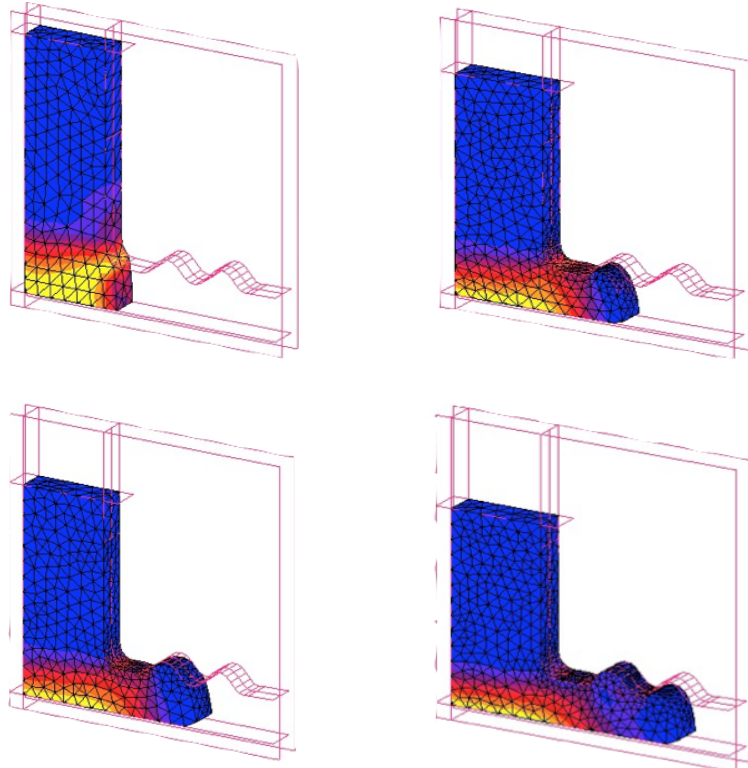




Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ
ΠΛΕΓΜΑΤΟΣΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ



ΓΙΩΡΓΟΣ ΣΟΥΠΙΩΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Τομέας Τεχνολογίας
των Κατεργασιών

Διπλωματική Εργασία

Αθήνα 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερας τον επιβλέποντα, για την εργασία, καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντας μου τη διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μανώλη Γκιθώνα για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές, τήν υπομονή του καθώς και την επικοινωνιακή συνεργασία κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

Γιώργος Σουπιώνης

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός τής διπλωματικής εργασίας είναι να δείξει πώς τα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών αναδημιουργούνται κατά τήν προσομοίωση κατεργασιών. Θα μελετηθεί πως λειτουργεί η αναδημιουργία πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων, η ανάγκη σε κατεργασίες διαμόρφωσης, ο τρόπος με τόν οποίο μπορεί να ελεγχθεί αλλά και θα εφαρμοστεί σε κάποιες κατεργασίες με τήν χρήση τών προγραμμάτων Msc.Marc και Ls-Dyna.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην διαδικασία τής προσομοίωσης και τα ωφέλει μιας τέτοιας εξέλιξης. Επίσης αναφέρονται τα βήματα τής διαδικασίας μίας ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και τέλος η κατεργασίες διαμόρφωσης που κατά τήν προσομοίωση τους χρειάζονται τήν λειτουργία τής αναδημιουργίας τού πλέγματος.

Στο 2^ο κεφάλαιο φαίνεται η χρονολογική πορεία τής αναδημιουργίας του πλέγματος και απο τι στοιχεία αποτελείτε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη, αναφέρονται οι λειτουργίες τής δημιουργίας και τής αναδημιουργίας τού πλέγματος και μία προσπάθεια να φανεί ο προγραμματισμός γύρω απο τήν αναδημιουργία. Επίσης, θα φανεί και η ανάγκη τής χρήσης τής αναδημιουργίας τού πλέγματος και τέλος οι παράμετροι και τα κριτήρια ελέγχου τής αναδημιουργίας τού πλέγματος στα προγράμματα Msc.Marc και Ls-Dyna.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται έτοιμα παραδείγματα για το κάθε πρόγραμμα ξεχωριστά και πώς παρουσιάζει το κάθε πρόγραμμα τήν λειτουργία τής αναδημιουργίας μέσα απο τα εγχειρίδια τους.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφεί σχεδίασης για τīs κατεργασίες τής συμπίεσης, επίπεδης έλασης και διέλασης αλλά και αναλυτικά η διαδικασία τής προσομοίωσης στα προγράμματα Msc.Marc και Ls-Dyna και για τīs τρεις κατεργασίες.

Τέλος στο 5^ο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα και εξάγονται τα συμπεράσματα για τόν χειρισμό τής λειτουργίας τής αναδημιουργίας τού πλέγματος από τα δύο προγράμματα και η ανάγκη χρήση τής λειτουργίας σε αυτές τής κατεργασίες.

ΠΕΡΙΕΧΩΜΕΝΑ

| | |
|--|------------------------------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ..... | 1 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 2 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ.... | 7 |
| 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 7 |
| 1.3 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ..... | 13 |
| 1.3.1 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ..... | 14 |
| 1.3.2 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ..... | 21 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 25 |
| 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 25 |
| 2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 28 |
| 2.2.1 ΤΡΙΓΩΝΙΚΑ..... | 28 |
| 2.2.2 ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΑ..... | 32 |
| 2.3 ΤΥΠΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 33 |
| 2.3.1 ΤΥΠΟΣ 157 (MSC.MARC)..... | 36 |
| 2.3.2 ΤΥΠΟΣ 13 (LS-DYNA)..... | 37 |
| 2.4 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ MESHING ΚΑΙ ΤΟΥ REMESHING..... | 38 |
| 2.4.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ..... | 39 |
| 2.4.2 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 40 |
| 2.4.3 ΑΝΑΔΟΜΗΣΗ ΚΟΡΥΦΩΝ ΚΑΙ ΑΚΜΩΝ ΤΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 41 |
| 2.4.5 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΑΚΜΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ..... | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| 2.4.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ..... | 45 |
| 2.4.7 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ..... | 46 |
| 2.5 Ο ΠΡΟΓΡΑΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΙΣΩ ΑΠΟ ΤΟ REMESHING..... | 47 |
| 2.6 ΑΝΑΓΚΗ ΧΡΗΣΗΣ REMESHING..... | 49 |
| 2.6.1 ΣΦΑΛΜΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ..... | 50 |
| 2.6.2 ΣΦΑΛΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 51 |
| 2.6.3 ΣΦΑΛΜΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 55 |
| 2.6.4 ΣΦΑΛΜΑ ΕΠΑΝΑΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗΣ (REZONING) ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 57 |
| 2.7 MSC.MARC ¹⁸ | 59 |
| 2.7.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC..... | 62 |
| 2.8 LS-DYNA..... | 66 |
| 2.8.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA..... | 68 |
| 2.8.1.1 ΕΝΤΟΛΗ CONTROL_ADAPTIVE..... | 68 |
| 2.8.1.2 ΕΝΤΟΛΗ CONTROL_REMESHING..... | 72 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ MSC.MARC ΚΑΙ LS-DYNA..... | 74 |

| | |
|---|-----|
| 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 74 |
| 3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ MSC.MARC | 75 |
| 3.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ LS-DYNA..... | 87 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ..... | 93 |
| 4.1 ΓΕΝΙΚΑ | 93 |
| 4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ SOLIDWORKS | 93 |
| 4.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ | 95 |
| 4.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΕΛΑΣΗΣ | 96 |
| 4.2.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΕΛΑΣΗΣ | 98 |
| 4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC..... | 100 |
| 4.4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC | 101 |
| 4.4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ | 101 |
| 4.4.1.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | 101 |
| 4.4.1.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ | 103 |
| 4.4.1.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΑΦΩΝ..... | 103 |
| 4.4.1.5 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 108 |
| 4.4.1.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | 110 |
| 4.4.1.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ | 112 |
| 4.4.1.8 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 118 |
| 4.4.1.9 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ..... | 119 |
| 4.4.1.10 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 122 |
| 4.4.1.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ..... | 124 |
| 4.4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC | 125 |
| 4.4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ | 125 |
| 4.4.2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | 126 |
| 4.4.2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ | 127 |
| 4.4.2.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΑΦΩΝ..... | 128 |
| 4.4.2.5 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 136 |
| 4.4.2.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | 137 |
| 4.4.2.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ | 140 |
| 4.4.2.8 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 146 |
| 4.4.2.9 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 147 |
| 4.4.2.10 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 150 |
| 4.4.2.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ..... | 153 |
| 4.4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΕΛΑΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC | 154 |
| 4.4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ | 154 |
| 4.4.3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | 155 |
| 4.4.3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ | 156 |
| 4.4.3.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΑΦΩΝ..... | 157 |
| 4.4.3.5 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 161 |
| 4.4.3.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | 163 |
| 4.4.3.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ | 165 |
| 4.4.3.8 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 171 |
| 4.4.3.9 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 172 |
| 4.4.3.10 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 174 |
| 4.4.3.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ..... | 178 |

| | |
|---|------------|
| 4.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA..... | 179 |
| 4.5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA | 180 |
| 4.5.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | 180 |
| 4.5.1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΚΑΙ ΚΟΜΒΩΝ..... | 184 |
| 4.5.1.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ | 188 |
| 4.5.1.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΜΒΟΛΟΥ | 191 |
| 4.5.1.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ | 193 |
| 4.5.1.7 ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΗ ΕΠΑΦΩΝ | 194 |
| 4.5.1.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΛΗΞΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 195 |
| 4.5.1.10 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ | 196 |
| 4.5.1.11 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 197 |
| 4.5.1.12 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 198 |
| 4.5.1.13 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 199 |
| 4.5.1.14 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 201 |
| 4.5.1.15 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ..... | 203 |
| 4.5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA | 205 |
| 4.5.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | 205 |
| 4.5.2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΚΑΙ ΚΟΜΒΩΝ..... | 206 |
| 4.5.2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ | 207 |
| 4.5.2.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΑΟΥΛΩΝ..... | 208 |
| 4.5.2.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ | 210 |
| 4.5.2.6 ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΗ ΕΠΑΦΩΝ | 211 |
| 4.5.2.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | 211 |
| 4.5.2.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΛΗΞΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 212 |
| 4.5.2.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ..... | 213 |
| 4.5.2.10 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 214 |
| 4.5.2.11 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 215 |
| 4.5.2.12 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 216 |
| 4.5.2.13 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 219 |
| 4.5.2.14 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ..... | 222 |
| 4.5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΕΛΑΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA..... | 223 |
| 4.5.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | 223 |
| 4.5.3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΚΑΙ ΚΟΜΒΩΝ..... | 225 |
| 4.5.3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ | 228 |
| 4.5.3.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΜΒΟΛΟΥ | 229 |
| 4.5.3.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ | 230 |
| 4.5.3.6 ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΗ ΕΠΑΦΩΝ | 231 |
| 4.5.3.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | 232 |
| 4.5.3.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΛΗΞΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 233 |
| 4.5.3.10 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ | 234 |
| 4.5.3.11 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 235 |
| 4.5.3.12 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 236 |
| 4.5.3.13 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 237 |
| 4.5.3.14 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 239 |
| 4.5.3.15 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ..... | 242 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 243 |
| 5.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 243 |

| | |
|---|------------|
| 5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 244 |
| 5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 244 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 246 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο | 246 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο | 246 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

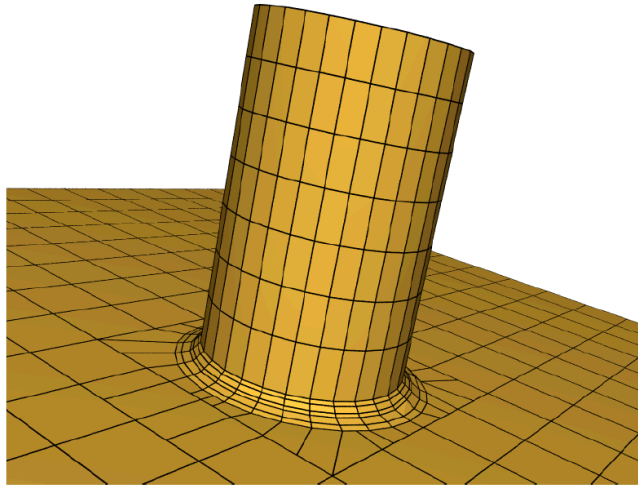
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η εξέλιξη στους υπολογιστές είναι ραγδαία. Σε όλους τους τομείς, για την πιο απλή εργασία, χρησιμοποιείται ένας υπολογιστής. Αυτό πριν από χρόνια ήταν αδιανόητο, σήμερα έχει γίνει καθημερινότητα. Δεδομένου ότι η πρόοδος της τεχνολογίας των πληροφοριακών συστημάτων αναπτύσσει την αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής από ένα κείμενο σε ένα γραφικό περιβάλλον, η μοντελοποίηση και η προσομοίωση έχει κερδίσει την προσοχή τόσο της βιομηχανίας όσο και της έρευνας. Η μοντελοποίηση είναι η τεχνική που χρησιμοποιούμε για να απεικονίσουμε ένα αντικείμενο σε έναν υπολογιστή. Μεγάλο μέρος της σύγχρονης μοντελοποίησης βρίσκεται στο να περιγράψει κανείς εύκολα πολύπλοκα σχήματα με απλές ρυθμίσεις. Η μοντελοποίηση είναι ένα πρωτεύον συστατικό στους παρακάτω τομείς στο computer design, στην παραγωγή (CAD / CAM) συστημάτων, στα γραφικά υπολογιστών, στα animation, στην προσομοίωση, στην ρομποτική, στις κατεργασίες υλικών και σε πολλούς άλλους τομείς. Προϋπόθεση σε οποιονδήποτε από αυτούς τους τομείς είναι με πόση λεπτομέρεια μπορούμε να δημιουργήσουμε τα γεωμετρικά μοντέλα.

Οι ανωτέρω εκτιμήσεις οδήγησαν σε μια σειρά από παραμέτρους για την διεξαγωγή της μοντελοποίησης όπως οι καμπύλες και επιφάνειες Bezier*, το B - splines, NURBS και πολυγωνικά πλέγματα (meshes). Το τριγωνικό και το τετραγωνικό πλέγμα είναι πρότυπο στις περισσότερες εφαρμογές λόγω της απλότητάς και της υποστήριξης από πολλά προγράμματα.

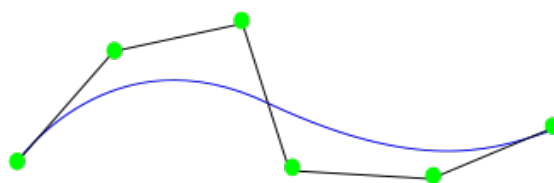
Ένα πλέγμα μπορεί να παραχθεί σε ένα μοντέλο που σχεδιάσαμε ή μπορεί να προσεγγίζει ένα πραγματικό αντικείμενο που συνελήφθη με σύγχρονες συσκευές ψηφιοποίησης. Η αυξανόμενη δημοτικότητα της δημιουργίας πλέγματος είναι λόγω της απλότητάς του, αυτό το καθιστά κατάλληλη επιλογή σε μια σειρά από πλαίσια εφαρμογής του όπως:

- Γρήγορη Προτύπωση: Ο παγκόσμιος ανταγωνισμός ωθεί τους κατασκευαστές να μειώσουν σημαντικά το μήκος του κύκλου παραγωγής του προϊόντος, και η δημιουργία φυσικών πρωτοτύπων από CAD μοντέλα γίνεται όλο και πιο συνηθισμένη. Συνέπεια, τα περισσότερα πακέτα μοντελοποίησης περιλαμβάνουν μεθόδους για τη μετατροπή του μοντέλου σε ένα σύνολο γεωμετρικών σχημάτων που ορίζει ο χειριστής (meshing).

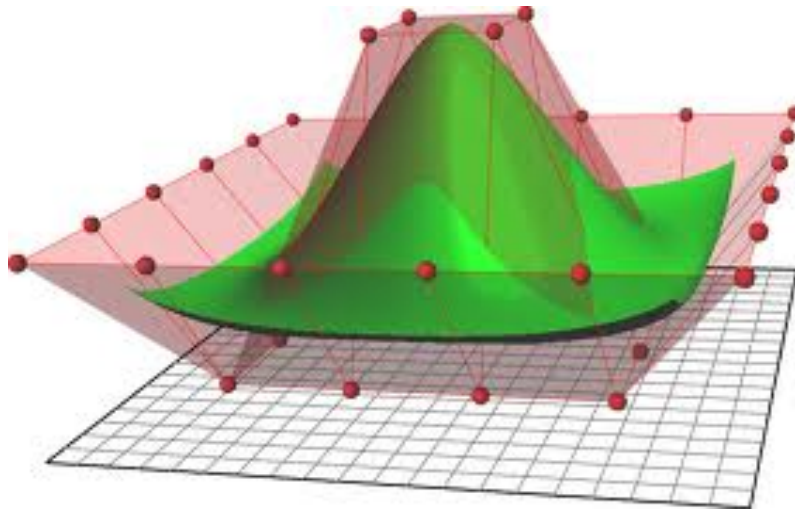


Σχήμα 1. 1 Απεικόνιση τρισδιάστατης επιφάνειας με τετραεδρικό πλέγμα (meshing)

- Μοντελοποίηση: Τα περισσότερα από τα προγράμματα CAD είναι προσαρμοσμένα για να δημιουργούν πολυγωνικά πλέγματα, με περαιτέρω βελτιστοποιήσεις για τα τριγωνικά και τετραγωνικά πλέγματα, λόγω ευκολίας χρήσης τους. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, η τάση για ένα σύγχρονο λογισμικό προσομοίωσης είναι να περιλαμβάνουν μεθόδους για τη δημιουργία πλέγματος για την προσέγγιση των μοντέλων που έχουν σχεδιαστεί. Ακόμη και αν αυτό το χαρακτηριστικό δεν περιλαμβάνεται ρητά, το γραφικό υποσύστημα εκτελεί συχνά μια τέτοια μετατροπή αυτόματα, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του (remeshing).
- Ανάλυση Μοντελοποίησης: Χάρη στην έρευνα για βελτίωση του πλέγματος η μοντελοποίηση σε τρισδιάστατα σχήματα χρησιμοποιώντας υποδιαιρούμενες επιφάνειες αποδεικνύεται ότι είναι πιο εύκολη από τη χρήση NURBS σε μεμονωμένα σημεία στο μοντέλο.
- Ανάστροφη Μηχανική: Η ανάπτυξη μεθόδων για την καταγραφή τρισδιάστατων μοντέλων οδήγησαν σε ένα νέο πρότυπο για την μοντελοποίηση, αντί να δημιουργηθεί ένα εντελώς νέο μοντέλο, ένας σχεδιαστής μπορεί να τροποποιήσει το ήδη υπάρχον μοντέλο που προέρχεται από τρισδιάστατη ψηφιοποίηση. Στην περίπτωση αυτή, η δημιουργία πλέγματος βοηθάει τον μηχανικό στην λεπτομέρεια του μοντέλου κατά την κατεργασία .



Σχήμα 1. 2 Απεικόνιση καμπύλης με χρήση NURBS



Σχήμα 1.3 Απεικόνιση τρισδιάστατης επιφάνειας με χρήση NURBS

Τα ωφέλει μιας τέτοιας εξέλιξης δεν είναι μόνο τεχνολογικά είναι και οικονομικά γιατί το λόγω παρουσιάζεται μεγάλο βιομηχανικό και ακαδημαϊκό ενδιαφέρον και μελετούνται εκτενώς. Στον τομέα των κατεργασιών υπάρχει ένας βαθμός πολυπλοκότητας διότι υπάρχει ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων, που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας, που διαφοροποιούν το αποτέλεσμα. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα γιατί σε κάθε πείραμα δεν είναι δυνατόν να διατηρήσει κάποιος τις ίδιες παραμέτρους και αυτό κάνει τα πειράματα μη συγκρίσιμα μεταξύ τους. Έτσι η χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων μας βοηθάει, με την προσομοίωση, να προσεγγίσουμε με ακρίβεια την φυσική λύση, πρόκειται για μια σύντομη αναπαράσταση μιας διαδικασίας που σκοπό της έχει να συνδέσει το αίτιο με το αποτέλεσμα.

Για την εξέλιξη αυτών των προγραμμάτων οι ερευνητές ήρθαν αντιμέτωποι με πολλά νέα προβλήματα στην διαδικασία της ανάλυσης για την δημιουργία πλέγματος (meshing) και την αναδιαμόρφωση του (remeshing). Πριν ερευνήσουμε την αναδιαμόρφωση του πλέγματος (remeshing), είναι χρήσιμο να αναφέρουμε πώς δημιουργούνται τα πλέγματα (meshes) και την ανάγκη του στις κατεργασίες κοπής και διαμόρφωσης. Ίσως το πιο κοινό πλέγμα είναι το τριγωνικό. Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα του τριγωνικού πλέγματος είναι ότι μεγιστοποιεί τις ελάχιστες γωνίες όλων των τριγώνων στο πλέγμα, και ως εκ τούτου έχει την τάση να αποφευχθεί η δημιουργία πολύ λεπτών τριγώνων στο πλέγμα. Ευρέως όμως χρησιμοποιούνται τα τετράπλευρα λόγω αντοχής και ευελιξίας.

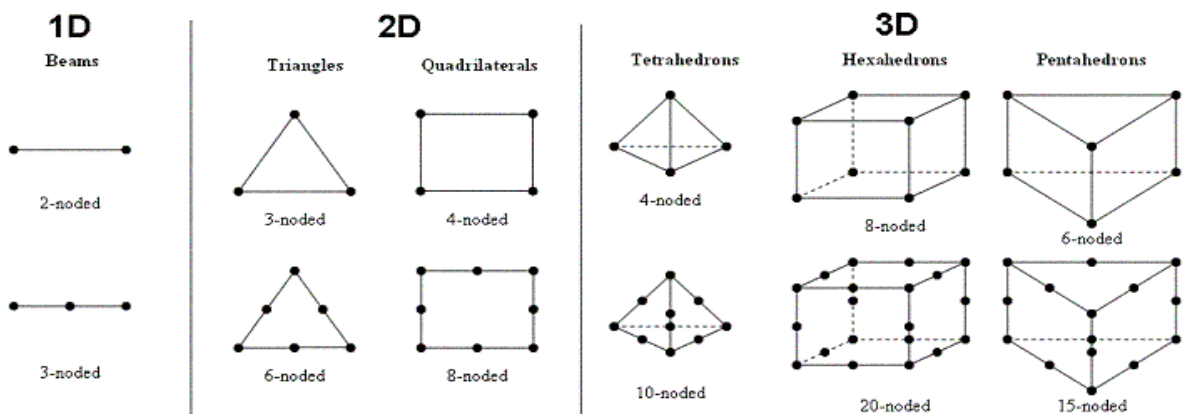
Η δημιουργία του πλέγματος βασίζεται στην Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων με την οποία παράγονται ταυτόχρονα πολλές αλγεβρικές σχέσεις οι οποίες επιλύονται αυτόματα από το εκάστοτε πρόγραμμα. Από τα μεγαλύτερα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων είναι τα Marc, LS-Dyna, NASTRAN, ANSYS, ABAQUS και το DEFORM 3D. Αυτά τα

προγράμματα χρησιμοποιούν και την λειτουργία της αναδιαμόρφωσης πλέγματος (remeshing) που αναλύουμε στην παρούσα εργασία .

1.2 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αναζητούνται προσεγγιστικές λύσεις, αρχικά μέσω της σύνθεσης ενός μοντέλου (model) που περιλαμβάνει τα κύρια χαρακτηριστικά του προβλήματος και ακολούθως, του χωρισμού του πεδίου (δηλαδή τμήμα ενός ρευστού σε προβλήματα ρευστομηχανικής , ένα τμήμα δοκιμίου σε προβλήματα κατεργασιών κλπ.) σε μικρά στοιχεία που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements). Εντός κάθε τέτοιου στοιχείου μια απλή συνάρτηση (συνήθως ένα μικρού βαθμού πολυώνυμο) θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την κατανομή των ζητούμενων μεταβλητών. Τα στοιχεία αυτά ενώνονται σε σταθερά σημεία εντός του πεδίου που καλούνται κόμβοι (nodes) συνθέτοντας τη διακριτοποίηση (meshing).

Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων με την χρήση συστήματος πολυωνυμικών παρεμβολών. Κατά την επίλυση οι πολυωνυμικές καμπύλες μπορούν να αναπαρασταθούν από έναν αριθμό σημείων, με αυτόν τον τρόπο η επίλυση γίνεται μόνο πάνω στα σημεία, γνωστά και ως κόμβοι (nodes). Μια γραμμική πολυωνυμική καμπύλη απαιτεί δύο σημεία ενώ μια τετραγωνική τρία σημεία . Αυτό που θέλουμε είναι η μείωση των σημειακών μερικών εξισώσεων σε μια μορφή πεπερασμένων στοιχείων αυτό επιτυγχάνεται με την μέθοδο Galerkin.



Σχήμα 1. 4 Μορφή πεπερασμένων στοιχείων σε μονοδιάστατη , δισδιάστατη και τρισδιάστατη μορφή

Η επιλογή των χαρακτηριστικών που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο, της μορφής και του πλήθους των πεπερασμένων στοιχείων και της συνάρτησης που προσεγγίζει την άγνωστη κατανομή στο εσωτερικό τους, επηρεάζει την ακρίβεια της προσέγγισης και

συνεπώς καθορίζει την ποιότητα της προσομοίωσης. Εξάλλου, καθώς η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία γίνεται αποκλειστικά με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή λόγω του μεγάλου πλήθους των απαιτούμενων αριθμητικών υπολογισμών, ο προσεκτικός καθορισμός των ανωτέρω παραμέτρων επιδρά καταλυτικά και στην ταχύτητα εξεύρεσης των λύσεων και είναι απαραίτητος για την επίτευξη ισορροπίας ανάμεσα στην επιθυμητή ακρίβεια και τον απαραίτητο υπολογιστικό χρόνο.

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι συχνά μια επαναληπτική διαδικασία, τυπικά αποτελούμενη από τα εξής βήματα:

- Το πρώτο βήμα αφορά στην αναγνώριση του προβλήματος και των βασικών φυσικών φαινομένων που το επηρεάζουν. Καθορίζεται αρχικά η κατηγορία του (π.χ. ως πρόβλημα στερεού σώματος, κίνησης ρευστού, θερμοδυναμικής κλπ.). Συχνά ένα περίπλοκο πρόβλημα είναι δυνατόν να ανήκει σε περισσότερες από μια κατηγορίες αφού φυσικά φαινόμενα αλληλεπιδρούν κατά την διεξαγωγή του πειράματος.
- Το δεύτερο βήμα είναι η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία που προσομοιώνει την πραγματικότητα απλοποιώντας την μέσω της κατασκευής ενός μοντέλου. Μπορούμε, για παράδειγμα, μέσω του μοντέλου να αγνοήσουμε κάποιες λεπτομέρειες στη γεωμετρία, να εξιδανικεύσουμε το υλικό του (αντιμετωπίζοντάς το π.χ. ως ομογενές, ισότροπο ή ελαστικό) ή τις συνθήκες στήριξης του δοκιμίου έχοντας έτσι τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε απλές θεωρίες που περιγράφουν τη συμπεριφορά του. Οι απλοποιήσεις αυτές μαζί με τις θεωρίες ανάλυσης που εφαρμόζουμε συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο (mathematical model) ενός προβλήματος. Είναι προφανές ότι, λόγω των παραπάνω παραδοχών, η μοντελοποίηση εισάγει αποκλίσεις από την πραγματικότητα, γνωστές και ως σφάλματα μοντέλου (modeling errors).
- Το τρίτο βήμα είναι η διακριτοποίηση του μοντέλου χωρίζοντας το σε ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (finite element mesh) με ιδεατές ευθείες, καμπύλες ή επιφάνειες (δημιουργία πλέγματος). Όπως αναφέραμε, η μορφή της κατανομής των άγνωστων μεγεθών εντός των στοιχείων προσεγγίζεται από μια απλή συνάρτηση, καθώς ωστόσο η πραγματική κατανομή είναι διαφορετική, εισάγονται περεταίρω σφάλματα, τα σφάλματα διακριτοποίηση (discretization errors).
- Στο τέταρτο βήμα συνήθως πριν την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι

επιθυμητή μια προκαταρκτική ανάλυση με συμβατικά μέσα. Πραγματοποιείται για να αποφευχθούν χονδροειδή σφάλματα αλλά και για μια πρώτη εκτίμηση της τάξης μεγέθους και μιας αδρής προσέγγισης της κατανομής των άγνωστων ποσοτήτων (που ενδεχομένως να οδηγήσουν σε βελτίωση του μοντέλου).

- Το πέμπτο βήμα συνίσταται στη χρήση ενός προγράμματος ή κώδικα ηλεκτρονικού υπολογιστή και περιλαμβάνει:
 - την προεπεξεργασία (preprocessing): κατά την οποία εισάγεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή το μοντέλο, δηλαδή η μορφή του, οι δράσεις σε αυτό, τα χαρακτηριστικά του υλικού (π.χ. το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson) και οι συνθήκες στήριξης του ανάλογα την κατεργασία. Στη συνέχεια επιλέγεται το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν και το μοντέλο διακριτοποιείται (συνήθως αυτόματα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή).
 - την επεξεργασία ή ανάλυση (processing): όπου συντελείται η αριθμητική επίλυση, υπολογίζονται τα άγνωστα μεγέθη στους κόμβους του δικτύου ή σε ενδιάμεσα ζητούμενα σημεία.
 - μετεπεξεργασία (post processing): κατά την οποία εμφανίζονται (συνήθως και γραφικά με τη βοήθεια χρωματικής κλίμακας) τα αποτελέσματα της ανάλυσης με στόχο την αξιολόγησή τους, τον έλεγχο των αντοχών κλπ.
- Στο έκτο βήμα ελέγχεται η συμβατότητα των αποτελεσμάτων με τη φύση του προβλήματος, με τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής ανάλυσης και συχνά με τη διαίσθηση του μελετητή. Εάν δεν είναι ικανοποιητική ή εάν η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν είναι η επιθυμητή, αναθεωρείται το μοντέλο ή και η διακριτοποίηση του και η ανάλυση επαναλαμβάνεται.

Όπως είναι εμφανές από τα παραπάνω η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια ισχυρή μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση προβλημάτων οριακών συνθηκών. Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε από τους μηχανικούς στην προσπάθειά τους να λύσουν δύσκολα προβλήματα αεροναυπηγικής, κατεργασιών, κατασκευών, ρευστομηχανικής και πολλά άλλα προβλήματα δύσκολης προσέγγισης. Το remeshing

βοηθάει για να επιτευχθεί η βέλτιστη ανάλυση μίας φυσικής λύσης αυτών των προβλημάτων. Το remeshing βρίσκεται στο βήμα της προεπεξεργασίας (preprocessing) όπου εκεί ορίζουμε τα κριτήρια και της παραμέτρους που θα λάβουμε υπόψη μας για το βέλτιστο επιθυμητό αποτέλεσμα.

1.3 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Με τον όρο κατεργασία εννοείται κάθε μεταβολή και διαμόρφωση που γίνεται στην πρώτη ύλη για την παραγωγή ενός προϊόντος. Η αξία του προϊόντος καθορίζεται από το κόστος τον χρόνο και την ποιότητα παραγωγής. Σήμερα πολύ σημαντικό ρόλο έχουν και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε εφαρμογής στην βιομηχανία, με αποτέλεσμα οι επιπτώσεις αυτές να συνδέονται άμεσα με την αξία του προϊόντος. Οι κατεργασίες γίνονται εν ψυχρώ ή εν θερμό με αφαίρεση ή όχι του υλικού και δίνουν συγκεκριμένη μορφή στην προσεχόμενη πρώτη ύλη, σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Οι κατεργασίες μετάλλων ή ελαστομερών υλικών πετυχαίνονται με ειδικές εργαλειομηχανές και εργαλεία. Οι εργαλειομηχανές εργάζονται παραμορφώνοντας το τεμάχιο (αερόσφυρες, πρέσες κλπ.) ή με αφαίρεση υλικού (τόρνος, φρεζομηχανές κλπ).

Η πρόοδος της βιομηχανίας στον τομέα των κατεργασιών οφείλεται στην συνεχή διερεύνηση της βέλτιστης λύσης. Η βέλτιστη λύση πρέπει να συνδυάζει το χαμηλό κόστος και τον μειωμένο χρόνο, σημαντικό ρόλο λοιπόν παίρνει η διαδικασία της προσομοίωσης σε Η/Υ. Με την διαδικασία της προσομοίωσης και της ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διεξάγεται μια συνεχής έρευνα για την προσέγγιση της φυσικής λύσης. Στον τομέα των κατεργασιών είναι πλέον ένα απαραίτητο εργαλείο για κάθε είδους κατεργασίας.

Σαν λειτουργία το remeshing, στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, βοηθάει στην καλύτερη προσέγγιση της επιθυμητής λύσης και στην ανάλυση της. Παρακάτω παρουσιάζεται ποιές κατεργασίες κοπής και διαμόρφωσης που αναλύονται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έχουν ανάγκη της χρήσης του remeshing για να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση. Θα εξεταστεί σε κάθε περίπτωση η ανάγκη της εφαρμογής του και ο τρόπος βελτίωσης της ανάλυσης με την χρήση του.

Η αριθμητική προσομοίωση στις κατεργασίες κοπής και διαμόρφωσης απαιτεί μια προηγμένη μοντελοποίηση αλλά και ανάλυση. Η μοντελοποίηση αυτή και η ανάλυση έχουν βοηθήσει σημαντικά για την αποφυγή ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων, όπως όγκιμες βλάβες, στον τομέα των κατεργασιών. Για να αποφευχθούν μεγάλες στρεβλώσεις του πλέγματος, της αριθμητικής προσομοίωσης, κατά την κατεργασία, λόγω της μεγάλης πλαστικής παραμορφώσεως, το πλέγμα πρέπει να προσαρμοστεί. Η πυκνότητα του πλέγματος πρέπει

να ελέγχεται ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα υπολογισμού σε συνδυασμό με την ποιότητα της φυσικής λύσης και αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση του remeshing.

1.3.1 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Οι κατεργασίες διαμόρφωσης είναι μια διαδικασία καταπόνησης υλικών με αποτέλεσμα την πλαστική παραμόρφωση με την διατήρηση της μάζας τους. Οι κατεργασίες διαμόρφωσης διακρίνονται σε κατεργασίες συμπαγούς υλικού και επίπεδου ελάσματος.

Οι κατεργασίες συμπαγούς υλικού είναι οι εξής :

- Σφυρηλάτηση
- Έλαση
- Διέλαση
- Ολκή

Ενώ οι κατεργασίες επίπεδου ελάσματος χωρίζονται σε:

- Κάμψης
- Απότμησης
- Βαθείας κοίλανσης

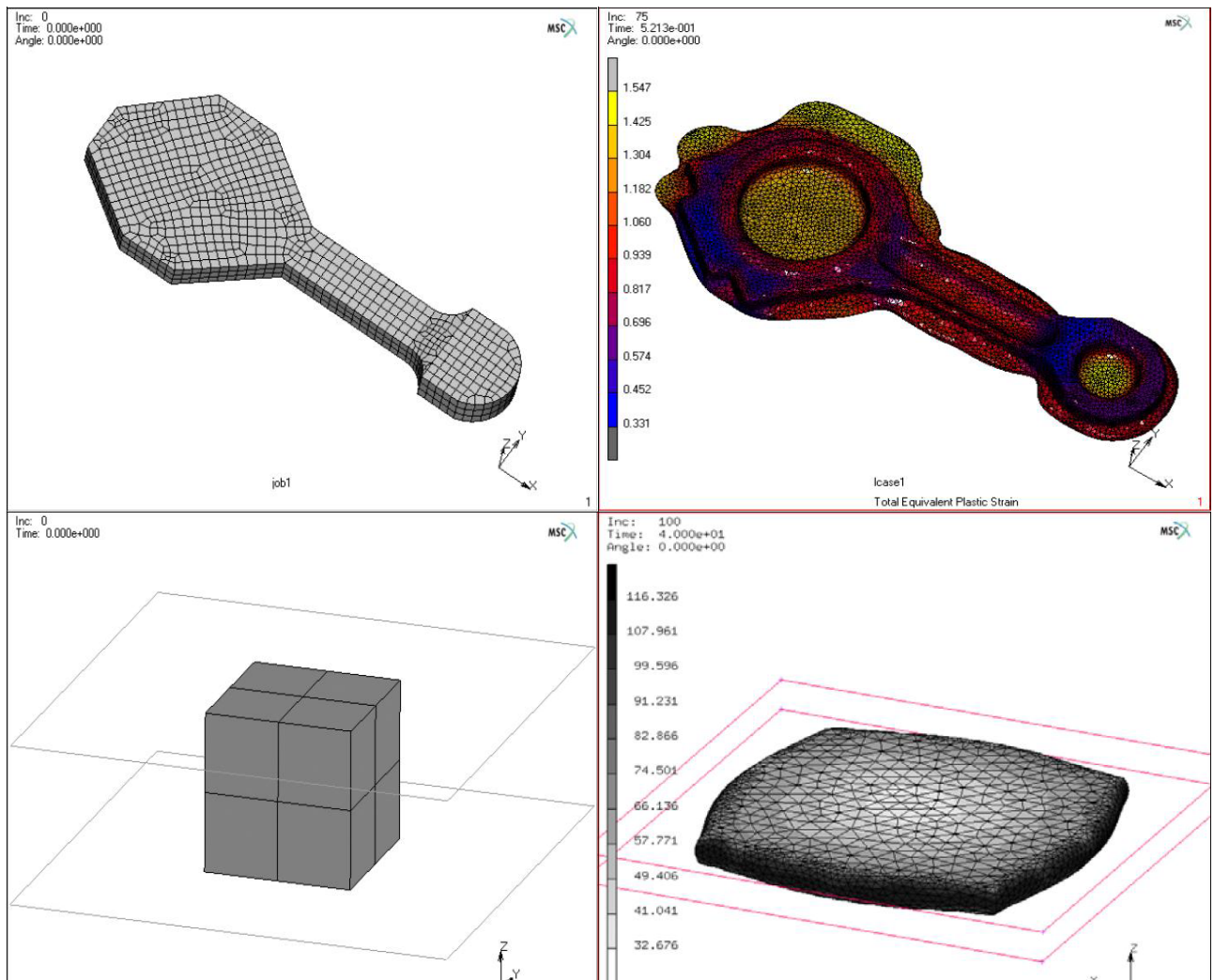
Σε μία ανάλυση κατεργασίας μετάλλων ή ελαστομερών το τεμάχιο μορφοποιείται από ένα αρχικό σχήμα σε ένα τελικό, πολύ συχνά, πολύπλοκο σχήμα. Κατά την κατεργασία οι παραμορφώσεις πιθανολογείται να είναι πολύ μεγάλες και το πλέγμα να καταστραφεί και η ανάλυση να μην προχωράει χωρίς την χρήση κάποιων ειδικών τεχνικών. Σήμερα το remeshing είναι ένα χαρακτηριστικό για να ξεπερνιούνται τέτοιου είδους δυσκολίες

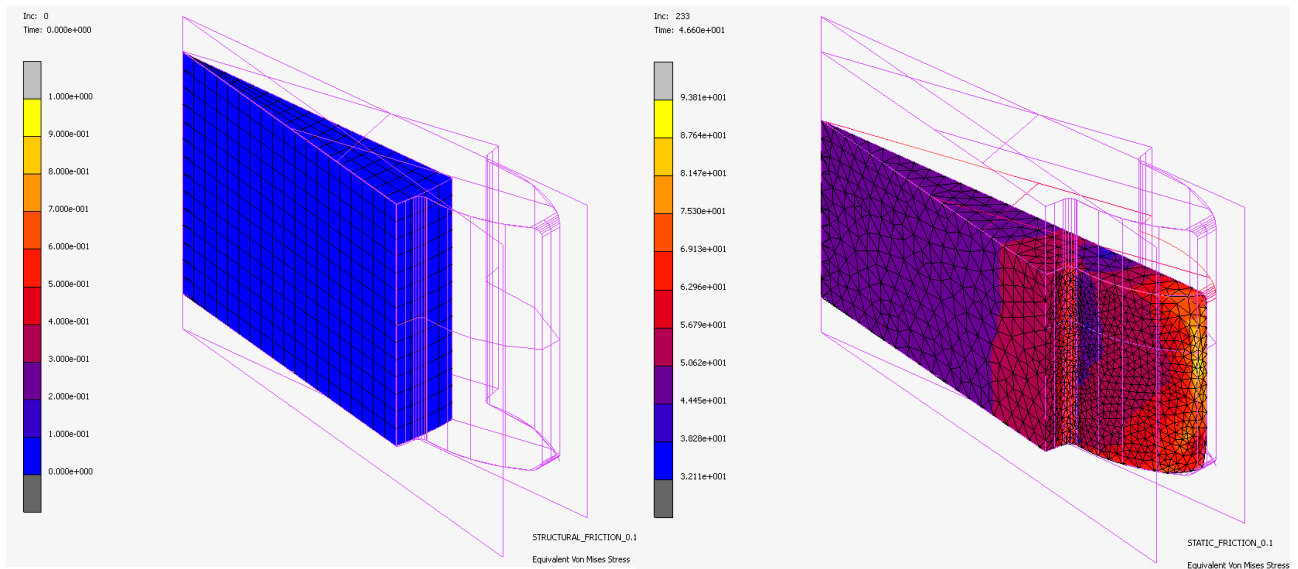
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει εξελιχθεί σε ένα αποτελεσματικό και ευέλικτο εργαλείο στην προσομοίωση διότι μπορεί να απεικονίσει αλλά και να χειριστεί κανείς πολύπλοκες γεωμετρίες και οριακές συνθήκες με ακρίβεια. Η κατεργασίες διαμόρφωσης μπορεί να παράξουν προϊόντα υψηλής αντοχής με βέλτιστη ποιότητα επιφάνειας χωρίς την απομάκρυνση υλικού. Καθώς η παραγωγή και η ζήτηση πολύπλοκων, γεωμετρικά, προϊόντων αυξάνεται, η αριθμητική προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία θεωρείται ως βασικό μέρος για τον σχεδιασμό αυτών των προϊόντων. Η αριθμητική προσομοίωση απαιτεί διακριτοποίηση του συνόλου σε υποσύνολα, ένα σημαντικό μέρος της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η αποδοτική παραγωγή των αδόμητων πλεγμάτων με υψηλή ποιότητα, λόγω της φύσης των κατεργασιών διαμόρφωσης, ένα αρχικό τεμάχιο υποβάλλεται σε μεγάλη παραμόρφωση μεταξύ των δύο μήτρων, εργαλείο-καλούπι. Ειδικότερα, τα στοιχεία

που βρίσκονται σε επαφή με τις μήτρες υποβάλλονται σε υψηλή παραμόρφωση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ένα υπολογιστικό λάθος, και σε ακραίες περιπτώσεις, να διακοπεί η περαιτέρω ανάλυση γι'αυτό το λόγω το remeshing μας βοηθάει στην ανάλυση αναδιαμορφώνοντας το πλέγμα και αποφεύγοντας την διακοπή της. Παρακάτω θα δείξουμε την ανάγκη της χρήσης remeshing στις κατεργασίες διαμόρφωσης για καλύτερα υπολογιστικά αποτελέσματα.

1.3.1.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

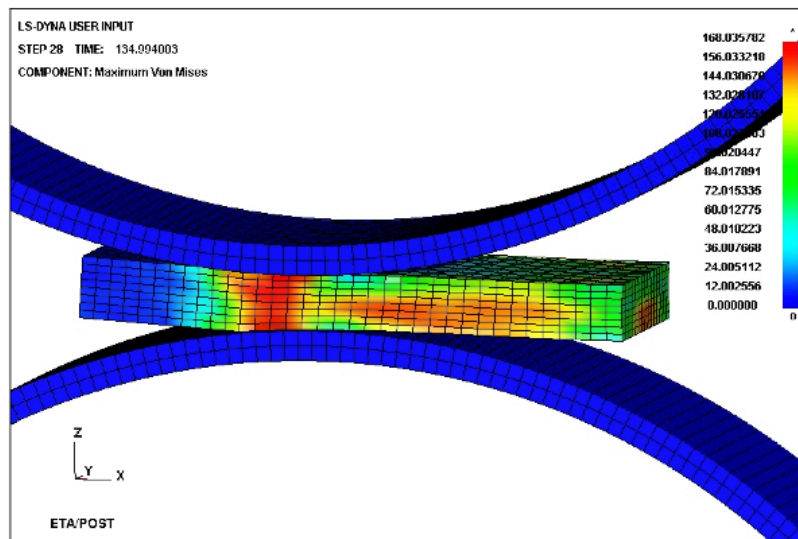
Η κατεργασία της σφυρηλάτησης δίνει στο κατεργαζόμενο υλικό την δυνατότητα να υποστεί πλαστική παραμόρφωση χωρίς αστοχία, διότι το υλικό βρίσκεται ανάμεσα στο έμβολο και την μήτρα και διατηρεί την μάζα του. Η κατεργασία σφυρηλάτησης ταξινομείται σε ανοικτής και κλειστής μήτρας κατεργασία όπου και στις δύο αυτές κατηγορίες η σφυρηλάτηση μπορεί να γίνει εν ψυχρό ή εν θερμό. Στην σφυρηλάτηση το remeshing είναι απαραίτητο λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων που δέχεται το τεμάχιο, λόγω πίεσης, αλλά και την αύξηση της θερμοκρασίας στην διάρκεια της κατεργασίας. Με την ελεγχόμενη αναδιαμόρφωση του πλέγματος ο χειριστής καταφέρνει μια πιο ακριβής προσέγγιση της επιθυμητής λύσης.





Σχήμα 1. 5 Παραδείγματα σφρηλάττησης με χρήση remeshing

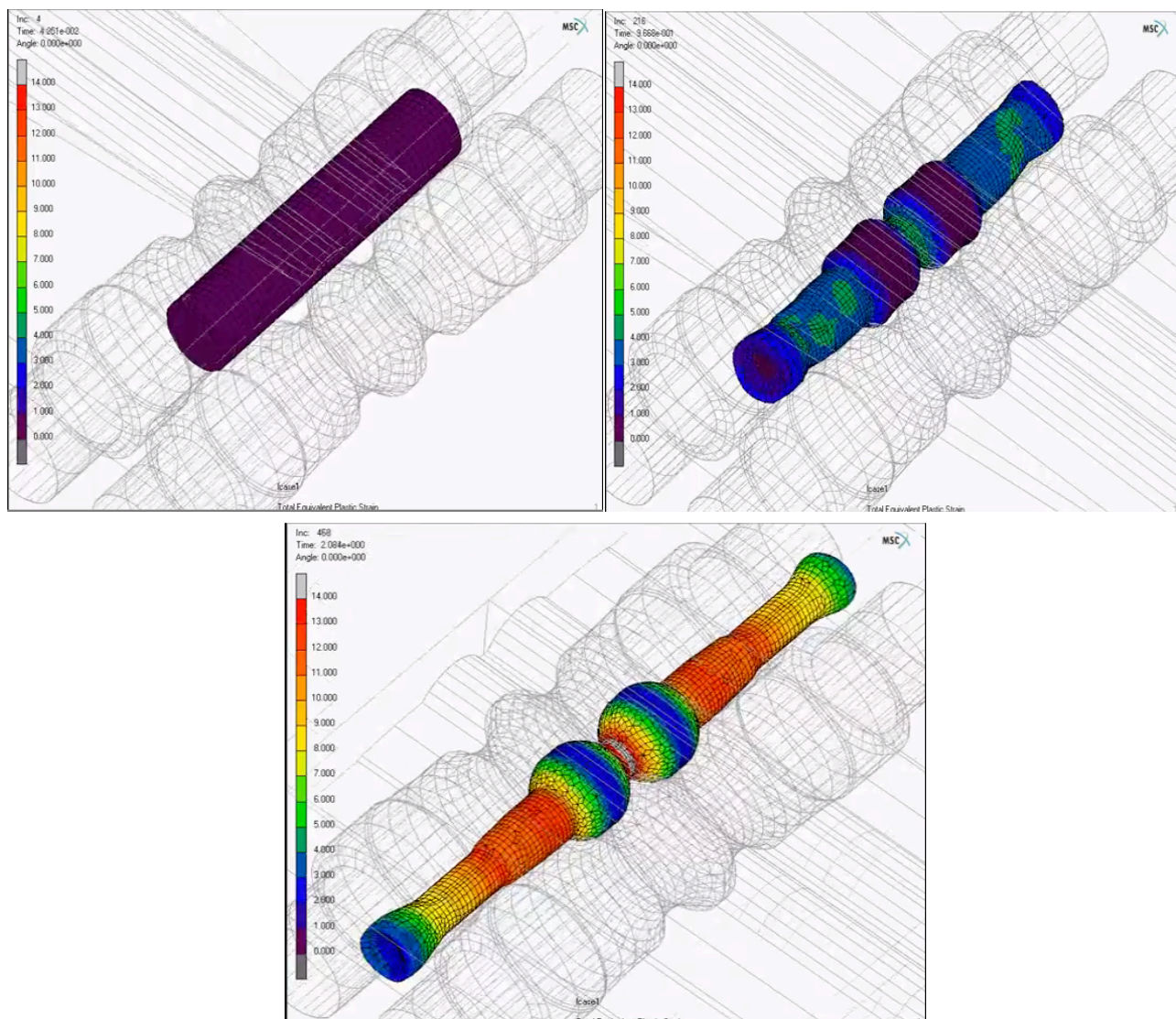
1.3.1.2 ΕΛΑΣΗ



Σχήμα 1. 6 Παράδειγμα έλασης

Κατά την κατεργασία της έλασης, το υλικό υπό τη μορφή πλάκας ή ράβδου εισέρχεται, λόγω τριβής, μέσα στο διάκενο δύο αντίθετα περιστρεφόμενων ραούλων. Εκεί υπόκειται σε θλιπτικά φορτία που του προκαλούν πλαστική παραμόρφωση. Παρατηρείται μείωση της διατομής του και επιμήκυνση κατά τη διεύθυνση της έλασης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναλαμβάνεται διαδοχικά με σταδιακή μείωση της διατομής, μέχρι να προκύψει το τελικό προϊόν. Επίσης και αυτή η κατεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί εν ψυχρό ή εν θερμό. Μεγαλύτερες μειώσεις διατομής πραγματοποιούνται με τη θερμή έλαση, κατά την οποία το υλικό βρίσκεται σε θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης. Η πρόσδωση της τελικής μορφής και

διάστασης δίνεται με ψυχρή έλαση στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το remeshing στην έλαση βοηθάει στον έλεγχο της κατανομής πίεσης στο τεμάχιο αλλά και σε περαιτέρω ανάλυση για τον έλεγχο της τελικής του μορφής.

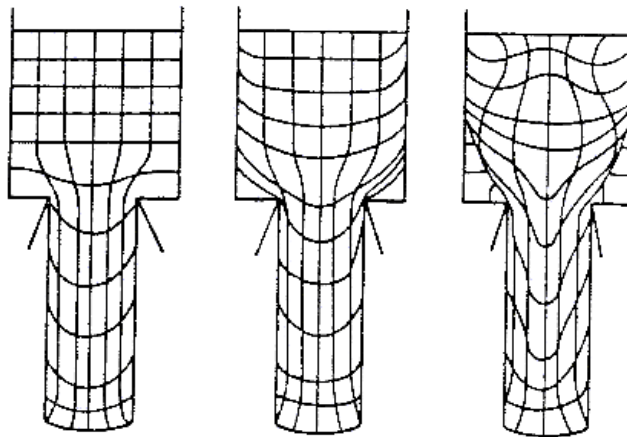


Σχήμα 1. 7 Παράδειγμα κυλινδρικής έλασης

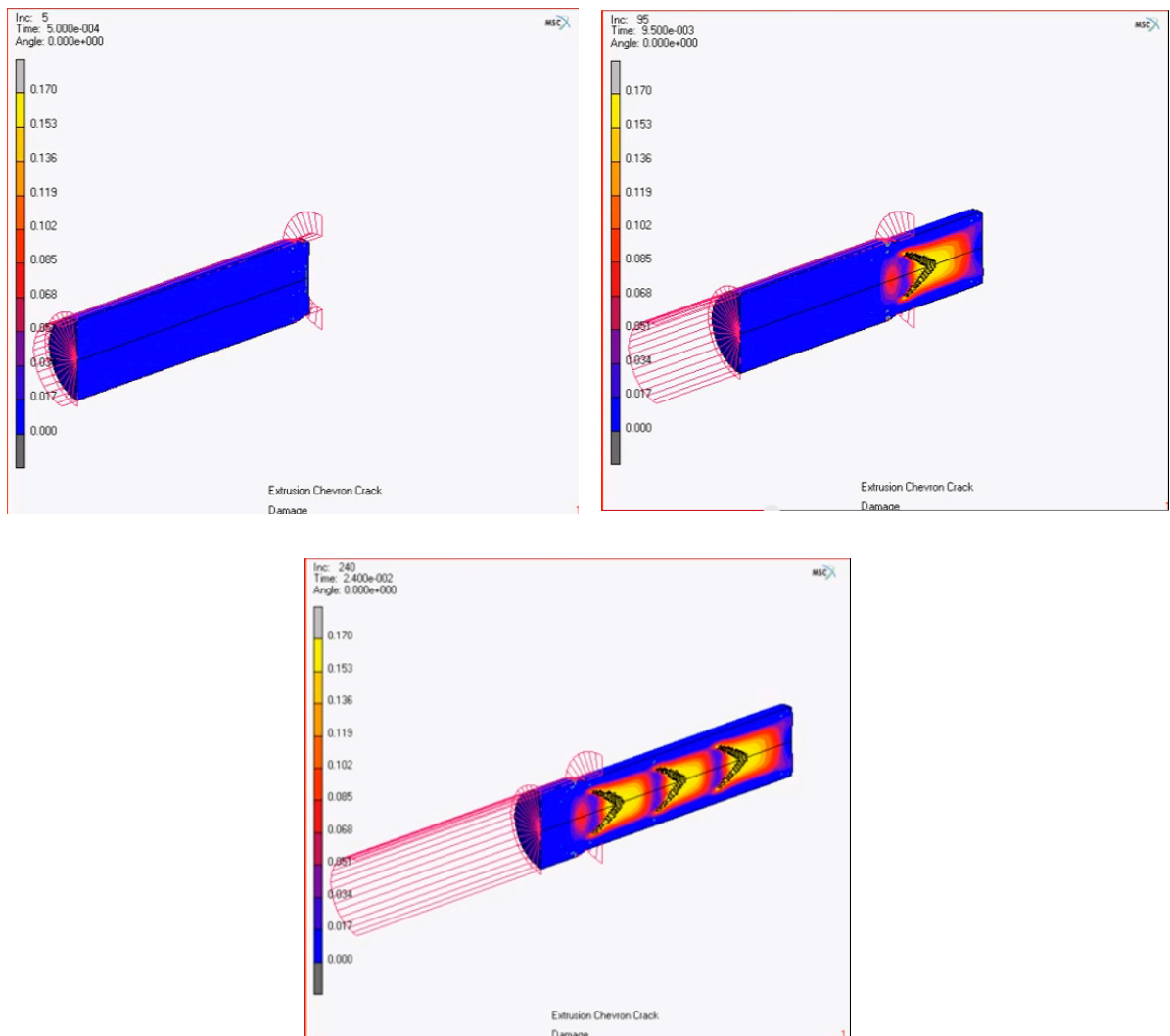
1.3.1.3 ΔΙΕΛΑΣΗ

Κατά τη διέλαση (extrusion) το τεμάχιο συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου μέσα σε μεταλλικό θάλαμο, στο άλλο άκρο του οποίου ευρίσκεται κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα, και αναγκάζεται να εξέλθει από το άνοιγμα της μήτρας αποδίδοντας προϊόν με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος. Η χρησιμοποιούμενη εργαλειομηχανή για την εκτέλεση της διέλασης είναι πρέσα, συνήθως υδραυλική και οριζόντια για τη θερμή διέλαση και κατακόρυφη για την ψυχρή διέλαση. Λόγω της φύσης αυτής της κατεργασίας μεταβάλλοντας τον όγκο του τεμαχίου εξέρχοντας από μία μικρής διατομής οπή η χρήση του remeshing είναι αναγκαία διότι το πλέγμα δέχεται σοβαρές παραμορφώσεις ακόμα και ρήξεις. Ελέγχοντας την

αναδιαμόρφωση του πλέγματος σε κάθε βήμα η ανάλυση μπορεί να ολοκληρωθεί χωρίς σοβαρές αποκλίσεις.



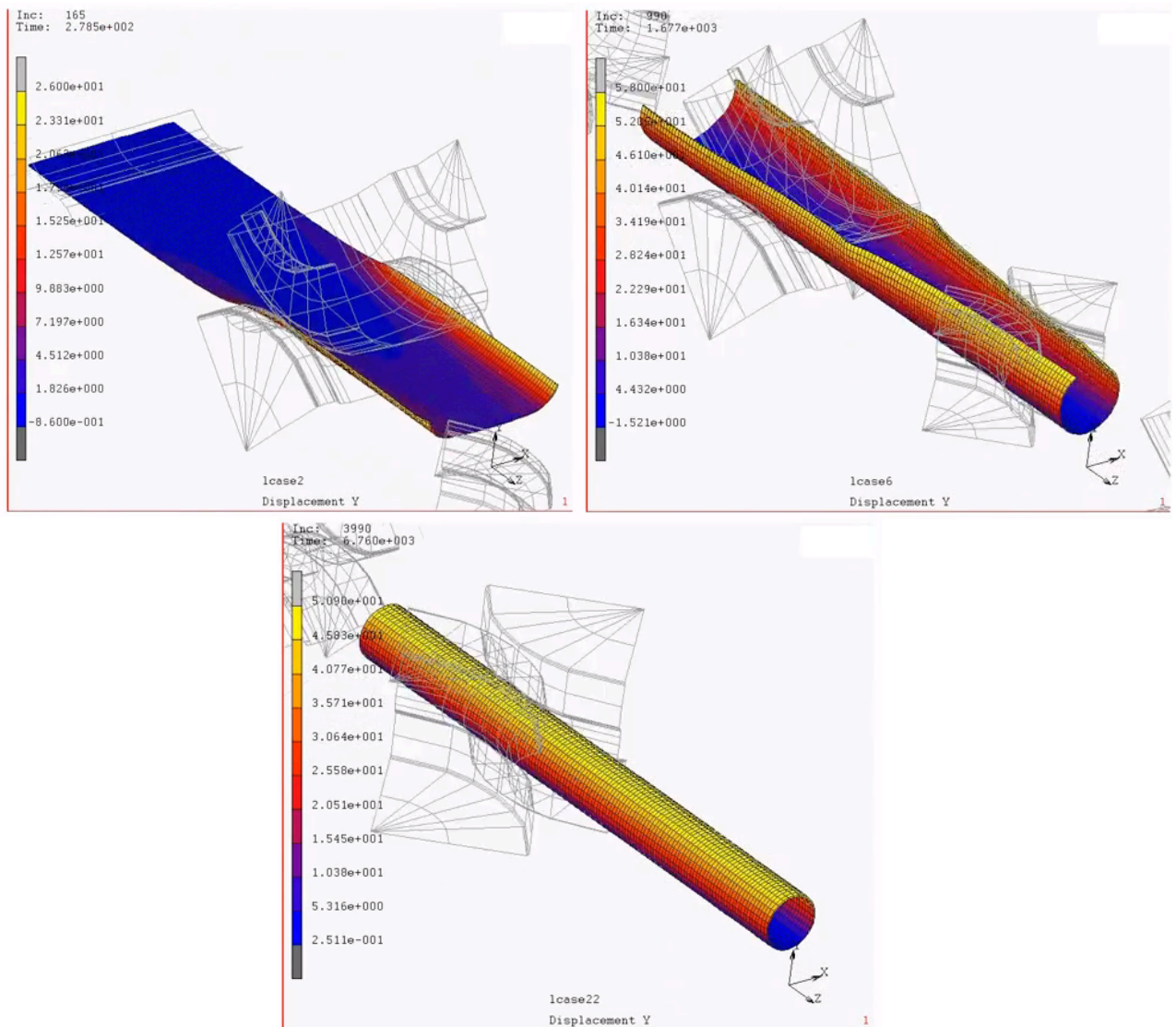
Σχήμα 1. 8 Κατεργασία διέλασης χωρίς την χρήση remeshing



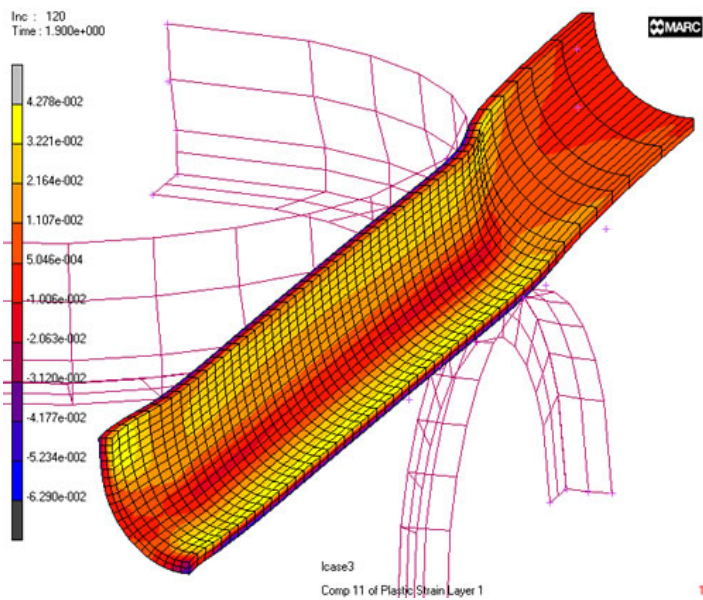
Σχήμα 1. 9 Παράδειγμα διέλασης

1.3.1.4 ΟΛΚΗ

Η ολκή είναι μια κατεργασία συρματοποίησης, ελκυσμού ράβδου και σωληνοποιήσεις αποτέλεσμα των κατεργασιών ολκής είναι η παραγωγή αντίστοιχου προϊόντος με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος. Κατά την ολκή, το τεμάχιο υπό τη μορφή ράβδου, σύρματος ή σωλήνα υφίσταται πλαστική παραμόρφωση διερχόμενο μέσα από μεταλλική μήτρα υπό την επενέργεια εφελκυστικού φορτίου στην έξοδο της μήτρας. Οι κατεργασίες ολκής κατατάσσεται στις ψυχρές κατεργασίες αλλά κατά την διάρκεια των κατεργασιών η θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά. Η παραμόρφωση του πλέγματος σε αυτές τις κατεργασίες είναι παρόμοια με αυτήν στην κατεργασία της διέλασης οπότε η λειτουργία του remeshing είναι αναγκαία διότι το πλέγμα δέχεται σοβαρές παραμορφώσεις και μπορούν να αποφευχθούν πιθανές ρήξεις του.

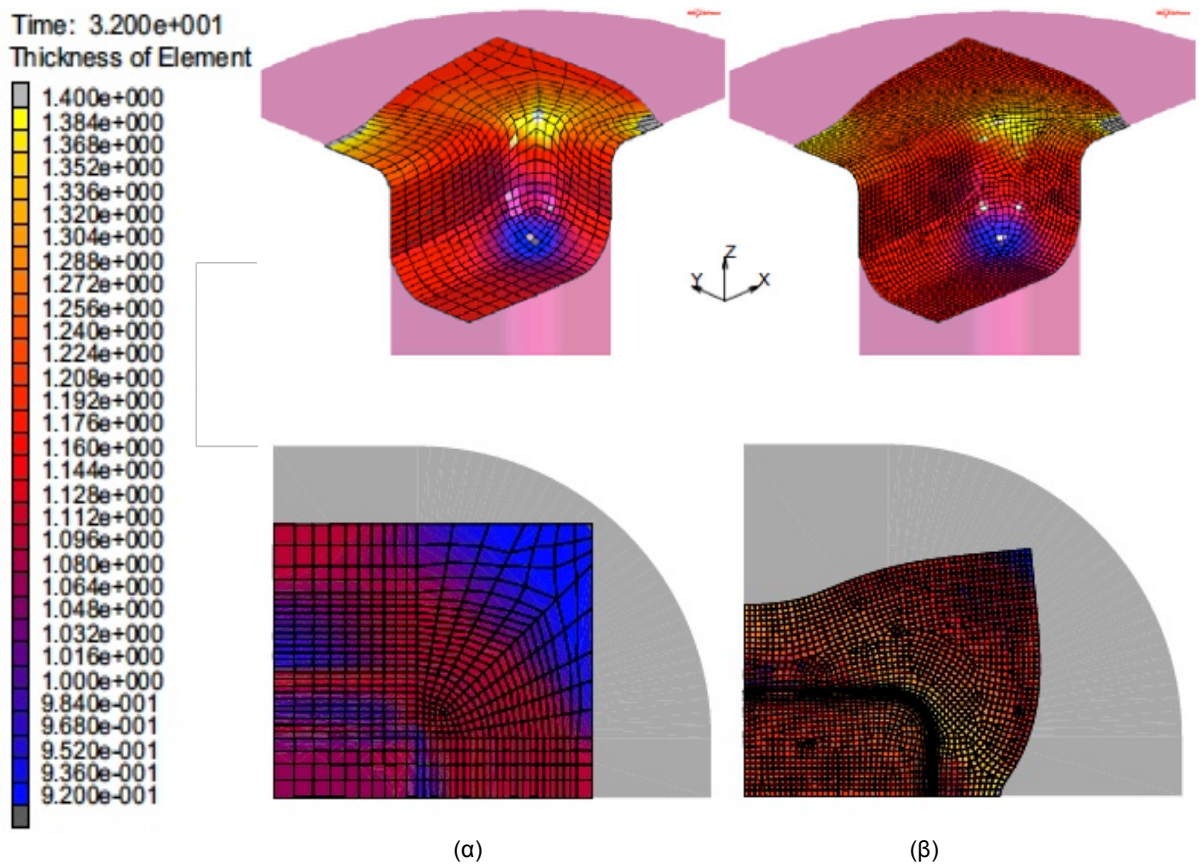


Σχήμα 1. 10 Κατεργασία σωληνοποίησης



Σχήμα 1. 11 Χρήση remeshing κατά την σωληνοποίηση

1.3.1.5 ΒΑΘΕΙΑ ΚΟΙΛΑΝΣΗ



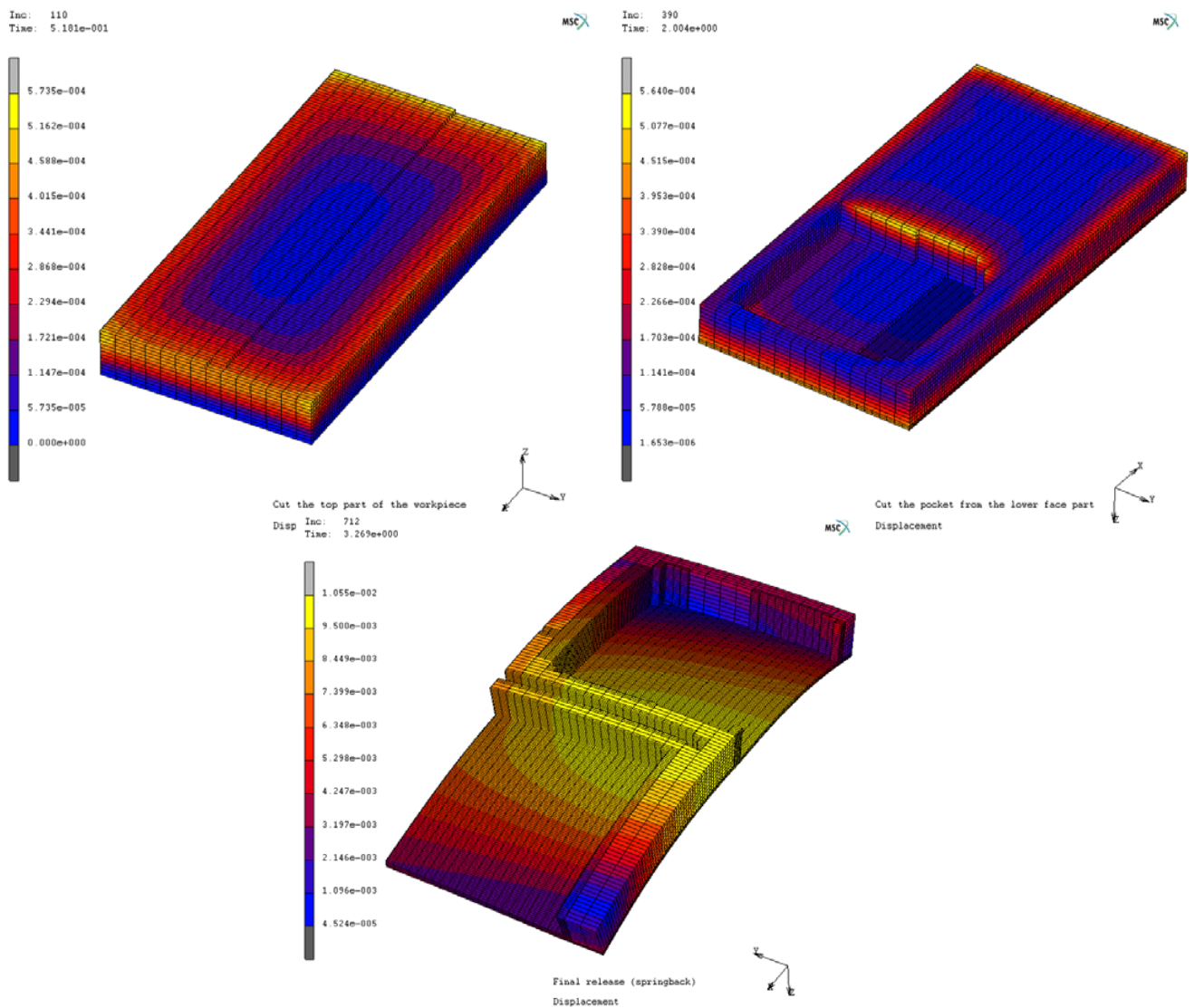
Σχήμα 1. 12 Κατεργασία βαθείας κοίλανσης (α) χωρίς remeshing και (β) με remeshing

Βαθεία κοίλανση είναι η διαμόρφωση επίπεδου ελάσματος σε κοίλο τεμάχιο με τη βοήθεια συστήματος εμβόλου/μήτρας με ή χωρίς τη χρήση δακτυλίου συγκράτησης, η οποία μπορεί να λαμβάνει χώρα σε περισσότερες από μία φάσεις. Στο Σχήμα 1.11 είναι εμφανής η παραμόρφωση του πλέγματος στην, περίπτωση (α), και με την χρήση του remeshing, περίπτωση (β), την καλύτερη απεικόνιση της διαμορφωμένης επιφάνειας και κατά συνέπεια την καλύτερη προσέγγιση της φυσικής λύσης. Βλέπουμε ότι η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων γίνεται πιο ακριβής αλλά και προσεγγίζει περισσότερο την φυσική λύση με την αναδιαμόρφωση του πλέγματος, κατά την διάρκεια της κατεργασίας, σε κάθε, προκαθορισμένο, βήμα.

1.3.2 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ

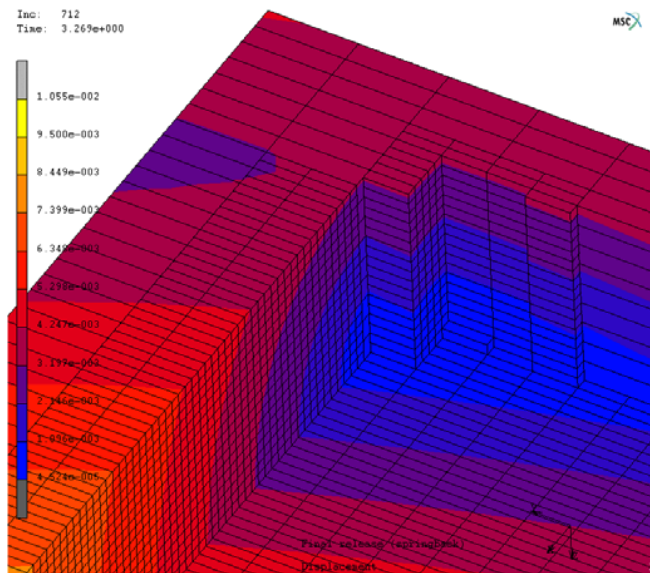
Οι κατεργασίες αφαιρέσεως μετάλλου ή κατεργασίες κοπής ομαδοποιούνται σε συμβατικές και μη συμβατικές. Στις μη συμβατικές η αφαίρεση υλικού δεν λαμβάνει χώρα μηχανικώς με πλαστική παραμόρφωση αλλά θερμικώς, ηλεκτρικώς, χημικώς ή με άλλους τρόπους. Με τις συμβατικές κατεργασίες κοπής αφαιρείται προοδευτικά κατά στρώσεις όγκος μετάλλου με την βοήθεια εργαλείου σε μορφή σφήνας, με πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου με την μορφή αποβλήτου. Με αυτό τον τρόπο δίνουμε στο κατεργαζόμενο τεμάχιο την μορφή που θέλουμε στις διαστάσεις που θέλουμε με τα επιτρεπτά όρια ανοχών, ώστε αυτό να ανταποκριθεί στις λειτουργικές απαιτήσεις κατά την χρήση του.

Στην βιομηχανία παραγωγής η NC μηχανουργική κατεργασία είναι μια διαδικασία αφαίρεσης υλικού για να παράξει την επιθυμητή γεωμετρία. Κατά την αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο η αποκατάσταση της ισορροπίας μέσα στην εναπομένουσα δομή του προκαλεί κάποια παραμόρφωση που οφείλεται στις παραμένουσες τάσεις του αποβλήτου είναι απαραίτητη για καλύτερα αποτελέσματα στην ανάλυση. Η παραμόρφωση που προκαλείται από αυτή την διαδικασία εξαρτάται από τις παραμένουσες τάσεις και την κατανομή στο εσωτερικό του δοκιμίου. Επίσης εξαρτάται από την τελική γεωμετρία της κατεργασίας. Για μια γεωμετρία που περιλαμβάνει ένα λεπτό, σε πάχος, δοκίμιο ή για μεγάλες κατασκευές η παραμόρφωση μπορεί να είναι τόσο μεγάλη που μπορεί να προκαλέσει στρέβλωση του σχήματος. Αυτή η στρέβλωση μπορεί να μην εξυπηρετεί την λειτουργικότητα την οποία έχουμε ορίσει. Χάρη σε αυτή την στρέβλωση μπορεί να έχουμε υψηλούς συντελεστές θραυσμάτων και κατά συνέπεια αύξηση του κόστους παραγωγής. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ χρήσιμη και δίνει την δυνατότητα να αναλύει κανείς την ενδεχόμενη παραμόρφωση που μπορεί να προκληθεί κατά την διάρκεια της κατεργασίας, συγκεκριμένα με την λειτουργία του remeshing είναι εύκολο για τους μηχανικούς να προβλέψουν τυχόν αποτυχίες και να μειώσουν το κόστος παραγωγής.



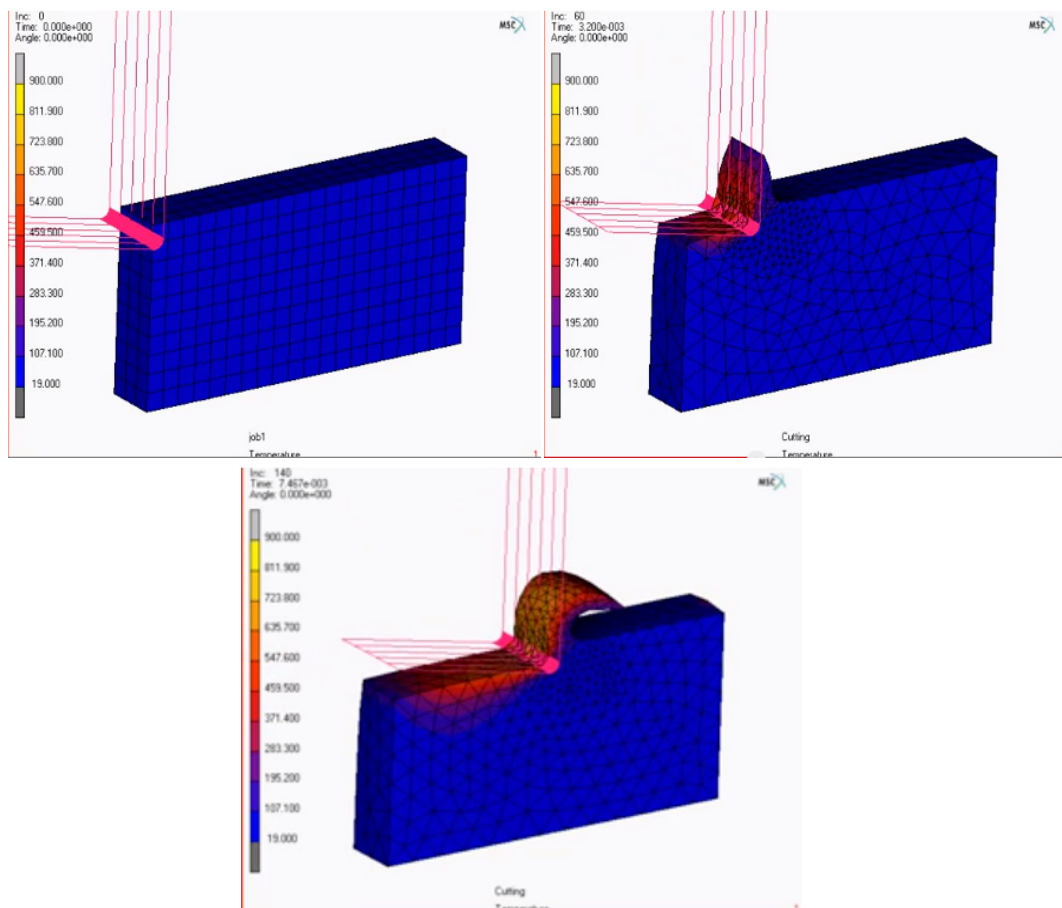
Σχήμα 1. 13 Προσομοίωση κατεργασίας φραιζαρίσματος

Το MSC.Marc σε κάθε έκδοση όλο και βελτιώνει την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης κοπής μετάλλων για την μείωση του χρόνου προσομοίωσης και της μνήμης αποθήκευσης του Η/Υ. Για να ελεγχθούν τα αποτελέσματα σε μια προσομοίωση κατεργασίας κοπής πρέπει πρώτα να ελεγχθεί αν τηρήθηκαν οι διαδρομές κοπής. Δεύτερον, θα πρέπει να ελεγχθούν οι παραμορφώσεις και οι εναπομένουσες τάσεις στο τεμάχιο. Αναλύοντας τα αποτελέσματα παραμόρφωσης / μετατόπισης, μπορούμε να δούμε την επίδραση της παραμένουσας τάσης και την διαδικασία κατεργασίας με τη γεωμετρία του τελικού κομματιού. Στο Σχήματα 1.13 βλέπουμε την διαδικασία φραιζαρίσματος και σε μια πιο κοντινή ματιά στο Σχήμα 1.14 πως βοηθάει το remeshing στην ανάλυση με την υποδιαίρεση των στοιχείων κατά την διάρκεια της κατεργασίας.



Σχήμα 1. 14 Κατεργασία φραιζαρίσματος με χρήση remeshing

Παρακάτω απεικονίζεται (Σχήμα 1.15) η μια κατεργασία κοπής με χρήση remeshing και η αναδιαμόρφωση του πλέγματος στο σημείο επαφής κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου.



Σχήμα 1. 15 Κατεργασία κοπής με χρήση remeshing

Ένα γρήγορο συμπέρασμα είναι ότι, κατά την εφαρμογή της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων για τέτοιες διεργασίες, τα στοιχεία παραμορφώνονται τόσο σοβαρά ώστε η ανάλυση δεν είναι σε θέση να συνεχίσει με το διαστρεβλωμένο πλέγμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα παραμορφωμένα στοιχεία δεν είναι σε θέση να παράσχουν σταθερή λύση, λόγω της ιδιομορφίας του συστήματος των εξισώσεων ή της αρνητικής Ιακωβιανής μαθηματικής μήτρας. Γι'αυτό το λόγω η χρήση του remeshing είναι απαραίτητο εργαλείο αλλά και ένα αναπόσπαστο κομμάτι για την ανάλυση των κατεργασιών. Στα παρακάτω κεφάλαια θα δούμε πώς μπορεί να ελεγχθεί αλλά και να εφαρμοστεί το remeshing στις κατεργασίες υλικών και διάφορα παραδείγματα αυτών.

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία κατεργασιών που βασίζεται σε συνθήκες μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων δημιουργεί προκλήσεις για τους προγραμματιστές των πεπερασμένων στοιχείων, λόγω της προοδευτικής παραμόρφωσης του πλέγματος, για πιθανές παρεμβολές ανάμεσα στο πλέγμα, στην επιφάνεια του δοκιμίου, και του εργαλείου. Η ανάγκη για μια αξιόπιστη, αυτόματη, δημιουργία πλέγματος και αναδιαμόρφωσης του (remeshing), έχει αναγνωριστεί από καιρό για να παίξει ένα σημαντικό ρόλο για τη διασφάλιση πολύπλοκων διεργασιών που είναι από την αρχή μέχρι το τέλος με υψηλά επίπεδα ακρίβειας, τόσο από την άποψη της γεωμετρίας όσο και την διανομή των μεταβλητών του πεδίου, πλέγματος. Στην πραγματικότητα, το χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης της αριθμητικής προσομοίωσης στις κατεργασίες των υλικών συνδέεται άρρηκτα με μια χρονολογική συνεισφορά στον τομέα του remeshing (εφαρμογές μορφοποίησης μετάλλου) που μπορεί να συστηματοποιηθούν σε τρεις διαφορετικές περιόδους.

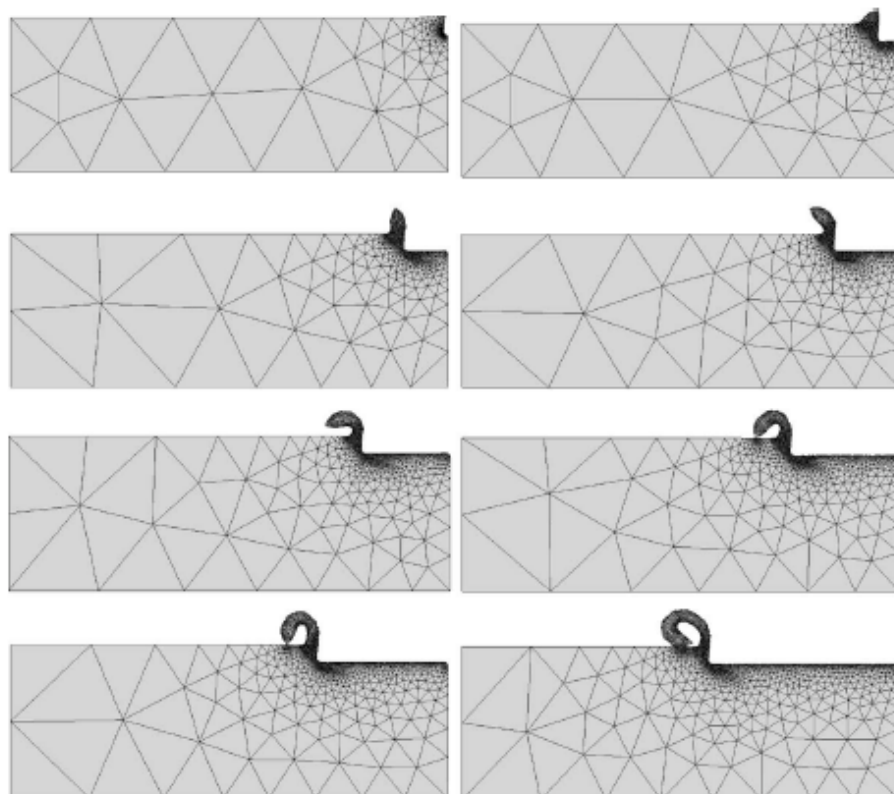
Η πρώτη περίοδος (1968-1992) εφιστά την προσοχή στην αριθμητική μοντελοποίηση των βασικών κατεργασιών. Το remeshing δεν ήταν απαραίτητο για τα πρώτα επιτεύγματα, αυτής της μοντελοποίησης, σε δισδιάστατες εφαρμογές (π.χ. αξονοσυμμετρικά σχήματα). Αυτά τα επιτεύγματα επέτρεψαν την αριθμητική προσομοίωση των κατεργασιών διαμόρφωσης, σε όλη την διάρκεια της κατεργασίας, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Οι προσεγγίσεις που αναπτύσσονται σε αυτήν την περίοδο ενεργοποιεί το remeshing και από αυθαίρετες γεωμετρίες καταλήγει σε ένα πλέγμα με τετράπλευρα και τριγωνικά στοιχεία.

Η δεύτερη περίοδος (1992-1996) ήταν σύντομη, αλλά οδήγησε σε δύο σημαντικά αποτελέσματα:

- (i) τη βελτίωση του remeshing σε προσεγγίσεις δύο διαστάσεων και
- (ii) η επέκταση αυτών των προσεγγίσεων σε τρεις διαστάσεις.

Το πρώτο αποτέλεσμα περιελάμβανε την ανάπτυξη της βελτίωσης του πλέγματος και στρατηγικές πυκνώση του με τη λήψη μετρήσεων των σφαλμάτων στο πλέγμα, παραμόρφωσης του πλέγματος, και την επιρροή του στο παρελθόν, το παρόν και την προβλεπόμενη μελλοντική εξέλιξη στον τομέα των εξαρτημένων μεταβλητών. Η πρώτη γενιά προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε δισδιάστατες εφαρμογές εμφανίστηκε σε αυτή την περίοδο. Το δεύτερο αποτέλεσμα οφείλεται στους Coupez T, Soyris N, Chenot JL.¹ που έδωσαν την δυνατότητα, αποτελεσματικά και αυτόματα, να προσομοιώνει κανείς πολύπλοκα

σχήματα (π.χ. βιομηχανικά εξαρτήματα) σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται αποκλειστικά στην αξιοποίηση των τετραεδρικών στοιχείων λόγω της ανθεκτικότητας, της ευελιξίας και της ευκολίας χειρισμού του αλγόριθμου, σε τρισδιάστατο πλέγμα, με βάση την μέθοδο Delaunay. Η εμφάνιση αυτής της μεθόδου υποκίνησε τους ερευνητές να κάνουν εκτενέστερες μελέτες στο θέμα και να υπάρχουν βελτιώσεις στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων μέχρι και σήμερα. Μία από αυτές τις μελέτες ήταν η δημιουργία πλέγματος με εξαεδρικά στοιχεία για να επιχειρήσουν παράλληλες προσεγγίσεις με έμμεσο remeshing η οποίες βασίζονται στην αυτόματη αποσύνθεση ενός τετραεδρικού στοιχείου σε τέσσερα εξαεδρικά. Ωστόσο, επειδή αυτή η προσέγγιση οδηγούσε πάντα σε ένα πλέγμα με παραμορφωμένα στοιχεία με μόνο ένα τμήμα, του πλέγματος, απεικόνιζε την ποιότητα ενός ιδανικού εξαεδρικού πλέγματος και επειδή η έμμεση δημιουργία πλέγματος με αποσύνθεση πάντα οδηγούσε σε άκαμπτα κομβικά σημεία αύξανε τεχνητά την συνολική ακαμψία των μοντέλων, έτσι το ενδιαφέρον για ένα εξαεδρικό πλέγμα ήταν πρόσκαιρο και εξελίχθηκε το τετραεδρικό. Αυτός μπορεί να είναι ο λόγος που ορισμένα γνωστά εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται σήμερα σε κατεργασίες υλικών δεν προσφέρουν εξαεδρικά στοιχεία ως επιλογή, ή δεν παρέχουν αυτόματο remeshing με εξαεδρικά στοιχεία.

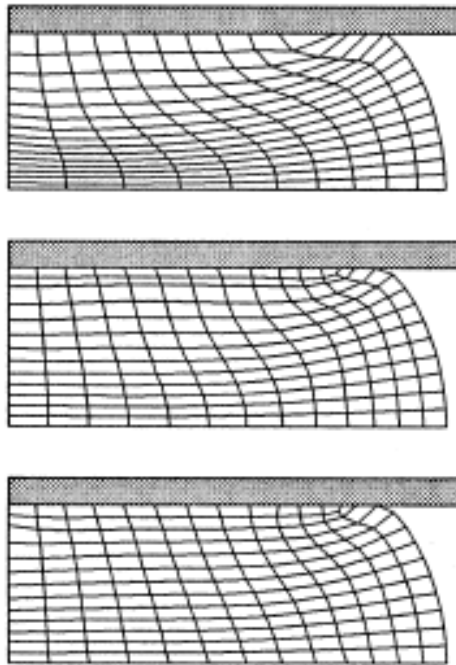


Σχήμα 2. 1 Διδιάστατη προσομοίωση κατεργασίας κοπής με χρήση remeshing

Η τρίτη περίοδος (1996-μέχρι σήμερα) ξεκίνησε όταν οι Schneiders R, Bünten R. πρότειναν μια νέα προσέγγιση (allhexahedral) για την αυτόματη παραγωγή καλής ποιότητας εξαεδρικών στοιχείων σε αυθαίρετες γεωμετρίες. Ένα εξαεδρικό πλέγμα βασίζεται στην προσέγγιση που περιλαμβάνει την κατασκευή ενός δομημένου τρισδιάστατου εξαεδρικού πλέγματος στο εσωτερικό του όγκου που ακολουθείται από την μετέπειτα αναδιαμόρφωση από μία σειρά στοιχείων που συνδέει το εσωτερικό του όγκου με την διαμορφωμένη προεξοχή κάθε στοιχείου στα σύνορα του τεμαχίου εργασίας . Η μέθοδος είναι μια επέκταση της προσέγγισης που βασίζεται σε δισδιάστατα τετράπλευρα στοιχεία που είχαν προηγουμένως αναπτυχθεί από τους Schneiders R, Oberschelp W, Kopp R, Becker M.², και κάθε ενδεχόμενο και δυνατότητα εφαρμογής έθεσε δύο βασικά θέματα :

- (i) Το πλεονέκτημα του εξαεδρικού έναντι τετραεδρικών στοιχείων και
- (ii) Την ανθεκτικότητας και την ευελιξία στο remeshing με εξαεδρικά στοιχεία.

Όσον αφορά το πρώτο θέμα, οι ερευνητές, όπως Chenot και Bay³ ισχυρίστηκαν ότι πρέπει να προτιμούνται τα τετραεδρικά αντί τα εξαεδρικά στοιχεία καθώς φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στην γεωμετρία του meshing και του remeshing και, ακόμη περισσότερο, για το adaptive remeshing. Επιπλέον, μπορεί επίσης να σημειωθεί ότι τα τετραεδρικά στοιχεία είναι πιο σωστή επιλογή επειδή τα όρια των τμημάτων που πρέπει να γίνει το remesh συχνά μοντελοποιούνται με τριγωνικά στοιχεία. Ωστόσο, υπήρχαν και άλλοι ερευνητές που παρουσίασαν τα επιχειρήματα τους για τα εξαεδρικά στοιχεία. Για παράδειγμα, ο Benzley⁴ παρατήρησε ότι πλέγματα με τετραεδρικά στοιχεία προσομοιώνονται σε μεγαλύτερα μοντέλα και ως εκ τούτου με μεγαλύτερες υπολογιστικές απαιτήσεις, από ότι πλέγματα με εξαεδρικά στοιχεία για το ίδιο επίπεδο ακρίβειας. Επίσης ο Kraft⁵, παρατήρησε ότι τα εξαεδρικά πλέγματα έχουν καλύτερη συμπεριφορά όταν παραμορφώνονται απ'ότι τα τετραεδρικά. Σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως τα τετραεδρικά στοιχεία και οι μελέτες για την βελτίωση του remeshing βρίθουν. Οι δυνατότητες του remeshing είναι πολύ σημαντικές για αναλύσεις κατεργασιών στις οποίες συνεργάζονται δύο, ή και περισσότερα, υλικά όπως οι κατεργασίες διαμόρφωσης και κοπής.



Σχήμα 2. 2 Κατεργασία σφυρηλάτισης με λίγα βήματα remeshing

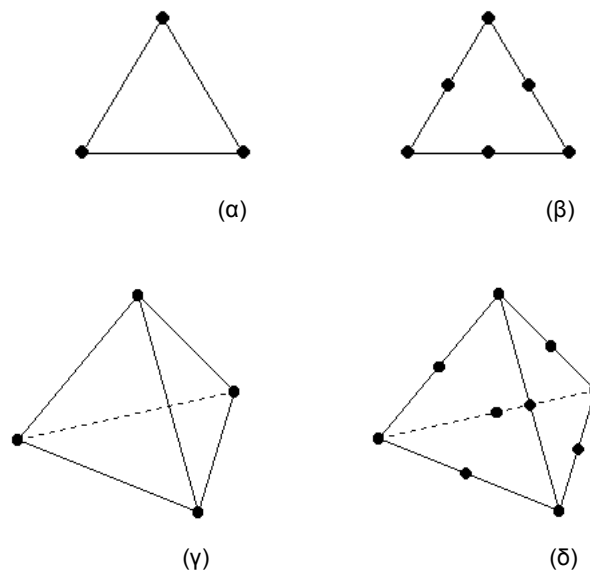
2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Πρίν δούμε πώς γίνεται η αναδιαμόρφωση τού πλέγματος (remeshing) πρέπει να δούμε από τι αποτελείται ένα πλέγμα και ποιά η αντίδραση του κατά τήν αναδιαμόρφωση. Το κάθε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων όπως το Marc περιλαμβάνουν μια εκτενή «βιβλιοθήκη»⁶ για διάφορων ειδών στοιχεία. Η «βιβλιοθήκη» στοιχείων επιτρέπει την διαμόρφωση τού τεμαχίου επεξεργασίας σε μονοδιάστατη, δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση. Αφού επιλεχθεί η γεωμετρία και ο τύπος τού στοιχείου ή ένας συνδυασμός, διάφορων τύπων, στοιχείων για την ανάλυσή, θα πρέπει να προετοιμαστούν τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου των στοιχείων (element input data). Σε γενικές γραμμές, τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση των στοιχείων, το πάχος τής δισδιάστατης κλίμακας, τα επίπεδα στοιχεία της γεωμετρίας, την διατομή τών τρισδιάστατων στοιχείων, τίσ συντεταγμένες τών κόμβων τών στοιχείων και την αναγνώριση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Τα στοιχεία αυτά είναι σε συγκεκριμένα γεωμετρικά σχήματα όπως τριγωνικά, τετραγωνικά και πολύγωνα.

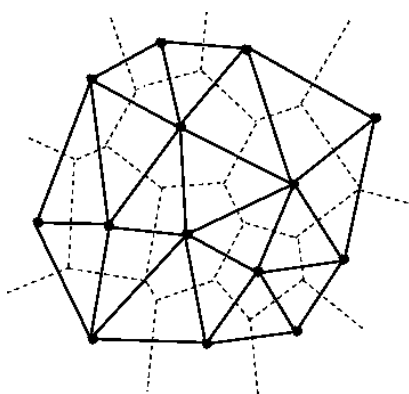
2.2.1 ΤΡΙΓΩΝΙΚΑ

Τα τριγωνικά στοιχεία είναι τα πρώτα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων. Η πιο γνωστή μέθοδος για την τοπολογία των τριγωνικών στοιχείων είναι η Delaunay triangulation, μια μέθοδος που έπειτα χρησιμοποιήθηκε και σε

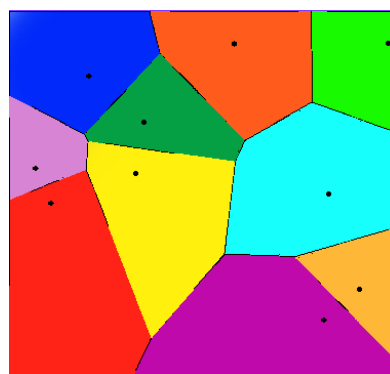
τετραεδρικά στοιχεία, και το διάγραμμα Voronoi. Στην διαδικασία της ανάλυσης με τριγωνικά πλέγματα εμφανίστηκαν αρκετά σφάλματα, πόσο μάλλον κατά την αναδιαμόρφωση των πλεγμάτων σε δισδιάστατες αναλύσεις. Πολλοί ερευνητές βελτίωσαν τα τριγωνικά πλέγματα και κατέληξαν στα τετραεδρικά στοιχεία τριγωνικής μορφής.



Σχήμα 2. 3 Τριγωνικά στοιχεία σε δισδιάστατη και τρισδιάστατη μορφή (α) 3 κόμβοι, (β) 6 κόμβοι. Τετράεδρα στοιχεία (γ) 4 κόμβοι, (δ) 10 κόμβοι



Σχήμα 2. 4 Μέθοδος Delaunay triangulation

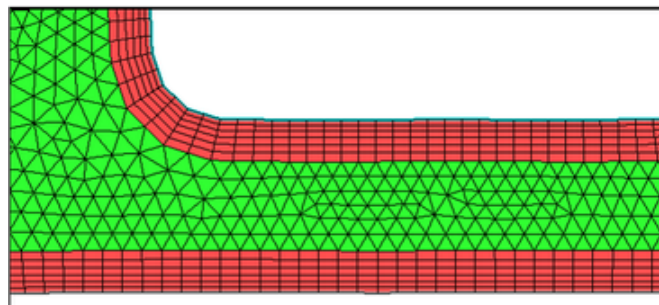


Σχήμα 2. 5 Διάγραμμα Voronoi

Το remeshing, σε μία ανάλυση με τριγωνικό πλέγμα, παράγει σχεδόν ισόπλευρα τρίγωνα του ίδιου μεγέθους, χωρίς να ακολουθεί αυστηρά την τοπολογία της επιφάνειας. Χρησιμοποιεί μια παραμετροποίηση η οποία περιορίζει την δυνατότητα προσαρμοστικότητας

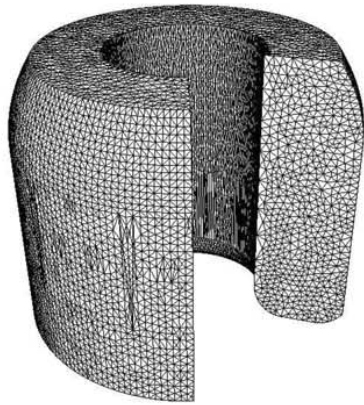
του πλέγματος. Το τριγωνικό πλέγμα στο remeshing μπορεί να προσαρμοστεί έτσι ώστε τα μεγέθη των τριγώνων, στο πλέγμα, να διαφέρουν σύμφωνα με την καμπυλότητα της επιφάνειας, χρησιμοποιεί μια πρότυπη πυκνότητα για τον έλεγχο της αναδιαμόρφωσης του πλέγματος. Έχει προταθεί να χρησιμοποιηθεί μια μετρική καμπυλότητα σε ανισοτροπικό remeshing έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά των τριγώνων να είναι αιχμηρά και ημιαιχμηρά.

Το τετραεδρικό πλέγμα έχει αποδειχθεί το πιο γρήγορο και ευέλικτο σε σύγκριση με άλλους τύπους πλεγμάτων . είναι πιο εύκολο να δημιουργηθεί ένα πλέγμα με τετραεδρικά στοιχεία σε αυθαίρετες γεωμετρίες παρά πλέγμα με άλλης μορφής στοιχείων . Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για την δημιουργία πλέγματος μία από αυτές είναι η Delaunay triangulation, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί και σε τριγωνικό αλλά και σε τετράπλευρο πλέγμα.

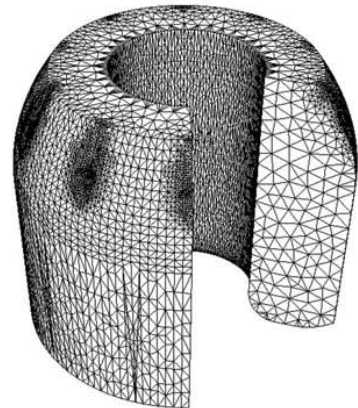


Σχήμα 2. 6 Κατεργασία διαμόρφωσης με τριγωνικό πλέγμα σε δισδιάστατη μορφή

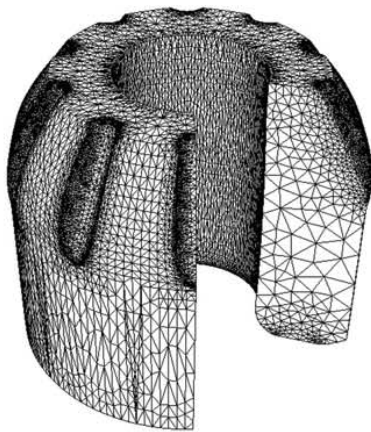
Adaptive remeshing:



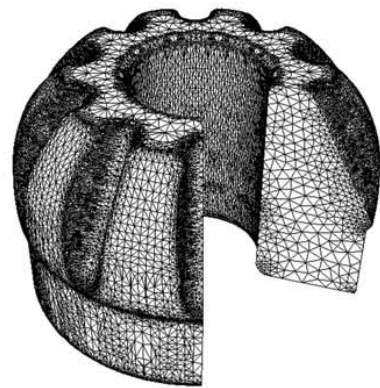
(a) INITIAL MESH, Nbelt=31141, Nbnoe=6296



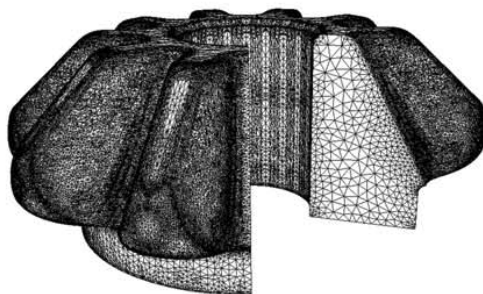
(b) REMESH=1, Nbelt=6748, Nbnoe=1695



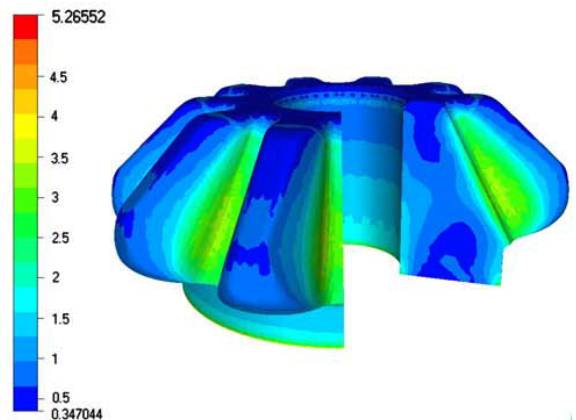
(c) REMESH=11, Nbelt=15219, Nbnoe=3821



(d) REMESH=25, Nbelt =23180, Nbnoe=5842
FORGE3 V6.1b,DATAFILE= fichier.don

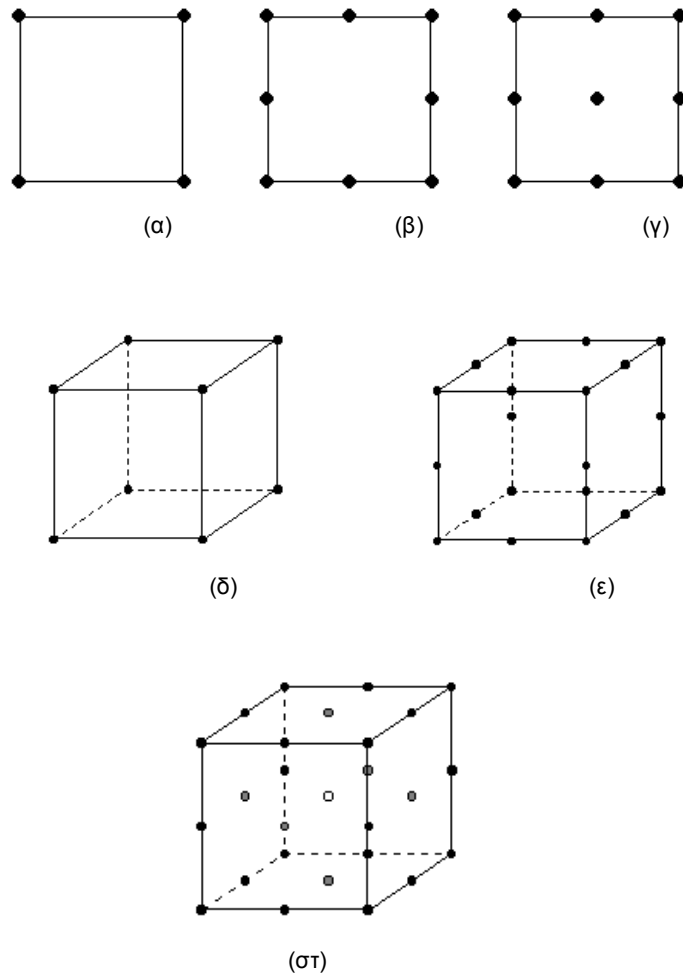


(e) REMESH=47, Nbelt=24700, Nbnoe =6412



Σχήμα 2. 7 Χρήση τού remeshing σε κατεργασία διαμόρφωσης με τριγωνικό πλέγμα σε τρισδιάστατη μορφή

2.2.2 ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΑ

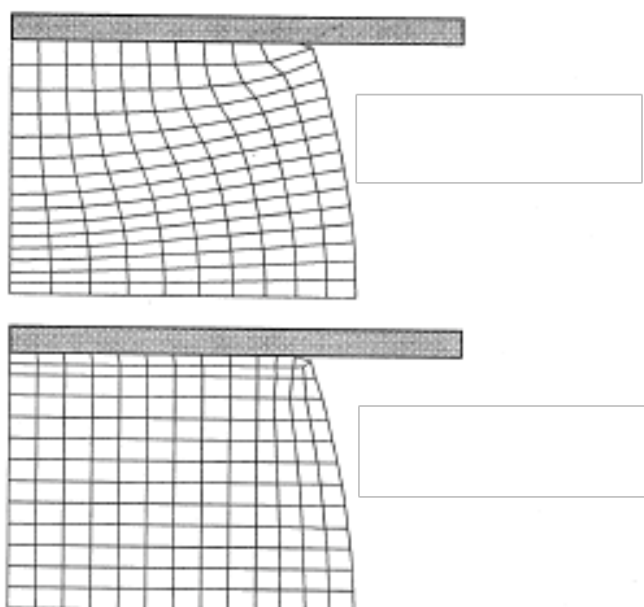


Σχήμα 2. 8 Τετραγωνικά στοιχεία σε δισδιάστατη και τρισδιάστατη μορφή (α) 4 κόμβοι, (β) 8 κόμβοι, (γ) 9 κόμβοι. Εξαεδρικά στοιχεία (δ) 8 κόμβοι, (ε) 20 κόμβοι και (στ) 27 κόμβοι.

Τα τετραγωνικά στοιχεία στην διαδικασία δημιουργίας πλέγματος χρησιμοποιούνται διότι ακολουθούν ένα γραμμικό πρόβλημα. Τα εξαεδρικά στοιχεία είναι πιο εύκολο να ακολουθήσουν την γεωμετρία του δοκιμίου αλλά και πιο εύκολα στην ανάλυση διότι αυτή η ιεραρχική δομή είναι χρήσιμη σε υπολογισμούς με όρια: ένα εξαεδρικό τρισδιάστατο στοιχείο περιέχει έξι δισδιάστατα τετράπλευρα στοιχεία και το καθένα δισδιάστατο τετραγωνικό στοιχείο περιέχει τέσσερα μονοδιάστατα γραμμικά στοιχεία.

Αν και τα εξαεδρικά στοιχεία σε πολύπλοκες γεωμετρίες έχουν καλύτερη απόδοση από τα τετραεδρικά, χρησιμοποιούνται ευρέως τα τετραεδρικά. Υπάρχουν βέβαια κάποιοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τα εξαεδρικά αλλά υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα, ότι τα συνοριακά στοιχεία του δοκιμίου τείνουν να επιδεινώνονται, κατά την κατεργασία, παρότι παράγει καλά διαμορφωμένα, δομημένα, στοιχεία στο εσωτερικό του. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη των κωδίκων της αριθμητικής προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία σε

γραμμικά πλέγματα με τετραγωνικά στοιχεία τα οποία προσομοιώνονται και διακριτοποιούνται εύκολα σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Οι Gay C, Montmionnet P, Coupez T, Chenot JL.^{7,8} ανέφεραν ότι ένα γραμμικό τετραγωνικό πλέγμα με τη μικτή σύνθεση είναι πιο κατάλληλο για τρισδιάστατες προσομοιώσεις. Ο Coupez T.⁹ ανέπτυξε την προσομοίωση σε θερμή σφυρηλάτηση με βάση τη μικτή σύνθεση με τετραεδρικά στοιχεία. Επίσης ανέπτυξε το σύστημα του DEFORM3D το οποίο είναι ευέλικτο στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις κατεργασιών διαμόρφωσης. Αρκετοί αλγόριθμοι δημιουργίας πλέγματος σε τρισδιάστατες προσομοιώσεις βασίζονται στην μέθοδο Delaunay. Για την βέλτιστη ανάλυση αλλά και για τα επιθυμητά αποτελέσματα ο χειρισμός κάποιων παραμέτρων στις επιλογές του REMESHING είναι αναγκαίος.



Σχήμα 2. 9 Κατεργασία σφυρηλάτησης με τετραγωνικά στοιχεία σε δισδιάστατη μορφή

2.3 ΤΥΠΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σε μία κατεργασία μπορούν να επιλεγθούν διαφορετικοί τύποι στοιχείων για να εκπροσωπούν διάφορα τμήματα της δομής κατά την ανάλυση. Αν υπάρχει ασυμβατότητα μεταξύ των κομβικών βαθμών ελευθερίας των στοιχείων, θα πρέπει να παραχθεί ένας κατάλληλος συνδυασμός περιορισμών για να διασφαλιστεί η συμβατότητα του πεδίου μετατόπισης στη δομή του τεμαχίου επεξεργασίας. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, όπως το Marc, το Ls-Dyna και το Deform-3D, παρέχουν πολλές βασικές επιλογές

για αυτόν τον συνδυασμό περιορισμών, αλλά ο χειριστής είναι υπεύθυνος για την συνοχή της ανάλυσης.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν όλα τα στοιχεία από την «βιβλιοθήκη» του εκάστοτε προγράμματος και για γραμμικές αλλά και μη γραμμικές αναλύσεις¹⁰, με τις ακόλουθες εξαιρέσεις:

- Δεν επιτρέπεται η πλαστικότητα ή το σπάσιμο στις ελαστικές δοκούς, κατά την διάτμηση και στα στοιχεία Fourier.
- Η εξίσωση Lagrange και το χαρακτηριστικό της πλαστικότητας κατά την πίεση δεν είναι διαθέσιμα για όλα τα στοιχεία.
- Η πλαστικότητα είναι διαθέσιμη μόνο για τα στοιχεία Hergmann κατά τη χρήση των $F^e F^p$ (Lagrange).¹¹
- Μόνο οι σύνδεσμοι θερμότητας και η δισδιάστατη μεταφορά θερμότητας των στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υδροδυναμική ανάλυση.
- Η ανάλυση Fourier μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για ένα περιορισμένο αριθμό αξονοσυμμετρικών στοιχείων.

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων καθορίζει όλα τα στοιχεία σε όλο το σύστημα συντεταγμένων. Όλων των ειδών τα στοιχεία ορίζονται σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων και το αποτέλεσμα της ανάλυσης ερμηνεύεται αναλόγως. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση των στοιχείων, διότι οι ιδιότητες του υλικού και η αντίδραση του κατά την κατεργασία μπορεί να είναι προκαθορισμένη. Ο καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού και της αντίδρασής του μας βοηθάει στο να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα κατανομημένα φορτία σε μία κατεργασία μπορούν να εφαρμοστούν κατά μήκος των ακμών των στοιχείων, πάνω από τις επιφάνειες των στοιχείων ή σε όλο τον όγκο των στοιχείων. Όταν οι δυνάμεις είναι μεγάλες πρέπει να εφαρμόζονται στα κομβικά σημεία των στοιχείων.

Πέντε έννοιες διαφοροποιούν τα είδη των στοιχείων

1. Ο τύπος κατά την γεωμετρία του στοιχείου στην μοντελοποίηση:
 - Ράβδος (2 κόμβοι)
 - Μembrάνη
 - Σύρμα-σχοινί
 - Πλάκα (3-9 κόμβοι)
 - Κέλυφος
 - Επίπεδη εντατική καταπόνηση (3-9 κόμβοι)
 - Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3-9 κόμβοι)

- Δοκός (2 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρική φόρτιση (3-9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρική τυχαία φόρτιση (αναλύεται σε αρμονικές)
- Τετράεδρο (3 κόμβοι)
- Πρίσμα (6 κόμβοι)
- Εξάεδρο (8 κόμβοι)
- Ορθοτροπικό-πολυστρωματικό υλικό

2. Ο τύπος των παρεμβολικών συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται για τα στοιχεία στο πλέγμα:

- Linear
- Quadratic
- Cubic
- Hermitian

Η συνάρτηση παρεμβολής χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μετατόπισης ενός αυθαίρετου σημείου στο σώμα.

$$\mathbf{u}_i(\mathbf{x}) = \mathbf{N}_i(\mathbf{x})\mathbf{t}_i$$

όπου \mathbf{u} είναι η μετατόπιση στον άξονα x , το \mathbf{N} είναι οι συνάρτησεις παρεμβολής, και \mathbf{t} είναι οι κομβικές μετατοπίσεις.

Η μηχανική τάση είναι:

$$\varepsilon_{ij}(x) = 1/2 \left(\frac{\partial u_i(x)}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j(x)}{\partial x_i} \right)$$

Έτσι έχουμε:

$$\varepsilon_{ij}(x) = 1/2 \left(\frac{\partial N_i u_i(x)}{\partial x_j} + \frac{\partial N_j u_j(x)}{\partial x_i} \right) = \beta_{ij} \bar{u}_i$$

όπου

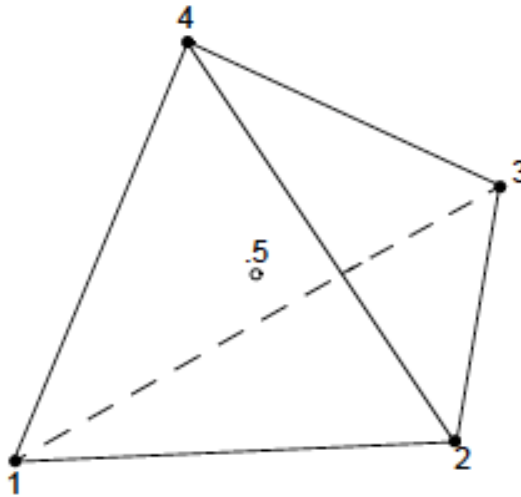
$$\beta_{ij} = \frac{\partial N_i}{\partial x_j}$$

3. Ο αριθμός των κόμβων σε ένα συγκεκριμένο στοιχείο
4. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που συνδέεται με κάθε κόμβο και ο τύπος των βαθμών ελευθερίας
5. Η μέθοδος ολοκλήρωσης που χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει την ακαμψία της μήτρας.

2.3.1 ΤΥΠΟΣ 157 (MSC.MARC)

Η «βιβλιοθήκη» τού προγράμματος που θα χρησιμοποιήσουμε στο Marc, ονομάζει τούς τύπους τών στοιχείων με αριθμούς από το 1 έως το 227 και το κάθε ένα εξυπηρετεί μία διαφορετική ανάλυση για κάθε κατεργασία¹². Στην παρούσα ανάλυση ο τύπος τών στοιχείων που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ο 157. Είναι ένας τύπος ο οποίος αντιπροσωπεύει ένα τρισδιάστατο τετραγωνικό στοιχείο Hergmann με 4+1 κόμβους γραμμικού προβλήματος. Τα τετραγωνικά στοιχεία τύπου 157 είναι στοιχεία τύπου Hergmann τα οποία τυπικά χειρίζονται, κατά την διάρκεια της ανάλυσης, τόσο καλά την πίεση όσο και την παραμόρφωση. Τα στοιχεία που έχουν μεγάλους βαθμούς ελευθερίας επιτρέπουν σε ασυμπέστα υλικά να υποβάλλονται σε μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις. Ένα στοιχείο τύπου 157 έχει 5 κόμβους τέσσερεις στις γωνίες και ένα στο κέντρο. Έχουμε τρεις βαθμούς ελευθερίας μετατόπισης και έναν ύπο πίεση σε κάθε γωνιακό κόμβο και μόνο τρεις βαθμούς ελευθερίας μετατόπισης στον εσωτερικό. Τα στοιχεία Hergmann, που συμπεριλαμβάνεται και ο τύπος 157, επιτρέπουν την μελέτη τού ασυμπέστου υλικού σε επίπεδες καταπονήσεις, αξονοσυμμετρικές και τρισδιάστατες αναλύσεις μέσω της εξίσωσης Lagrange, με βάση την διατύπωση τού Hergmann.

Τα ασυμπέστα υλικά μπορούν να μοντελοποιηθούν βάση κάποιας ειδικής ομάδας στοιχείων που διαθέτουν τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Αυτά τα στοιχεία, βασίζονται στις αρχές τού Hergmann, είναι σε θέση να χειρίζονται μεγάλες επιδράσεις παραμόρφωσης τών στοιχείων, καθώς και φαινόμενα ολίσθησης και μεταφοράς θερμότητας. Σε γενικές γραμμές, τα χαμηλής τάξης (γραμμικά) στοιχεία έχουν ένα μόνο κόμβο που περιέχει τον πολλαπλασιαστή Lagrange (F^oF^p), ενώ τα υψηλής τάξης (τετραγωνικά) στοιχεία έχουν τόν πολλαπλασιαστή Lagrange σε κάθε γωνιακό κόμβο. Τα στοιχεία τύπου 157 είναι χαμηλής τάξης στοιχεία και είναι μια εξαίρεση από τα υπόλοιπα στοιχεία, για ασυμπέστα υλικά, αφού ο πολλαπλασιαστής Lagrange βρίσκεται σε κάθε γωνιακό κόμβο.

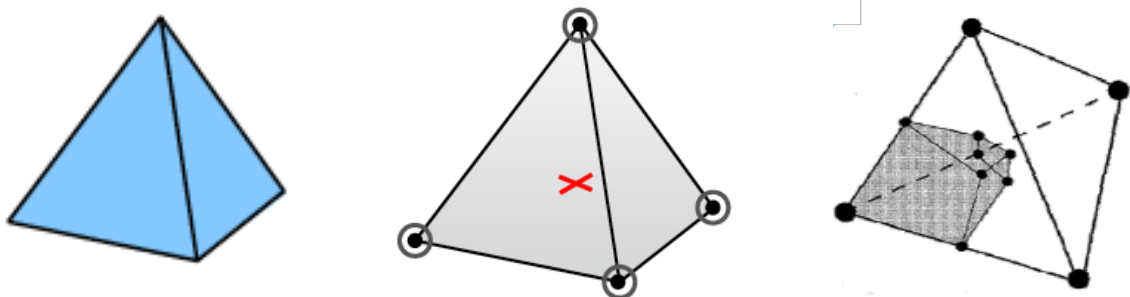


Σχήμα 2. 10 Στοιχείο τύπου 157

2.3.2 ΤΥΠΟΣ 13 (LS-DYNA)

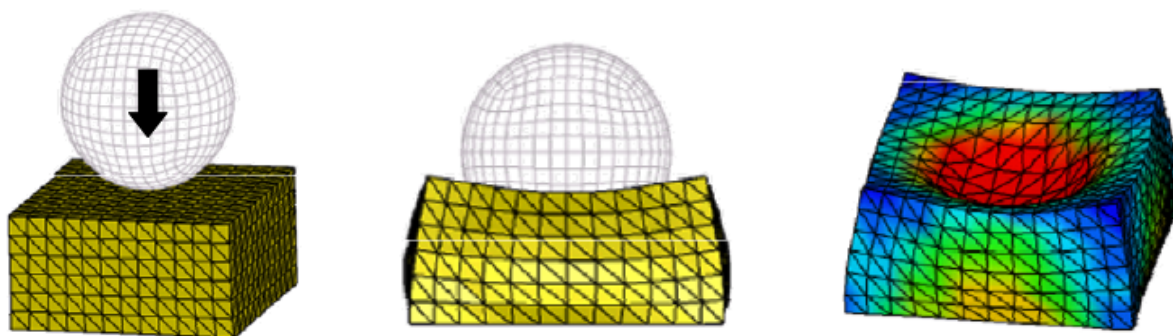
Η «βιβλιοθήκη» στο LS-DYNA ονομάζει τούς τύπους τών στοιχείων με αριθμούς από το 1 έως το 130 και συνεχίζει με τα 139,161,191-195 και το κάθε ένα εξυπηρετεί μία διαφορετική ανάλυση σε κάθε κατεργασία για διαφορετικά στοιχεία αλλά και υλικά. Στην παρούσα ανάλυση ο τύπος τών στοιχείων που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ο 13 για ιστροπικές και ελαστικές αναλύσεις.

Το στοιχείο τύπου 13 είναι ένα τρισδιάστατο τετράεδρικό στοιχείο βασισμένο στην θεωρία του Timoshenko, με δύο κόμβους για μικρές μετατοπίσεις και γραμμική ιστροπική ελαστικότητα. Το μητρώο δυσκαμψίας προήλθε από τον Yuhua Luo (Luo, 2008), με βάση τις ίδιες κυβικές συναρτήσεις. Το στοιχείο αυτό λειτουργεί μόνο με την ενεργοποίηση της εντολής * MAT_ELASTIC. Χρησιμοποιεί την γεωμετρία αναφοράς για τον υπολογισμό της ακαμψίας του στοιχείου και υπολογίζει τις δυνάμεις του στοιχείου πολλαπλασιάζοντας την ακαμψία του στοιχείου από τις μετατοπίσεις. Τα αντισταθμιστικά οφέλη λειτουργούν, αλλά είναι σταθερα για όλο το χρόνο, καταπόνησης του στοιχείου, όπως και η γεωμετρία αναφοράς.



Σχήμα 2. 11 Στοιχείο τύπου 13

Το στοιχείο τύπου 13 είναι πανομοιότυπο με τον τύπο 10, αλλά με επιπλέον τόν μέσο όρο των κομβικών πιέσεων, γεγονός που μειώνει σημαντικά την ογκομετρική ακαμψία. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλο για εφαρμογές με ασυμπίεστα υλικά, δηλαδή υλικά από καουτσούκ ή όλκιμα μέταλλα με ισοχωρικές πλαστικές παραμορφώσεις (π.χ. κατεργασίες διαμόρφωσης). Σε σύγκριση με το πρότυπο τετράεδρο (τύπος 10), παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας κατά 25%. Χρησιμοποιείται κυρίως για κομβικές πιέσεις και για έμμεσες εφαρμογές. Το στοιχείο τύπου 13 χαρακτηρίζεται κυρίως από ένα σημείο συνεχούς πίεσης με κομβική μέση πίεση, από την άμβλυνση της ογκομετρικής ακαμψίας και καλύτερη συμπεριφορά για υλικά με την αναλογία Poisson $\nu > 0$. Το στοιχείο 13 αποτρέπει την ογκομετρική ακαμψία με τον καθορισμό κομβικών όγκων και αξιολογώντας τόν μέσο όρο της κομβικής πίεσης ως προς τόν όγκο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασαφείς δυναμικές εφαρμογές που αφορούν ασυμπίεστα υλικά.



Σχήμα 2. 12 Παράδειγμα με στοιχεία τύπου 13

2.4 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ MESHING ΚΑΙ ΤΟΥ REMESHING

Η εμπειρία που έχει συσσωρευτεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, που σχετίζονται με τη χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και οι νέες προκλήσεις που προκύπτουν από την αναπροσαρμογή αυτών των διαδικασιών οδήγησαν σε αρκετές τροποποιήσεις στους αλγόριθμους και βελτίωσαν σημαντικά τη συνολική αξιοπιστία, την ευελιξία και την δυνατότητα εφαρμογής του remeshing. Οι αλγόριθμοι για το remeshing ακολουθούν μια διαδικασία που περιλαμβάνουν:

- (i) τόν προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών,
- (ii) την συναρμογή του πυρήνα του πλέγματος,
- (iii) την αναδόμηση των κορυφών και των ακμών του παραμορφωμένου πλέγματος,
- (iv) την διόρθωση των ακμών και επιφανειών,

- (v) τήν εξομάλυνση των ακμών, επιφανειών και τού όγκου και
- (vi) τήν μεταφορά των μεταβλητών τού πεδίου μεταξύ τού παλιού και τού νέου πλέγματος.

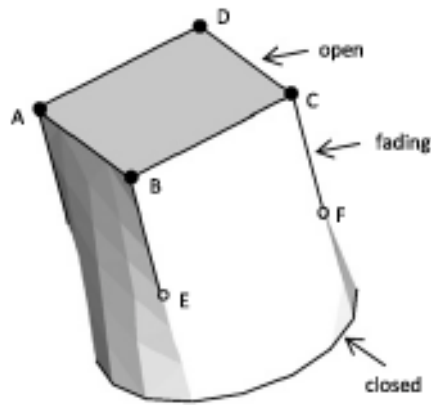
2.4.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Το πρώτο βήμα για το meshing και το remeshing είναι ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Δηλαδή κατά το meshing είναι η οριοθέτηση και ο ορισμός τού πλέγματος βάση τού τεμαχίου επεξεργασίας και ο ορισμός τής γεωμετρίας τών στοιχείων που θα απαρτίζει το πλέγμα. Ενώ κατά το remeshing είναι η ομαλή μεταφορά τού παλιού πλέγματος τής γεωμετρίας στα όρια τού τεμαχίου αλλά και τών στοιχείων σε ένα νέο, χωρίς μεγάλες παραμορφώσεις στα στοιχεία του πλέγματος. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τής εκάστοτε γεωμετρίας μπορεί να περιλαμβάνει κορυφές και ακμές που πρέπει να διατηρούνται κατά τη διάρκεια τού meshing και τού remeshing προκειμένου να υπάρχει η συνολική συνοχή μεταξύ του όγκου και τής διακριτοποίησης τού πλέγματος. Οι κορυφές συλλέγονται από τα ακραία σημεία των ακμών που είναι συνδεδεμένα με τουλάχιστον τρία γειτονικά τμήματα ακμών. Οι ακμές ταξινομούνται σε τρεις κύριες ομάδες:

- (i) ανοικτές ακμές, (A–B, B–C, C–D και D–A),
- (ii) κλειστές ακμές και
- (iii) συνευθειακά τμήματα ακμών. (B–E και C–F).

Οι ανοικτές ακμές συνδέουν δύο διαφορετικές κορυφές, οι κλειστές ακμές αρχίζουν και τελειώνουν στο ίδιο σημείο και δεν περιέχουν κορυφές, και τα συνευθειακά τμήματα ακμών ξεκινούν σε μια κορυφή, αλλά εξαφανίζονται ομαλά κατά μήκος της επιφάνειας.

Προκειμένου να απλουστευθεί το συνολικό μέγεθος τής συστοιχίας τών αιχμών χρησιμοποιείται ένας διαδοχικός τρόπος για τόν εντοπισμό των ακμών, με τόν οποίο τα διαδοχικά και συνευθειακά τμήματα ακμών συγχωνεύονται. Όπως θα φανεί αργότερα, τα οφέλη από τη συγχώνευση τών συνευθειακών ακμών υπερβαίνουν την μείωση του μεγέθους τής συστοιχίας τών αιχμών επειδή διευρύνει σημαντικά την επιλογή των κόμβων τού πλέγματος και εξογκώνονται προς την άκρη της επιφάνειας.



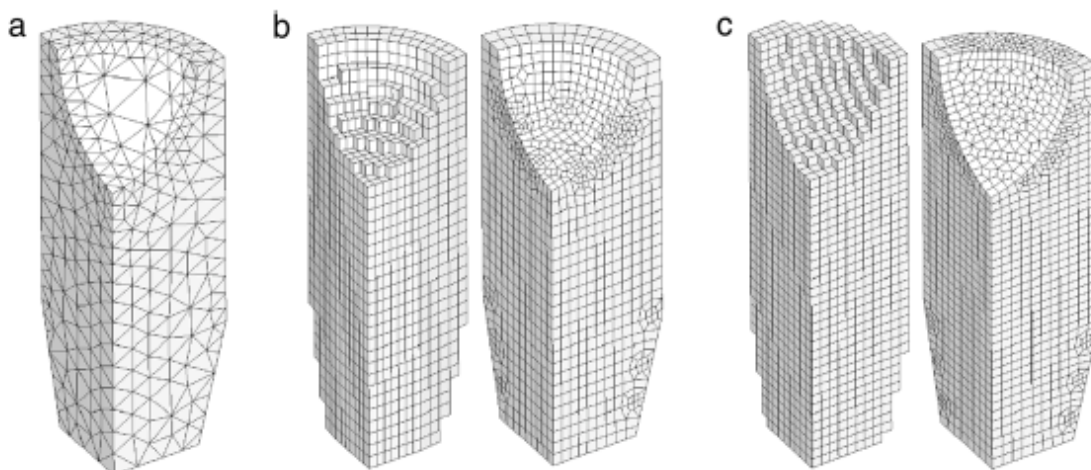
Σχήμα 2. 11 Υπόδειξη ακμών σε ένα τεμάχιο

2.4.2 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Ο αλγόριθμος για την δημιουργία τού πυρήνα τού πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται συνήθως από τέσσερις κύριες διαδικασίες:

- (i) τον προσδιορισμό τού πλαισίου οριοθέτησης,
- (ii) κατασκευή ενός πλέγματος εντός του πλαισίου οριοθέτησης,
- (iii) απομάκρυνση των στοιχείων που βρίσκονται έξω από το τεμάχιο εργασίας
- (iv) την τοπολογία για τα υπόλοιπα στοιχεία

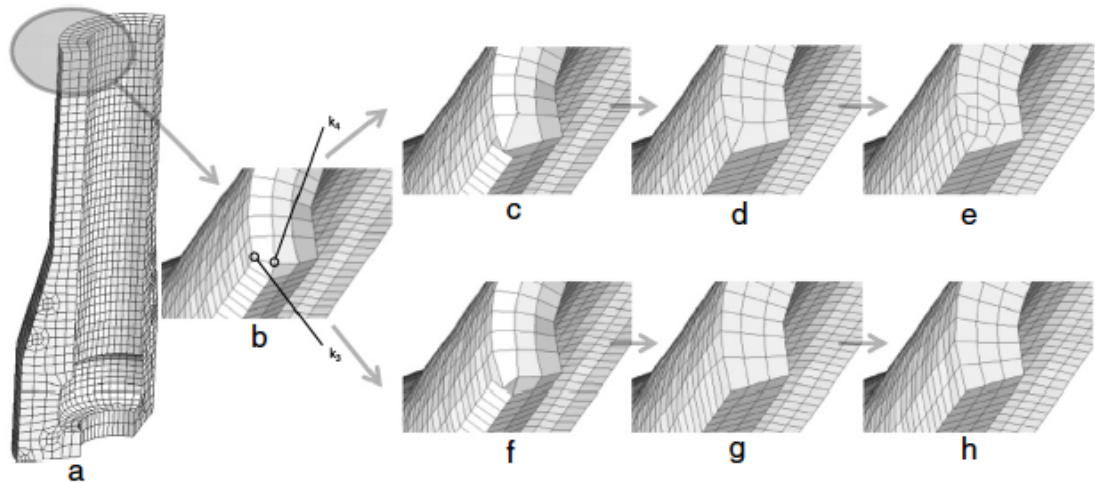
Η επιρροή του πυρήνα τού πλέγματος στη συνολική ποιότητα τού τελικού πλέγματος είναι πολύ σημαντική. Ειδικότερα, αποφεύγεται ή ελαχιστοποιείται η ανάγκη για επιδιόρθωση τού πλέγματος κατά την διάρκεια μίας κατεργασίας. Λαμβάνοντας την περίπτωση που φαίνεται στο Σχήμα 2. 12 ως παράδειγμα, προκύπτει ότι ένα εξαεδρικό meshing ξεκινώντας από ένα κυλινδρικό πυρήνα πλέγματος παράγει ένα πολύ καλύτερο, τελικό πλέγμα, από ένα κυβοειδές πυρήνα πλέγματος. Ένας αλγόριθμος εφαρμόζεται για να καθοριστεί εάν ένας κόμβος βρίσκεται εντός ή εκτός από τις τριγωνικές αιχμές τής επιφάνειας τού πλέγματος που χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύει το τεμαχίου. Ακολουθώντας την κατεύθυνση ενός διανύσματος αρχίζοντας από κάθε κόμβο και μετρώντας τον αριθμό των διασταυρώσεων με τις τριγωνικές αιχμές στα στοιχεία της επιφάνειας επιτρέπει τον προσδιορισμό, εάν ένας κόμβος βρίσκεται εντός (μονός αριθμός διασταυρώσεων) ή εκτός (ζυγός αριθμός διασταυρώσεων) τού τεμαχίου.^{13, 14}



Σχήμα 2. 12 Η επιρροή στο remeshing του πυρήνα του πλέγματος (a) τριγωνικό πλέγμα, (b) πλέγμα με κυλινδρικό πυρήνα και η τελική μορφή του πλέγματος, (c) πλέγμα με κυβικό πυρήνα και τελική η μορφή του πλέγματος

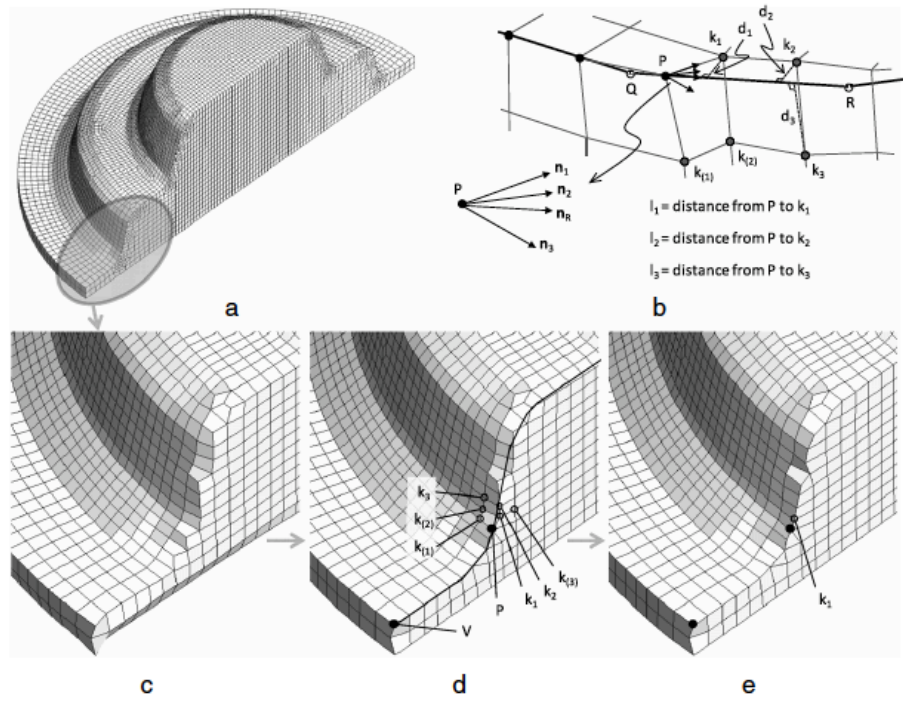
2.4.3 ΑΝΑΔΟΜΗΣΗ ΚΟΡΥΦΩΝ ΚΑΙ ΑΚΜΩΝ ΤΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριγωνικών επιφανειών του πλέγματος, που αναφέραμε παραπάνω, παρέχουν όλες τις πληροφορίες που χρειάζονται για την εφαρμογή ενός πλέγματος στις επιφάνειες, στις ακμές και στις κορυφές ενός τεμαχίου. Η ανακατασκευή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητη για να διατηρηθεί η συνοχή των στοιχείων στο πλέγμα, στην περίπτωση των επιφανειών πραγματοποιείται επιτυχώς με την τεχνική του ισομορφισμού^{13,2}. Η τεχνική ισομορφισμού βασίζεται στην παραγωγή ενός στρώματος στοιχείων μεταξύ του πυρήνα του πλέγματος και των τριγωνικών επιφανειών του πλέγματος που ορίζεται από το περίγραμμα του τεμαχίου. Ο πυρήνας του πλέγματος λειαίνεται πριν την προβολή των κομβικών σημείων στην τριγωνική επιφάνεια του πλέγματος προκειμένου να αποφευχθεί η διασταύρωση των επιφανειών που θα δημιουργούσε προβλήματα στην ανάλυση αλλά και στην απεικόνιση της κατεργασίας. Η αναδόμηση της επιφάνειας με ισομορφισμό και με εξομάλυνση υπήρξε σοβαρό θέμα μελέτης κατά τα τελευταία χρόνια, επίσης έμφαση έχει δοθεί στην ανακατασκευή των ακμών και των κορυφών που ως γνωστόν έχουν αρκετά μειονεκτήματα κατά το remeshing. Ο στόχος στην αναδόμηση των κορυφών είναι να προβάλλει τα κομβικά σημεία του εν λόγω πλέγματος πάνω στις κορυφές των τριγωνικών επιφανειών.

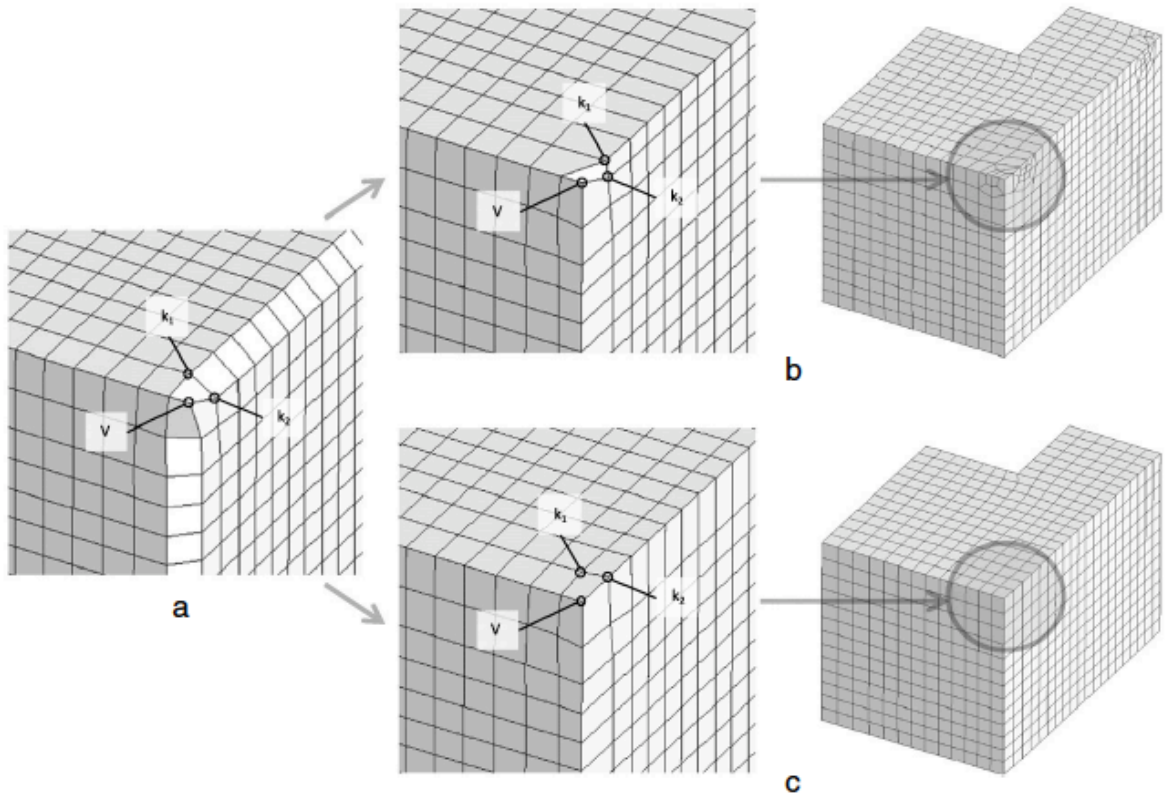


Σχήμα 2. 13 Τρόποι αναδόμησης κορυφών και η επιρροή στο τελικό πλέγμα

Η αναδόμηση των ακμών είναι ένα από τα βασικά βήματα στην δημιουργία του πλέγματος και στην αναδιαμόρφωσή του¹⁵. Παρακάτω στο Σχήμα 2. 14 φαίνεται η διαδικασία αναδόμησης των ακμών όπου το σημείο P είναι ο τελευταίος κόμβος που προεξέχει στο τμήμα Q-R. Οι εικόνες (c) – (e) δείχνουν σε μεγέθυνση λεπτομέρειες των ενδιάμεσων κόμβων στην αναδόμηση των άκρων που οδηγούν στο πλέγμα στην εικόνα (a), το πλέγμα στην εικόνα (a) είναι μετά από την αναδόμηση των κορυφών. Το πρώτο βήμα στον αλγόριθμο της αναδόμησης είναι η ταυτοποίηση και η διαλογή μέχρι τριών υποψήφιων κόμβων $k_{(1)}$, $k_{(2)}$, $k_{(3)}$ με βάση την απόσταση από τον τελευταίο προεξέχοντα κόμβο P. Το δεύτερο βήμα είναι να επιλεγεί ένας εκ των τριών υποψήφιων κόμβων που έχουν εντοπιστεί. Σε αυτό το σημείο όμως βλέπουμε ότι έχουμε άλλους τρεις υποψήφιους κόμβους k_1 , k_2 , k_3 που μπορεί να επιλέξει ο αλγόριθμος. Τα κριτήρια επιλογής αναδόμησης και κατά συνέπεια εξομάλυνσης των ακμών του πλέγματος έχουν να κάνουν με την γραμμικότητα των υποψήφιων κόμβων σε σχέση με τον κόμβο P.



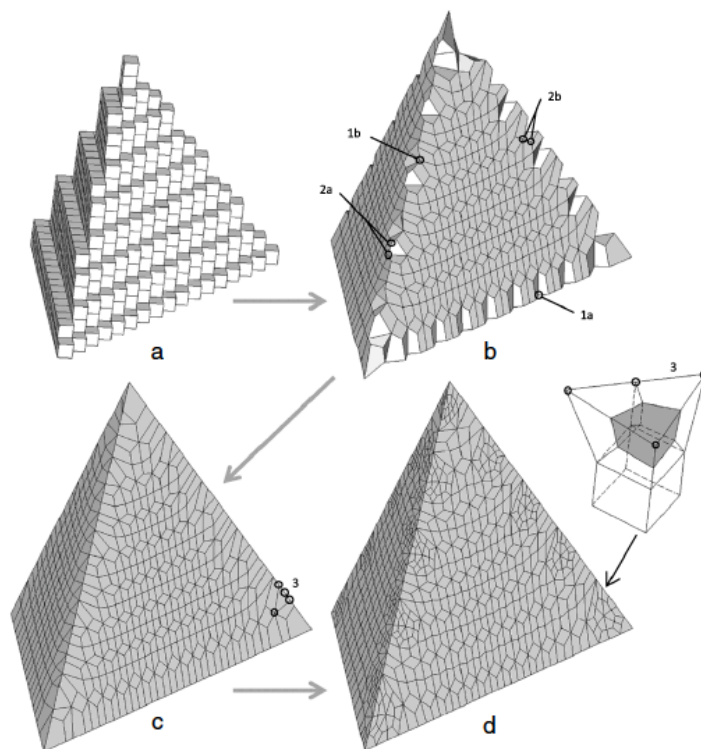
Σχήμα 2. 15 Αναδόμησης ακμών και η επιρροή στο τελικό πλέγμα(a)



Σχήμα 2. 14 Η σημαντικότητα τής επιλογής τού κόμβου (b) επιλογή τού k_1 (c) επιλογή τού k_2

2.4.5 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΑΚΜΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Η ποιότητα του πλέγματος επηρεάζει την ακρίβεια, την αξιοπιστία και την εγκυρότητα της αριθμητικής μοντελοποίησης των κατεργασιών παραγωγής. Υπάρχει συχνά η ανάγκη να εκτελεί την διόρθωση των ακμών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης ανακατασκευή των άκρων του πλέγματος. Επιπλέον είναι γνωστό ότι όσο περισσότερο οι γωνίες μεταξύ των γειτονικών πλευρών ενός εξαέδρου πλέγματος παρεκκλίνουν από τις 90° (τήν ιδανική γωνία), τόσο πιο αναξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Λόγω της υψηλής ποιότητας των πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται σε εξαεδρικό meshing και remeshing, τα μείζονα προβλήματα περιορίζονται στα στοιχεία που συνδέουν τον πυρήνα του πλέγματος με την επιφάνεια του τεμαχίου και, ειδικότερα, με τα στοιχεία που περιέχουν κορυφές και ακμές. Ως αποτέλεσμα αυτού, μια ξεχωριστή διαδικασία για την επανεξέταση, συνεχίζει και βελτιώνει το πλέγμα και είναι σημαντικό για την εξάλειψη των γεωμετρικών αντιφάσεων που προκύπτουν από τις πλευρές που λείπουν από τα στοιχεία κατά μήκος των ακμών να επιλύουν κακώς διαμορφωμένα στοιχεία. Παράδειγμα για αυτήν την διαδικασία βλέπουμε στο Σχήμα 2. 16 όπου ο πυρήνας του πλέγματος απαρτίζεται από κυβικά εξαεδρικά στοιχεία και μέσω των παραπάνω διεργασιών καταλήγει σε μια πυραμίδα με λεία επιφάνεια.

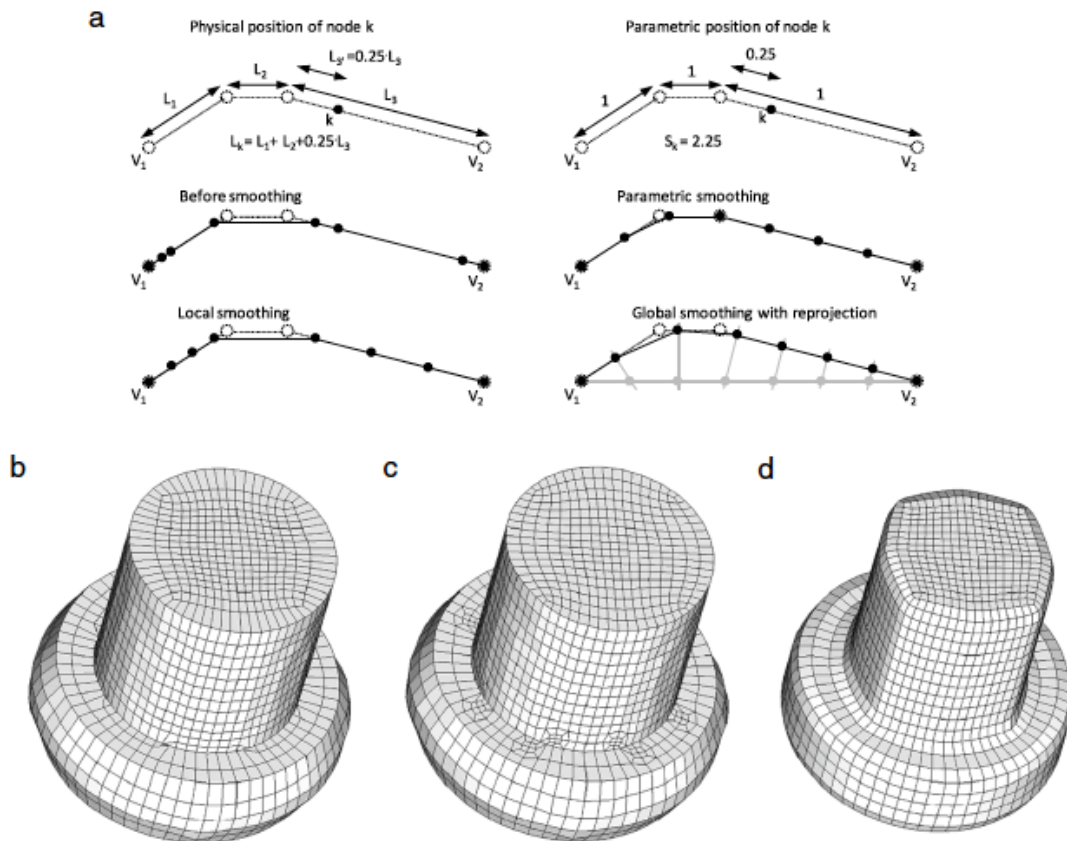


Σχήμα 2. 16 Παράδειγμα διόρθωσης ακμών και επιφάνειας

2.4.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ

Η διαδικασία εξομάλυνσης εφαρμόζεται με σκοπό την διόρθωση τών διαστρεβλωμένων στοιχείων και για την βελτίωση του πλέγματος στα διαφορετικά στάδια τής διαδικασίας τού remeshing. Σε γενικές γραμμές, η λείανση επιτυγχάνεται με την αλλαγή θέσης των κομβικών σημείων σε νέες θέσεις που δίνονται από ένα σταθμισμένο μέσο όρο των γειτονικών κομβικών σημείων χωρίς να τροποποιούν την τοπολογία του πλέγματος. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά προβλήματα που πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν για να διατηρηθεί η γεωμετρική συνοχή τού πλέγματος. Στήν διαδικασία τής εξομάλυνσης οι κορυφές παραμένουν σταθερές. Οι υπόλοιποι κόμβοι μπορούν να αλλάξουν τις θέσεις τους για τη βελτίωση της συνολικής ποιότητας του πλέγματος για όσο διάστημα οι ακραίοι κόμβοι και οι επιφανειακοί κόμβοι παραμένουν στις θέσεις τους.

Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, πρώτα λειαινόνται οι ακμές μέσω μιας παραμετρικής διαδικασίας που αναπτύχθηκε από τους μελετητές, οι επιφάνειες λειαινόνται ενώ εξαιρούνται οι ακραίοι κόμβοι, και ο όγκος (που αντιστοιχεί στον πυρήνα του πλέγματος) που είναι το τελευταίο που πρέπει να εξομαλύνεται, εξαιρουμένων όλων τών κομβικών σημείων που βρίσκονται επί των ακμών και επιφανειών. Η εξομάλυνση ακμών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια δύο διαφορετικών εννοιών. Αυτές οι έννοιες έχουν αναλυθεί περιεκτικά από τους Karadogan και Tekkaya ¹⁶ και Fernandes and Martins ¹³ και είναι η τοπική εξομάλυνση και η ολική εξομάλυνση (Local smoothing and global smoothing). Με τήν διαδικασία τής εξομάλυνσης καταφέρνουμε να έχουμε ένα ομοιόμορφο και ποιοτικό πλέγμα σε κάθε remeshing



Σχήμα 2. 17 (a) Τρόποι εξομάλυνσης (b)-(d) Εξομάλυνση του πλέγματος στην τελική μορφή του

2.4.7 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η μεταφορά του χρόνου και των ολοκληρωματικών μεταβλητών του πεδίου ανάλυσης σε κατεργασίες που συναντούμε, πίεση, αποκοπή υλικού, μεταβολή σχετικής πυκνότητας και θερμοκρασίας από το παλιό σε ένα νέο πλέγμα απαιτεί την αξιολόγηση των κομβικών τιμών των εν λόγω ποσοτήτων στο παλιό πλέγμα. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την χρήση μητρικής άλγεβρας και την απαλοιφή Gauss σε κάθε κόμβο, όμως έχει παρατηρηθεί ότι καλύτερα αποτελέσματα έχουμε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων^{13, 17}. Η μεταφορά δεδομένων είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι διότι σε αυτό το στάδιο κρίνετε ο χρόνος της προσομοίωσης αλλά και η ποιότητα κάθε καινούργιου πλέγματος.

2.5 Ο ΠΡΟΓΡΑΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΙΣΩ ΑΠΟ ΤΟ REMESHING

Η αριθμητική προσομοίωση των διαφόρων τύπων προβλημάτων στον τομέα των κατεργασιών είναι το πρώτο βήμα για την προσέγγιση αυτών και έχει αποδειχτεί η αποτελεσματικότητά του. Ωστόσο, πολλά χαρακτηριστικά της αριθμητικής προσομοίωσης χρήζουν βελτίωσης. Ειδικότερα η εξομάλυνση κάποιων τμημάτων στα όρια του τεμαχίου τα οποία υπόκειται σε παραμορφώσεις και μειώνουν σημαντικά τον αριθμό των στοιχείων του πλέγματος. Επιπλέον, ένας εκ των προτέρων προσδιορισμός, των επαφών, ακολουθώντας μια γεωμετρική προσέγγιση θα μειώσει το χρόνο επίλυσης του προβλήματος.

Το remeshing είναι απαραίτητο για την πρόβλεψη ανεπιθύμητων διαμορφώσεων στα στοιχεία. Ο στόχος του remeshing είναι να κάνει όσο το δυνατόν πιο πολλές προσομοιώσεις στην διάρκεια τις κατεργασίας. Η διαδικασία του remeshing είναι μια σταδιακή προσέγγιση για την επαναοριοθέτηση (rezoning) του παραμορφωμένου σχήματος, σε κάθε βήμα της κατεργασίας που εξαρτάται από μεταβλητές καταστάσεις, για την σωστή αναδιαμόρφωση από το προηγούμενο παραμορφωμένο πλέγμα σε ένα νέο πιο ομοιόμορφο πλέγμα. Η ανάλυση συνεχίζεται από το νέο πλέγμα μέχρι το επόμενο στάδιο που απαιτείται remeshing.

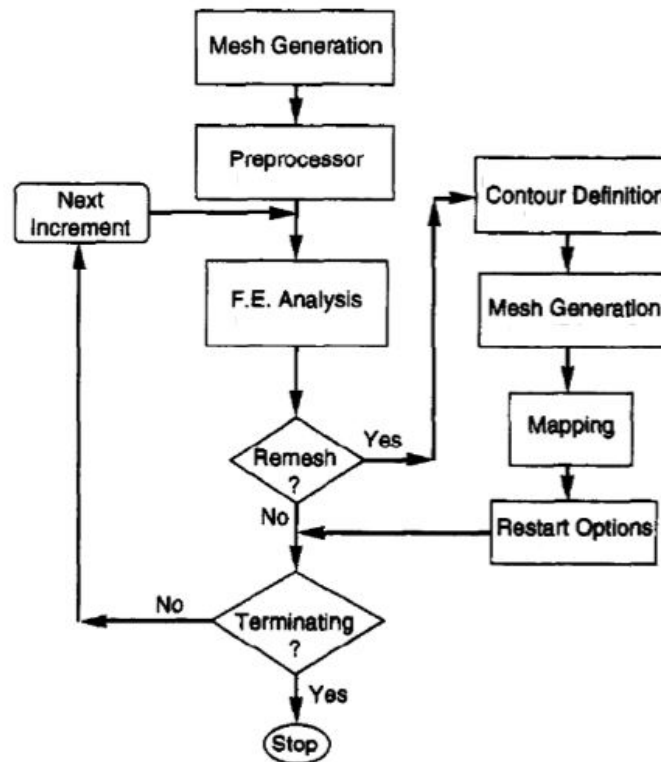
Σχηματικά, η διαδικασία του remeshing μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα βήματα:

- (1) γεωμετρικό ορισμό του τεμαχίου και του εργαλείου
- (2) δημιουργία του αρχικού πλέγματος
- (3) προσομοίωση των πεπερασμένων στοιχείων
- (4) Επιλογές παραμέτρων και κριτηρίων για το remeshing
- (5) γεωμετρικό ορισμό του παραμορφωμένου τεμαχίου (προκύπτει από τα προηγούμενα αποτελέσματα της προσομοίωσης)
- (6) δημιουργία του νέου εφαρμοσμένου πλέγματος
- (7) Η μεταφορά δεδομένων από το παλιό πλέγμα στο νέο και
- (8) αυτόματη επανεκκίνηση όταν η προσομοίωση διακοπεί

Οι κατεργασίες διαμόρφωσης και κοπής εκτελούνται με την επανάληψη των βημάτων 3-8 μέχρι η προδιαγεγραμμένη πορεία, από τον χειριστή, φτάσει στο τέλος της .

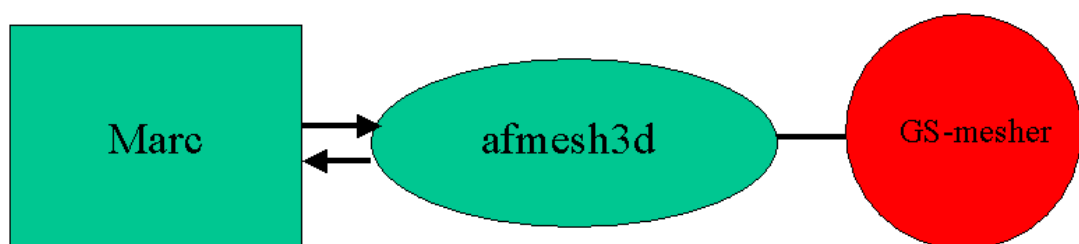
Η λειτουργία ελέγχου μίας «λούπας» (loop) περνάει μέσα από μία εντολή η οποία επικαλείται ένα άλλο πρόγραμμα. Το κάθε πρόγραμμα ασχολείται με διαφορετικές λειτουργίες, που πρέπει να εκτελεστούν. Ένα από τα σημαντικότερα βήματα για την

διαδικασία του remeshing είναι να ορίσεις τις προϋποθέσεις για την εκκίνηση του (δηλαδή ο χειριστής να ορίσει τα κριτήρια).



Σχήμα 2. 88 Διάγραμμα ροής για αυτόματο remeshing

Η λειτουργία του remeshing απαιτεί επαναοριοθέτηση (rezoning) στον τομέα των παραμέτρων στο μοντέλο. Μαζί με το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων, στην περίπτωση μας το Marc, χρειάζεται και ένα άλλο πρόγραμμα αυτόνομο το οποίο θα δημιουργεί το πλέγμα (mesh generator afmesh3d). Για την παρουσίαση της επιφάνειας και του πλέγματος το πρόγραμμα (afmesh3d) είναι συνδεδεμένο με μία “βιβλιοθήκη” (GS-Mesher), το Marc χρησιμοποιεί το Patran, που διαθέτει τις μορφές διαφόρων πλεγμάτων (π.χ. τριγωνικά, τετράπλευρα, εξαεδρικά) αλλά και τις υποπεριπτώσεις τους. Χωρίς αυτή την ακολουθία το remeshing δεν λειτουργεί σωστά.



Σχήμα 2.19 Διαδικασία μεταφοράς δεδομένων και δημιουργίας πλέγματος κατά το remeshing¹⁸

Όταν το remeshing είναι αναγκαίο το Marc δημιουργεί ένα αρχείο εισαγωγής did_bxx.fem το οποίο εξάγεται προς το πρόγραμμα που δημιουργεί το πλέγμα (afmesh3d) γίνεται η κατάλληλη επεξεργασία αυτόματα και τότε δημιουργείται ένα εισερχόμενο αρχείο jid_bxx.fem το οποίο εισάγεται στο Marc. Τα xx συμβολίζουν τον αριθμό των σωμάτων που έρχονται σε επαφή κατά την διαδικασία του remeshing¹⁸.

```

input:
  the input mesh  $M_I$  to be remeshed
  the initial remeshing result  $M_0$ 
output: mesh  $M_T$  with improved vertex locations
   $t \leftarrow 0$ 
  Fit curved PN triangles to  $M_I$ 
repeat
   $t \leftarrow t + 1$ 
  for each vertex  $v_i$  in mesh  $M_{t-1}$  do
    Project it onto curved PN triangles representing  $M_t$ 
    to get the position  $p_i$  and normal  $n_i$  
  end for
  for each edge  $e_j$  in mesh  $M_{t-1}$  do
    Calculate the edge midpoints  $m_j$ 
    Project midpoint  $m_j$  onto curved PN triangles
    representing  $M_t$  to obtain the position  $p_j$  
  end for
  for each vertex  $v_i$  in mesh  $M_{t-1}$  do
    Calculate the optimised position  $\hat{p}_i$  based on PL
    approximation 
  end for
  for each vertex  $v_i$  in mesh  $M_{t-1}$ 
    Update  $\hat{p}_i$  to minimise the spring-like energy 
  end for
  Modify  $M_{t-1}$  with updated positions  $\hat{p}_i$  to give  $M_t$ 
until  $|M_t - M_{t-1}| < \epsilon$  or  $t > t_{\max}$ 
  Return the last  $M_t$  as  $M_T$ 

```

Σχήμα 2. 20 Παράδειγμα αλγόριθμου για remeshing

2.6 ΑΝΑΓΚΗ ΧΡΗΣΗΣ REMESHING

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε την ανάγκη της χρήσης του remesh στην παραμορφωμένη γεωμετρία ενός τεμαχίου. Λόγω του χαρακτήρα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων και της προσέγγισης της πραγματικής λύσης, που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της γεωμετρίας της εκάστοτε κατεργασίας (κοπής ή διαμόρφωσης), θα υπάρχουν πάντα σφάλματα στην λύση. Για να επιτευχθεί μία πιο ακριβής λύση και μια ρεαλιστική προσέγγιση αυτά τα σφάλματα κατά την διαδικασία της ανάλυσης πρέπει να ανιχνεύονται και η ανάλυση να ξεκινάει από την αρχή με τα νέα δεδομένα. Η διαδικασία της ανάλυσης αυτής είναι η δημιουργία πλέγματος στην γεωμετρία τού τεμαχίου

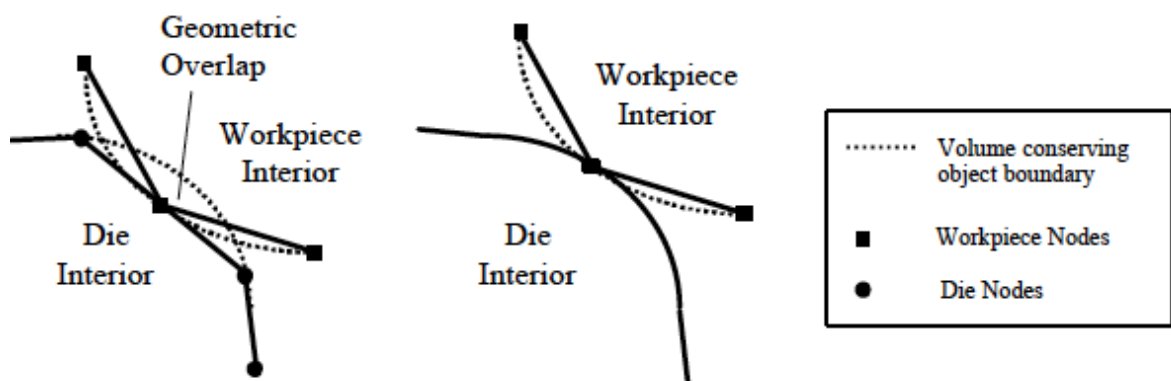
και ο εντοπισμός των σφαλμάτων όταν ξεκινάει η αναδιαμόρφωση του (remeshing). Οι βασικές πηγές των σφαλμάτων στις κατεργασίες είναι:

- Στην προσέγγιση της γεωμετρίας
- Στην παραμόρφωση των στοιχείων
- Στην διακριτοποίηση του πλέγματος
- Στην επαναοριοθέτηση του πλέγματος

Παρακάτω θα εξετάσουμε κάθε ένα από αυτά τα είδη αλλά και το πώς θα τα αντιμετωπίσουμε. Έτσι το αν η λειτουργία του remeshing θα μπει σε εφαρμογή θα εξαρτηθεί από τα κριτήρια και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση αυτών των σφαλμάτων.

2.6.1 ΣΦΑΛΜΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

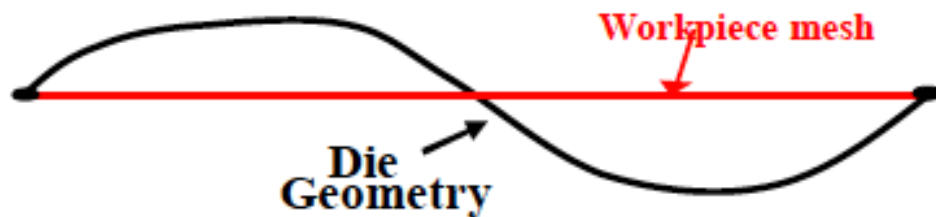
Τα σφάλματα στην προσέγγιση της γεωμετρίας υπάρχουν διότι η προσέγγιση μίας πολύπλοκης γεωμετρίας με το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων είναι δύσκολο να ταυτιστούν εξ ολοκλήρου. Αυτό μας οδηγεί σε μια ανακριβής αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης εργαλείου(-μήτρας)-τεμαχίου και μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στα κριτήρια διαρροής τού τεμαχίου, για παράδειγμα μικρά ελαττώματα μπορεί να εμφανιστούν σε μία κατεργασία διαμόρφωσης, όπως να δημιουργηθεί το φαινόμενο της αναδίπλωσης, αυτό μπορεί να οδηγήσει την ανάλυση σε λάθος αποτελέσματα, λόγω απώλειας όγκου, και κατά συνέπεια σε λάθος τρόπους αντιμετώπισης.



Σχήμα 2. 21 Αλληλεπίδραση μήτρας-τεμαχίου κατά τήν προσομοίωση

Η επίδραση της γεωμετρικής προσέγγισης σχετικά με την αλληλεπίδραση μήτρας-τεμαχίου φαίνεται στο Σχήμα 2.21. Συνήθως, οι αλγόριθμοι επαφής στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων εξασφαλίζουν ότι οι κόμβοι του τεμαχίου δεν διαπερνούν τα όρια

του πλέγματος του εργαλείου(-μήτρας). Ως εκ τούτου, η έναρξη της επαφής με την κυρτή γεωμετρία μίας μήτρας θα μπορούσε να συμβεί πολύ πριν (ή μετά) ο κώδικας ανάλυσης είναι σε θέση να την εντοπίσει. Δεδομένου ότι η πλαστική παραμόρφωση είναι ένα εξαρτώμενο φαινόμενο, η χρήση μίας προσεγγιστικής λύσης θα μπορούσε ενδεχομένως να τροποποιήσει την υπολογισμένη συμπεριφορά παραμόρφωσης για το τεμάχιο. Ο λόγος για αυτό είναι ότι, ανάλογα με την τοπική καμπυλότητα της μήτρας και την διακριτοποίηση που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της περιοχής αυτής, τα τμήματα του τεμαχίου (κοντά στις υπάρχουσες περιοχές επαφής) είναι πιθανό να υποβληθούν σε περισσότερη (ή λιγότερη) παραμόρφωση πριν το πρόγραμμα καθορίσει νέα όρια επαφών. Καθώς η προσομοίωση εξελίσσεται και το πλέγμα του τεμαχίου αναδιαμορφώνεται αρκετές φορές, τα σφάλματα αυτά θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσουν σε αναδιανομή του όγκου του τεμαχίου προκαλώντας ελλιπής πλήρωση ή υπερπλήρωση στην μήτρα.



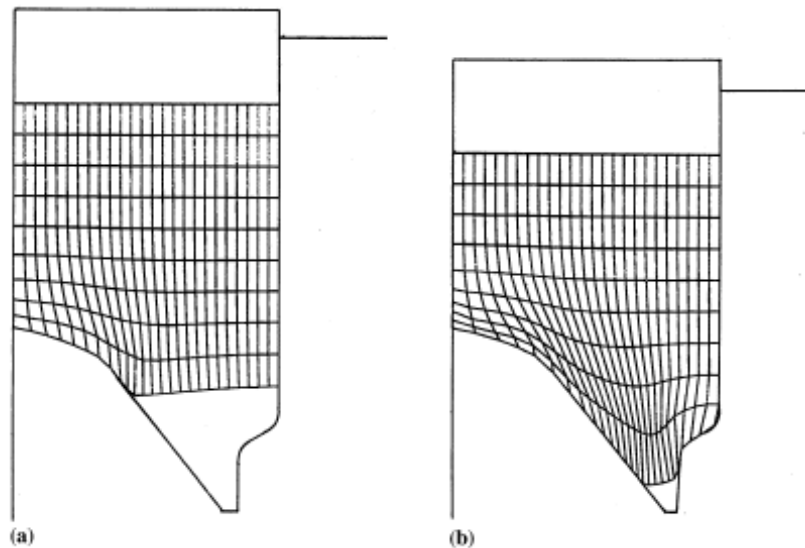
Σχήμα 2. 22 Πιθανό σφάλμα γεωμετρίας στο πλέγμα στην διάρκεια της ανάλυσης, το πλέγμα του τεμαχίου να μην ακολουθεί την γεωμετρία του καλουπιού

Μια τεχνική που βοηθά στην μείωση των γεωμετρικών σφαλμάτων είναι η βελτίωση του πλέγματος στα σημεία διαχωρισμού γύρω από την περιοχή επαφής. Αυτό οδηγεί σε ένα καλύτερο πλέγμα στις περιοχές που θα έρθει σε επαφή με μία μήτρα, καθώς η προσομοίωση προχωρά σε μια καλύτερη αντιπροσώπευση του κατεργαζόμενου τεμαχίου το υλικό διαχέεται γύρω από τις καμπύλες επιφάνειες επί της μήτρας¹⁹. Ωστόσο, αυτή είναι μία εκ των υστέρων λύση για να ελαχιστοποιήσει τα γεωμετρικά σφάλματα προσέγγισης για την επόμενη φάση της προσομοίωσης.

2.6.2 ΣΦΑΛΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το σχήμα ενός στοιχείου στο πλέγμα έχει σχέση με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, όταν τα στοιχεία υποστούν σημαντικές παραμορφώσεις τότε γίνεται πιο δύσκολη η ανάλυση αλλά και λιγότερο ακριβής. Αρκετοί ερευνητές^{20,21,22} έχουν προτείνει την δυσκαμψία των στοιχείων όταν είναι αρκετά παραμορφωμένα επίσης έχει αναφερθεί²³ ότι αυτά τα «κακοσχηματισμένα» στοιχεία δημιουργούν προβλήματα στην επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων. Για παράδειγμα για τα

τριγωνικά στοιχεία οι ερευνητές έχουν αναπτύξει τη μαθηματική ανάλυση που οδηγεί στην απαίτηση ότι η μεγαλύτερη γωνία θα πρέπει να οριοθετείται στις 180²⁴. Μία άλλη μελέτη έχει επεκτείνει την μέγιστη γωνία ως προς το κριτήριο των τετραεδρικών στοιχείων και αποδεικνύει ότι η μέγιστη γωνία όλων των τριγωνικών επιφανειών τού τετραέδρου και η μέγιστη γωνία μεταξύ των όψεων του τετραέδρου θα πρέπει να οριοθετείται πέρα από τις 180²⁵.



Σχήμα 2. 23 Κατεργασία διαμόρφωσης σε δισδιάστατη μορφή χωρίς την χρήση remeshing. Η παραμόρφωση των στοιχείων είναι εμφανής.

Η σχέση μεταξύ του παραμορφωμένου στοιχείου και της ακριβής λύσης στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα πολύπλοκο θέμα και δεν είναι πλήρως καταρτισμένο, λειτουργίες όπως της γεωμετρίας του χώρου, οι συνοριακές συνθήκες, οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν την γεωμετρία των πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ενός προβλήματος²⁶. Η πιο κοινή προσέγγιση για να εξεταστεί η επίδραση του σχήματος του στοιχείου είναι να χρησιμοποιηθεί η λειτουργία της αναδιαμόρφωσης του πλέγματος (remeshing) ώστε να αποφευχθεί η μεγάλη στρέβλωση των στοιχείων στο πλέγμα.

Για να είναι έγκυρη, η παραμόρφωση των στοιχείων σε ένα πλέγμα πρέπει:²⁶

- Να υπολογιστεί η απόκλιση του στοιχείου στον φυσικό χώρο (x, y, z) για κάθε στοιχείο σε έναν υπολογιστικό χώρο (ξ, η, ζ)
- Να υπάρχει ευαισθησία των στοιχείων σε επιμήκυνση και διάτμηση

- Δεν πρέπει να επηρεάζονται από τις μετατοπίσεις τών άκαμπτων σωμάτων
- Να μή επιτραπεί η δυαδική επίλυση

Το μέτρο στρέβλωσης του στοιχείου είναι μία Ιακωβιανή μήτρα J που συσχετίζει τόν υπολογιστικό χώρο με τόν φυσικό. Δεδομένου ότι ο υπολογιστικός χώρος (ξ, η, ζ) είναι διαφορετικός από τον φυσικό (x, y, z) , για να μετατραπούν οι μεταβλητές στο χώρο σε μορφή ολοκλήρωσης, χρησιμοποιείται μια τυπική διαδικασία η οποία περιλαμβάνει την Ιακωβιανή μήτρα J .^{27,28}. Έτσι, για παράδειγμα ένα στοιχείο όγκου γίνεται:

$$dx dy dz = |J| d\xi d\eta d\zeta$$

Όταν ο καθοριστικός παράγοντας της Ιακωβιανής μήτρας J γίνεται μηδέν ή αρνητικός, η μετατροπή από το φυσικό στο υπολογιστικό πεδίο δεν είναι έγκυρη λόγω απώλειας της μοναδικότητας της χαρτογράφησης. Υπό αυτές τις συνθήκες, το τοπικό (σε έναν ορισμένο χώρο στην γεωμετρία) remesh για να αλλάξει το σχήμα τού παραμορφωμένου στοιχείου ή ένα ολικό remesh της παραμορφωμένης γεωμετρίας του τεμαχίου είναι απαραίτητο. Ενώ ένα θετικό μέτρο Ιακωβιανής μήτρας θα εξασφαλίσει την εγκυρότητα σε ένα βασικό στοιχείο και δεν θα υποδείξει το δυναμικό της αριθμητικής σκλήρυνσης όλων των στοιχείων, αυτό πιθανόν να μειώσει την ακρίβεια. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα Ιακωβιανά στοιχεία τυπικά παρακολουθούνται μόνον στα σημεία ολοκλήρωσης τους. Ως εκ τούτου, σε ορισμένες περιπτώσεις, η λύση μπορεί να εξακολουθήσει να γίνεται δεκτή ακόμη και παρουσία των στοιχείων που έχουν καταστεί άκυρα. Παρακάτω θα δούμε μερικές επιλύσεις που έχουν προταθεί για την μέτρηση των παραμορφωμένων στοιχείων.

Μία μελέτη²⁹ παρακολουθεί τη σύγκλιση της λύσης της αντίστροφης μη γραμμικής χαρτογράφησης των λειτουργιών του στοιχείου. Σε αυτή τη μέθοδο, οι τοπικές συντεταγμένες τών κόμβων βρέθηκαν από την επίλυση ενός προβλήματος αντίστροφης χαρτογράφησης, δηλαδή χαρτογράφηση από το ολικό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων (ξ, η, ζ) . Η χαρτογράφηση για το στοιχείο ορίζεται από τις εξής γεωμετρικές συναρτήσεις:

$$x = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta, \zeta)x_i, \quad y = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta, \zeta)y_i, \quad z = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta, \zeta)z_i$$

όπου x_i , y_i και z_i οι συντεταγμένες των κόμβων ενός στοιχείου με n το πλήθος των κόμβων και N η βασική συνάρτηση. Η επίλυση για ένα τετράπλευρο στοιχείο με 8 κόμβους είναι η εξής: (λόγω συμμετρίας το επιλύουμε για 4 κόμβους)

$$\begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i \xi_i & \sum x_i \eta_i & \sum x_i \zeta_i \\ \sum y_i \xi_i & \sum y_i \eta_i & \sum y_i \zeta_i \\ \sum z_i \xi_i & \sum z_i \eta_i & \sum z_i \zeta_i \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 8x - \sum x_i f(\xi, \eta, \zeta) \\ 8y - \sum x_i f(\xi, \eta, \zeta) \\ 8z - \sum x_i f(\xi, \eta, \zeta) \end{Bmatrix}$$

όπου $f(\xi, \eta, \zeta) = 1 + \xi_i \eta_i \xi \eta + \xi_i \zeta_i \xi \zeta + \eta_i \xi_i \eta \xi + \xi_i \eta_i \zeta_i \xi \eta \zeta$

Για την επίλυση τού μη γραμμικού συστήματος (3) χρησιμοποιείται μία επαναληπτική μέθοδος και έχει αποδειχθεί ότι το σφάλμα τού πεδίου (ξ , η , ζ) είναι μια συνάρτηση του αριθμού των επαναλήψεων και των γωνιών τού στοιχείου. Το ποσοστό της σύγκλισης επηρεάζεται από το μέγεθος της μεγαλύτερης γωνίας του στοιχείου και για γωνίες μεγαλύτερες από 180 η λύση δεν συγκλίνει προς τις σωστές τιμές τού πεδίου (ξ , η , ζ). Σε εφαρμογή σε δυσδιάστατο (2-D) σύστημα²⁹ υπολογίζονται οι τιμές των ξ , η σε κάθε γωνιά τού τετράπλευρου στοιχείου για να διαπιστωθεί εάν υπάρχει σημαντική παραμόρφωση. Εάν οι υπολογιζόμενες τιμές δεν είναι μέσα στο 1% μετά από 20 επαναλήψεις ενεργοποιείται η λειτουργία της αναδιαμόρφωσης του πλέγματος (remeshing).

Ο Habraken^{30,31} χρησιμοποίησε τέσσερα διαφορετικά κριτήρια για τη μέτρηση τού μέτρου στρέβλωσης για τετράπλευρα στοιχεία:

- i) το κριτήριο των τριγώνων
- ii) το κριτήριο της ακμής
- iii) το κριτήριο για την μέσα πλευρά του κόμβου
- iv) το κριτήριο λυγηρότητας

Στο κριτήριο των τριγώνων, κάθε τετράπλευρο στοιχείο χωρίζεται σε τέσσερα τρίγωνα, η επί τοις εκατό μεταβολή στην περιοχή του καθενός από τα τρίγωνα (πριν και μετά την παραμόρφωση) παρακολουθείται, παρομοίως και στο κριτήριο ακμής. Ο Habraken συνιστά μια οριακή τιμή 66% η οποία απαιτεί από τις εσωτερικές γωνίες για ένα τετράγωνο / ορθογώνιο (90°) να κυμαίνεται στις 30°-150°, κατά την παραμόρφωση. Για το κριτήριο ακμής επισημαίνεται ότι η χρήση μιας ποσοστιαίας τιμής για μια επιτρεπόμενη μεταβολή μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα. Είναι πιθανό ότι στο αρχικό πλέγμα (ειδικά μετά από remeshing) τα στοιχεία θα έχουν εσωτερικές γωνίες μεγαλύτερες τών 90°. Για παράδειγμα, εάν η

μεγαλύτερη εσωτερική γωνία για ένα στοιχείο είναι 120 , το αποδεκτό εύρος αλλάζει σε 40 - 180 . Το κριτήριο για την μέσα πλευρά του κόμβου και το κριτήριο λυγηρότητας ορίζονται μόνο για να εφαρμόζονται σε ανώτερης τάξης ισοπαραμετρικά στοιχεία.

Επιπροσθέτως προς τα ανωτέρω μέτρα παραμόρφωσης στοιχείων, αυτό που αναλύει ο Habraken είναι το να προκαλέσει remesh μόνο μετά την ανίχνευση ενός επαρκούς αριθμού παραμορφωμένων στοιχείων, σε αντίθεση με άλλες τεχνικές^{19,29} όπου ένα remesh μπορεί να ενεργοποιείται όταν ένα από τα κριτήρια στρέβλωσης στοιχείων αποτυγχάνει. Χρησιμοποιεί δύο δείκτες που υπολογίζουν το ποσοστό των αλλοιωμένων στοιχείων και το ποσοστό της περιοχής των διαστρεβλωμένων στοιχείων, όπου τα στρεβλωμένα στοιχεία είναι εκείνα για τα οποία κανένα από τα μέτρα στρέβλωσης που εξηγήθηκαν παραπάνω δεν θα είναι εκτός από το εύρος των ορίων³².

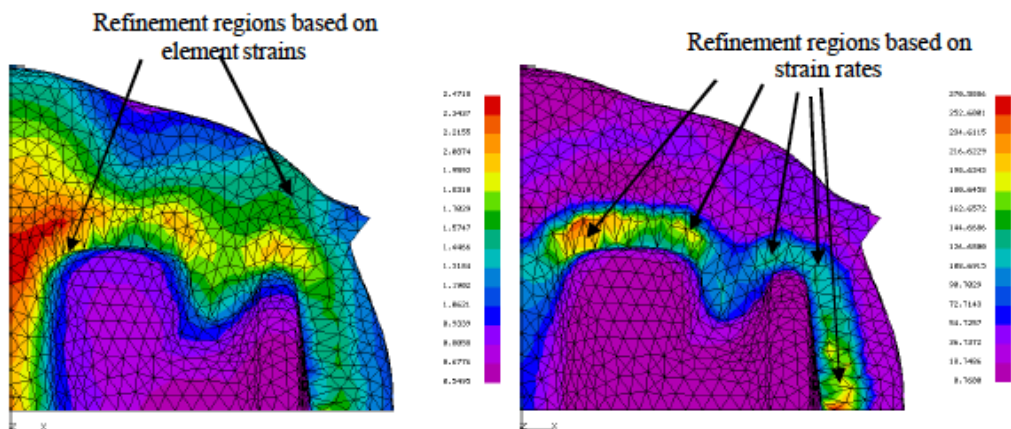
Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτών των δεικτών για να προκαλέσει remesh δεν είναι σαφές, δηλαδή εάν ένα στοιχείο θεωρείται ότι είναι παραμορφωμένο όταν αποτυγχάνει κάθε ένα από τα παραπάνω κριτήρια, τότε το να μην γίνει remesh όταν το πρώτο στοιχείο αποτυγχάνει να ικανοποιήσει ένα από τα παραπάνω κριτήρια θα αυξήσει το σφάλμα στην λύση. Ωστόσο ακόμα και αυτή η μελέτη βγάζει σε πολλά αδιέξοδα.

Καθώς προχωράμε βλέπουμε ότι για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων παραμόρφωσης των στοιχείων συναντούμε ένα μεγάλο φάσμα παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Σήμερα όλα τα «εμπόδια» που συναντούμε στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία έχουν ενσωματωθεί στα προγράμματα ως κριτήρια και παράμετροι και μπορεί ο χειριστής να τα αντιμετωπίσει με ευκολία. Ωστόσο είναι ένα κομμάτι της ανάλυσης το οποίο οι ερευνητές συνεχίζουν να το μελετούν για την βελτίωση του.

2.6.3 ΣΦΑΛΜΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Τα σφάλματα διακριτοποίησης του πλέγματος ορίζονται ως σφάλματα στην λύση λόγω της χρήσης ειδικών βασικών λειτουργιών σε μεμονωμένα στοιχεία. Υπάρχουν συγκεκριμένες διαδικασίες που, συνήθως, χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν τις περιοχές όπου αυτά τα σφάλματα υπερβαίνουν το επιθυμητό όριο. Μία τεχνική είναι να χρησιμοποιηθούν μαθηματικές εξισώσεις για να υπολογιστούν εκ των υστέρων οι εκτιμήσεις των σφαλμάτων για μια δεδομένη διακριτοποίηση, μία δεύτερη είναι να χρησιμοποιηθούν οι δείκτες του σφάλματος ώστε να προσδιορίσει τις περιοχές όπου η βελτίωση του πλέγματος θα είναι απαραίτητη. Η χρήση τυποποιημένων στοιχείων καταλήγει σε ένα ασυνεχές πεδίο λύσεων για τις δευτερεύουσες μεταβλητές, αυτές οι λύσεις είναι πιθανό να καταλήγουν σε λογικούς δείκτες σφάλματος για γραμμικά προβλήματα^{33,34}. Στις περιοχές που τα στοιχεία μεταξύ τους έχουν μεγάλες διαφορές αυτόματα γίνονται υποψήφιος περιοχές που θα

υποστούν αναδιαμόρφωση(remeshing)^{19,35}. Αρκετές εφαρμογές για την τεχνική ένδειξης σφάλματος στην διακριτοποίηση, στις κατεργασίες διαμόρφωσης και κοπής, έχουν αναλυθεί και τεκμηριωθεί^{30,31,36}. Οι περισσότερες από αυτές βασίζονται στο μοντέλο προσέγγισης που προτείνουν οι Zienkiewicz και Zhu³⁷ όπου νόρμα σφαλμάτων υπολογίζεται με βάση τη διαφορά μεταξύ τού πεδίου των πεπερασμένων στοιχείων και ενός βελτιωμένου πεδίου λύσης. Η πρώτη μελέτη^{37,38} χρησιμοποιεί την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για να καθορίσει το βελτιωμένο πεδίο, ενώ η επόμενη μελέτη³⁸ εκτελεί την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων σε μεμονωμένα στοιχεία και καθορίζει τις τιμές στους κόμβους.



Σχήμα 2. 24 Στην πρώτη περίπτωση βλέπουμε όλα τα στοιχεία να έχουν υποστεί διακριτοποίηση κατά το remeshing ενώ στην δεύτερη μόνο η περιοχή με τις μεγαλύτερες καταπονήσεις

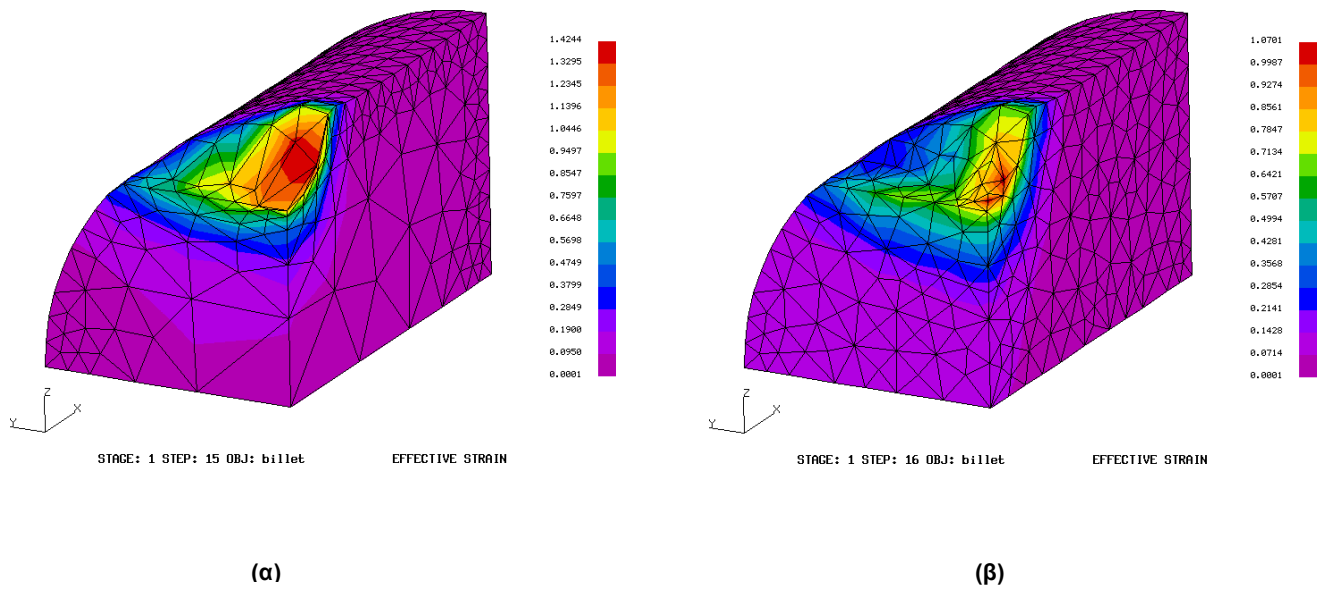
Οι διαδικασίες ένδειξης σφάλματος συνήθως εκτελούνται γρήγορα και αξιολογούν ποιά τεχνική είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό της περιοχής που χρειάζεται το remeshing. Αυτό μας βοηθάει στο να έχουμε ένα ποιοτικό μέτρο σφάλματος σε διαφορετικές θέσεις. Δεδομένου ότι τα σφάλματα στο πλέγμα σχετίζονται με την εξίσωση των συνοριακών συνθηκών³⁹, η εξίσωση των παραμορφωμένων στοιχείων συμβάλει σημαντικά στο σφάλμα του πλέγματος. Η ένδειξη του σφάλματος βασίζεται στην αλληλεπίδραση των στοιχείων για ένα αποτελεσματικό ποσοστό παραμόρφωσης. Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι το ποσοστό παραμόρφωσης παρέχει μία στιγμιαία απεικόνιση της παραμόρφωσης του τεμαχίου κατά τη στιγμή του remeshing και επιπλέον, είναι ένας χρήσιμος δείκτης της επακόλουθης παραμόρφωσης (μετά το remeshing). Μία σωστή αντιμετώπιση τού σφάλματος διακριτοποίησης επιτρέπει τον υπολογισμό της βέλτιστης χαρτογράφησης του τεμαχίου, η οποία ελαχιστοποιεί το μέγεθος του πλέγματος για μια προκαθορισμένη ακρίβεια.

2.6.4 ΣΦΑΛΜΑ ΕΠΑΝΑΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗΣ (REZONING) ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

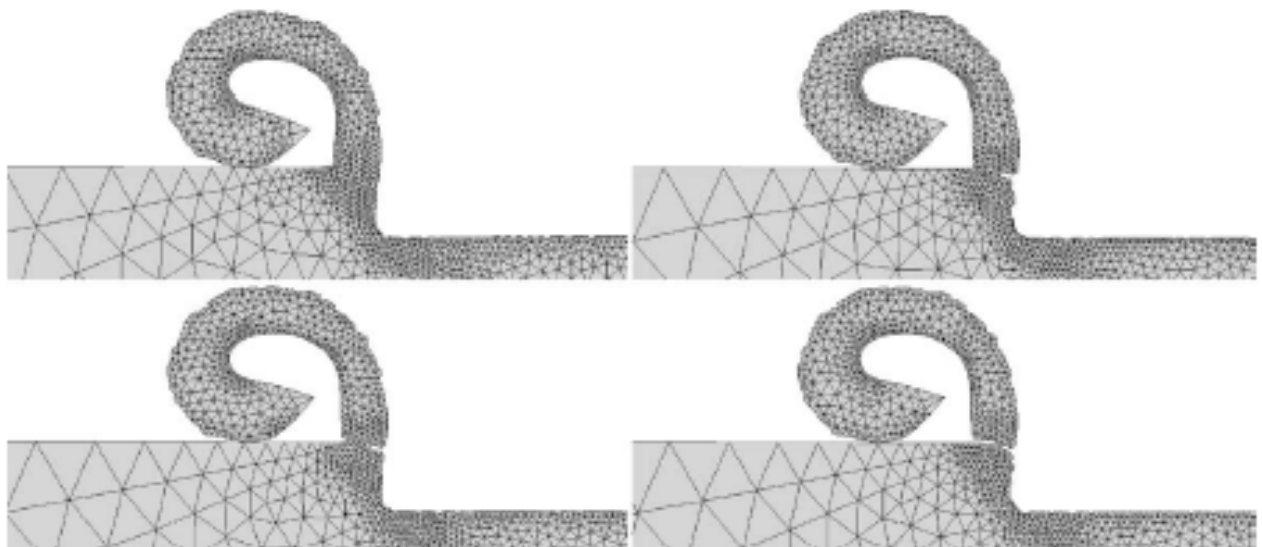
Ένα βασικό στοιχείο για την επιτυχή χρήση του remeshing στην διαδικασία ανάλυσης είναι η επίλυση των εξαρτώμενων μεταβλητών στο πλέγμα. Οι ειδικές απαιτήσεις που τίθενται κατά την διαδικασία της χαρτογράφησης εξαρτώνται από τον τύπο της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε³⁵. Για παράδειγμα, σε μια ανάλυση πλαστικής παραμόρφωσης, η κατάσταση καταπόνησης όλων των σημείων στην περιοχή παραμόρφωσης πρέπει να παραμείνει στην επιφάνεια διαρροής μετά την χαρτογράφηση. Τα σφάλματα κατά την χαρτογράφηση μπορεί να αλλάξουν το αποτέλεσμα της ανάλυσης αφού η παραμόρφωση που δέχεται μία περιοχή είναι ένα εξαρτώμενο μέγεθος.

Μια προσεκτική ανάλυση της αριθμητικής μεθόδου δίνει μια έκφραση στην οποία το σφάλμα είναι μία συνάρτηση παραμέτρων που περιλαμβάνει το μέγεθος των στοιχείων προς την δύναμη, αυτός ο εκθέτης καθορίζει το ρυθμό σύγκλισης της μεθόδου^{40,41,42}. Εάν ο ρυθμός σύγκλισης για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί μια συγκεκριμένη σειρά, θέλουμε να είμαστε βέβαιοι ότι θα χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος επαναοριοθέτησης που θα είναι της ίδιας ή ανώτερης τάξης. Εάν η μέθοδος επαναοριοθέτησης έχει κατώτερη τάξη σύγκλισης, τότε θα έχουμε μεγάλη απόκλιση, υποβαθμίζοντας έτσι την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Παρακάτω στο Σχήμα 2.25 βλέπουμε το τεμάχιο λίγο πριν το remeshing (α) και αμέσως μετά (β). Φαίνονται ακριβώς τα ίδια αλλά η τιμή της πίεσης είναι διαφορετική. Η διακύμανση στην κατανομή των στοιχείων στο τεμάχιο πριν και μετά από το remeshing μπορούν να επηρεάσουν τους υπολογισμούς διαρροής υλικού. Έτσι, κάθε φορά που γίνεται remeshing είναι πιθανό να δημιουργηθούν σφάλματα στην επαναοριοθέτηση του πλέγματος. Επομένως το πλήθος των αναδιαμορφώσεων (remeshes) επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια κατά την προσομοίωση.

Σε αυτό που καταλήγουμε είναι ότι η δημιουργία πλέγματος (meshing) αλλά και η αναδιαμόρφωσή του (remeshing) είναι μία αλληλένδετη διαδικασία πολλών παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν. Το remeshing είναι θέμα για έρευνα εδώ και πολλά χρόνια, αυτό από μόνο του μας δείχνει την ανάγκη χρήσης του σε τέτοιου είδους αναλύσεις. Το θέμα remeshing δεν είναι εύκολο για τους ερευνητές και για αυτό υπάρχουν πολλές προτάσεις για την βελτίωση του. Οι περισσότεροι ερευνητές όμως εστιάζουν στην αντιμετώπιση των τεσσάρων βασικών σφαλμάτων που προαναφέραμε. Αντιμετωπίζοντας τα σφάλματα που συναντούμε κατά την διαδικασία της ανάλυσης, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, καταλήγουμε σε μία αξιόπιστη ανάλυση η οποία προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική λύση. Αυτό μας μειώνει τον εργαστηριακό χρόνο αλλά και το κόστος της επικείμενης εργασίας. Στις κατεργασίες κοπής και διαμόρφωσης με την χρήση της λειτουργίας του remeshing, κατά την προσομοίωση, ο χειριστής κερδίζει σημαντικές πληροφορίες και μπορεί να περάσει στην παραγωγική διαδικασία με μεγαλύτερη ασφάλεια.

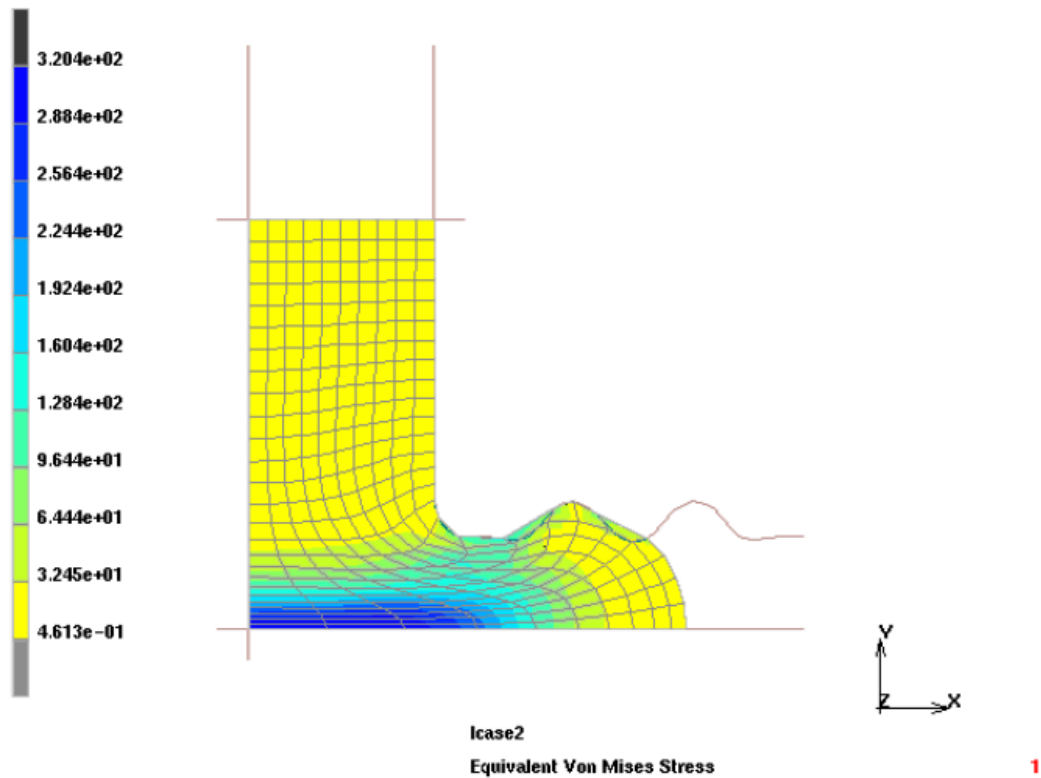


Σχήμα 2. 25 Επαναοριοθέτηση τού πλέγματος μετά από το remeshing



Σχήμα 2. 26 Χρήση remeshing σε κατεργασία κοπής

Σχήμα 2. 27 Κατεργασία διαμόρφωσης χωρίς remeshing



2.7 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ MSC.MARC¹⁸

Το remeshing/rezoning εμφανίστηκε στο Marc 2000 και γινόταν αυτόματα κυρίως σε κατεργασίες διαμόρφωσης όταν το πλέγμα αλλοιωνόταν αρκετά. Λόγω μεγάλων παραμορφώσεων, η ανάλυση σταματούσε και εδημιουργείτο ένα καινούργιο πλέγμα βάση του παραμορφωμένου σχήματος. Ένας χάρτης δεδομένων μετέφερε τα απαραίτητα δεδομένα από το παλιό στο νέο παραμορφωμένο πλέγμα. Η ανοχή επαφής μεταξύ τεμαχίου-εργαλείου(-καλουπιού) αν δεν την καθορίσει ο χειριστής υπολογίζεται ξανά όπως επίσης και οι συνθήκες επαφής. Έτσι γινόταν το αυτόματο remeshing.

Στην συνέχεια η δυνατότητα προσομοίωσης κατεργασιών κοπής εμφανίστηκε το 2003 με τα εξής χαρακτηριστικά:

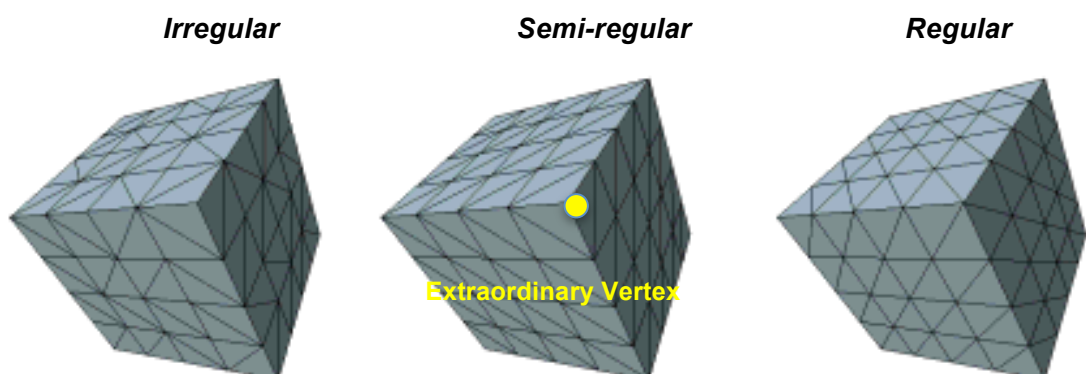
1. Διασύνδεση μεταξύ Marc και CAD/NC δεδομένων που περιγράφει το σχήμα κοπής και την διαδρομή κοπής
2. Εντοπισμός επαφής πλέγματος και κοπτικού εργαλείου

3. Αυτόματη απενεργοποίηση των στοιχείων που έχουν αποκοπεί
4. Οπτικοποίηση της διαδικασίας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μετά την επεξεργασία της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων.

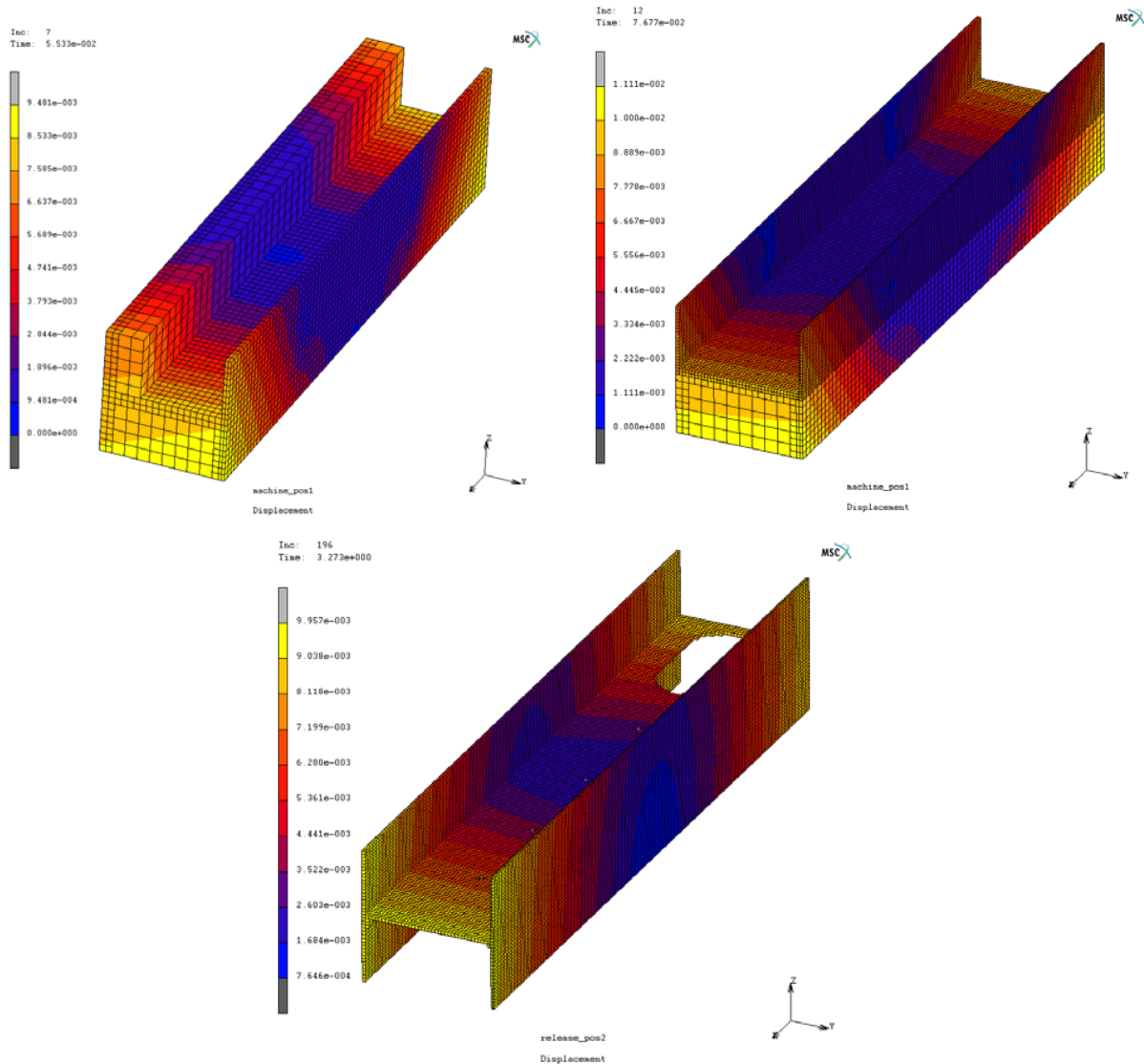
Από την έκδοση του 2007 και στην τρέχουσα έκδοση του Marc, μια σειρά από πρόσθετες βελτιώσεις έχουν γίνει για να βελτιωθεί η ακρίβεια, η υπολογιστική αποδοτικότητα και η ευχρηστία. Εν ολίγοις, οι νέες προσθήκες και βελτιώσεις αναφέρονται ως εξής:

1. Αναβαθμίστηκε η ακρίβεια του πλέγματος κατά την κατεργασία
2. Κατά την κατεργασία επίσης υπάρχει συγχρονισμός του εξαρτώμενου χρόνου επαφής και των οριακών συνθηκών μέσω του χρόνου φόρτισης (Loadcase time)
3. Οπτικοποίηση της κατεργασίας κοπής της προσομοίωσης
4. Περισσότερες επιλογές για το remeshing είναι πλέον διαθέσιμες για την ανάλυση κατεργασιών κοπής. Η ανάλυση επεκτάθηκε έτσι ώστε το σπάσιμο των στοιχείων σε regular και irregular remeshing να είναι εφικτό.
 - Υποδιαίρεση ενός στοιχείου στο μέγιστο επιτρεπτό
 - Regular remeshing: κάθε στοιχείο που θα παραμορφώνεται και θα τείνει να τέμνει το εφαπτόμενο θα υποδιαιρείται σε κάθε βήμα. (Αυτό μπορεί να προκαλέσει την αύξηση στο μέγεθος του πλέγματος και του υπολογιστικού χρόνου)
 - Irregular remeshing: κάθε στοιχείο που θα παραμορφώνεται και θα τείνει να τέμνει το εφαπτόμενο δεν θα υποδιαιρείται κατά το πρώτο στάδιο της κατεργασίας. Αλλά θα υποδιαιρείται σε ένα δεύτερο στάδιο όπου όλη η διάσπαση εκτελείται στην τελευταία βήμα της κατεργασίας. Η διαδικασία του Irregular remeshing μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικά υπολογιστικό χρόνο και μνήμη.

Παρακάτω θα δούμε παραδείγματα να δείχνουν τις δυνατότητες του Regular remeshing και του Irregular remeshing στις κατεργασίες.



Σχήμα 2.28 Απεικόνιση του Irregular, Semi-regular, και τού Regular meshing σε τρισδιάστατη μορφή με τριγωνικό πλέγμα



Σχήμα 2. 29 Διαδικασία φρεζαρίσματος με τήν χρήση regular remeshing

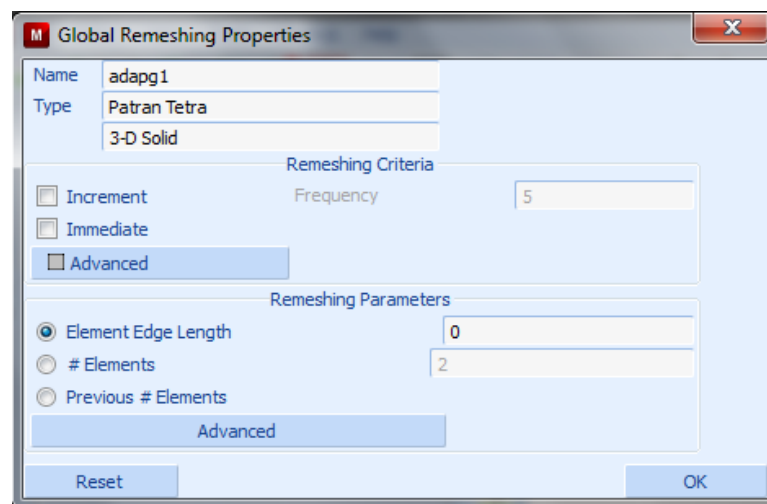
| Μέθοδος remeshing | Αριθμός αναδιαμορφώσεων | Αριθμός κόμβων | Αριθμός στοιχείων | Μνήμη MB | Χρόνος sec |
|----------------------------|-------------------------|----------------|-------------------|----------|------------|
| Regular (Each increment) | 362 | 105280 | 91200 | 1154 | 34429 |
| Irregular (Last increment) | 326 | 65892 | 51200 | 693 | 20688 |

Πίνακας 2. 30 Σύγκριση Regular με Irregular remeshing

Σε προσομοιώσεις μεγάλων παραμορφώσεων και διατμήσεων το πλέγμα αλλοιώνεται σημαντικά. Για να επιτευχθεί μια ακριβής ανάλυση θα πρέπει να ενεργοποιηθεί η λειτουργία του remeshing. Ο χειριστής είναι υποχρεωμένος να υποδείξει πότε και γιατί θα πρέπει να ενεργοποιηθεί το remeshing ελέγχοντας τα κριτήρια και τις παραμέτρους του πλέγματος και αν δεν χρειάζεται ολικό remeshing ορίζοντας και την περιοχή που θα εφαρμοστεί τοπικά.

Η διαδικασία του remeshing αποτελεί ένα εργαλείο που μπορεί να αναλύσει αυτόματα μια προσομοιωμένη κατεργασία με ευελιξία στην επιλογή των περιορισμών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Το remeshing είναι αναγκαίο για την προσομοίωση σύνθετων κατεργασιών το οποίο όχι μόνο επιτρέπει την απεριόριστη συνέχιση της ανάλυσης, αλλά και βελτιώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Για να προχωρήσουμε στην ανάλυση του remeshing θα πρέπει να δούμε τις παραμέτρους και τα κριτήρια από τα οποία εξαρτάται.

2.7.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC

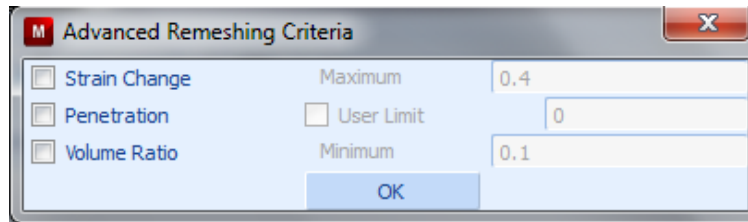


Σχήμα 2. 31 Παράθυρο ελέγχου κριτηρίων και παραμέτρων remeshing

Στην παρούσα έκδοση του Marc 2010 τα κριτήρια ελέγχου για το remeshing είναι τα εξής:

- **Increment Frequency:** Η συχνότητα προσαυξήσεως των στοιχείων, δίνει την δυνατότητα στον χειριστή να ελέγχει σε ποιο βήμα της κατεργασίας θα εκτελεστεί το remeshing .
- **Immediate Remeshing:** Αυτή η επιλογή ενεργοποιεί το remeshing πριν από το επόμενο βήμα ανάλυσης. Είναι χρήσιμο όταν θές να αλλάξεις την μορφή του πλέγματος από εξαεδρικό σε τετραεδρικό πριν ξεκινήσει η ανάλυση των

πεπερασμένων στοιχείων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν επιλογή επανεκκίνησης για να πραγματοποιηθεί άμεσα το remeshing. Επίσης, επιτρέπει την αλλαγή από εξαεδρικό πλέγμα τύπου 7 σε τετραεδρικό τύπου 157 αλλά όχι το αντίστροφο.



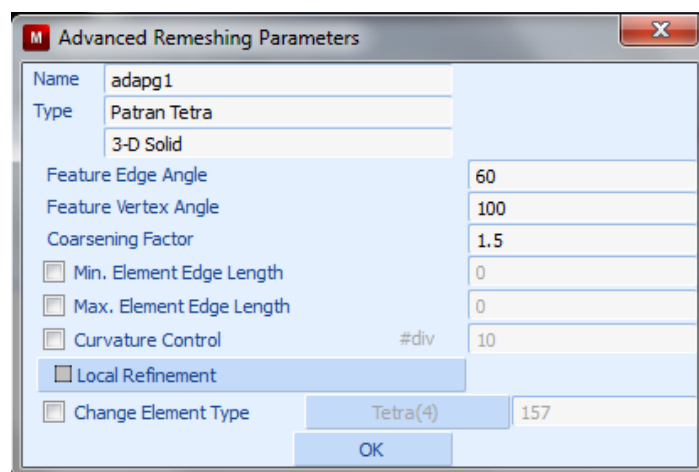
Σχήμα 2. 32 Παράθυρο ελέγχου κριτηρίων

- **Strain Change:** Κατά την κατεργασία μετά από κάθε remeshing καταγράφεται ένα συσσωρευμένο οριακό μέτρο πίεσης, μόλις η τιμή αυτή ξεπεραστεί ξεκινάει η διαδικασία του remeshing. Αυτό το κριτήριο ελέγχει το μέγεθος της παραμόρφωσης σε κάθε βήμα προσαύξησης.
- **Penetration:** Με αυτή την επιλογή ελέγχουμε την επαφή των σωμάτων (π.χ. εργαλείο – τεμάχιο). Δηλαδή όταν η διείδυση φτάσει το μέγιστο επιτρεπτό όριο εκτελείται το remeshing. Η απόσταση διείδυσης μετριέται ανάμεσα στις τριγωνικές προεξοχές των στοιχείων και σε κάθε κεντρικό σημείο στα εφαπτόμενα σώματα. Η χρησιμότητα του κριτηρίου αυτού βρίσκεται σε κατεργασίες που το τεμάχιο έρχεται σε επαφή με άκαμπτα σώματα που έχουν αιχμηρές γωνίες . Βοηθάει το σώμα που υποβάλλεται σε remeshing να διορθώσει την γεωμετρία του, σε κάθε βήμα της κατεργασίας, για να αποφευχθεί η περαιτέρω διείδυση. Σε περιπτώσεις αυτοεπαφής το κριτήριο δεν εκτελείται.
- **Volume Ratio Distortion:** Αυτό το κριτήριο ελέγχει την παραμόρφωση του κάθε στοιχείου με βάση τον όγκο του. Ο λόγος του ύψους με την βάση του τριγώνου χρησιμοποιείται για να σιγουρέψει ότι το στοιχείο βρίσκεται σε καλή κατάσταση για υπολογισμό. Το εύρος των τιμών είναι 0-1. Η τιμή 1 υποδεικνύει ένα καλό στοιχείο αντιθέτως η τιμή 0 σημαίνει ότι το στοιχείο σε επίπεδη κατάσταση το οποίο δεν ταιριάζει στην ανάλυση. Μπορεί να οριστεί από τον χειριστή μία τιμή ελέγχου για την αποφυγή μεγάλων παραμορφώσεων στα στοιχεία.
- **Force Global Remeshing:** Με την ενεργοποίηση αυτού του κριτηρίου αν εμφανισθεί, μετρηθεί, ένα κακόμορφο πλέγμα, κατά την διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας, αυτόματα το πρόγραμμα δημιουργεί νέο πλέγμα . Χρησιμοποιείται κυρίως μαζί με την αυτόματη περικοπή του χρόνου κατεργασίας. Αν το καινούργιο πλέγμα δεν βοηθάει στην ανάλυση τότε η περικοπή του χρόνου επιβάλλεται.

Δύο βασικά κριτήρια για τον έλεγχο του remeshing είναι ο ορισμός της συχνότητας προσαυξήσεων (increment frequency) και ο ορισμός του μέτρου πίεσης (strain change). Αυτά τα δύο συνδυάζονται προκειμένου να ελεγχτεί όσο το δυνατόν πιο σωστά η συχνότητα της αναδιαμόρφωσης του πλέγματος.

Οι παράμετροι που ελέγχουν το πώς θα διαμορφωθεί το καινούργιο πλέγμα είναι οι εξής:

- **Element Edge Length:** Αυτή η επιλογή ελέγχει το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος σε κάθε βήμα της αναδιαμόρφωσης, αν και το ραφινάρισμα και η εκτράχυνση των στοιχείων παρακάμπτεται.
- **Number of Elements:** Με αυτή την παράμετρο ελέγχεται ο αριθμός των στοιχείων στο καινούργιο πλέγμα δίνοντας έτσι μια κατευθυντήρια γραμμή για να οριστεί το μέγεθος των στοιχείων στο καινούργιο πλέγμα. Αν δεν οριστούν ο αριθμός των στοιχείων και κατ'επέκτασιν το μέγεθος των στοιχείων στο καινούργιο πλέγμα, δηλαδή να μην οριστούν **Number of Elements** και **Element Edge Length**, τότε θα χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία του προηγούμενου πλέγματος.
- **Previous Number of Elements:** Ενεργοποιώντας αυτή την επιλογή η δημιουργία του νέου πλέγματος θα είναι βάση με τα στοιχεία του παλιού.



Σχήμα 2. 33 Παράθυρο ελέγχου παραμέτρων

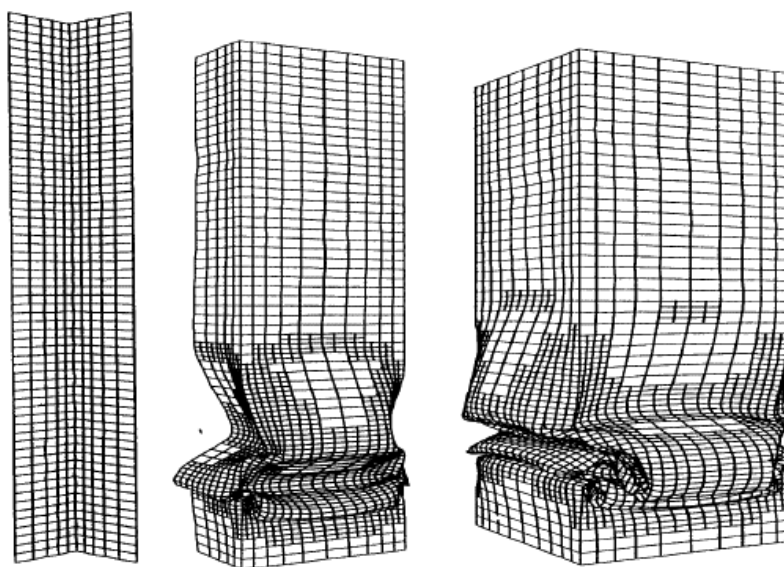
- **Feature Edge Angle:** Η παράμετρος αυτή μας επιτρέπει τον έλεγχο της γωνίας που θα πάρουν τα στοιχεία στο πλέγμα μετά το remeshing. Για 0° τα

συνδεδεμένα στοιχεία βρίσκονται σε επίπεδη επιφάνεια ενώ για 180° τα στοιχεία εφάπτονται. Μία πρότυπη τιμή είναι οι 60 .

- **Feature Vertex Angle:** Αυτό το χαρακτηριστικό μετρείται στην ένωση των δύο ακμών ,των στοιχείων. Ορίζει την μετατόπιση των κόμβων μέσα στο πλέγμα με τέτοιο τρόπο που όταν είναι 180° οι κόμβοι των στοιχείων βρίσκονται σε μία ευθεία γραμμή και όταν είναι 0° η μία γραμμή ακουμπάει την άλλη. Μία πρότυπη τιμή είναι οι 100° .
- **Coarsing Factor:** Ο συντελεστής τραχύτητας επιτρέπει στο να δημιουργηθούν μεγάλα στοιχεία στο εσωτερικό του τεμαχίου, για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας στις συνθήκες επαφής το πλέγμα συνήθως περιλαμβάνει μικρά στοιχεία στην επιφάνεια. Με το να μεγαλώνουν τα στοιχεία σταδιακά στο εσωτερικό του τεμαχίου περιορίζεται ο αριθμός των στοιχείων στην επιφάνεια. Δηλαδή μετράει το μέγεθος των στοιχείων από την επιφάνεια προ στο εσωτερικό του τεμαχίου. Μια πρότυπη τιμή είναι το 1,5 , η τιμή 1 υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει τραχύτητα στο πλέγμα, δηλαδή το ιδανικό.
- **Minimum Edge Length:** Αυτή η παράμετρος ελέγχει τα μικρά στοιχεία του πλέγματος στην επιφάνεια του τεμαχίου και είναι άμεσα συνδεδεμένη με το μέγεθος των στοιχείων. Μια πρότυπη τιμή είναι το $1/3$ του **Element Edge Length** .
- **Maximum Edge Length:** Αυτή η παράμετρος ελέγχει τα μεγάλα στοιχεία του πλέγματος στην επιφάνεια του τεμαχίου και είναι επίσης άμεσα συνδεδεμένη με το μέγεθος των στοιχείων. Μια πρότυπη τιμή είναι τρεις φορές μεγαλύτερη του **Element Edge Length**.
- **Curvature Control:** Ο έλεγχος καμπυλότητας σε μία επιφάνεια είναι πολύ σημαντικός και αυτή η παράμετρος μας δίνει αυτή την δυνατότητα. Ελέγχει τον αριθμό των τμημάτων που θα υποδιαιρεθούν και δείχνει την ευαισθησία της καμπυλότητας. Κατά το remeshing στις καμπυλωτές επιφάνειες δημιουργούνται μικρότερα στοιχεία από ότι στις επίπεδες . Σαν επιλογή στο remeshing είναι απενεργοποιημένη ενώ μια τιμή σε γενικές εφαρμογές θεωρείται το 10.
- **Change Element Type:** Αυτή η παράμετρος απαιτείται, αν ο τύπος των στοιχείων πρέπει να αλλάξει μετά το remeshing. Συνήθως χρησιμοποιείται για να γίνει το πλέγμα από τετραεδρικό σε εξαεδρικό . Προς το παρόν στο Marc είναι διαθέσιμος μόνο ο τύπος 157.

2.8 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ LS-DYNA

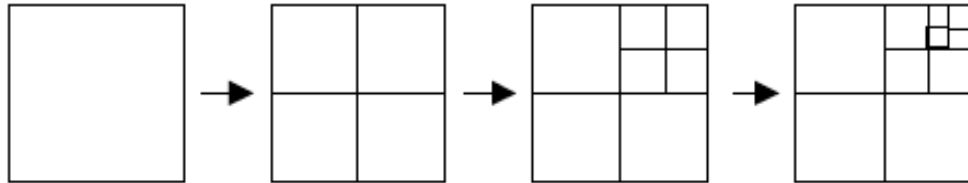
Σε μια ανάλυση με remeshing σημαίνει ότι το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων αλλάζει ή εξελίσσεται συνεχώς καθ' όλη την ανάλυση. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην μεγάλη παραμόρφωση σε ορισμένες περιοχές όπου η αρχική γεωμετρία του πλέγματος κατά την ανάλυση είναι ανεπαρκής. Ο στόχος της ανάλυσης με την μέθοδο του remeshing είναι να καταλήξει στην καλύτερη δυνατή ακρίβεια με ελάχιστη υπολογιστική προσπάθεια. Σε βέλτιστες μεταβολές του πλέγματος κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, για παράδειγμα σε μη γραμμική ανάλυση, η μέθοδος του remeshing γίνεται ακόμα πιο ευεργετική. Γενικώς, σε μία ανάλυση με remeshing η διαδικασία σύμπλεξης και συνοχής του πλέγματος βασίζεται στις εκτιμήσεις σφάλματος. Ως εκ τούτου, η εκτίμηση σφάλματος πρέπει να εκτελεστεί μετά από κάθε διαδοχικό βήμα. Η εκτίμηση σφάλματος γίνεται για κάθε στοιχείο στο πλέγμα.



Σχήμα 2. 10 Συμπίεση δοκού με χρήση remeshing

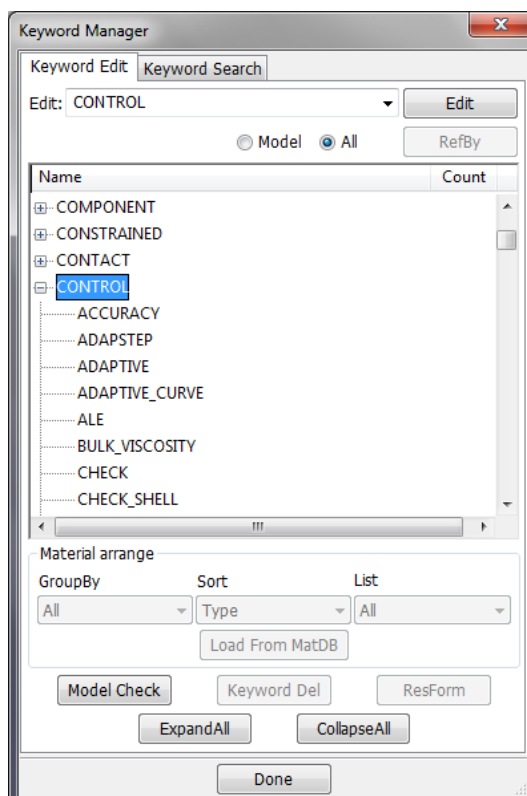
Η ανάλυση με remeshing απαιτεί την υποδιαίρεση των στοιχείων. Η διαδικασία όταν ένα στοιχείο χωρίζεται σε πολλά μικρότερα στοιχεία ονομάζεται σχάση ή διαχωρισμός, το αρχικό στοιχείο διαιρείται σε στοιχεία με πλευρές $h / 2$, όπου h είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος του αρχικού στοιχείου. Για παράδειγμα ένα τετράπλευρο υποδιαιρείται πρώτα σε τέσσερα τετράπλευρα χρησιμοποιώντας τα ενδιάμεσα σημεία των πλευρών και το κέντρο του αρχικού στοιχείου. Το LS-DYNA χρησιμοποιεί στοιχεία με τα πρότυπα των Belytschko-Lin-

Tsay. Είναι σημαντικά πιο αποτελεσματική από άλλα είδη στοιχείων και αυτό το πλεονέκτημα εξαρτάται από πολλές μαθηματικές απλοποιήσεις. Ωστόσο, λόγω αυτών των απλοποιήσεων, έχει κάποια μειονεκτήματα. Χάνει την ακαμψία σημαντικά όταν το στοιχείο είναι στρεβλό και ως εκ τούτου δεν είναι κατάλληλο για την ανάλυση σε δομές με μεγάλη παραμόρφωση.



Σχήμα 2. 11 Διαδικασία remeshing σε τετραγωνικό στοιχείο

Στο LS-DYNA ο έλεγχος της αναδιαμόρφωσης του πλέγματος γίνεται μέσα από το παράθυρο Keyword Manager. Το παράθυρο Keyword Manager είναι ο χώρος όπου δημιουργούμε τις συνθήκες μιας προσομοίωσης δηλαδή τα χαρακτηριστικά της (ταχύτητα, οριακές συνθήκες κ.λ.π.). Η εντολή CONTROL είναι προαιρετική, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αλλάξει τις προεπιλεγμένες τιμές μίας προσομοίωσης για μια πιο δραστηκή λύση, όπως ο έλεγχος της μαζικής κλιμάκωσης του κατεργαζόμενου υλικού, την αναδιαμόρφωση του πλέγματος (remeshing) για πιο ακριβή αποτελέσματα ακόμη και για μια πιο γρήγορη λύση.



Σχήμα 2. 12 Παράθυρο ελέγχου (Keyword Manager)

2.8.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA

2.8.1.1 ΕΝΤΟΛΗ CONTROL_ADAPTIVE

- **Adaptive Refinements (ADPFREQ):** Προσδιορίζει το χρονικό διάστημα που θα εφαρμόζεται το remeshing.
- **Adaptive tolerance (ADPTOL):** Η ανοχή σφάλματος σε μοίρες όταν το ADPOPT ορίζεται σε 1 ή 2.

| 1 | ADPFREQ | ADPTOL | ADPOPT | MAXLVL | TBIRTH | TDEATH | LCADP | IOFLAG |
|---|---------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| | | 1.0E+20 | 1 | 3 | 0.0 | 1.0E+20 | 0 | 0 |
| 2 | ADPSIZE | ADPASS | JREFLG | ADPENE | ADPTH | MEMORY | ORIENT | MAXEL |
| | 0.0 | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | LADPN90 | LADPGH | NCFRED | LADPCL | ADPCTL | CBIRTH | CDEATH | LCLVL |
| | 0 | 0 | | 1 | | 0.0 | 1.0E+20 | |
| 4 | CNLA | | | | | | | |
| | 0 | | | | | | | |

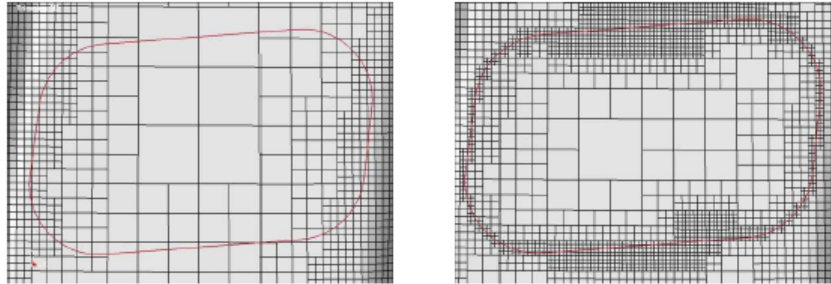
Σχήμα 2. 34 Παράθυρο ελέγχου κριτηρίων

- **Adaptive Options (ADPOPT):** Σε αυτήν την παράμετρο έχουμε επιλογές που χαρακτηρίζονται με τους εξής αριθμούς 1, 2, 3, 7 και 8. Συνδέεται άμεσα με το Adaptive Tolerance (ADPTOL) και χαρακτηρίζει τις γωνίες των στοιχείων στο πλέγμα.
 - **Επιλογή 1:** Μεταβάλλει την γωνία, σε μοίρες, σε κάθε προσαρμοστική βελτίωση σε σχέση με τα περιβάλλοντα στοιχεία. Αυτή είναι και προεπιλεγμένη από το πρόγραμμα.
 - **Επιλογή 2:** Συνολική μεταβάλλει των γωνιών, σε μοίρες, σε σχέση με τα περιβάλλοντα στοιχεία για κάθε στοιχείο που πρέπει να τελειοποιηθεί.
 - **Επιλογή 3:** προσαρμόζει το σφάλμα του κελύφους στο ενεργειακό πρότυπο (Δe), υπερβαίνει την τιμή στην επιλογή ADTOL κατά 100 φορές και υπολογίζεται ως εξής:
$$\Delta e = \left(\int \frac{\|\Delta \sigma\|^2}{E} d\Omega \right)^{1/2}$$
 όπου το E είναι το μέτρο ελαστικότητας Young. Το σφάλμα τάσης $\Delta \sigma$ είναι η διαφορά της θεωρητικής

τάσης σ^* και τής πραγματικής σ^h , $\Delta \equiv \sigma^* - \sigma^h$. Αυτή η επιλογή δουλεύει καλύτερα με στοιχεία τύπου 2, 4, 16, 18, 20.

- **Επιλογή 7:** Αυτή η επιλογή χρησιμοποιείται σε τρισδιάστατες προσομοιώσεις σε συμπαγείς στοιχεία τύπου 13, τα οποία είναι τετράεδρα, και τύπου 41. Δημιουργείται ένα νέο πλέγμα, βάση του παλαιού, με τήν προσέγγιση τής μεθόδου των τετραγώνων. Το μέγεθος του πλέγματος βασίζεται στο μέγιστο και το ελάχιστο μήκος των στοιχείων και καθορίζεται από τήν εντολή CONTROL_REMESHING. Η επιλογή αυτή βρίσκεται υπό ανάπτυξη και δεν υπάρχει βεβαιότητα αξιοπιστίας σε πολύπλοκες γεωμετρίες.
 - **Επιλογή 8:** Χρησιμοποιείται για δισδιάστατες προσομοιώσεις, αξονοσυμμετρικά προβλήματα και για επίπεδα συμπαγείς στοιχεία.
- **Maximum Level (MAXLVL):** Ορίζει τα επίπεδα βελτίωσης του πλέγματος σε κάθε βήμα αναδιαμόρφωσης (remeshing). Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 3.
 - **Time of Birth (TBIRTH):** Αυτή η παράμετρος ορίζει τήν χρονική έναρξη τής αναδιαμόρφωσης του πλέγματος και ως προεπιλεγμένη τιμή είναι 0.0.
 - **Time of Death (TDEATH):** Αυτή η παράμετρος ορίζει τήν χρονική λήξη τής αναδιαμόρφωσης του πλέγματος και ως προεπιλεγμένη τιμή είναι 1.0E+20.
 - **Curve Adaptivity (LCADP):** Η προσαρμοστικότητα του διαστήματος μεταβάλλεται ως συνάρτηση του χρόνου που δίδεται από το φορτίο τής καμπύλης. Αν αυτή η παράμετρος δεν είναι 0 τότε αντικαθιστά τήν **ADPFREQ**.
 - **Flag (IOFLAG):** Ορίζει αν στην έξοδο του αρχείου θα υπάρχει η ανάλυση τής αναδιαμόρφωσης συμπεριλαμβανομένων των εντολών NODE, ELEMENT, SHELL, BOUNDARY_, CONTACT_NODE_ και CONSTRAINED_ADAPTIVITY. Έχει δύο επιλογές 1 και 0 και η κάθε μία ορίζει τήν έξοδο ή μη του αρχείου με τήν ανάλυση. Προεπιλογή 1.
 - **Adaptive Size (ADSIZE):** Το ελάχιστο όριο πού μπορεί να έχει ένα στοιχείο βάση το μήκος πού έχουμε ορίσει (element edge length). Αν δεν οριστεί το μήκος των στοιχείων (element edge length) αγνοείται η παράμετρος αυτή. Προεπιλεγμένη τιμή 0.0.

- **Adaptivity Pass (ADPASS):** Το πάσο εφαρμογής της αναδημιουργίας διαθέτει δύο επιλογές

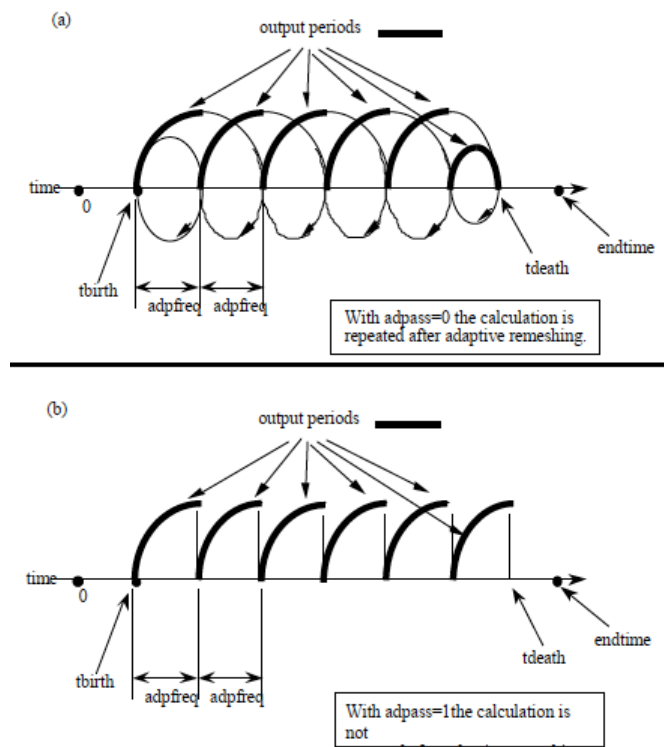


Σχήμα 2. 13 Η βελτίωση κατά μήκος μιας καμπύλης

- **Rifinement Level (IREFLG):** Ορίζει το ομοιόμορφο επίπεδο βελτίωσης του πλέγματος. Αν θέσουμε τιμές π.χ. 1,2,3 επιτρέπει την δημιουργία 4,16,64 στοιχείων, με σεβασμό προς την ομοιομορφία, για κάθε στοιχείο.
- **Adaptive Penetration (ADPENE):** Προσαρμόζει το πλέγμα, στις επιφάνειες επαφής όταν το πλέγμα του κατεργαζόμενου υλικού κατά την αναδιαμόρφωση διαπεράσει το εργαλείο.
- **Adaptive Thickness (ADPTH):** Το επίπεδο του πάχους του κελύφους στο οποίο θα πρέπει να ξεκινήσει η αναδιαμόρφωση του πλέγματος (remeshing). Προεπιλεγμένη τιμή 0 και θέτει αυτή την παράμετρο σε ανενεργεία. Αυτή η παράμετρο ενεργοποιείται όταν η ADPTOL δεν είναι μηδέν. Αν το πάχος του πλέγματος είναι το επιθυμητό χωρίς αλλαγές στις γωνίες, τότε, η επιλογή **ADPTOL** ορίζεται με μια μεγάλη γωνία.
- **Memory:** Ενεργοποιεί την αυτόματη επέκταση μνήμης και θέτει τη μνήμη του περιβάλλοντος μεταβλητή. Σημειώνεται ότι η αυτόματη επέκταση μνήμης δεν είναι πάντα 100% αξιόπιστη, ανάλογα με το επίπεδο του H/Y και το λειτουργικό σύστημα. Ως εκ τούτου, δεν είναι ακόμη σαν προεπιλογή. Εάν η μεταβλητή αυτή δεν έχει οριστεί και η χρήση της μνήμης φτάσει στο όριο αυτό, η περαιτέρω ανάλυση εμποδίζεται για να αποφευχθεί η υπέρβαση της μνήμης που ορίζεται κατά το χρόνο εκτέλεσης.
- **Orientation (ORIENT):** Επαναπροσανατολίζει το πλέγμα στην επιφάνεια επαφής μετά την αναδιαμόρφωσή του. Οι επιλογές είναι 0 και 1, με την επιλογή 0 γίνεται αυτόματα ενώ με την επιλογή 1 ανάλογα με της επιλογές που έχει κάνει ο χειριστής. Χρησιμοποιείται κυρίως για κατεργασίες διαμόρφωσης. Εάν οι βοηθητικοί κόμβοι

βρίσκονται και στις δύο πλευρές των επιφανειών επαφής, ο προσανατολισμός καθορίζεται με βάση την αρχή του "κανόνα της πλειοψηφίας". Η εμπειρία έχει δείξει ότι η αρχή αυτή δεν είναι πάντα αξιόπιστη.

- **Maximum Elements (MAXEL):** Ορίζει τον μέγιστο αριθμό των στοιχείων σε μία ανάλυση. Προεπιλεγμένη τιμή είναι 0.
- **(LADPN90):** Μέγιστος αριθμός στοιχείων που έχουν ακτίνα 90° . Για κατεργασίες λυγισμού παίρνει τιμές 4 με 6.
- **(LADPGH):** Επιτρέπει τον διαχωρισμό των γειτονικών στοιχείων. Με την τιμή 0 διαχωρίζει όλα τα γειτονικά στοιχεία ενώ με την 1 δεν διαχωρίζει κανένα γειτονικό στοιχείο.
- **(NCFRED):** Η συχνότητα διαχωρισμού των στοιχείων με βήματα σύντηξης κατά την αναδιαμόρφωση (remeshing). Οι τιμές που μπορεί ο χειριστής να θέσει είναι >1
- **(LADPCL):** Ορίζει την συγχώνευση των στοιχείων κατά των διαχωρισμό τους. Είναι άμεσα συνδεδεμένο με την παράμετρο **NCFRED**.
- **(ADPCTL):** Είναι η προσαρμοστικότητα ανοχής του σφάλματος, σε μοίρες, για την ενεργοποίηση της σύντηξης. Ακολουθεί τους ίδιους κανόνες με το **ADPOPT**.
- **Birth Create (CBIRTH):** Ορίζει τον χρόνο δημιουργίας σύντηξης. Είναι καλό το χρονικό ξεκίνημα δημιουργίας σύντηξης να είναι σε προχωρημένο στάδιο της κατεργασίας και να μη ξεκινάει από την αρχή.
- **Death Create (CDEATH):** Ορίζει τον χρόνο περάτωσης της σύντηξης.
- **(LCLVL):** Είναι η καμπύλη φορτίου που καθορίζει το μέγιστο επίπεδο βελτίωσης ως συνάρτηση του χρόνου.
- **Corner Nodes Limit Angle (CNLA):** Όριο γωνίας των γωνιακών κόμβων.



Σχήμα 2. 14 Απεικόνιση χρονικής έναρξης και λήξης μίας ανάλυσης

2.8.1.2 ENTOΛΗ CONTROL_REMESHING

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

*CONTROL_REMESHING (0)

| 1 | RMIN | RMAX | VF_LOSS | MFRAC | DT_MIN | ICURV | IADP10 | SEFANG |
|---|------|------|---------|-------|--------|-------|--------|--------|
| | | | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 4 | 0 | 0.0 |

COMMENT:

Σχήμα 2. 15 Παράθυρο ελέγχου παραμέτρων

- (RMIN): Ορίζει το ελάχιστο μήκος των ακμών των στοιχείων του πλέγματος στην

επιφάνεια που θα υποστεί τήν αναδιαμόρφωση.

- **(RMAX):** Ορίζει το μέγιστο μήκος των ακμών των στοιχείων του πλέγματος στην επιφάνεια που θα υποστεί τήν αναδιαμόρφωση.
- **Volume Fraction Loss (VF_LOSS):** Θέτει ένα όριο απώλειας όγκου των στοιχείων στο πλέγμα που αναδιαμορφώνεται. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για στοιχεία τύπου 13 και συνιστούνται οι τιμές με εύρο 0.10 – 0.30. Η απώλεια του όγκου μπορεί να οδηγήσει σε αριθμητικά προβλήματα.
- **Mass Fraction (MFRAC):** Ορίζει τήν αναλογία τής μάζας κατά τήν κλιμακωτή αύξησή της. Θέτοντας μία τιμή από 0 έως 1 ορίζεται και τότε θα ενεργοποιηθεί το remeshing.
- **(DT_MIN):** Είναι το μέγεθος του βήματος-χρόνου που απαιτείται για τήν ενεργοποίηση του remeshing.
- **(ICURV):** Καθορίζει τόν αριθμό των στοιχείων κατά μήκος τής ακτίνας του πλέγματος.
- **(IADP10): Δεν χρησιμοποιείται**
- **(SEFANG):** Καθορίζει το γωνιακό μέγεθος του πλέγματος σε τρισδιάστατα αξονοσυμμετρικά remeshing.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε παραδείγματα εφαρμογής τής αναδημιουργίας του πλέγματος σε απλές γεωμετρίες και για τα δύο προγράμματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ MSC.MARC ΚΑΙ LS-DYNA

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

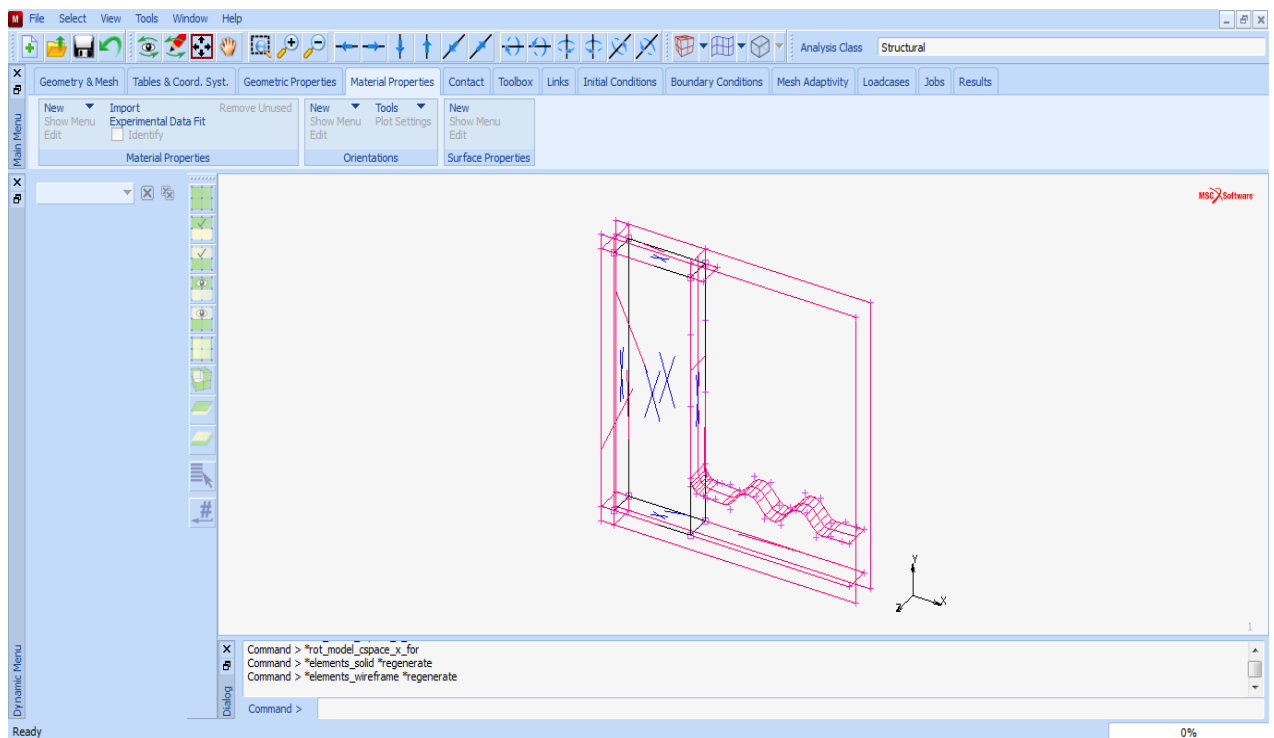
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται πολύ συχνά σε προβλήματα κατεργασιών όπως διαμόρφωσης και κατεργασίες κοπής. Τα προβλήματα που εμφανίζονται αφορούν συνήθως μεγάλες παραμορφώσεις και μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών. Το remeshing αναφέρεται σε μια αριθμητική διαδικασία στην οποία οι κόμβοι του πλέγματος κινούνται προς την βελτίωση της κατεργασίας. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι αρχικές συνθήκες της κατεργασίας διατηρούνται. Επίσης είναι πολύ αποτελεσματική στον έλεγχο του υπολογισμού του χρονικού βήματος. Ο έλεγχος της τοπολογίας των στοιχείων σε ένα πλέγμα είναι πολύ σημαντικός διότι μπορεί κανείς να δημιουργήσει τις προϋποθέσεις για τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η ανάλυση με remeshing/rezoning περιλαμβάνει την παρεμβολή και την παρέκταση των κόμβων καθώς και την ποσότητα των στοιχείων στο πλέγμα. Αυτό εισάγει προσεγγίσεις στους κόμβους και στην ποσότητα των στοιχείων και κάνει τα βήματα μετά το remeshing δύσκολα στο να συγκλίνουν. Για το λόγο αυτό, η εμπειρία δείχνει ότι πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα στο να μην γίνεται remeshing στο σώμα πάρα πολύ συχνά, να κρατηθεί σταθερός ο αριθμός των στοιχείων μέσω της παραμέτρου number of elements, να λεγχθεί το μήκος των στοιχείων μέσω της παραμέτρου element edge length ώστε το πλέγμα να μην είναι πολύ πυκνό και το μήκος των στοιχείων μετά το remeshing να παραμένει πολύ κοντά στην τιμή που έχουμε ορίσει.

Στο Marc η επαφή δύο σωμάτων λαμβάνεται υπ'οψιν μέσω περιορισμένων εξισώσεων. Οι περιορισμένες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται, για την ποιότητα της λύσης, μπορεί να εξαρτηθούν από το πόσα σώματα εφάπτονται. Γενικά τα βέλτιστα αποτελέσματα λαμβάνονται αν ο αριθμός των σωμάτων επιλέγεται έτσι ώστε σε περίπτωση επαφής δύο σωμάτων με μεγάλη διαφορά στην ακαμψία, όπως καουτσούκ με ασάλι, το πιο μαλακό σώμα να έχει τους λιγότερους περιορισμούς. Σε περίπτωση επαφής δύο σωμάτων με μεγάλη διαφορά στην πυκνότητα του πλέγματος το σώμα με το λιγότερο πυκνό πλέγμα έχει τους λιγότερους περιορισμούς. Για κάθε παραμόρφωση μεταξύ των σωμάτων μπορεί να αναφερθεί με ποια σειρά η επαφή μεταξύ τους εκτελείται από το πρόγραμμα. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό, για κατεργασίες με μεγάλες παραμορφώσεις, να σημειωθεί ότι καθιστά την σειρά της αναζήτησης ανεξάρτητη από τον αριθμό των σωμάτων που έρχονται σε επαφή και επίσης η βέλτιστη σειρά αναζήτησης μπορεί επίσης να προσδιοριστεί από το πρόγραμμα με βάση το μικρότερο element edge length. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό για μια ανάλυση με remeshing, όπου η πυκνότητα του πλέγματος μετά το remeshing να διαφέρει αρκετά σε σύγκριση με αυτό πριν το remeshing

3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ MSC.MARC

Ένα δοκίμιο από ελαστομερές υλικό, καουτσούκ, ορθογωνικής διατομής ($1,8 \times 1,2 \text{ cm}^2$) και πάχους $0,2 \text{ cm}$ θα πιεστεί από άκαμπτο εργαλείο σε καλούπι κυματωειδούς μορφής. Η προσομοίωση γίνεται σε τρισδιάστατη μορφή με το δοκίμιο να πιέζεται κατακόρυφα με ταχύτητα εμβόλου 1 cm/s . Στην παρούσα κατεργασία μόνο τα ογκομετρικά φορτία ξαναχρησιμοποιούνται αυτόματα μετά το remeshing. Η ολοκλήρωση της κατεργασίας και της ανάλυσης γίνεται σε 50 βήματα με χρονικό βήμα $0,01 \text{ s}$. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην αρχή της ανάλυσης είναι εξαεδρικά για να αποδείξουμε ότι αρχικά μπορεί να δοθεί ένα πολύ ακατέργαστο μοντέλο και στην συνέχεια τα στοιχεία πέρνουν τετραεδρική μορφή για την ευκολία της συγκεκριμένης ανάλυσης.

Παρόλο την απλή γεωμετρία που θα αναλύσουμε, χωρίς την διαδικασία του remeshing η ανάλυση θα είχε τερματιστεί πρόωρα. Αυτό οφείλεται στην υπερβολική παραμόρφωση των στοιχείων και στην αυξανόμενη πίεση μεταξύ των δύο σωμάτων (Εικόνα 2.29). Η λειτουργία του remeshing βοηθάει το αποτέλεσμα να είναι πιό κοντά στην φυσική λύση. Η ανάλυση του remeshing γίνεται με βάση το κριτήριο του penetration για την πρόληψη σοβαρών πιέσεων μεταξύ εργαλείου-δοκιμίου. Η αναδιαμόρφωση του πλέγματος χρησιμοποιεί τον έλεγχο καμπυλότητας έτσι ώστε να δημιουργούνται μικρότερα στοιχεία στις κμπυλωτές επιφάνειες. Σε αυτές τις περιοχές η ανάλυση συλλαμβάνει τις γεωμετρικές αλλαγές χωρίς να δημιουργεί υπερβολικό αριθμό στοιχείων και να καθυστερεί την ανάλυση. Ο τύπος των στοιχείων είναι 157 με το πλαίσιο της συνάρτησης Lagrangian (θέση, ταχύτητα, χρόνος).

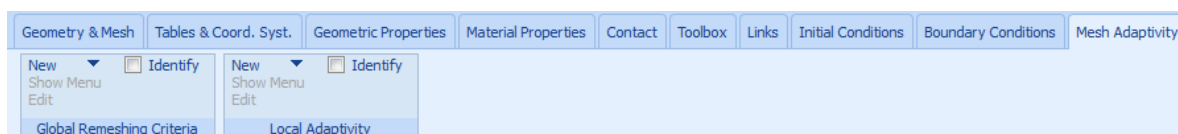


Σχήμα 3. 1 Το περιβάλλον Marc με την κατεργασία που θα αναλύσουμε

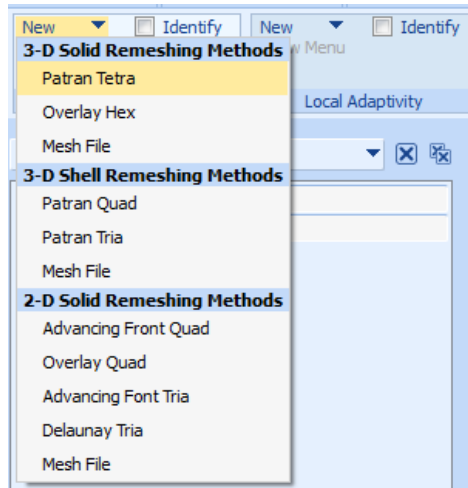
Επιλέγουμε ένα παράδειγμα για να δείξουμε τις λειτουργίες τού προγράμματος MSC.Marc. Το πρώτο βήμα είναι να ορίσουμε τις παραμέτρους αλλά και τις ιδιότητες τών υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε. Επιλέγουμε τόν τύπο αντίδρασης που θα έχουν τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε και διαλέγουμε κατά Mooney όπου είναι για κατεργασίες με υπερελαστικά υλικά για προβλήματα γραμμικού χαρακτήρα. Παρακάτω έχει διάφορες σταθερές C που πρέπει να ορίσουμε, για τήν προσαρμογή τής εκθετικής συνάρτησης στίς καμπύλες τού αρχτύπου που προσδιορίζονται κυρίως εμπειρικά. Οι δύο πρώτες σταθερές C_{10}, C_{01} προσδιορίζουν τις παραμέτρους τών υλικών για αρχέτυπα Mooney-Rivlin δύο όρων όπως στο παράδειγμά μας. Έτσι συμπληρώνουμε στο $C_{10} = 8 \text{ N/cm}^2$ (0.08 MPa) και στο $C_{01} = 2 \text{ N/cm}^2$ (0.02 MPa). Το κάθε υλικό έχει τής δικές του ιδιότητες και αντιδράσεις σε μία κατεργασία οπότε οι παράμετροι και τα κριτήρια τού remeshing θα είναι διαφορετικά. Παρακάτω στο Volumetric Behavior (Ογκομετρική Συμπεριφορά) έχουμε τήν επιλογή Bulk Modulus η οποία μετρά την αντίσταση της ύλης (τού δοκιμίου) στην ομοιόμορφη συμπίεση, το οποίο θα είναι ίσο με 10000 N/cm^2 (100MPa). Στην συνέχεια καταχωρούμε τα στοιχεία που έχουμε πρὸς κατεργασία. Σε αυτήν τήν φάση επιλέξαμε το κατεργαζόμενο υλικό που θα υποστεί το remeshing.

Η διαδικασία συνεχίζεται με το να καθορίσουμε τις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή κατά τήν κατεργασία. Δηλαδή τήν καταχώριση τού ελαστωμερούς υλικού και στην συνέχεια τήν καταχώριση τού καλουπιού και τού εμβόλου που είναι τα άκαμπτα υλικά. Στον προσδιορισμό τού εμβόλου πρέπει να ορίσουμε και τήν κατεύθυνση του εμβόλου και το μήκος τής διαδρομής του.

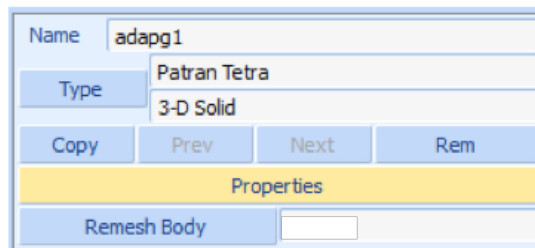
Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός τού πλέγματος (meshing) και η αναδιαμόρφωση του (remeshing). Στην καρτέλα Mesh Adaptivity επιλέγουμε από το μενού Global Remeshing τήν εντολή New->Patran Tetra(3D Solid Remeshing Method). Σε αυτό το βήμα ορίζουμε τα κριτήρια και τις παραμέτρους τής αναδιαμόρφωσης (remeshing) τού πλέγματος. Επιλέγοντας τήν εντολή Properties μας εμφανίζει το παράθυρο ελέγχου του remeshing (Global Remeshing Properties). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα στο μενού τών κριτηρίων επιλέγουμε το Immediate το οποίο μας δίνει τήν επιλογή να αλλάξουμε το πλέγμα μας από εξεδρικό σε τετραεδρικό αλλά και για να πραγματοποιηθεί άμεσα το remeshing.



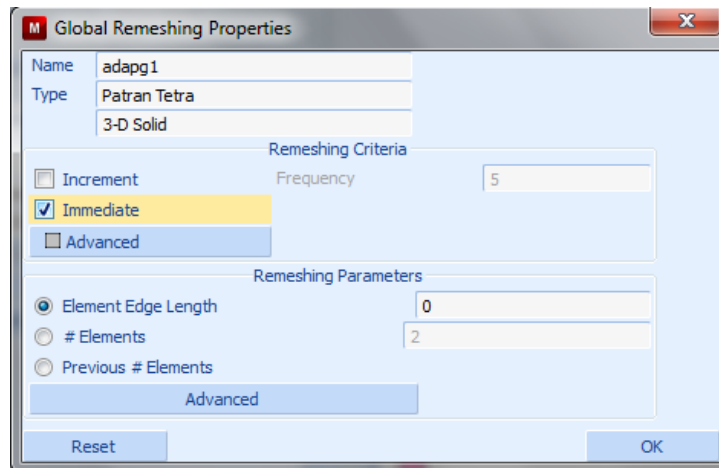
Σχήμα 3. 2 Επιλογή τής καρτέλας Mesh Adaptivity



Σχήμα 3. 3 Επιλογή τής μεθόδου αναδιαμόρφωσης.

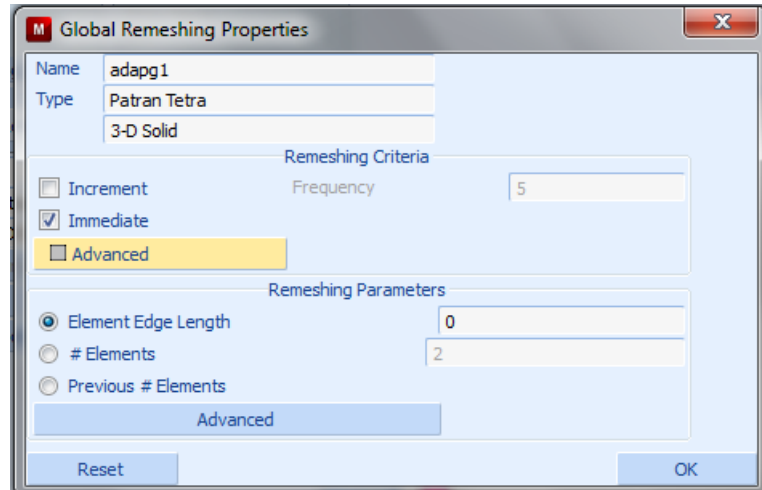


Σχήμα 3. 4 Εντολή ιδιοτήτων για το Remeshing (Properties)

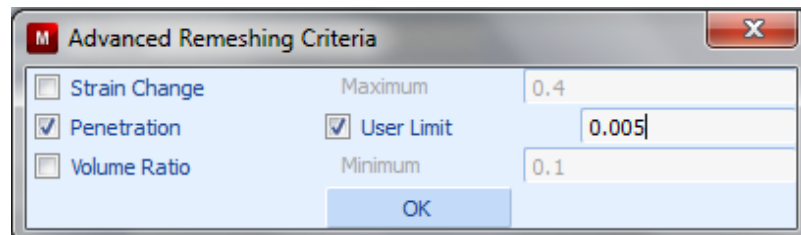


Σχήμα 3. 5 Μενού ιδιοτήτων Remeshing

Πιο αναλυτικά τα κριτήρια τα βλέπουμε στην εντολή Advance που μας εμφανίζει το παράθυρο Advanced Remeshing Critieria στο οποίο επιλέγουμε τήν εντολή Penetration και τήν εντολή User Limit και αναγράφουμε το όριο απόστασης διείσδυσης τών στοιχείων που επιθυμούμε 0.005.



Σχήμα 3. 6 Εντολή για τα κριτήρια τού Remeshing



Σχήμα 3. 7 Κριτήρια Remeshing

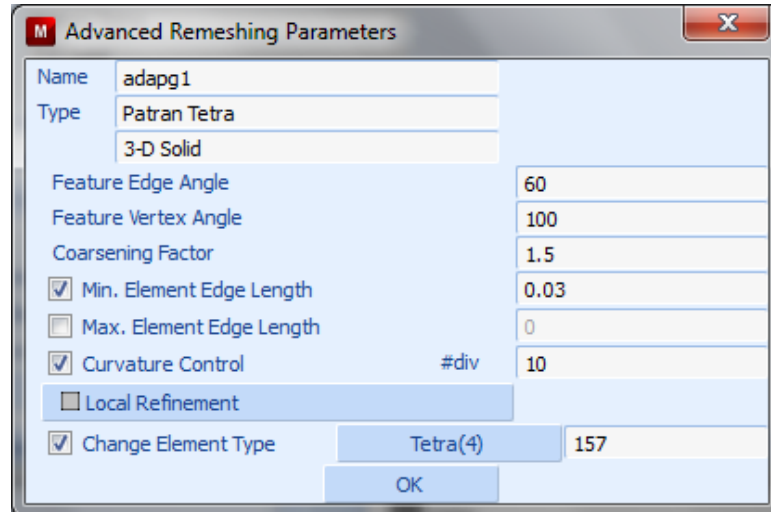
Παρακάτω θα ορίσουμε τής παραμέτρους, στο παράθυρο Global Remeshing Properties και στο μενού Remeshing Parametres θα θέσουμε αρχικά ένα όριο στο Element Edge Length τής τάξεως τού 0.1 και στήν εντολή Advance θα μας εμφανίσει το παράθυρο Advanced Remeshing Parameters στο οποίο θα ορίσουμε όρια:

Minimum Edge Length 0.03

Curvature Control 10

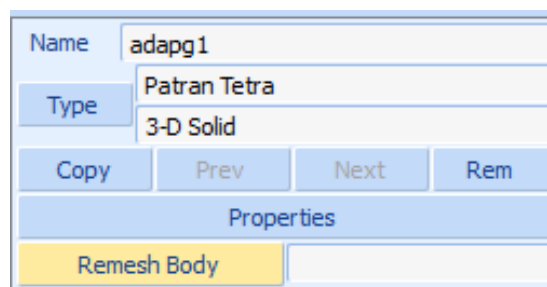
Change Element Type 157

Οι υπόλοιπες παράμετροι θα παραμείνουν στις προεπιλεγμένες τιμές που ορίζει το πρόγραμμα.

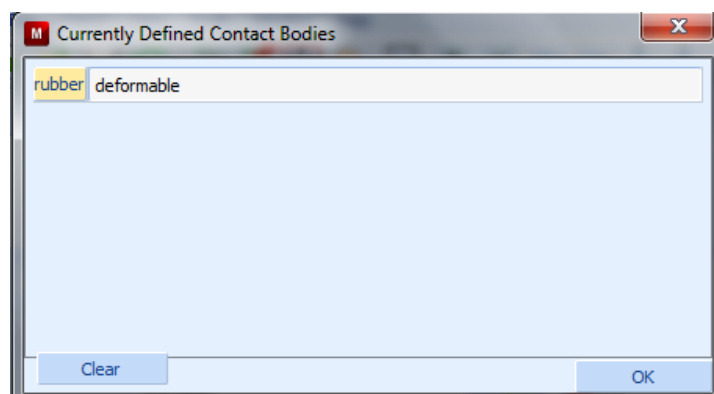


Σχήμα 3. 8 Παράμετροι Remeshing

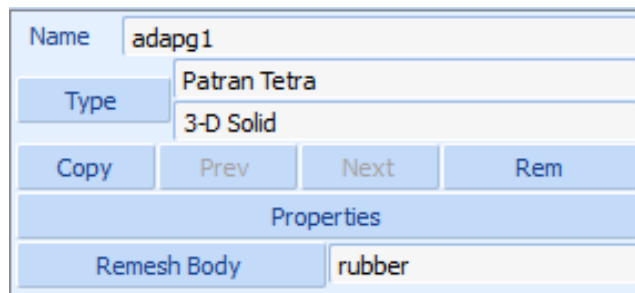
Αφού ορίσουμε τα κριτήρια και τις παραμέτρους που θέλουμε πρέπει να ορίσουμε το σώμα το οποίο θα υποστεί το remeshing. Ενώ έχουμε κλείσει το παράθυρο Global Remeshing Properties πατώντας την εντολή OK μας εμφανίζεται το αρχικό μενού επιλογών εκεί διαλέγουμε την εντολή Remesh Body και μας εμφανίζει το παράθυρο Currently Defined Contact Body το οποίο έχει μόνο μία επιλογή αυτήν που έχουμε ορίσει σαν τεμάχιο διαμόρφωσης, εύκαμπτο υλικό (Deformable), πίσω στο μενού Material Properties.



Σχήμα 3. 9 Επιλογή σώματος προς ανάλυση

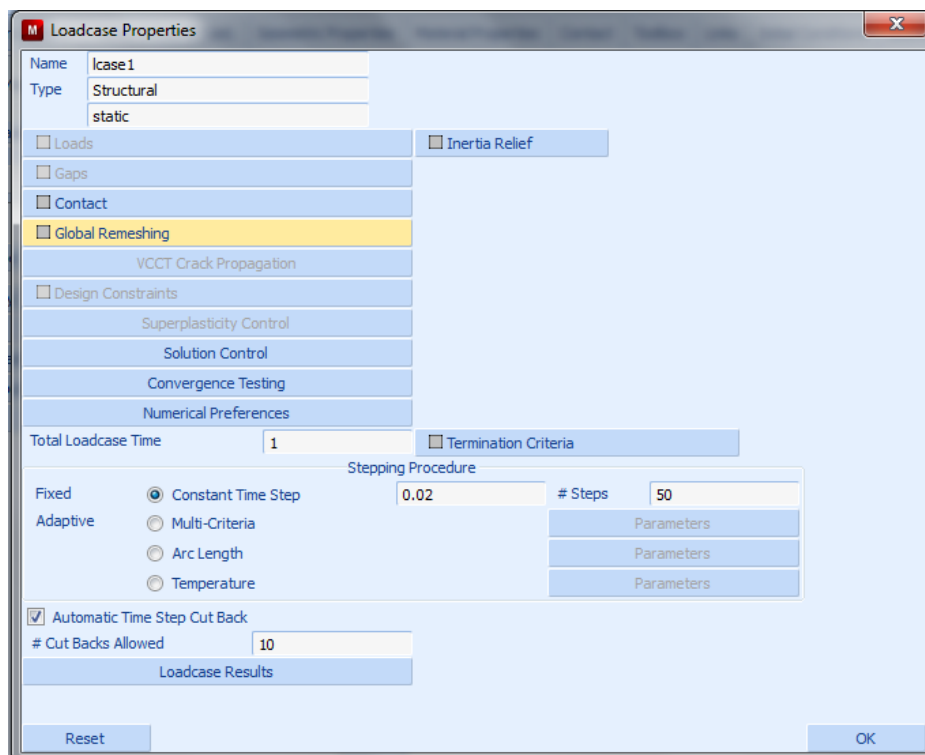


Σχήμα 3. 10 Μενου καταχωρημένων σωμάτων προς ανάλυση

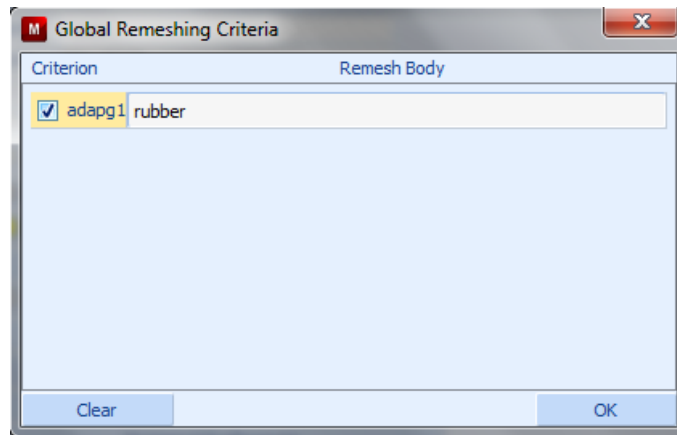


Σχήμα 3. 11 Καταχωρημένο το σώμα για την ανάλυση

Στην συνέχεια θα ορίσουμε τόν χρόνο τής κατεργασίας αλλά και τόν χρόνο τών φορτίων για να εφαρμοστεί το remeshing. Επιλέγουμε τήν καρτέλα Loadcase->New->Static->Properties->Global Remeshing->adapg1(rubber) και έτσι ορίζουμε το σώμα το οποίο θα υποστεί το remeshing.



Σχήμα 3. 12 Επιλογή καταχωρημένου δοκιμίου

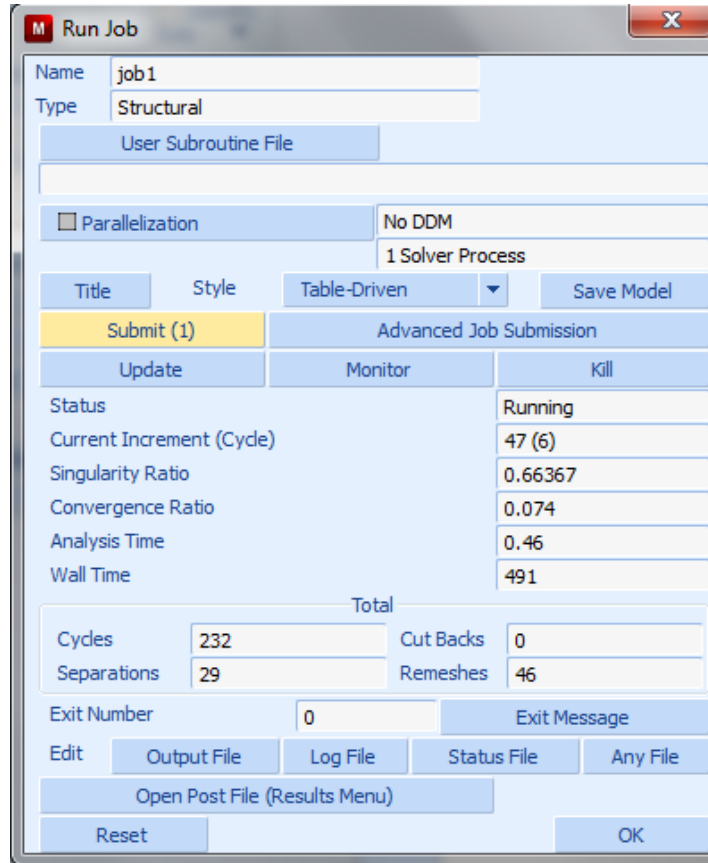


Σχήμα 3. 13 Καταχώρηση δοκιμίου

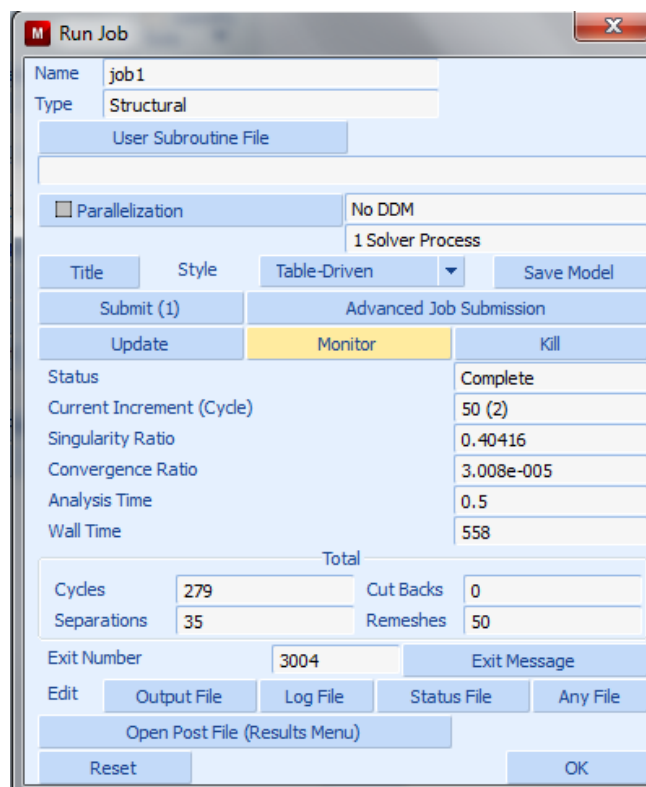
Μετά ορίζουμε την εντολή Total Loadcase 0.5s και την εντολή Constant Time Step 50. Έτσι ορίσαμε τα φορτία να τα δέχεται το τεμάχιο ανά 0.01s και η κατεργασία να κάνει 50 βήματα.

Τέλος θα πρέπει καταχωρίσουμε ένα ανώτατο όριο κόμβων αλλά και τις ιδιομορφίες της κατεργασίας. Στην καρτέλα Jobs->New->Structural->Properties εμφανίζει το παράθυρο Jobs Properties όπου εκεί επιλέγουμε την κατεργασία που έχουμε ορίσει στα προηγούμενα βήματα lcase1, μετά επιλέγουμε την εντολή Mesh Adaptivity που εμφανίζει ένα παράθυρο Mesh Adaptivity Control και βάζουμε το ανώτατο όριο τών κόμβων Max#Contact Node/Body: 2000 πίσω στο παράθυρο Jobs Properties επιλέγουμε την εντολή Analysis Option η οποία εμφανίζει ένα παράθυρο Structural Analysis Options και επιλέγουμε την επιλογή Large Strain στο μενού Nonlinear Procedure και στην συνέχεια στο μενού Displacement Spectral Density επιλέγουμε την εντολή Advance Option που μας εμφανίζει το παράθυρο Advance Analysis Option και εκεί επιλεγούμε Update Lagrange.

Επιστρέφοντας στο παράθυρο Jobs Properties και επιλέγοντας την εντολή Job Result και στο μενού Available Element Tensor επιλέγουμε Cauchy stress. Πίσω στο παράθυρο Jobs Properties ελέγχουμε το Analysis dimension να είναι 3D. Για να τρέξει η ανάλυση στο μενού Jobs επιλέγουμε την εντολή Run που μας βγάζει ένα παράθυρο Run Job και εκεί επιλέγουμε την εντολή Submit(1) για να τρέξει η ανάλυση και στην συνέχεια την εντολή Monitor για να καταχωρηθεί.

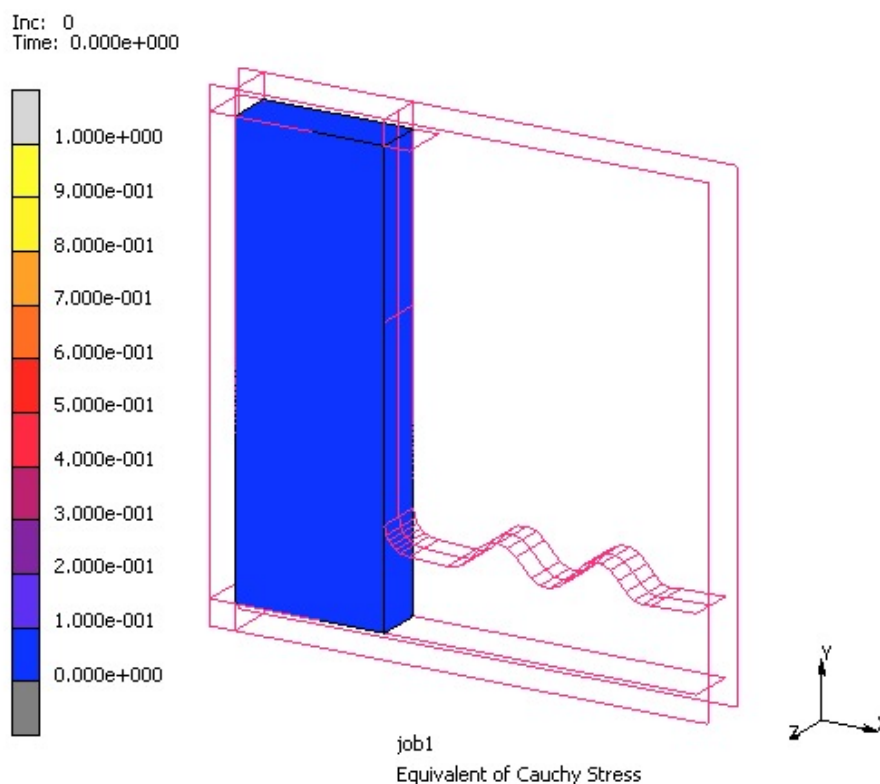


Σχήμα 3. 14 Εκκίνηση ανάλυσης



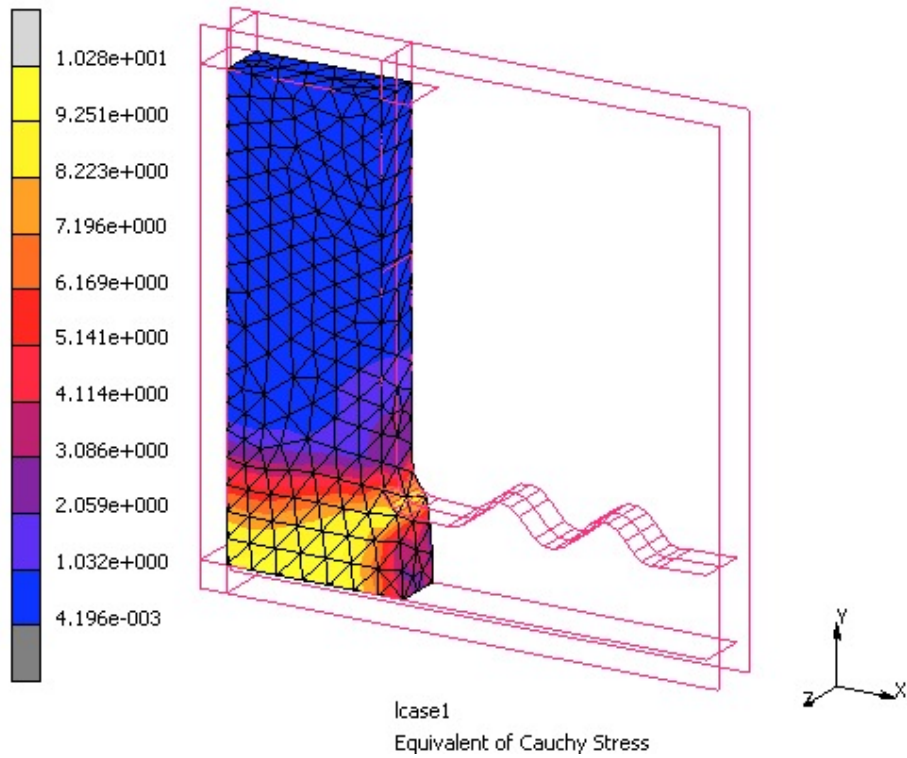
Σχήμα 3. 15 Καταχώρηση ανάλυσης

Για να δούμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης αλλά και την Animated κατεργασία διαλέγουμε την καρτέλα Result και στην εντολή File διαλέγουμε το Open Default και τότε επιλέγουμε στο μενού Deformed Shape το Deformed Only και στο Scalar Plot το Contour Bands μετά την εντολή Scalar και επιλέγουμε το Equivalent of Cauchy Stress. Το Animation θα ξεκινήσει όταν διαλέξουμε την εντολή Monitor Result File (Play) και βλέπουμε τα αποτελέσματα. Ο αριθμός των στοιχείων όταν ξεκινάει η ανάλυση είναι 2.257 και στο τέλος έχει 4.714



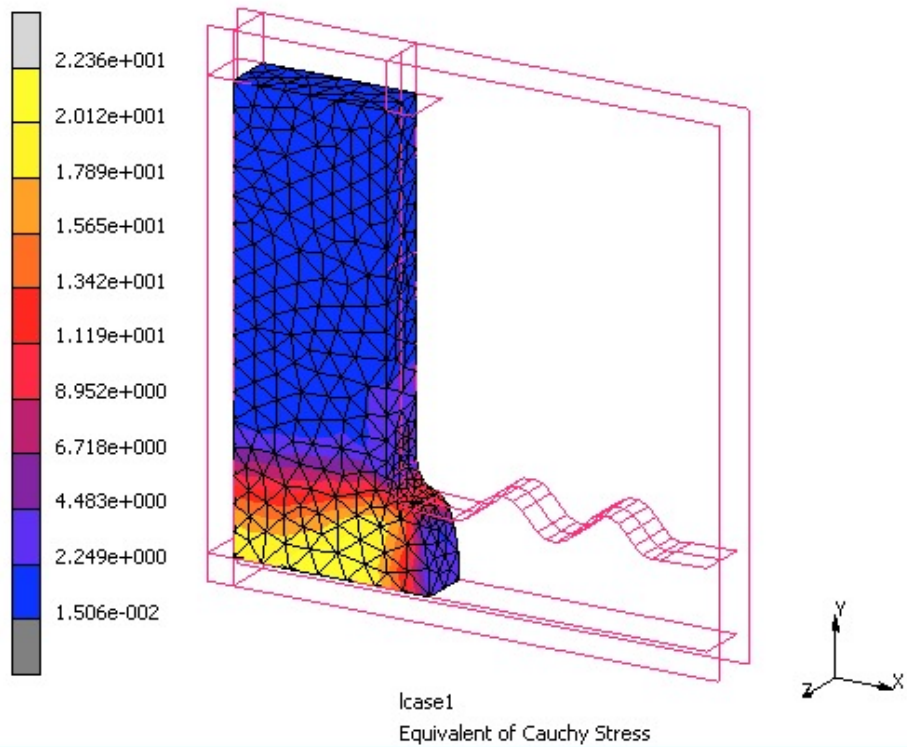
Σχήμα 3. 16 Κατεργασία διαμόρφωσης κατά την προσομίωση

Inc: 4
Time: 4.000e-002



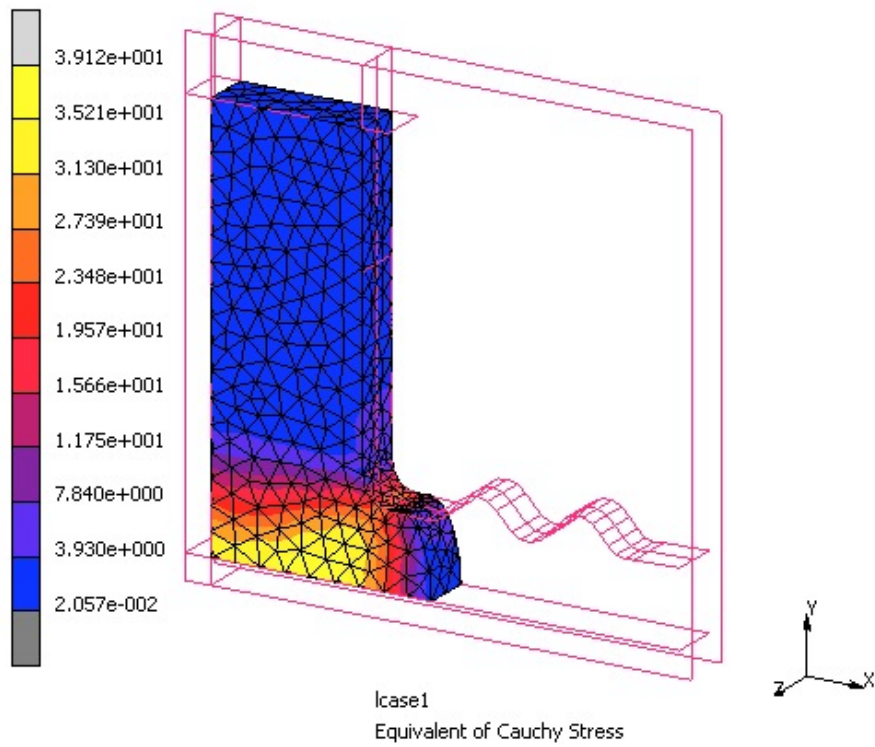
Σχήμα 3. 17 Βήμα 4 προσομοίωσης τής ανάλυσης

Inc: 8
Time: 8.000e-002



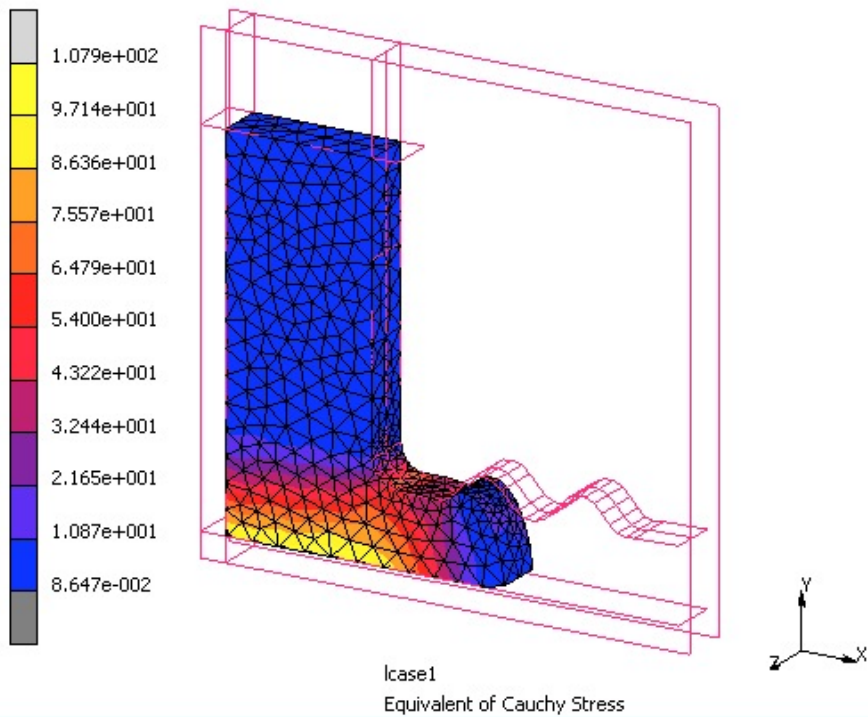
Σχήμα 3. 18 Βήμα 8 προσομοίωσης τής ανάλυσης

Inc: 13
Time: 1.300e-001



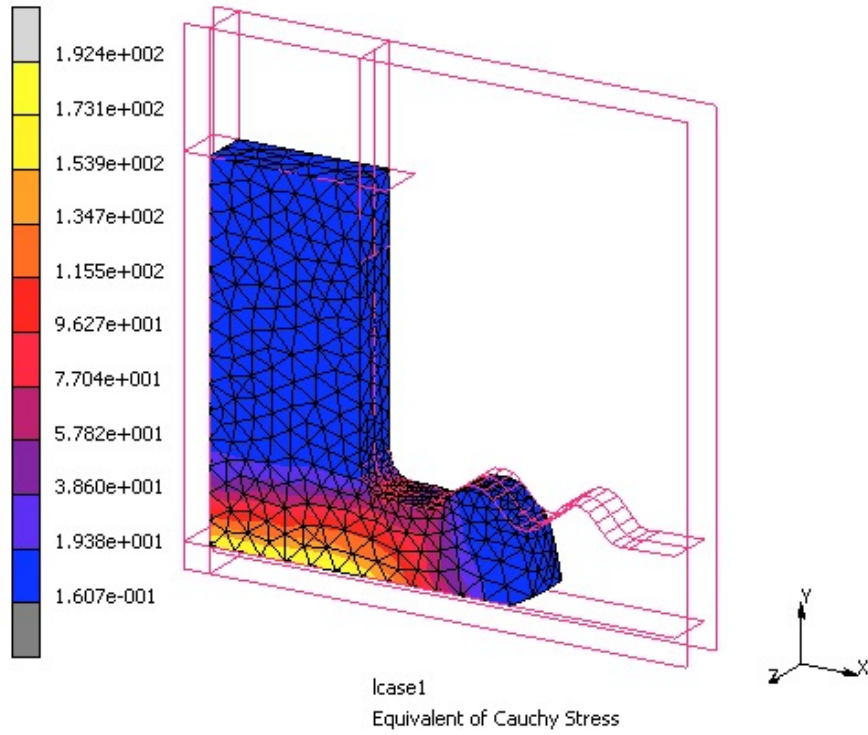
Σχήμα 3. 19 Βήμα 13 προσομοίωσης τής ανάλυσης

Inc: 27
Time: 2.700e-001



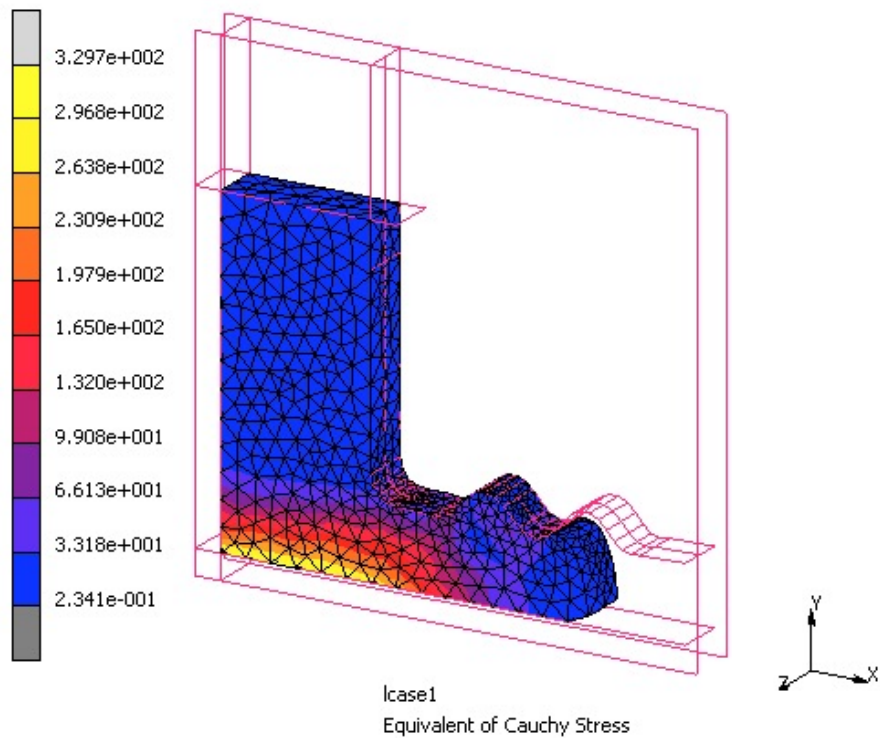
Σχήμα 3. 20 Βήμα 27 προσομοίωσης τής ανάλυσης

Inc: 37
Time: 3.700e-001

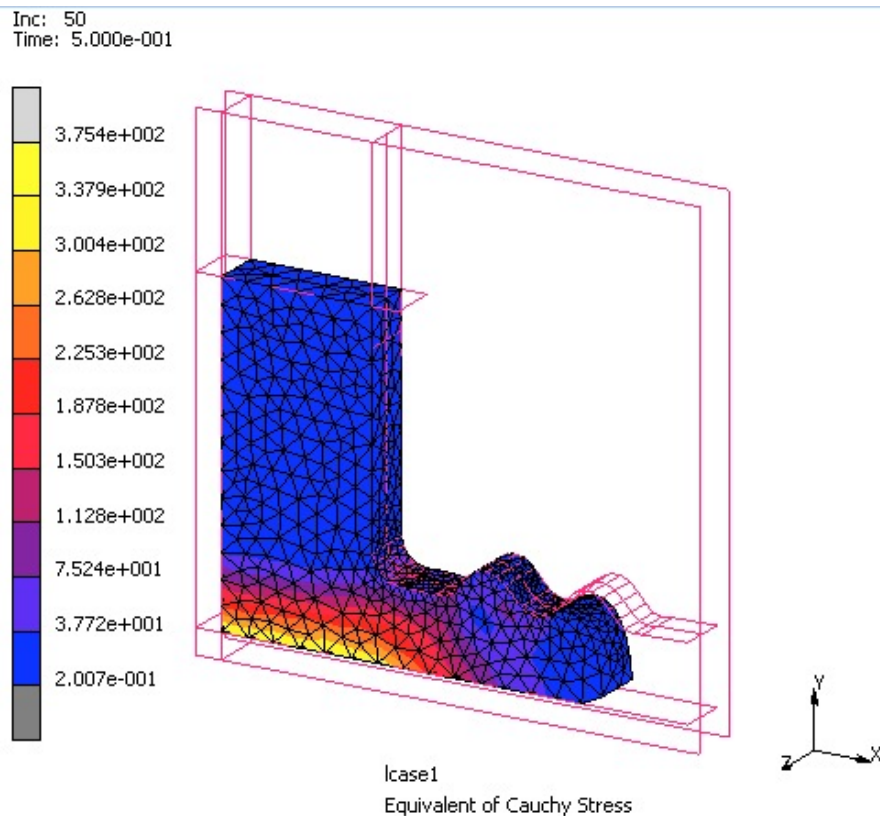


Σχήμα 3. 21 Βήμα 37 προσομοίωσης τής ανάλυσης

Inc: 47
Time: 4.700e-001



Σχήμα 3. 22 Βήμα 47 προσομοίωσης τής ανάλυσης



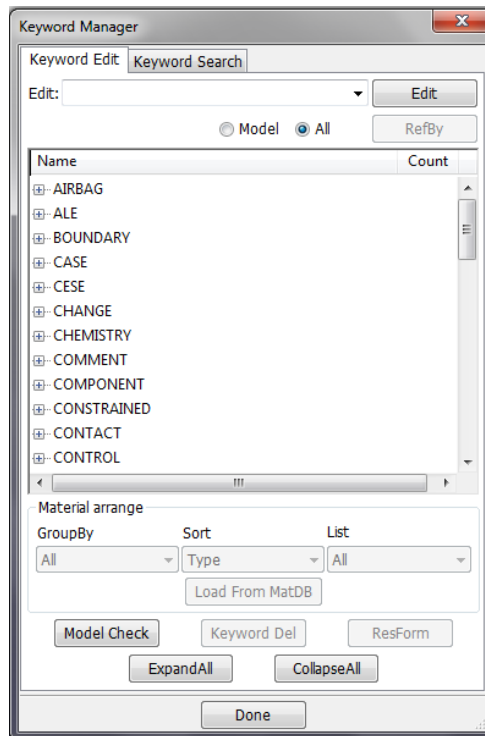
Σχήμα 3. 23 Τέλος ανάλυσης στα 50 βήματα που έχουμε ορίσει

3.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ LS-DYNA

Η διαδικασία στο LS-DYNA είναι τελείως διαφορετική, διότι ο επιλυτής της εκάστοτε ανάλυσης είναι άλλο πρόγραμμα το οποίο τρέχει ανεξάρτητα από το LS-PrePost το οποίο είναι αυτό με το οποίο ο χειριστής καταχωρεί την γεωμετρία αλλά και τα κριτήρια και τις παραμέτρους για το remeshing. Οπότε το πρώτο βήμα σε μία ανάλυση αφού έχουμε διαμορφώσει την γεωμετρία είναι να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους των επαφών τα υλικά τον χρόνο και ότι χρειάζεται μέσα απο το παράθυρο διαχείρισης λέξεις-κλειδιά (Keyword Manager).

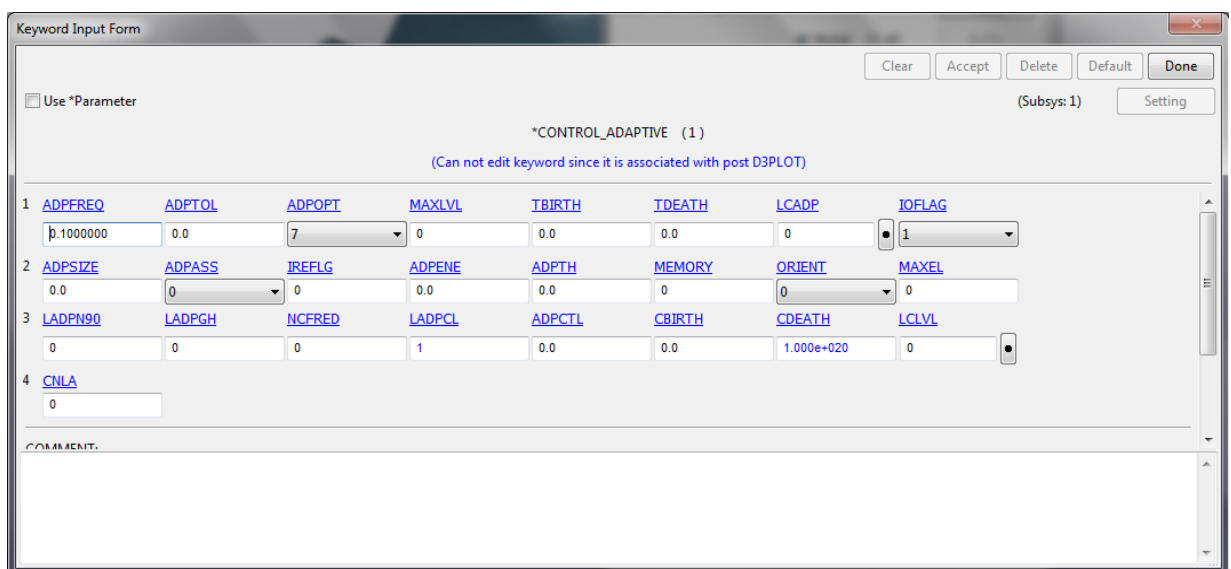
Όπως και πριν το πρώτο βήμα είναι να ορίσουμε την κατεργασία που έχουμε και σε ποιά μορφή, δηλαδή κατεργασία διαμόρφωσης με έμβολο μετά ορίζουμε τις παραμέτρους αλλά και τις ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε. Το υλικό θα έχει πυκνότητα μάζας 7830 kg/m^3 και Young's modulus $2.100 \text{ e}+011$, αυτά τα χαρακτηριστικά δείχνουν την σκληρότητα τού κατεργαζόμενου υλικού. Αφού ορίζουμε το τεμάχιο στην συνέχεια καθορίζουμε τις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή κατά την κατεργασία (τεμάχιο-έμβολο).

Στον προσδιορισμό τού εμβόλου πρέπει να ορίσουμε και την κατεύθυνση του και σε ποιόν άξονα κινείται.



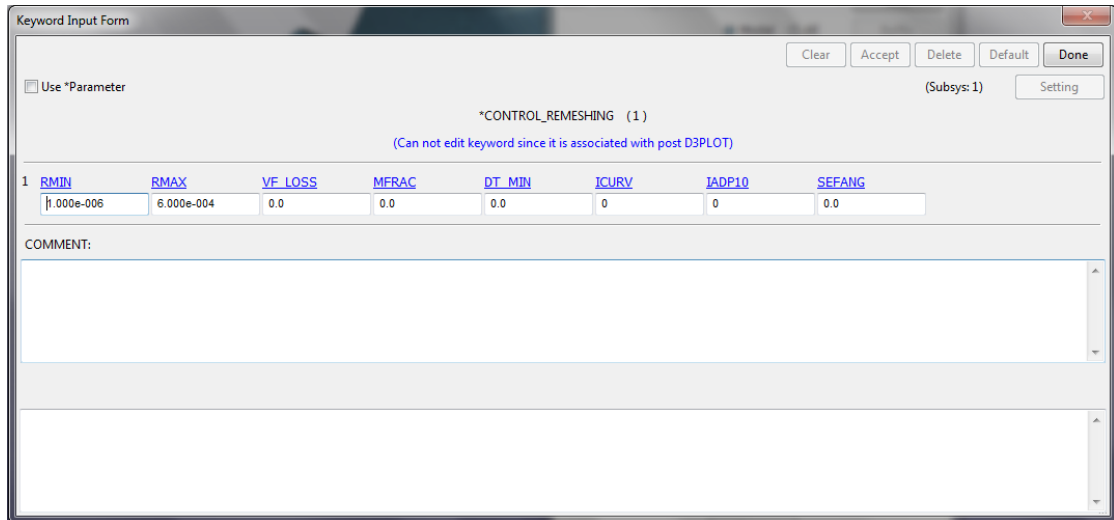
Σχήμα 3. 24 Παράθυρο διαχείρισης λέξεις-κλειδιά (Keyword Manager)

Στο παράθυρο Keyword Manager διαλέγοντας CONTROL_ADAPTIVE μπορούμε να ελέγξουμε τα κριτήρια για το remeshing. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ορίζουμε ένα χρονικό βήμα που θα εφαρμόζεται το remeshing (**ADPFREQ**) τής τάξεως 0.1s, αφού ορίσουμε τις γωνίες τών στοιχείων στο πλέγμα (**ADPOPT**) στην επιλογή 7 για στοιχεία τύπου 13, ορίζουμε



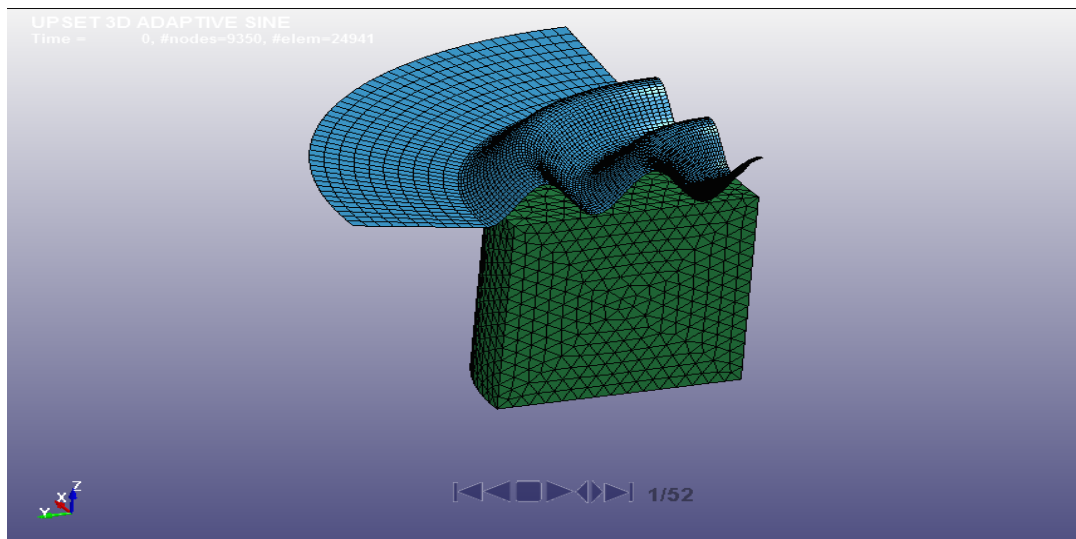
Σχήμα 3. 25 Παράθυρο ελέγχου κριτηρίων

και την ανοχή του σφάλματος (**ADPTOL**) 0° στην συνέχεια μηδενίζουμε την παράμετρο για τον μέγιστο αριθμό των επιπέδων βελτίωσης (**MAXLVL**) και την χρονική λήξη της αναδιαμόρφωσης του πλέγματος (**TDEATH**).

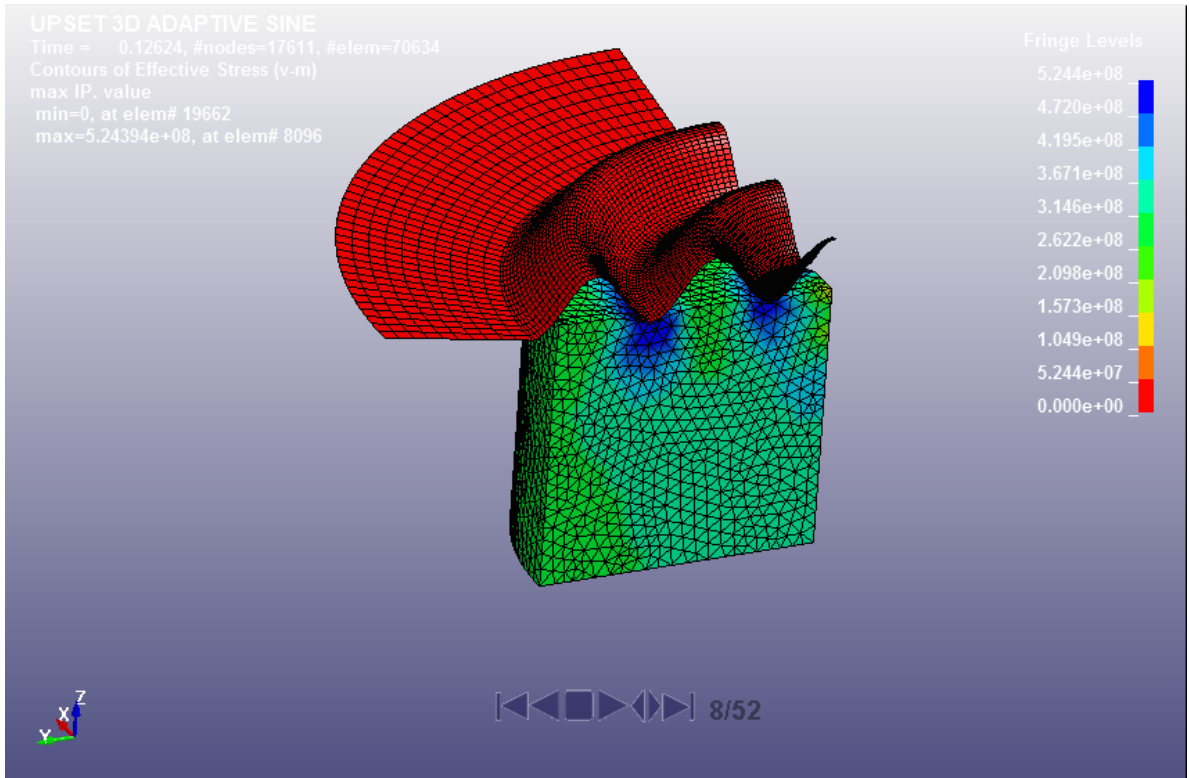


Σχήμα 3. 26 Παράθυρο ελέγχου παραμέτρων

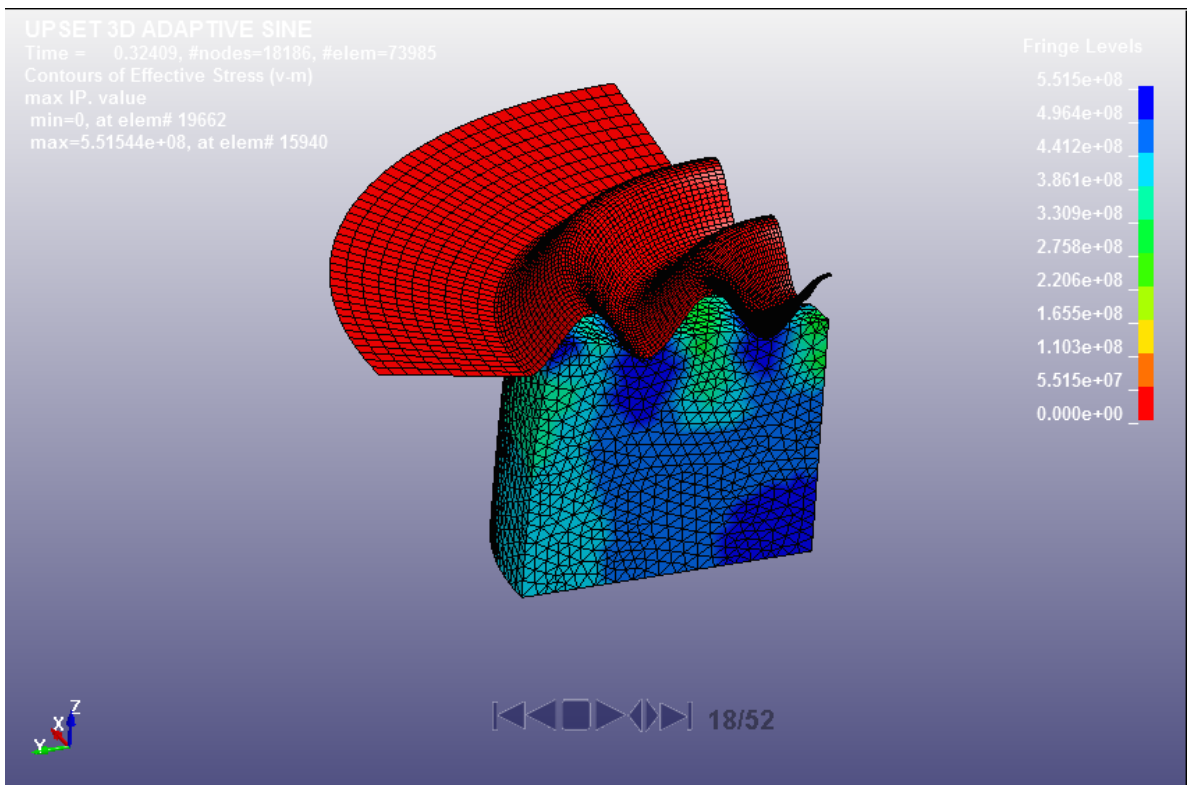
Τίς παραμέτρους για το remeshing τις βρίσκουμε από το παράθυρο Keyword Manager διαλέγοντας CONTROL_REMESHING. Για μία καλύτερη λύση ορίζουμε το μέγιστο και το ελάχιστο μήκος των ακμών των στοιχείων του πλέγματος (**RMAX,RMIN**) σε 1.000e-006(0.000001) και 6.000e-004(0.0006) αντίστοιχα. Και για να μην έχουμε κανένα περιορισμό μηδενίζουμε την παράμετρο που καθορίζει τον αριθμό των στοιχείων κατά μήκος της ακτίνας του πλέγματος (**ICURV**). Αφού αποθηκεύσουμε το αρχείο θα πρέπει να τρέξουμε την ανάλυση με βάση τις επιλογές μας. Για την ανάλυση μας χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα ANSYS το οποίο δημιουργεί ένα αρχείο D3PLOT το οποίο το ανοίγουμε στο LS-PrePost για να δούμε την προσομοιωμένη ανάλυση. Η ανάλυση ξεκινάει με 24.941 στοιχεία και τελειώνει με 72.846. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα.



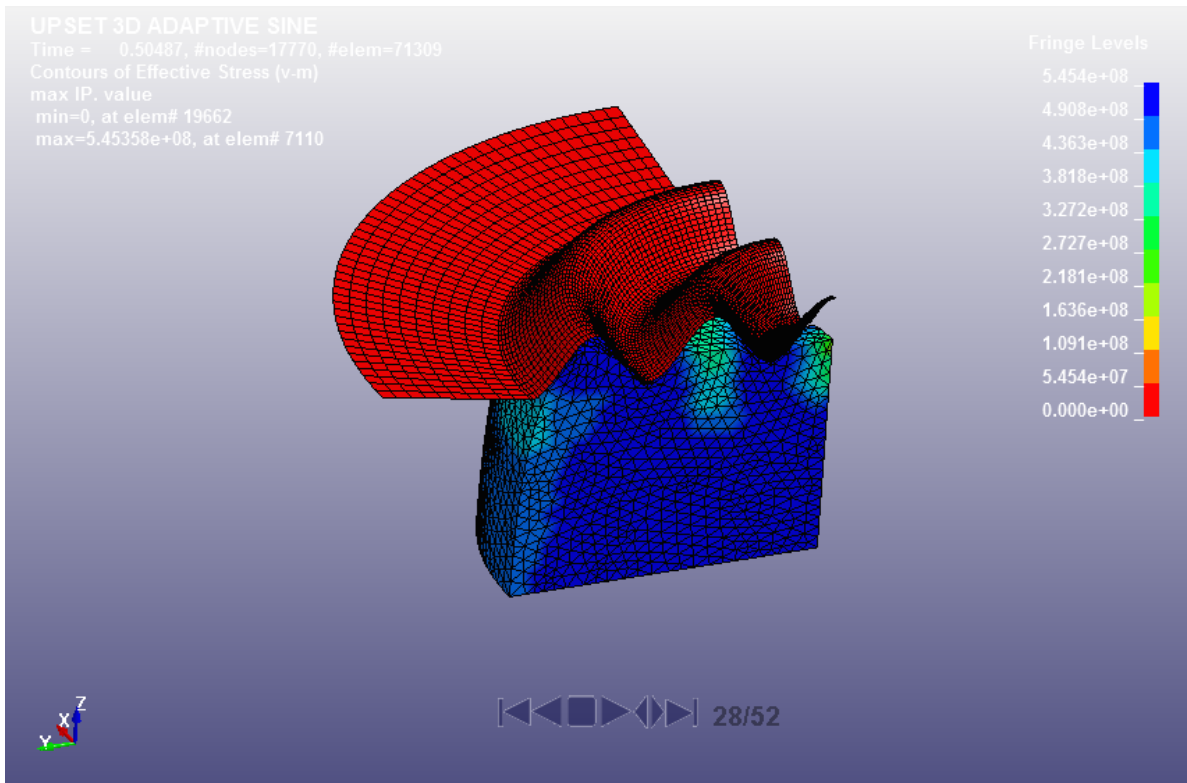
Σχήμα 3. 27 Κατεργασία διαμόρφωσης με κάθετο έμβολο βήμα 1



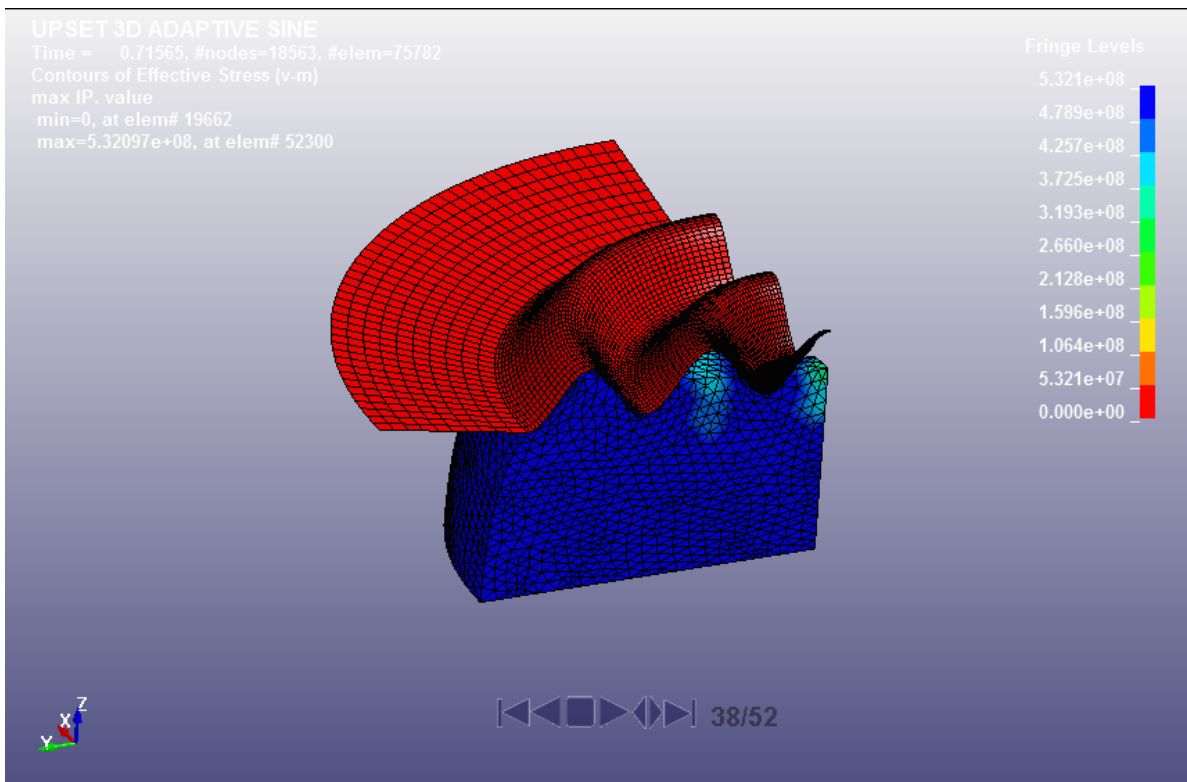
Σχήμα 3. 28 Κατεργασία διαμόρφωσης με κάθετο έμβολο βήμα 8



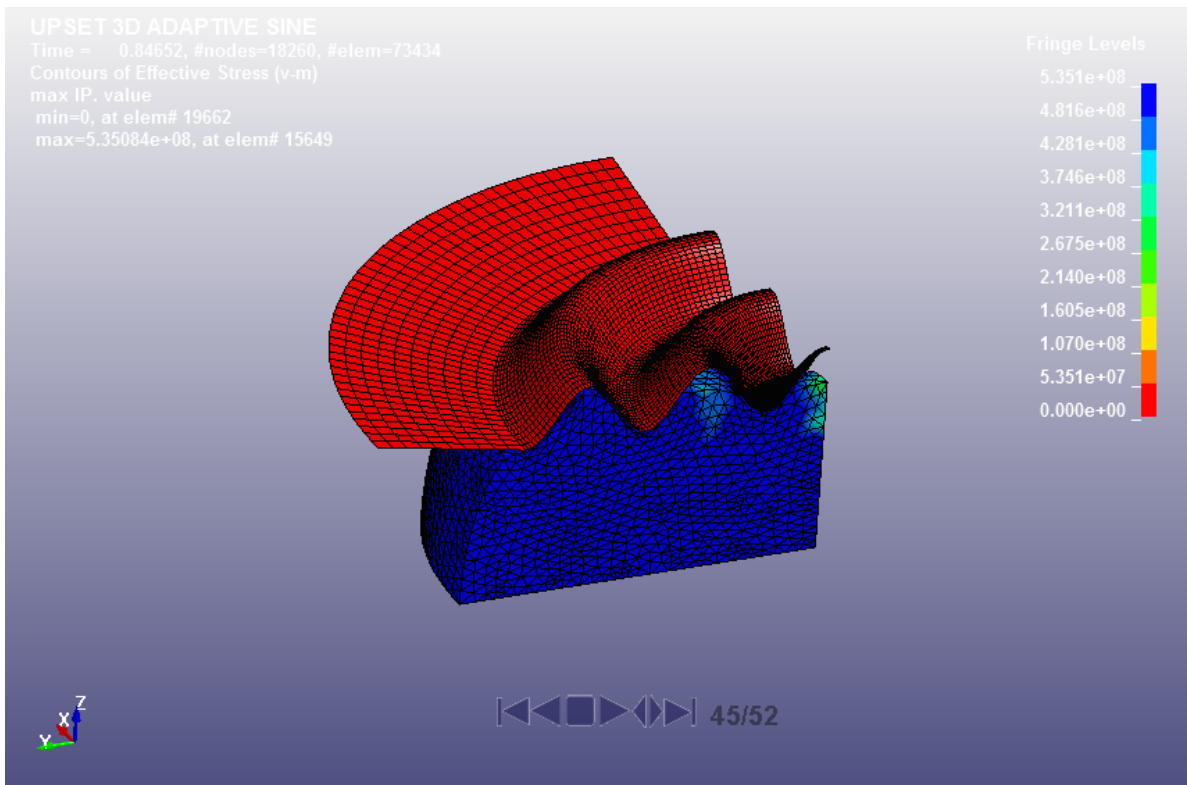
Σχήμα 3. 29 Κατεργασία διαμόρφωσης με κάθετο έμβολο βήμα 18



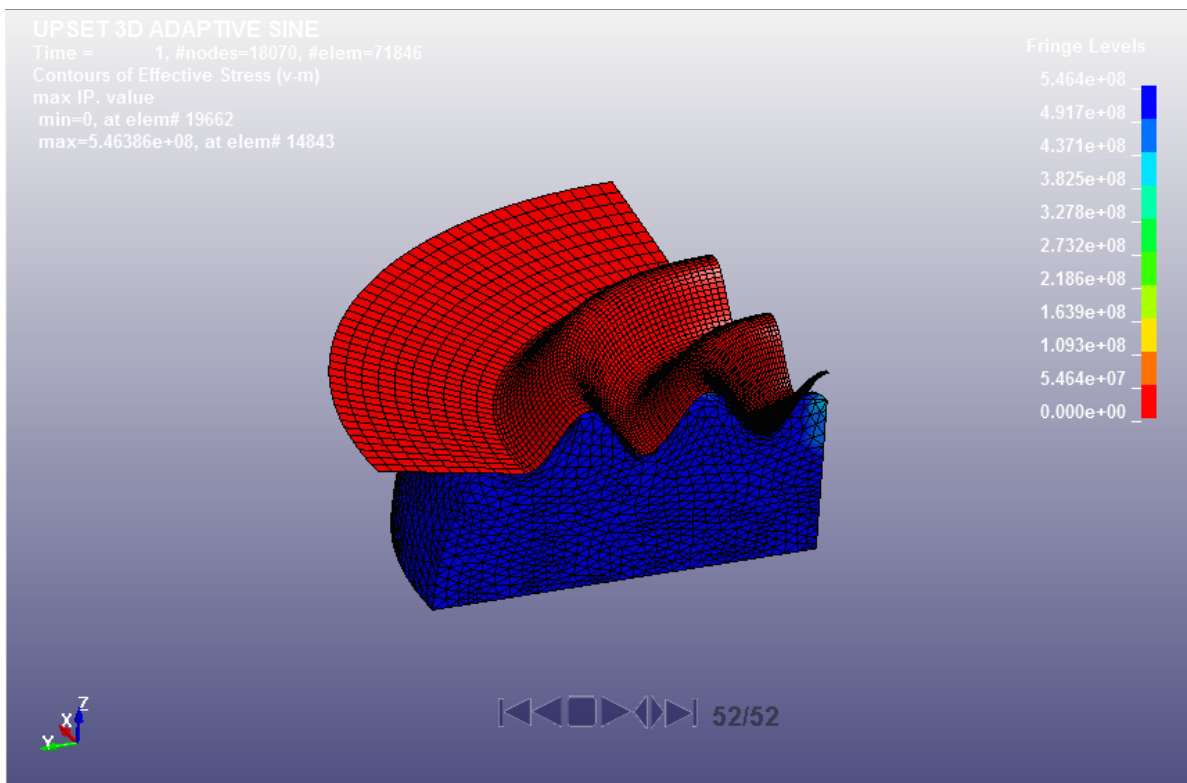
Σχήμα 3. 29 Κατεργασία διαμόρφωσης με κάθετο έμβολο βήμα 28



Σχήμα 3. 30 Κατεργασία διαμόρφωσης με κάθετο έμβολο βήμα 38



Σχήμα 3. 31 Κατεργασία διαμόρφωσης με κάθετο έμβολο βήμα 38



Σχήμα 3. 32 Κατεργασία διαμόρφωσης με κάθετο έμβολο βήμα 52 τελικό βήμα

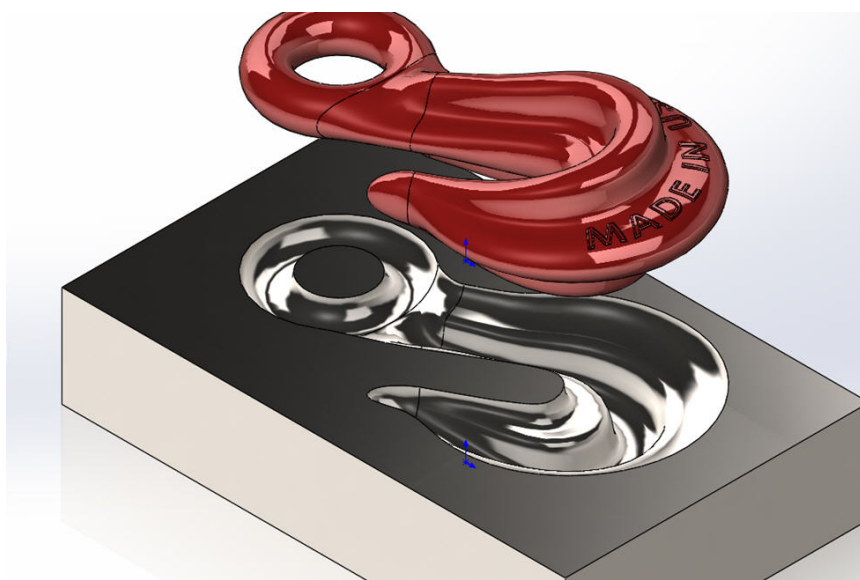
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

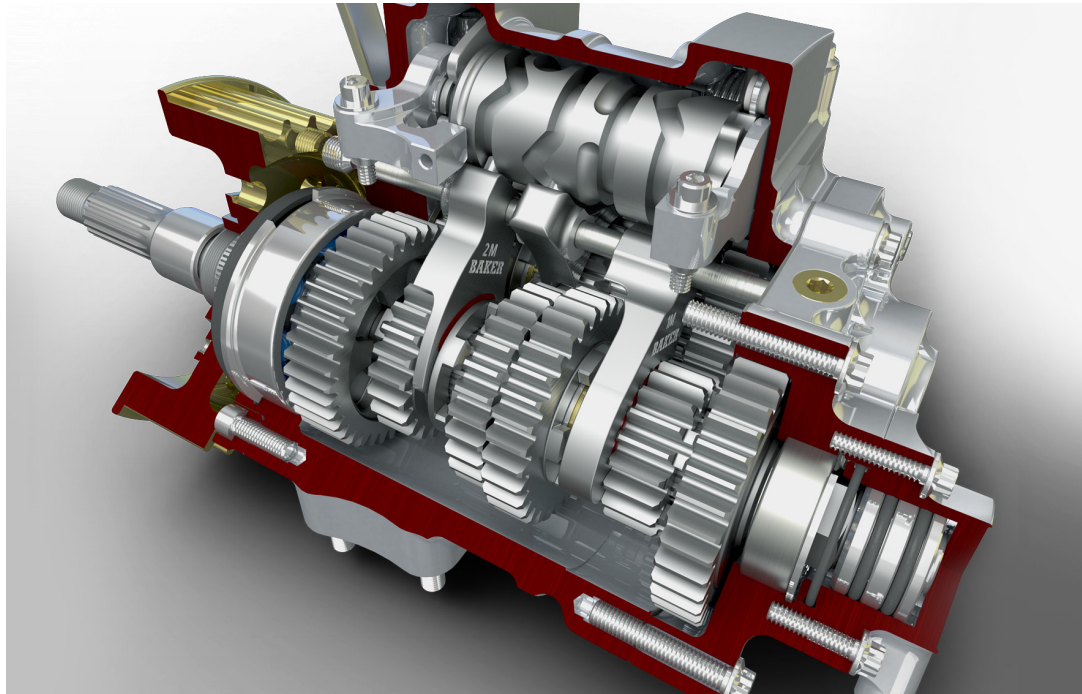
Η ανάλυση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα στα δύο προγράμματα, MSC.Marc και LS-DYNA, θα γίνει σε τρεις κατεργασίες διαμόρφωσης, οι οποίες είναι οι εξής, μία κατεργασία συμπίεσης, μία διέλασης και μία έλασης. Για τον σχεδιασμό των κατεργασιών χρησιμοποιούμε το μηχανολογικό πρόγραμμα SolidWorks το οποίο είναι πακέτο, τύπου CAD (Computer - Aided Design), με το οποίο αναπαριστώνται τρισδιάστατα μηχανολογικά σχέδια και απευθύνεται σε μηχανολόγους μηχανικούς και σε σχεδιαστές μηχανολογικού σχεδίου.

4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ SOLIDWORKS

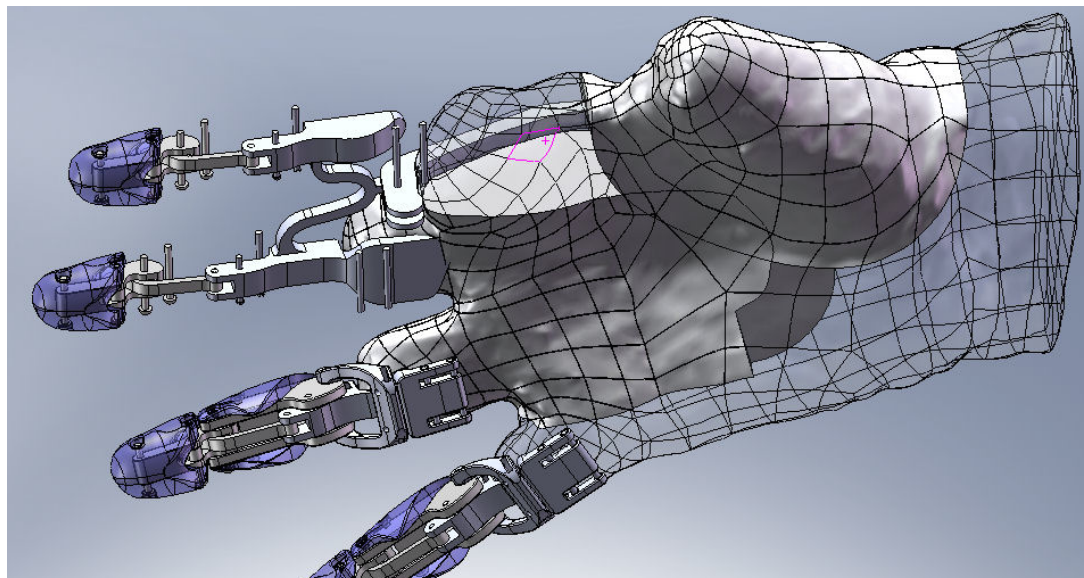
Το SolidWorks έχει αναπτυχθεί από την Dassault Systèmes SolidWorks Corp., θυγατρική εταιρία της Γαλλικής Dassault Systèmes, S. A., ενώ είναι συμβατό με λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows. Η πρώτη έκδοση SolidWorks95 παρουσιάστηκε το 1995 και από τότε κάθε χρόνο κατασκευάζεται ανανεωμένη έκδοση. Είναι ένα πλήρες 3D μηχανολογικό εργαλείο για σχεδιασμό προϊόντων, προσφέροντας όλα τα απαραίτητα εργαλεία για μηχανολογικό σχεδιασμό, επικύρωση, προσομοίωση κίνησης μηχανισμών, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (αντοχής και ροής), φωτορεαλισμό, διαχείριση δεδομένων από ομάδες και πολλά εργαλεία επικοινωνίας. Εξάγει τα γεωμετρικά δεδομένα σε πληθώρα ουδέτερων πρωτοκόλλων επικοινωνίας (IGES, STEP, PARASOLID, VRML, STL κ.α.), δίνοντας τη δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία τους και με άλλα λογισμικά εργαλεία. Εν γένει το πρόγραμμα παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για να αποτυπωθεί ο στόχος του σχεδιαστή στο μοντέλο. Παρακάτω φαίνονται κάποιες από τις εφαρμογές που έχει χρησιμοποιηθεί το SolidWorks



Σχήμα 4. 1 Σχεδίαση καλουπιού



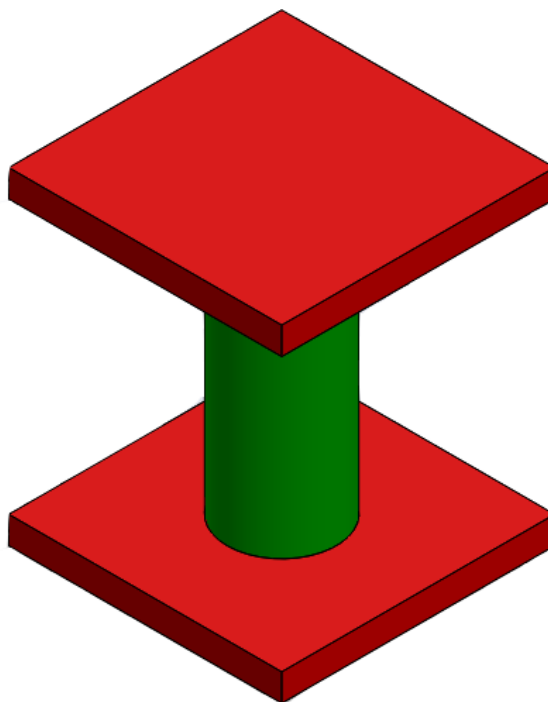
Σχήμα 4. 2 Σχεδίαση κινητήρα



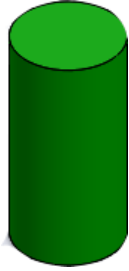
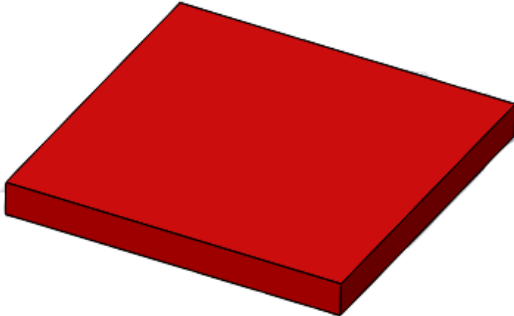
Σχήμα 4. 3 Σχεδίαση Ρομποτικού χεριού

Στην παρούσα εργασία οι γεωμετρίες που θα σχεδιάσουμε είναι απλές, για την εξοικονόμηση χώρου αλλά και χρόνου κατά την ανάλυση θα τις κάνουμε συμμετρικές κατά 90° . Παρακάτω βλέπουμε την τελική μορφή σχεδίασης αλλά και αναλυτικά τα κομμάτια που σχεδιάσαμε, στο πρόγραμμα SolidWorks, των κατεργασιών διαμόρφωσης που θα πραγματοποιήσουμε την προσομοίωση στα προγράμματα MSC.Marc και LS-DYNA. Με πράσινο χαρακτηρίζεται το δοκίμιο με μπλέ το έμβολο και με κόκκινο η μήτρα. Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα αναλυτικά τα κομμάτια με τις διαστάσεις τους για την κάθε κατεργασία.

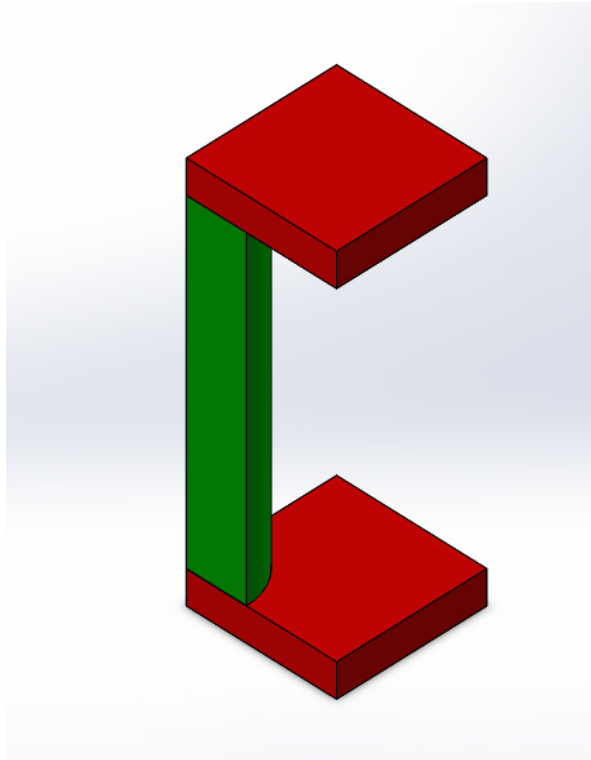
4.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ



Σχήμα 4. 4 Σχέδιο συμπίεσης

| | ΟΝΟΜΑ | ΠΟΣΟΤΗΤΑ | ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm) |
|---|--------------|----------|-----------------|
|  | Δοκίμιο | 1 | 40x100 |
|  | Πλάκα πίεσης | 2 | 100x100x10 |

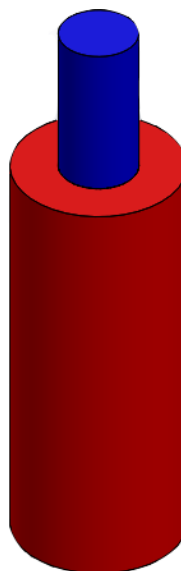
Πίνακας 4. 1 Πίνακας διαστάσεων Συμπίεσης



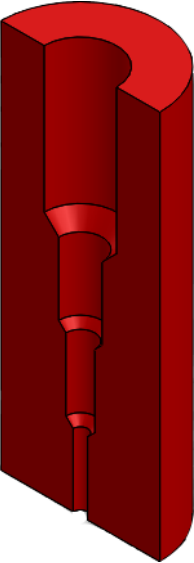
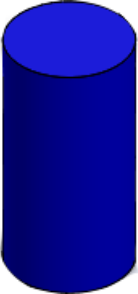

Σχήμα 4. 5 Τελικό συμμετρικό σχέδιο συμπίεσης

4.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΕΛΑΣΗΣ

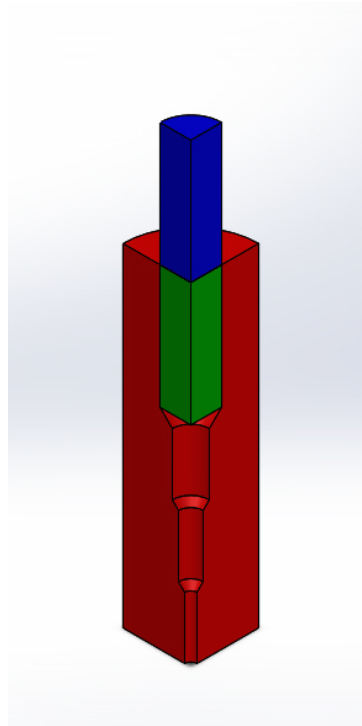
Για τήν κατεργασία τής διέλασης οι διαστάσεις και τα κομμάτια που σχεδιάστηκαν φαίνονται στον **Πίνακα 4.2**. Όπως θα δούμε η μήτρα τής διέλασης αποτελείται από τέσσερις ομόκεντρες οπές για να πετύχουμε μικρότερη διάμετρο από τήν αρχική αλλά και μεγαλύτερο μήκος.



Σχήμα 4. 6 Σχέδιο διέλασης

| | ΟΝΟΜΑ | ΠΟΣΟΤΗΤΑ | ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm) | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ |
|---|---------|----------|--|--|
|  | ΜΗΤΡΑ | 1 | 110x270 1 ^η οπή 50x100 2 ^η οπή 30x50 3 ^η οπή 20x50 4 ^η οπή 10x50 | Η γωνία που δημιουργείται ανάμεσα στις οπές είναι σχεδιασμένη κατά 45° |
|  | ΕΜΒΟΛΟ | 1 | 50x100 | |
|  | ΔΟΚΙΜΙΟ | 1 | 50x100 | |

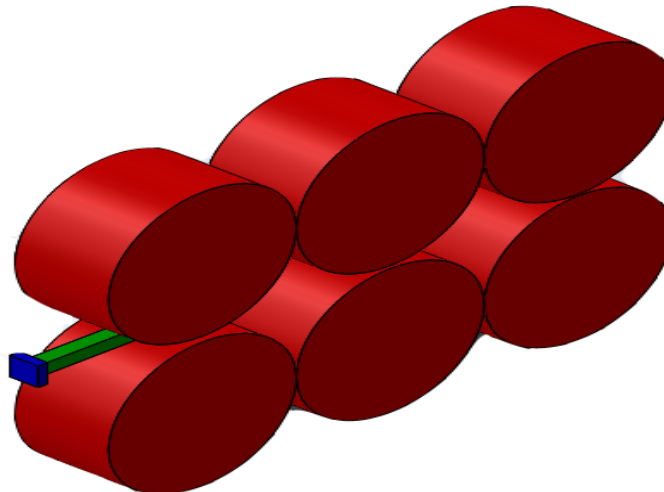
Πίνακας 4. 2 Πίνακας διαστάσεων διέλασης



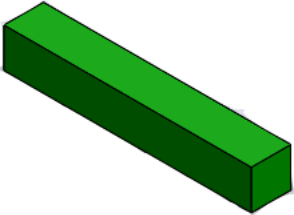

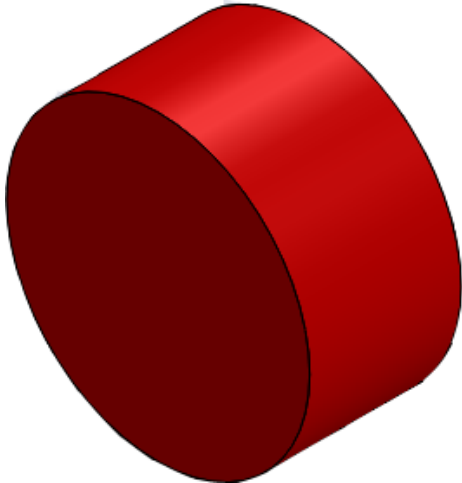
Σχήμα 4. 7 Τελικό συμμετρικό σχέδιο
διέλασης

4.2.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΕΛΑΣΗΣ

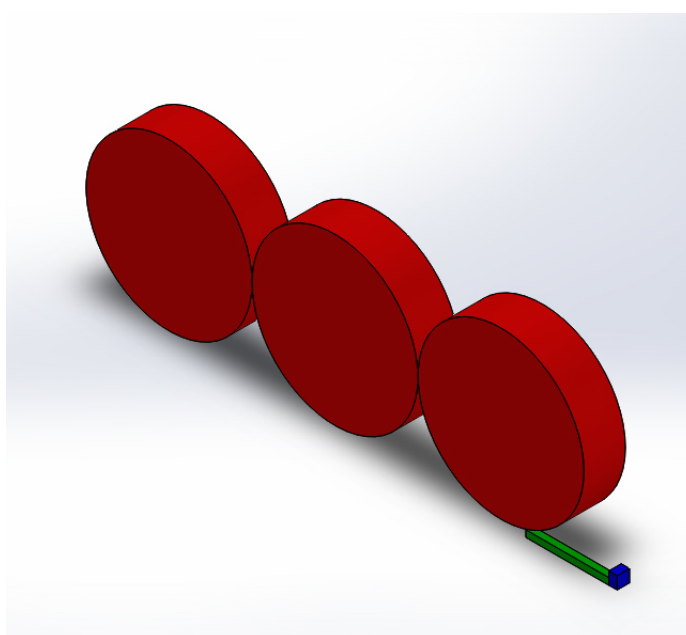
Η Τρίτη και τελευταία κατεργασία που σχεδιάστηκε με το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks είναι η κατεργασία τής έλασης. Στον **Πίνακα 4.3** βλέπουμε αναλυτικά τα κομμάτια και τής διαστάσεις τους. Με τήν κατεργασία τής έλασης θέλουμε να πετύχουμε μικρότερη διατομή αλλά και μεγαλύτερο μήκος στο κατεργαζόμενο κομμάτι.



Σχήμα 4. 8 Μοντέλο έλασης

| | ΟΝΟΜΑ | ΠΟΣΟΤΗΤΑ | ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm) |
|--|---------|----------|--------------------|
|  | ΔΟΚΙΜΙΟ | 1 | 16x16x100 |
|  | ΕΜΒΟΛΟ | 1 | 30x30x10 |
|  | ΡΑΟΥΛΟ | 6 | 200x100 |

Πίνακας 4. 3 Πίνακας διαστάσεων επίπεδης έλασης



Σχήμα 4. 9 Τελικό συμμετρικό σχέδιο έλασης

Αφού σχεδιάσουμε τα κομμάτια, στην συνέχεια πρέπει να τα συνδέσουμε στην διάταξη που επιθυμούμε αλλά και στους άξονες που επιθυμούμε, δηλαδή να δημιουργήσουμε ένα αρχείο Assembly για να εισάγουμε την γεωμετρία μας στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων αναγνωρίζουν συγκεκριμένους τύπους αρχείων σχεδίασης όπως .IGES, .STL, .STEP και πολλούς άλλους, το SolidWorks μας δίνει την δυνατότητα να τα αποθηκεύσουμε σε αυτούς τους τύπους και αυτό μας βοηθάει να προσδιορίσουμε την γεωμετρία πιο εύκολα σε αυτά τα προγράμματα. Στην συνέχεια θα δούμε την εισαγωγή των κατεργασιών που σχεδιάσαμε αλλά και τα αποτελέσματα που θα έχουμε κατά την ανάλυση με και χωρίς την χρήση του remeshing στα προγράμματα Msc.Marc και LS-Dyna.

4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε την διαδικασία της προσομοίωσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Msc.Marc στις κατεργασίες της συμπίεσης, της επίπεδης έλασης και της διέλασης. Ο σχεδιασμός σε ένα πρόγραμμα CAD είναι πολύ σημαντικός διότι ο σχεδιασμός στα προγράμματα πεπερασμένων διαφορών δεν είναι τόσο ευέλικτος. Στο Msc.Marc το αρχείο της γεωμετρίας που θα εισάγουμε θα είναι της μορφής .IGES, η λογική της διαδικασίας της προσομοίωσης σε κάθε πρόγραμμα είναι διαφορετική διότι χρησιμοποιεί την γεωμετρία που εισάγουμε με διαφορετικό τρόπο. Η γεωμετρία, που εισάγουμε, στο Marc μας βοηθάει στο να προσδιορίσουμε τα σημεία ώστε να προσεγγίσουμε με τα κριτήρια του προγράμματος, όσο μπορούμε, την πραγματικότητα. Δεν χρησιμοποιούμε την γεωμετρία που εισάγουμε για την ανάλυση αλλά δημιουργούμε νέα με τον προσδιορισμό των σημείων.

Επειδή οι κατεργασίες που θα αναλύσουμε θα είναι συμμετρικές για εξοικονόμηση χρόνου αλλά και μνήμης, στο Marc, δημιουργήσαμε συμμετρικές επιφάνειες που θα εφάπτονται με το δοκίμιο. Στην συνέχεια θα δούμε βήμα-βήμα την διαδικασία για κάθε κατεργασία, θα δείξουμε την επιλογή υλικού, την δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων και τα κριτήρια και τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιήσουμε για την αναδημιουργία (Remesh) του. Για τα κατάλληλα κριτήρια αλλά και παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές και διαφορετικές ρυθμίσεις μέχρι να καταλήξουμε σε αυτές που δεν επιβαρύνουν πολύ την επίλυση των μοντέλων και βγάζουν ακριβή αποτελέσματα. Όπως θα δούμε η λειτουργία της αναδημιουργίας του πλέγματος στις κατεργασίες διαμόρφωσης είναι απαραίτητη διότι έχουμε μεγάλη παραμόρφωση των στοιχείων. Βασικότερο ζητούμενο είναι η δημιουργία λεπτομερέστερου πλέγματος στις περιοχές όπου η γεωμετρία είναι πολύπλοκη και δημιουργεί μεγάλη παραμόρφωση των στοιχείων. Και τέλος θα ορίσουμε τον χρόνο φόρτισης αλλά και τα βήματα της ανάλυσης.

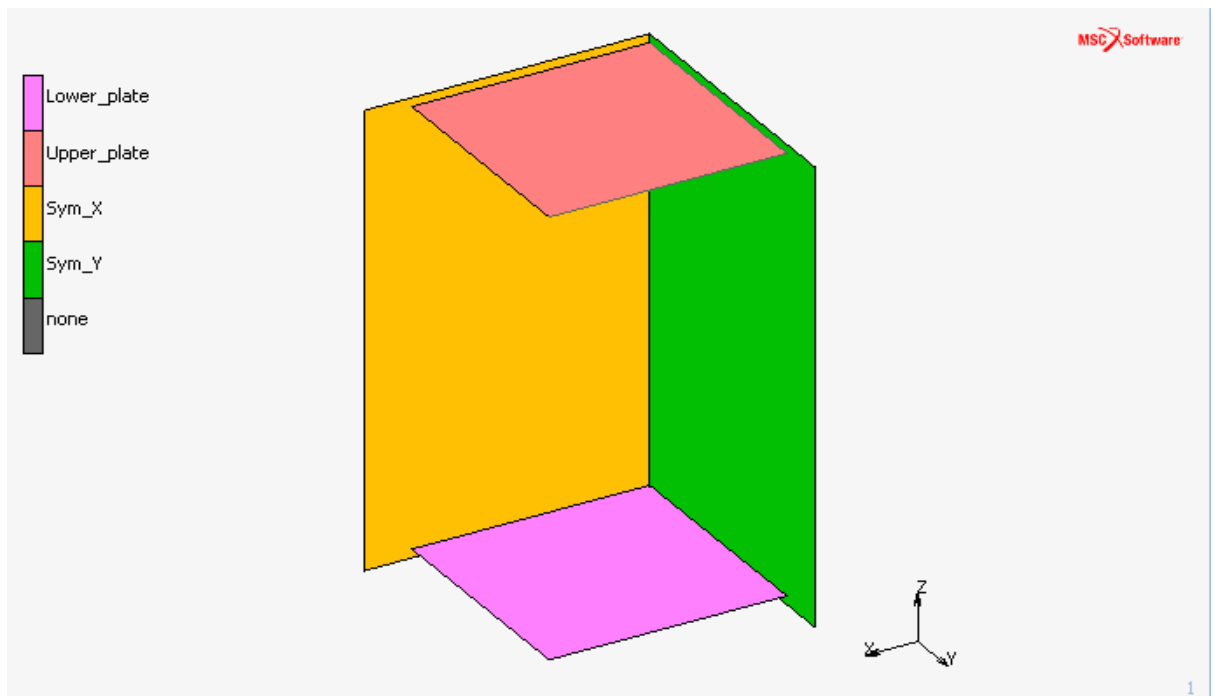
4.4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC

4.4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Για να εισάγουμε την γεωμετρία ακολουθούμε την εξής διαδρομή:

File* → *Import* → *IGES

και εισάγουμε την συμμετρική γεωμετρία της σταθερής πλάκας και τού εμβόλου που έχουμε σχεδιάσει, στην συνέχεια αφαιρούμε περιττά σημεία, καμπύλες και επιφάνειες και δημιουργούμε τρεις επιφάνειες συμμετρίας κατά 90° όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.10 Γεωμετρία συμπίεσης που έχει εισαχθεί από SolidWorks και έχει επεξεργαστεί στο MSC.Marc

4.4.1.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

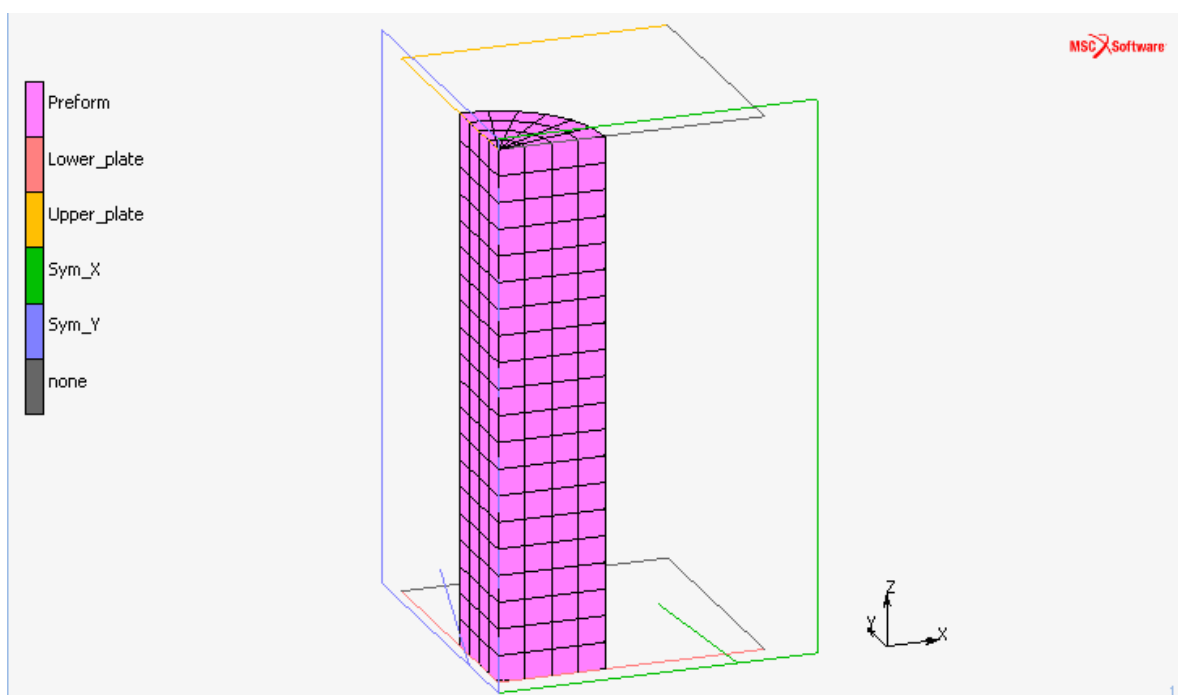
Σε κατεργασίες διαμόρφωσης όπως της συμπίεσης χρησιμοποιούνται κυρίως εξαεδρικά στοιχεία. Για την δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στο Msc.Marc θα πρέπει να οριστεί μία επιφάνεια που θα προσδιορίζει το κατεργαζόμενο τεμάχιο, αφού δημιουργήσουμε την ορθογώνια επιφάνεια ακολουθώντας την παρακάτω διαδρομή μετατρέπουμε την επιφάνεια σε τετραγωνικά στοιχεία διαστάσεων 5x2mm.

Geometry & Mesh → Convert → Surfaces to Elements

Για να δώσουμε τήν τελική συμμετρική μορφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου που θα αποτελείται από εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούμε τήν εντολή:

Geometry & Mesh → Expand → Elements

για κυλινδρικά δοκίμια ορίζουμε το κέντρο περιστροφής το βήμα περιστροφής και τα βήματα, αντίστοιχα Παρακάτω φαίνονται τα εξαεδρικά στοιχεία που δημιουργήσαμε για κάθε κατεργασία.



Σχήμα 4.11 Πλέγμα εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων για τήν συμπίεση

Τέλος χρησιμοποιούμε τήν εντολή sweep για να διαγραφούν από το πλέγμα μας οι διπλοί κόμβοι που υπάρχουν ορίζοντας το tolerance 0.005, ακολουθώντας τήν παρακάτω εντολή.

Geometry & Mesh → Sweep → Nodes

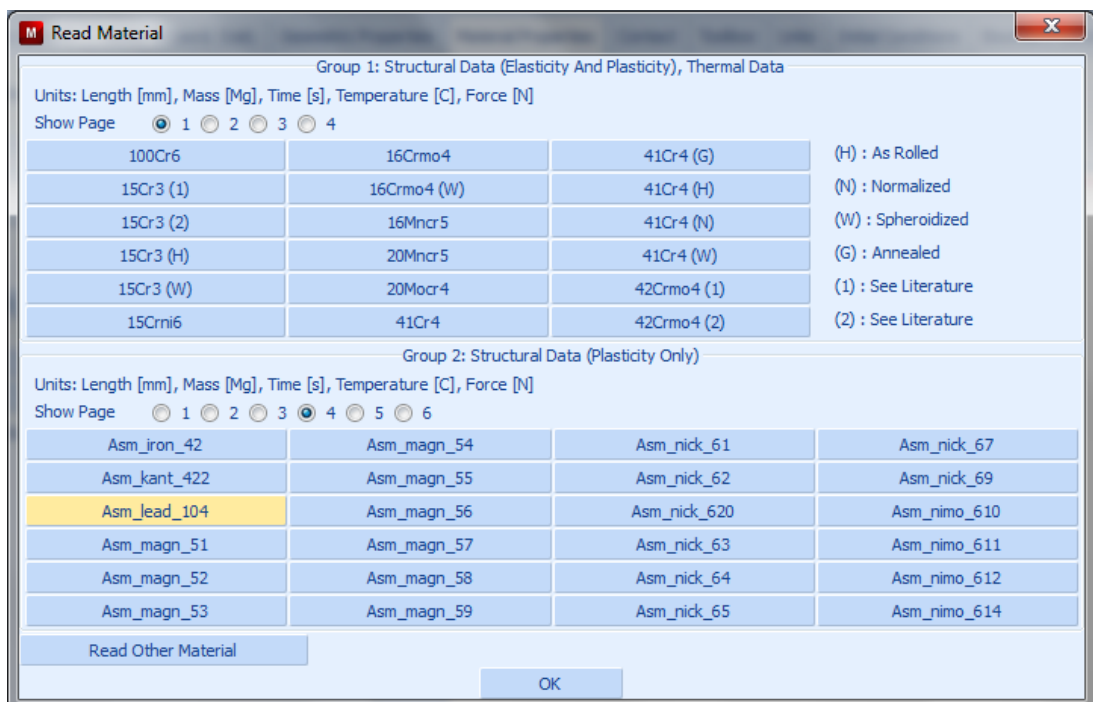
Τελικά οι κόμβοι και τα στοιχεία που θα έχουμε θα είναι **609** και **480** αντίστοιχα.

4.4.1.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι ο μόλυβδος και θα ληφθεί από την βιβλιοθήκη τού προγράμματος με την ακόλουθη εντολή:

Material Properties → Import → Read Material

και επιλέγουμε μόλυβδο (asm_lead_104).



Σχήμα 4.12 Επιλογή του Μολύβδου ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών του MSC MARC

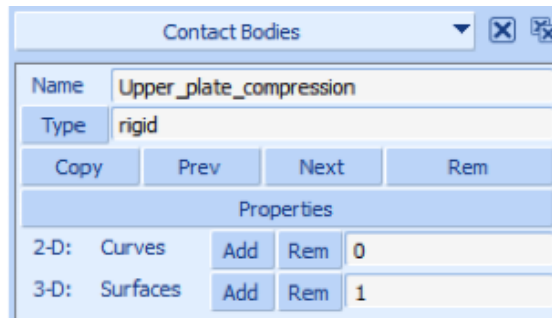
4.4.1.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΑΦΩΝ

Για να ορίσουμε τα κομμάτια σαν παραμορφώσιμα (deformable) και απαραμόρφωτα (rigid) επιλέγουμε την εντολή:

Contact → Contact Bodies → New → Rigid

και ορίζουμε ως απαραμόρφωτα (Rigid) την σταθερή πλάκα και το έμβολο, ως συμμετρικές (Symmetry) τις επιφάνειες συμμετρίας και ως παραμορφώσιμο (Deformable) το παραμορφώσιμο σώμα, το δοκίμιο. Στο παράθυρο που εμφανίζεται πληκτρολογούμε το

όνομα, στο κελί δίπλα στη θέση **Name**, και μετά επιλέγουμε το κουμπί **Add** δίπλα στη θέση **3-D: Surfaces** για να καθορίσουμε την επιφάνεια όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.17**.

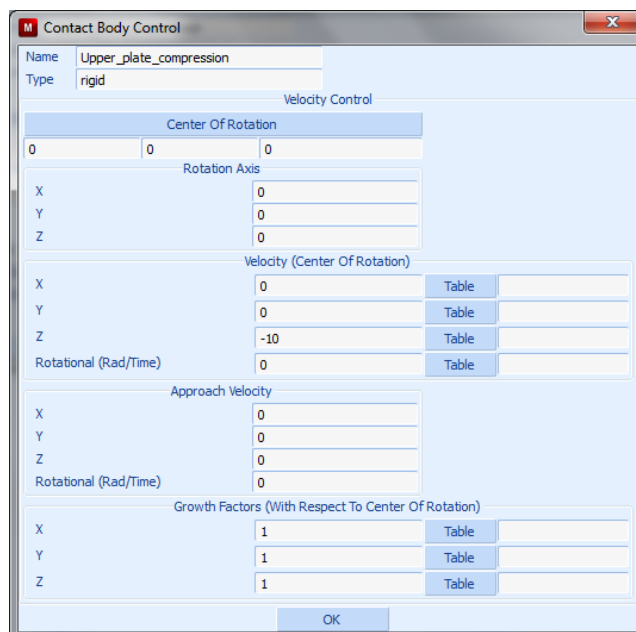


Σχήμα 4.13 Ορισμός εμβόλου ως απαραμόρφωτο σώμα

Στον ορισμό του εμβόλου θα πρέπει να καθορίσουμε την φορά του και την ταχύτητά του. Αυτό γίνεται στην καρτέλα **Contact Bodies** που ορίσαμε το έμβολο ακολουθώντας την εντολή:

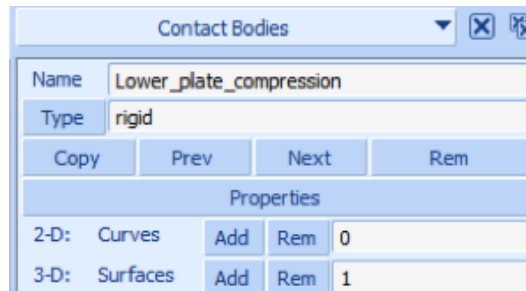
Properties → Parameters

Και εμφανίζεται το παράθυρο **Contact Bodies Control**.



Σχήμα 4.14 Ορισμός της ταχύτητας του εμβόλου κατά τον άξονα Z για συμπίεση.

Το πρόσημο αλλά και ο άξονας που βάζουμε τήν ταχύτητα έχει να κάνει με τήν γεωμετρία που σχεδιάσαμε, υποδηλώνει δηλαδή προς τα πού θα κινηθεί η επιφάνεια. Τέλος στο **Σχήμα 4.15** βλέπουμε και τήν καταχώριση τής अपαραμόρφωτης επιφάνειας.

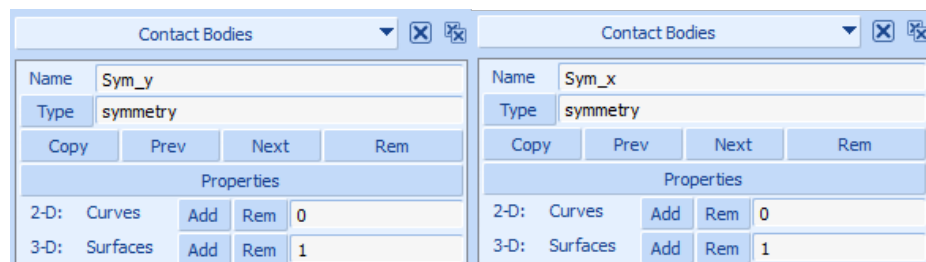


Σχήμα 4.15 Ορισμός μήτρας ως απαραμόρφωτο σώμα για συμπίεση

Για τίσ συμμετρικές επιφάνειες η διαδικασία είναι η ίδια ακολουθούμε τήν εντολή:

Contact → **Contact Bodies** → **New** → **Symmetry**

στο παράθυρο που εμφανίζεται πληκτρολογούμε το όνομα, στο κελί δίπλα στη θέση **Name**, και μετά επιλέγουμε το κουμπί **Add** δίπλα στη θέση **3-D: Surfaces** για να καθορίσουμε τήν επιφάνεια όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.16**.

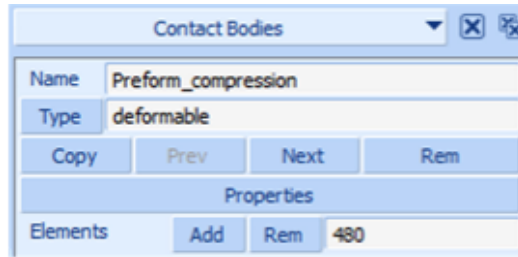


Σχήμα 4.16 Ορισμός συμμετρικών επιφανειών ως συμμετρικά σώματα

Τέλος στην περιοχή **Contact Bodies** πρέπει να ορίσουμε το παραμορφώσιμο σώμα, δηλαδή το δοκίμιό μας που είναι στήν μορφή εξαεδρικών στοιχείων, ακολουθούμε τήν εντολή:

Contact → **Contact Bodies** → **New** → **Deformable**

και στο παράθυρο που εμφανίζεται πληκτρολογούμε το όνομα στο κελί δίπλα στη θέση **Name** και μετά επιλέγουμε το κουμπί **Add** δίπλα στη θέση **Elements** όπως φαίνεται αμέσως πιο κάτω.



Σχήμα 4.17 Ορισμός δοκιμίου ως παραμορφώσιμο σώμα

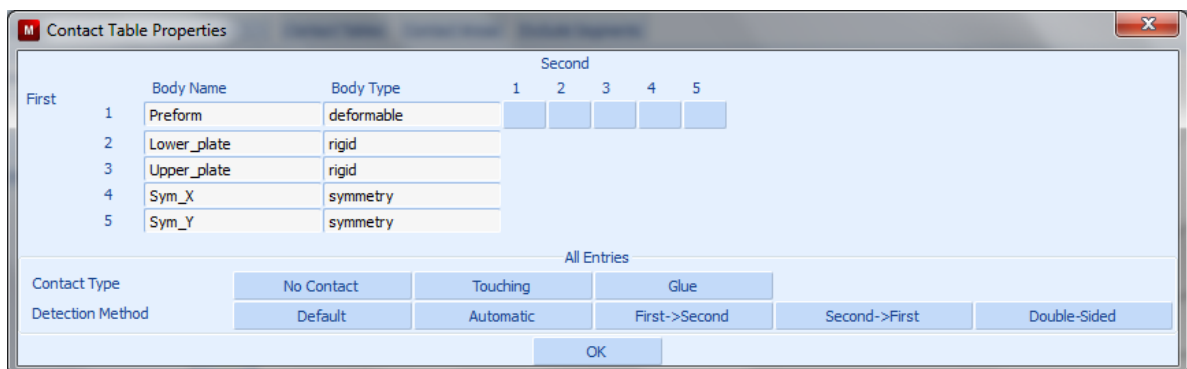
Σε κάθε επαφή που καταχωρίσαμε θα πρέπει να ορίσουμε και τον συντελεστή τριβής που έχει, αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή:

Contact → Contact Tables → New

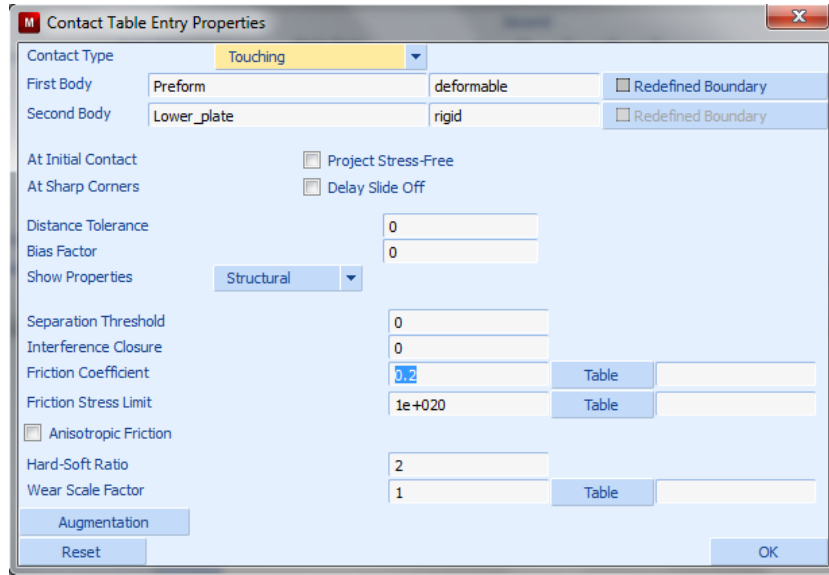
Στην συνέχεια επιλέγουμε την εντολή **Properties** και μας εμφανίζει το παράθυρο **Contact Table Properties** και παρατηρούμε ότι μονό το δοκίμιο (Perform) αντιστοιχίζεται με τα υπόλοιπα σώματα στον πίνακα ιδιοτήτων επαφών. Για την επαφή τού δοκιμίου με κάποιο απαραμόρφωτο σώμα επιλέγουμε το ανάλογο κουτί στην οριζόντια σειρά κουτιών στην περιοχή **Second** και στο παράθυρο που εμφανίζεται δίνουμε την εντολή:

Contact Type → Touching

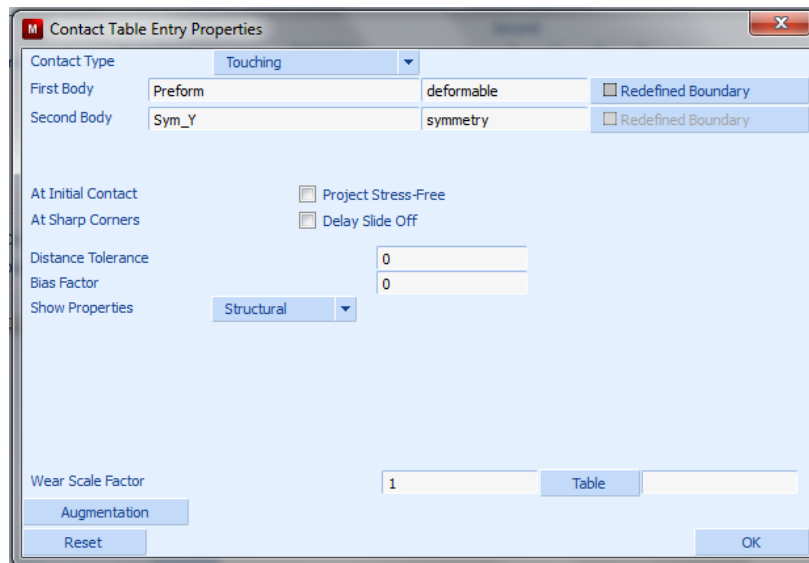
και ορίζουμε στο κελί δίπλα από το **Friction Coefficient** την τιμή 0.2. Στην επαφή με τις συμμετρικές επιφάνειες δεν χρειάζεται να ορίσουμε κάποια τιμή για τον συντελεστή τριβής αλλά μόνο ότι ακουμπάει (δηλαδή **Contact Type → Touching**).



Σχήμα 4.18 Ορισμός του πίνακα επαφών μεταξύ των στοιχείων



Σχήμα 4.19 Ορισμός της επαφής μεταξύ του εμβόλου και του δοκιμίου



Σχήμα 4.20 Ορισμός της επαφής μεταξύ συμμετρικής επιφάνειας και του δοκιμίου

| First | | Body Name | Body Type | Second | | | | |
|-------|--|-------------|------------|--------|---|---|---|---|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | | Preform | deformable | | T | T | T | T |
| 2 | | Lower_plate | rigid | | | | | |
| 3 | | Upper_plate | rigid | | | | | |
| 4 | | Sym_X | symmetry | | | | | |
| 5 | | Sym_Y | symmetry | | | | | |

| All Entries | | | | | |
|------------------|------------|-----------|---------------|---------------|--------------|
| Contact Type | No Contact | Touching | Glue | | |
| Detection Method | Default | Automatic | First->Second | Second->First | Double-Sided |

OK

Σχήμα 4.21 Πίνακας επαφών

Παρατηρούμε ότι το γράμμα **T (Touching)** βρίσκεται σε κάθε κουτί που επεξεργαστήκαμε. Επιλέγουμε το κουμπί **OK**.

4.4.1.5 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Για τις επιλογές της αναδημιουργίας του πλέγματος ακολουθούμε την εντολή:

Mesh Adaptivity → Global Remeshing Criteria → New → Patran Tetra

στην συνέχεια ορίζουμε τα κριτήρια επαναδημιουργίας του πλέγματος καθώς και τις παραμέτρους για τα νέα στοιχεία που θα δημιουργηθούν.

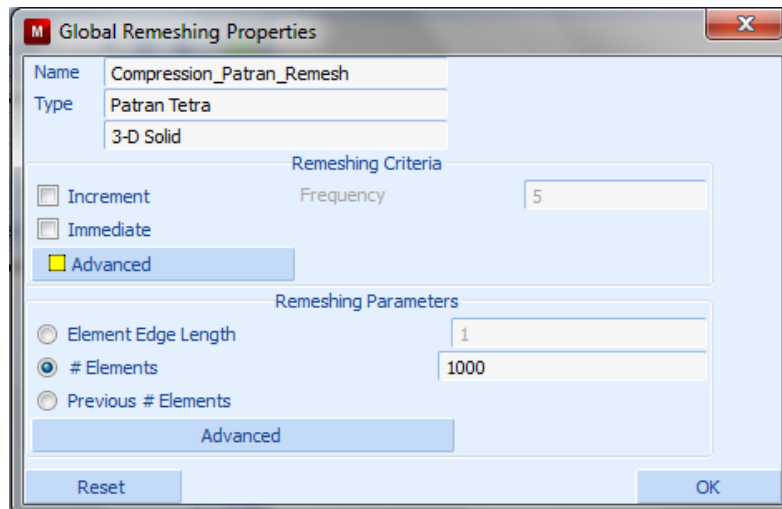


Σχήμα 4.22 Γενικά κριτήρια επιλογής αναγέννησης του πλέγματος

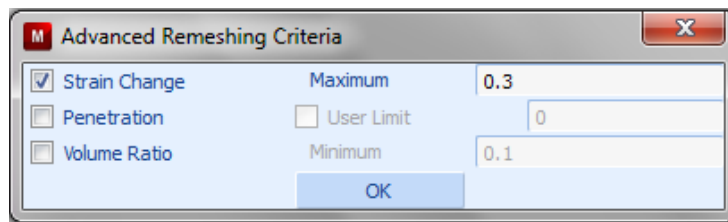
Για την κατεργασία της συμπίεση οι περιορισμοί που θα χρησιμοποιήσουμε στην αναδημιουργία του πλέγματος θα είναι λίγοι διότι δεν υπάρχουν πολλές επαφές και καμπυλότητες που έρχεται σε επαφή το δοκίμιο. Μια εντολή που ορίζουμε είναι η **Strain Change** που θέτει ένα όριο στην παραμόρφωση του πλέγματος κατά το συσσωρευμένο οριακό μέτρο πίεσης, με την εντολή **#Elements** θα βάλουμε ένα όριο στοιχείων που θέλουμε να έχουμε κατά την αναδημιουργία και με την επιλογή **Change Element Type** θα αλλάξουμε τα στοιχεία από τύπο 7 (προεπιλεγμένη επιλογή) σε τύπο 157

- **Strain Change:** 0.3
- **#Elements:** 1000
- **Change Element Type:** 157

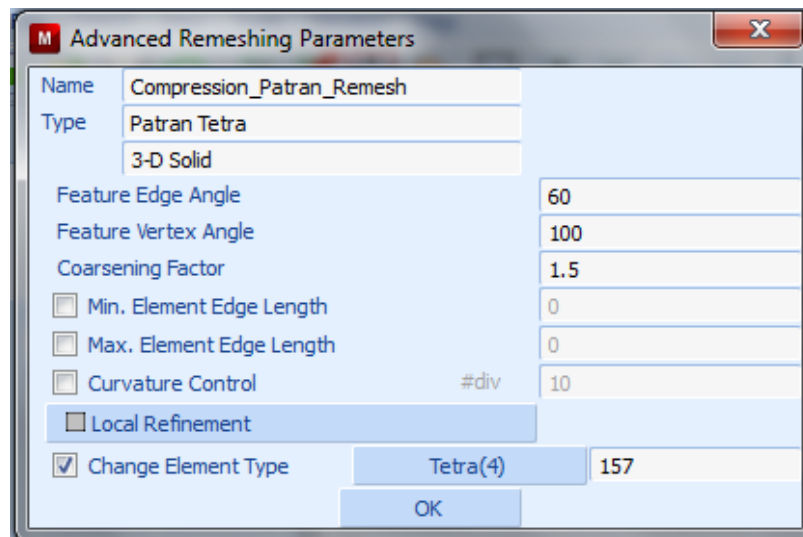
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.34, 4.35, 4.36.



Σχήμα 4.23 Κριτήρια & παράμετροι επαναδημιουργίας πλέγματος Patran Tetra



Σχήμα 4.24 Ειδικά κριτήρια αναδιαμόρφωσης του πλέγματος



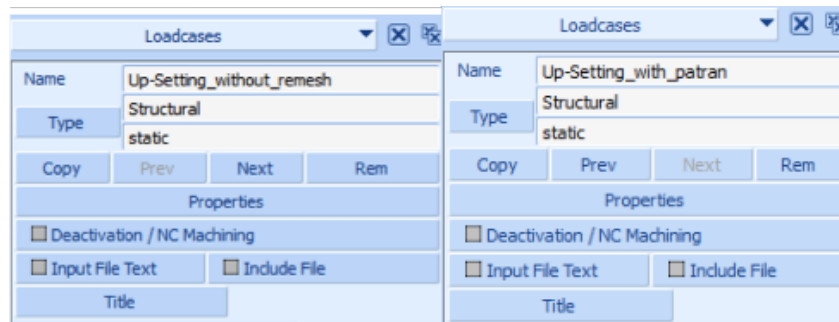
Σχήμα 4.25 Επιλογές για προχωρημένους στις παραμέτρους του Remeshing

4.4.1.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Επιλέγουμε την καρτέλα **Loadcases** δίνουμε την εντολή:

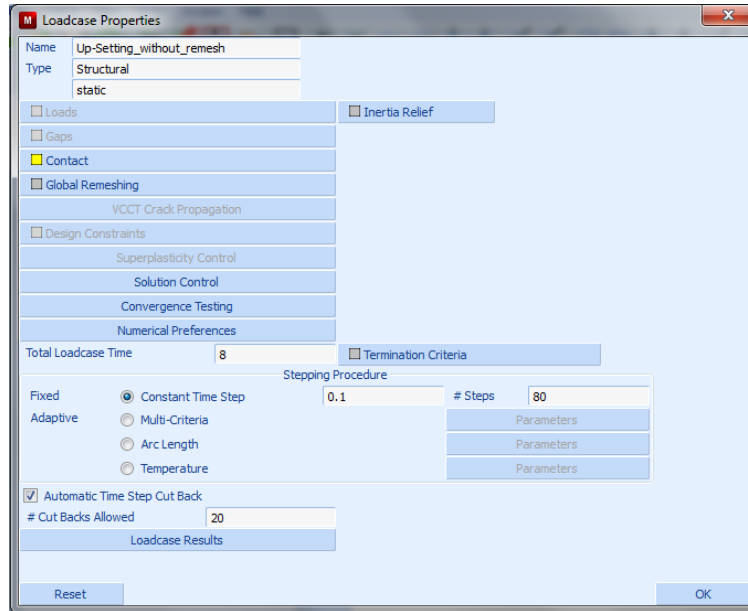
Loadcases → New → Static

Θα δημιουργήσουμε 2 προϋποθέσεις φόρτισης μία με αναδημιουργία πλέγματος και μία χωρίς άρα την παραπάνω εντολή την ακολουθούμε δύο φορές και αφού δώσουμε όνομα στην φόρτισή μας παίρνουμε το ακόλουθο παράθυρο επιλογής:

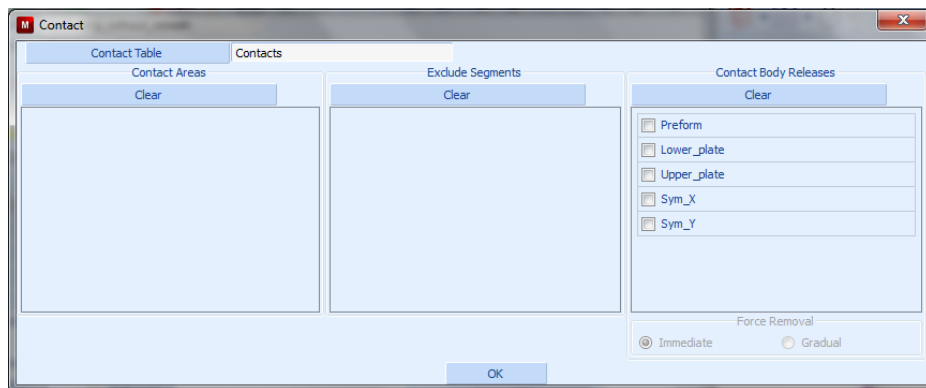


Σχήμα 4.26 Επιλογές για τη ρύθμιση των στοιχείων φόρτισης με και χωρίς αναδημιουργία

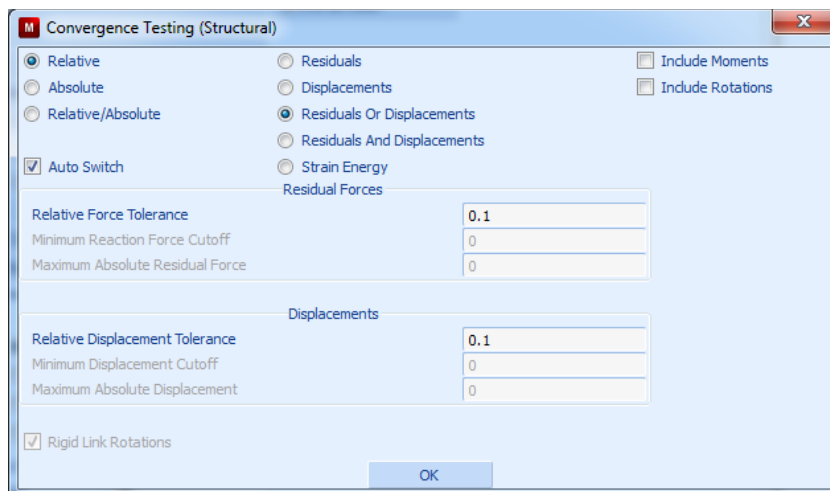
Στη συνέχεια, ορίζουμε τις επιλογές της φόρτισης, όπου διακρίνουμε τον χρόνο φόρτισης, όσος χρόνος χρειάζεται για την μετακίνηση τού εμβόλου, σύμφωνα με την ταχύτητα εμβόλου που έχουμε ορίσει. Ο χρόνος αυτός υποδιαιρείται σε βήματα (Steps) που ορίζουμε εμείς και αυτόματα ορίζετε πόσο θα διαρκεί το κάθε βήμα. Επίσης, στις επιλογές ορίζουμε την επαφή των στοιχείων του μοντέλου δείχνοντας τον πίνακα επαφών που έχουμε κατασκευάσει, το πλέγμα επαναδημιουργίας, όπως το έχουμε ορίσει στο προηγούμενο βήμα καθώς και άλλες απαραίτητες ρυθμίσεις που αφορούν τρόπους σύγκλισης, έλεγχο επίλυσης και αριθμητικές επιλογές.



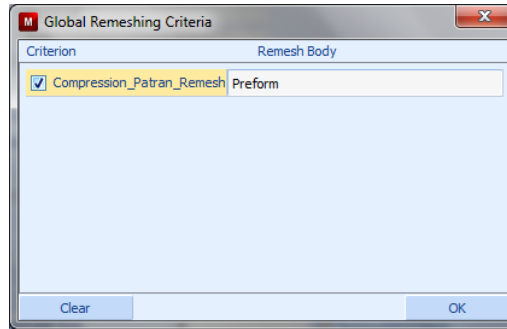
Σχήμα 4.27 Ορισμός των ιδιοτήτων της υπόθεσης φόρτισης



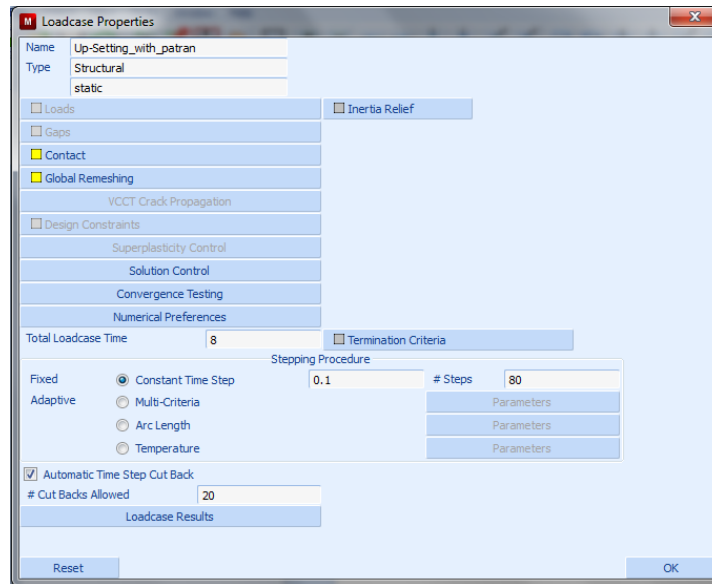
Σχήμα 4.28 Πίνακας επαφών



Σχήμα 4.29 Ορισμός επιλογών των κριτηρίων σύγκλισης



Σχήμα 4.30 Ορισμός της επαναδημιουργίας πλέγματος Patran Tetra



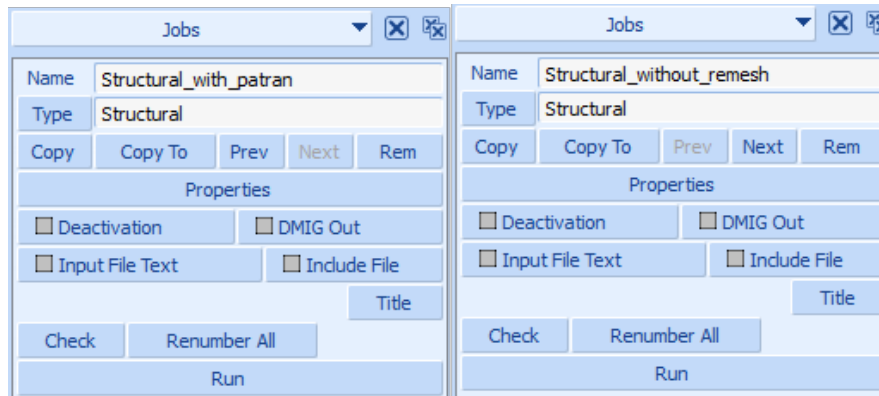
Σχήμα 4.31 Ορισμός των ιδιοτήτων της υπόθεσης φόρτισης με αναδημιουργία

4.4.1.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για να ορίσουμε την ανάλυσή μας χρησιμοποιούμε την εντολή:

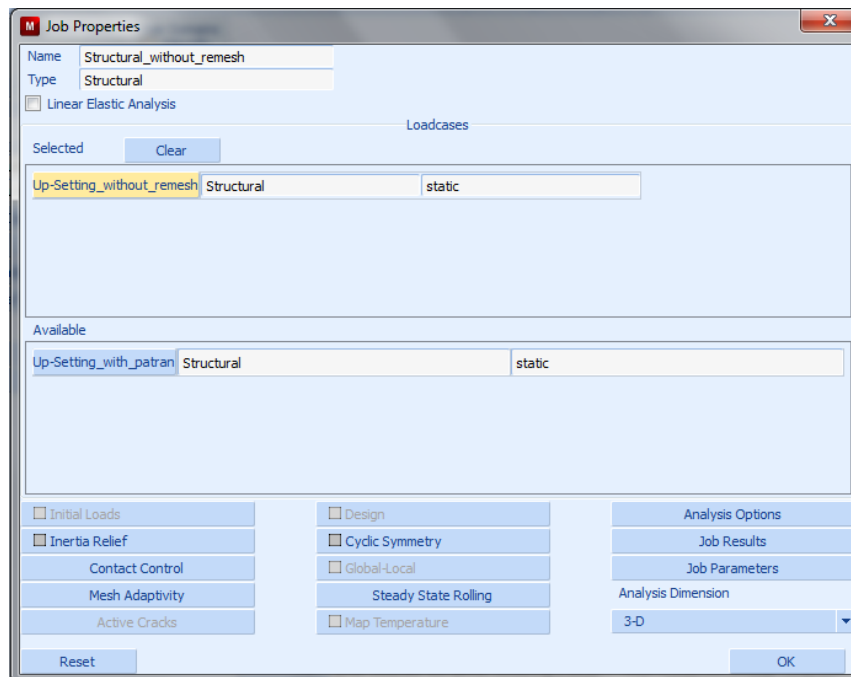
Jobs → New → Structural

και στο παράθυρο που εμφανίζεται δίνουμε το όνομα στο κελί δίπλα στη θέση **Name**.

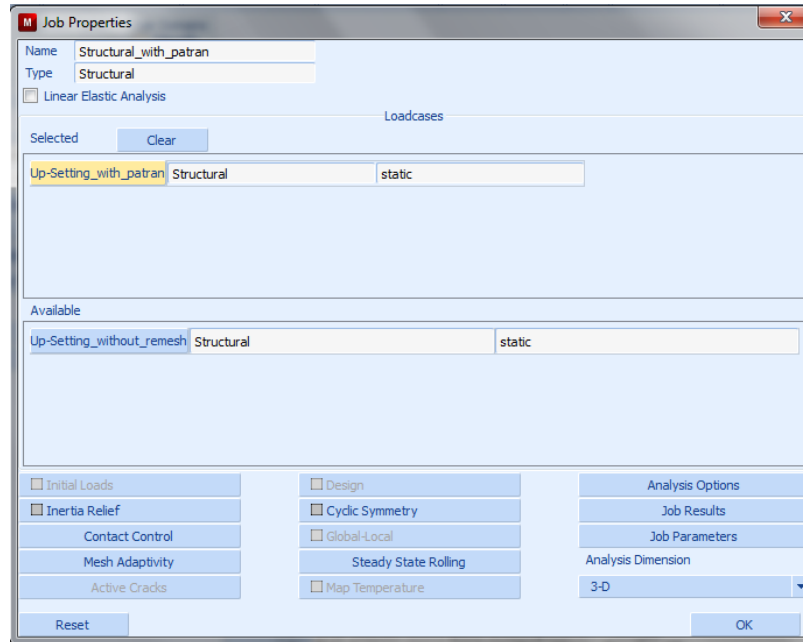


Σχήμα 4.32 Επιλογές προετοιμασίας ανάλυσης.

Επιλέγουμε το κουμπί **Properties** και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε τη την ανάλυση που εισήχθη προηγουμένως στην περιοχή **Available**.



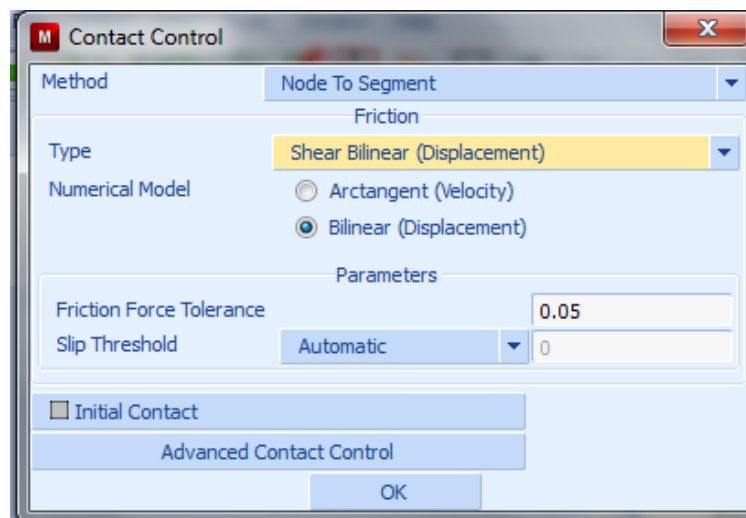
Σχήμα 4.33 Ιδιότητες για την προετοιμασία της ανάλυσης χωρίς αναδημιουργία



Σχήμα 4.34 Ιδιότητες για την προετοιμασία της ανάλυσης με αναδημιουργία

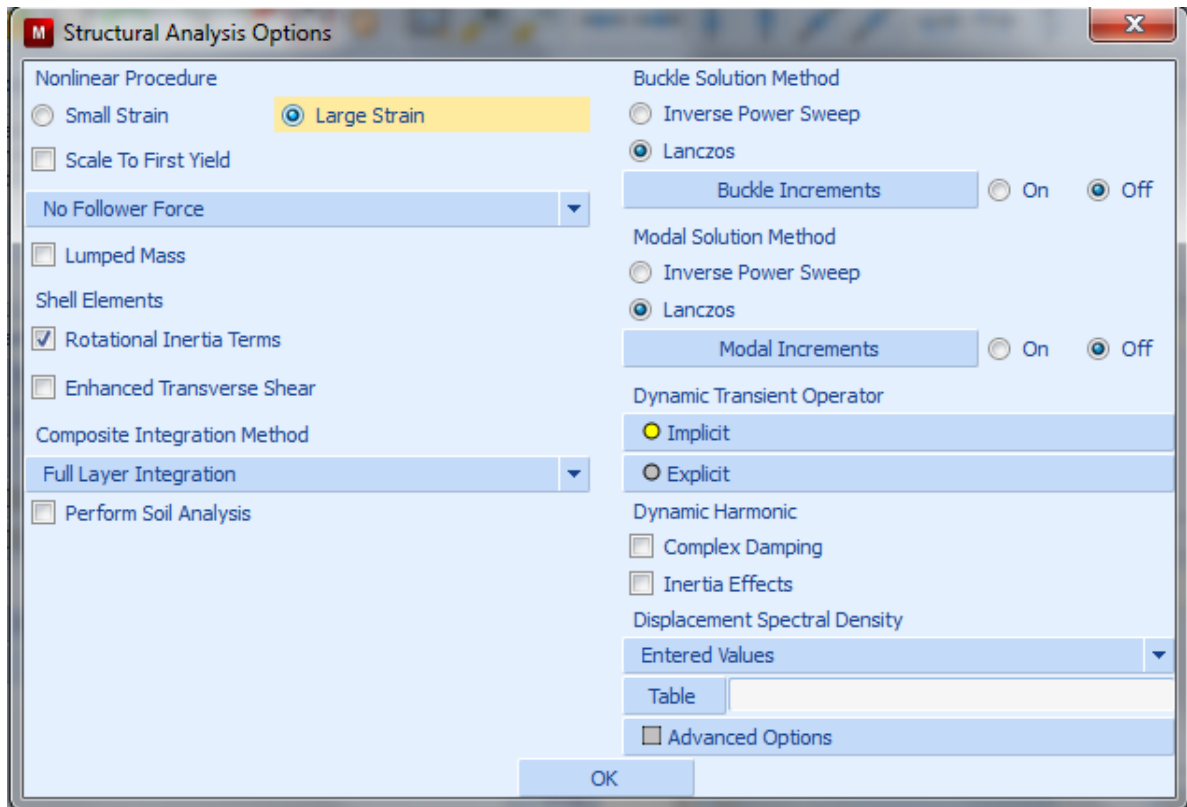
Στη συνέχεια επιλέγουμε το κουμπί **Contact Control** και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε:

Type → **Shear Bilinear (Displacement)**



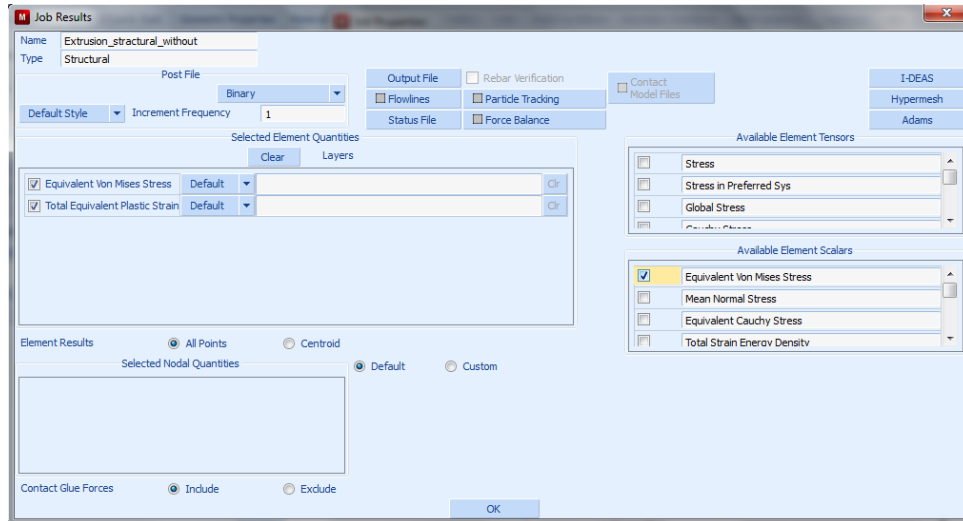
Σχήμα 4.35 Ρύθμιση ιδιοτήτων επαφών

Επιλέγουμε OK και επιστρέφουμε στο **Σχήμα 4.33** όπου πατάμε την επιλογή **Analysis Options** και στο παράθυρο που ακολουθεί επιλέγουμε **Large Strain** στη περιοχή **Nonlinear Procedure** όπως φαίνεται στο αμέσως πιο κάτω σχήμα.



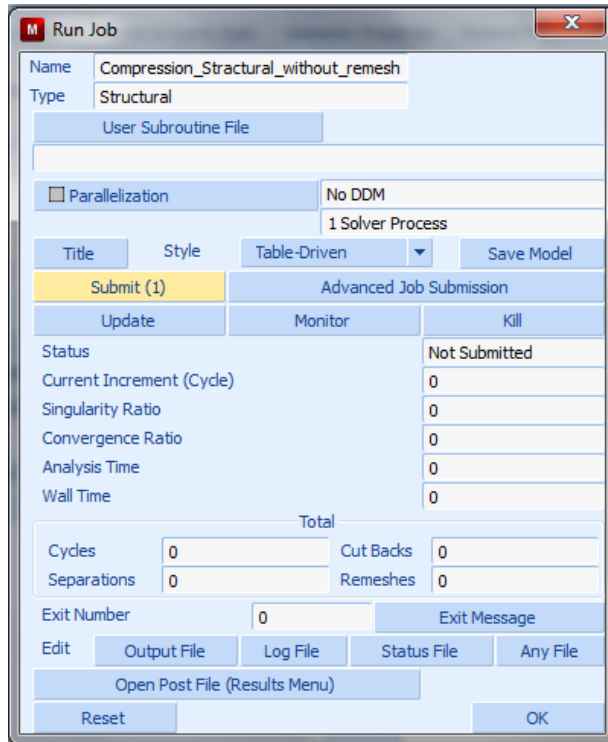
Σχήμα 4.36 Επιλογές για τη δομική ανάλυση

Επιλέγουμε OK. Επιστρέφουμε στο παράθυρο στο **Σχήμα 4.33, 4.34**, αντίστοιχα, και επιλέγουμε το κουμπί **Job Results** προκειμένου να επιλέξουμε ποια αποτελέσματα επιθυμούμε κατά την ανάλυση να είναι διαθέσιμα. Για την ανάλυση μας θα επιλέξουμε την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises και την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση. Επομένως στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε τις **Equivalent Von Mises stress** και **Total Equivalent Plastic Strain** του πεδίου **Available Elements Scalars**.

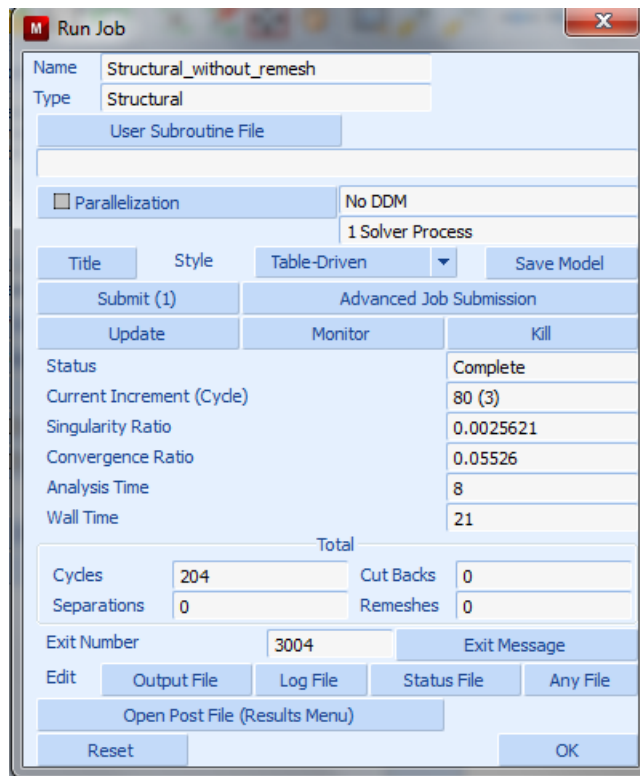


Σχήμα 4.37 Ορισμός των αποτελεσμάτων της διεργασίας

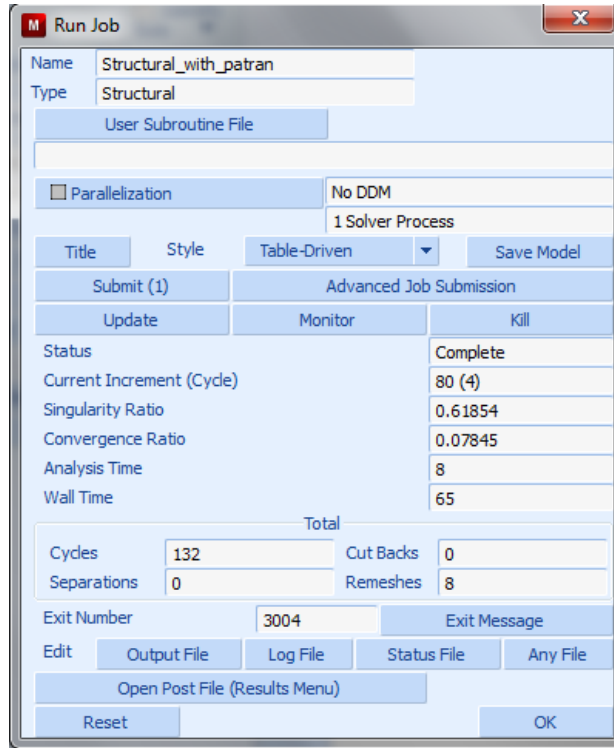
Τέλος επιλέγουμε το OK στο παράθυρο των **Job Properties (Σχήμα 4.33)** που είχαμε ανοίξει και στο παράθυρο στο **Σχήμα 4.32** επιλέγουμε το κουμπί **Check** και αναμένουμε το μήνυμα «**INFO: Found 0 errors and 0 warnings**» στην κονσόλα για να σιγουρευτούμε για τυχόν λάθη και παραλείψεις. Επιλέγουμε την εντολή **Run (Σχήμα 4.32)** και για να ξεκινήσουμε την ανάλυσή μας στο παράθυρο που θα μας εμφανίσει επιλέγουμε την εντολή **Submit (1)** για την εκκίνηση της επίλυσης. Μετά το πέρας της ανάλυσης θα πρέπει να δίνεται ως **Exit Number** ο αριθμός **3004** που δηλώνει την επιτυχή επίλυση. Τότε μπορούμε να παρατηρήσουμε τις διάφορες πληροφορίες όπως για παράδειγμα τους κύκλους ανάλυσης ή τον αριθμό των αναδημιουργιών πλέγματος.



Σχήμα 4.38 Παράθυρο έναρξης και ελέγχου της ανάλυσης



Σχήμα 4.39 Παράθυρο έναρξης και ελέγχου της ανάλυσης μετά την λήξη της χωρίς αναδημιουργία



Σχήμα 4.40 Παράθυρο έναρξης και ελέγχου της ανάλυσης μετά την λήξη της με αναδημιουργία

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.40 κατά την επίλυση χρειάστηκαν **8** αναδημιουργίες του πλέγματος και το **Exit Number** είναι 3004 που δηλώνει την επιτυχία της ανάλυσης.

4.4.1.8 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

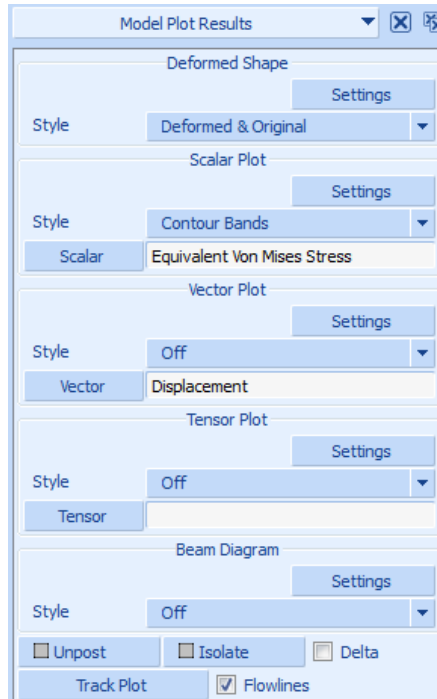
Μετά την επίλυση στο παράθυρο **Run Job** (Σχήμα 4.39) Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να εμφανιστούν με την εντολή:

Run Job → Open Post File (Results Menu)

στο παράθυρο που εμφανίζεται **Model Plot Results** επιλέγουμε στην περιοχή **Deformed shape → Style: Deformed Only** και στην περιοχή **Scalar Plot → Style: Counter Bands**, επίσης στην περιοχή **Scalar Plot** ακολουθούμε την εντολή:

Scalar → Equivalent Von Mises Stress

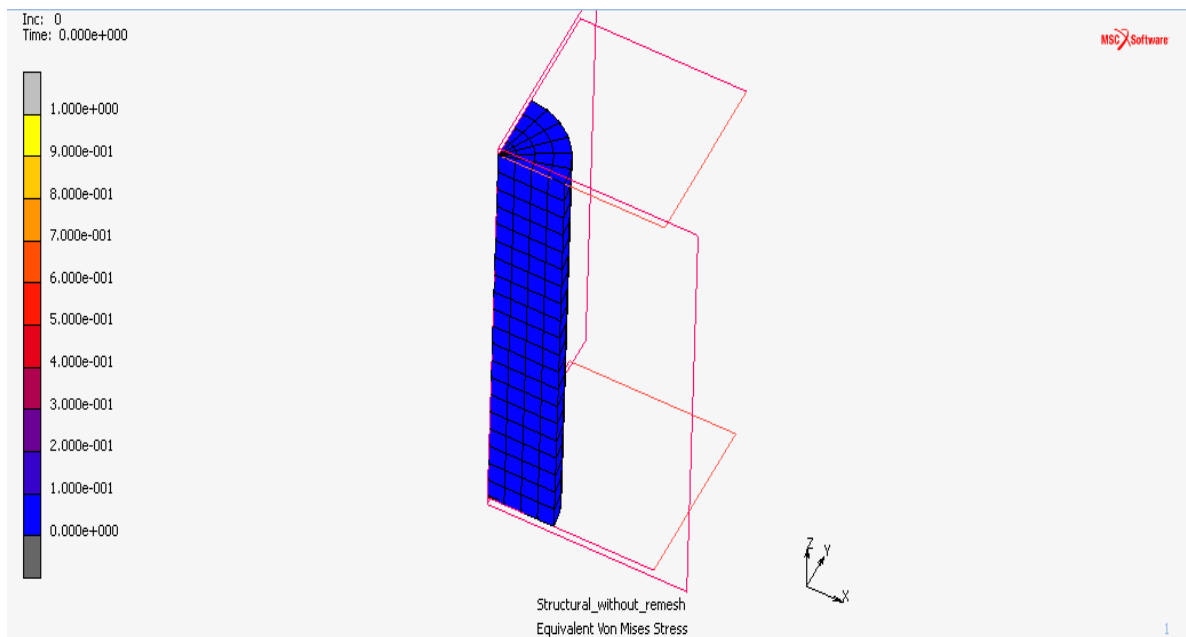
και έτσι προβάλλουμε την παραμόρφωση του δοκιμίου σύμφωνα με τα παραπάνω μεγέθη. Με τη βοήθεια των κουμπιών πλοήγησης μπορούμε να ξεκινήσουμε την γραφική απεικόνιση της κατεργασίας.



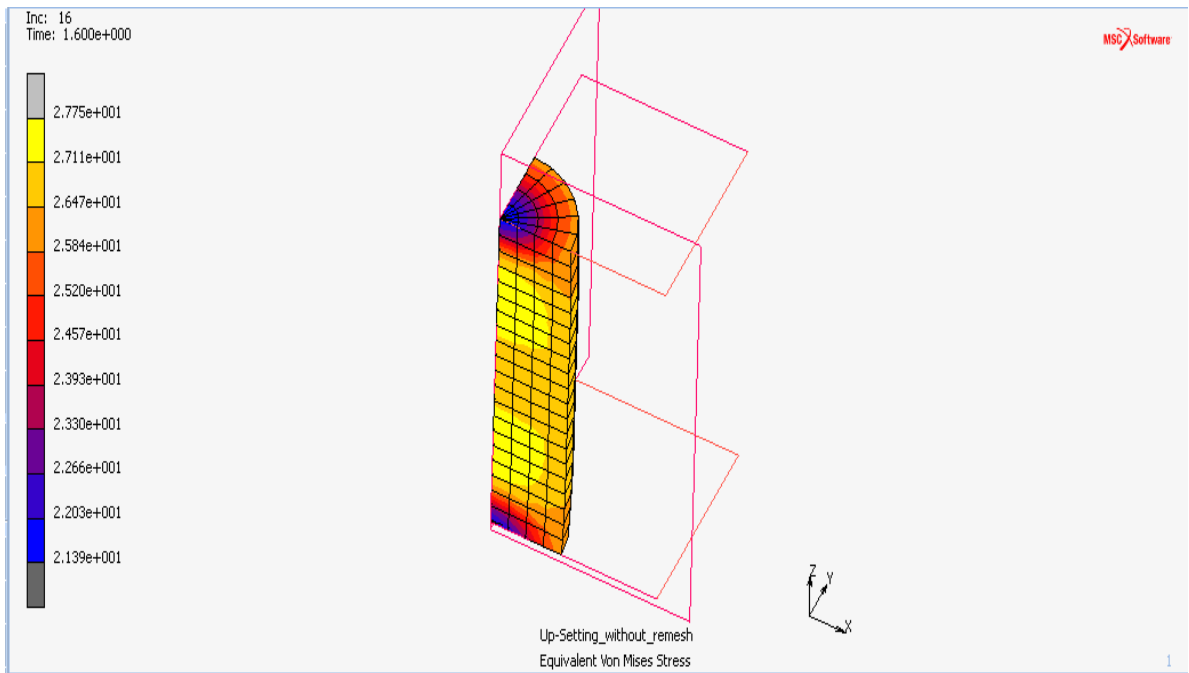
Σχήμα 4.41 Παράθυρο επιλογών γραφικών αποτελεσμάτων προσομοίωσης

4.4.1.9 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

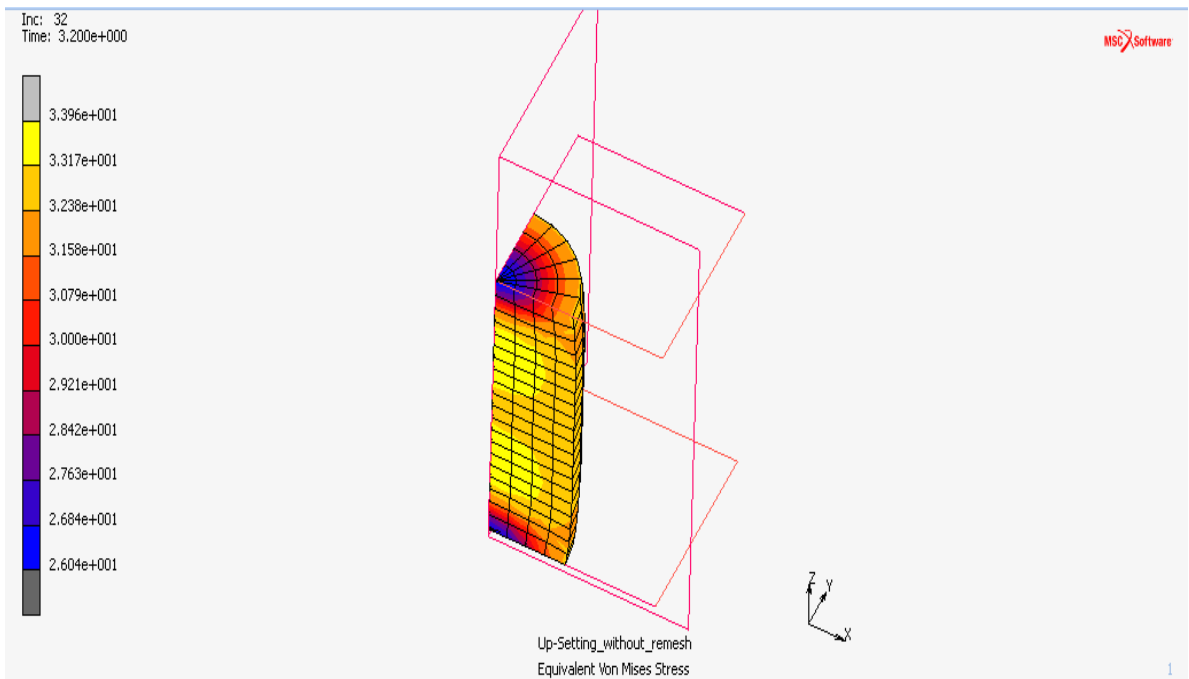
Στο Σχήμα 4.39 βλέπουμε μετά την ολοκλήρωση τής επίλυσης δίνεται ως **Exit Number** ο αριθμός **3004** που δηλώνει την επιτυχή επίλυση τής συγκεκριμένης κατεργασίας.



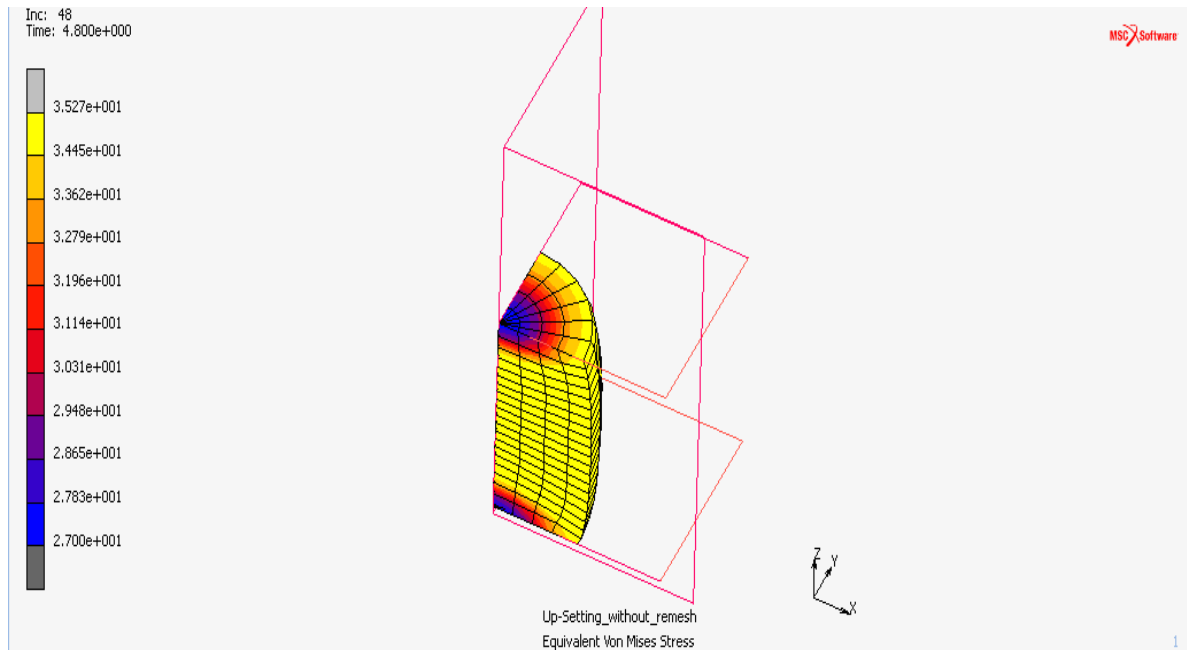
Σχήμα 4.42 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (480 στοιχεία) συμπίεσης



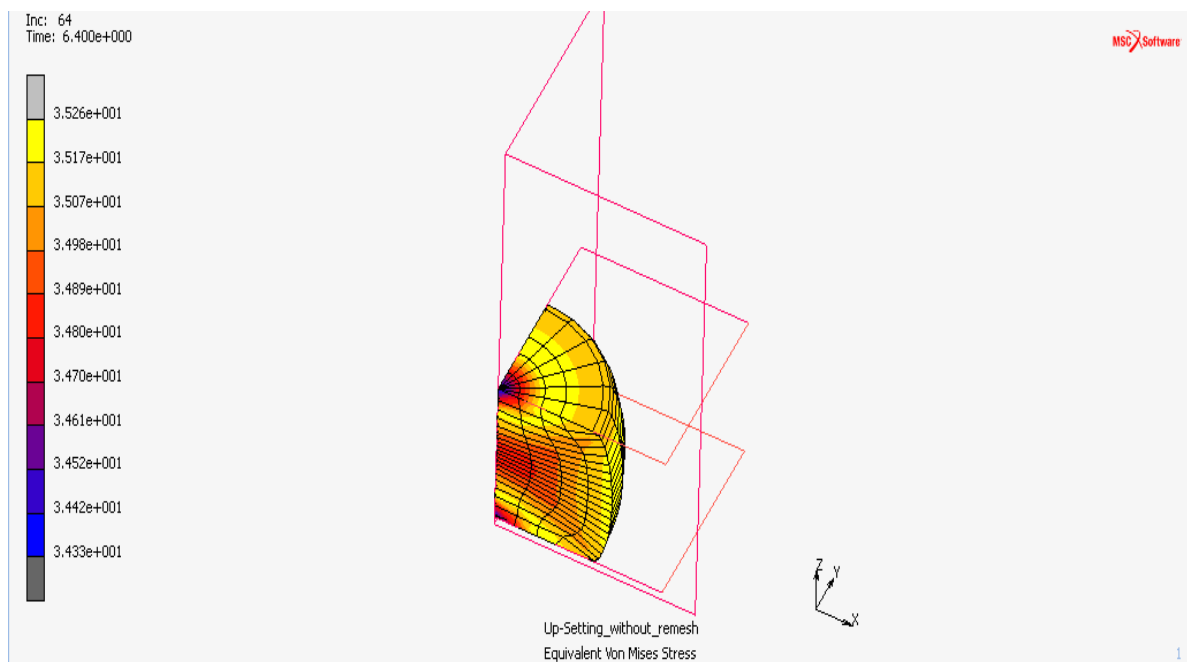
Σχήμα 4.43 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 16 (480 στοιχεία) συμπίεσης



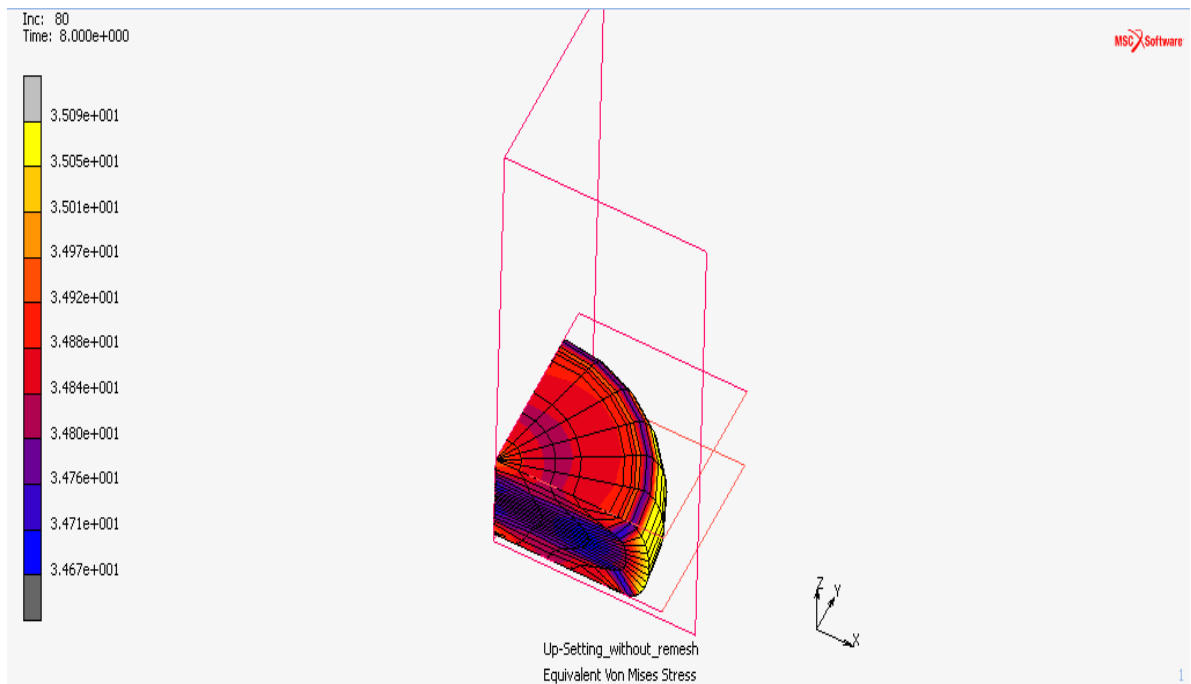
Σχήμα 4.44 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 32 (480 στοιχεία) συμπίεσης



Σχήμα 4.45 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 48 (480 στοιχεία) συμπίεσης



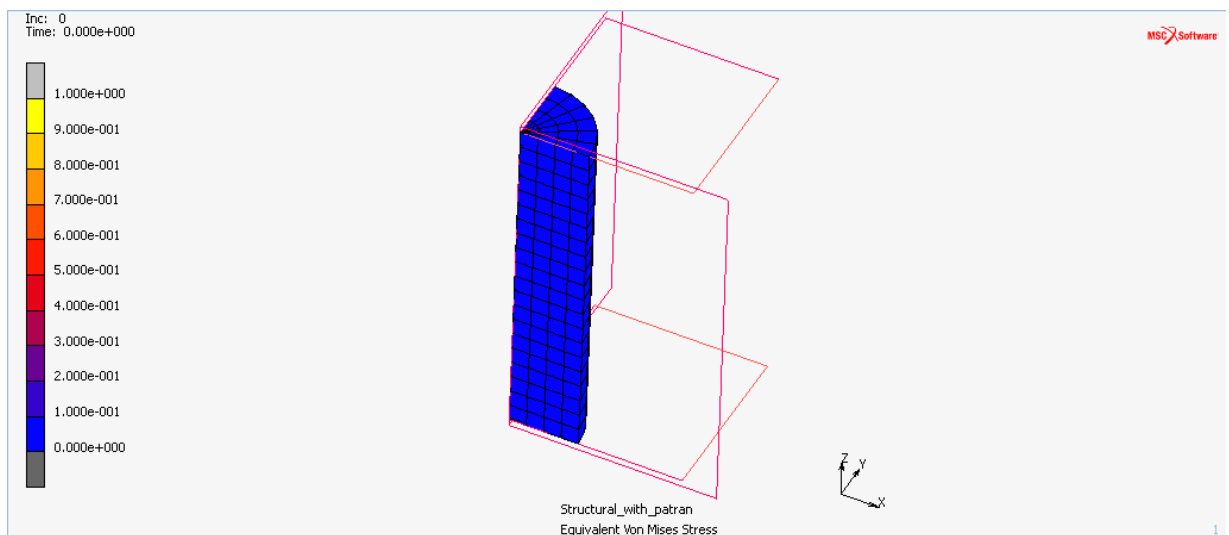
Σχήμα 4.46 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 64 (480 στοιχεία) συμπίεσης



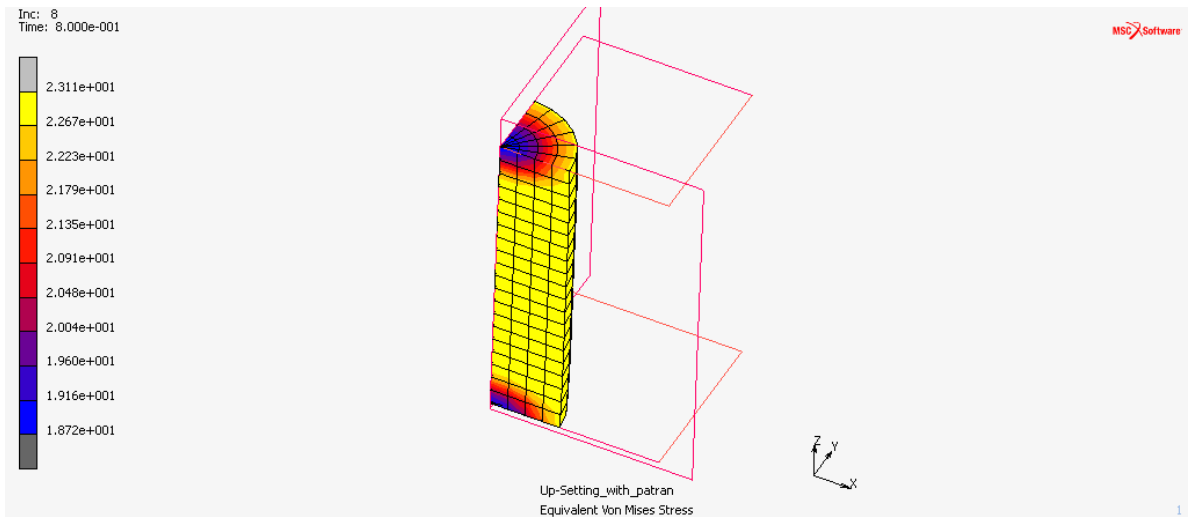
Σχήμα 4.47 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 80 (480 στοιχεία) συμπίεσης

4.4.1.10 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

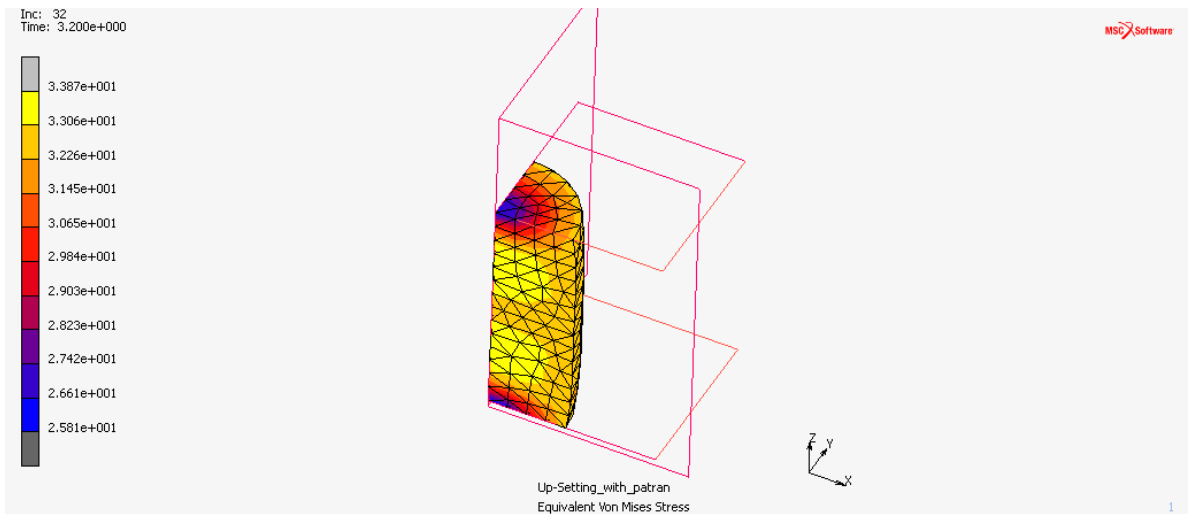
Ενώ υπήρχε πολύ μεγάλη παραμόρφωση τού πλέγματος τών πεπερασμένων στοιχείων η επίλυση συνέχισε, με τήν αναδημιουργία του πλέγματος θα δούμε με μεγαλύτερη ευκρίνεια τίσ καμπύλες επιφάνειες αλλά θα έχουμε και καλύτερη ποιότητα πλέγματος. Παρακάτω παρουσιάζεται η ανάλυση.



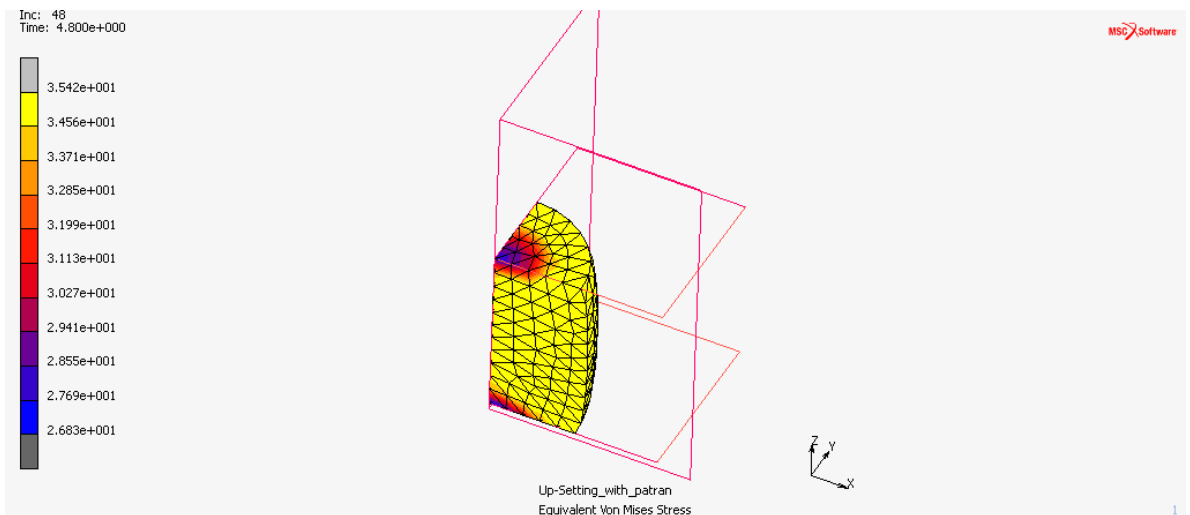
Σχήμα 4.48 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (480 στοιχεία) συμπίεσης



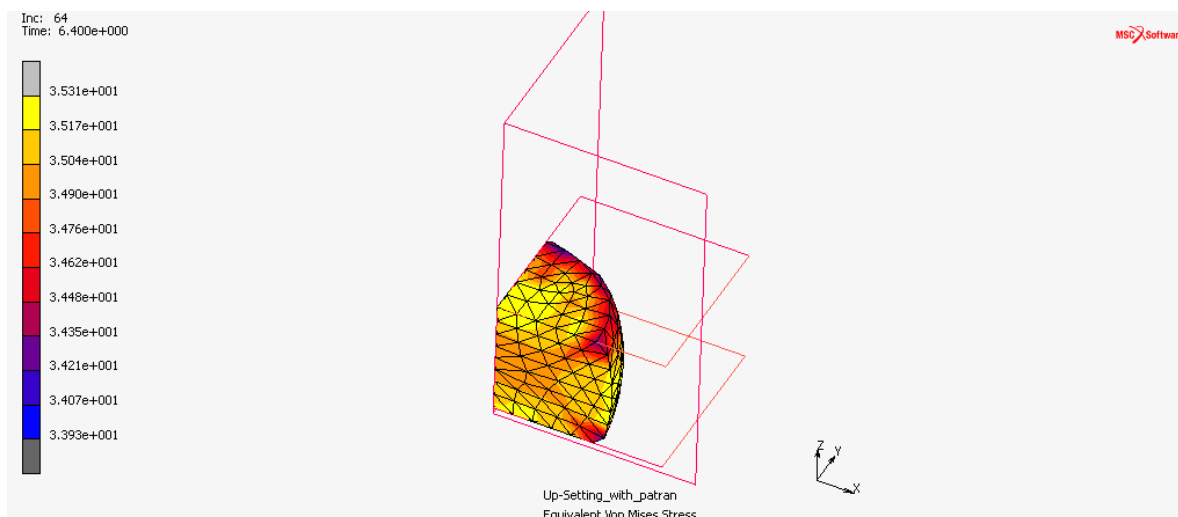
Σχήμα 4.49 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 8 (480 στοιχεία) συμπίεσης



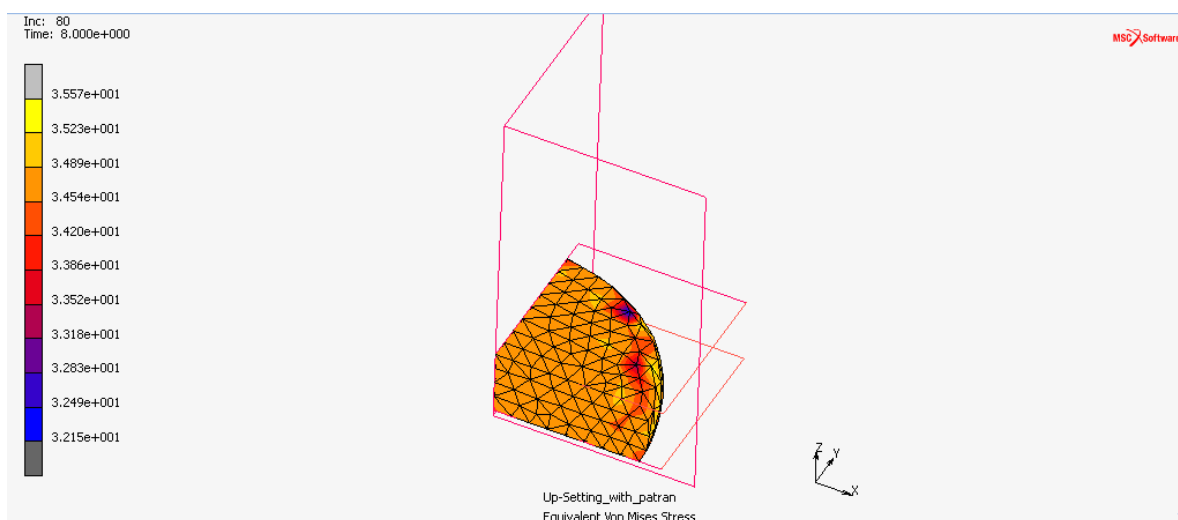
Σχήμα 4.50 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 32 (1154 στοιχεία) συμπίεσης



Σχήμα 4.51 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 48 (1310 στοιχεία) συμπίεσης



Σχήμα 4.52 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 64 (1067 στοιχεία) συμπίεσης



Σχήμα 4.53 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 80 (1339 στοιχεία) συμπίεσης

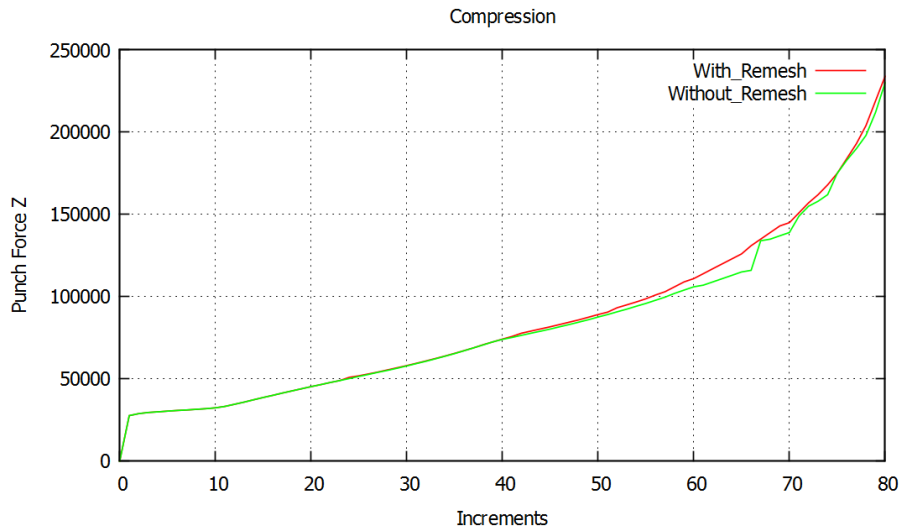
Βλέπουμε ένα καλύτερο σε ποιότητα πλέγμα στο **Σχήμα 4.76** σε σχέση με αυτό στο **Σχήμα 4.55**. Τα στοιχεία στην αρχή τής ανάλυσης είναι **480** ενώ στο τέλος τής ανάλυσης ανέρχονται στα **1339**, η αναδημιουργία τού πλέγματος έγινε 8 φορές. Με αυτόν τόν τρόπο μπορούμε να προσεγγίσουμε τήν πραγματική λύση αλλά και να τήν ελέγξουμε.

4.4.1.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για να εμφανίσουμε τα αποτελέσματα, αφού έχουμε επιλέξει τήν εντολή **Open Post File (Results Menu)** στο παράθυρο Run Job και βρισκόμαστε στο μενού **Model Plot Results** στην καρτέλα **Results** ακολουθούμε τήν εντολή:

Results → **History Plot** → **All Incs** → **Add Curves** → **Global**

και επιλέγουμε του άξονες, στον x βάζουμε τα βήματα (Increments) και στον y την δύναμη του εμβόλου Punch Force y κατά y επιλέγουμε Fit και βλέπουμε το διάγραμμά μας. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε μορφή .txt, στο μενού τού History Plot επιλέγουμε Save. Τα αποτελέσματα που θα πάρουμε είναι κατά την συμμετρία 90° οπότε θα πρέπει να τα επεξεργαστούμε και να τα πολλαπλασιάσουμε με τέσσερα. Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση με και χωρίς την αναδημιουργία του πλέγματος στην κατεργασία τής συμπίεσης με το πρόγραμμα gnuplot Grapher.



Σχήμα 4.54 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων συμπίεσης

Φαίνεται καθαρά η δύναμη με την χρήση τής αναδημιουργίας τού πλέγματος κινείται πολύ πιο ομαλά σε σχέση με αυτήν χωρίς την αναδημιουργία. Όπως φαίνεται η χρήση τής αναδημιουργίας σε κατεργασίες συμπίεσης βοηθάει στο να έχουμε ομοιομορφία σε όλα τα βήματα τής κατεργασίας.

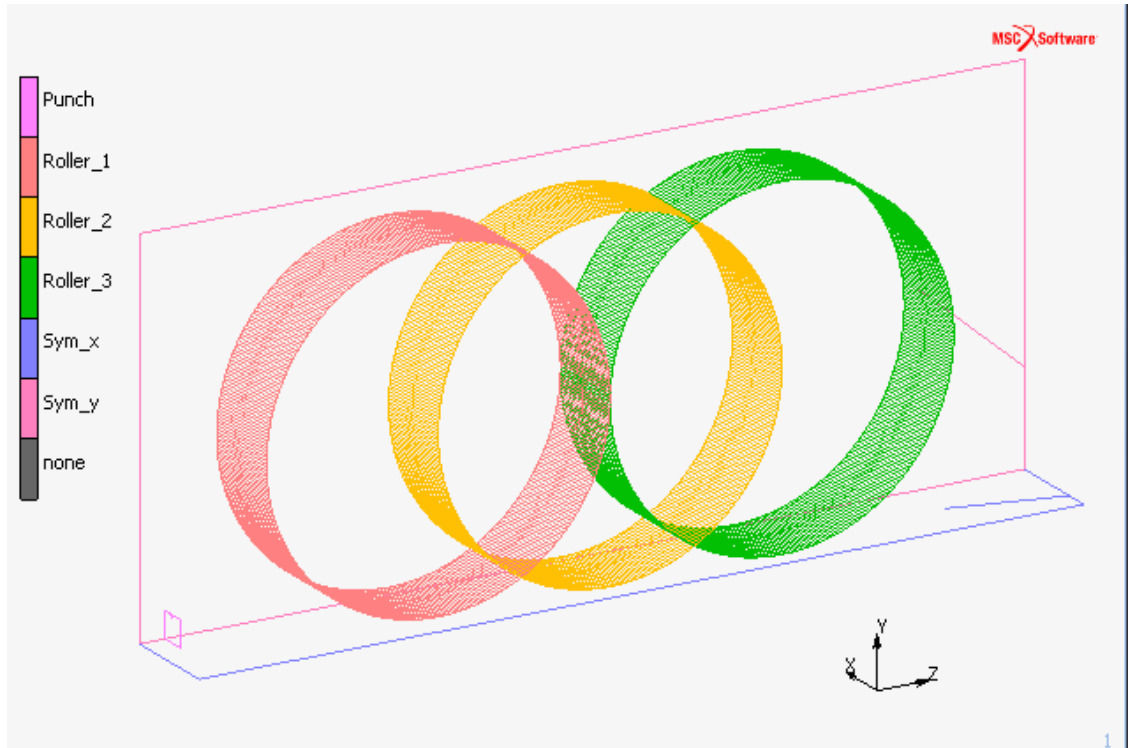
4.4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC

4.4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η διαδικασία εισαγωγής και στις τρεις κατεργασίες είναι η ίδια ακολουθούμε την διαδρομή:

File → Import → IGES

και εισάγουμε την συμμετρική γεωμετρία των ραούλων και τού εμβόλου που έχουμε σχεδιάσει, στην συνέχεια αφαιρούμε περιττά σημεία, καμπύλες και επιφάνειες και δημιουργούμε τις επιφάνειες συμμετρίας κατά 90° όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.55 Γεωμετρία διέλασης που έχει εισαχθεί από SolidWorks και έχει επεξεργαστεί στο MSC.Marc

4.4.2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

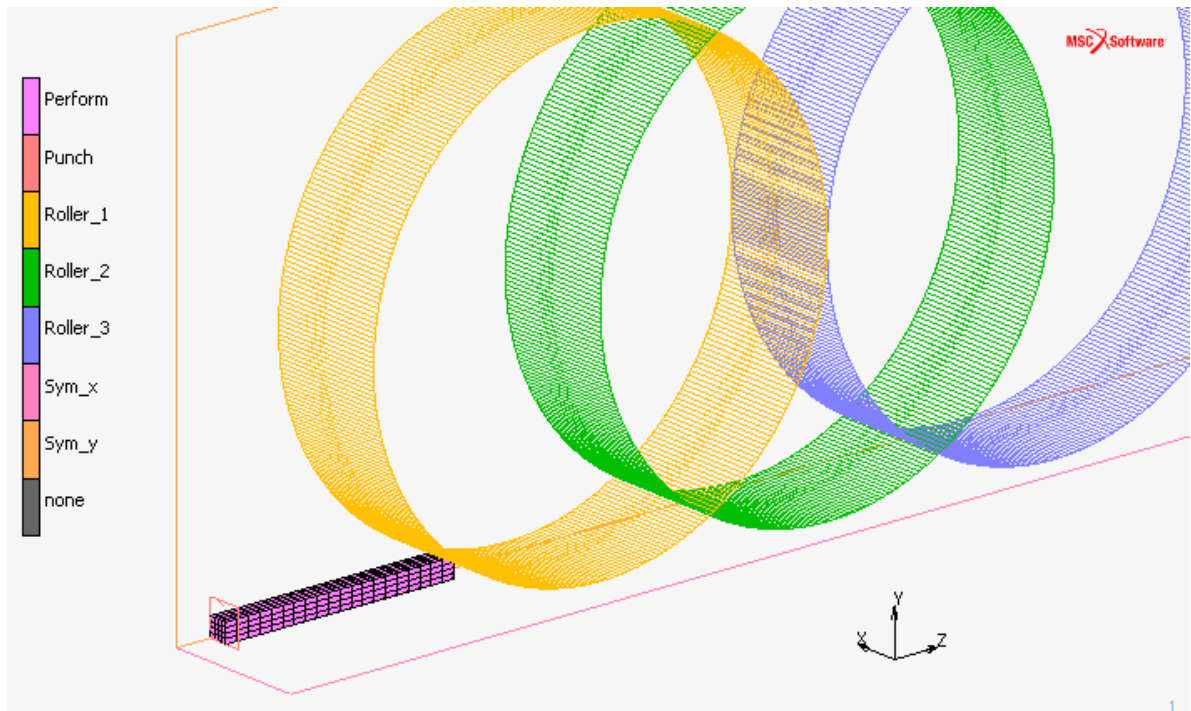
Και σε αυτή την κατεργασία διαμόρφωσης θα χρησιμοποιηθούν εξαεδρικά στοιχεία. Ορίζουμε την επιφάνεια που θα προσδιορίζει το κατεργαζόμενο τεμάχιο και δημιουργούμε την ορθογώνια επιφάνεια και την μετατρέπουμε από επιφάνεια σε τετραγωνικά στοιχεία διαστάσεων 5x2mm.

Geometry & Mesh → Convert → Surfaces to Elements

Για να δώσουμε την τελική συμμετρική μορφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου που θα αποτελείται από εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούμε την εντολή:

Geometry & Mesh → Expand → Elements

για τετραγωνικά δοκίμια ορίζουμε το βάθος προεκτάσεις και τα βήματα. Παρακάτω φαίνονται τα εξαεδρικά στοιχεία που δημιουργήσαμε.



Σχήμα 4.56 Πλέγμα εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων για την επίπεδη έλαση

Τέλος χρησιμοποιούμε την εντολή sweep για να διαγραφούν από το πλέγμα μας οι διπλοί κόμβοι που υπάρχουν ορίζοντας το tolerance 0.005, ακολουθώντας την παρακάτω εντολή.

Geometry & Mesh → Sweep → Nodes

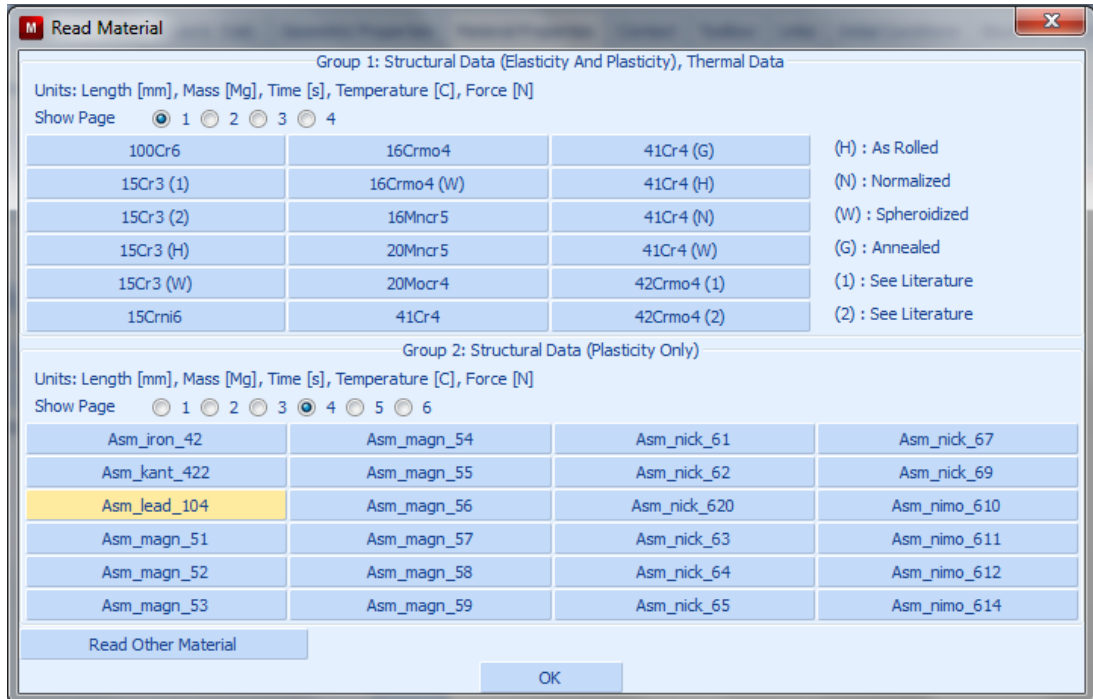
Τελικά οι κόμβοι και τα στοιχεία που θα έχουμε θα είναι **609** και **480** αντίστοιχα.

4.4.2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την κατεργασία θα είναι ο μόλυβδος και θα ληφθεί από την βιβλιοθήκη τού προγράμματος με την ακόλουθη εντολή:

Material Properties → Import → Read Material

και επιλέγουμε μόλυβδο (asm_lead_104).



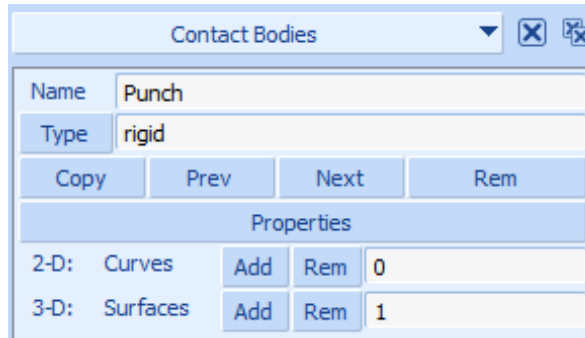
Σχήμα 4.57 Επιλογή του Μολύβδου ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών του MSC MARC

4.4.2.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΑΦΩΝ

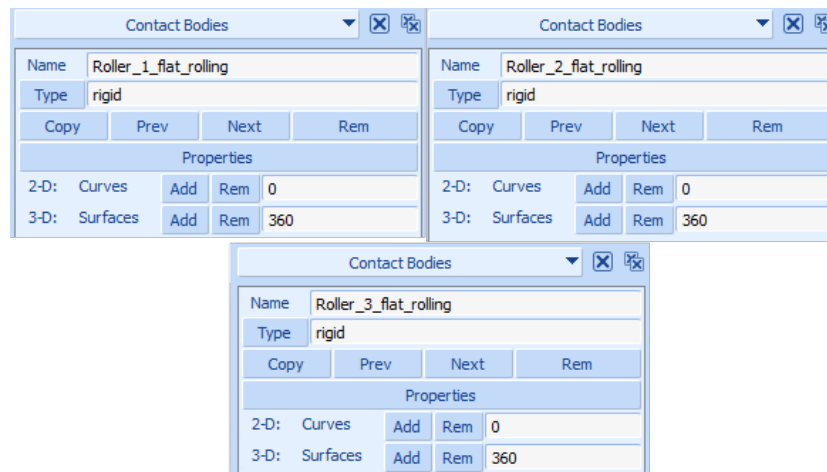
Για να ορίσουμε τα κομμάτια σαν παραμορφώσιμα (deformable), απαραμόρφωτα (rigid) και συμμετρικά (symmetry) επιλέγουμε την εντολή:

Contact → Contact Bodies → New → Rigid

και ορίζουμε τα απαραμόρφωτα (Rigid) τα ράουλα και το έμβολο, ως συμμετρικές (Symmetry) τις επιφάνειες συμμετρίας και ως παραμορφώσιμο (Deformable) το παραμορφώσιμο σώμα, το δοκίμιο. Στο παράθυρο που εμφανίζεται πληκτρολογούμε το όνομα, στο κελί δίπλα στη θέση **Name**, και μετά επιλέγουμε το κουμπί **Add** δίπλα στη θέση **3-D: Surfaces** για να καθορίσουμε την επιφάνεια όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.17**.



Σχήμα 4.58 Ορισμός εμβόλου ως απαραμόρφωτο σώμα

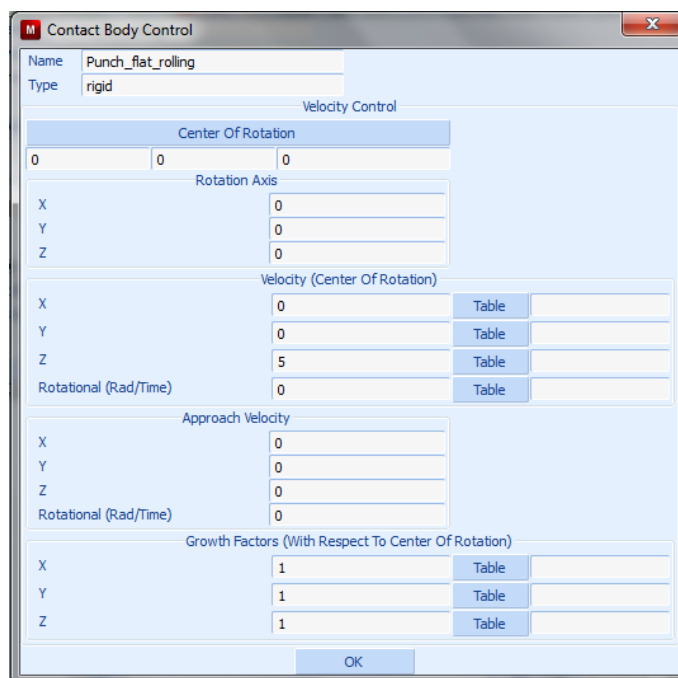


Σχήμα 4.59 Ορισμός ράουλων ως απαραμόρφωτα σώματα για επίπεδη έλαση

Στον ορισμό του εμβόλου θα πρέπει να καθορίσουμε την φορά του και την ταχύτητά του. Αυτό γίνεται στην καρτέλα **Contact Bodies** που ορίσαμε το έμβολο ακολουθώντας την εντολή:

Properties* → *Parameters

Και εμφανίζεται το παράθυρο **Contact Bodies Control**.



Σχήμα 4.60 Ορισμός της ταχύτητας του εμβόλου κατά τον άξονα Z.

Στο **Σχήμα 4.60** βλέπουμε τον ορισμό της ταχύτητας του εμβόλου που υπολογίστηκε σύμφωνα με την περιφερειακή ταχύτητα των ραούλων.

Η διαδικασία καθορισμού περιστροφικής κίνησης διαφέρει από την αξονική. Ακολουθώντας την ίδια εντολή και φτάνοντας στο παράθυρο **Contact Bodies Control** για κάθε ράουλο ορίζουμε το κέντρο περιστροφής στην εντολή **Center Of Rotation** για κάθε ράουλο είναι διαφορετικό για να πετύχουμε το τελικό πάχος της ράβδου των 2mm. Στήν συνέχεια ορίζουμε τον άξονα περιστροφής στο **Rotation Axis** που σύμφωνα με την γεωμετρία μας είναι ο άξονα x και τέλος στο **Velocity (Center Of Rotation)** ορίζουμε την ταχύτητα στην επιλογή **Rotational (rad/time)**. Παρακάτω φαίνεται το παράθυρο **Contact Bodies Control** για το κάθε ράουλο ξεχωριστά.

Contact Body Control

Name: Roller_1_flat_rolling
 Type: rigid

Velocity Control

Center Of Rotation

| | | |
|---|-----|-----|
| 0 | 104 | 130 |
|---|-----|-----|

Rotation Axis

| | |
|---|---|
| X | 1 |
| Y | 0 |
| Z | 0 |

Velocity (Center Of Rotation)

| | | | |
|-----------------------|--------|-------|--|
| X | 0 | Table | |
| Y | 0 | Table | |
| Z | 0 | Table | |
| Rotational (Rad/Time) | -0.667 | Table | |

Approach Velocity

| | |
|-----------------------|---|
| X | 0 |
| Y | 0 |
| Z | 0 |
| Rotational (Rad/Time) | 0 |

Growth Factors (With Respect To Center Of Rotation)

| | | | |
|---|---|-------|--|
| X | 1 | Table | |
| Y | 1 | Table | |
| Z | 1 | Table | |

OK

Σχήμα 4.61 Ορισμός της ταχύτητας πρώτου ράουλου.

Contact Body Control

Name: Roller_2_flat_rolling
 Type: rigid

Velocity Control

Center Of Rotation

| | | |
|---|-----|-----|
| 0 | 102 | 230 |
|---|-----|-----|

Rotation Axis

| | |
|---|---|
| X | 1 |
| Y | 0 |
| Z | 0 |

Velocity (Center Of Rotation)

| | | | |
|-----------------------|--------|-------|--|
| X | 0 | Table | |
| Y | 0 | Table | |
| Z | 0 | Table | |
| Rotational (Rad/Time) | -0.667 | Table | |

Approach Velocity

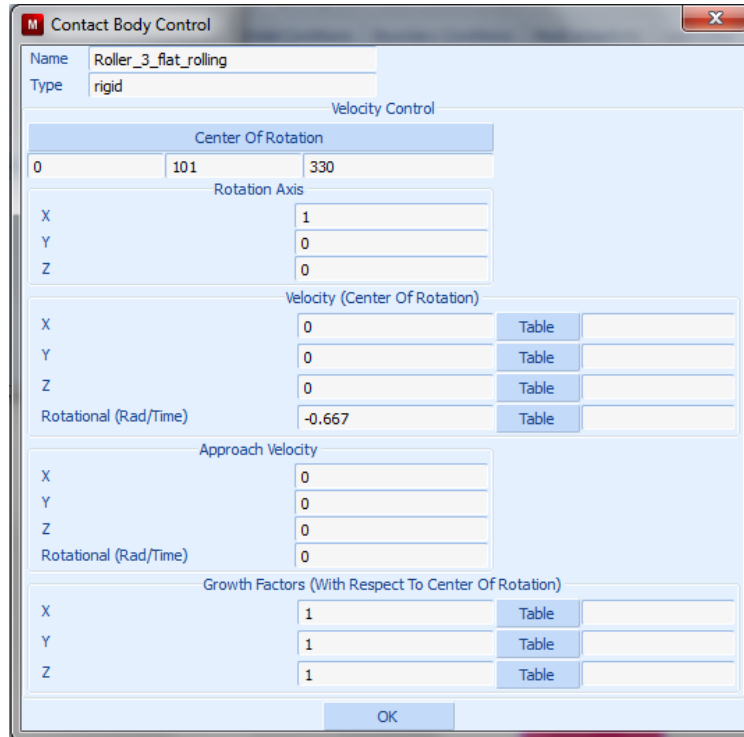
| | |
|-----------------------|---|
| X | 0 |
| Y | 0 |
| Z | 0 |
| Rotational (Rad/Time) | 0 |

Growth Factors (With Respect To Center Of Rotation)

| | | | |
|---|---|-------|--|
| X | 1 | Table | |
| Y | 1 | Table | |
| Z | 1 | Table | |

OK

Σχήμα 4.62 Ορισμός της ταχύτητας δεύτερου ράουλου

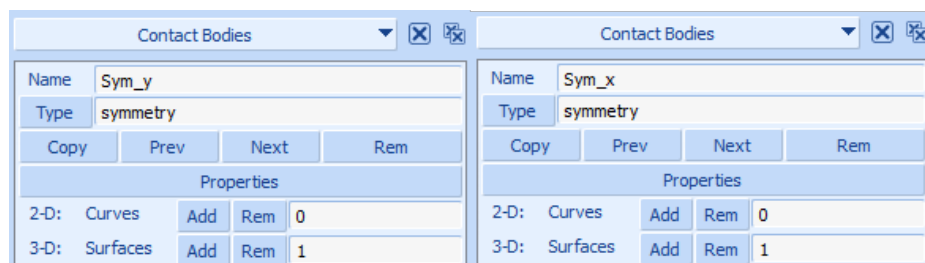


Σχήμα 4.63 Ορισμός της ταχύτητας τρίτου ράουλου

Για τις συμμετρικές επιφάνειες η διαδικασία είναι η ίδια με την εντολή:

Contact → **Contact Bodies** → **New** → **Symmetry**

στο παράθυρο που εμφανίζεται πληκτρολογούμε το όνομα, στο κελί δίπλα στη θέση **Name**, και μετά επιλέγουμε το κουμπί **Add** δίπλα στη θέση **3-D: Surfaces** για να καθορίσουμε την επιφάνεια όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.16**.

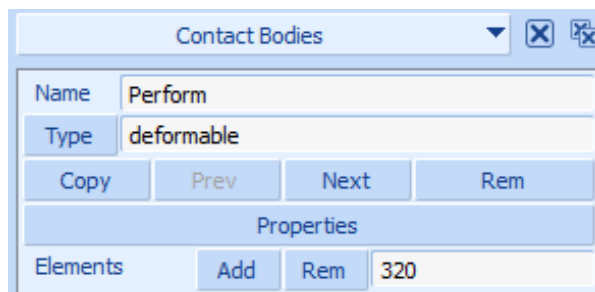


Σχήμα 4.64 Ορισμός συμμετρικών επιφανειών ως συμμετρικά σώματα

Τέλος στην περιοχή **Contact Bodies** πρέπει να ορίσουμε το παραμορφώσιμο σώμα, δηλαδή το δοκίμιο μας που είναι στην μορφή εξαεδρικών στοιχείων, ακολουθούμε την εντολή:

Contact → **Contact Bodies** → **New** → **Deformable**

και στο παράθυρο που εμφανίζεται πληκτρολογούμε το όνομα στο κελί δίπλα στη θέση **Name** και μετά επιλέγουμε το κουμπί **Add** δίπλα στη θέση **Elements** όπως φαίνεται αμέσως πιο κάτω.



Σχήμα 4.65 Ορισμός δοκιμίου ως παραμορφώσιμο σώμα

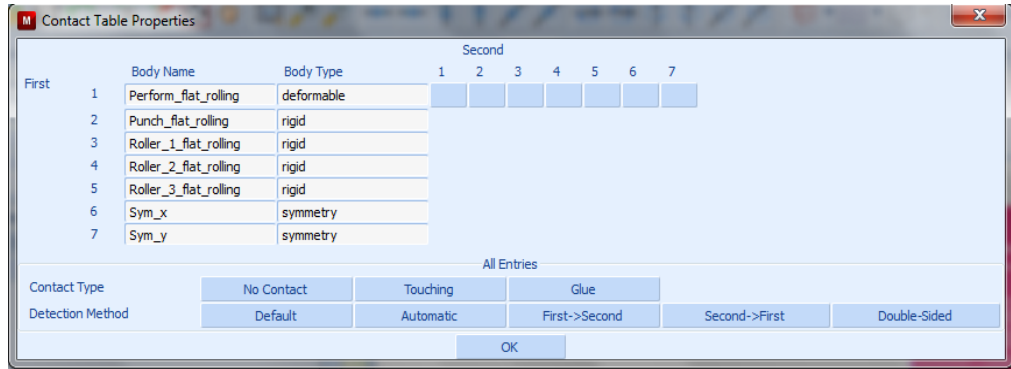
Σε κάθε επαφή που καταχωρίσαμε θα πρέπει να ορίσουμε και τον συντελεστή τριβής που έχει, αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή:

Contact → Contact Tables → New

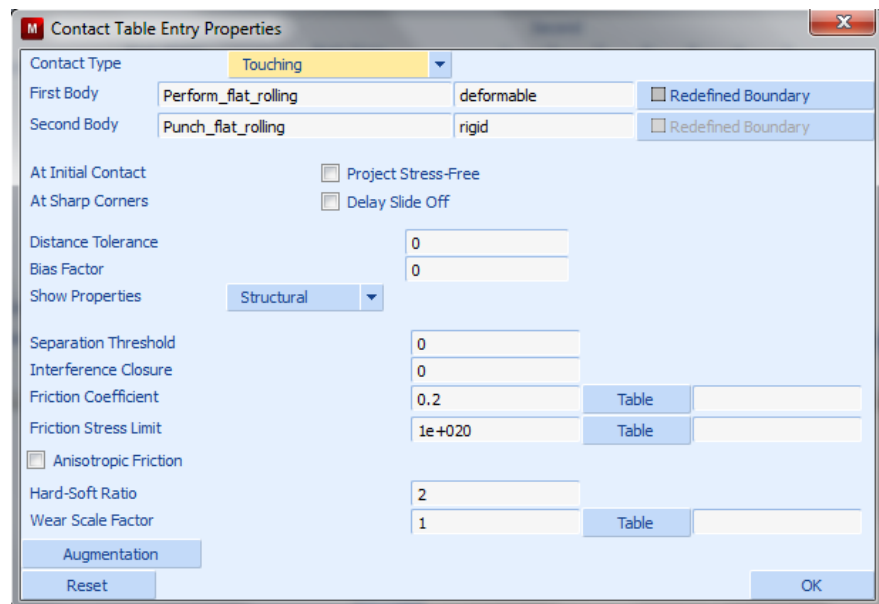
Στην συνέχεια επιλέγουμε την εντολή **Properties** και μας εμφανίζει το παράθυρο **Contact Table Properties** και παρατηρούμε ότι μονό το δοκίμιο (Perform) αντιστοιχίζεται με τα υπόλοιπα σώματα στον πίνακα ιδιοτήτων επαφών. Για την επαφή τού δοκιμίου με κάποιο απαραμόρφωτο σώμα επιλέγουμε το ανάλογο κουτί στην οριζόντια σειρά κουτιών στην περιοχή **Second** και στο παράθυρο που εμφανίζεται δίνουμε την εντολή:

Contact Type → Touching

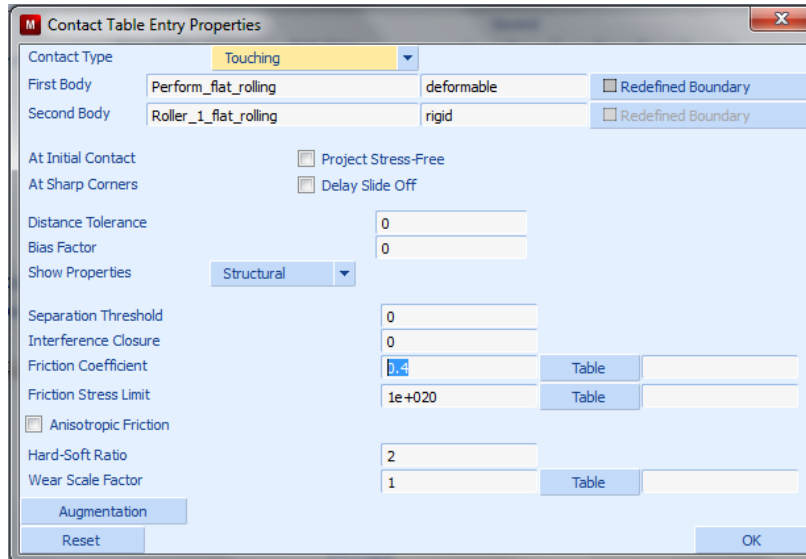
και ορίζουμε στο κελί δίπλα από το **Friction Coefficient** την τιμή 0.2 για το έμβολο και για τα ράουλα ο συντελεστής τριβής θα είναι μεγαλύτερος και θα έχει την τιμή 0.4. Στήν επαφή με τις συμμετρικές επιφάνειες δεν χρειάζεται να ορίσουμε κάποια τιμή για τον συντελεστή τριβής αλλά μόνο ότι ακουμπάει (δηλαδή *Contact Type → Touching*).



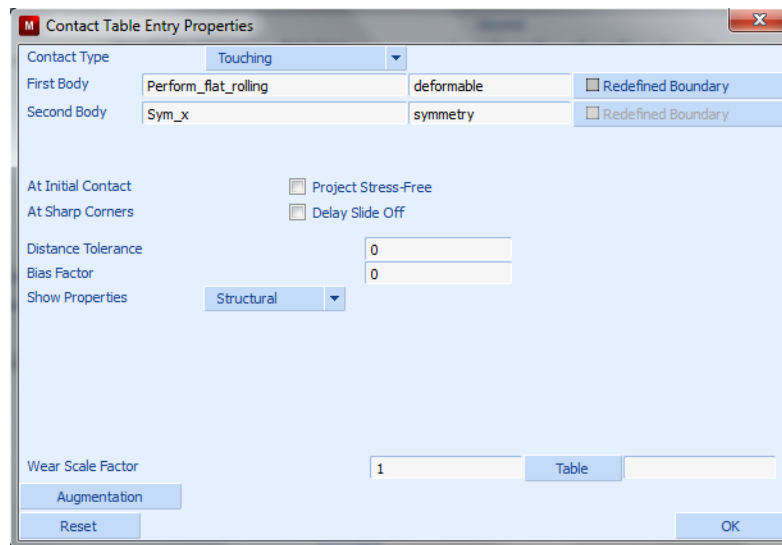
Σχήμα 4.66 Πίνακας επαφών μεταξύ των στοιχείων



Σχήμα 4.67 Ορισμός της επαφής μεταξύ του εμβόλου και του δοκιμίου



Σχήμα 4.68 Ορισμός της επαφής μεταξύ του ρόουλι και του δοκιμίου με συντελεστή τραχύτητας 0.4



Σχήμα 4.69 Ορισμός της επαφής μεταξύ του δοκιμίου και της επιφάνειας συμμετρίας



Σχήμα 4.70 Τελικός πίνακας επαφών μεταξύ σωμάτων

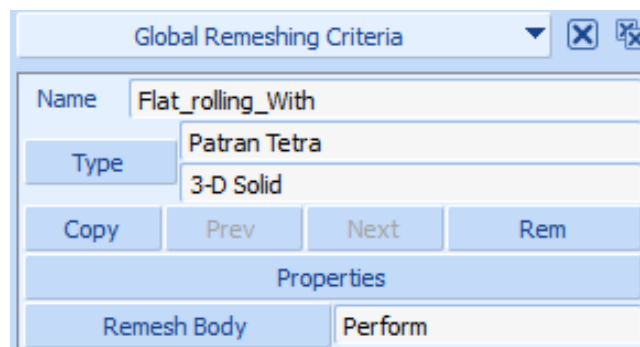
Για την επιτυχή καταχώρηση κάθε κουτί θα πρέπει να έχει το γράμμα **T (Touching)**.
Επιλέγουμε το κουμπί **OK**.

4.4.2.5 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Για τις επιλογές της αναδημιουργίας τού πλέγματος ακολουθούμε την εντολή:

Mesh Adaptivity → Global Remeshing Criteria → New → Patran Tetra

στην συνέχεια ορίζουμε τα κριτήρια επαναδημιουργίας του πλέγματος καθώς και τις παραμέτρους για τα νέα στοιχεία που θα δημιουργηθούν.

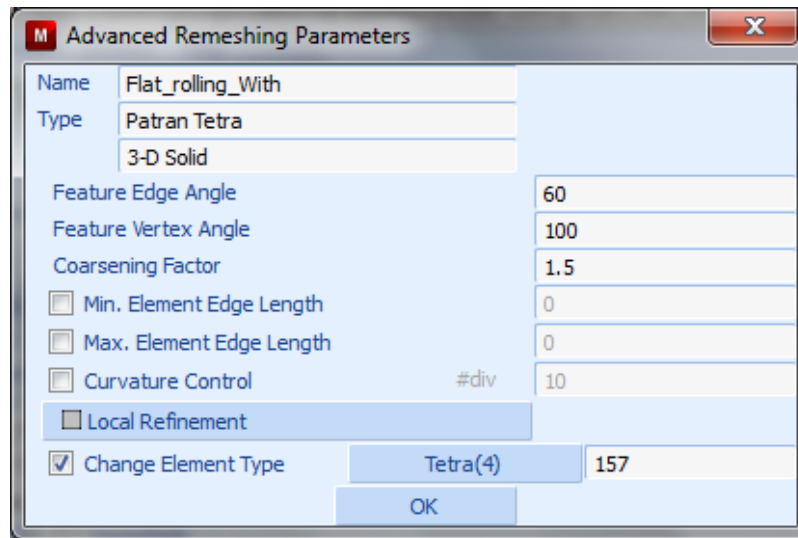


Σχήμα 4.71 Γενικά κριτήρια επιλογής αναγέννησης του πλέγματος

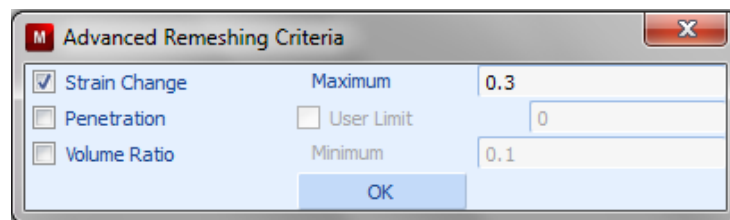
Για την κατεργασία της επίπεδη έλασης θα χρησιμοποιήσουμε τούς ίδιους περιορισμούς δηλαδή:

- **Strain Change:** 0.3
- **#Elements:** 1000
- **Change Element Type:** 157

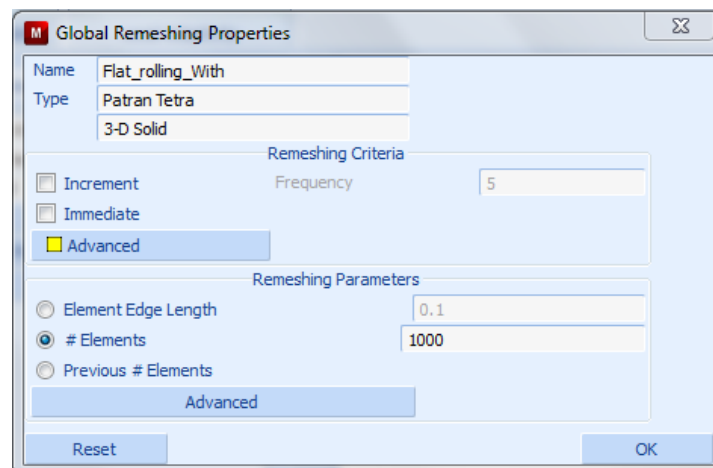
Όπως φαίνεται στα **Σχήματα 4.34, 4.35, 4.36**.



Σχήμα 4.72 Ειδικές παράμετροι αναγέννησης του πλέγματος



Σχήμα 4.73 Ειδικά κριτήρια αναδιαμόρφωσης του πλέγματος



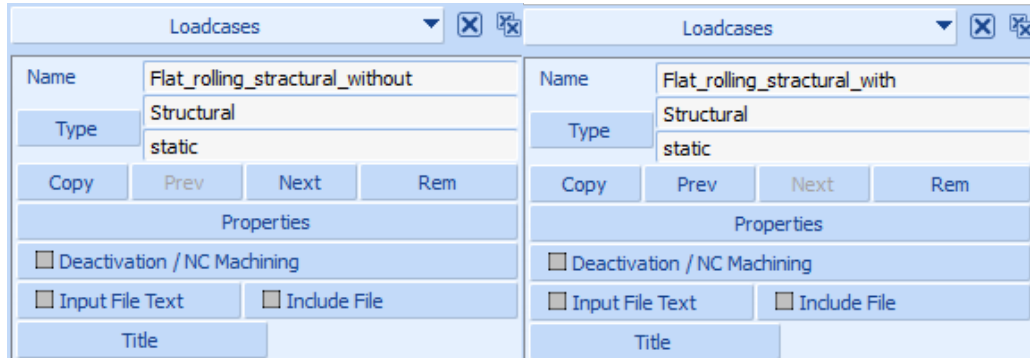
Σχήμα 4.74 Ιδιότητες αναγέννησης του πλέγματος

4.4.2.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Επιλέγουμε την καρτέλα **Loadcases** δίνουμε την εντολή:

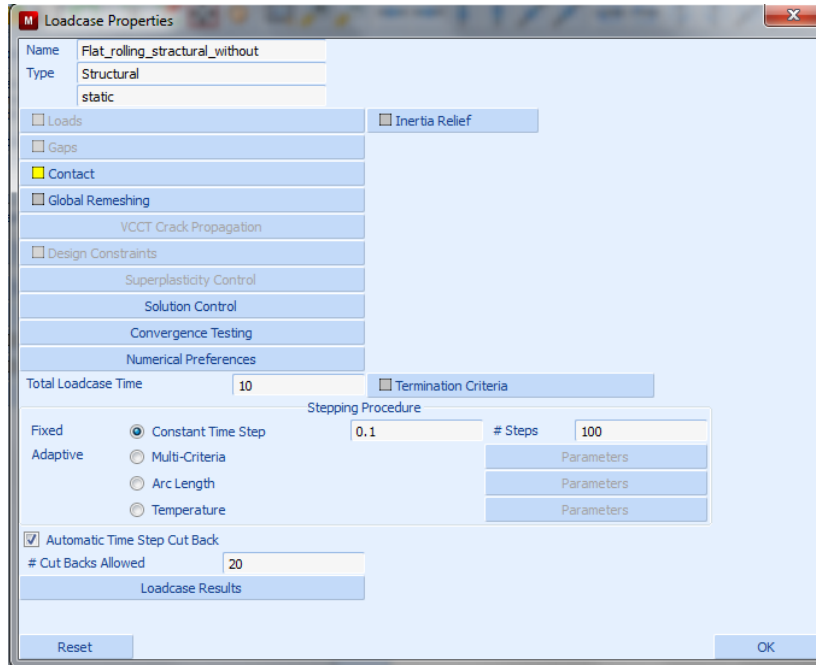
Loadcases → New → Static

Θα δημιουργήσουμε 2 προϋποθέσεις φόρτισης μία με αναδημιουργία πλέγματος και μία χωρίς άρα τήν παραπάνω εντολή τήν ακολουθούμε δύο φορές και αφού δώσουμε όνομα στην φόρτισή μας παίρνουμε τα ακόλουθο παράθυρα επιλογής:

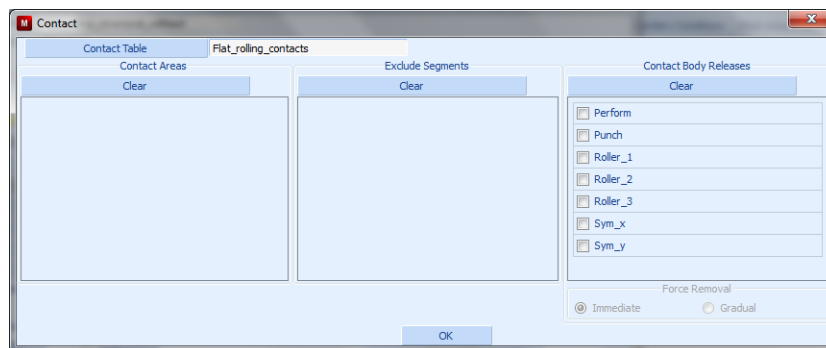


Σχήμα 4.75 Επιλογές για τη ρύθμιση των στοιχείων φόρτισης με και χωρίς αναδημιουργία

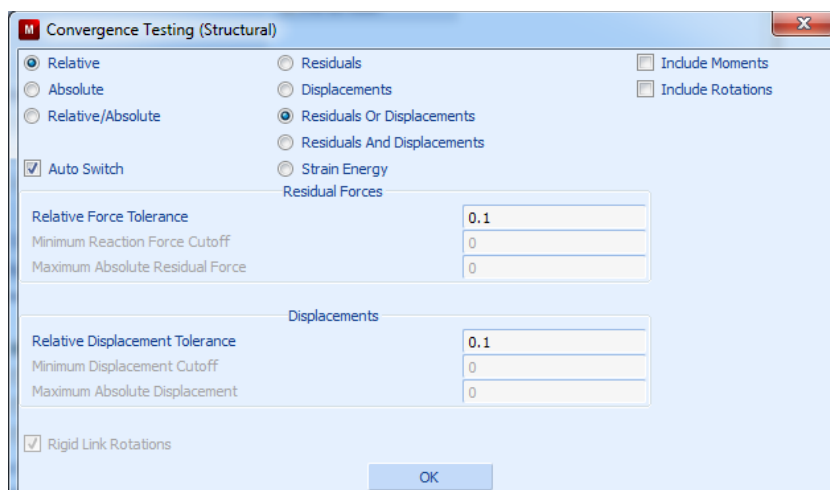
Στη συνέχεια, ορίζουμε τις επιλογές της φόρτισης, όπου διακρίνουμε τον χρόνο φόρτισης, όσος χρόνος χρειάζεται για τήν μετακίνηση τού εμβόλου και τών ράουλων. Ο χρόνος αυτός υποδιαιρείται σε βήματα (Steps) που ορίζουμε εμείς και αυτόματα ορίζετε πόσο θα διαρκεί το κάθε βήμα. Επίσης, στις επιλογές ορίζουμε την επαφή των στοιχείων του μοντέλου δείχνοντας τον πίνακα επαφών που έχουμε κατασκευάσει, το πλέγμα επαναδημιουργίας, όπως το έχουμε ορίσει στο προηγούμενο βήμα καθώς και άλλες απαραίτητες ρυθμίσεις που αφορούν τρόπους σύγκλισης, έλεγχο επίλυσης και αριθμητικές επιλογές.



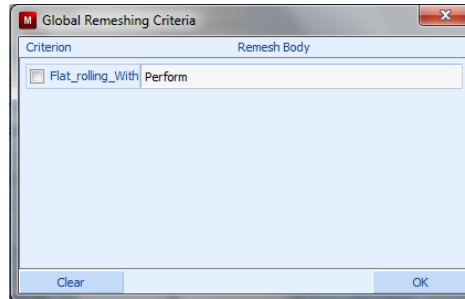
Σχήμα 4.76 Ορισμός των ιδιοτήτων της υπόθεσης φόρτισης



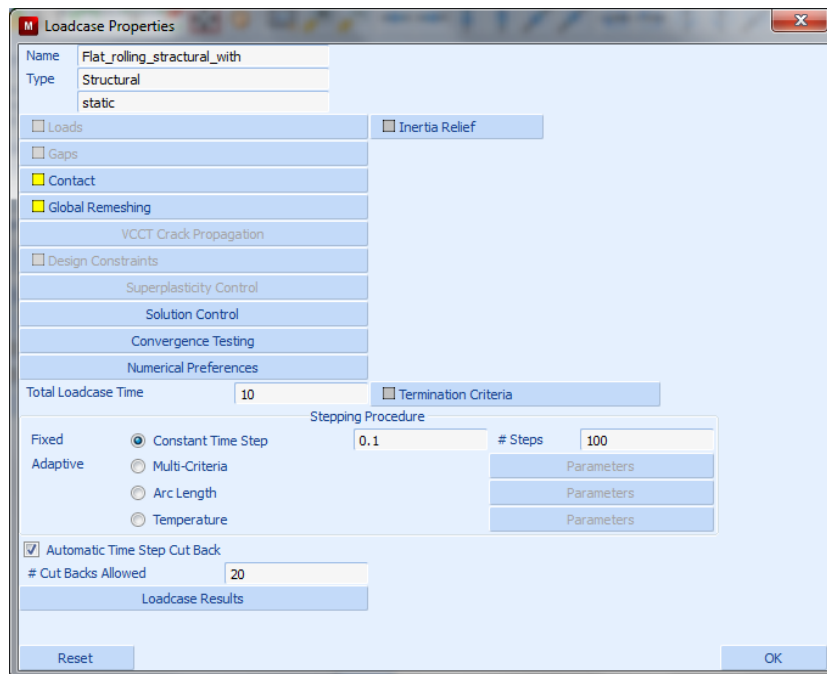
Σχήμα 4.77 Πίνακας επαφών



Σχήμα 4.78 Ορισμός κριτηρίων σύγκλισης



Σχήμα 4.79 Ορισμός αναδημιουργίας πλέγματος



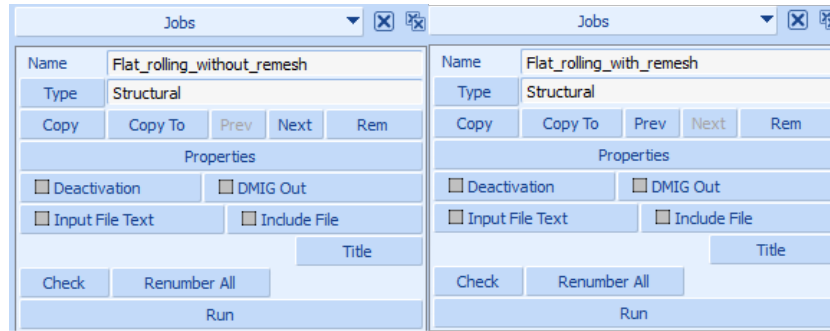
Σχήμα 4.80 Ορισμός των ιδιοτήτων της υπόθεσης φόρτισης με αναδημιουργία

4.4.2.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για να ορίσουμε την ανάλυσή μας χρησιμοποιούμε την εντολή:

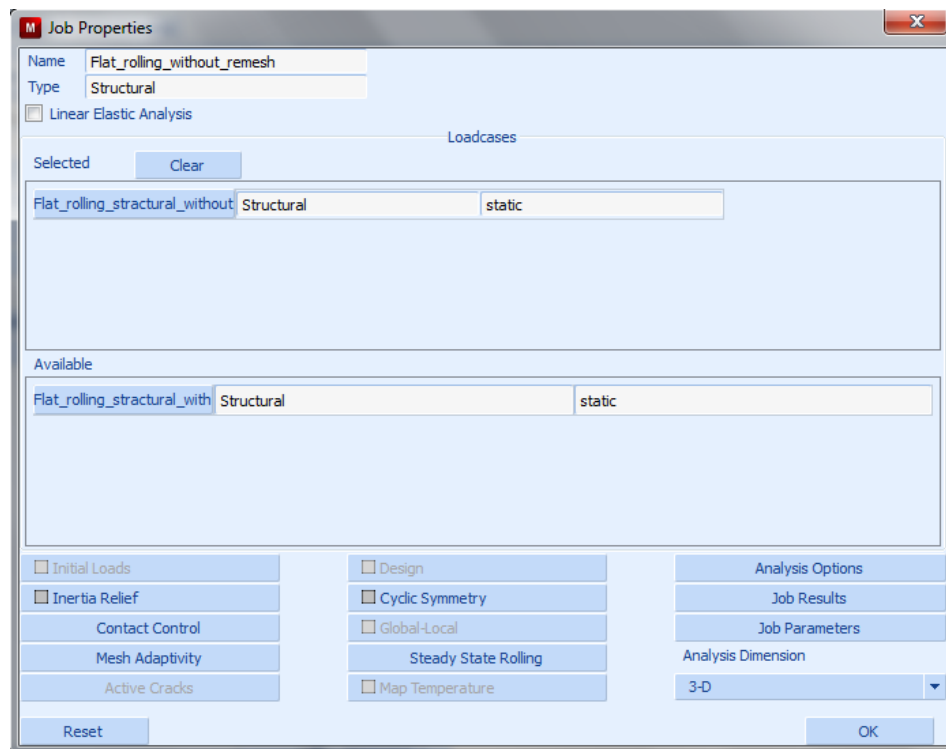
Jobs → New → Structural

και στο παράθυρο που εμφανίζεται δίνουμε το όνομα στο κελί δίπλα στη θέση **Name**.

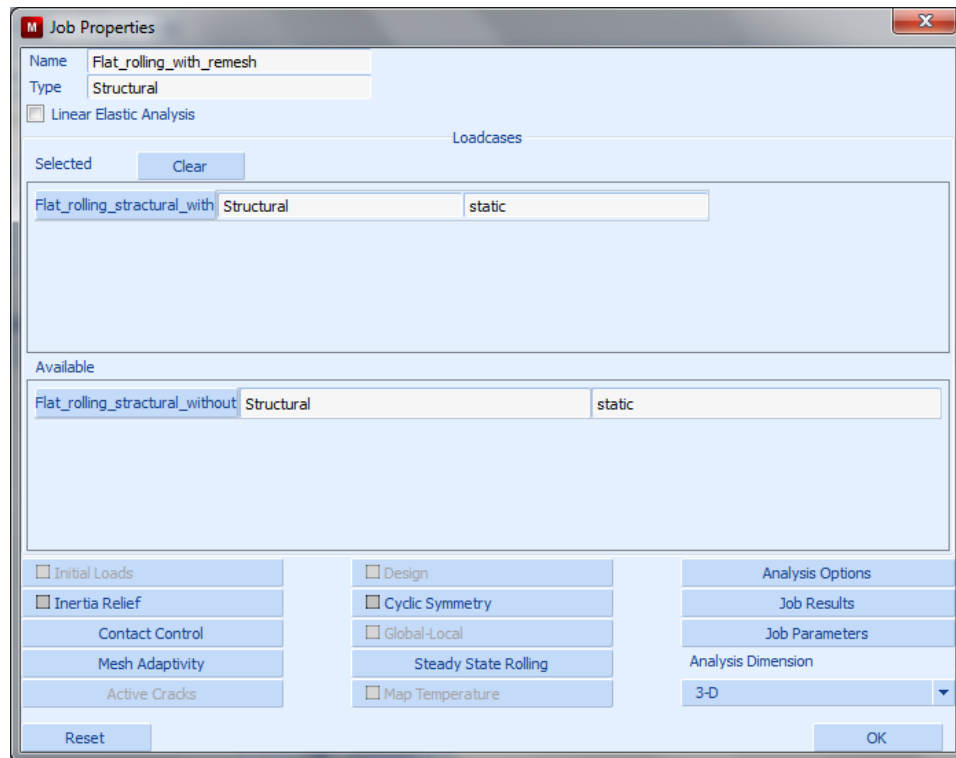


Σχήμα 4.81 Επιλογές προετοιμασίας ανάλυσης.

Επιλέγουμε το κουμπί **Properties** και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε τη την ανάλυση, που εισήχθη προηγουμένως, στην περιοχή **Available**.



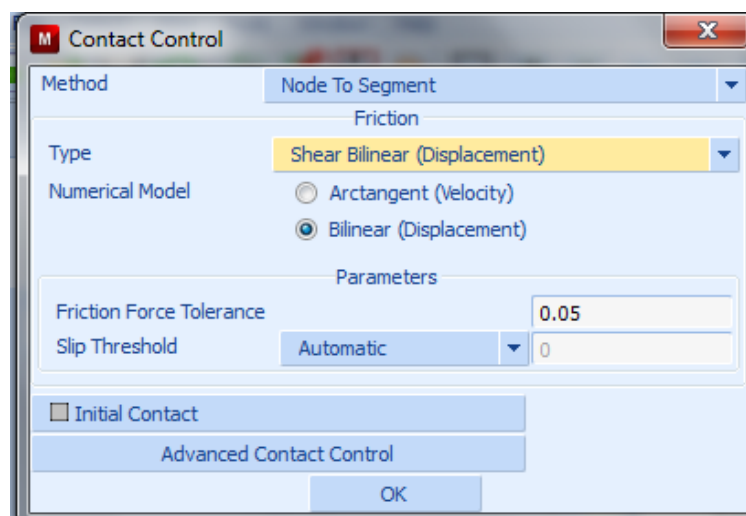
Σχήμα 4.82 Ιδιότητες για την προετοιμασία της ανάλυσης χωρίς αναδημιουργία



Σχήμα 4.83 Ιδιότητες για την προετοιμασία της ανάλυσης με αναδημιουργία

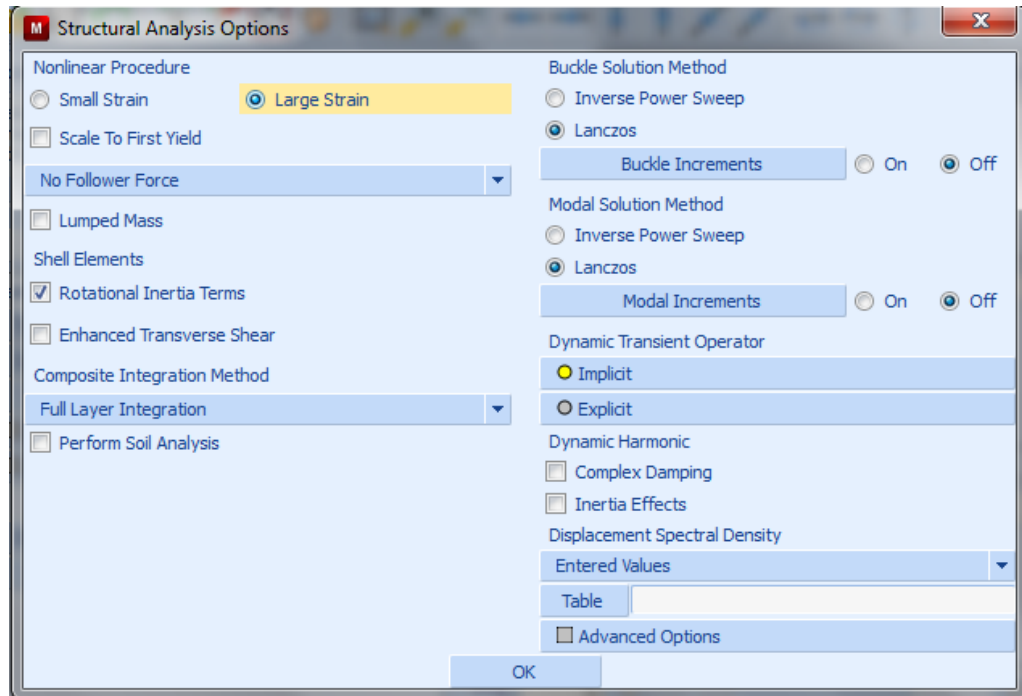
Στη συνέχεια επιλέγουμε το κουμπί **Contact Control** και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε:

Type → Shear Bilinear (Displacement)



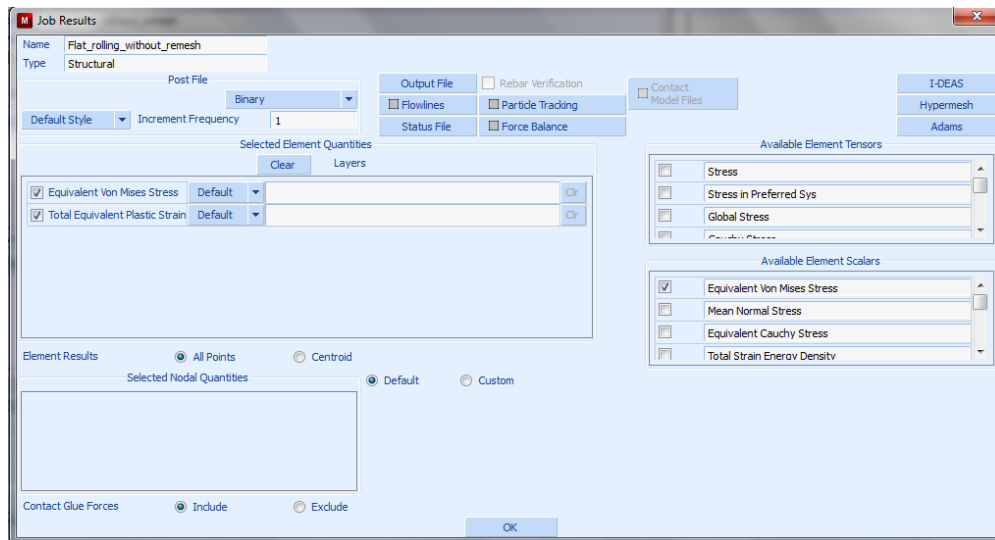
Σχήμα 4.84 Ρύθμιση ιδιοτήτων επαφών

Επιλέγουμε OK και επιστρέφουμε στο **Σχήμα 4.83** όπου πατάμε την επιλογή **Analysis Options** και στο παράθυρο που ακολουθεί επιλέγουμε **Large Strain** στη περιοχή **Nonlinear Procedure** όπως φαίνεται στο αμέσως πιο κάτω σχήμα.



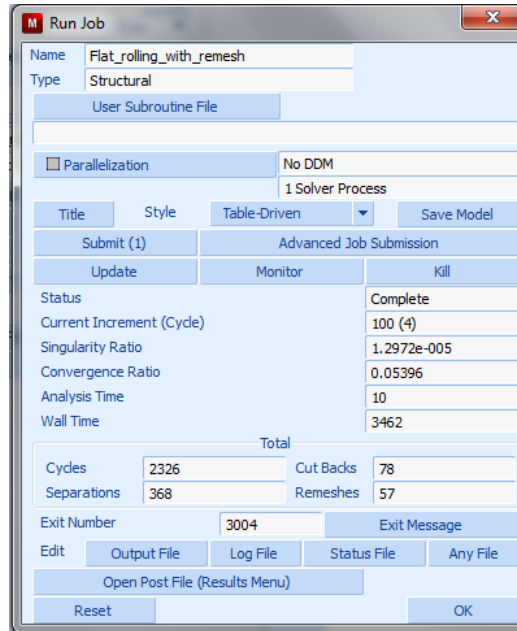
Σχήμα 4.85 Επιλογές για τη δομική ανάλυση

Επιλέγουμε OK. Επιστρέφουμε στο παράθυρο στο **Σχήμα 4.82, 4.83**, αντίστοιχα, και επιλέγουμε το κουμπί **Job Results** προκειμένου να επιλέξουμε ποια αποτελέσματα επιθυμούμε κατά την ανάλυσης να είναι διαθέσιμα. Για την ανάλυση μας θα επιλέξουμε την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises και την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση. Επομένως στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε τις **Equivalent Von Mises stress** και **Total Equivalent Plastic Strain** του πεδίου **Available Elements Scalars**.

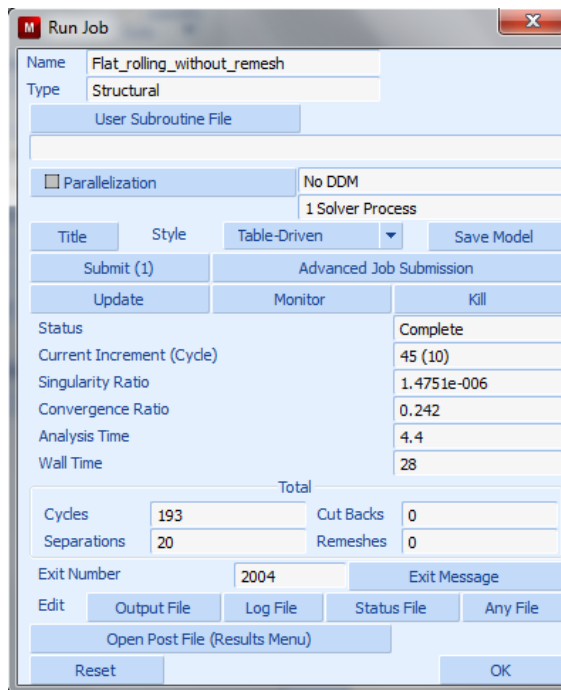


Σχήμα 4.86 Ορισμός των αποτελεσμάτων της διεργασίας

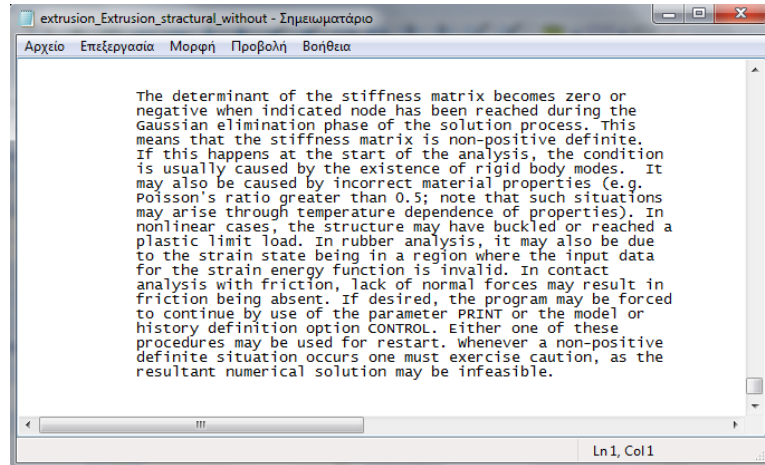
Τέλος επιλέγουμε το OK στο παράθυρο των **Job Properties (Σχήμα 4.83)** που είχαμε ανοίξει και στο παράθυρο στο **Σχήμα 4.81** επιλέγουμε το κουμπί **Check** και αναμένουμε το μήνυμα «**INFO: Found 0 errors and 0 warnings**» στην κονσόλα για να σιγουρευτούμε για τυχόν λάθη και παραλείψεις. Επιλέγουμε την εντολή **Run (Σχήμα 4.32)** και για να ξεκινήσουμε την ανάλυσή μας στο παράθυρο που θα μας εμφανίσει επιλέγουμε την εντολή **Submit (1)** για την εκκίνηση της επίλυσης. Μετά το πέρας της ανάλυσης θα πρέπει να δίνεται ως **Exit Number** ο αριθμός **3004** που δηλώνει την επιτυχή επίλυση. Τότε μπορούμε να παρατηρήσουμε τις διάφορες πληροφορίες όπως για παράδειγμα τους κύκλους ανάλυσης ή τον αριθμό των αναδημιουργιών πλέγματος.



Σχήμα 4.87 Παράθυρο έναρξης και ελέγχου της ανάλυσης μετά την λήξη της με αναδημιουργίας



Σχήμα 4.88 Παράθυρο έναρξης και ελέγχου της ανάλυσης χωρίς αναδημιουργία



Σχήμα 4.89 Μήνυμα διακοπής επίλυσης

Όπως βλέπουμε στο **Σχήμα 4.40** κατά την επίλυση χρειάστηκαν **57** αναδημιουργίες του πλέγματος και το **Exit Number** είναι 3004 που δηλώνει την επιτυχία της ανάλυσης. Ενώ χωρίς αναδημιουργία η επίλυση δεν ολοκληρώθηκε και το **Exit Number** είναι **2004** που σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση στο πλέγμα και δεν μπορεί να συνεχιστεί η επίλυση. Αυτό που εξηγεί είναι ότι λόγω της μεγάλης παραμόρφωσης του πλέγματος η επίλυση δεν μπορεί να συνεχίσει. Αυτό φαίνεται παρακάτω.

4.4.2.8 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

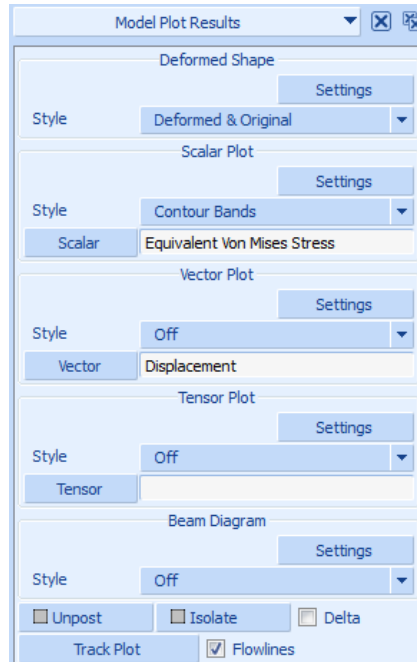
Μετά την επίλυση στο παράθυρο **Run Job** (**Σχήμα 4.88**) Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να εμφανιστούν με την εντολή:

Run Job → Open Post File (Results Menu)

στο παράθυρο που εμφανίζεται **Model Plot Results** επιλέγουμε στην περιοχή **Deformed shape → Style: Deformed Only** και στην περιοχή **Scalar Plot → Style: Counter Bands**, επίσης στην περιοχή **Scalar Plot** ακολουθούμε την εντολή:

Scalar → Equivalent Von Mises Stress

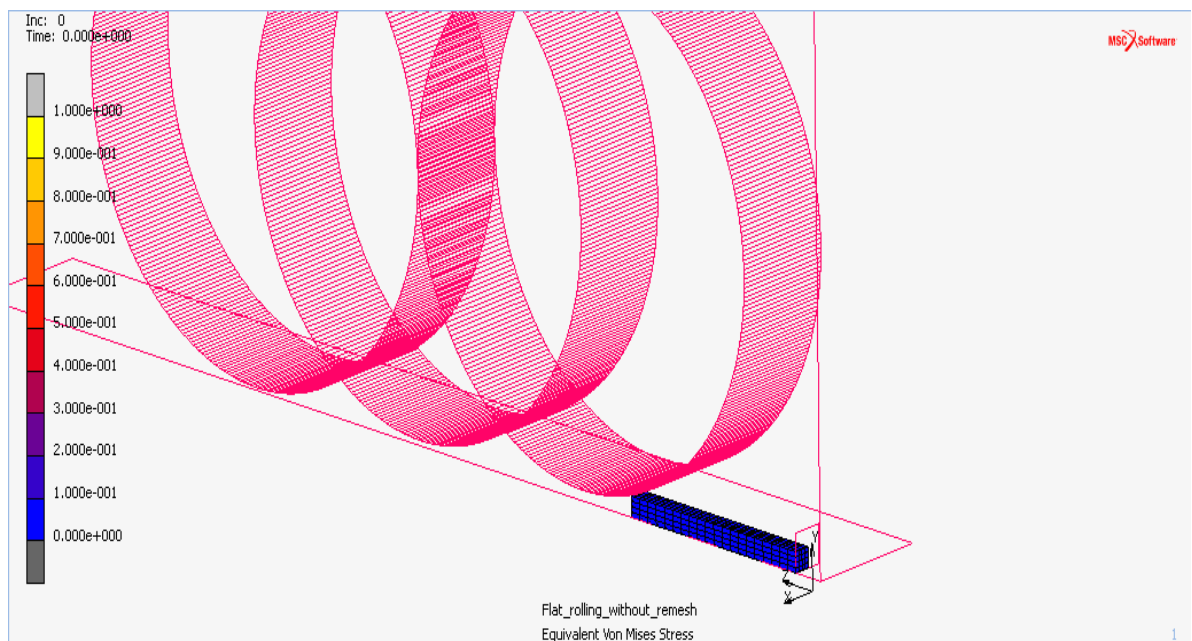
και έτσι προβάλλουμε την παραμόρφωση του δοκιμίου σύμφωνα με τα παραπάνω μεγέθη. Με τη βοήθεια των κουμπιών πλοήγησης μπορούμε να ξεκινήσουμε την γραφική απεικόνιση της κατεργασίας.



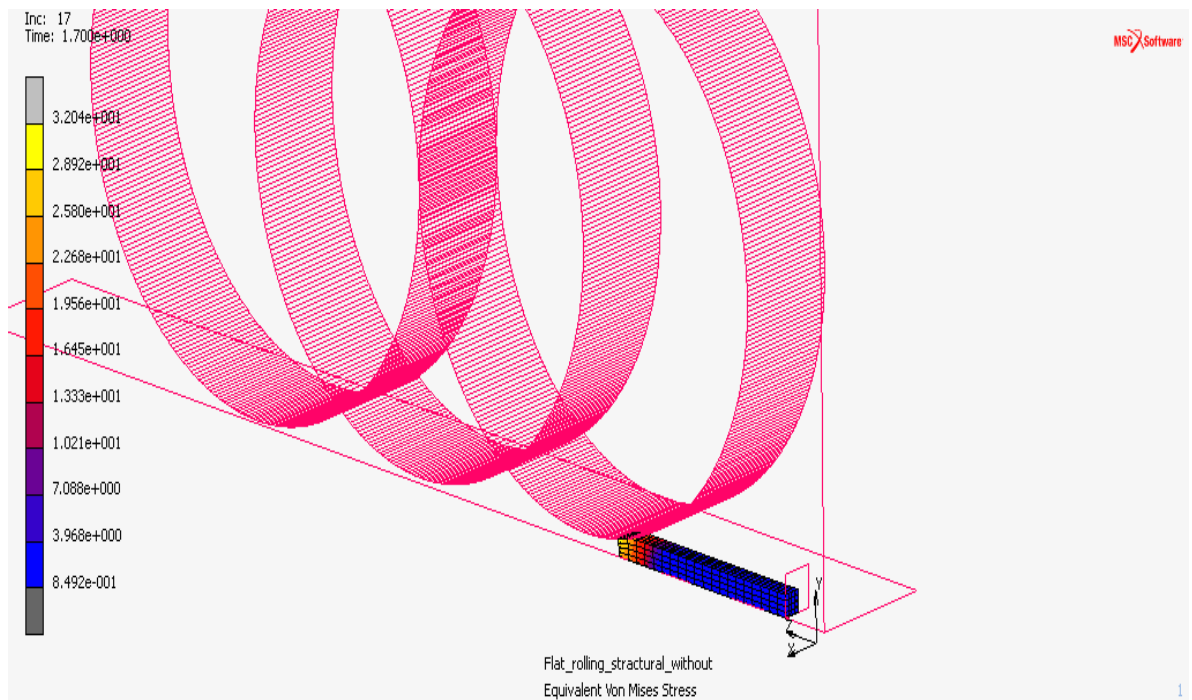
Σχήμα 4.90 Παράθυρο επιλογών γραφικών αποτελεσμάτων προσομοίωσης

4.4.2.9 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

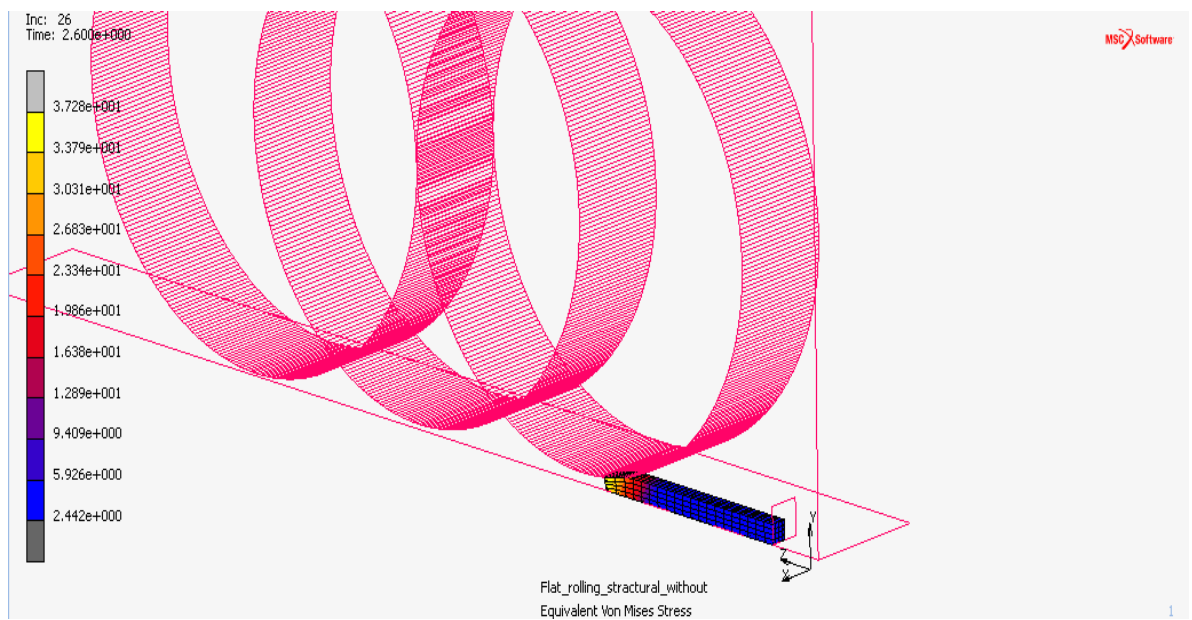
Στήν κατεργασία τής επίπεδης έλασης η επίλυση δεν μπόρεσε να τελειώσει λόγω τής μεγάλης παραμόρφωσης του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων, με τήν αναδημιουργία του πλέγματος θα δούμε ότι η ανάλυση θα περατωθεί με επιτυχία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



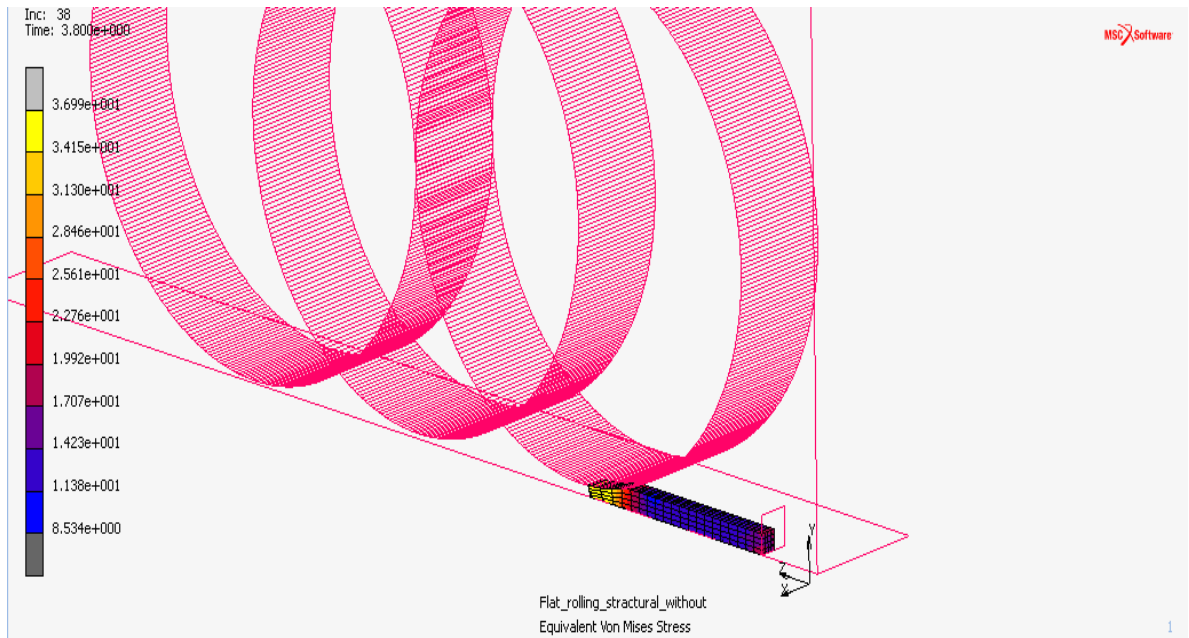
Σχήμα 4.91 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (320 στοιχεία)



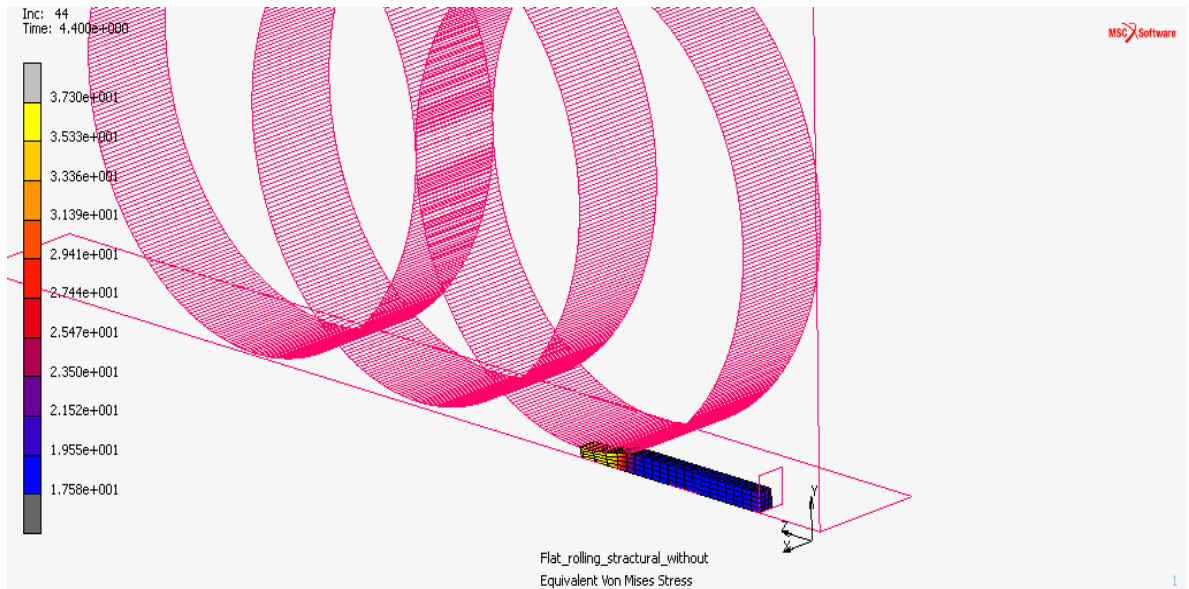
Σχήμα 4.92 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 17 (320 στοιχεία)



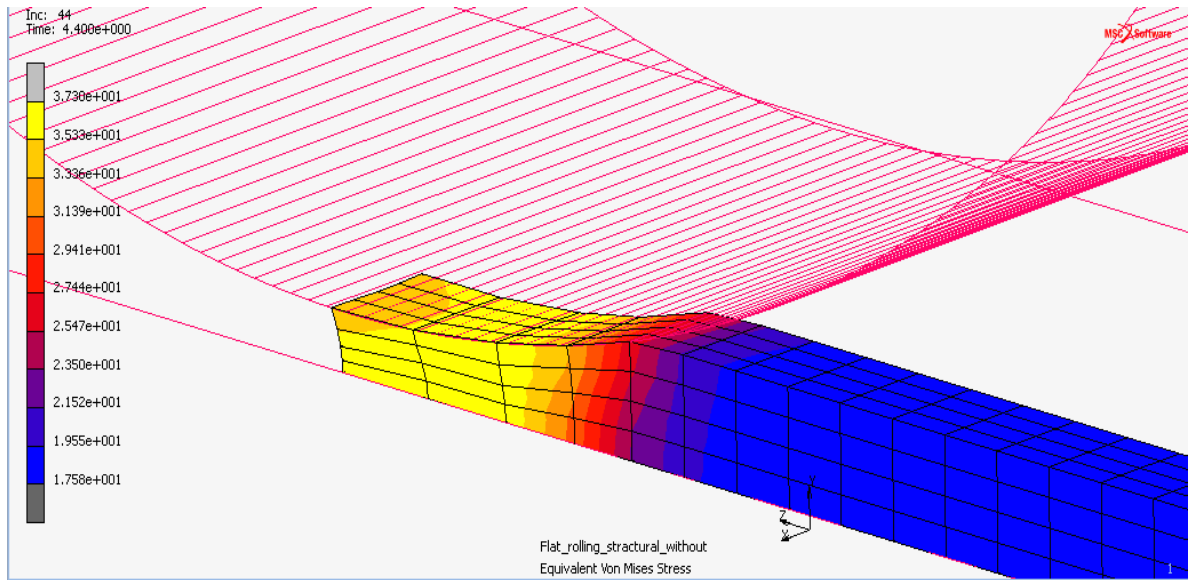
Σχήμα 4.93 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 26 (320 στοιχεία)



Σχήμα 4.94 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 38 (320 στοιχεία)



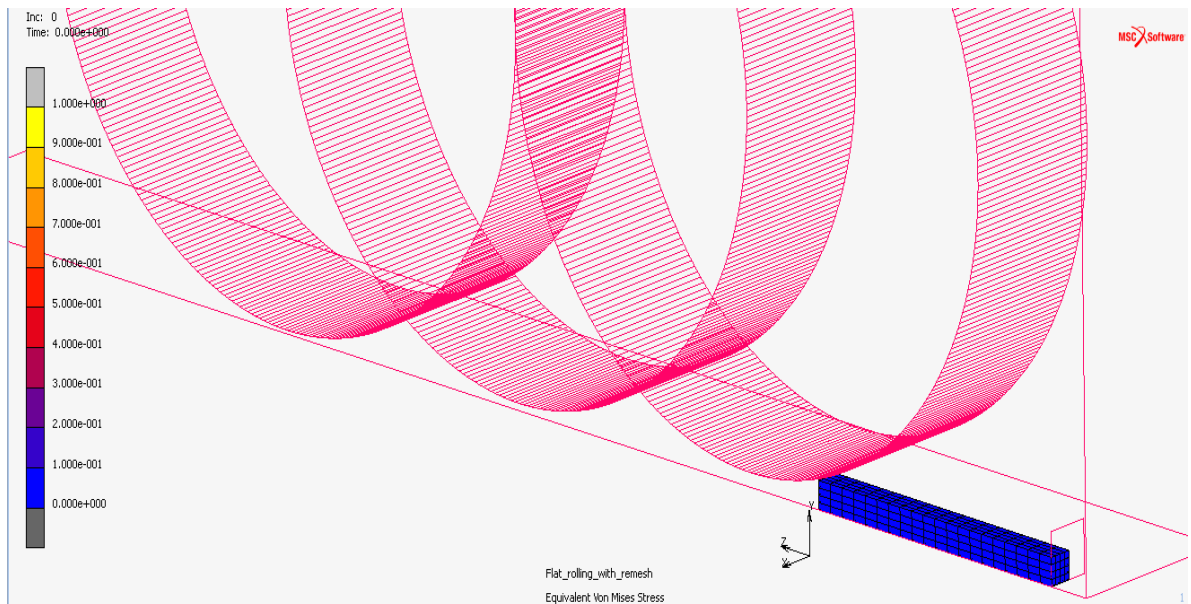
Σχήμα 4.95 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 44 (320 στοιχεία)



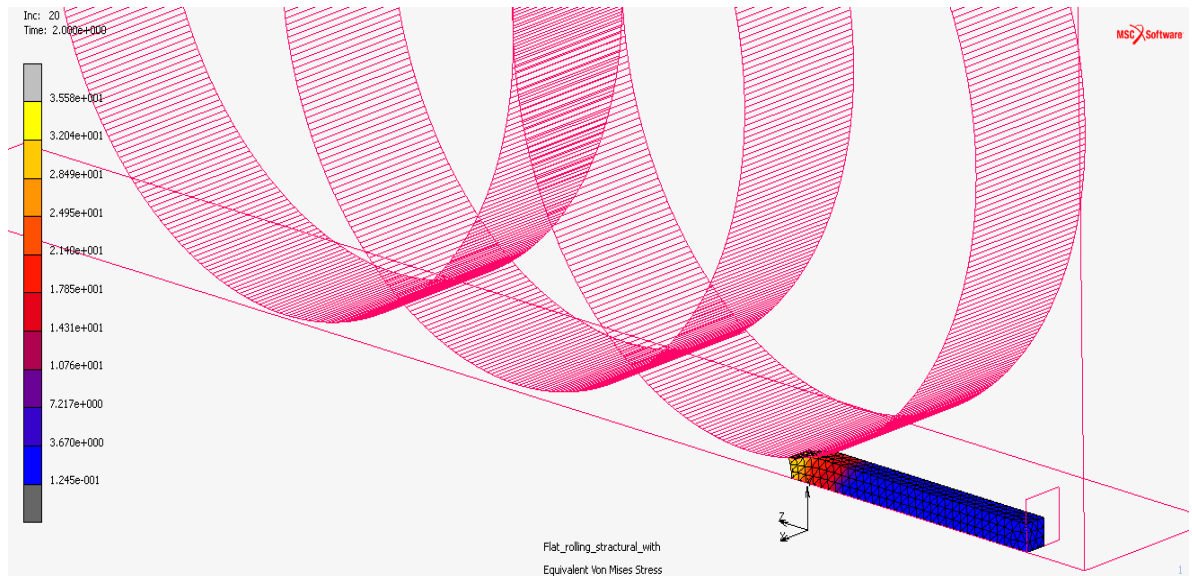
Σχήμα 4.96 Παραμορφωμένο πλέγμα επίπεδης έλασης επανάληψη 44

Στο Σχήμα 4.98 βλέπουμε την αλλοίωση τού πλέγματος και τον λόγο που σταμάτησε η επίλυση.

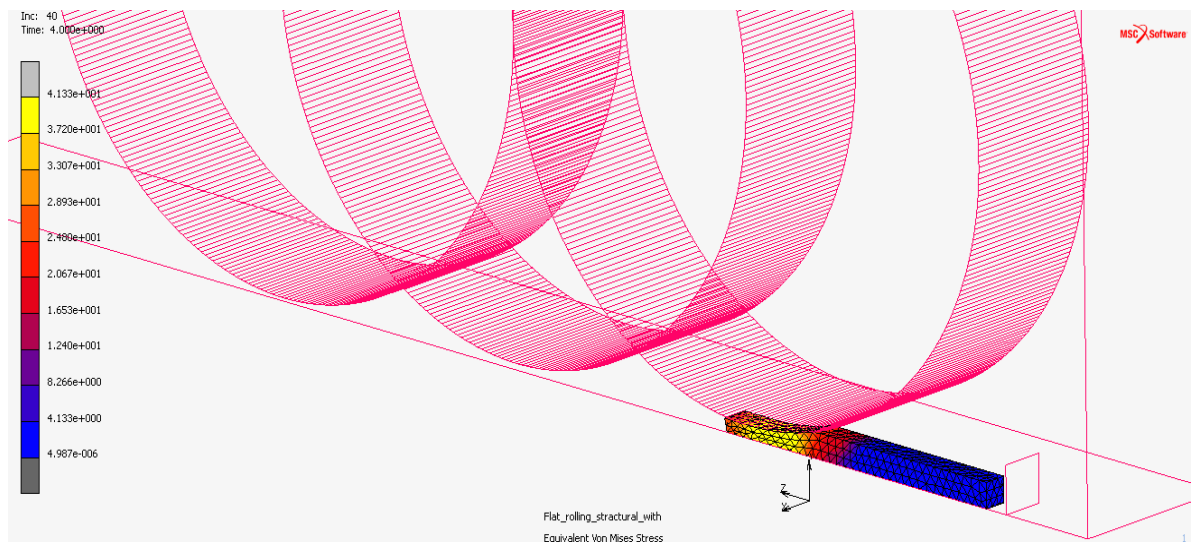
4.4.2.10 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ



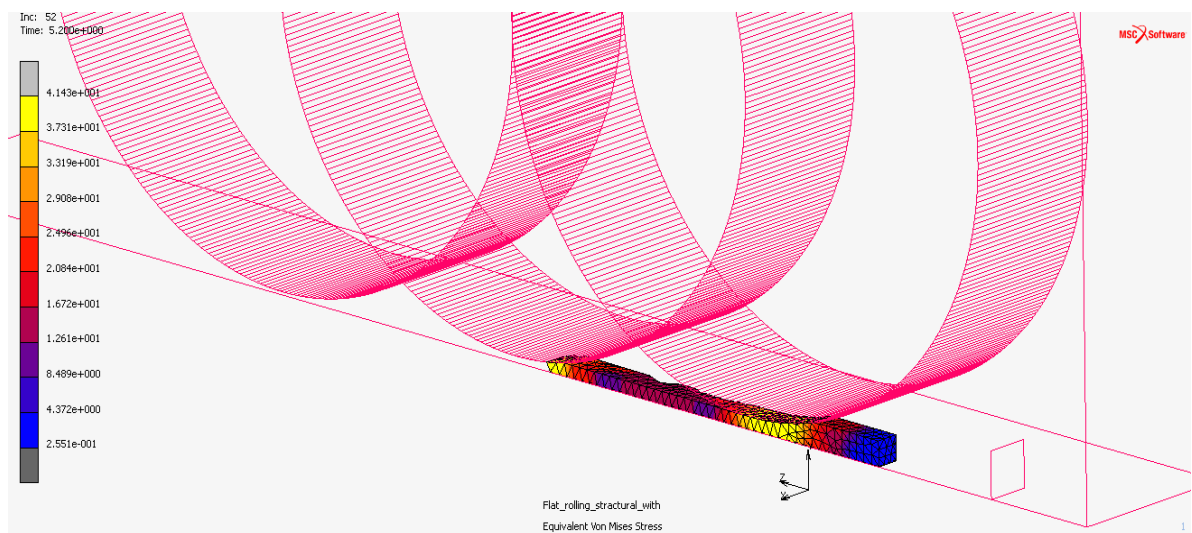
Σχήμα 4.97 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (320 στοιχεία) επίπεδης έλασης



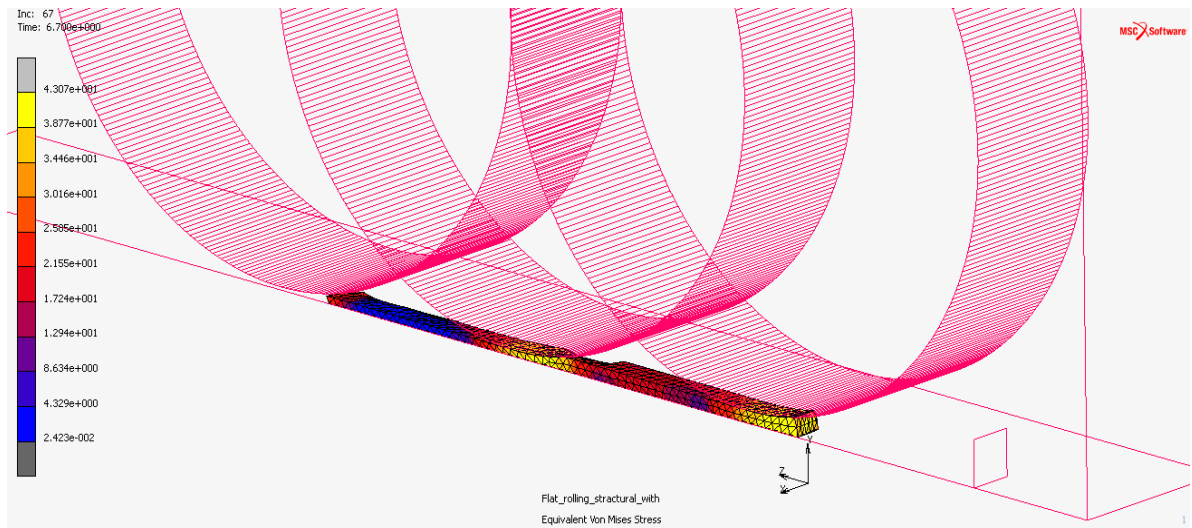
Σχήμα 4.98 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 20 (1882 στοιχεία) επίπεδης έλασης



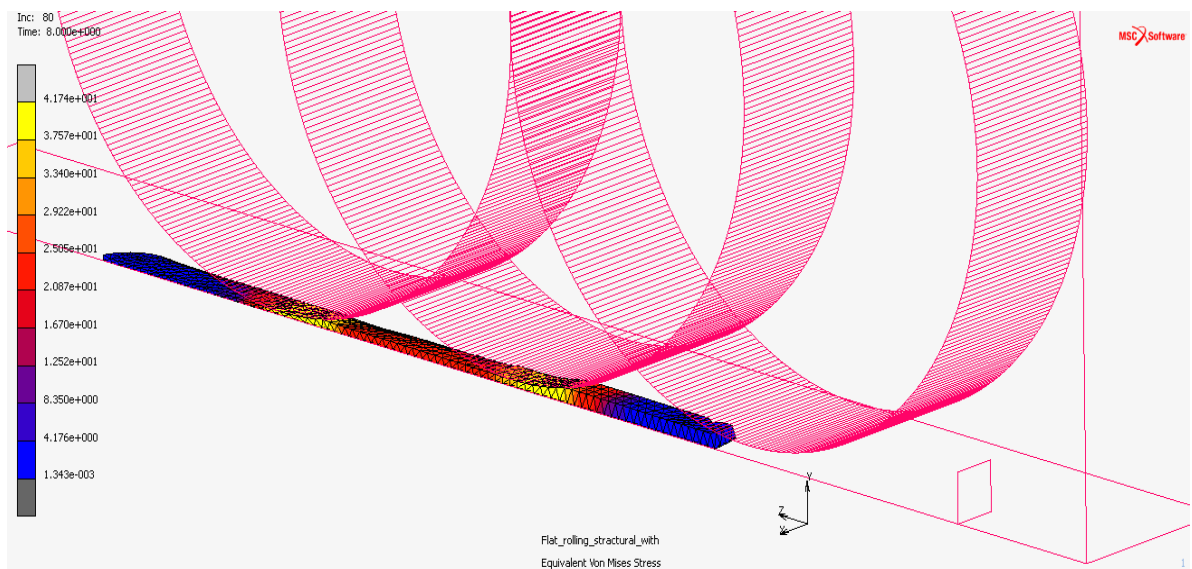
Σχήμα 4.99 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 40 (1773 στοιχεία) επίπεδης έλασης



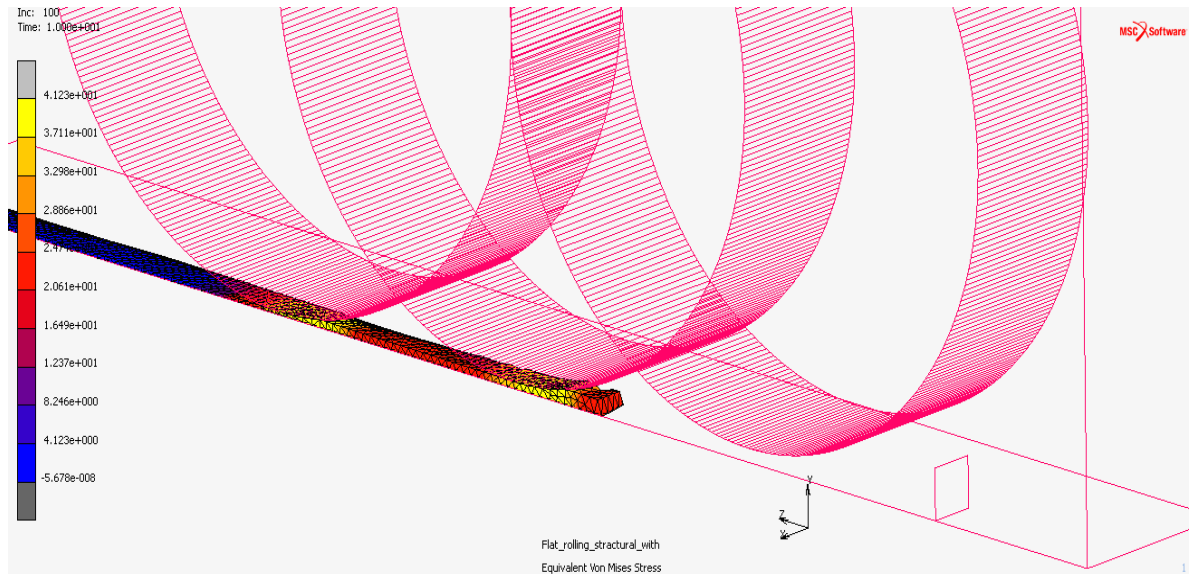
Σχήμα 4.100 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 52 (1704 στοιχεία) επίπεδης έλασης



Σχήμα 4.101 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 67 (2249 στοιχεία) επίπεδης έλασης



Σχήμα 4.102 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 80 (2525 στοιχεία) επίπεδης έλασης



Σχήμα 4.103 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 100 (2767 στοιχεία) επίπεδης έλασης

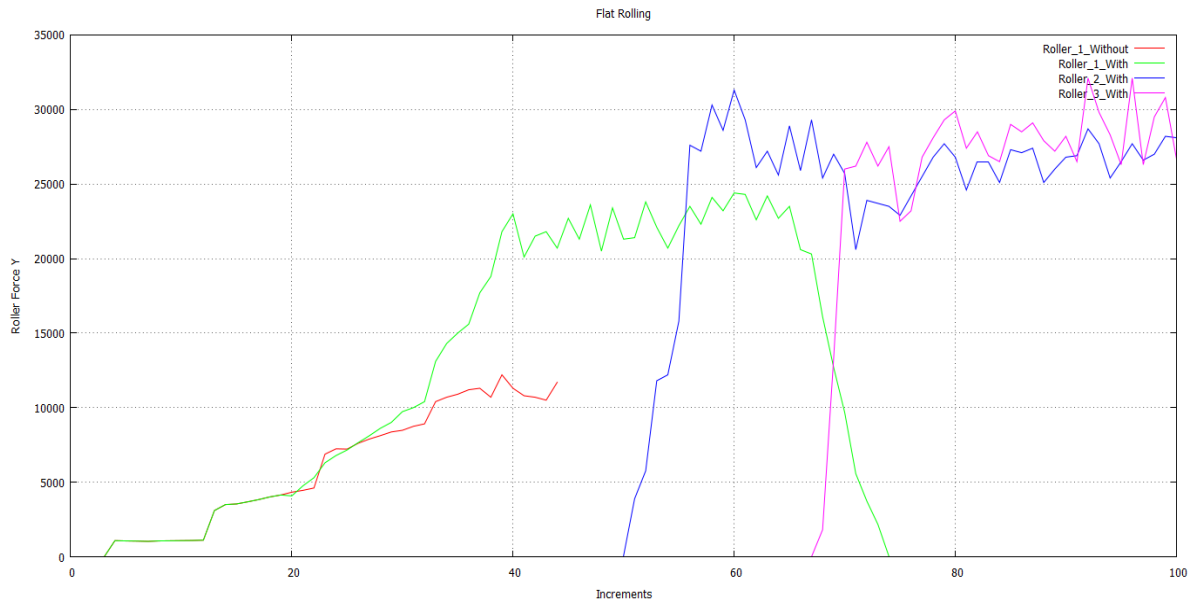
Τα στοιχεία στην αρχή της ανάλυσης είναι **320** ενώ στο τέλος της ανάλυσης ανέρχονται στα **2767**, η αναδημιουργία του πλέγματος έγινε **57** φορές.

4.4.2.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για να εμφανίσουμε τα αποτελέσματα, αφού έχουμε επιλέξει την εντολή **Open Post File (Results Menu)** στο παράθυρο Run Job και βρισκόμαστε στο μενού **Model Plot Results** στην καρτέλα **Results** ακολουθούμε την εντολή:

Results → History Plot → All Incs → Add Curves → Global

και επιλέγουμε τους άξονες, στον x βάζουμε τα βήματα (Increments) και στον y την δύναμη των ραούλων Roller_1 Force y, Roller_2 Force y, Roller_3 Force y κατά y επιλέγουμε Fit και βλέπουμε το διάγραμμά μας. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε μορφή .txt, στο μενού του History Plot επιλέγουμε Save. Τα αποτελέσματα που θα πάρουμε είναι κατά την συμμετρία 90° οπότε θα πρέπει να τα επεξεργαστούμε και να τα πολλαπλασιάσουμε με τέσσερα. Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση με και χωρίς την αναδημιουργία του πλέγματος στην κατεργασία της συμπίεσης με το πρόγραμμα gnuplot Grapher.



Σχήμα 4.104 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων επίπεδης έλασης

Φαίνεται καθαρά η δύναμη με τήν χρήση τής αναδημιουργίας τού πλέγματος κινείται πολύ πιο ομαλά σε σχέση με αυτήν χωρίς τήν αναδημιουργία. Όπως φαίνεται η χρήση τής αναδημιουργίας σε κατεργασίες συμπίεσης βοηθάει στο να έχουμε ομοιομορφία σε όλα τα βήματα τής κατεργασίας.

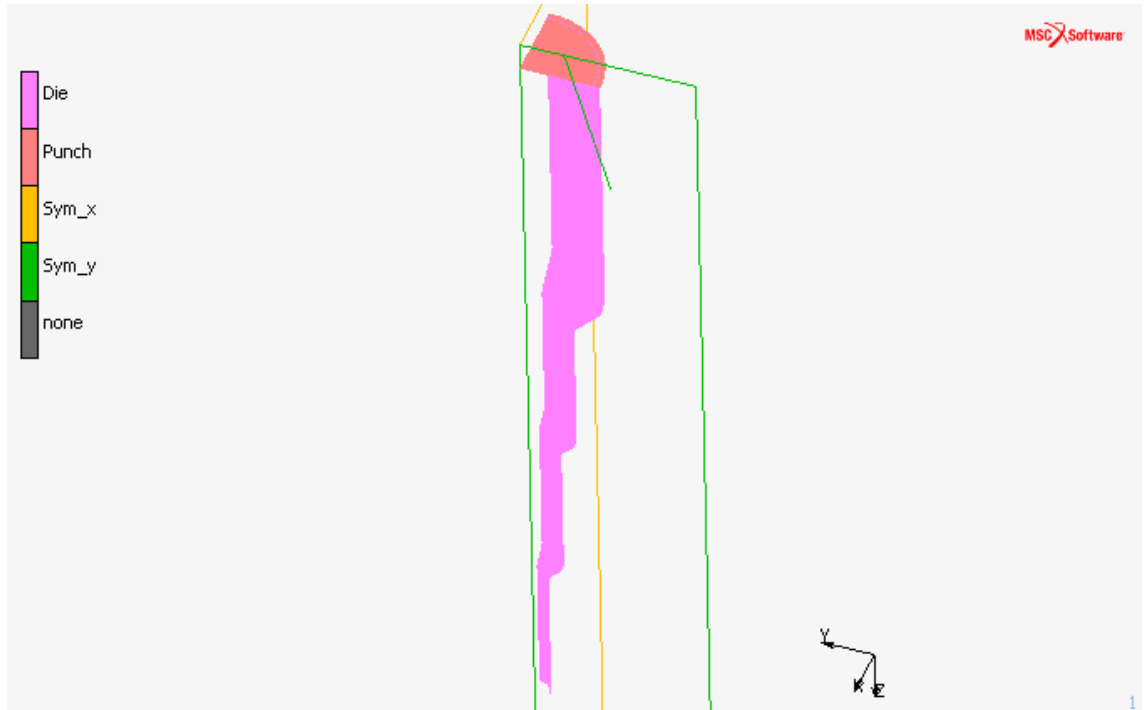
4.4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΕΛΑΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC.MARC

4.4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Για να εισάγουμε τήν γεωμετρία ακολουθούμε τήν διαδρομή:

File* → *Import* → *IGES

και εισάγουμε τήν συμμετρική γεωμετρία τού καλουπιού και τού εμβόλου που έχουμε σχεδιάσει, στην συνέχεια αφαιρούμε περιττά σημεία, καμπύλες και επιφάνειες και δημιουργούμε τίσ επιφάνειες συμμετρίας κατά 90° όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.105 Γεωμετρία συμπίεσης που έχει εισαχθεί από SolidWorks και έχει επεξεργαστεί στο MSC.Marc

4.4.3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

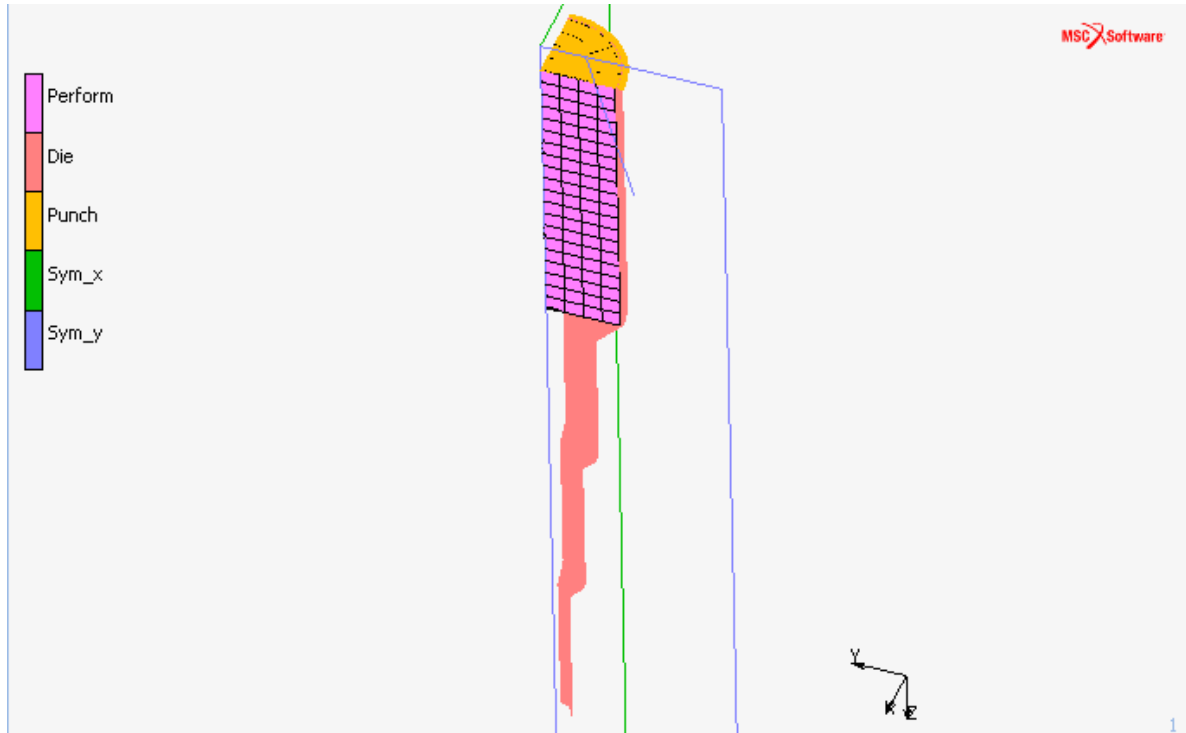
Και στην κατεργασία τής διέλασης χρησιμοποιούνται εξαεδρικά στοιχεία. Για τήν δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να οριστεί μία επιφάνεια που θα προσδιορίζει το κατεργαζόμενο τεμάχιο, αφού δημιουργήσουμε τήν ορθογώνια επιφάνεια ακλουθώντας τήν παρακάτω διαδρομή μετατρέπουμε τήν επιφάνεια σε τετραγωνικά στοιχεία διαστάσεων 5x2mm.

Geometry & Mesh → Convert → Surfaces to Elements

Για να δώσουμε τήν τελική συμμετρική μορφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου που θα αποτελείται από εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούμε τήν εντολή:

Geometry & Mesh → Expand → Elements

για κυλινδρικά δοκίμια ορίζουμε το κέντρο περιστροφής το βήμα περιστροφής και τα βήματα, Παρακάτω φαίνονται τα εξαεδρικά στοιχεία που δημιουργήσαμε για κάθε κατεργασία.



Σχήμα 4.106 Πλέγμα εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων για την διέλαση

Τέλος χρησιμοποιούμε την εντολή sweep για να διαγραφούν από το πλέγμα μας οι διπλοί κόμβοι που υπάρχουν ορίζοντας το tolerance 0.005, ακολουθώντας την παρακάτω εντολή.

Geometry & Mesh → Sweep → Nodes

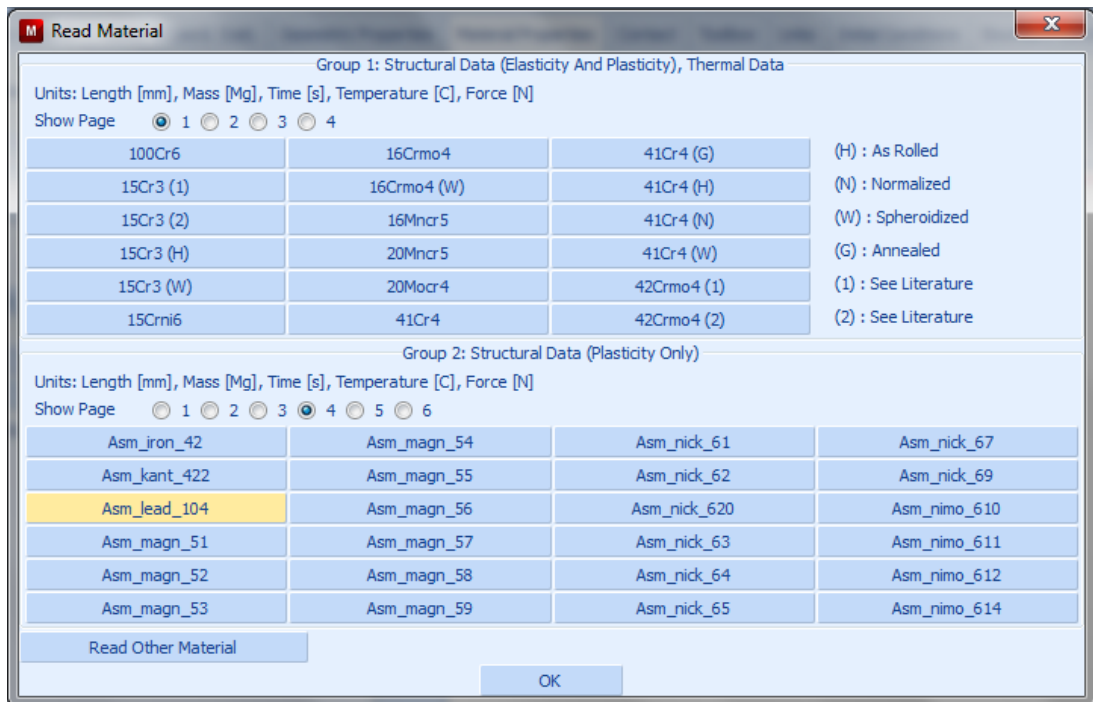
Τελικά οι κόμβοι και τα στοιχεία που θα έχουμε θα είναι **609** και **480** αντίστοιχα.

4.4.3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι ο μόλυβδος και θα ληφθεί από την βιβλιοθήκη τού προγράμματος με την ακόλουθη εντολή:

Material Properties → Import → Read Material

και επιλέγουμε μόλυβδο (asm_lead_104).



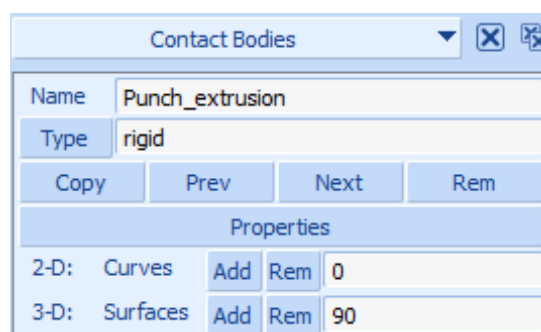
Σχήμα 4.107 Επιλογή του Μολύβδου ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών του MSC MARC

4.4.3.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΑΦΩΝ

Για να ορίσουμε τα κομμάτια σαν παραμορφώσιμα (deformable) και απαραμόρφωτα (rigid) επιλέγουμε την εντολή:

Contact → Contact Bodies → New → Rigid

και ορίζουμε ως απαραμόρφωτα (Rigid) το καλούπι και το έμβολο, ως συμμετρικές (Symmetry) τις επιφάνειες συμμετρίας και ως παραμορφώσιμο (Deformable) το παραμορφώσιμο σώμα, το δοκίμιο. Στο παράθυρο που εμφανίζεται πληκτρολογούμε το όνομα, στο κελί δίπλα στη θέση **Name**, και μετά επιλέγουμε το κουμπί **Add** δίπλα στη θέση **3-D: Surfaces** για να καθορίσουμε τήν επιφάνεια όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.108**.

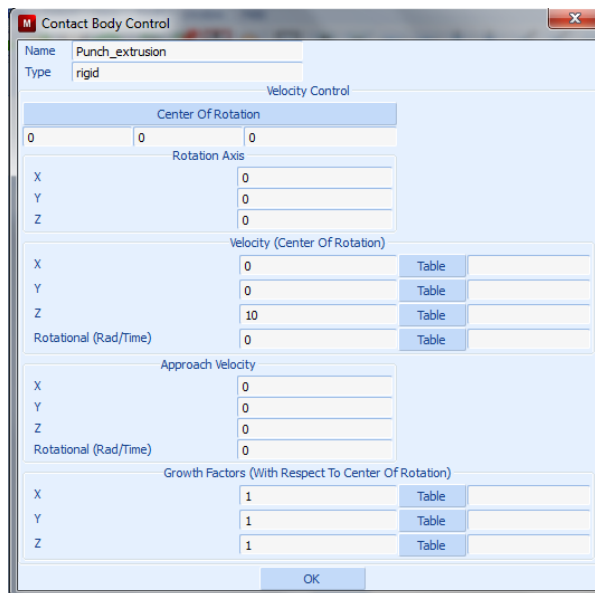


Σχήμα 4.108 Ορισμός εμβόλου ως απαραμόρφωτο σώμα

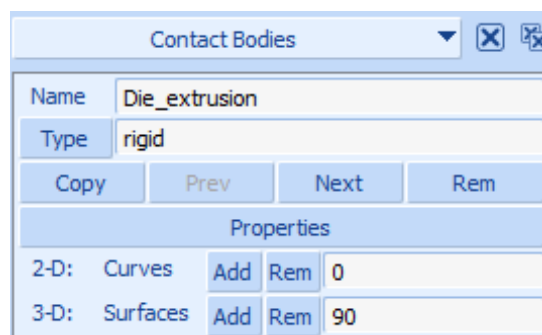
Στον ορισμό του εμβόλου θα πρέπει να καθορίσουμε τήν φορά του και τήν ταχύτητά του. Αυτό γίνεται στην καρτέλα **Contact Bodies** που ορίσαμε το έμβολο ακολουθώντας τήν εντολή:

Properties → Parameters

Και εμφανίζεται το παράθυρο **Contact Bodies Control**.



Σχήμα 4.109 Ορισμός της ταχύτητας του εμβόλου κατά τον άξονα Z

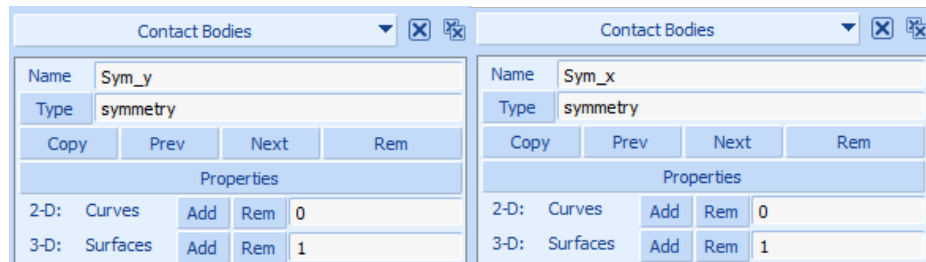


Σχήμα 4. 110 Ορισμός μήτρας ως απαραμόρφωτο σώμα για συμπίεση

Για τής συμμετρικές επιφάνειες η διαδικασία είναι η ίδια ακολουθούμε τήν εντολή:

Contact → Contact Bodies → New → Symmetry

στο παράθυρο που εμφανίζεται πληκτρολογούμε το όνομα, στο κελί δίπλα στη θέση **Name**, και μετά επιλέγουμε το κουμπί **Add** δίπλα στη θέση **3-D: Surfaces** για να καθορίσουμε τήν επιφάνεια όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.16**.

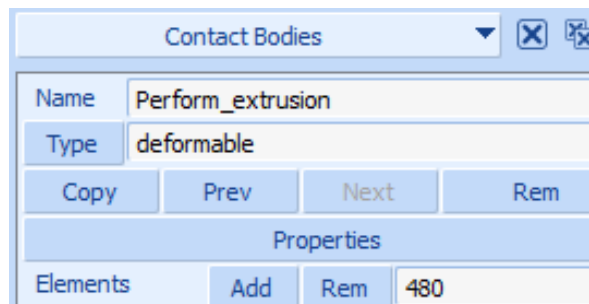


Σχήμα 4.111 Ορισμός συμμετρικών επιφανειών ως συμμετρικά σώματα

Τέλος στην περιοχή **Contact Bodies** πρέπει να ορίσουμε το παραμορφώσιμο σώμα, δηλαδή το δοκίμιο μας που είναι στην μορφή εξαεδρικών στοιχείων, ακολουθούμε τήν εντολή:

Contact → **Contact Bodies** → **New** → **Deformable**

και στο παράθυρο που εμφανίζεται πληκτρολογούμε το όνομα στο κελί δίπλα στη θέση **Name** και μετά επιλέγουμε το κουμπί **Add** δίπλα στη θέση **Elements** όπως φαίνεται αμέσως πιο κάτω.



Σχήμα 4.112 Ορισμός δοκιμίου ως παραμορφώσιμο σώμα

Σε κάθε επαφή που καταχωρίσαμε θα πρέπει να ορίσουμε και τον συντελεστή τριβής που έχει, αυτό επιτυγχάνεται με τήν εντολή:

Contact → **Contact Tables** → **New**

Στην συνέχεια επιλέγουμε τήν εντολή **Properties** και μας εμφανίζει το παράθυρο **Contact Table Properties** και παρατηρούμε ότι μονό το δοκίμιο (Perform) αντιστοιχίζεται με τα

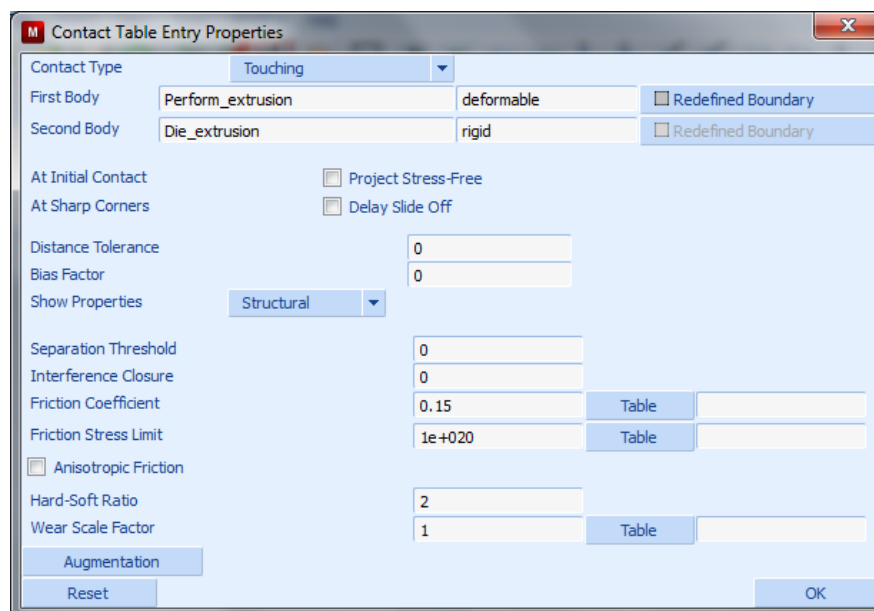
υπόλοιπα σώματα στον πίνακα ιδιοτήτων επαφών. Για την επαφή τού δοκιμίου με κάποιο απαραμόρφωτο σώμα επιλέγουμε το ανάλογο κουτί στην οριζόντια σειρά κουτιών στην περιοχή **Second** και στο παράθυρο που εμφανίζεται δίνουμε την εντολή:

Contact Type → Touching

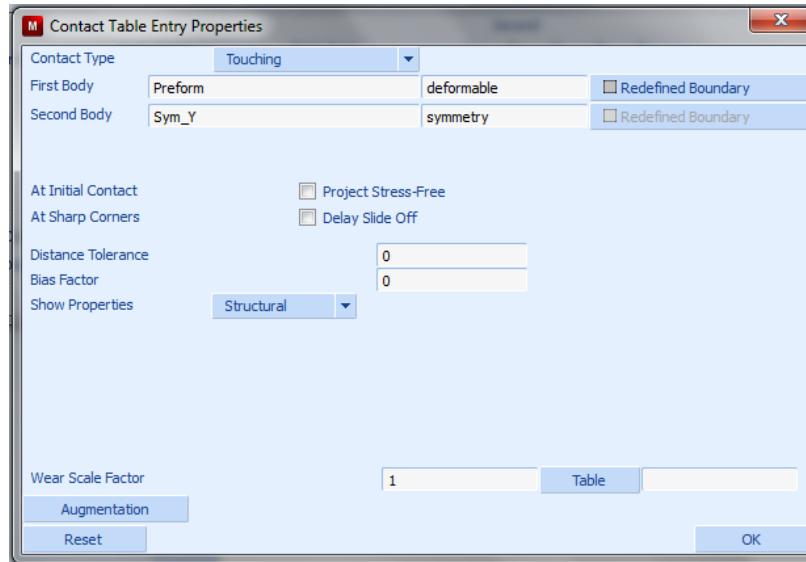
και ορίζουμε στο κελί δίπλα από το **Friction Coefficient** την τιμή 0.15. Στην επαφή με τις συμμετρικές επιφάνειες δεν χρειάζεται να ορίσουμε κάποια τιμή για τον συντελεστή τριβής αλλά μόνο ότι ακουμπάει (δηλαδή *Contact Type → Touching*).



Σχήμα 4.113 Ορισμός πίνακα επαφών



Σχήμα 4.114 Επαφή Δοκιμίου με μήτρα



Σχήμα 4.115 Επαφή δοκιμίου με συμμετρική επιφάνεια



Σχήμα 4.116 Πίνακας επαφών

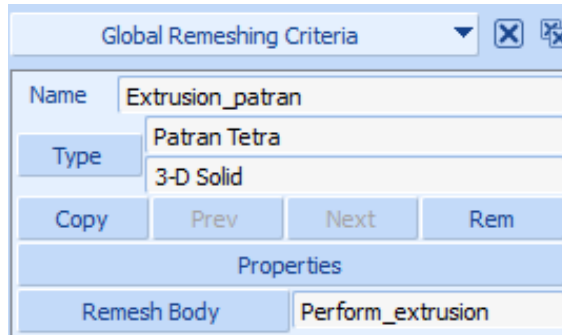
Παρατηρούμε ότι το γράμμα **T (Touching)** βρίσκεται σε κάθε κουτί που επεξεργαστήκαμε. Επιλέγουμε το κουμπί **OK**.

4.4.3.5 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Για τις επιλογές τής αναδημιουργίας τού πλέγματος ακολουθούμε τήν εντολή:

Mesh Adaptivity → Global Remeshing Criteria → New → Patran Tetra

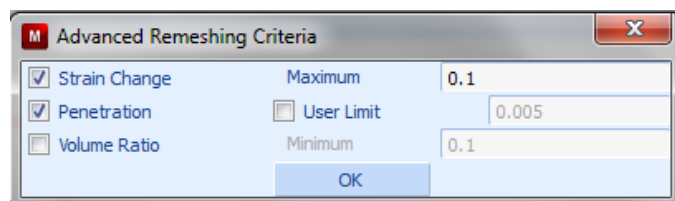
στην συνέχεια ορίζουμε τα κριτήρια επαναδημιουργίας του πλέγματος καθώς και τις παραμέτρους για τα νέα στοιχεία που θα δημιουργηθούν.



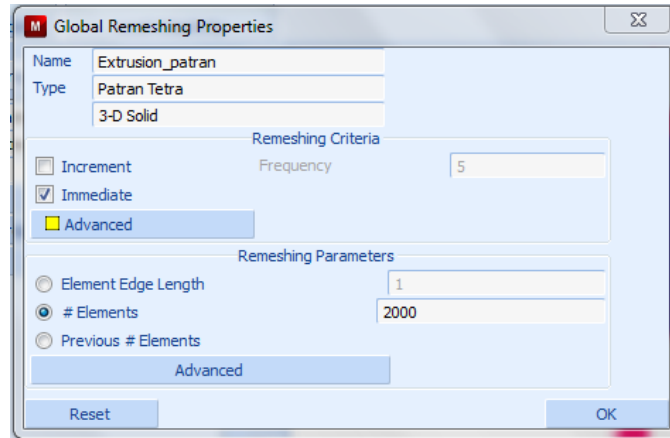
Σχήμα 4.117 Γενικά κριτήρια επιλογής αναγέννησης του πλέγματος

- Για την κατεργασία της διέλασης οι περιορισμοί που θα χρησιμοποιήσουμε στην αναδημιουργία του πλέγματος θα είναι αρκετοί διότι υπάρχουν πολλές επαφές και καμπυλότητες που έρχεται σε επαφή το δοκίμιο. Μια εντολή που ορίζουμε είναι η **Strain Change** που θέτει ένα όριο στην παραμόρφωση του πλέγματος κατά το συσσωρευμένο οριακό μέτρο πίεσης, με την εντολή **#Elements** θα βάλουμε ένα όριο στοιχείων που θέλουμε να έχουμε κατά την αναδημιουργία και με την επιλογή **Change Element Type** θα αλλάξουμε τα στοιχεία από τύπο 7 (προεπιλεγμένη επιλογή) σε τύπο 157. Με την επιλογή **Immediate** ενεργοποιούμε την αναδιαμόρφωση του πλέγματος από το πρώτο βήμα και με την επιλογή του **Penetration** λόγω της φύσης της κατεργασίας για να ελεγχθεί η επαφή του δοκιμίου με την μήτρα και το έμβολο ως άκαμπτα σώματα.
- **Immediate**
- **Strain Change: 0.1**
- **Penetration**
- **Change Element Type: 157**
- **#Elements: 2000**

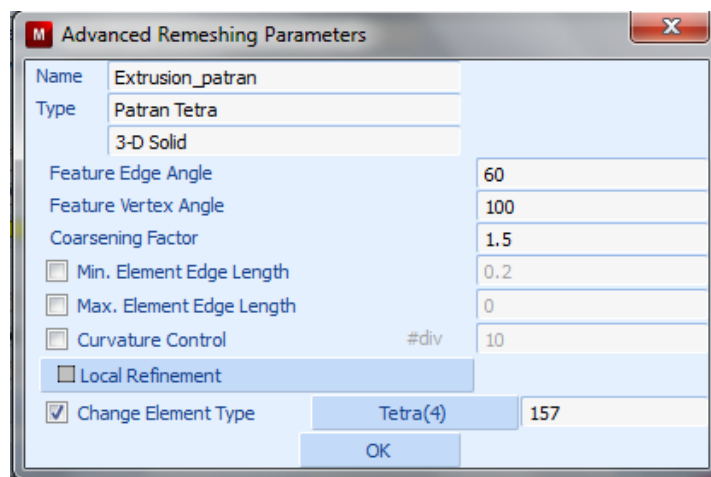
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.118, 4.119, 4.120.



Σχήμα 4.118 Ειδικά κριτήρια αναδιαμόρφωσης του πλέγματος



Σχήμα 4.119 Ιδιότητες αναγέννησης του πλέγματος



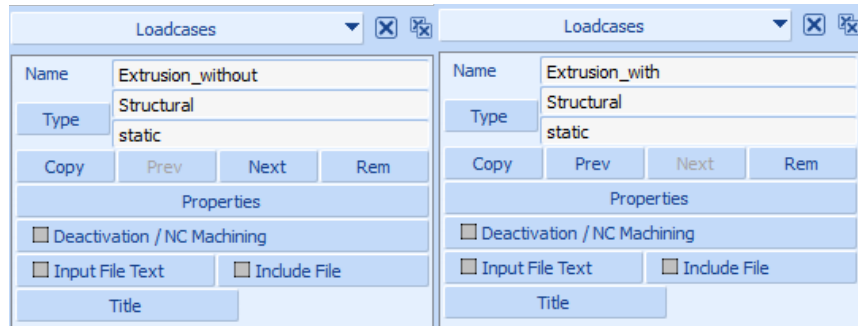
Σχήμα 4.120 Ειδικές παράμετροι αναδιαμόρφωσης του πλέγματος

4.4.3.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Επιλέγουμε την καρτέλα **Loadcases** δίνουμε την εντολή:

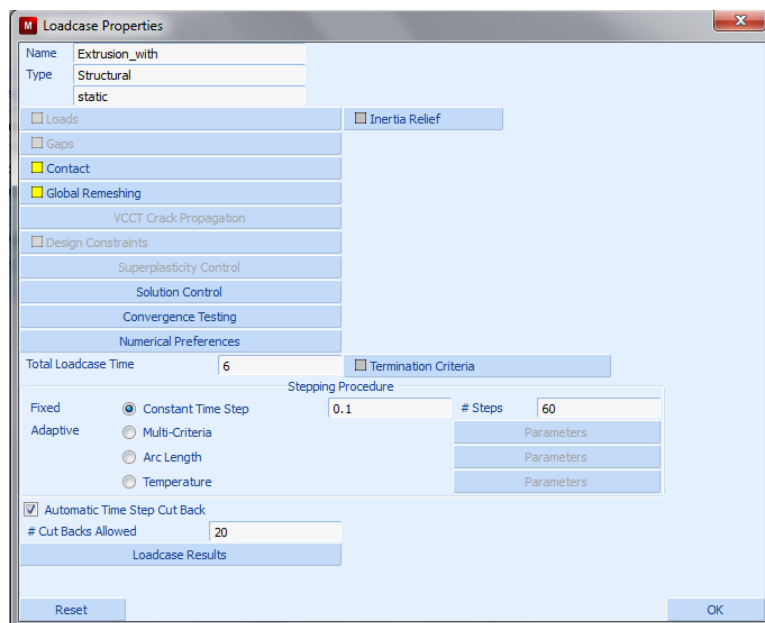
Loadcases → New → Static

Θα δημιουργήσουμε 2 προϋποθέσεις φόρτισης μία με αναδημιουργία πλέγματος και μία χωρίς άρα την παραπάνω εντολή την ακολουθούμε δύο φορές και αφού δώσουμε όνομα στην φόρτισή μας παίρνουμε το ακόλουθο παράθυρο επιλογής:

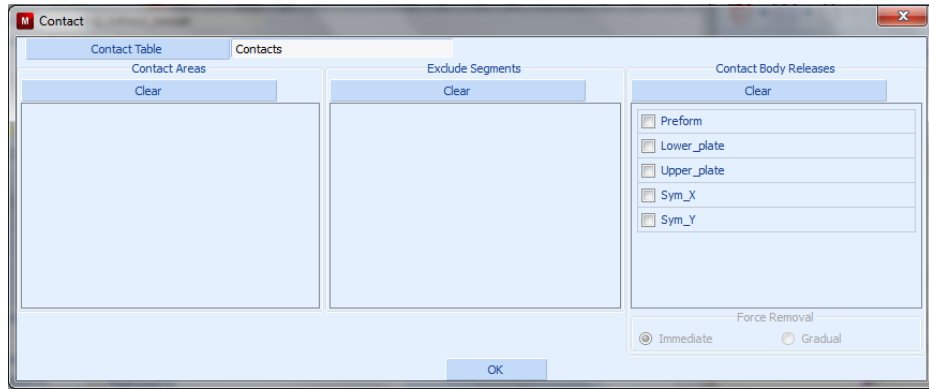


Σχήμα 4.121 Επιλογές για τη ρύθμιση των στοιχείων φόρτισης με και χωρίς αναδημιουργία

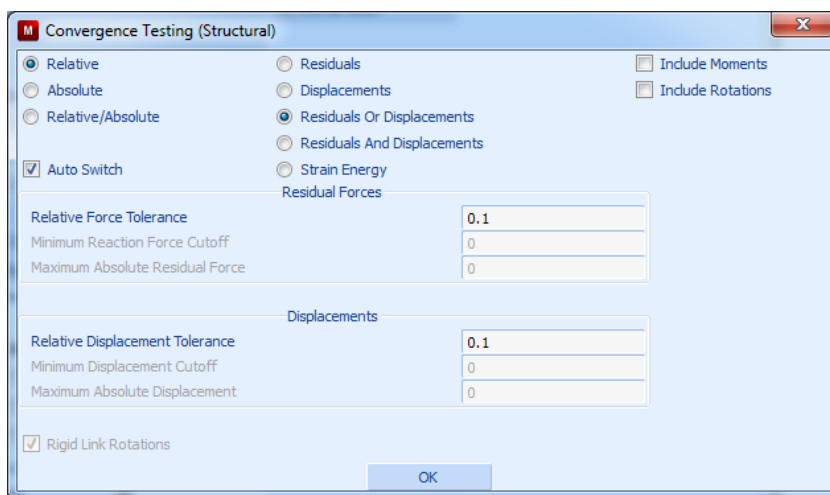
Στη συνέχεια, ορίζουμε τις επιλογές της φόρτισης, όπου διακρίνουμε τον χρόνο φόρτισης, όσος χρόνος χρειάζεται για τήν μετακίνηση τού εμβόλου, σύμφωνα με την ταχύτητα εμβόλου που έχουμε ορίσει. Ο χρόνος αυτός υποδιαιρείται σε βήματα (Steps) που ορίζουμε εμείς και αυτόματα ορίζετε πόσο θα διαρκεί το κάθε βήμα. Επίσης, στις επιλογές ορίζουμε την επαφή των στοιχείων του μοντέλου δείχνοντας τον πίνακα επαφών που έχουμε κατασκευάσει, το πλέγμα επαναδημιουργίας, όπως το έχουμε ορίσει στο προηγούμενο βήμα καθώς και άλλες απαραίτητες ρυθμίσεις που αφορούν τρόπους σύγκλισης, έλεγχο επίλυσης και αριθμητικές επιλογές.



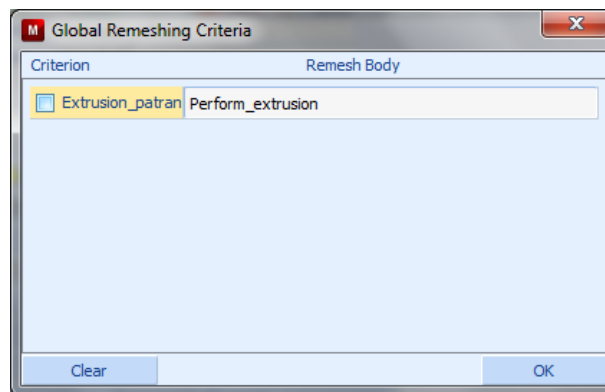
Σχήμα 4.122 Παράθυρο Ιδιοτήτων φόρτωσης



Σχήμα 4.123 Επιλογή πίνακα επαφών



Σχήμα 4.124 Ορισμός επιλογών των κριτηρίων σύγκλισης



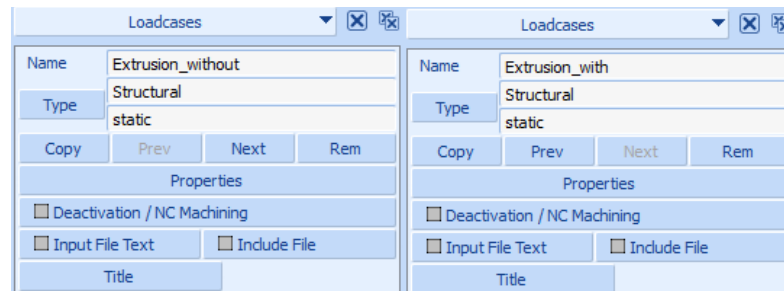
Σχήμα 4.125 Ορισμός της επαναδημιουργίας πλέγματος Patran Tetra

4.4.3.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για να ορίσουμε την ανάλυσή μας χρησιμοποιούμε την εντολή:

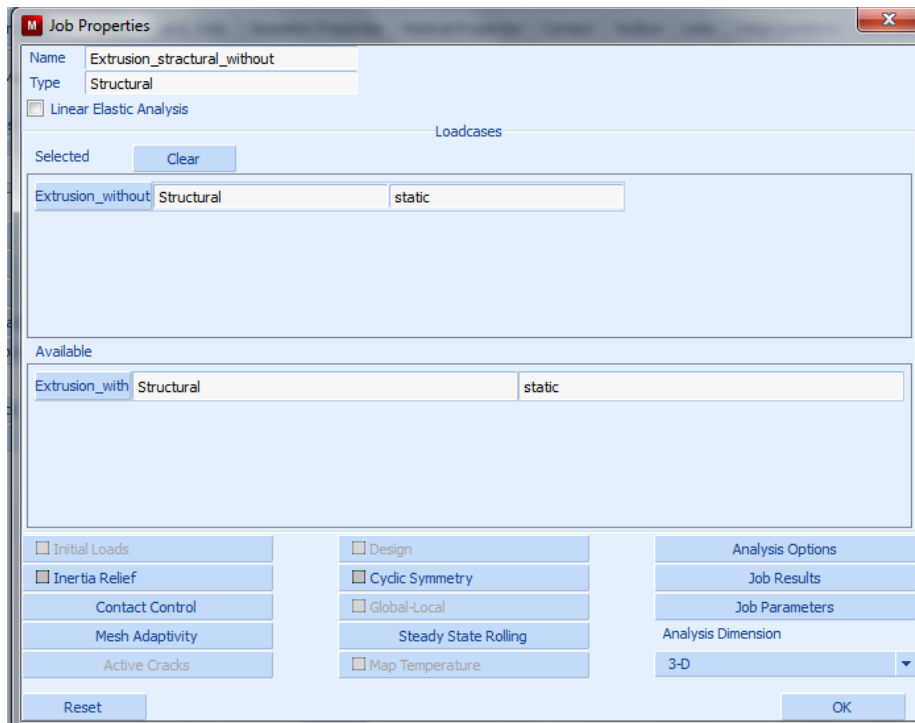
Jobs → New → Structural

και στο παράθυρο που εμφανίζεται δίνουμε το όνομα στο κελί δίπλα στη θέση **Name**.

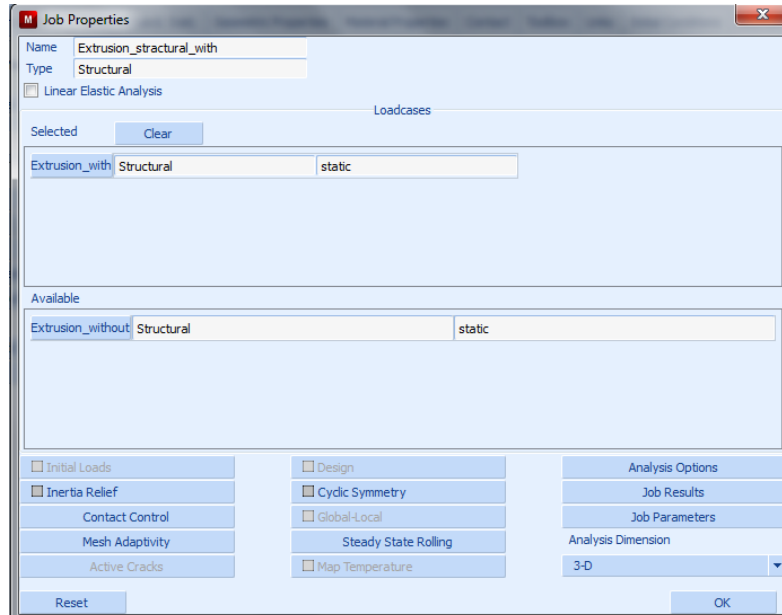


Σχήμα 4.126 Επιλογές προετοιμασίας ανάλυσης.

Επιλέγουμε το κουμπί **Properties** και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε τη την ανάλυση που εισήχθει προηγουμένως στην περιοχή **Available**.



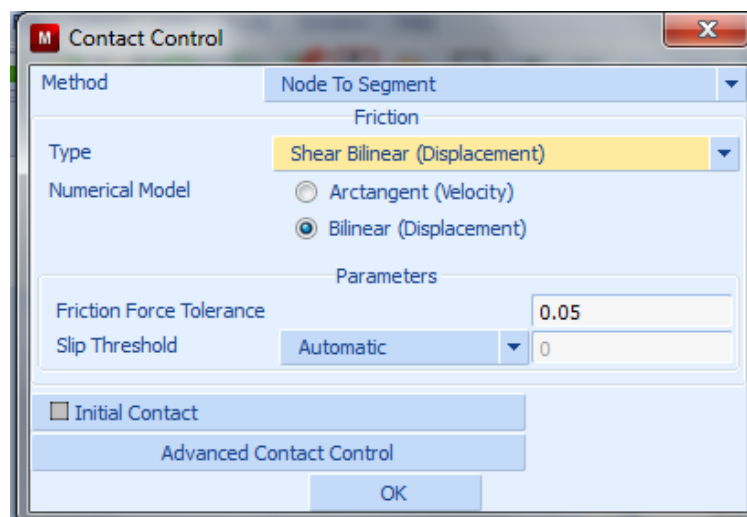
Σχήμα 4.127 Ιδιότητες για την προετοιμασία της ανάλυσης χωρίς αναδημιουργία



Σχήμα 4.128 Ιδιότητες για την προετοιμασία της ανάλυσης με αναδημιουργία

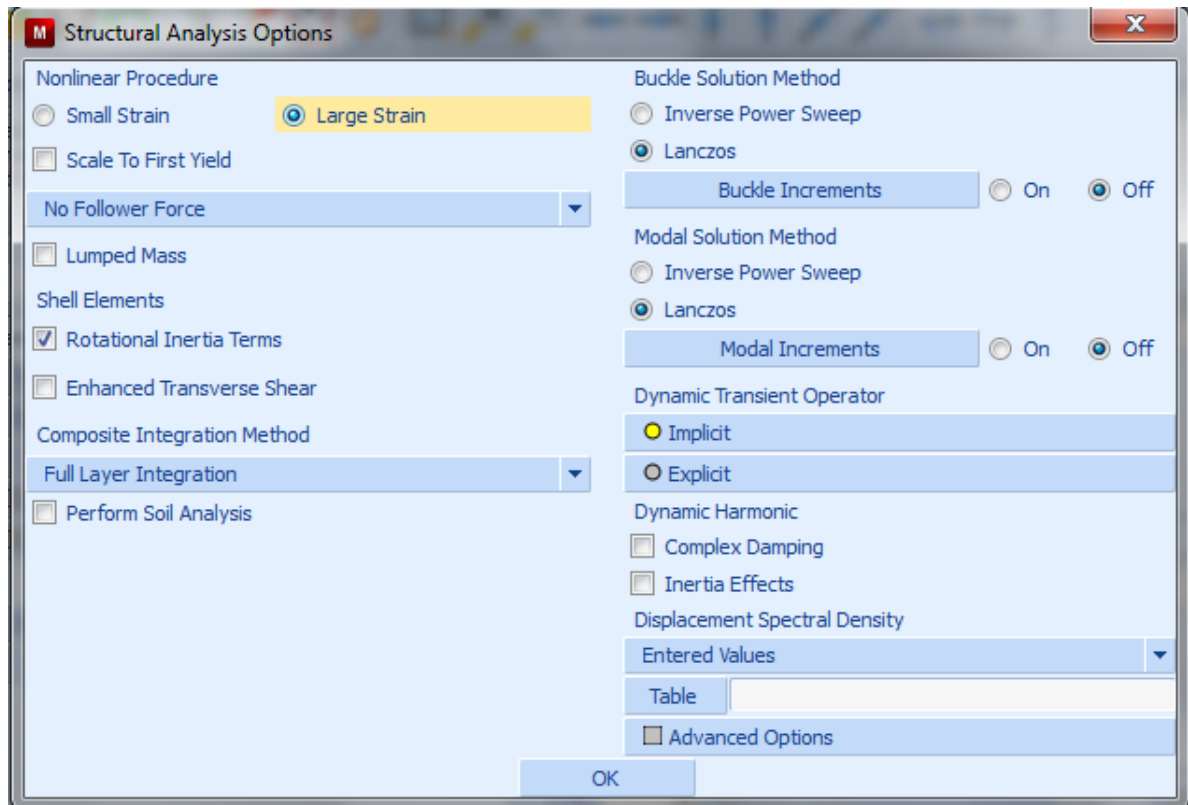
Στη συνέχεια επιλέγουμε το κουμπί **Contact Control** και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε:

Type → **Shear Bilinear (Displacement)**



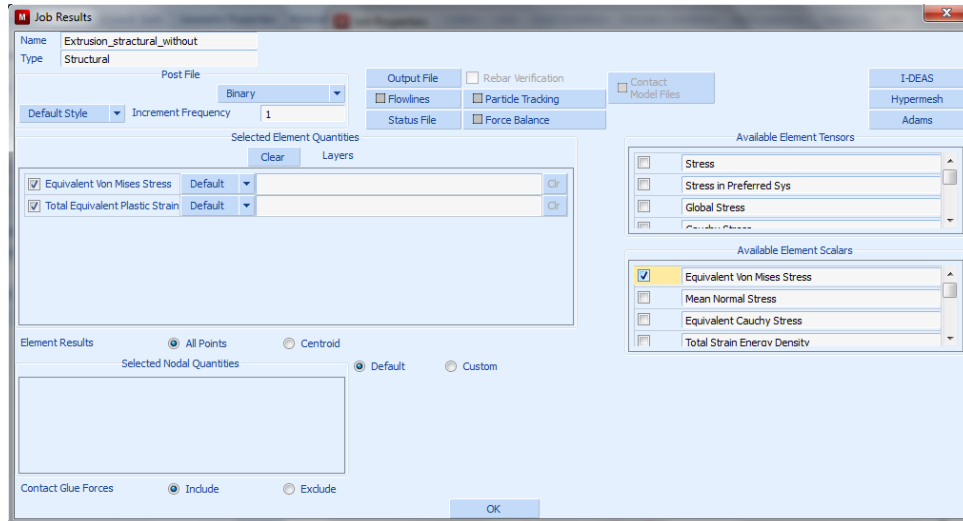
Σχήμα 4.129 Ρύθμιση ιδιοτήτων επαφών

Επιλέγουμε OK και επιστρέφουμε στο **Σχήμα 4.33** όπου πατάμε την επιλογή **Analysis Options** και στο παράθυρο που ακολουθεί επιλέγουμε **Large Strain** στη περιοχή **Nonlinear Procedure** όπως φαίνεται στο αμέσως πιο κάτω σχήμα.



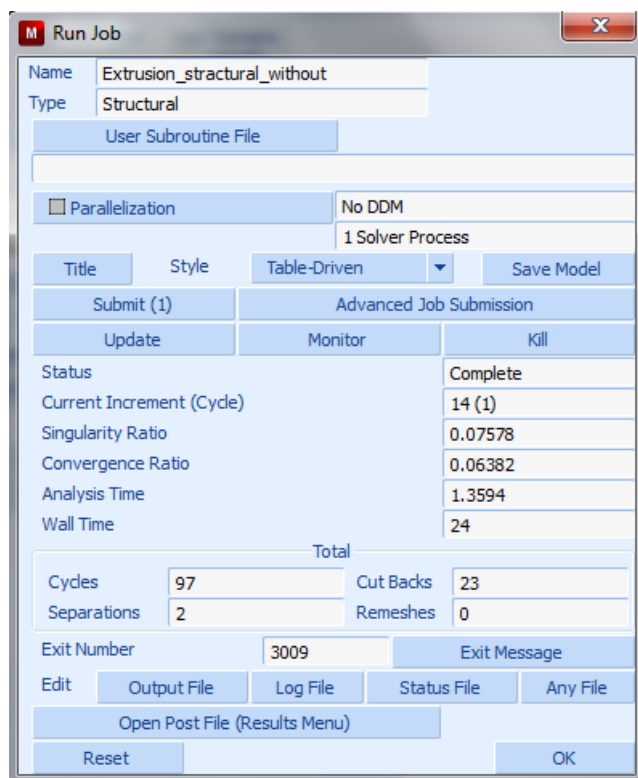
Σχήμα 4.130 Επιλογές για τη δομική ανάλυση

Επιλέγουμε OK. Επιστρέφουμε στο παράθυρο στο **Σχήμα 4.128, 4.129**, αντίστοιχα, και επιλέγουμε το κουμπί **Job Results** προκειμένου να επιλέξουμε ποια αποτελέσματα επιθυμούμε κατά την ανάλυση να είναι διαθέσιμα. Για την ανάλυση μας θα επιλέξουμε την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises και την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση. Επομένως στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε τις **Equivalent Von Mises stress** και **Total Equivalent Plastic Strain** του πεδίου **Available Elements Scalars**.

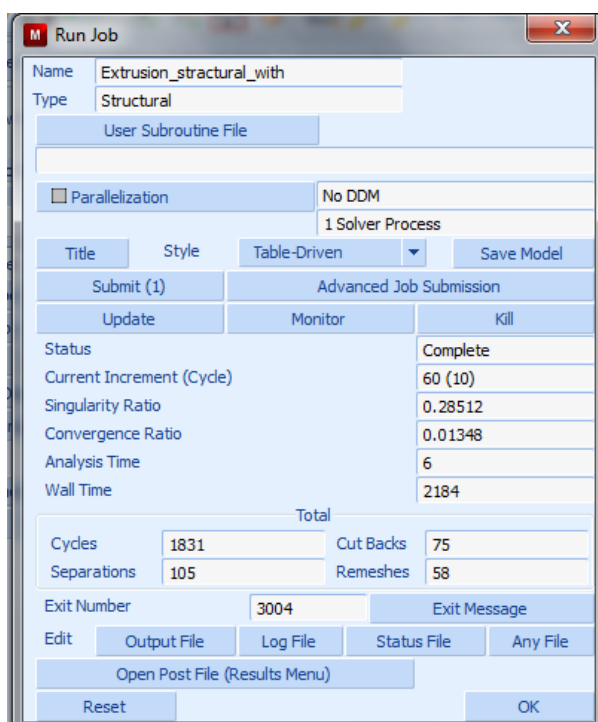


Σχήμα 4.131 Ορισμός των αποτελεσμάτων της διεργασίας

Τέλος επιλέγουμε το OK στο παράθυρο των **Job Properties** (Σχήμα 4.128) που είχαμε ανοίξει και στο παράθυρο στο Σχήμα 4.127 επιλέγουμε το κουμπί **Check** και αναμένουμε το μήνυμα «**INFO: Found 0 errors and 0 warnings**» στην κονσόλα για να σιγουρευτούμε για τυχόν λάθη και παραλείψεις. Επιλέγουμε την εντολή **Run** (Σχήμα 4.127) και για να ξεκινήσουμε την ανάλυσή μας στο παράθυρο που θα μας εμφανίσει επιλέγουμε την εντολή **Submit (1)** για την εκκίνηση της επίλυσης. Μετά το πέρας της ανάλυσης θα πρέπει να δίνεται ως **Exit Number** ο αριθμός **3004** που δηλώνει την επιτυχή επίλυση. Τότε μπορούμε να παρατηρήσουμε τις διάφορες πληροφορίες όπως για παράδειγμα τους κύκλους ανάλυσης ή τον αριθμό των αναδημιουργιών πλέγματος.



Σχήμα 4.132 Παράθυρο έναρξης και ελέγχου της ανάλυσης μετά την λήξη της χωρίς αναδημιουργία



Σχήμα 4.133 Παράθυρο έναρξης και ελέγχου της ανάλυσης μετά την λήξη της με αναδημιουργία

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.135 κατά την επίλυση χρειάστηκαν 58 αναδημιουργίες του πλέγματος και το **Exit Number** είναι 3004 που δηλώνει την επιτυχία τής ανάλυσης.

4.4.3.8 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

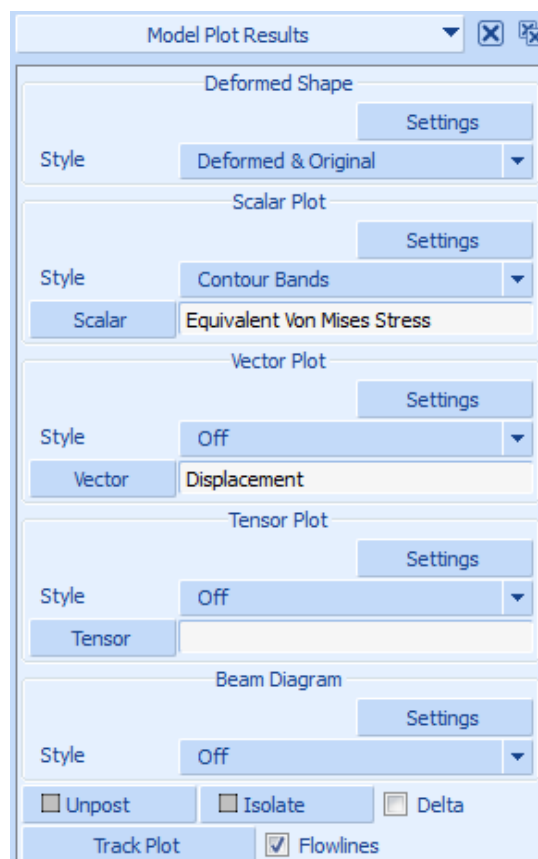
Μετά την επίλυση στο παράθυρο **Run Job** (Σχήμα 4.135) Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να εμφανιστούν με την εντολή:

Run Job → Open Post File (Results Menu)

στο παράθυρο που εμφανίζεται **Model Plot Results** επιλέγουμε στην περιοχή **Deformed shape → Style: Deformed Only** και στην περιοχή **Scalar Plot → Style: Counter Bands**, επίσης στην περιοχή **Scalar Plot** ακολουθούμε την εντολή:

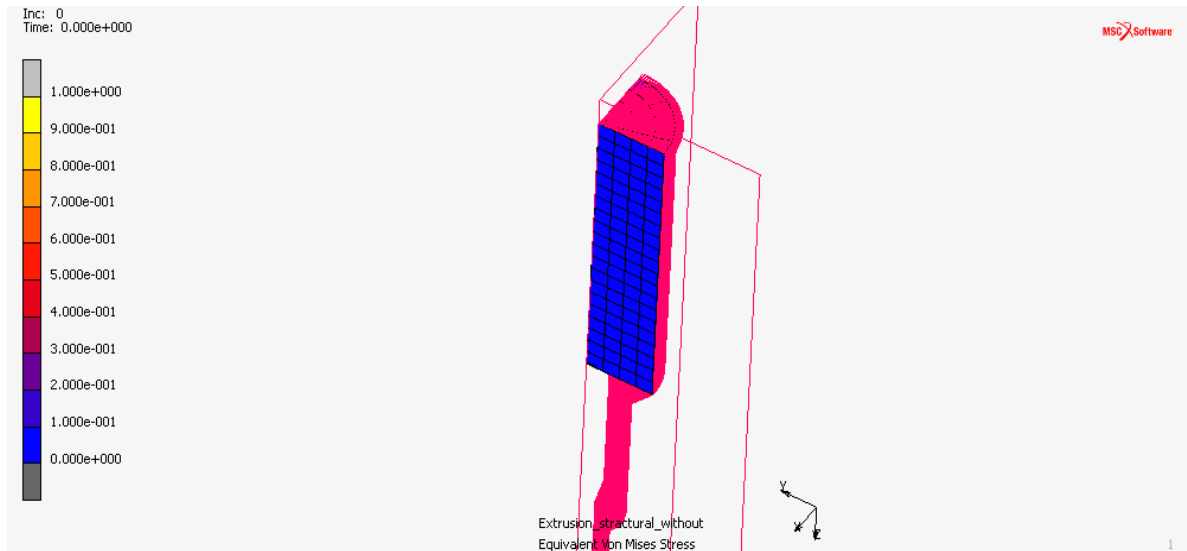
Scalar → Equivalent Von Mises Stress

και έτσι προβάλλουμε την παραμόρφωση του δοκιμίου σύμφωνα με τα παραπάνω μεγέθη. Με τη βοήθεια των κουμπιών πλοήγησης μπορούμε να ξεκινήσουμε την γραφική απεικόνιση της κατεργασίας.

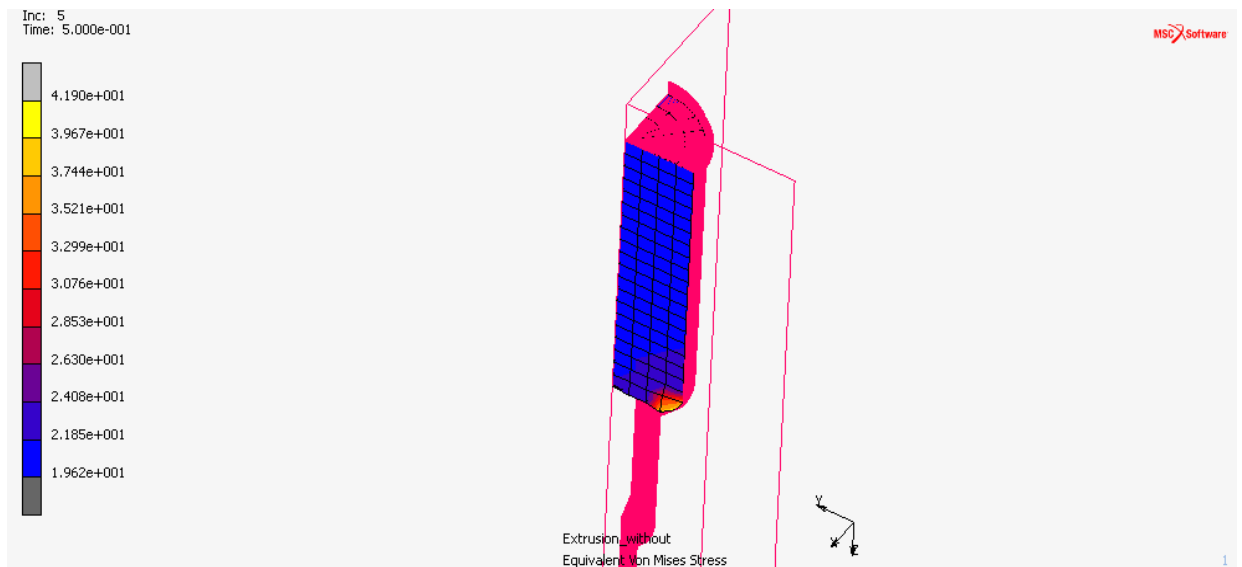


Σχήμα 4.134 Παράθυρο επιλογών γραφικών αποτελεσμάτων προσομοίωσης

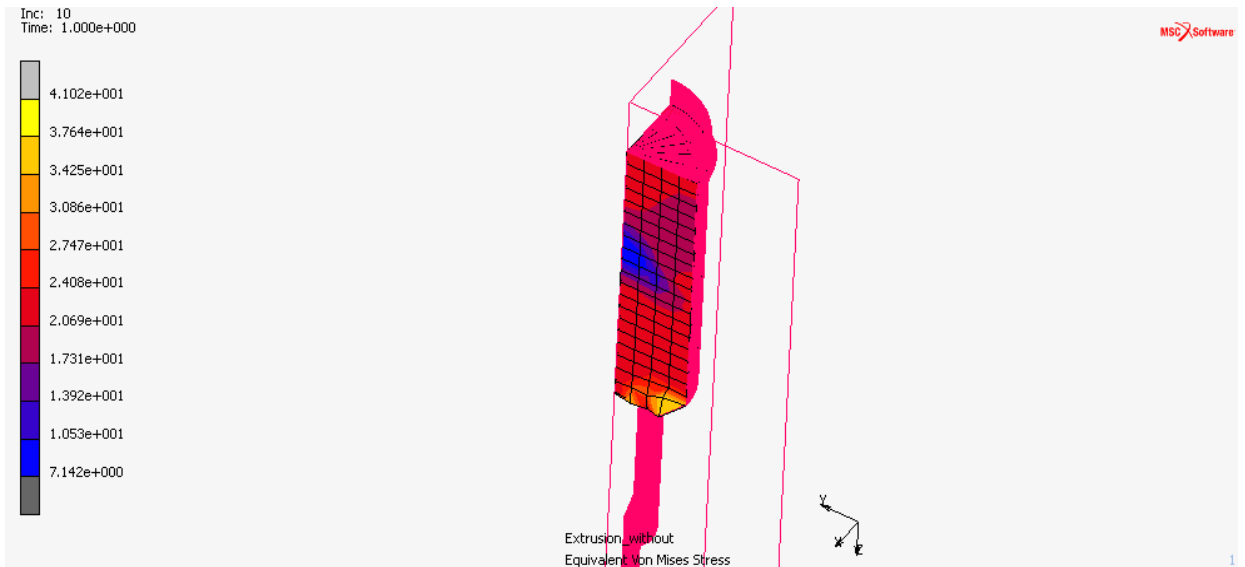
4.4.3.9 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ



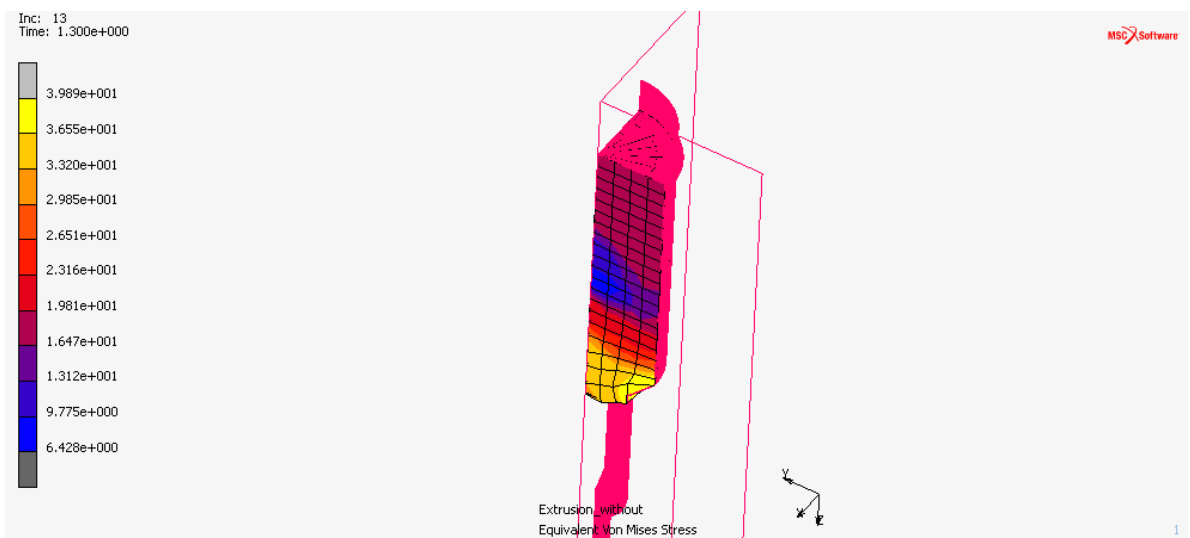
Σχήμα 4.135 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (480 στοιχεία) διέλασης



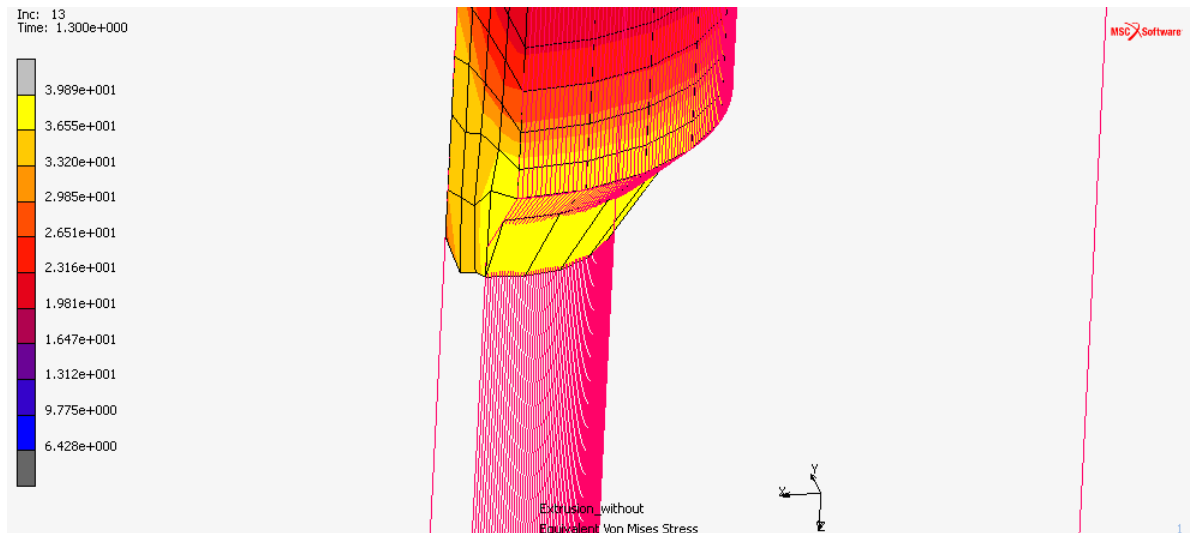
Σχήμα 4.136 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 5 (480 στοιχεία) διέλασης



Σχήμα 4.137 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 10 (480 στοιχεία) διέλασης



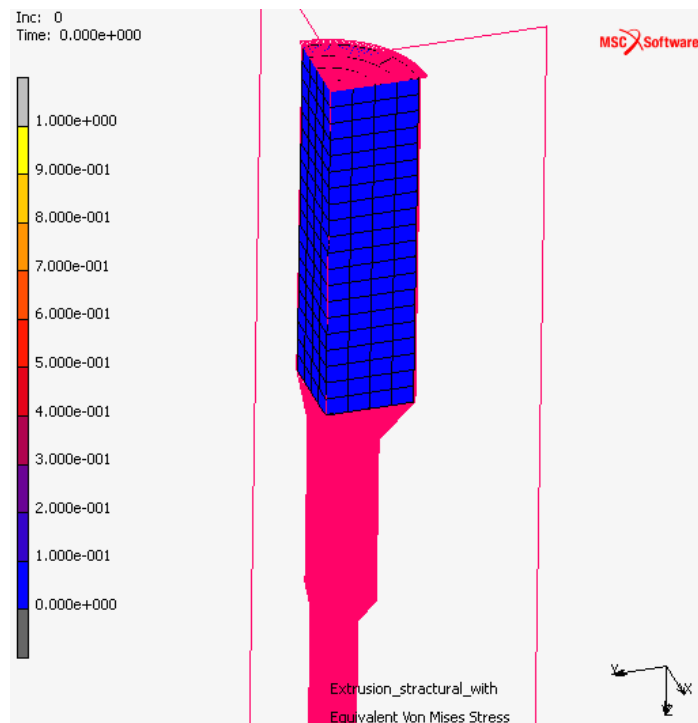
Σχήμα 4.138 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 13 (480 στοιχεία) διέλασης



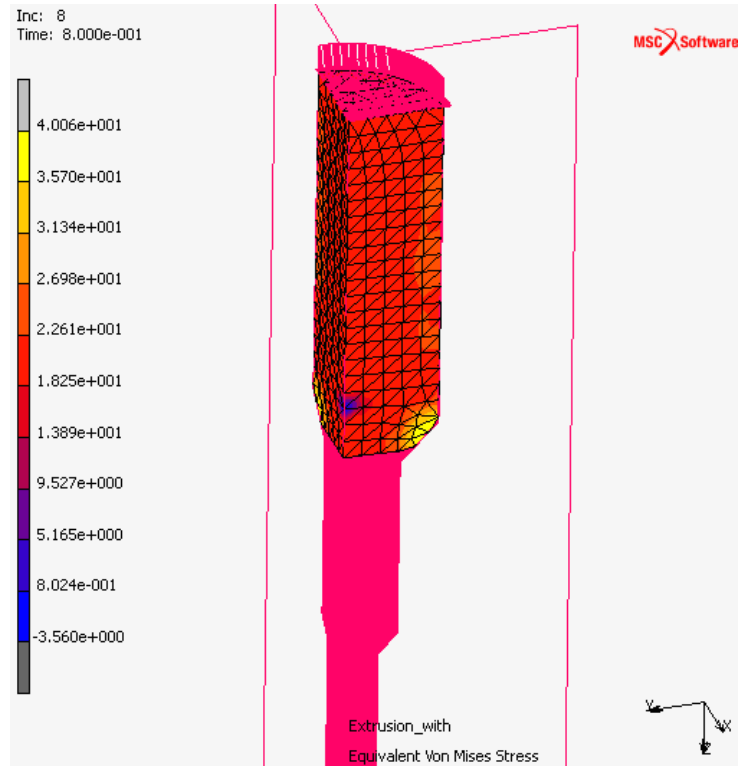
Σχήμα 4.139 Παραμορφωμένο πλέγμα διέλασης επανάληψη 13

Στο Σχήμα 4.104 βλέπουμε το πλέγμα να έχει διαπεράσει το καλούπτι και είναι ο λόγος που σταμάτησε η επίλυση.

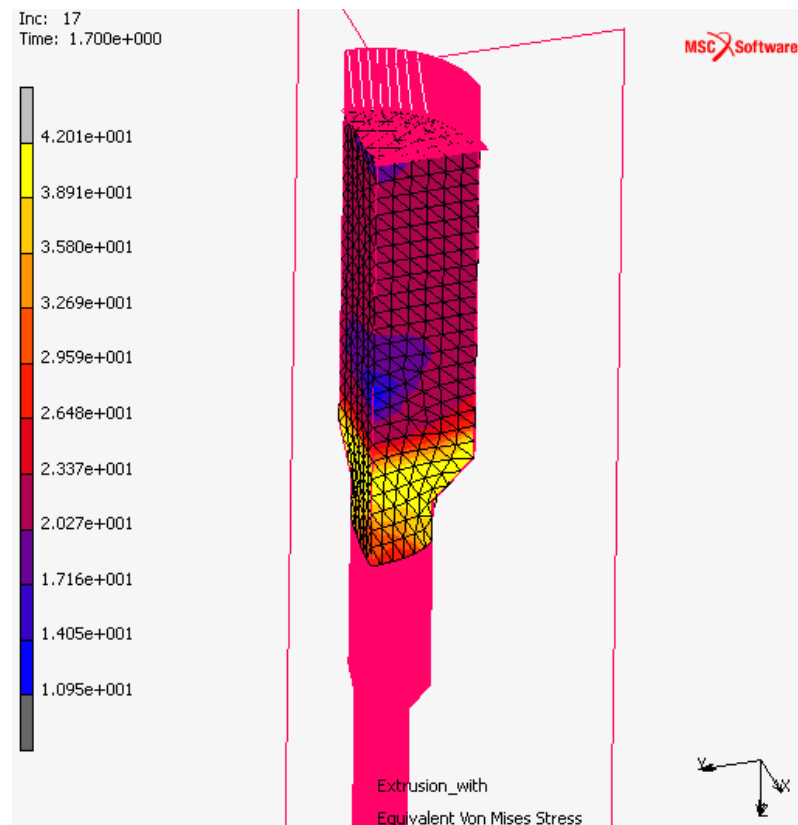
4.4.3.10 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ



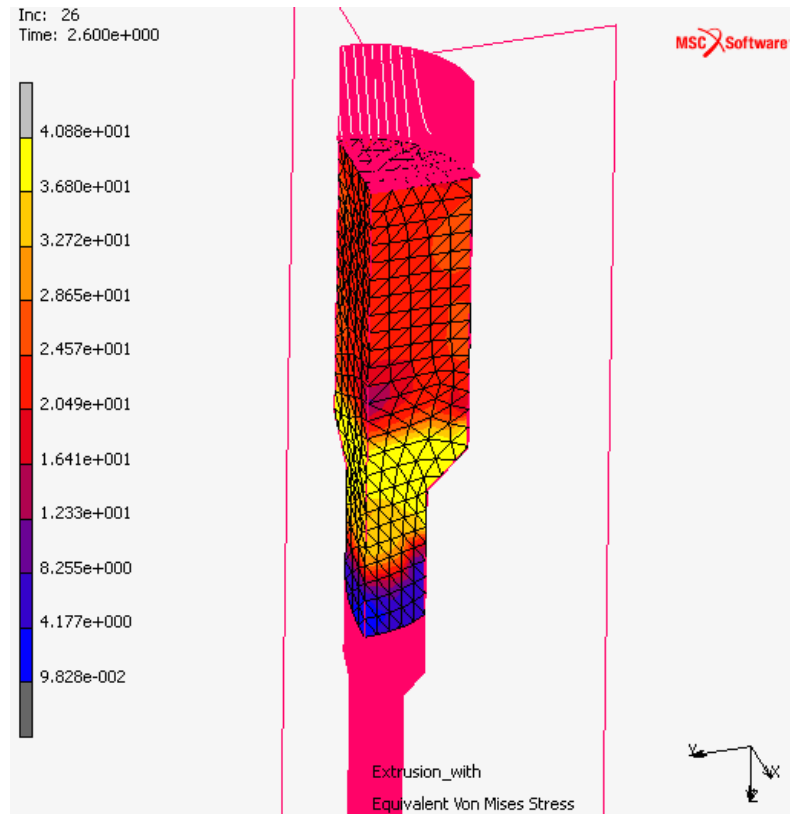
Σχήμα 4.140 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (480 στοιχεία)



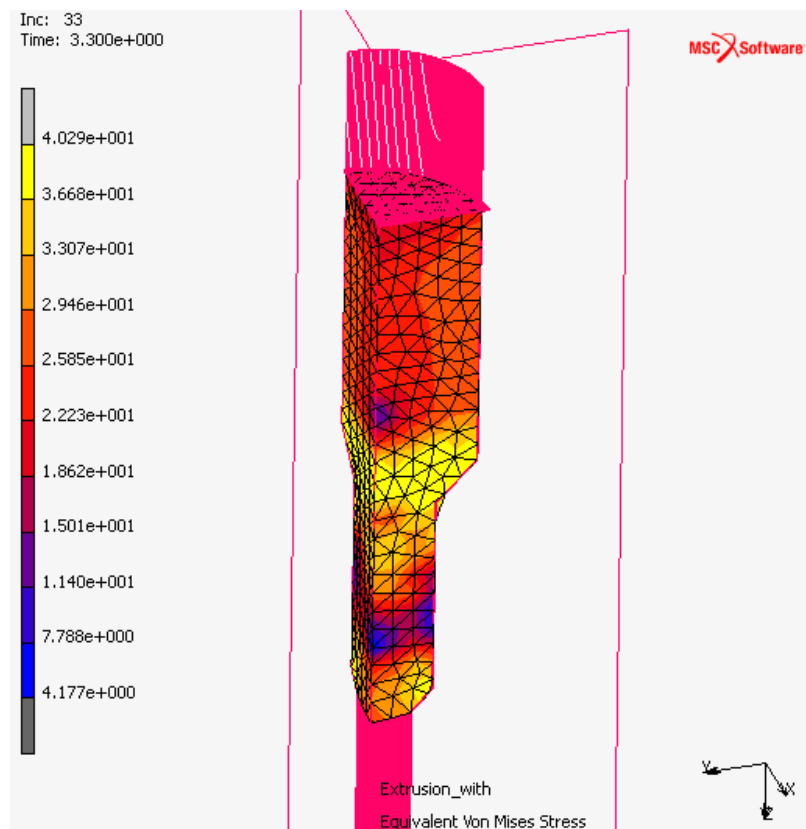
Σχήμα 4.141 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 8 (2562 στοιχεία)



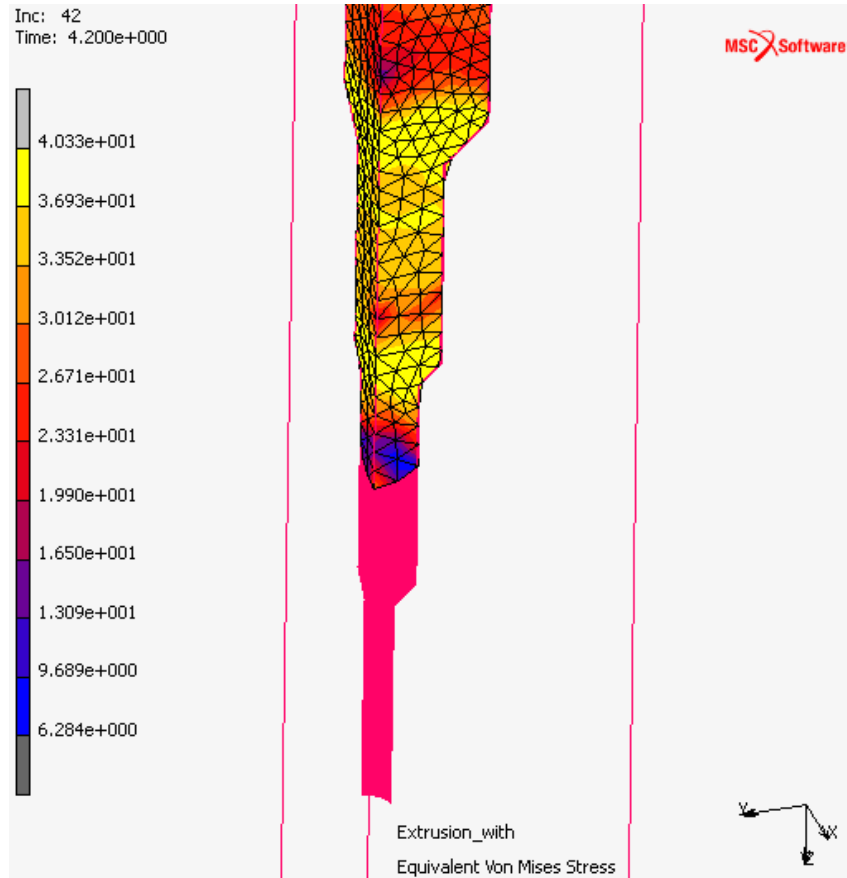
Σχήμα 4.142 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 17 (3490 στοιχεία)



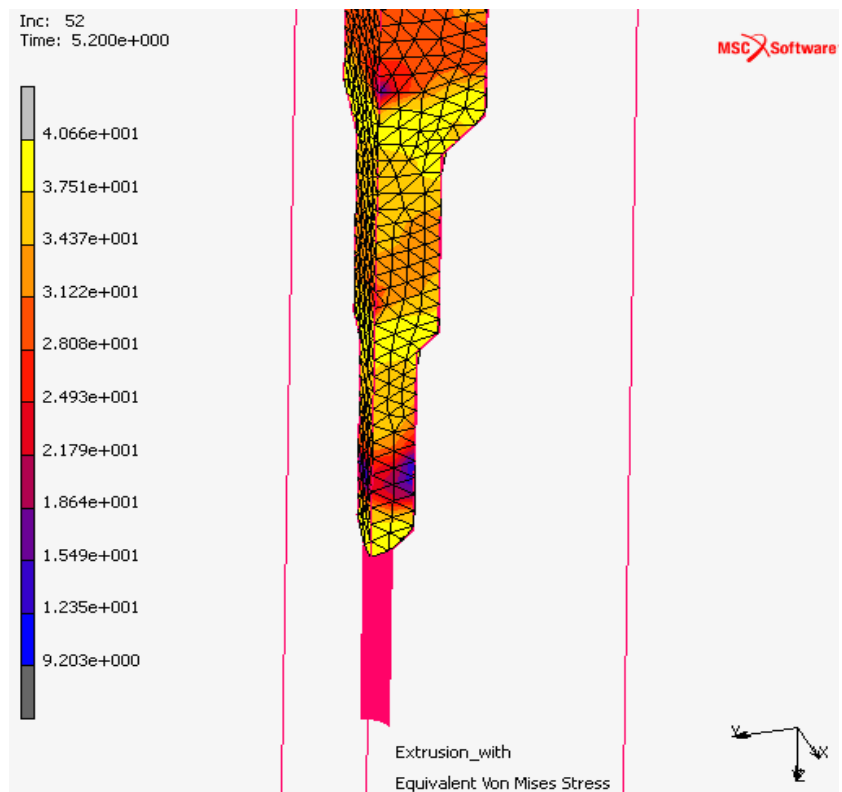
Σχήμα 4.143 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 26 (2601 στοιχεία)



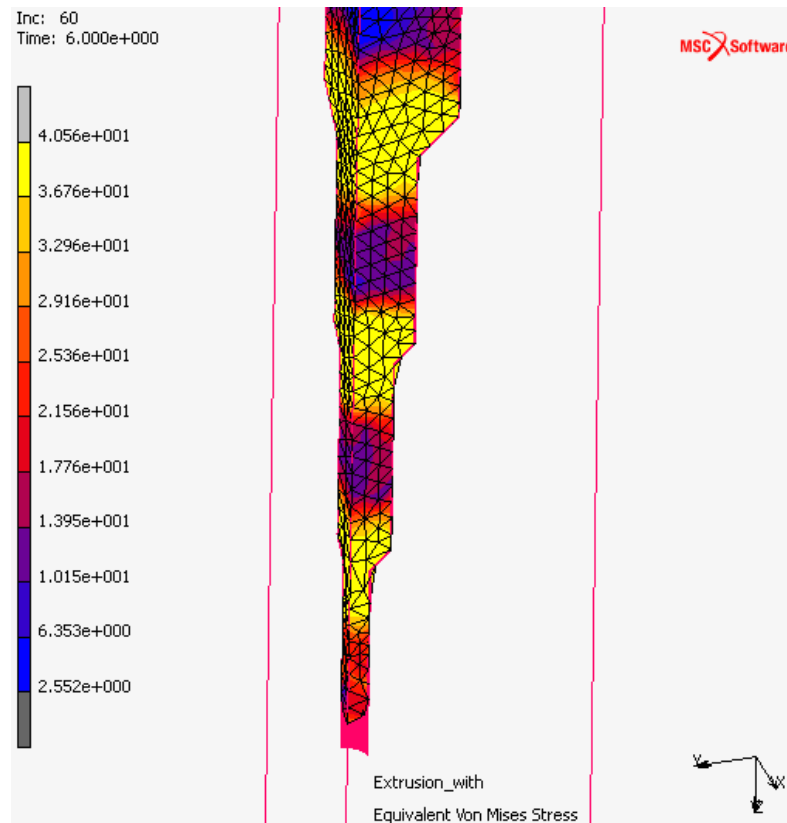
Σχήμα 4.144 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 33 (2813 στοιχεία)



Σχήμα 4.145 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 42 (2670 στοιχεία)



Σχήμα 4.146 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 52 (2726 στοιχεία)



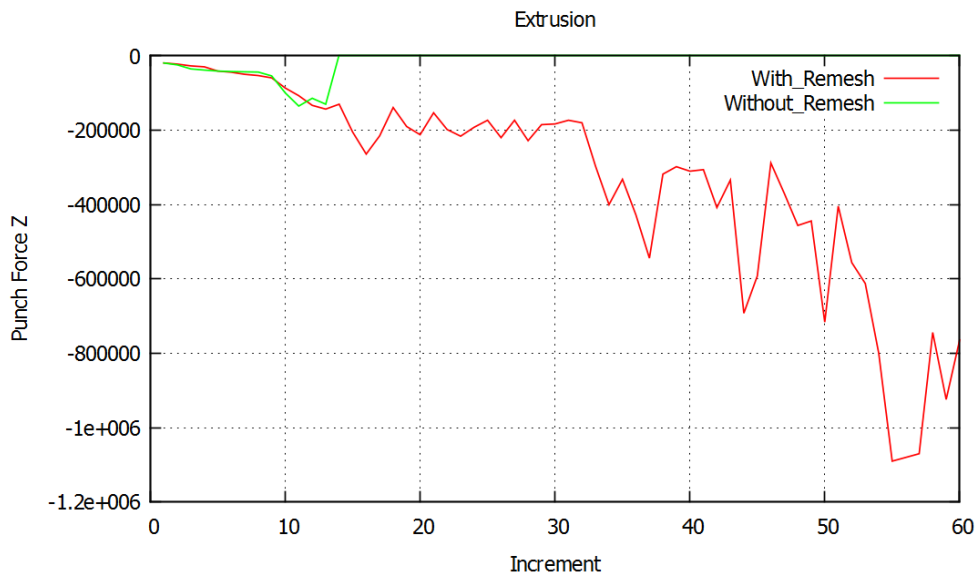
Σχήμα 4.147 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (2747 στοιχεία)

4.4.3.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για να εμφανίσουμε τα αποτελέσματα, αφού έχουμε επιλέξει την εντολή **Open Post File (Results Menu)** στο παράθυρο Run Job και βρισκόμαστε στο μενού **Model Plot Results** στην καρτέλα **Results** ακολουθούμε την εντολή:

Results → History Plot → All Incs → Add Curves → Global

και επιλέγουμε του άξονες, στον x βάζουμε τα βήματα (Increments) και στον y την δύναμη του εμβόλου Punch Force z κατά y επιλέγουμε Fit και βλέπουμε το διάγραμμά μας. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε μορφή .txt, στο μενού του History Plot επιλέγουμε Save. Τα αποτελέσματα που θα πάρουμε είναι κατά την συμμετρία 90° οπότε θα πρέπει να τα επεξεργαστούμε και να τα πολλαπλασιάσουμε με τέσσερα. Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση με και χωρίς την αναδημιουργία του πλέγματος στην κατεργασία της συμπίεσης με το πρόγραμμα gnuplot Grapher.



Σχήμα 4. 148 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων διέλασης

Φαίνεται καθαρά η δύναμη με την χρήση της αναδημιουργίας του πλέγματος κινείται πολύ πιο ομαλά σε σχέση με αυτήν χωρίς την αναδημιουργία. Όπως φαίνεται η χρήση της αναδημιουργίας σε κατεργασίες συμπίεσης βοηθάει στο να έχουμε ομοιομορφία σε όλα τα βήματα της κατεργασίας.

4.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε την διαδικασία της προσομοίωσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA στις κατεργασίες της συμπίεσης, της επίπεδης έλασης και της διέλασης. Το LS-DYNA χειρίζεται διαφορετικά την γεωμετρία που εισάγουμε, το αρχείο της γεωμετρίας θα είναι της μορφής .IGES. Η γεωμετρία που εισάγουμε είναι και η γεωμετρία που θα επεξεργαστούμε δεν θα πρέπει να σχεδιάσουμε καινούργια. Η λογική του πως χειριζόμαστε την γεωμετρία, πώς δημιουργούμε πλέγμα και πως εισάγουμε τα δεδομένα είναι τελείως διαφορετική από αυτήν που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Τα μοντέλα κατεργασιών που θα αναλύσουμε θα είναι τα ίδια με τα ίδια στοιχεία για να μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά μας. Στην συνέχεια θα δούμε βήμα-βήμα την διαδικασία για κάθε κατεργασία, θα δείξουμε την επιλογή υλικού, την δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων και τα κριτήρια και τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιήσουμε για την αναδημιουργία (Remesh) του. Για τα κατάλληλα κριτήρια αλλά και παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές και διαφορετικές ρυθμίσεις μέχρι να καταλήξουμε σε αυτές που δεν επιβαρύνουν πολύ την επίλυση των μοντέλων και βγάζουν ακριβή αποτελέσματα.

Η προσομοίωση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Ls-Dyna ακολουθεί τελείως διαφορετικά βήματα από αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Το Ls-Dyna έχει συγκεκριμένες εφαρμογές σε μικρότερο εύρος όπως κατεργασίες διαμόρφωσης, έλεγχος αντοχής υλικών, προσομοιώσεις σε ελέγχους αυτοκινήτων και άλλα. Χειρίζεται την γεωμετρία που εισάγεται με άλλο τρόπο σχετικά πιο απλό από τον παραπάνω και η δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα. Όλες οι παράμετροι και τα κριτήρια για μία προσομοίωση βρίσκονται συγκεντρωμένες στο παράθυρο ελέγχου Keyword Manager. Από εκεί θα δούμε ότι γίνεται η επιλογή του υλικού, ορίζεται η ταχύτητα εμβόλου, οι επιλογές για την αναδημιουργία πλέγματος, ο ορισμός συμμετρίας και ότι ρύθμιση είναι αναγκαία για μία προσομοίωση. Παρακάτω παρουσιάζεται βήμα-βήμα οι προσομοιώσεις συμπίεσης, επίπεδης έλασης και διέλασης.

4.5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA

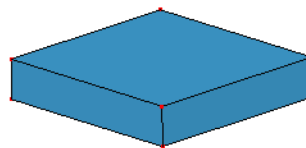
4.5.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η διαδικασία της δημιουργίας του πλέγματος είναι τελείως διαφορετική. Το πρόγραμμα κάνει αυτόματα το πλέγμα ορίζοντας του το μέγεθος των στοιχείων. Στο Ls-Dyna πρέπει να δημιουργηθεί πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και για τα απαραμόρφωτα σώματα δηλαδή το έμβολο και την κάτω πλάκα. Επίσης θα πρέπει να ορίσουμε και την μορφή που θα έχουν τα πλέγματα που θα δημιουργήσουμε δηλαδή Solid ή Shell. Στην κατεργασία της συμπίεσης το πλέγμα θα είναι της μορφής Solid. Για να εισάγουμε την γεωμετρία ακολουθούμε την διαδρομή:

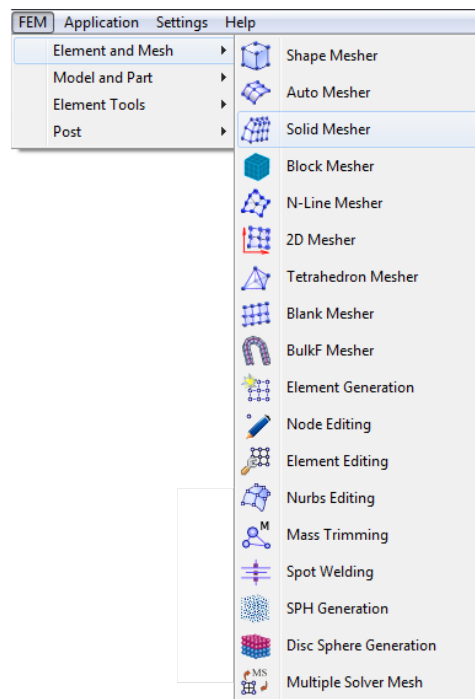
File → Import → IGES

και εισάγουμε τα κομμάτια της συμμετρικής γεωμετρίας ένα-ένα. Εισάγουμε πρώτα την κάτω πλάκα και δημιουργούμε ένα πλέγμα Solid με την εντολή:

FEM → Element and Mesh → Solid Mesher



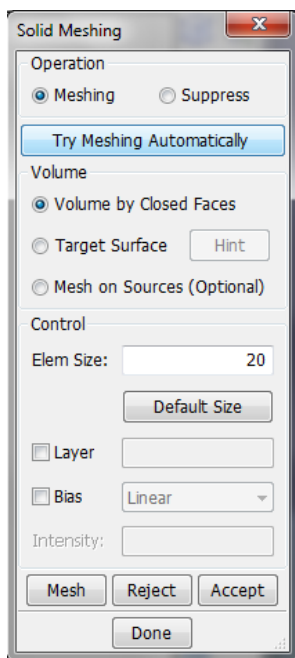
Σχήμα 4.149 Γεωμετρία κάτω πλάκας που έχει εισαχθεί από SolidWorks στο Ls-Dyna



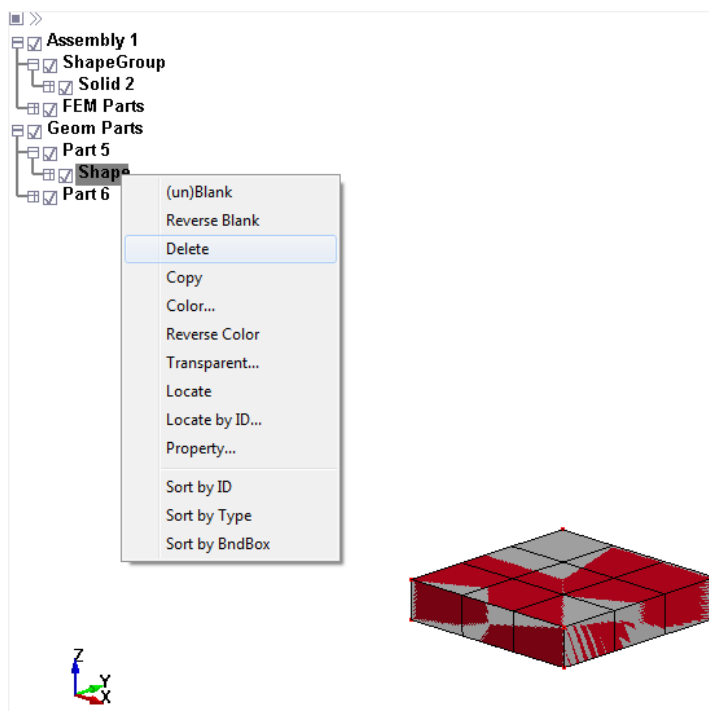
Σχήμα 4.150 Επιλογή δημιουργίας πλέγματος τύπου Solid

Και μας εμφανίζει το παράθυρο **Solid Meshing** στο οποίο ορίζουμε το μέγεθος τού στοιχείου στην εντολή **Element Size** και στην συνέχεια επιλέγουμε **Try Meshing Automatically** και δημιουργεί αυτόματα το πλέγμα μας μορφής Solid με τετραγωνικά

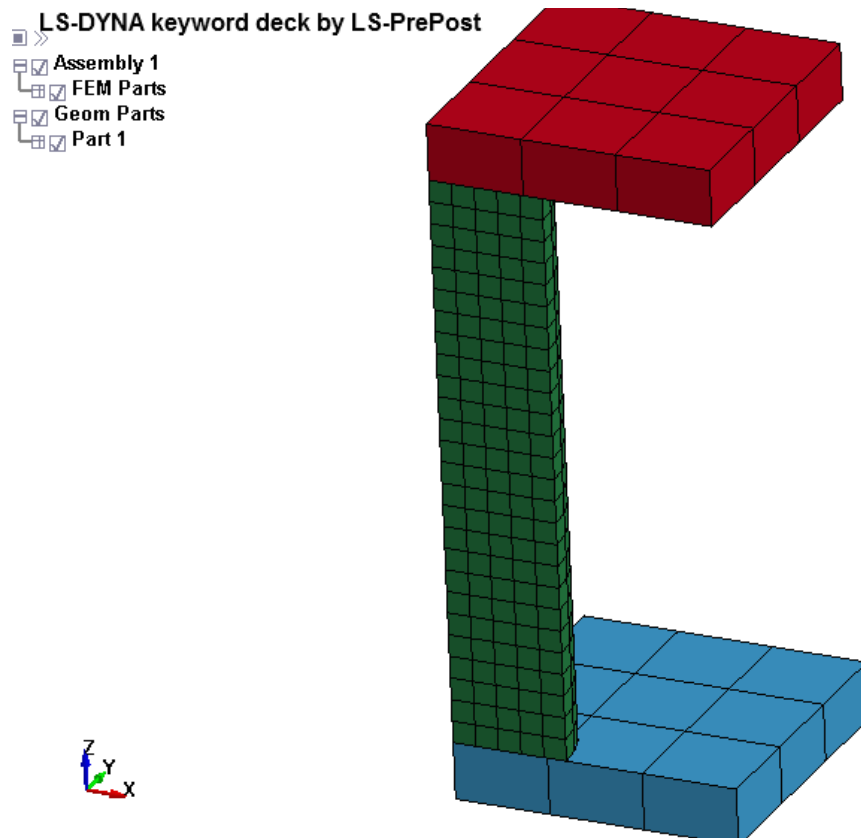
στοιχεία. Επιλέγουμε **Accept** και **Done**. Στην συνέχεια θα πρέπει να σβήσουμε την γεωμετρία και να εισάγουμε τα υπόλοιπα κομμάτια και να καταλήξουμε στην τελική συμμετρική γεωμετρία που σχεδιάσαμε όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.146**. Το πλέγμα τού δοκίμιου θα έχει διαφορετικό **Element Size** από αυτό των πλακών. Το **Element Size** για τις πλάκες είναι 20 και για το δοκίμιο 5.



Σχήμα 4.151 Παράθυρο αυτόματης δημιουργίας πλέγματος

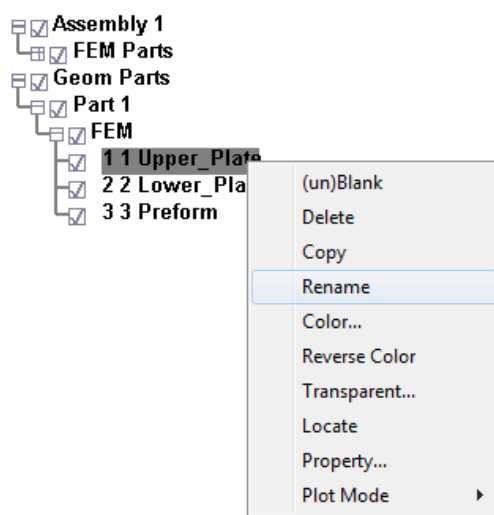


Σχήμα 4.152 Διαγραφή γεωμετρίας



Σχήμα 4.153 Τελική μορφή αρχτύπου με πεπερασμένα στοιχεία

Στήν συνέχεια ονομάζουμε τα κομμάτια μας για δική μας ευκολία από τήν γραμμή εντολών που βρίσκεται αριστερά στην οθόνη επεξεργασίας.

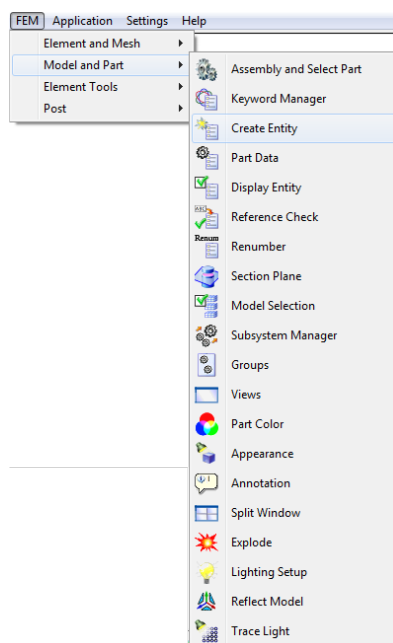


Σχήμα 4.154 Διαδικασία μετονομασίας

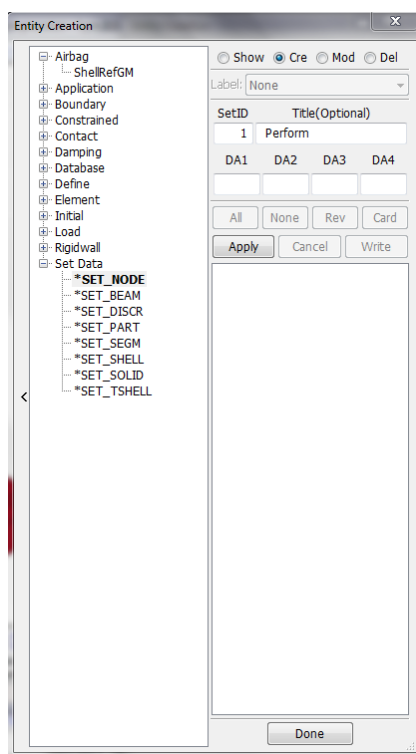
4.5.1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΚΑΙ ΚΟΜΒΩΝ

Για να ορίσουμε τούς κόμβους τού δοκιμίου μας ακολουθούμε τήν εντολή:

FEM → Model and Part → Create Entity → Set Data → *SET_NODE

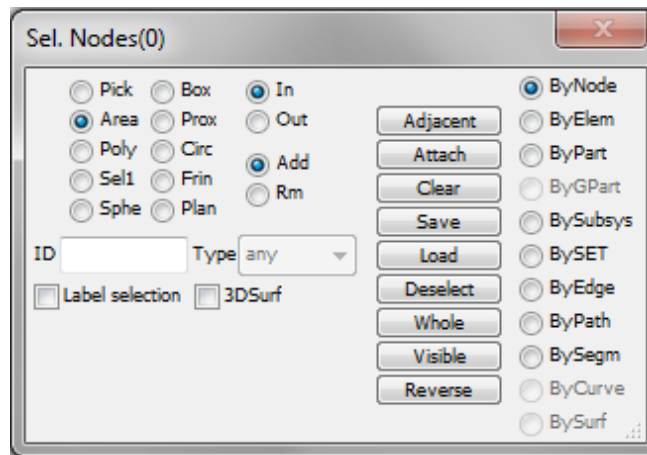


Σχήμα 4.155 Επιλογή καταχώρησης κόμβων και τεμαχίων

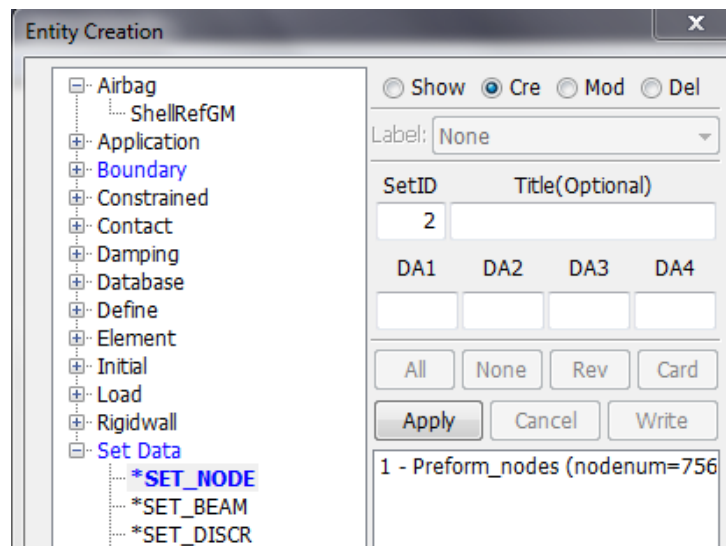


Σχήμα 4.156 Παράθυρο εισαγωγής κόμβων και τεμαχίων

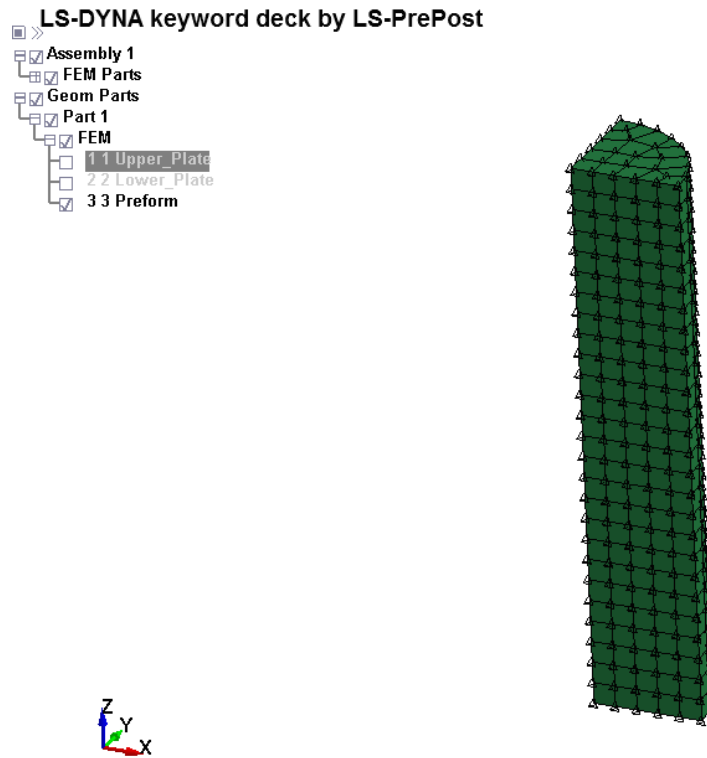
Για να καταχωρίσουμε τους κόμβους επιλέγουμε την εντολή **Cre** για να δημιουργήσουμε νέα εισαγωγή κόμβων όπως φαίνεται το **Σχήμα 4.149**. Επιλέγοντας την εντολή **Area** στο παράθυρο **Sel. Nodes** και επιλέγουμε όλο το κομμάτι και πατάμε **Apply**.



Σχήμα 4.157 Παράθυρο Sel. Nodes



Σχήμα 4.158 Καταχώρηση κόμβων



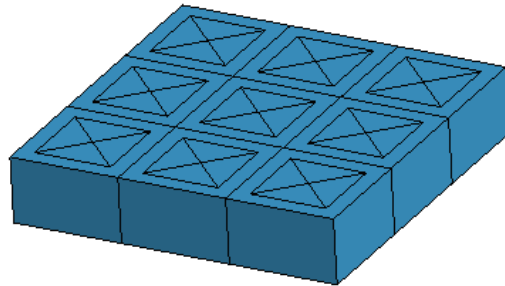
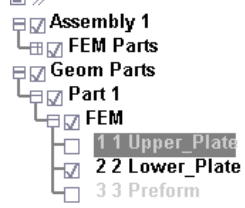
Σχήμα 4.159 Επιλογή κόμβων δοκιμίου

Για την καταχώρηση των τεμαχίων ακολουθούμε:

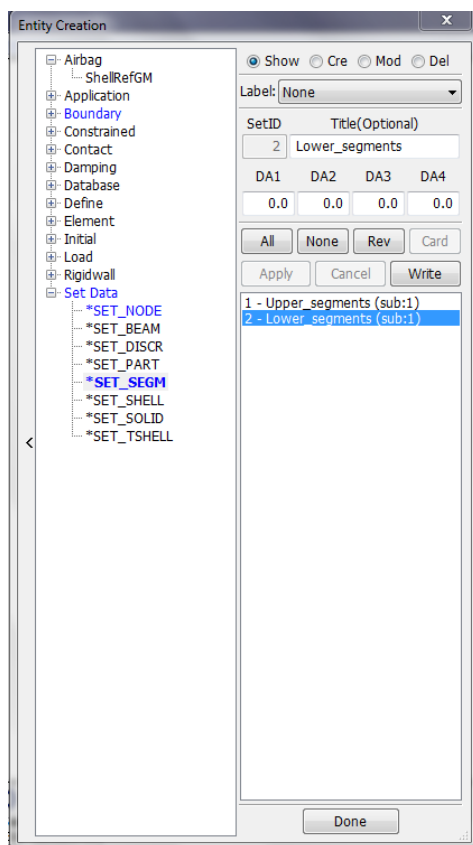
**Fem → Model and Part → Create Entity → Set Data →
*SET_SEGMENT**

Για να καταχωρίσουμε τα τεμάχια επιλέγουμε την εντολή **Cre** για να δημιουργήσουμε νέα εισαγωγή τεμαχίων. Επιλέγοντας την εντολή **Pick** στο παράθυρο **Sel. Nodes** επιλέγουμε τα στοιχεία που έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο μας και πατάμε **Apply**.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost



Σχήμα 4.160 Καταχώριση επιφάνειας επαφής της κάτω πλάκας



Σχήμα 4. 161 Καταχώρηση τεμαχίων

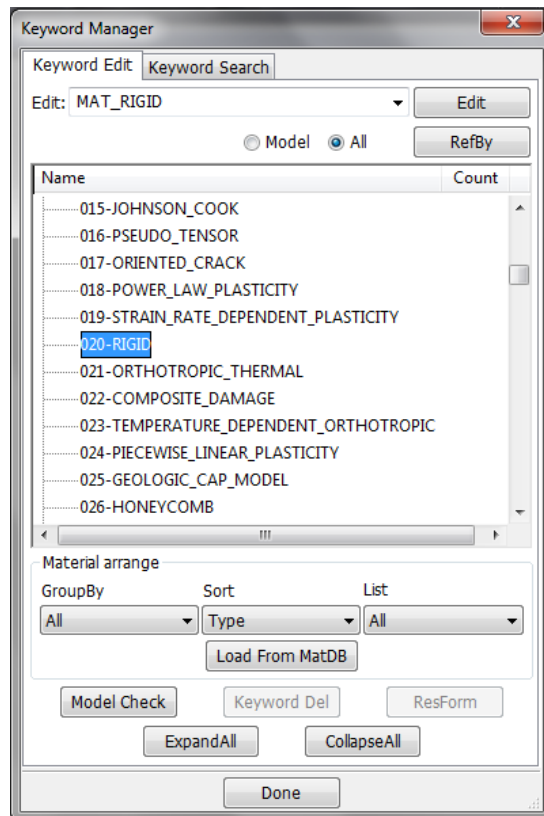
4.5.1.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Στο Ls-Dyna θα πρέπει να οριστεί υλικό και για τα παραμορφώσιμα υλικά και για τα απαραμόρφωτα. Για τα απαραμόρφωτα στοιχεία, δηλαδή άνω και κάτω πλάκα, το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι ασάλι και για το παραμορφώσιμο, το δοκίμιο, θα είναι μόλυβδος. Τα στοιχεία για τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε τα λάβαμε από τον διαδικτυακό τόπο www.matweb.com. Παρακάτω φαίνεται η εντολή για την εισαγωγή απαραμόρφωτων υλικών:

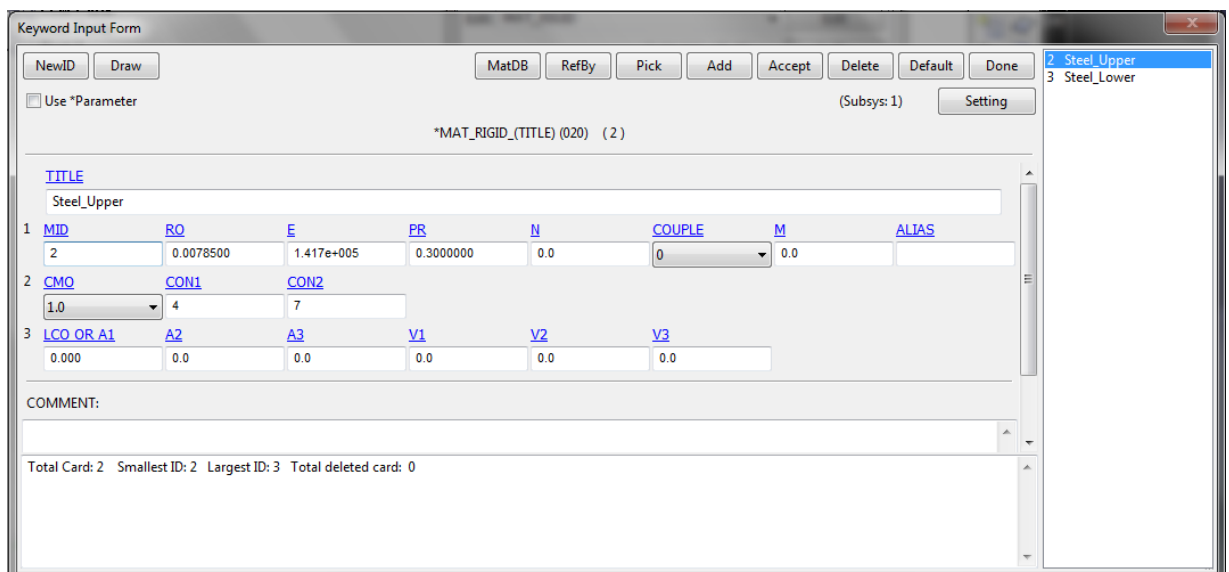
FEM → Model and Part → Keyword Manager → All → MAT → 020-RIGID

και ορίζουμε τα χαρακτηριστικά για το ασάλι. Επειδή στην καρτέλα που ορίζουμε το υλικό ορίζουμε και αν είναι σταθερό ή έχει κάποια κίνηση θα πρέπει να δημιουργήσουμε δύο καρτέλες με το ίδιο υλικό η μία για την σταθερή πλάκα και η άλλη για την κινούμενη όπως φαίνεται παρακάτω. Η εντολή που δηλώνει αν το απαραμόρφωτο υλικό θα είναι σταθερό ή κινούμενο είναι η **CON1** η οποία δίνει έτοιμες επιλογές για να επιλεγθεί σε ποιούς άξονες θα

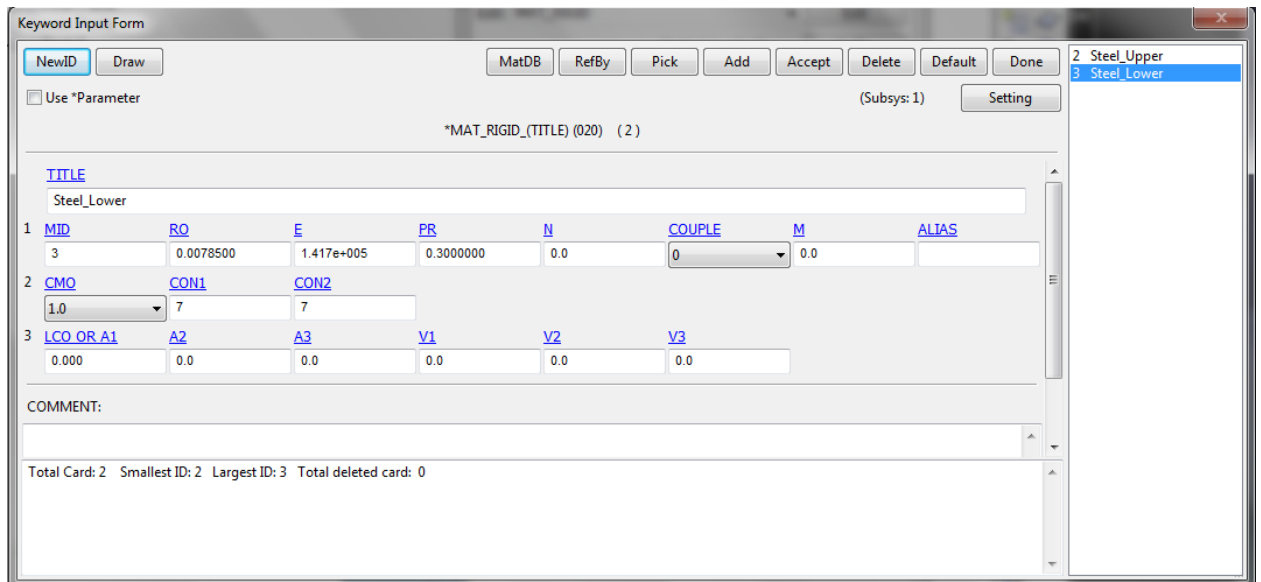
είναι σταθερό το υλικό. Για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για την δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.



Σχήμα 4.162 Παράθυρο εντολών Keyword Manager επιλογή απαραιμόρφωτων υλικών



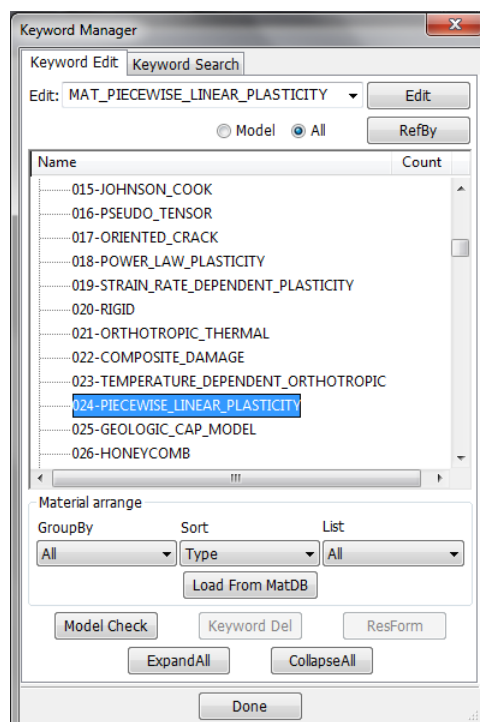
Σχήμα 4.163 Χαρακτηριστικά υλικού κινούμενης πλάκας



Σχήμα 4.164 Χαρακτηριστικά υλικού σταθερής πλάκας

Στήν συνέχεια θα ορίσουμε το υλικό τού παραμορφώσιμου σώματος, του δοκιμίου, που θα είναι ο μόλυβδος με την ακόλουθη εντολή:

FEM → Model and Part → Keyword Manager → All → MAT → 024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY



Σχήμα 4.165 Παράθυρο εντολών Keyword Manager επιλογή παραμορφώσιμου υλικού

Keyword Input Form

NewID Draw MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

TITLE
Lead

| | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| 1 | MID | RO | E | PR | SIGY | ETAN | FAIL | TDEL |
| | h | 0.0113000 | 3620.7578 | 0.4300000 | 0.0 | 0.0 | 1.000e+021 | 0.0 |
| 2 | C | P | LCSS | LCSR | VP | | | |
| | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0.0 | | | |
| 3 | EPS1 | EPS2 | EPS3 | EPS4 | EPS5 | EPS6 | EPS7 | EPS8 |
| | 0.0 | 0.0108620 | 0.0708600 | 0.2642630 | 0.5893000 | 0.8433520 | 1.0229330 | 1.3152910 |
| 4 | ES1 | ES2 | ES3 | ES4 | ES5 | ES6 | ES7 | ES8 |
| | 8.2536840 | 11.600840 | 16.991930 | 22.005810 | 22.692480 | 23.274269 | 24.133671 | 26.185209 |

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

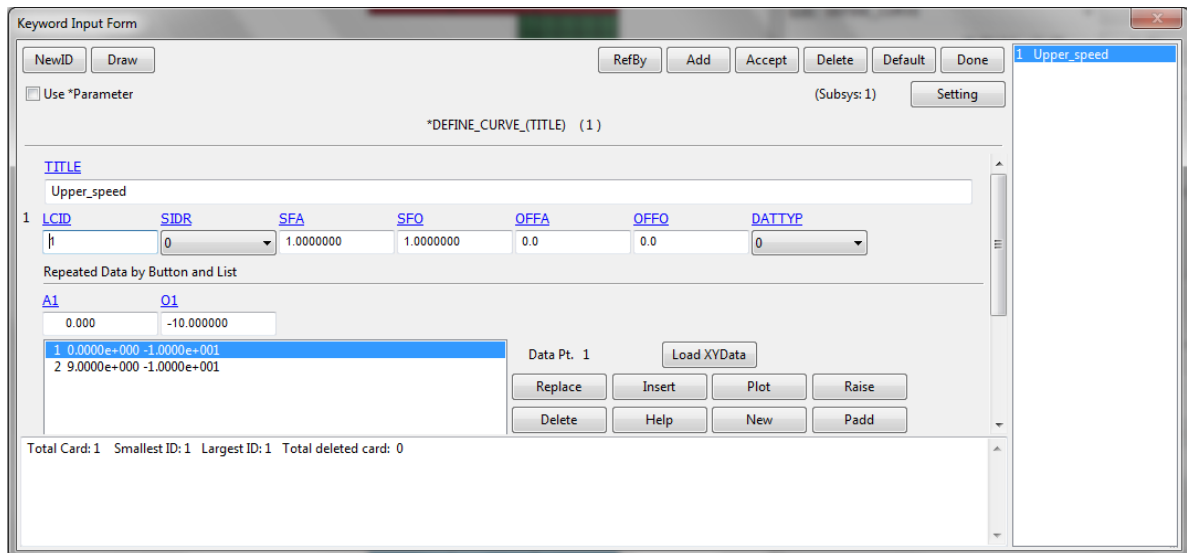
Σχήμα 4.166 Χαρακτηριστικά υλικού δοκιμίου

4.5.1.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΜΒΟΛΟΥ

Για την ταχύτητα του εμβόλου από το παράθυρο ελέγχου Keyword Manager επιλέγουμε:

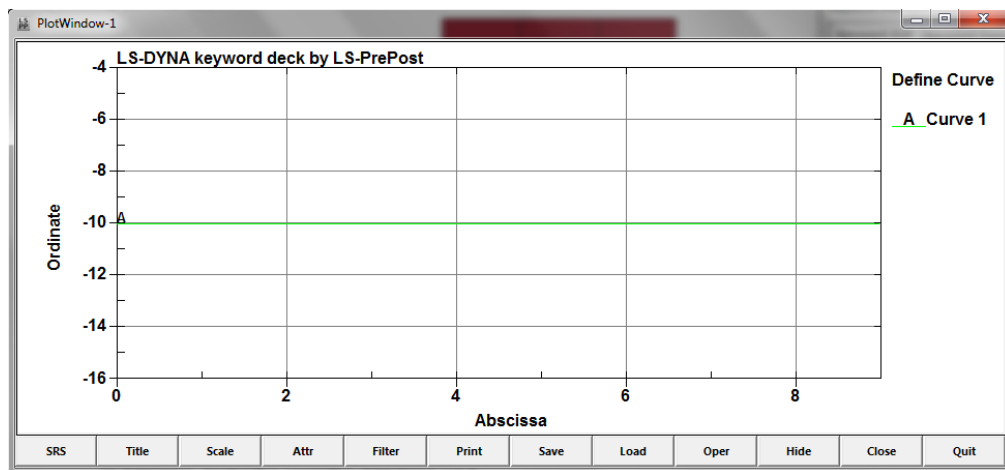
Keyword Manager → DIFINE → CURVE

Δίνουμε όνομα στην καμπύλη της ταχύτητας που θα δημιουργήσουμε και παρατηρούμε ότι υπάρχουν οι εντολές **A1** και **O1** που δηλώνουν τούς άξονες καρτεσιανού επιπέδου y , x αντίστοιχα. Στην **A1** επιλέγουμε την τιμή 0 και στην **O1** την ταχύτητα του εμβόλου και την κατεύθυνση την δηλώνουμε με το πρόσημο βάζουμε την τιμή -10 και επιλέγουμε **Insert**, έπειτα επαναλαμβάνουμε και στην **A1** βάζουμε την τιμή 9 και επιλέγουμε **Insert** για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept**. Δηλώσαμε ότι την ταχύτητα θα την έχει για 9 βήματα.



Σχήμα 4.167 Παράθυρο καταχώρησης καμπύλης ταχύτητας

Για να δούμε την καμπύλη που δημιουργήσαμε επιλέγουμε **Plot** και εμφανίζεται η καμπύλη μας.

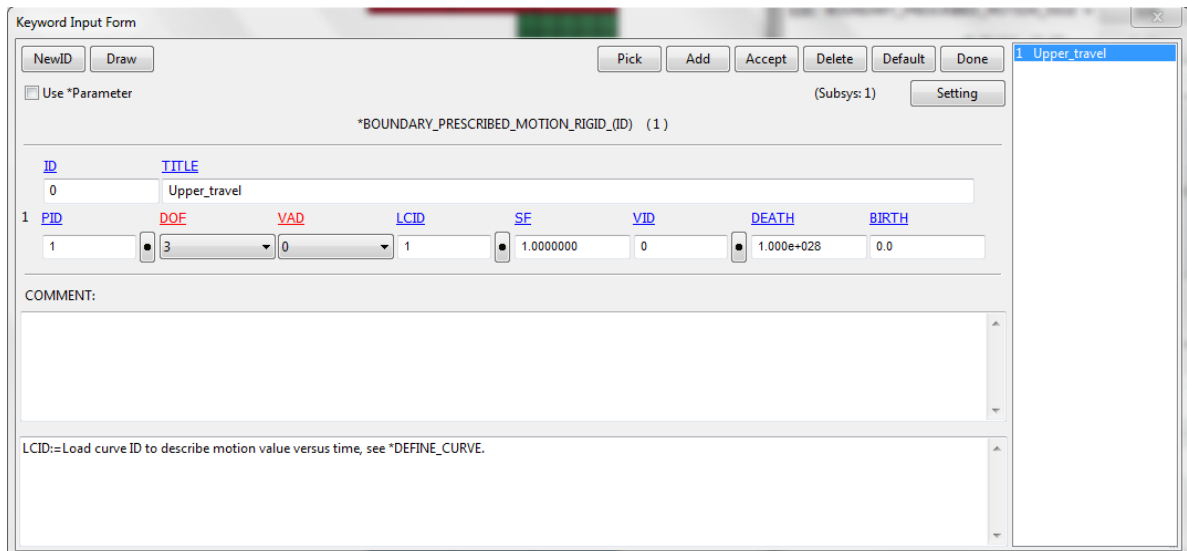


Σχήμα 4.168 Καμπύλη που δημιουργήθηκε

Στην συνέχεια θα πρέπει να δηλώσουμε ποιά απαραμόρφωτο σώμα κάνει την κίνηση σε ποιόν άξονα αλλά και τι είδους κίνηση κάνει. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή:

Keyword Manager → BOUNDARY → PRESCRIBED_MOTION_RIGID

Στην πρώτη επιλογή **PID** ορίζουμε το κομμάτι που θα κάνει την κίνηση, στην δεύτερη επιλογή **DOF** επιλέγουμε τόν άξονα που θα κινηθεί το απαραμόρφωτο σώμα μας και τέλος στην επιλογή **LCID** καταχωρούμε την καμπύλη που δημιουργήσαμε παραπάνω.



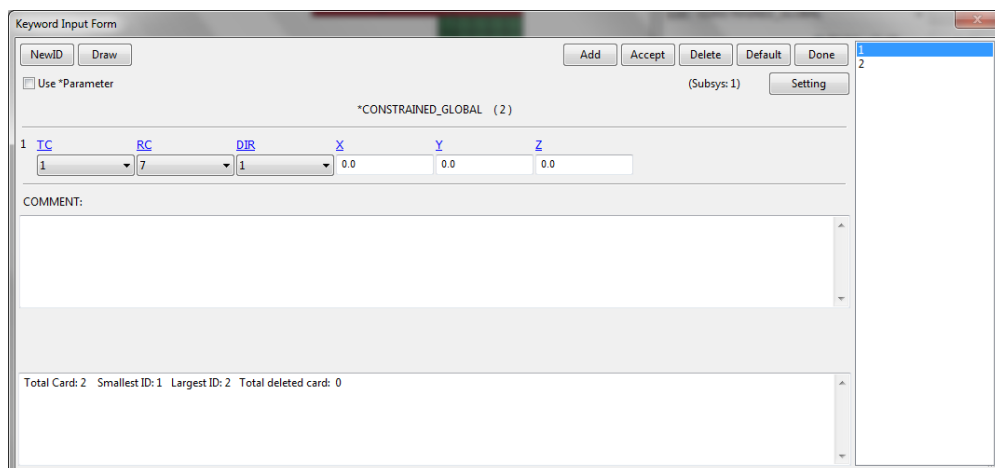
Σχήμα 4.169 Παράθυρο καταχώρισης σώματος που κάνει την κίνηση

4.5.1.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ

Το Ls-Dyna δίνει την δυνατότητα στον χειριστή να προσδιορίσει την συμμετρία με προεπιλεγμένες επιλογές με την εντολή:

Keyword Manager → CONSTRAINED → GLOBAL

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.162 υπάρχουν οι επιλογές **T1**, **RC** και **DIR** που δηλώνουν τον αξονικό περιορισμό, τον περιστροφικό περιορισμό και την κατεύθυνση της συμμετρίας αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη κατεργασία θα έχουμε δύο συμμετρικές επιφάνειες κατά τους άξονες x και y. Για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για την δημιουργία νέας καταχώρισης Επιλέγουμε **ADD**.



Σχήμα 4.170 Ορισμός συμμετρίας

4.5.1.7 ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΗ ΕΠΑΦΩΝ

Η εντολή για την καταχώρηση των επαφών είναι :

**Keyword Manager → CONTACT →
AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE**

Σε αυτό το παράθυρο δηλώνουμε ποιά σώματα έρχονται σε επαφή αλλά και τον συντελεστή τριβής τους. Στην εντολή **SSTYP** δηλώνουμε με ποιό τύπο θα δηλώσουμε το κομμάτι που θα δεχθεί την παραμόρφωση, επιλέγουμε να το καταχωρήσουμε βάση της λίστας των κόμβων που έχουμε. Με τον ίδιο τρόπο θα δηλώσουμε και τον τύπο του απαραμόρφωτου σώματος στην εντολή **MSTYP** και θα επιλέξουμε να καταχωρήσουμε με τα τεμάχια (segment ID) που έχουμε καταχωρήσει. Στην εντολή **SSID** καταχωρούμε την λίστα των κόμβων του δοκιμίου μας και στο **MSID** καταχωρούμε την πλάκα που έρχεται σε επαφή. Στις εντολές **FS** και **FD** ορίζουμε την δυναμική και την στατική τριβή της επαφής. Ακολουθούμε την διαδικασία και για τις δύο πλάκες. Για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για την δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.

| 1 | CID | TITLE |
|---|---------------|-------|
| 0 | Upper_Preform | |

| 2 | IGNORE | BUCKET | LCBUCKET | NS2TRACK | INITITER | PARMAX | UNUSED | CPARAMB |
|---|--------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|---------|
| 0 | 200 | | 3 | 2 | 1.0005 | | 0 | |

| 3 | UNUSED | CHKSEGS | PENSE | GRPABLE |
|---|--------|---------|-------|---------|
| 0 | 1.0 | 0 | | |

| 4 | SSID | MSID | SSTYP | MSTYP | SBOXID | MBOXID | SPR | MPR |
|---|------|------|-------|-------|--------|--------|-----|-----|
| 1 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| 5 | FS | FD | DC | VC | VDC | PENCHK | BT | DT |
|-----------|-----------|-----|-----|-----|-----|--------|------------|----|
| 0.2000000 | 0.2000000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | n | 0.0 | 1.000e+020 | |

FD:=Dynamic coefficient of friction. The frictional coefficient is assumed to be dependent on the relative velocity v-rel of the surfaces in contact. Give table ID if FS=2 (default=0.0).
Note: For the special contact option TIED_SURFACE_TO_SURFACE_FAILURE only, the variables FD is Shear stress at failure

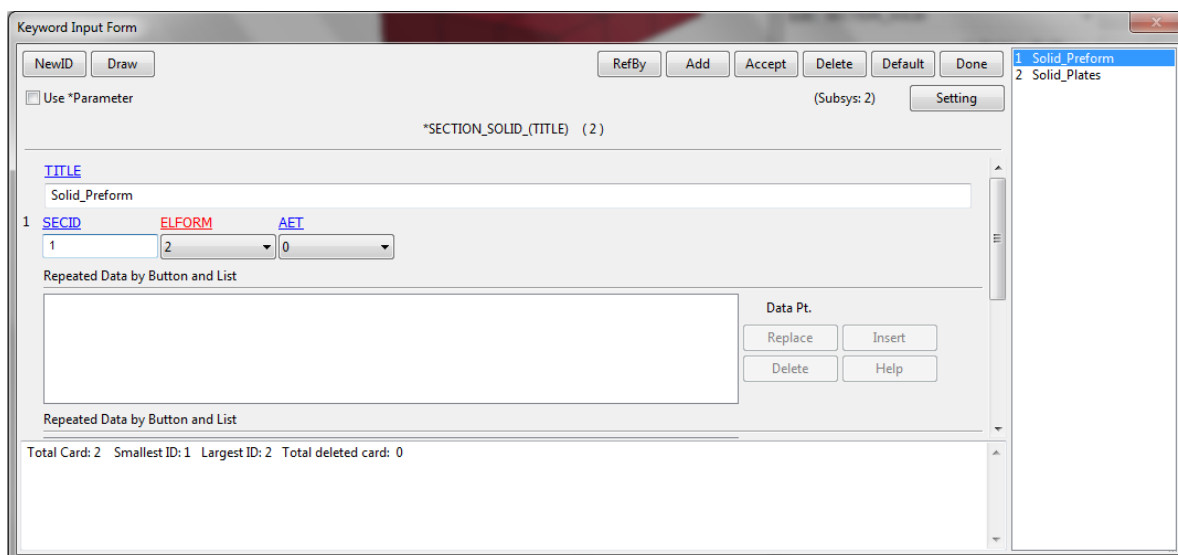
Σχήμα 4.171 Ορισμός επαφών

4.5.1.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Ο ορισμός των στοιχείων παίζει βασικό ρόλο διότι ορίζει την αντίδραση που θα έχει το πλέγμα στην παραμόρφωσή του στην κατεργασία της συμπίεσης. Όλες οι γεωμετρίες που εισήχθησαν μετατράπηκαν σε πλέγμα πεπερασμένων διαφορών τύπου Solid έτσι η εντολή που θα επιλέξουμε θα είναι:

Keyword Manager → SECTION → SOLID

Θα καταχωρίσουμε δύο επιλογές μία για τα απαραμόρφωτα στοιχεία και μία για τα παραμορφώσιμα αφού γράψουμε το όνομα της καταχώρισης μας στην εντολή ELFORM επιλέγουμε τόν τύπο 1 που είναι και η προεπιλεγμένη επιλογή για τα στοιχεία του πλέγματος που απαρτίζουν τα απαραμόρφωτα υλικά και τόν τύπο 2 για τα στοιχεία του παραμορφώσιμου σώματος. Για τήν καταχώριση τών αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για τήν δημιουργία νέας καταχώρισης Επιλέγουμε **ADD**.



Σχήμα 4. 172 Ορισμός στοιχείων

4.5.1.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΛΗΞΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με τήν παρακάτω εντολή ορίζουμε τόν χρόνο που θα διαρκέσει η προσομοίωση. Η προσομοίωση τής συμπίεσης θα διαρκέσει 8sec.

Keyword Manager → CONTROL → TERMINATION

| | ENDTIM | ENDCYC | DTMIN | ENDENG | ENDMAS |
|---|-----------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 8.0000000 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Σχήμα 4.173 Καταχώρηση χρονικής λήξης

4.5.1.10 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Για τόν έλεγχο τών κριτηρίων τής αναδημιουργίας του πλέγματος ακολουθούμε τήν εντολή:

Keyword Manager → CONTROL → ADAPTIVE

Και εμφανίζει το παράθυρο ελέγχου τών κριτηρίων στο οποίο θα ορίσουμε τήν συχνότητα που θα γίνεται η αναδημιουργία στην εντολή **ADPFREQ** με βήμα 2 και στην εντολή **ADPOPT** θα επιλέξουμε 7 η οποία μας επιτρέπει τήν τρισδιάστατη εφαρμογή τής αναδημιουργίας τού πλέγματος σε στοιχεία τύπου Solid. Για τον έλεγχο τών παραμέτρων επιλέγουμε:

Keyword Manager → CONTROL → REMESHING

Στο παράθυρο που θα εμφανιστεί θα ορίσουμε το ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος τών στοιχείων με τίσ εντολές **RMIN** και **RMAX** με τίσ τιμές 2 και 4 αντίστοιχα.

Keyword Input Form

Use *Parameter (Subsys: 1) Clear Accept Delete Default Done Setting

*CONTROL_ADAPTIVE (1)

| | | | | | | | | |
|---|-----------|------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|
| 1 | ADPFREQ | ADPTOL | ADPOPT | MAXLVL | TBIRTH | TDEATH | LCADP | IOFLAG |
| | 2.0000000 | 1.000e+020 | 7 | 0 | 0.0 | 1.000e+020 | 0 | 0 |
| 2 | ADPSIZE | ADPASS | IREFLG | ADPENE | ADPTH | MEMORY | ORIENT | MAXEL |
| | 0.0 | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | LADPN90 | LADPGH | NCFRED | LADPCL | ADPCTL | CBIRTH | CDEATH | LCLVL |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0 |
| 4 | CNLA | | | | | | | |
| | 0 | | | | | | | |

COMMENT:

Σχήμα 4.174 Παράθυρο ελέγχου κριτηρίων αναδημιουργίας πλέγματος

Keyword Input Form

Use *Parameter (Subsys: 1) Clear Accept Delete Default Done Setting

*CONTROL_REMESHING (1)

| | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | RMIN | RMAX | VF_LOSS | MFRAC | DT_MIN | ICURV | IADP10 | SEFANG |
| | 2.0000000 | 4.0000000 | 1.0000000 | 0.2000000 | 0.0 | 4 | 0 | 0.0 |

COMMENT:

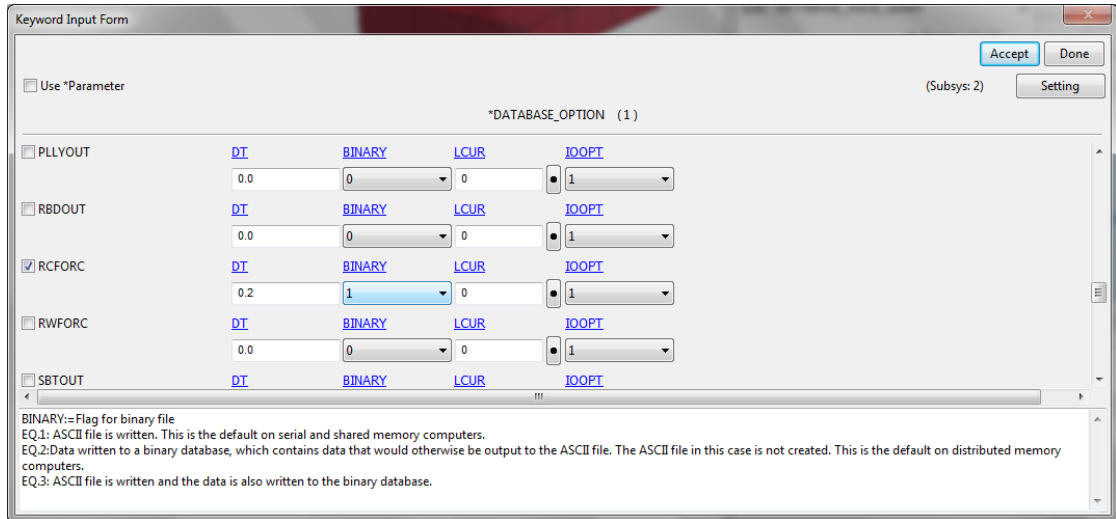
Σχήμα 4.175 Παράθυρο ελέγχου παραμέτρων αναδημιουργίας πλέγματος

4.5.1.11 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το βήμα θα ορίσουμε τί αποτελέσματα θέλουμε να εμφανιστούν αλλά και το βήμα των σημείων που θα εμφανιστούν στο διάγραμμά μας ακολουθώντας την εντολή:

Keyword Manager → DATABASE → ASCII_OPTION

Και επιλέγουμε την δύναμη του εμβόλου κατά τον άξονα z, **RCFOC**, με βήμα 0,2 στην εντολή DT και στην εντολή BINARY επιλέγουμε τον αριθμό 1.



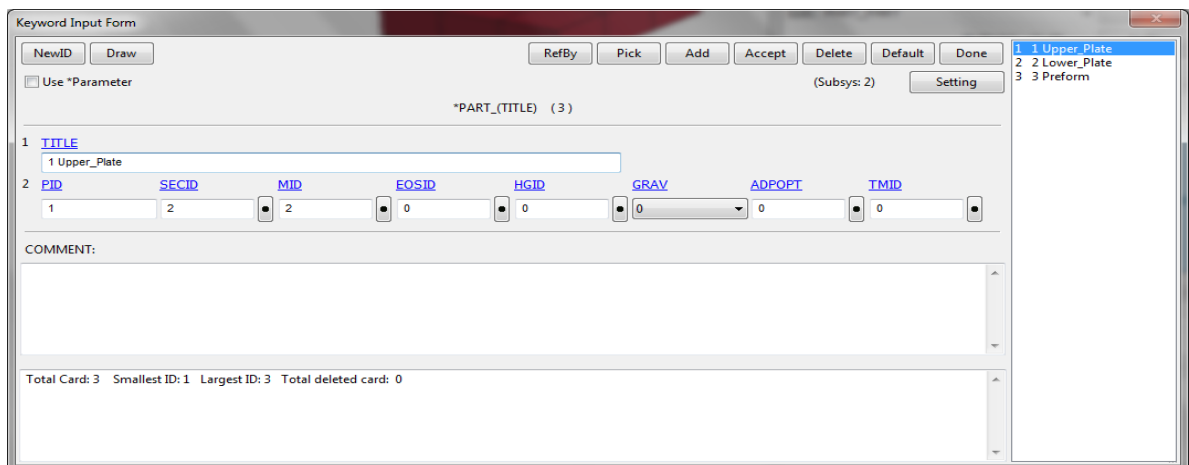
Σχήμα 4. 176 Παράθυρο ελέγχου του βήματος αποτελεσμάτων

4.5.1.12 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το τελευταίο βήμα είναι να ορίσουμε όλες τις παραμέτρους στα αρχικά μοντέλα που δημιουργήσαμε με την εντολή:

Keyword Manager → PART → PART

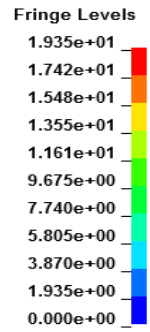
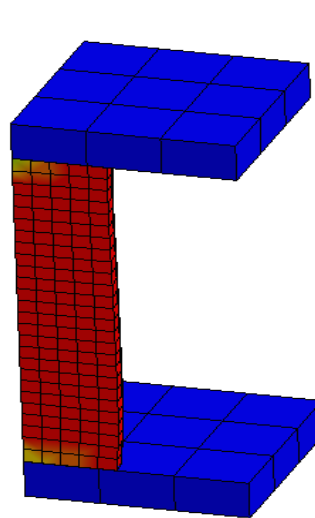
Αφού δώσουμε όνομα στο κομμάτι μας ορίζουμε τον τύπο του πλέγματος με την εντολή **SECID** και με την εντολή **MID** ορίζουμε το υλικό που έχουμε καταχωρήσει. Αυτό το επαναλαμβάνουμε για όλα τα κομμάτια του μοντέλου μας και στην διαδικασία της αναδημιουργίας του πλέγματος στο παραμορφώσιμο κομμάτι επιλέγουμε στην εντολή **ADPOPT** τον τύπο 3 που δηλώνει την τρισδιάστατη αναδημιουργία του πλέγματος. Για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για την δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.



Σχήμα 4.177 Καχώρηση κομματιών μοντέλου

4.5.1.13 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

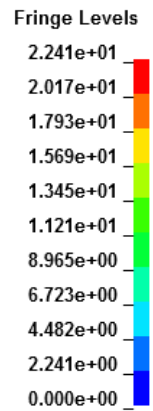
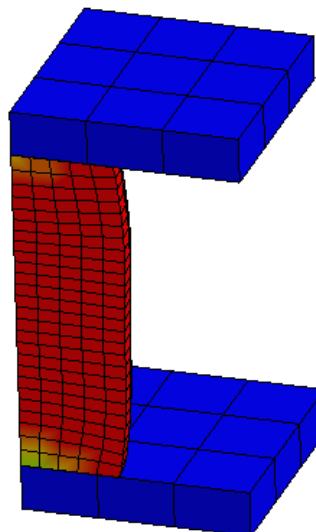
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 1.1983
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=19.3503, at elem# 284



4/22

Σχήμα 4.178 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 4 (512 στοιχεία) συμπίεσης

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 2.7983
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=22.4115, at elem# 298



8/22

Σχήμα 4.179 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 8 (512 στοιχεία) συμπίεσης

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 5.1999

Contours of Effective Stress (v-m)

min=0, at elem# 1

max=24.4701, at elem# 296

Fringe Levels

2.447e+01

2.202e+01

1.958e+01

1.713e+01

1.468e+01

1.224e+01

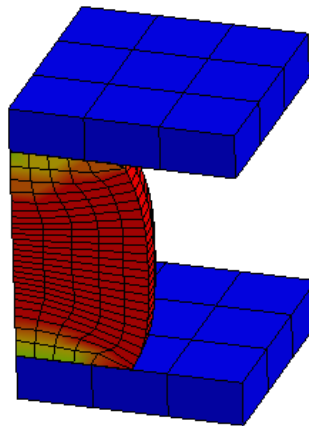
9.788e+00

7.341e+00

4.894e+00

2.447e+00

0.000e+00



14/22

Σχήμα 4.180 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 14 (512 στοιχεία) συμπίεσης

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 8.0003

Contours of Effective Stress (v-m)

min=0, at elem# 1

max=33.2808, at elem# 294

Fringe Levels

3.328e+01

2.995e+01

2.662e+01

2.330e+01

1.997e+01

1.664e+01

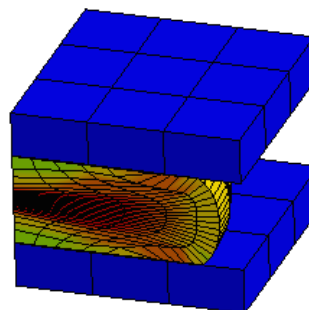
1.331e+01

9.984e+00

6.656e+00

3.328e+00

0.000e+00



22/22

Σχήμα 4.181 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 22 (512 στοιχεία) συμπίεσης

4.5.1.14 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

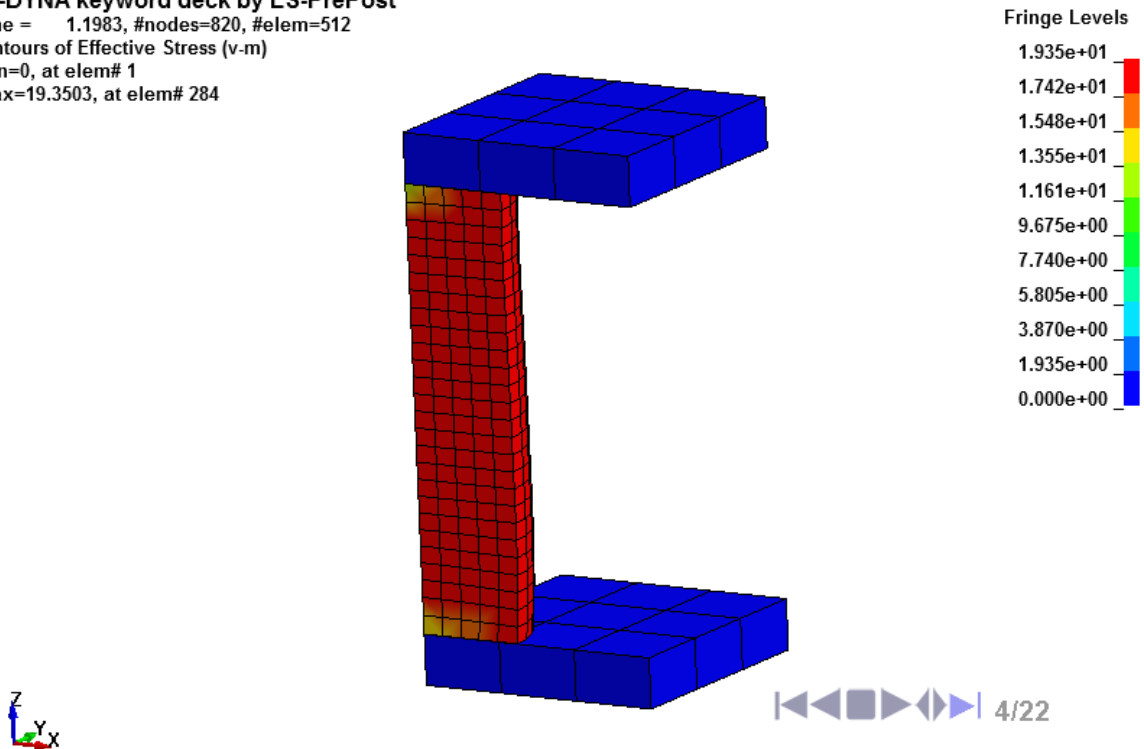
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 1.1983, #nodes=820, #elem=512

Contours of Effective Stress (v-m)

min=0, at elem# 1

max=19.3503, at elem# 284



Σχήμα 4.182 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 4 (512 στοιχεία) συμπίεσης

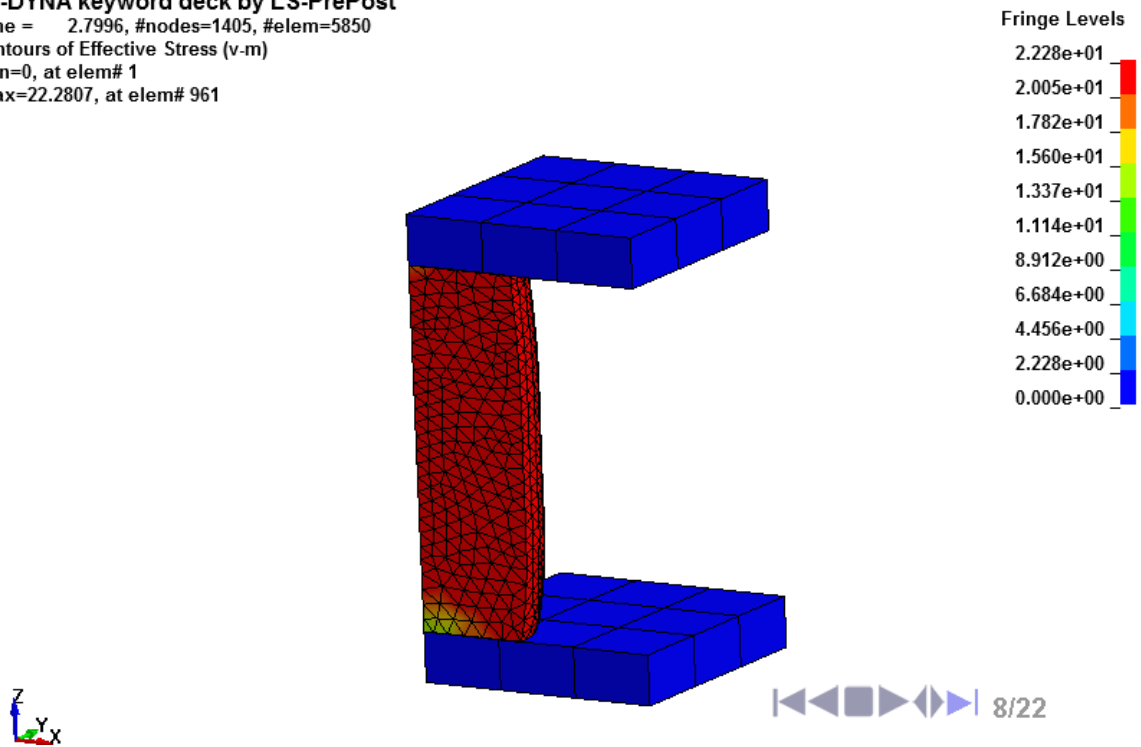
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 2.7996, #nodes=1405, #elem=5850

Contours of Effective Stress (v-m)

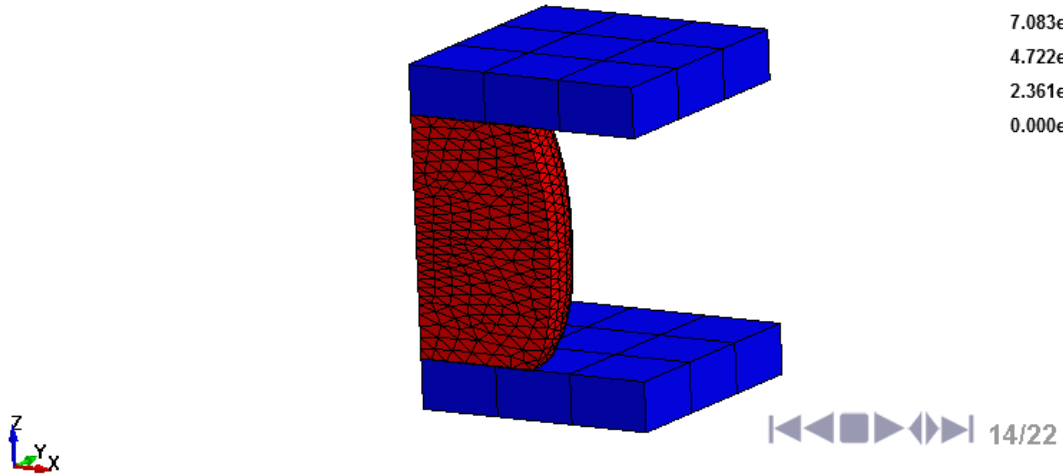
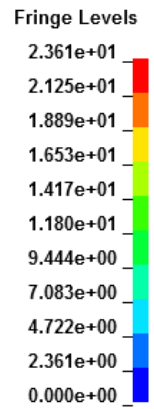
min=0, at elem# 1

max=22.2807, at elem# 961



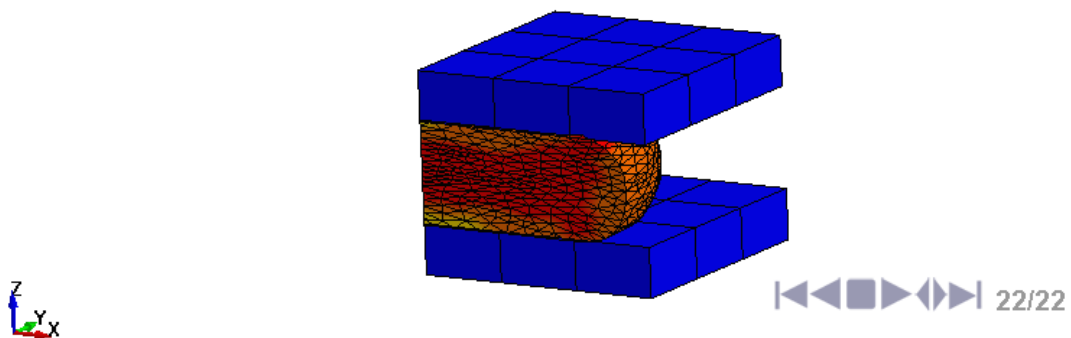
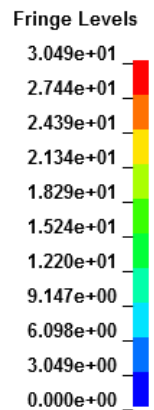
Σχήμα 4.183 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 8 (5850 στοιχεία) συμπίεσης

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 5.2, #nodes=1737, #elem=7772
 Contours of Effective Stress (v-m)
 min=0, at elem# 1
 max=23.6093, at elem# 4450



Σχήμα 4.184 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 14 (7772 στοιχεία) συμπίεσης

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 8, #nodes=2084, #elem=9856
 Contours of Effective Stress (v-m)
 min=0, at elem# 1
 max=30.4894, at elem# 5503



Σχήμα 4.185 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 22 (9856 στοιχεία) συμπίεσης

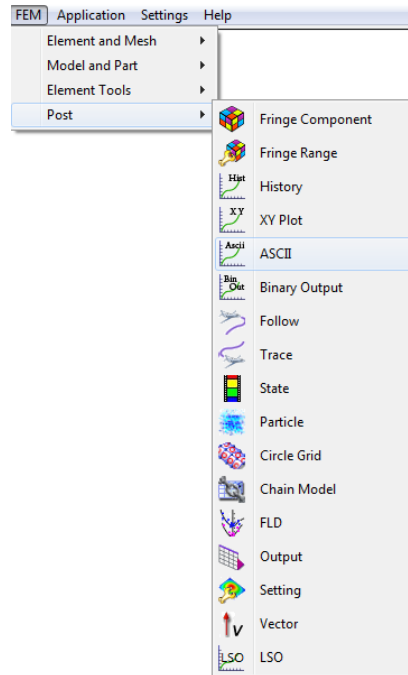
Η κατργασία τής συμπίεσης κατά τήν προσομοίωση με αναδημιουργία πλέγματος ξεκινάει με **820** κόμβους και **512** στοιχεία και καταλήγει με **2084** κόμβους και **9856** στοιχεία.

4.5.1.15 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

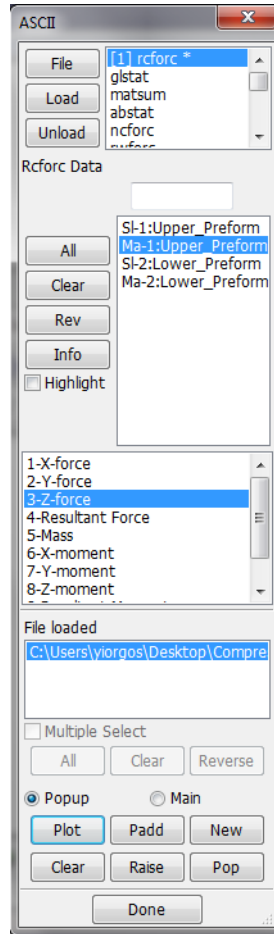
Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων με την παρακάτω εντολή μας παρουσιάζει το παράθυρο **ASCII**.

FEM → POST → ASCII

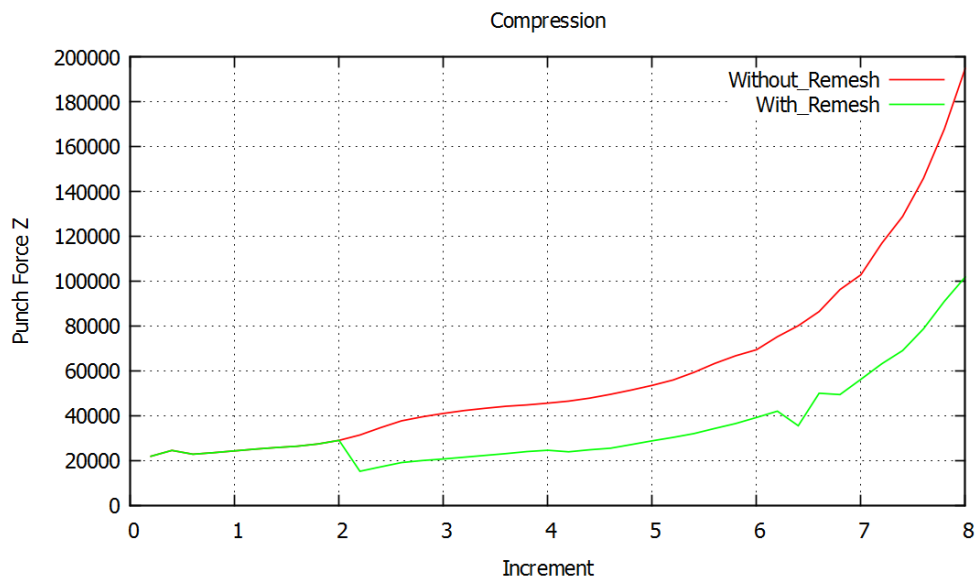
Στο παράθυρο **ASCII** επιλέγουμε την εντολή **rforc***, που επιλέξαμε κατά τον ορισμό της εμφάνισης των αποτελεσμάτων και επιλέγουμε **Load**, παρακάτω διαλέγουμε το σώμα που δέχεται την δύναμη δηλαδή την πάνω πλάκα **Ma-1:Upper_Perform** και τον άξονα που υπάρχει η δύναμη δηλαδή **3-Z-force** και στην συνέχεια **Plot** και εμφανίζεται το διάγραμμα μας. Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση με και χωρίς την αναδημιουργία του πλέγματος στην κατεργασία της συμπίεσης με το πρόγραμμα gnuplot Grapher.



Σχήμα 4.186 Επιλογή εμφάνισης αποτελεσμάτων



Σχήμα 4.187 Ορισμός αξόνων για την εμφάνιση τών αποτελεσμάτων



Σχήμα 4.188 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων συμπίεσης

4.5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA

4.5.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

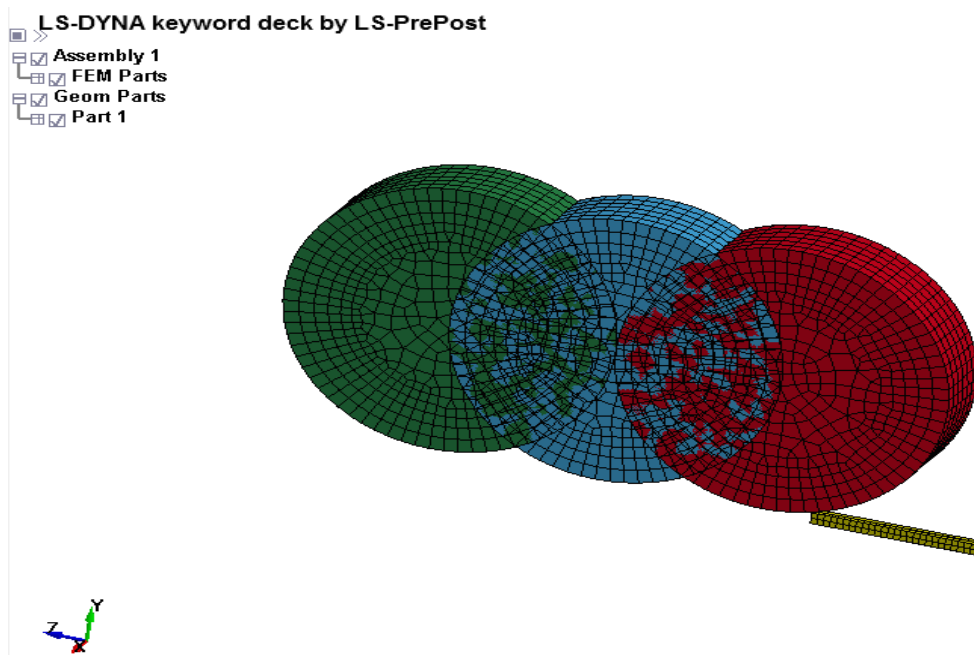
Για να εισάγουμε την γεωμετρία ακολουθούμε την διαδρομή:

File → Import → IGES

και εισάγουμε τα κομμάτια της συμμετρικής γεωμετρίας ένα-ένα. Εισάγουμε πρώτα το δοκίμιο και δημιουργούμε ένα πλέγμα Solid με την εντολή:

FEM → Element and Mesh → Solid Mesher

Και στο παράθυρο **Solid Meshing** ορίζουμε το μέγεθος των στοιχείων στην εντολή **Element Size** και στην συνέχεια επιλέγουμε **Try Meshing Automatically** και δημιουργεί αυτόματα το πλέγμα μας μορφής Solid με τετραγωνικά στοιχεία. Επιλέγουμε **Accept** και **Done**. Στην συνέχεια θα πρέπει να σβήσουμε την γεωμετρία και να εισάγουμε τα υπόλοιπα κομμάτια και να καταλήξουμε στην τελική συμμετρική γεωμετρία που σχεδιάσαμε όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.1**. Το πλέγμα τού δοκιμίου θα έχει διαφορετικό **Element Size** από αυτό των πλακών. Το **Element Size** για τα ράουλα θα είναι 8 και για το δοκίμιο 5.



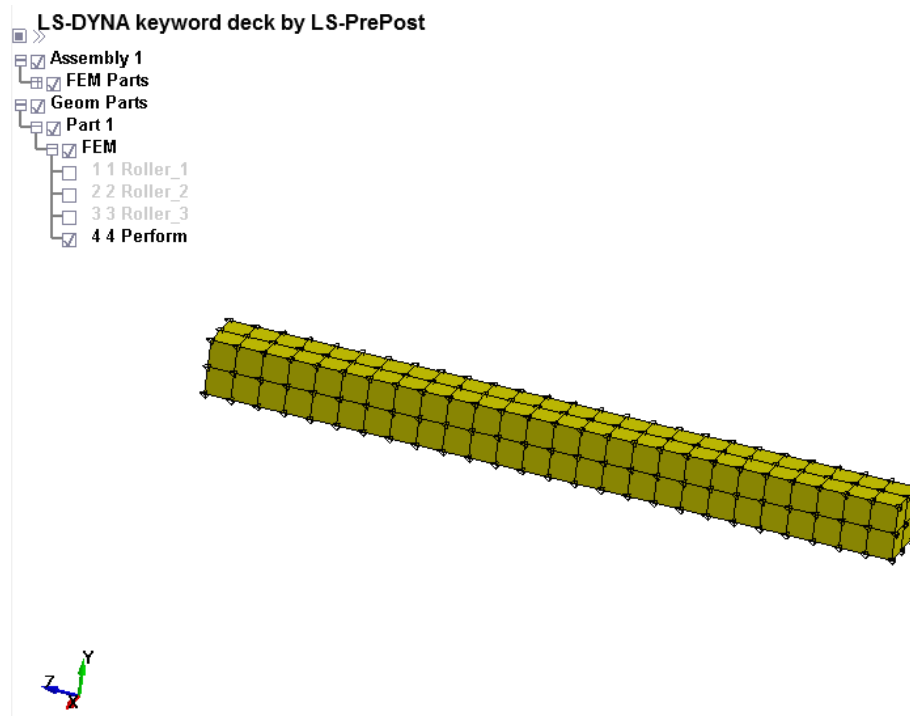
Σχήμα 4.189 Γεωμετρία επίπεδης έλασης με πλέγμα πεπερασμένων διαφορών

4.5.2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΚΑΙ ΚΟΜΒΩΝ

Για να ορίσουμε τούς κόμβους τού τεμαχίου μας ακολουθούμε τήν εντολή:

FEM → Model and Part → Create Entity → Set Data → *SET_NODE

Επιλέγουμε τήν εντολή **Cre** για να δημιουργήσουμε νέα εισαγωγή κόμβων. Επιλέγοντας τήν εντολή **Area** στο παράθυρο **Sel. Nodes** επιλέγουμε όλο το κομμάτι και πατάμε **Apply**.

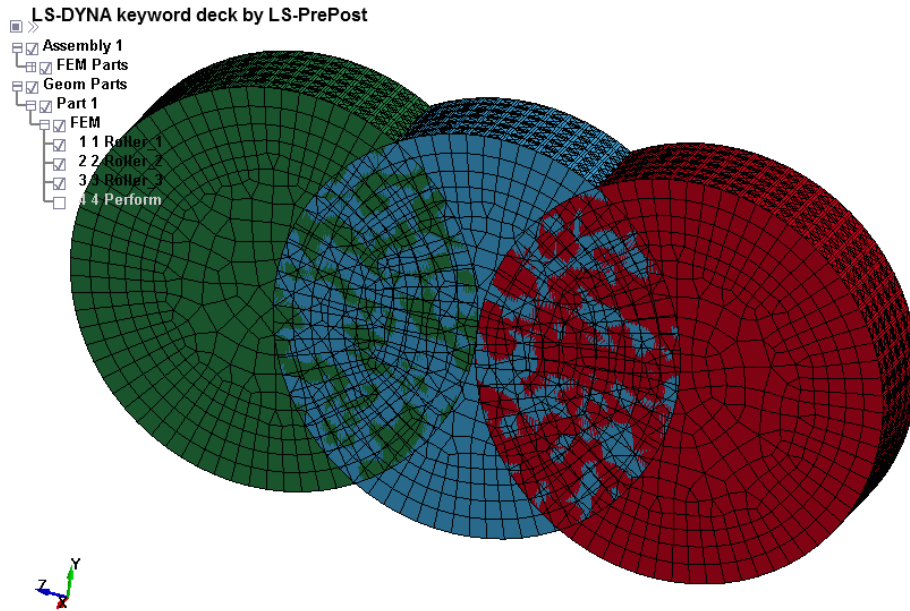


Σχήμα 4.190 Ορισμός κόμβων τεμαχίου

Για τήν καταχώρηση τών τεμαχίων ακολουθούμε:

Fem → Model and Part → Create Entity → Set Data → *SET_SEGMENT

Επιλέγουμε τήν εντολή **Cre** για να δημιουργήσουμε νέα εισαγωγή τεμαχίων. Επιλέγοντας τήν εντολή **Pick** στο παράθυρο **Sel. Nodes** επιλέγουμε τα στοιχεία που έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο μας και πατάμε **Apply** στην περίπτωση μας τίσ περιφερειακές επιφάνειες τών ραούλων.

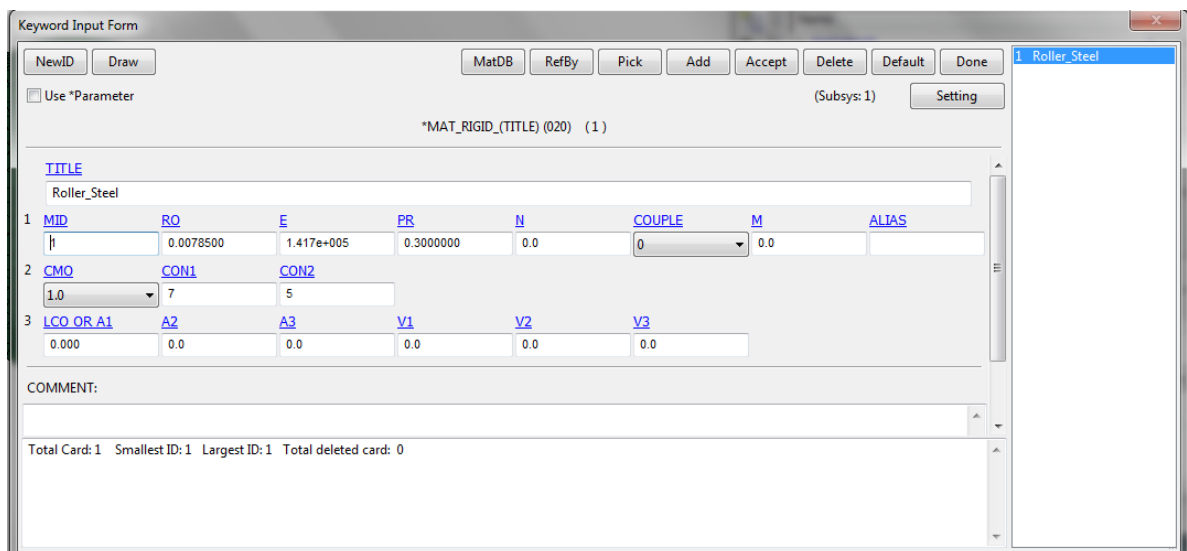


Σχήμα 4.191 Ορισμός τεμαχίων επαφής με τεμάχιο

4.5.2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Για τα απαραμόρφωτα στοιχεία, δηλαδή τα ράουλα, το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι ατσάλι και για το παραμορφώσιμο, το δοκίμιο, θα είναι μόλυβδος. Τα στοιχεία για τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε τα λάβαμε από τον διαδικτυακό τόπο www.matweb.com. Παρακάτω φαίνεται η εντολή για την εισαγωγή απαραμόρφωτων υλικών:

FEM → Model and Part → Keyword Manager → All → MAT → 020-RIGID



Σχήμα 4.192 Καταχώριση υλικού για απαραμόρφωτα σώματα

και ορίζουμε τα χαρακτηριστικά για το αστάλι. Στην καρτέλα που ορίζουμε το υλικό ορίζουμε και την κίνηση που θα έχουν τα ράουλα. Η εντολή που δηλώνει αν το απαραμόρφωτο υλικό θα είναι κινούμενο είναι η **CON1** με την οποία θα επιλεγθεί σε ποιούς άξονες θα είναι σταθερό το υλικό. Στην κατεργασία της επίπεδης έλασης τα ράουλα έχουν περιστροφική μετατόπιση και όχι αξονική οπότε η επιλογή μας θα είναι να παραμένουν σταθερά χωρίς καμία μετατόπιση και για τούς τρεις άξονες. Στην εντολή **CON2** επιλέγουμε τον άξονα περιστροφής τους που θα είναι ο x. Για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν.

Στην συνέχεια θα ορίσουμε το υλικό τού παραμορφώσιμου σώματος, του δοκιμίου, που θα είναι ο μόλυβδος με την ακόλουθη εντολή:

**FEM → Model and Part → Keyword Manager → All → MAT → 024-
PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY**

| *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1) | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| TITLE | | | | | | | | |
| Perform_Lead | | | | | | | | |
| 1 | MID | RO | E | PR | SIGY | ETAN | FAIL | TDEL |
| | 1 | 0.0113000 | 3620.7578 | 0.4300000 | 0.0 | 0.0 | 1.000e+021 | 0.0 |
| 2 | C | P | LCSS | LCSR | VP | | | |
| | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0.0 | | | |
| 3 | EPS1 | EPS2 | EPS3 | EPS4 | EPS5 | EPS6 | EPS7 | EPS8 |
| | 0.0 | 0.0108620 | 0.0708600 | 0.2642630 | 0.5893000 | 0.8433520 | 1.0229330 | 1.3152910 |
| 4 | ES1 | ES2 | ES3 | ES4 | ES5 | ES6 | ES7 | ES8 |
| | 8.2536840 | 11.600840 | 16.991930 | 22.005810 | 22.692480 | 23.274269 | 24.133671 | 26.185209 |

Total Card: 1 Smallest ID: 2 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Σχήμα 4.193 Καταχώριση υλικού για τεμάχιο

4.5.2.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΑΟΥΛΩΝ

Για την ταχύτητα των ραούλων από το παράθυρο ελέγχου Keyword Manager επιλέγουμε:

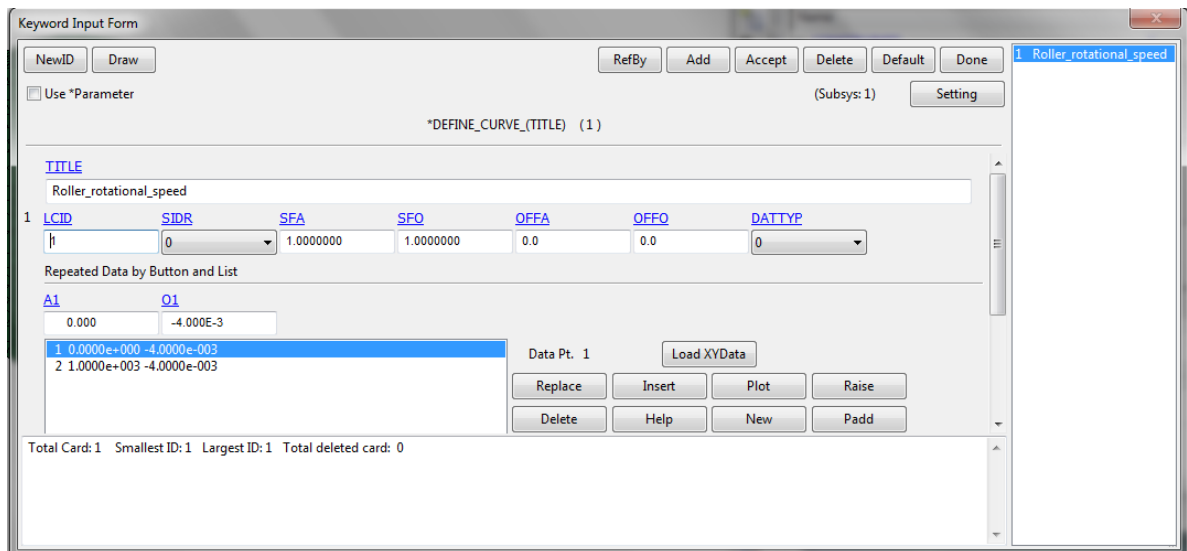
Keyword Manager → DEFINE → CURVE

Δίνουμε όνομα στην καμπύλη της ταχύτητας που θα δημιουργήσουμε και παρατηρούμε ότι υπάρχουν οι εντολές **A1** και **O1** που δηλώνουν τούς άξονες καρτεσιανού επιπέδου y, x αντίστοιχα. Στην **A1** επιλέγουμε την τιμή 0 και στην **O1** την ταχύτητα των ραούλων και την

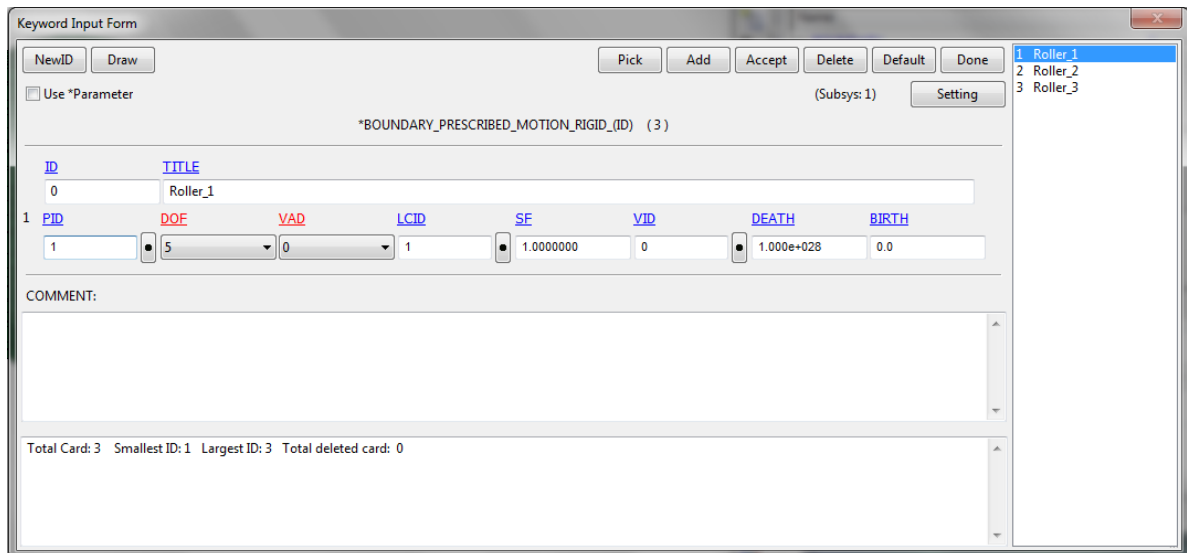
κατεύθυνση τήν δηλώνουμε με το πρόσημο βάζουμε τήν τιμή -0.667 και επιλέγουμε **Insert**, έπειτα επαναλαμβάνουμε και στην **A1** βάζουμε τήν τιμή 500 και επιλέγουμε **Insert** για τήν καταχώριση τών αλλαγών επιλέγουμε **Accept**. Δηλώσαμε ότι τήν ταχύτητα θα τήν έχει για τα 500 βήματα τής κατεργασίας. Στην συνέχεια θα πρέπει να δηλώσουμε ποιό απαραμόρφωτο σώμα κάνει τήν κίνηση σε ποιόν άξονα αλλά και τι είδους κίνηση κάνει. Αυτό επιτυγχάνεται με τήν εντολή:

Keyword Manager → BOUNDARY → PRESCRIBED_MOTION_RIGID

Στην πρώτη επιλογή **PID** ορίζουμε το κομμάτι που θα κάνει τήν κίνηση, στην δεύτερη επιλογή **DOF** επιλέγουμε τόν άξονα που θα κάνει τήν περιστροφή το απαραμόρφωτο σώμα μας και τέλος στην επιλογή **LCID** καταχωρούμε τήν καμπύλη που δημιουργήσαμε παραπάνω. Και για τα τρία ράουλα η κίνηση και ο άξονας περιστροφής είναι ίδιος. . Για τήν καταχώριση τών αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για τήν δημιουργία νέας καταχώρισης Επιλέγουμε **ADD**.



Σχήμα 4.194 Δημιουργία καμπύλης ταχύτητας



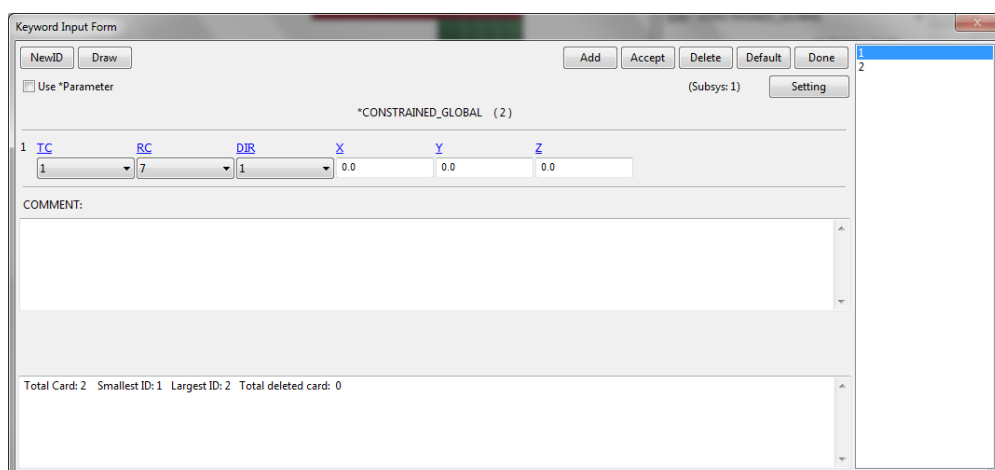
Σχήμα 4.195 Ορισμός σωμάτων που κάνουν τήν κίνηση

4.5.2.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ

Ο προσδιορίσει τήν συμμετρία γίνεται με τήν εντολή:

Keyword Manager → CONSTRAINED → GLOBAL

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 υπάρχουν οι επιλογές **T1**, **RC** και **DIR** που δηλώνουν τόν αξονικό περιορισμό, τον περιστροφικό περιορισμό και τήν κατεύθυνση τής συμμετρίας αντίστοιχα. Στή συγκεκριμένη κατεργασία θα έχουμε δύο συμμετρικής επιφάνειες κατά τούς άξονες x και y. Για τήν καταχώριση τών αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για τήν δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.



Σχήμα 4. 196 Ορισμός συμμετρίας

4.5.2.6 ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΗ ΕΠΑΦΩΝ

Η εντολή για την καταχώρηση των επαφών είναι :

Keyword Manager → CONTACT → NODES_TO_SURFACE

Σε αυτό το σημείο δηλώνουμε ποιιά σώματα έρχονται σε επαφή αλλά και τόν συντελεστή τριβής τους. Στην εντολή **SSTYP** δηλώνουμε με ποιό τύπο θα καταχωρήσουμε το κομμάτι που θα δεχθεί την παραμόρφωση, επιλέγουμε να το καταχωρήσουμε βάση της λίστας των κόμβων που έχουμε, και με τόν ίδιο τρόπο θα δηλώσουμε και τον τύπο τού απααραμόρφωτου σώματος στην εντολή **MSTYP** και θα επιλέξουμε να καταχωρήσουμε με τα τεμάχια (segment ID) που έχουμε καταχωρήσει. Στην εντολή **SSID** καταχωρούμε την λίστα των κόμβων, το δοκίμιό μας, και στο **MSID** καταχωρούμε την πλάκα που έρχεται σε επαφή. Στις εντολές **FS** και **FD** ορίζουμε την δυναμική και την στατική τραχύτητα της επαφής η οποία θα είναι 0.4. Ακλουθώ την διαδικασία και για τα τρία ράουλα. Για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για την δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.

| CID | TITLE |
|-----|----------------|
| 1 | Billet_Roller1 |

| IGNORE | BUCKET | LCBUCKET | NS2TRACK | INITITER | PARMAX | UNUSED | CPARMB |
|--------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|
| 0 | 200 | | 3 | 2 | 1.0005 | | 0 |

| UNUSED | CHKSEGS | PENSE | GRPABLE |
|--------|---------|-------|---------|
| 0 | | 1.0 | 0 |

| SSID | MSID | SSTYP | MSTYP | SBOXID | MBOXID | SPR | MPR |
|------|------|-------|-------|--------|--------|-----|-----|
| 1 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| FS | FD | DC | VC | VDC | PENCHK | BT | DT |
|-----------|-----------|-----|-----|-----|--------|-----|------------|
| 0.4000000 | 0.4000000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | n | 0.0 | 1.000e+020 |

Total Card: 3 Smallest ID: 1 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

- (0) Billet_Roller1
- (5) Billet_Roller2
- (6) Billet_Roller3

Σχήμα 4.197 Ορισμός επαφών και συντελεστών τριβής

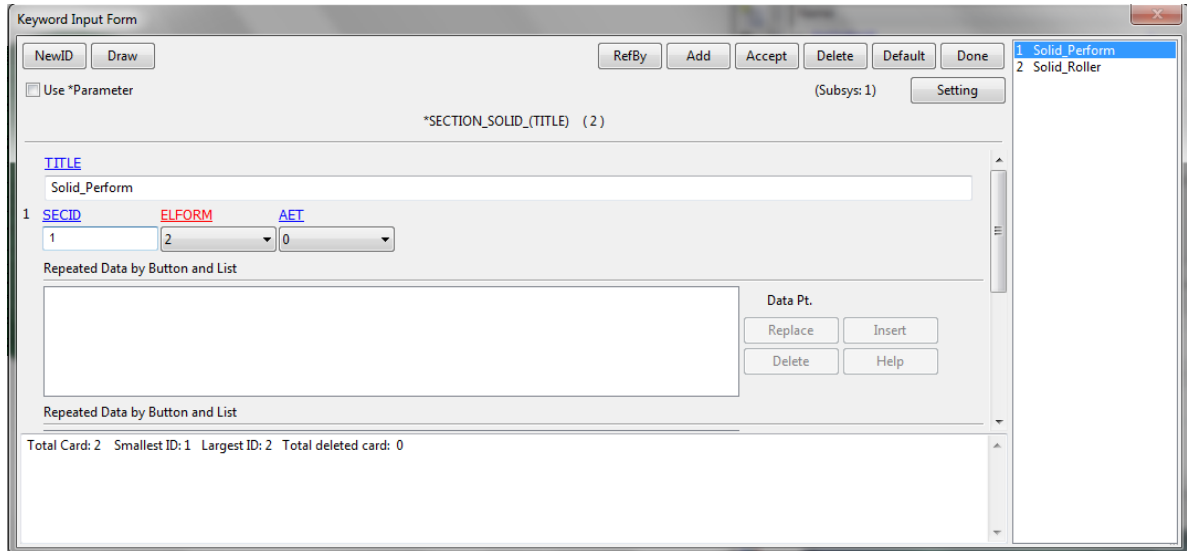
4.5.2.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Αφού όλες οι γεωμετρίες που εισήχθησαν μετατράπηκαν σε πλέγμα πεπερασμένων διαφορών τύπου Solid η εντολή που θα επιλέξουμε θα είναι:

Keyword Manager → SECTION → SOLID

Θα καταχωρηθούν δύο επιλογές μία για τα απααραμόρφωτα στοιχεία και μία για τα παραμορφώσιμα αφού γράψουμε το όνομα της καταχώρισης μας στην εντολή επιλέγουμε τόν

τύπο 1 που είναι και η προεπιλεγμένη επιλογή για τα στοιχεία τού πλέγματος που απαρτίζουν τα απαραμόρφωτα υλικά και τόν τύπο 2 για τα στοιχεία του παραμορφώσιμου σώματος. Στήν διαδικασία τής αναδημιουργίας τού πλέγματος θα επιλέξουμε στοιχεία τύπου 13. Για τήν καταχώριση τών αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για τήν δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.

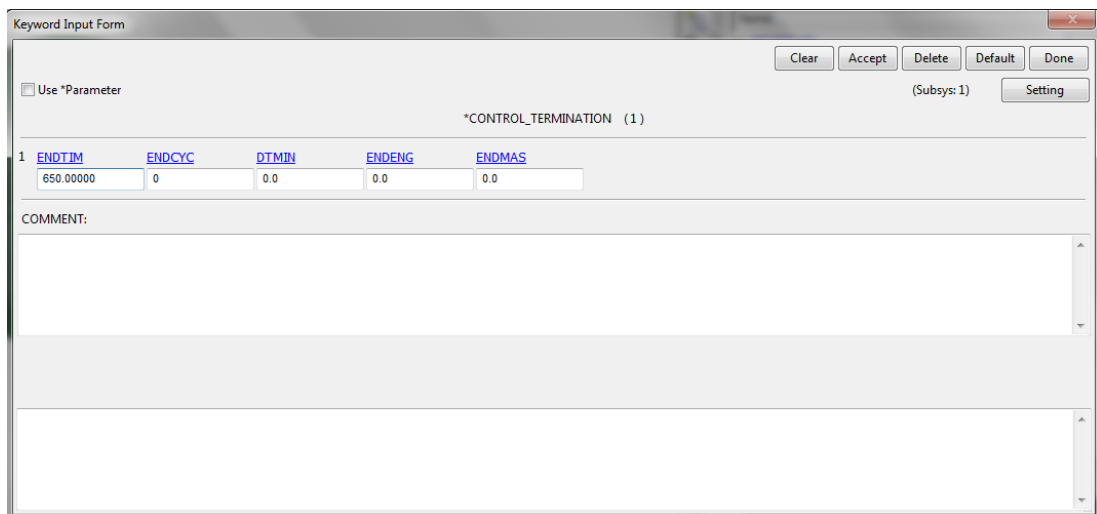


Σχήμα 4.198 Ορισμός στοιχείων

4.5.2.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΛΗΞΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με τήν παρακάτω εντολή ορίζουμε τόν χρόνο που θα διαρκέσει η προσομοίωση. Η προσομοίωση τής συμπίεσης θα διαρκέσει 650.

Keyword Manager → CONTROL → TERMINATION



Σχήμα 4.199 Ορισμός χρονικής λήξης

4.5.2.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Για τόν έλεγχο τών κριτηρίων τής αναδημιουργίας του πλέγματος ακολουθούμε τήν εντολή:

Keyword Manager → CONTROL → ADAPTIVE

| 1 | ADPFREQ | ADPTOL | ADPOPT | MAXLVL | TBIRTH | TDEATH | LCADP | IOFLAG |
|---|-----------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|--------|
| | 5.0000000 | 1.000e+020 | 7 | 3 | 0.0 | 1.000e+020 | 0 | 0 |
| 2 | ADPSIZE | ADPASS | IREFLG | ADPENE | ADPTH | MEMORY | ORIENT | MAXEL |
| | 0.0 | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | LADPN90 | LADPGH | NCFRED | LADPCL | ADPCTL | CBIRTH | CDEATH | LCLVL |
| | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.0 | 0.0 | 1.000e+020 | 0 |
| 4 | CNLA | | | | | | | |
| | 0 | | | | | | | |

COMMENT:

Σχήμα 4. 200 Παράθυρο κριτηρίων αναδημιουργίας πλέγματος

Και εμφανίζει το παράθυρο ελέγχου τών κριτηρίων στο οποίο θα ορίσουμε τήν συχνότητα που θα γίνεται η αναδημιουργία στην εντολή **ADPFREQ** με βήμα 5 και στην εντολή **ADPOPT** θα επιλέξουμε 7 η οποία μας επιτρέπει τήν τρισδιάστατη εφαρμογή τής αναδημιουργίας τού πλέγματος σε στοιχεία τύπου Solid. Για τον έλεγχο τών παραμέτρων επιλέγουμε:

Keyword Manager → CONTROL → REMESHING

Στο παράθυρο που θα εμφανιστεί θα ορίσουμε το ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος τών στοιχείων με τίσ εντολές **RMIN** και **RMAX** με τίσ τιμές 2 και 5 αντίστοιχα.

Keyword Input Form

Use *Parameter (Subsys: 1) Clear Accept Delete Default Done Setting

*CONTROL_REMESHING (1)

| | RMIN | RMAX | VF_LOSS | MFRAC | DT_MIN | ICURV | IADP10 | SEFANG |
|---|-----------|-----------|-----------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 2.0000000 | 5.0000000 | 1.0000000 | 0.0 | 0.0 | 4 | 0 | 0.0 |

COMMENT:

Σχήμα 4.201 Παράθυρο κριτηρίων αναδημιουργίας πλέγματος

4.5.2.10 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το βήμα θα ορίσουμε τί αποτελέσματα θέλουμε να εμφανιστούν αλλά και το βήμα των σημείων που θα εμφανιστούν στο διάγραμμά μας ακολουθώντας την εντολή:

Keyword Manager → DATABASE → ASCII_OPTION

Και επιλέγουμε την δύναμη του εμβόλου κατά τον άξονα z, **RCFORC**, με βήμα 0,2 στην εντολή DT και στην εντολή BINARY επιλέγουμε τον αριθμό 1.

Keyword Input Form

Use *Parameter (Subsys: 2) Accept Done Setting

*DATABASE_OPTION (1)

| | DT | BINARY | LCUR | IOOPT |
|--|-----|--------|------|-------|
| <input type="checkbox"/> PLLYOUT | 0.0 | 0 | 0 | 1 |
| <input type="checkbox"/> RBDOUT | 0.0 | 0 | 0 | 1 |
| <input checked="" type="checkbox"/> RCFORC | 0.2 | 1 | 0 | 1 |
| <input type="checkbox"/> RWFORC | 0.0 | 0 | 0 | 1 |
| <input type="checkbox"/> SBTOUT | | | | |

BINARY:=Flag for binary file
 EQ.1: ASCII file is written. This is the default on serial and shared memory computers.
 EQ.2:Data written to a binary database, which contains data that would otherwise be output to the ASCII file. The ASCII file in this case is not created. This is the default on distributed memory computers.
 EQ.3: ASCII file is written and the data is also written to the binary database.

Σχήμα 4. 202 Παράθυρο ελέγχου του βήματος αποτελεσμάτων

4.5.2.11 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το τελευταίο βήμα είναι να ορίσουμε όλες τις παραμέτρους στα αρχικά μοντέλα που δημιουργήσαμε με την εντολή:

Keyword Manager → PART → PART

Αφού δώσουμε όνομα στο κομμάτι μας ορίζουμε τον τύπο του πλέγματος με την εντολή **SECID** και με την εντολή **MID** ορίζουμε το υλικό που έχουμε καταχωρήσει. Αυτό το επαναλαμβάνουμε για όλα τα κομμάτια του μοντέλου μας και στην διαδικασία της αναδημιουργίας του πλέγματος στο παραμορφώσιμο κομμάτι επιλέγουμε στην εντολή **ADPOPT** τον τύπο 3 που δηλώνει την τρισδιάστατη αναδημιουργία του πλέγματος. Για την καταχώρηση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για την δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.

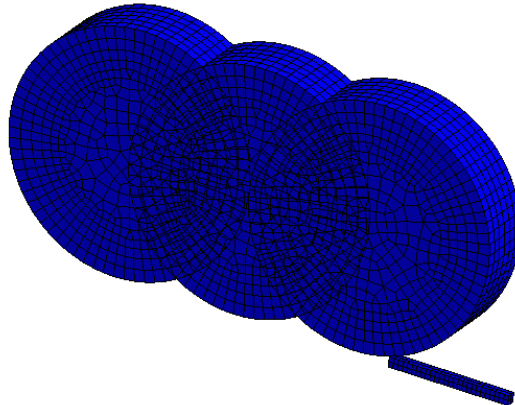
| TITLE | PID | SECID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|------------|-----|-------|-----|-------|------|------|--------|------|
| 1 Roller_1 | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Σχήμα 4.203 Ορισμός κομματιών του μοντέλου

4.5.2.12 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0, #nodes=12082, #elem=9722
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=0, at elem# 1

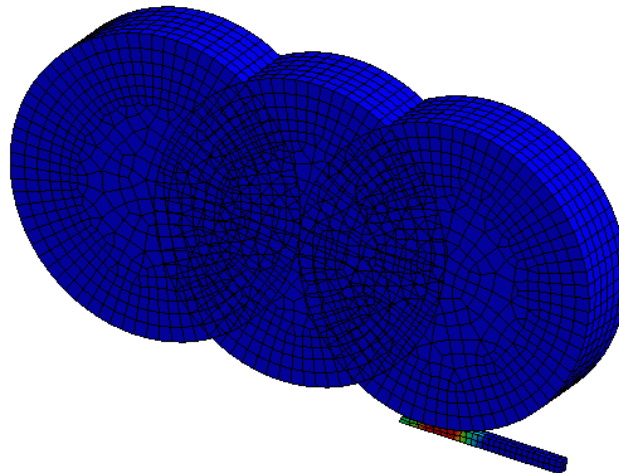
Fringe Levels
0.000e+00
0.000e+00
0.000e+00
0.000e+00
0.000e+00
0.000e+00
0.000e+00
0.000e+00
0.000e+00
0.000e+00
0.000e+00



Σχήμα 4.204 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επίπεδη έλαση (243 στοιχεία)

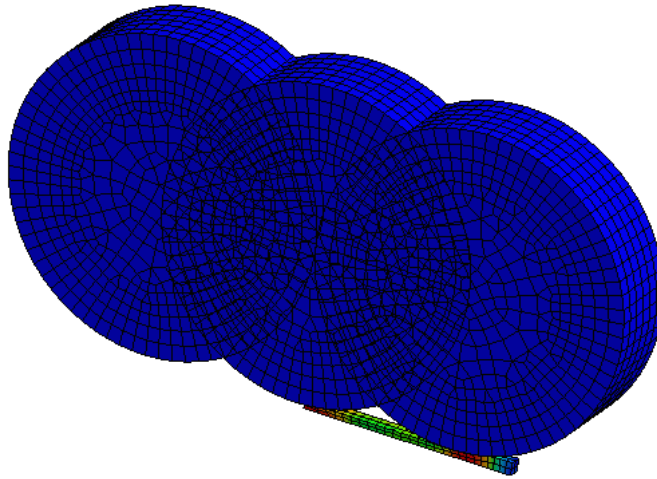
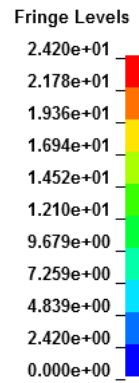
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 112.5, #nodes=12082, #elem=9722
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=22.7492, at elem# 9648

Fringe Levels
2.275e+01
2.047e+01
1.820e+01
1.592e+01
1.365e+01
1.137e+01
9.100e+00
6.825e+00
4.550e+00
2.275e+00
0.000e+00



Σχήμα 4. 205 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 4 (243 στοιχεία)

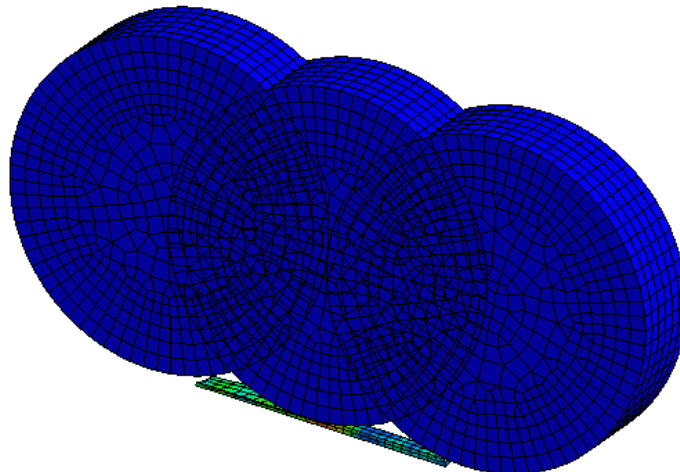
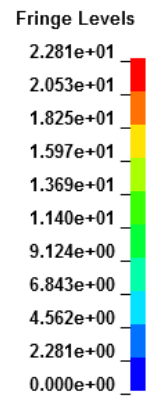
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 300, #nodes=12082, #elem=9722
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=24.1963, at elem# 9646



Navigation icons and page number 9/17

Σχήμα 4. 206 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 9 (243 στοιχεία)

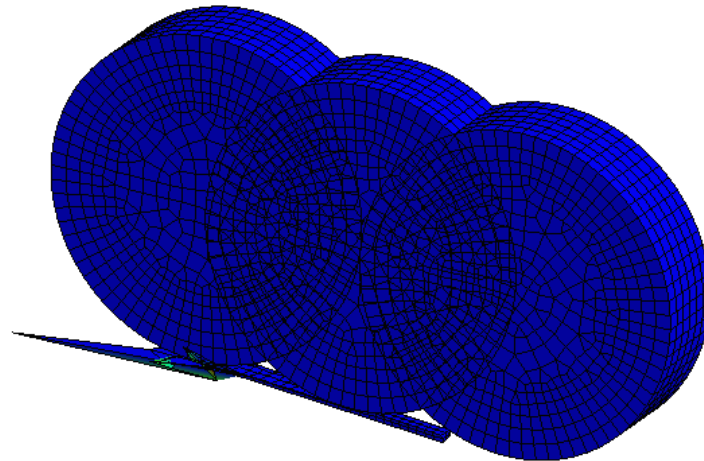
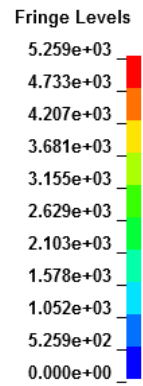
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 487.5, #nodes=12082, #elem=9722
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=22.8099, at elem# 9682



Navigation icons and page number 14/17

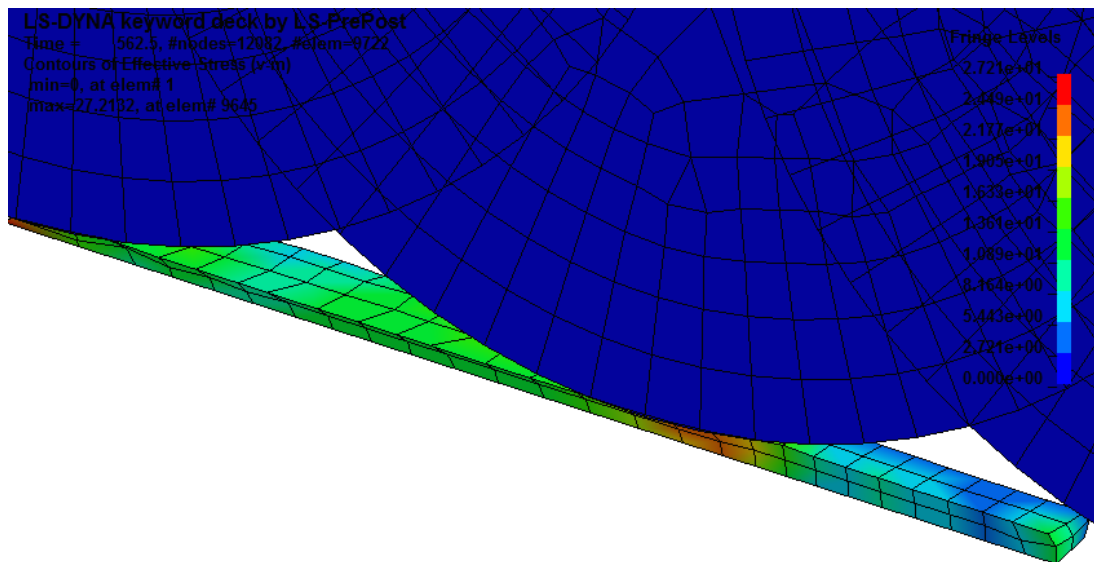
Σχήμα 4. 207 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 14 (243 στοιχεία)

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 565.58, #nodes=12082, #elem=9722
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=5258.71, at elem# 9645

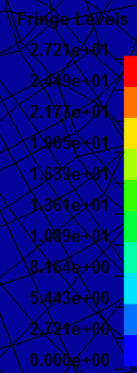


Navigation icons: back, forward, search, and page number 17/17.

Σχήμα 4. 208 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 17 (243 στοιχεία)



LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 562.5, #nodes=12082, #elem=9722
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=27.2132, at elem# 9645

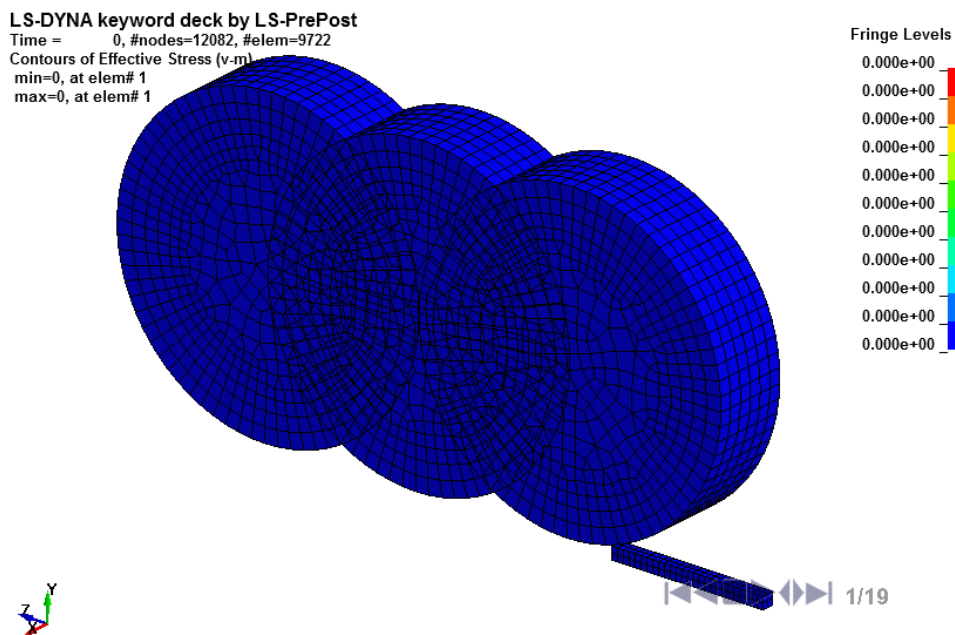


Navigation icons: back, forward, search, and page number 16/17.

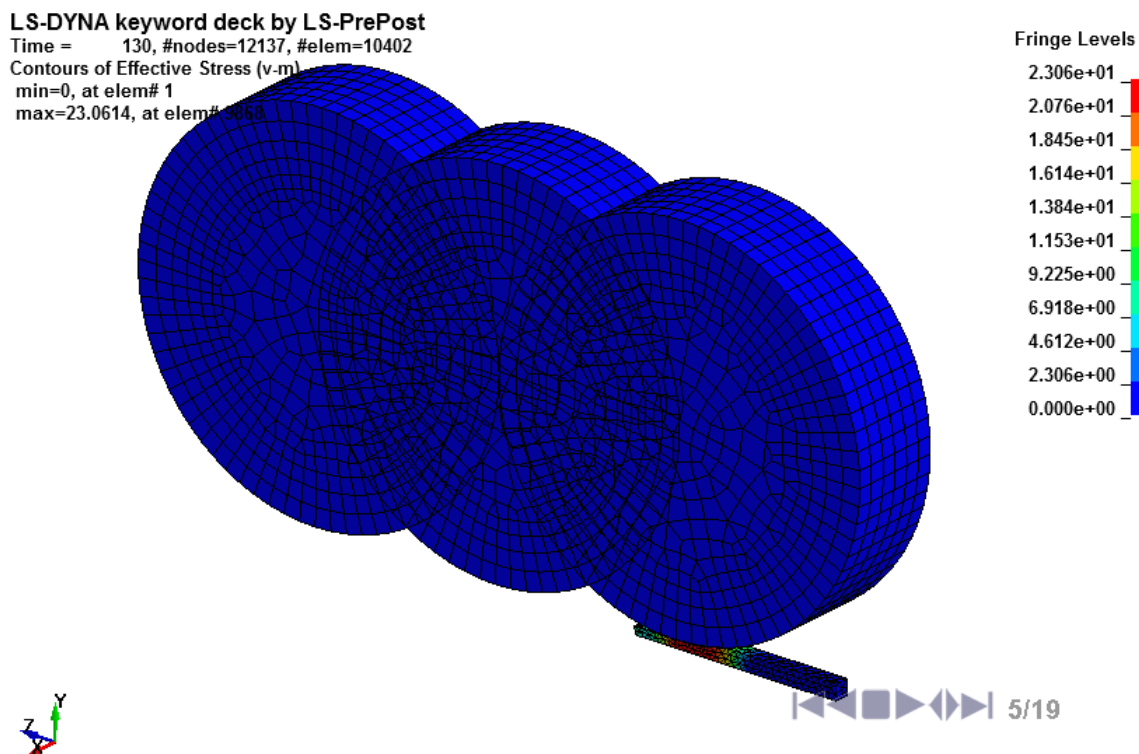
Σχήμα 4. 209 Παραμορφωμένο πλέγμα επίπεδης έλασης επανάληψη 16

Όπως βλέπουμε στο **Σχήμα 4.208** η αλλοίωση τού πλέγματος είναι αρκετά μεγάλη μετά το δεύτερο ράουλο και για τον λόγο αυτό σταμάτησε η επίλυση.

4.5.2.13 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

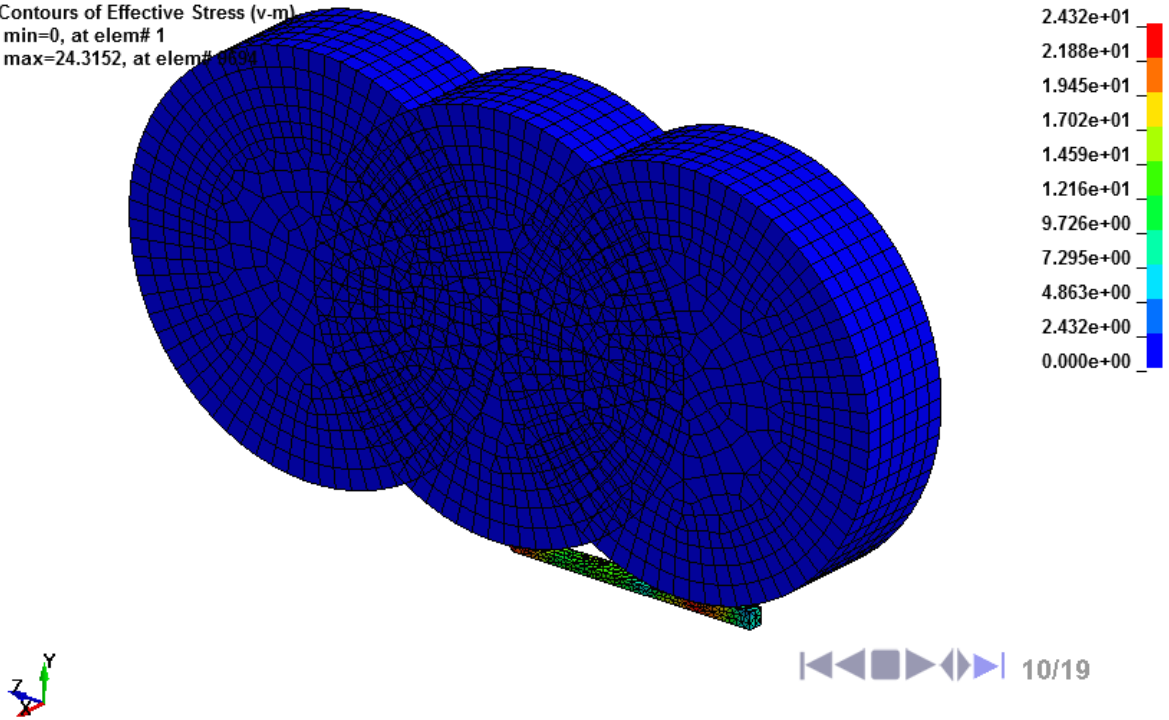


Σχήμα 4. 210 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (168 στοιχεία)



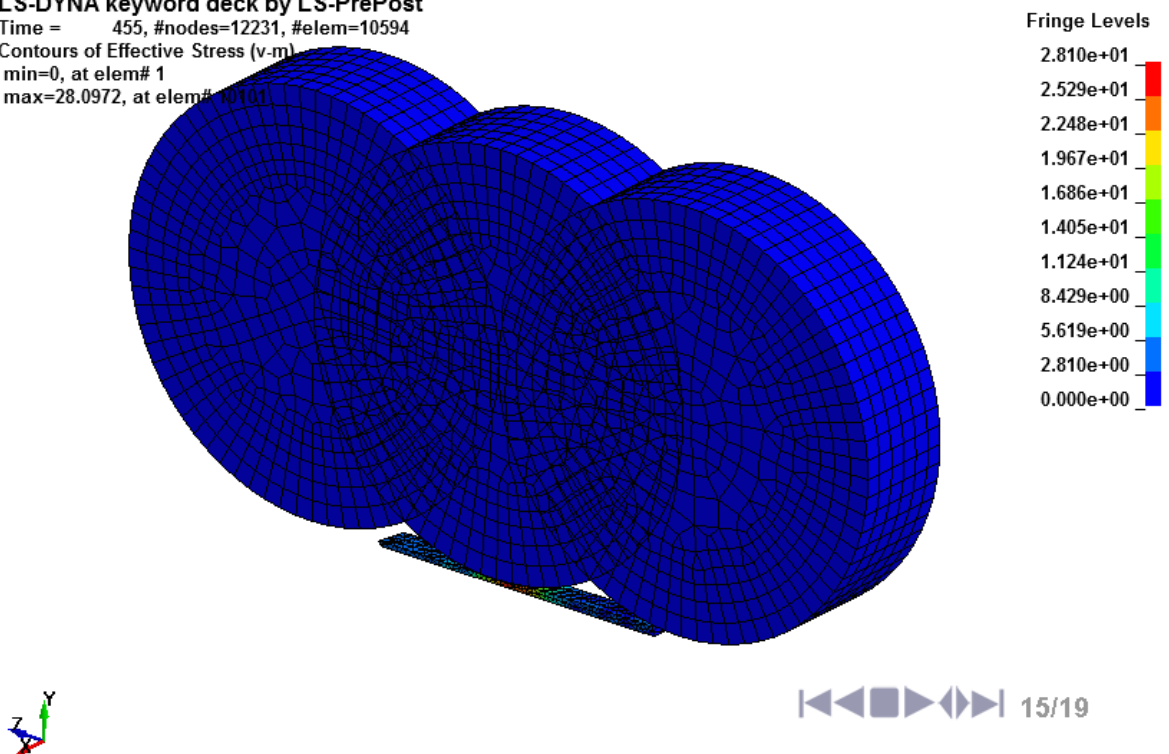
Σχήμα 4. 211 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 5 (848 στοιχεία)

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 292.5, #nodes=12165, #elem=10475
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=24.3152, at elem# 6694



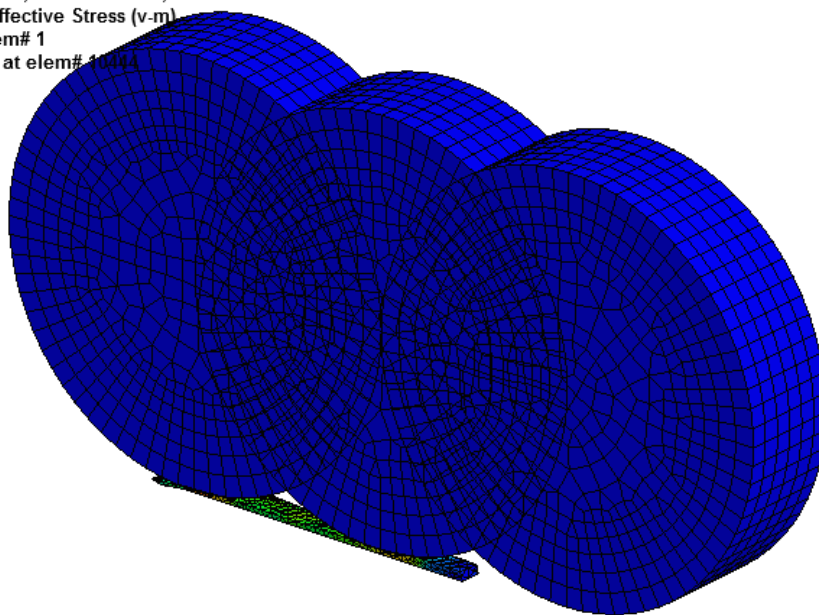
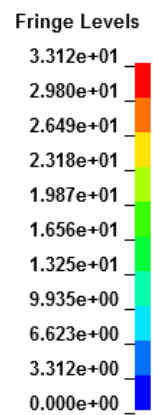
Σχήμα 4. 212 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 10 (921 στοιχεία)

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 455, #nodes=12231, #elem=10594
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=28.0972, at elem# 10101



Σχήμα 4. 213 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 15 (1040 στοιχεία)

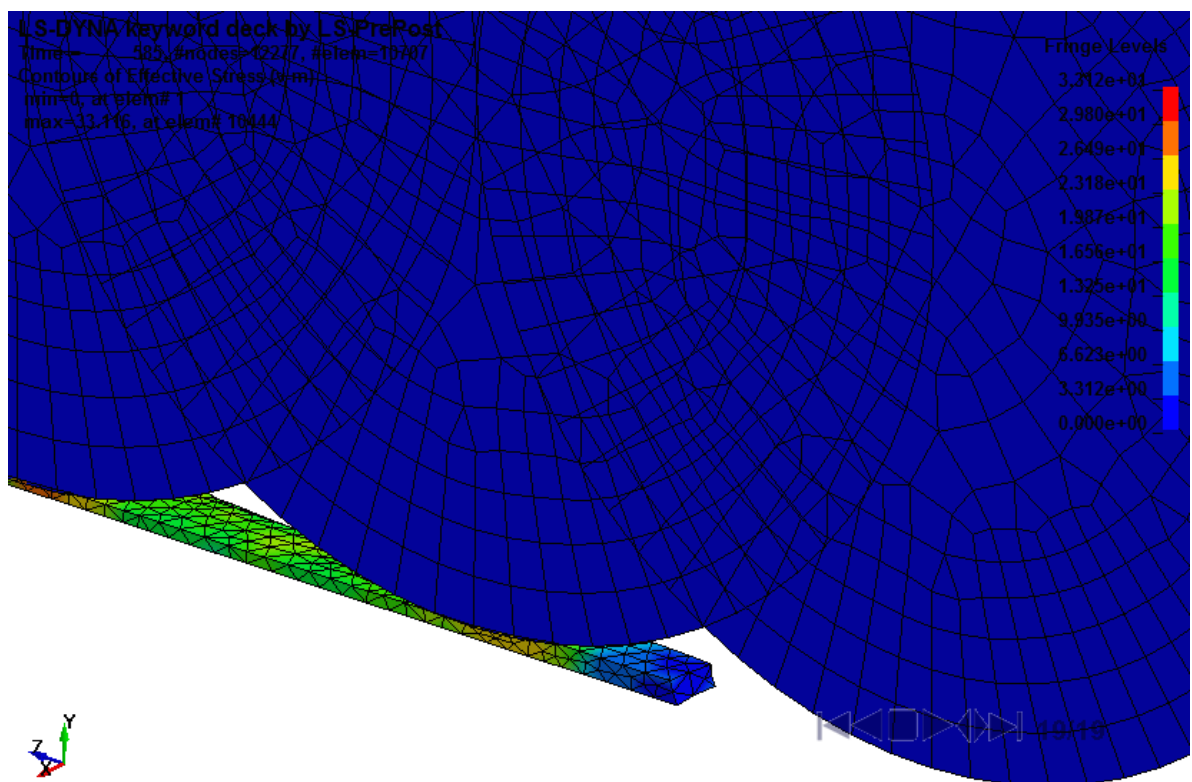
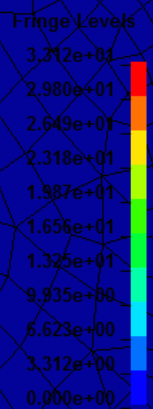
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 585, #nodes=12277, #elem=10707
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=33.116, at elem# 10444



19/19

Σχήμα 4. 214 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 19 (1153 στοιχεία)

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 585, #nodes=12277, #elem=10707
Contours of Effective Stress (v-m)
min=0, at elem# 1
max=33.116, at elem# 10444



19/19

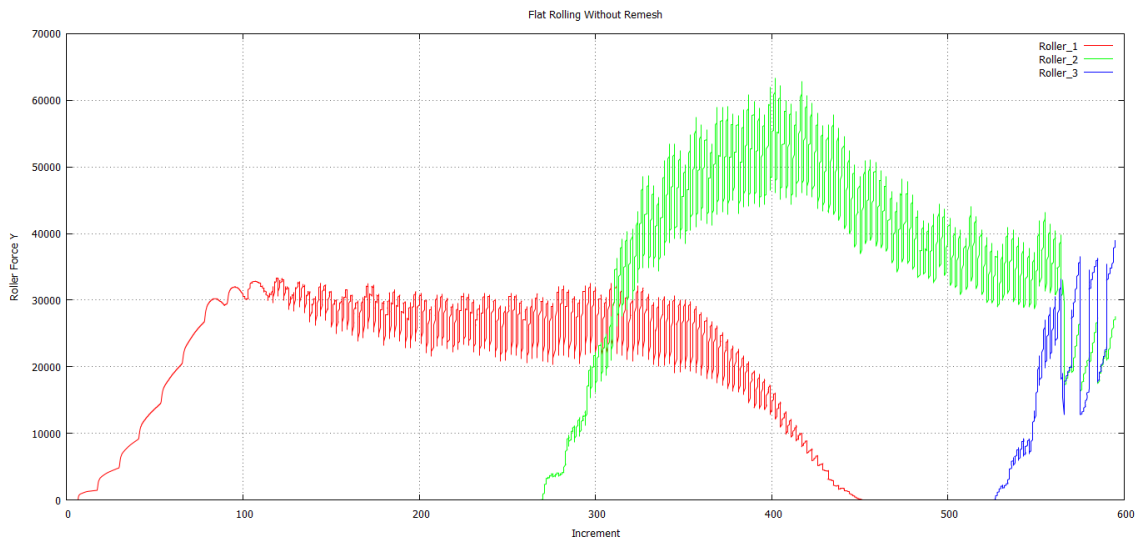
Σχήμα 4. 215 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 19

4.5.2.14 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

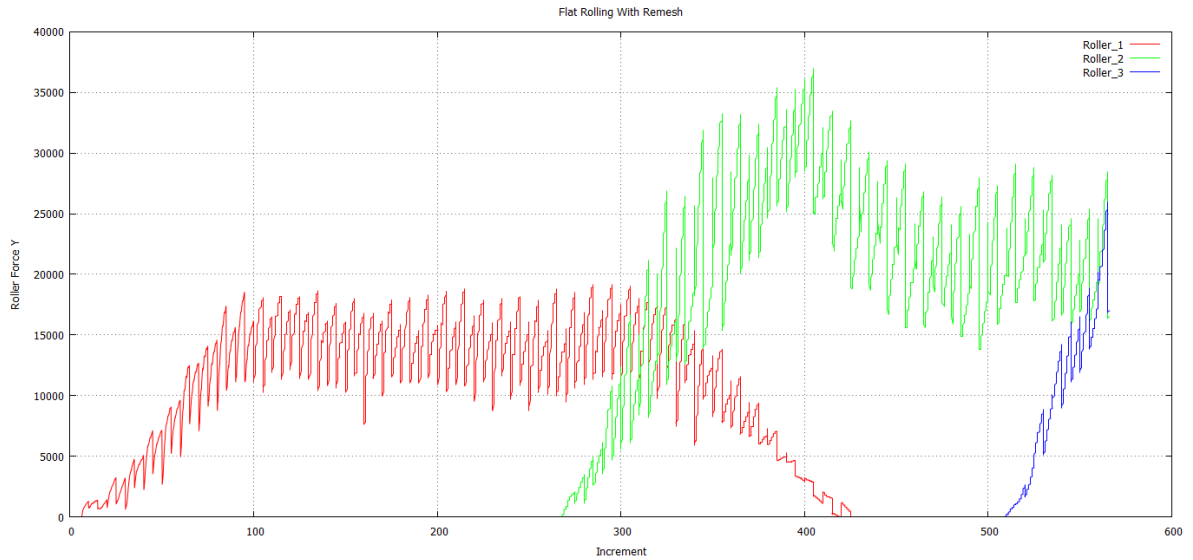
Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων με την παρακάτω εντολή μας παρουσιάζει το παράθυρο **ASCII**.

FEM → POST → ASCII

Στο παράθυρο **ASCII** επιλέγουμε την εντολή **rcforc*** και επιλέγουμε **Load**, παρακάτω διαλέγουμε το σώμα που ασκεί την δύναμη δηλαδή την πάνω πλάκα **Ma-1:Upper_Perform** και τον άξονα που υπάρχει η δύναμη δηλαδή **3-Z-force** και στην συνέχεια **Plot** και εμφανίζεται το διάγραμμά μας. Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση με και χωρίς την αναδημιουργία του πλέγματος στην κατεργασία της συμπίεσης με το πρόγραμμα gnuplot Grapher.



Σχήμα 4.216 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων χωρίς αναδημιουργία



Σχήμα 4.217 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων με αναδημιουργία

4.5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΕΛΑΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LS-DYNA

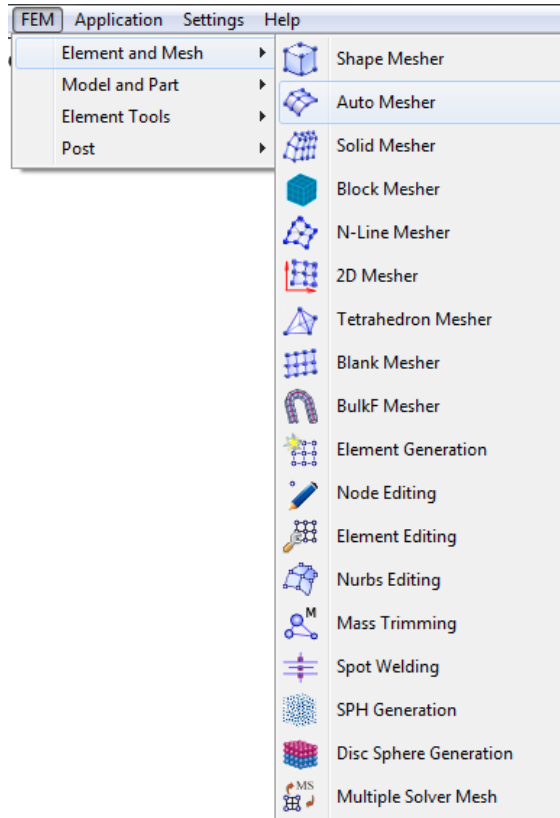
4.5.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για να εισάγουμε την γεωμετρία ακολουθούμε την διαδρομή:

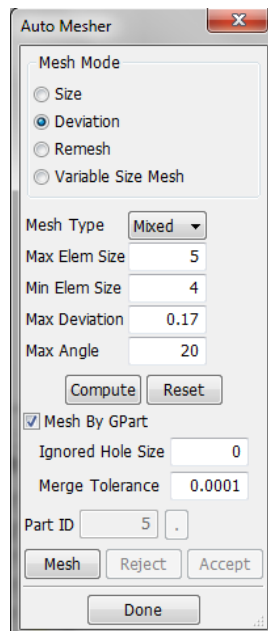
File → Import → IGES

και εισάγουμε τα κομμάτια της συμμετρικής γεωμετρίας. Εισάγουμε πρώτα το καλούπι και δημιουργούμε ένα πλέγμα τύπου Shell με την εντολή:

FEM → Element and Mesh → Auto Mesher



Σχήμα 4.218 Επιλογή δημιουργίας πλέγματος τύπου Shell



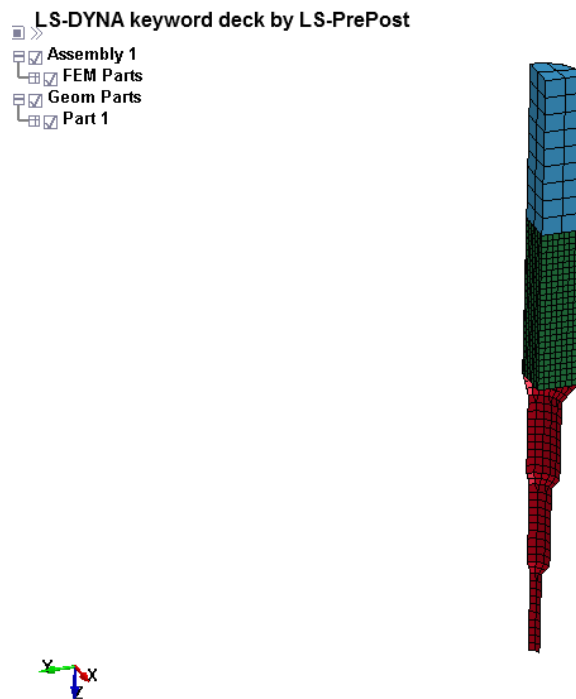
Σχήμα 4.219 Παράθυρο αυτόματης δημιουργίας πλέγματος τύπου Shell

Η διαδικασία δημιουργίας πλέγματος τύπου Shell διαφορετική με αυτή που παρουσιάστηκε παραπάνω, μπορεί να γίνει σε επιφάνειες που θα επιλεγθούν ξεχωριστά. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να αφαιρέσουμε τις περιττές επιφάνειες και να δημιουργήσουμε ένα πλέγμα στις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο. Στο παράθυρο **Auto Mesher** επιλέγουμε

Deviation και στην συνέχεια ορίζουμε μέγιστο και ελάχιστο μήκος στοιχείων με τις εντολές **Max Elem Size** και **Min Elem Size**. Στην περίπτωση της διέλασης θα ορίσουμε για μέγιστο 5 και για ελάχιστο 4 και επιλέγουμε την εντολή **Mesh** και **Accept** για την καταχώρηση του πλέγματος. Στην συνέχεια για να ορίσουμε το έμβολο και το δοκίμιο ακολουθούμε την εντολή:

FEM → Element and Mesh → Solid Mesher

Δημιουργούμε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων τύπου Solid για το έμβολο και το δοκίμιο με μέγεθος στοιχείων για το έμβολο 12 και για το δοκίμιο 4.

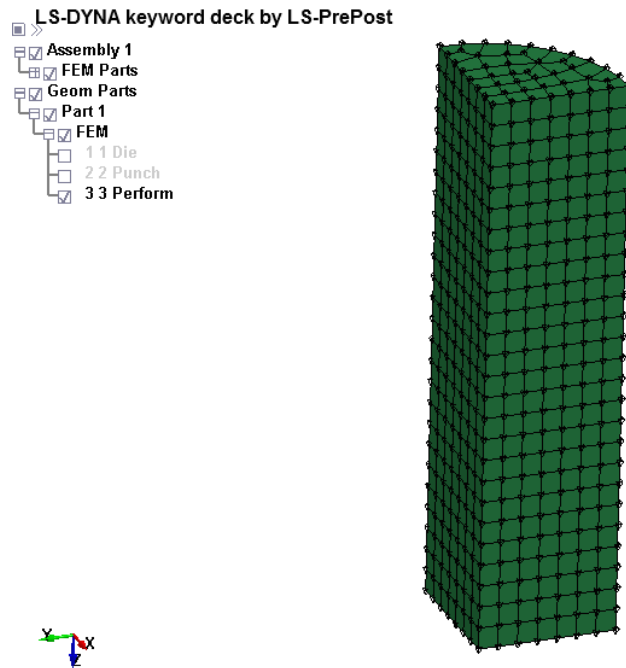


Σχήμα 4.220 Γεωμετρία διέλασης με πλέγμα πεπερασμένων διαφορών

4.5.3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΚΑΙ ΚΟΜΒΩΝ

Για να ορίσουμε τους κόμβους του τεμαχίου μας ακολουθούμε την εντολή:

FEM → Model and Part → Create Entity → Set Data → *SET_NODE

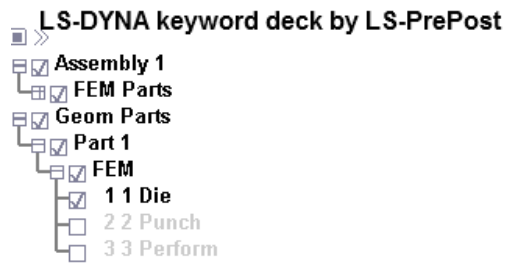


Σχήμα 4.221 Καταχώρηση κόμβων τεμαχίου

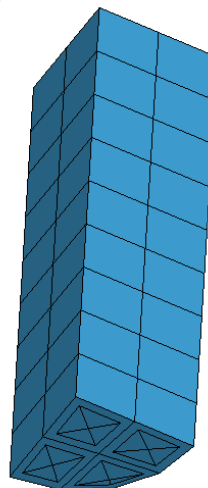
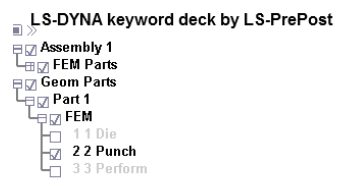
Για να καταχωρίσουμε τούς κόμβους επιλέγουμε την εντολή **Cre** για να δημιουργήσουμε νέα εισαγωγή κόμβων όπως φαίνεται το **Σχήμα 4.1**. Επιλέγοντας την εντολή **Area** στο παράθυρο **Sel. Nodes** επιλέγουμε όλο το κομμάτι και πατάμε **Apply**. Για την καταχώρηση τών τεμαχίων ακολουθούμε:

Fem → **Model and Part** → **Create Entity** → **Set Data** →
***SET_SEGMENT**

Για να καταχωρίσουμε τα τεμάχια επιλέγουμε την εντολή **Cre** για να δημιουργήσουμε νέα εισαγωγή τεμαχίων. Επιλέγοντας την εντολή **Pick** στο παράθυρο **Sel. Nodes** διαλέγουμε τα στοιχεία που έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο μας και πατάμε **Apply**.



Σχήμα 4.222 Καταχώρηση επιφανειών επαφής μήτρας



Σχήμα 4.223 Καταχώρηση επιφανειών επαφής εμβόλου

4.5.3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Παρακάτω φαίνεται η εντολή για την εισαγωγή απαραμόρφωτων υλικών:

**FEM → Model and Part → Keyword Manager → All → MAT → 020-
RIGID**

ορίζουμε τα χαρακτηριστικά για το αστάλι που θα είναι για το έμβολο και για την μήτρα. Στην καρτέλα που ορίζουμε το υλικό ορίζουμε και την κίνηση που θα έχει το σώμα. Θα πρέπει να δημιουργήσουμε δύο καρτέλες με το ίδιο υλικό η μία για την σταθερή μήτρα και η άλλη για την κινούμενη όπως φαίνεται παρακάτω. Η εντολή που δηλώνει αν το απαραμόρφωτο υλικό θα είναι σταθερό ή κινούμενο είναι η **CON1** η οποία δίνει έτοιμες επιλογές για να επιλεγθεί σε ποιούς άξονες θα είναι σταθερό το υλικό. Στην παράμετρο **CON2** θα επιλεγθεί να μην υπάρχει άλλη μετακίνηση στους άξονες. Για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για την δημιουργία νέας καταχώρισης Επιλέγουμε **ADD**.

| 1 | MID | RO | E | PR | N | COUPLE | M | ALIAS |
|---|-----|-----------|------------|-----------|-----|--------|-----|-------|
| | 1 | 0.0078500 | 1.417e+005 | 0.3000000 | 0.0 | 0 | 0.0 | |

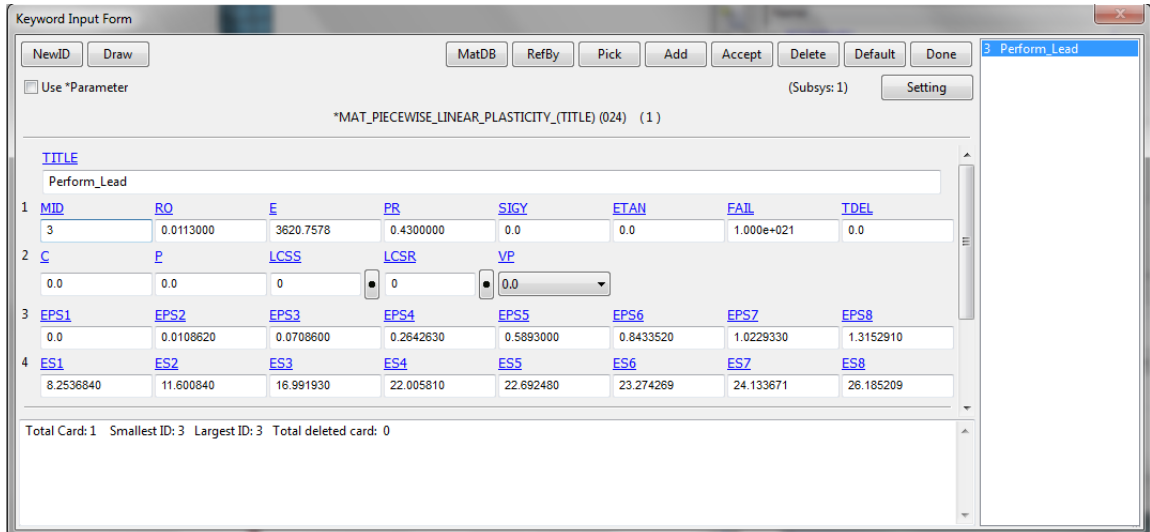
| 2 | CMO | CON1 | CON2 |
|---|-----|------|------|
| | 1.0 | 4 | 7 |

| 3 | LCO OR A1 | A2 | A3 | V1 | V2 | V3 |
|---|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Σχήμα 4.224 Ορισμός άκαμπτων υλικών

Στην συνέχεια θα ορίσουμε το υλικό τού παραμορφώσιμου σώματος, του δοκιμίου, που θα είναι όπως και στις υπόλοιπες κατεργασίες μολυβδος, με την ακόλουθη εντολή:

**FEM → Model and Part → Keyword Manager → All → MAT → 024-
PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY**



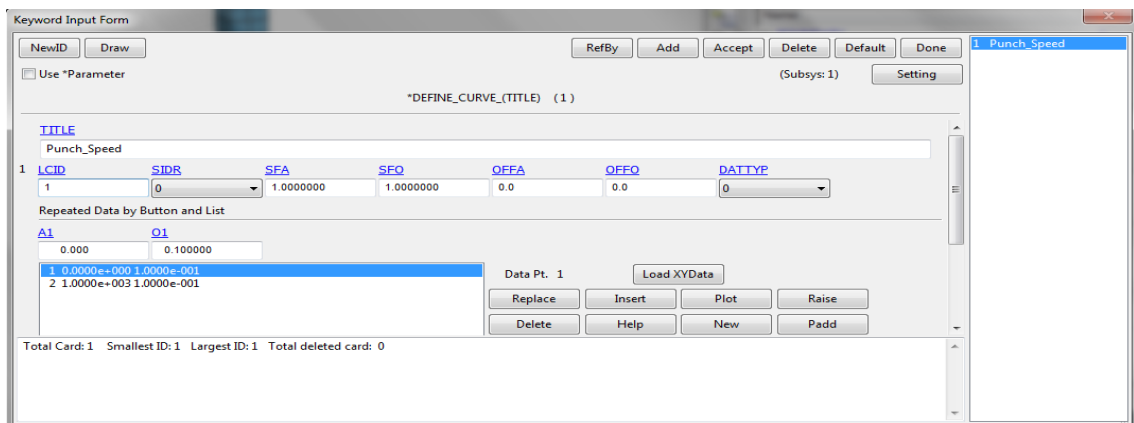
Σχήμα 4.225 Ορισμός εύκαμπτου υλικού

4.5.3.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΜΒΟΛΟΥ

Για την ταχύτητα του εμβόλου από το παράθυρο ελέγχου Keyword Manager επιλέγουμε:

Keyword Manager → DEFINE → CURVE

Δίνουμε όνομα στην καμπύλη της ταχύτητας που θα δημιουργήσουμε και παρατηρούμε ότι υπάρχουν οι εντολές **A1** και **O1** που δηλώνουν τους άξονες καρτεσιανού επιπέδου y, x αντίστοιχα. Στην **A1** επιλέγουμε την τιμή 0 και στην **O1** την ταχύτητα του εμβόλου και την κατεύθυνση την δηλώνουμε με το πρόσημο βάζουμε την τιμή 10 και επιλέγουμε **Insert**, έπειτα επαναλαμβάνουμε και στην **A1** βάζουμε την τιμή 100 και επιλέγουμε **Insert** για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept**.



Σχήμα 4.226 Δημιουργία καμπύλης ταχύτητας εμβόλου

Στην συνέχεια θα πρέπει να δηλώσουμε ποιό απαραμόρφωτο σώμα κάνει την κίνηση σε ποιόν άξονα αλλά και τι είδους κίνηση κάνει. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή:

Keyword Manager → BOUNDARY → PRESCRIBED_MOTION_RIGID

| ID | TITLE | PID | DOF | VAD | LCID | SE | VID | DEATH | BIRTH |
|----|--------------|-----|-----|-----|------|-----------|-----|------------|-------|
| 0 | Punch_travel | | | | | | | | |
| 1 | | 2 | 3 | 0 | 1 | 1.0000000 | 0 | 1.000e+028 | 0.0 |

Σχήμα 4.227 Καταχώρηση ταχύτητας εμβόλου

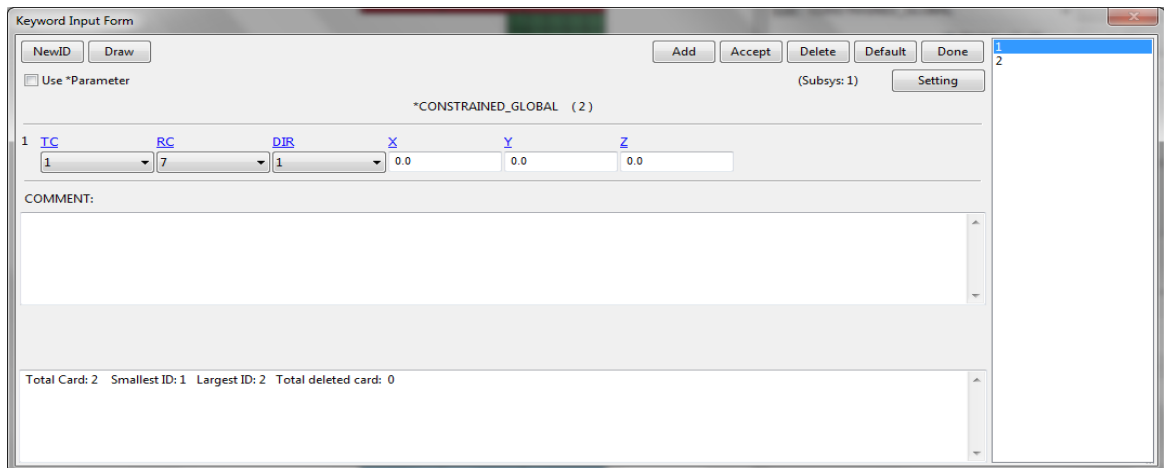
Στην πρώτη επιλογή **PID** ορίζουμε το κομμάτι που θα κάνει τήν κίνηση, στην δεύτερη επιλογή **DOF** επιλέγουμε τόν άξονα που θα κινηθεί το απαραμόρφωτο σώμα μας και τέλος στην επιλογή **LCID** καταχωρούμε τήν καμπύλη που δημιουργήσαμε παραπάνω.

4.5.3.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ

Το Ls-Dyna δίνει τήν δυνατότητα στον χειριστή να προσδιορίσει τήν συμμετρία με προεπιλεγμένες επιλογές με τήν εντολή:

Keyword Manager → CONSTRAINED → GLOBAL

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.1** υπάρχουν οι επιλογές **T1**, **RC** και **DIR** που δηλώνουν τόν αξονικό περιορισμό, τόν περιστροφικό περιορισμό και τήν κατεύθυνση τής συμμετρίας αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη κατεργασία θα έχουμε δύο συμμετρικές επιφάνειες κατά τούς άξονες x και y. Για τήν καταχώριση τών αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για τήν δημιουργία νέας καταχώρισης Επιλέγουμε **ADD**.



Σχήμα 4.228 Ορισμός συμμετρίας

4.5.3.6 ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΗ ΕΠΑΦΩΝ

Η εντολή για την καταχώρηση των επαφών είναι :

Keyword Manager → CONTACT → NODES_TO_SURFACE

Σε αυτό το σημείο δηλώνουμε ποιά σώματα έρχονται σε επαφή αλλά και τόν συντελεστή τριβής τους. Στην εντολή **SSTYP** δηλώνουμε με ποιό τύπο θα καταχωρήσουμε το κομμάτι που θα δεχθεί την παραμόρφωση, επιλέγουμε να το καταχωρήσουμε βάση τής λίστας των κόμβων που έχουμε, και με τόν ίδιο τρόπο θα δηλώσουμε και τον τύπο τού απαμορφωτού σώματος στην εντολή **MSTYP** και θα επιλέξουμε να καταχωρήσουμε με τα τεμάχια (segment ID) που έχουμε καταχωρήσει. Στην εντολή **SSID** καταχωρούμε τήν λίστα των κόμβων, το δοκίμιό μας, και στο **MSID** καταχωρούμε τήν επιφάνεια που έρχεται σε επαφή. Στις εντολές **FS** και **FD** ορίζουμε τήν δυναμική και τήν στατική τριβή τής επαφής η οποία θα είναι 0.2. Ακολουθώ τήν διαδικασία και για τα δύο απαμορφωτά σώματα. Για τήν καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για τήν δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP) (2)

1 CID TITLE
0 Perform-Punch

MPP1 MPP2

2 IGNORE BUCKET LGBUCKET NS2TRACK INITITER PARMAX UNUSED CPARMB
0 200 0 3 2 1.0005 0 0

3 UNUSED CHKSEGS PENSE GRPABLE
0 0 1.0 0

4 SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
1 1 4 0 0 0 0 0

5 FS FD DC VC VDC FENCHK BT DT
0.2000000 0.2000000 0.0 0.0 0.0 0 0.0 1.000e+020

Total Card: 2 Smallest ID: 1 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

1 (0) Perform-Punch
2 (2) Perform-Die

Σχήμα 4. 229 Ορισμός επαφών

4.5.3.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι γεωμετρίες που εισήχθησαν μετατράπηκαν σε πλέγμα πεπερασμένων διαφορών τύπου Solid και Shell θα πρέπει να χαρακτηρίσουμε τα στοιχεία, η εντολή που θα επιλέξουμε για τα τα πλέγματα τύπου Solid θα είναι:

Keyword Manager → SECTION → SOLID

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

*SECTION_SOLID_(TITLE) (2)

TITLE
Punch_solid

1 SECID ELFORM AET
2 1 0

Repeated Data by Button and List

Data Pt.
Replace Insert
Delete Help

Repeated Data by Button and List

Total Card: 2 Smallest ID: 2 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

2 Punch_solid
3 Perform_solid

Σχήμα 4.230 Ορισμός τύπων στοιχείων για πλέγματα τύπου Solid

Θα καταχωρηθούν δύο επιλογές μία για το απαραμόρφωτο σώμα και μία για το παραμορφώσιμο αφού γράψουμε το όνομα της καταχώρισης μας στην εντολή επιλέγουμε τον

τύπο 1 που είναι και η προεπιλεγμένη επιλογή για τα στοιχεία τού πλέγματος που απαρτίζουν το απαραμόρφωτο σώμα, το έμβολο, και τόν τύπο 2 για τα στοιχεία του παραμορφώσιμου σώματος. Για τήν καταχώριση τών αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για τήν δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.

Ενώ η εντολή που θα επιλέξουμε για τα το πλέγμα τής μήτρα που είναι τύπου Shell θα είναι:

Keyword Manager → SECTION → SHELL

Και καταχωρούμε τα στοιχεία τύπου Shell. Στα πλέγματα τύπου Shell θα πρέπει να ορίσουμε και ένα πάχος. Στην επιλογή T1, που ορίζει το πάχος τού πλέγματος τύπου Shell, βάζουμε τήν τιμή 1.

Keyword Input Form

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

*SECTION_SHELL_(TITLE) (1)

TITLE: Die_Shell

| SECID | ELFORM | SHRE | NIP | PROPT | QR/IRID | ICOMP | SETYP |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------|-------|
| 1 | 2 | 1.0000000 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | T1 | T2 | T3 | T4 | NLOC | MAREA | IDOF |
| | 1.0000000 | 1.0000000 | 1.0000000 | 1.0000000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Repeated Data by Button and List

Data Pt. Replace Insert Delete Help

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Σχήμα 4.231 Ορισμός τύπων στοιχείων για πλέγματα τύπου Shell

4.5.3.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΛΗΞΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με τήν παρακάτω εντολή ορίζουμε τόν χρόνο που θα διαρκέσει η προσομοίωση. Η προσομοίωση τής συμπίεσης θα διαρκέσει 750sec.

Keyword Manager → CONTROL → TERMINATION

Keyword Input Form

Use *Parameter

(Subsys: 1)

*CONTROL_TERMINATION (1)

| 1 | ENDTIM | ENDCYC | DTMIN | ENDENG | ENDMAS |
|---|-----------|--------|-------|--------|--------|
| | 750.00000 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

COMMENT:

Σχήμα 4.232 Ορισμός χρονικής λήξης

4.5.3.10 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Για τόν έλεγχο τών κριτηρίων τής αναδημιουργίας του πλέγματος ακολουθούμε τήν εντολή:

Keyword Manager → CONTROL → ADAPTIVE

Keyword Input Form

Use *Parameter

(Subsys: 1)

*CONTROL_ADAPTIVE (1)

| 1 | ADPFREQ | ADPTOL | ADPOPT | MAXLVL | TBIRTH | TDEATH | LCADP | IOFLAG |
|---|-----------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|--------|
| | 5.0000000 | 1.000e+020 | 7 | 3 | 0.0 | 1.000e+020 | 0 | 0 |
| 2 | ADPSIZE | ADPASS | IREFLG | ADPENE | ADPTH | MEMORY | ORIENT | MAXEL |
| | 0.0 | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | LADPN90 | LADPGH | NCFRED | LADPCL | ADPCTL | CBIRTH | CDEATH | LCLVL |
| | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.0 | 0.0 | 1.000e+020 | 0 |
| 4 | CNLA | | | | | | | |
| | 0 | | | | | | | |

COMMENT:

Σχήμα 4.233 Παράθυρο κριτηρίων αναδημιουργίας πλέγματος

Και εμφανίζει το παράθυρο ελέγχου τών κριτηρίων στο οποίο θα ορίσουμε τήν συχνότητα που θα γίνεται η αναδημιουργία στην εντολή **ADPFREQ** με βήμα 5 και στην εντολή **ADPOPT**

θα επιλέξουμε 7 η οποία μας επιτρέπει την τρισδιάστατη εφαρμογή της αναδημιουργίας του πλέγματος σε στοιχεία τύπου Solid. Για τον έλεγχο των παραμέτρων επιλέγουμε:

Keyword Manager → CONTROL → REMESHING

Στο παράθυρο που θα εμφανιστεί θα ορίσουμε το ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος των στοιχείων με τις εντολές **RMIN** και **RMAX** με τις τιμές 2 και 5 αντίστοιχα.

| | RMIN | RMAX | VF_LOSS | MFRAC | DT_MIN | ICURV | IADP10 | SEFANG |
|---|-----------|-----------|-----------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 1.0000000 | 3.0000000 | 1.0000000 | 0.0 | 0.0 | 4 | 0 | 0.0 |

Σχήμα 4. 234 Παράθυρο παραμέτρων αναδημιουργίας πλέγματος

4.5.3.11 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το βήμα θα ορίσουμε τί αποτελέσματα θέλουμε να εμφανιστούν αλλά και το βήμα των σημείων που θα εμφανιστούν στο διάγραμμά μας ακολουθώντας την εντολή:

Keyword Manager → DATABASE → ASCII_OPTION

Και επιλέγουμε την δύναμη του εμβόλου κατά τον άξονα z, **RCFOC**, με βήμα 0,2 στην εντολή DT και στην εντολή BINARY επιλέγουμε τον αριθμό 1.

| | DT | BINARY | LCUR | IOOPT |
|--|-----|--------|------|-------|
| <input type="checkbox"/> PLLYOUT | 0.0 | 0 | 0 | 1 |
| <input type="checkbox"/> RBDOUT | 0.0 | 0 | 0 | 1 |
| <input checked="" type="checkbox"/> RCFORC | 0.2 | 1 | 0 | 1 |
| <input type="checkbox"/> RWFORC | 0.0 | 0 | 0 | 1 |
| <input type="checkbox"/> SBTOUT | 0.0 | 0 | 0 | 1 |

BINARY:=Flag for binary file
 EQ.1: ASCII file is written. This is the default on serial and shared memory computers.
 EQ.2: Data written to a binary database, which contains data that would otherwise be output to the ASCII file. The ASCII file in this case is not created. This is the default on distributed memory computers.
 EQ.3: ASCII file is written and the data is also written to the binary database.

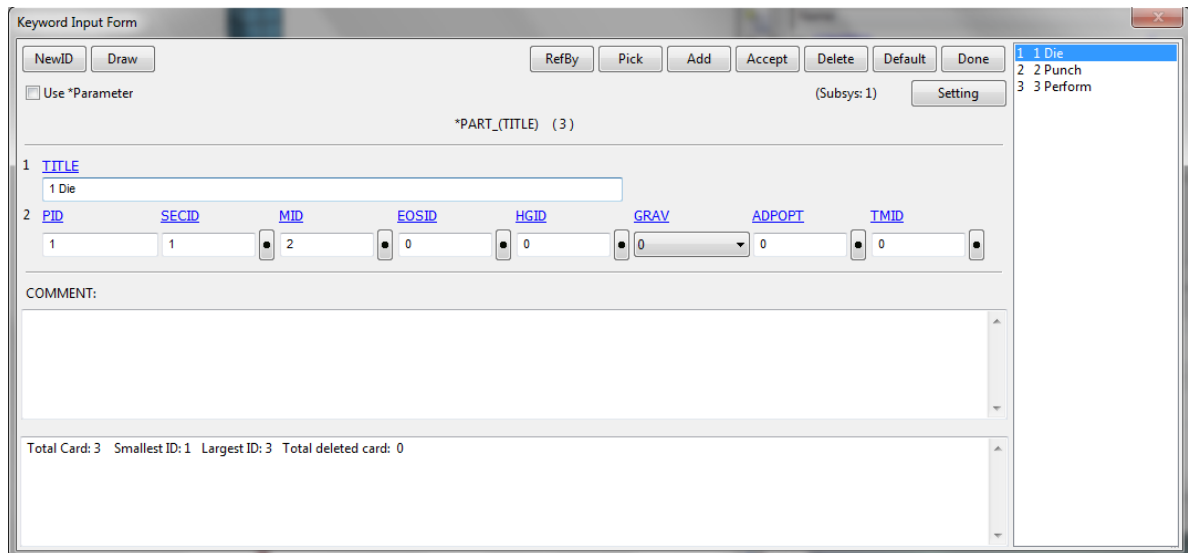
Σχήμα 4.235 Παράθυρο ελέγχου του βήματος αποτελεσμάτων

4.5.3.12 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το τελευταίο βήμα είναι να ορίσουμε όλες τις παραμέτρους στα αρχικά μοντέλα που δημιουργήσαμε με την εντολή:

Keyword Manager → PART → PART

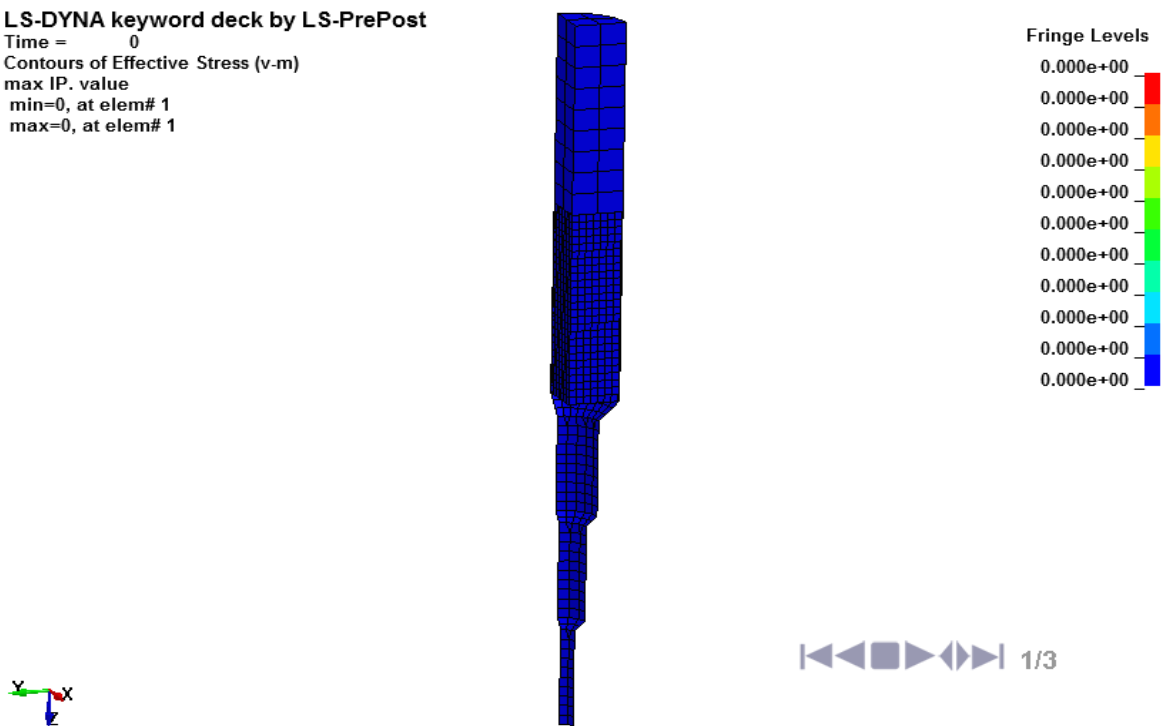
Αφού δώσουμε όνομα στο κομμάτι μας ορίζουμε τον τύπο του πλέγματος με την εντολή **SECID** και με την εντολή **MID** ορίζουμε το υλικό που έχουμε καταχωρήσει. Αυτό το επαναλαμβάνουμε για όλα τα κομμάτια τού μοντέλου μας και στην διαδικασία της αναδημιουργίας τού πλέγματος στο παραμορφώσιμο κομμάτι επιλέγουμε στην εντολή **ADPOPT** τον τύπο 2 που δηλώνει την τρισδιάστατη αναδημιουργία τού πλέγματος. Για την καταχώρηση των αλλαγών επιλέγουμε **Accept** αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για την δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε **ADD**.



Σχήμα 4.236 Ορισμός κομματιών τού μοντέλου

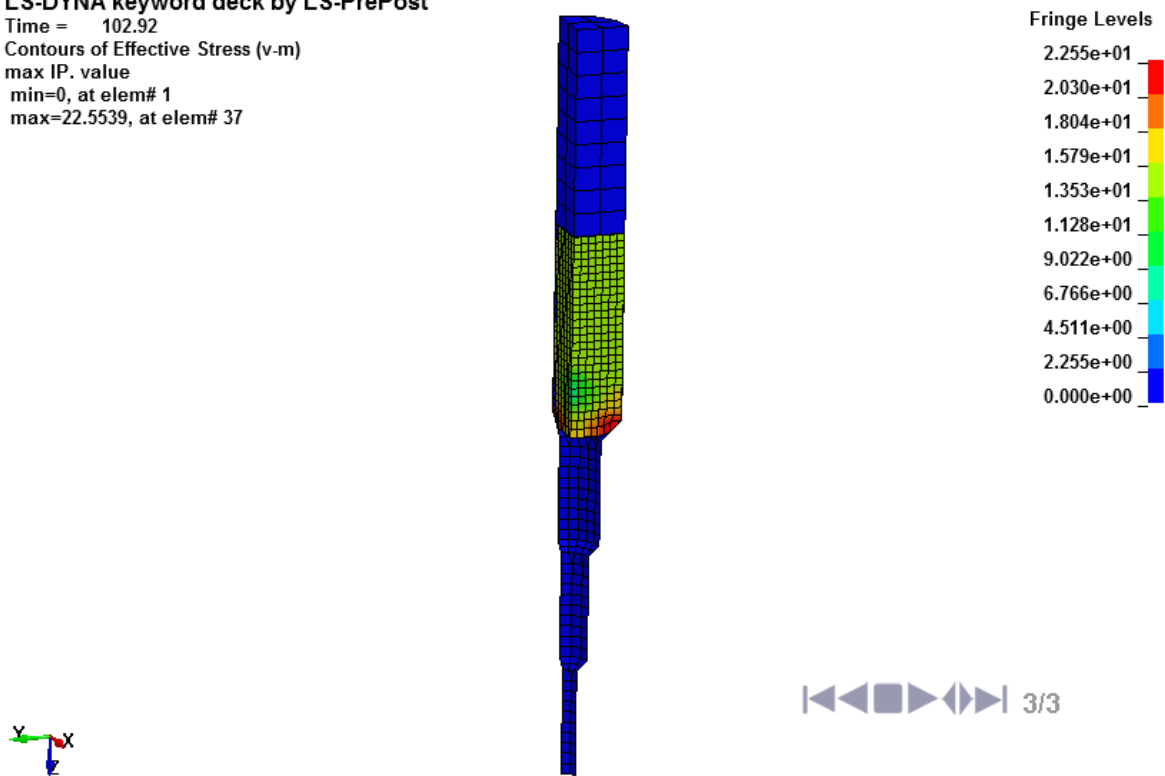
4.5.3.13 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max IP. value
 min=0, at elem# 1
 max=0, at elem# 1



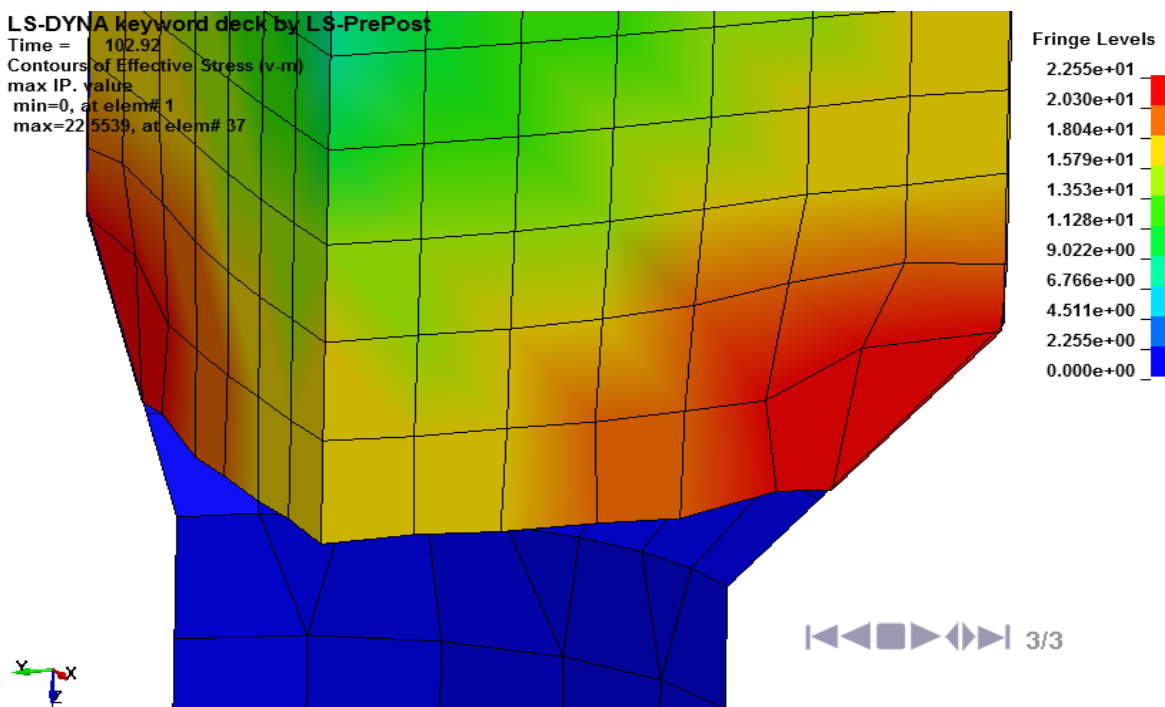
Σχήμα 4.237 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την διέλαση (1200 στοιχεία)

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 102.92
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=22.5539, at elem# 37



Σχήμα 4.238 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 3 (1200 στοιχεία)

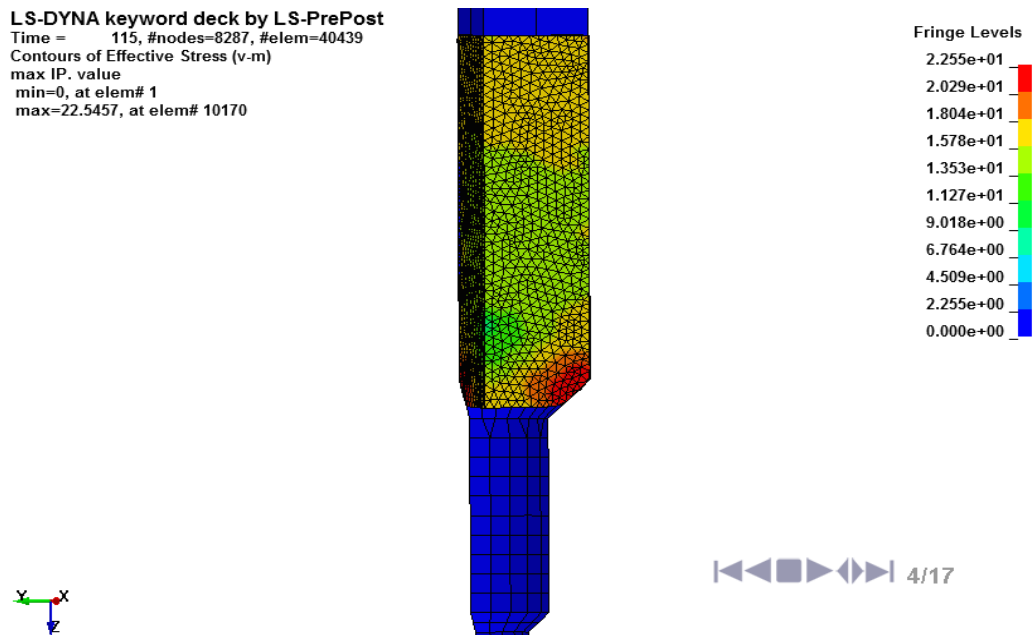
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 102.92
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=22.5539, at elem# 37



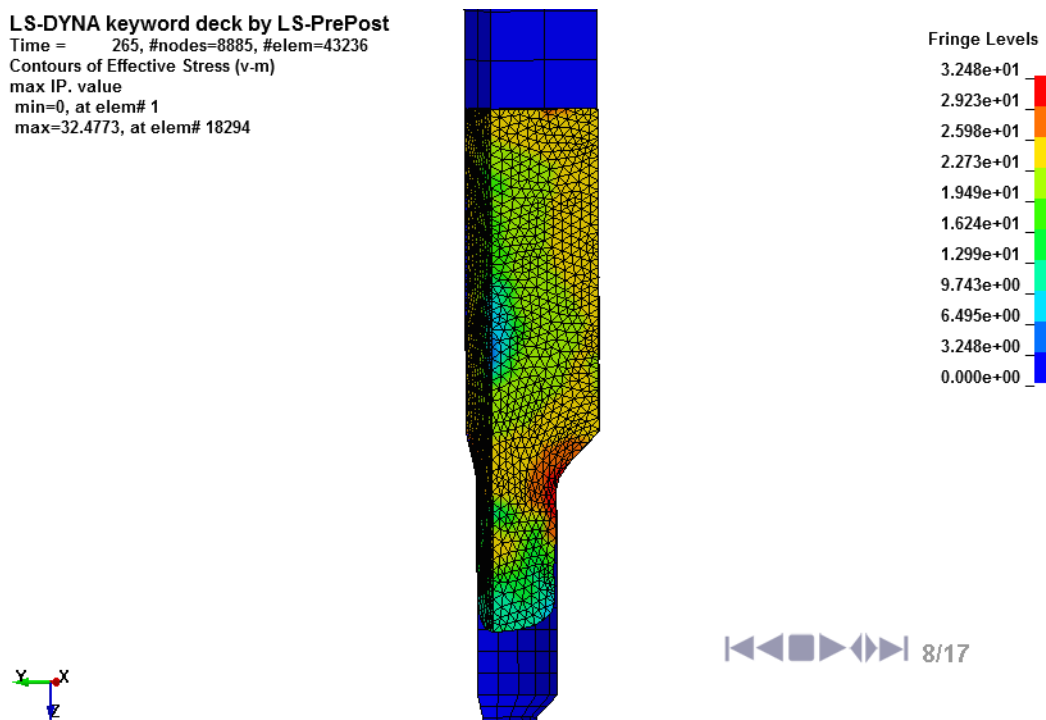
Σχήμα 4.239 Παραμορφωμένο πλέγμα διέλασης επανάληψη 3

Η ανάλυση χωρίς την αναδημιουργία πλέγματος σταματάει στο τρίτο βήμα λόγω μεγάλης παραμόρφωσης στο πλέγμα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.223**.

4.5.3.14 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

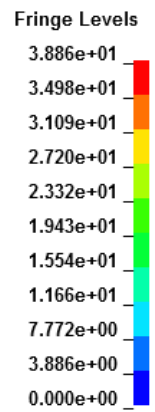
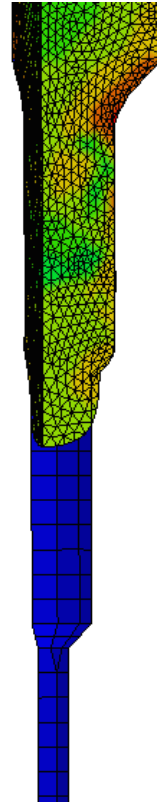


Σχήμα 4.240 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 4 (40439 στοιχεία)



Σχήμα 4.241 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 8 (43236 στοιχεία)

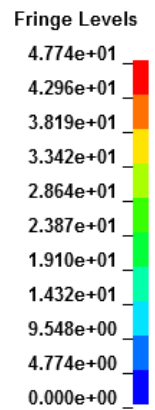
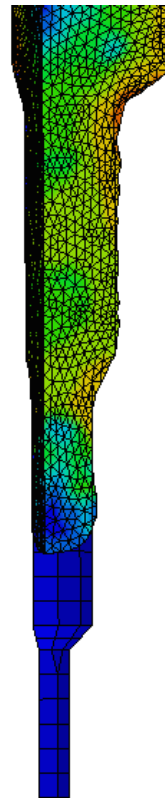
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 415, #nodes=9129, #elem=43842
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=38.862, at elem# 7738



Navigation icons and page number 12/17

Σχήμα 4.242 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 12 (43842 στοιχεία)

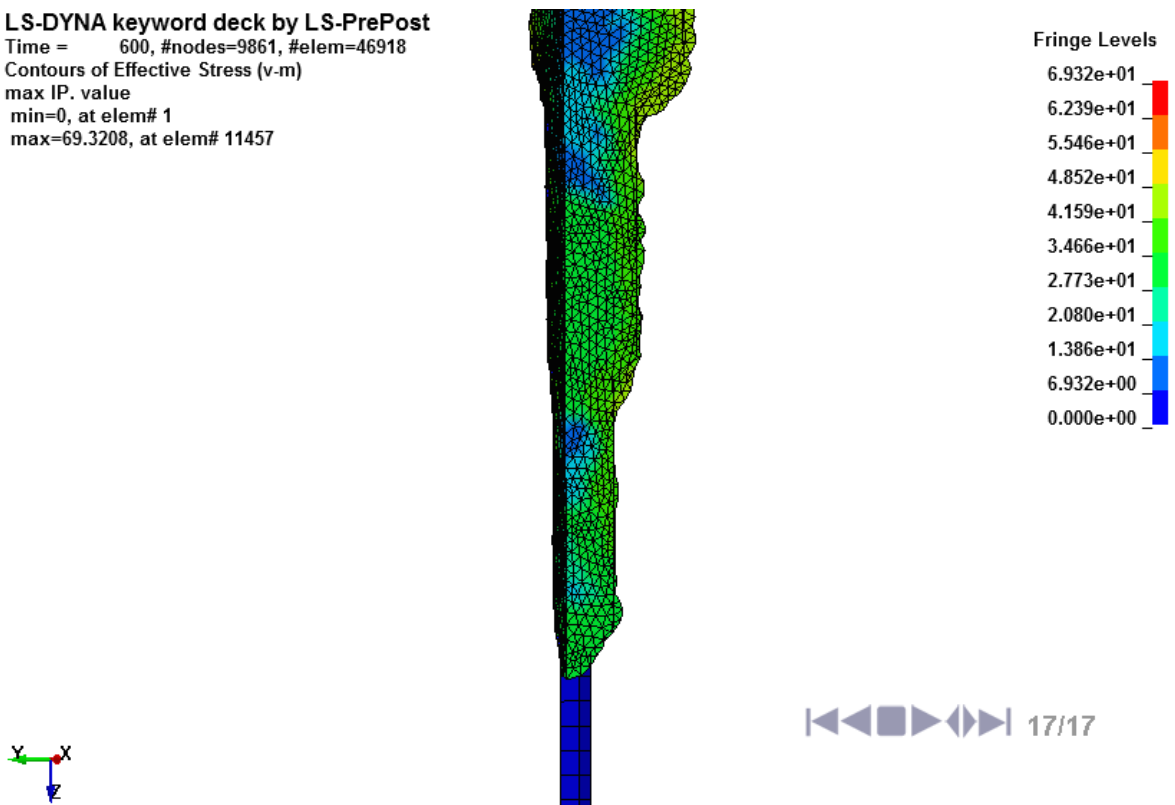
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 490, #nodes=9447, #elem=45135
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=47.7375, at elem# 15868



Navigation icons and page number 14/17

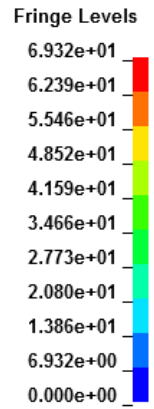
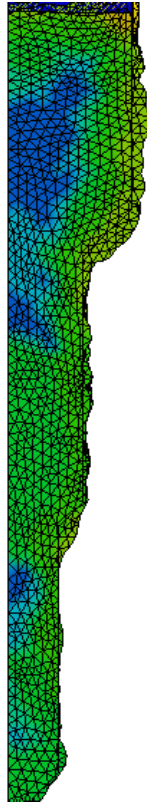
Σχήμα 4.243 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 14 (45135 στοιχεία)

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 600, #nodes=9861, #elem=46918
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=69.3208, at elem# 11457



Σχήμα 4.244 Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 17 (46918 στοιχεία)

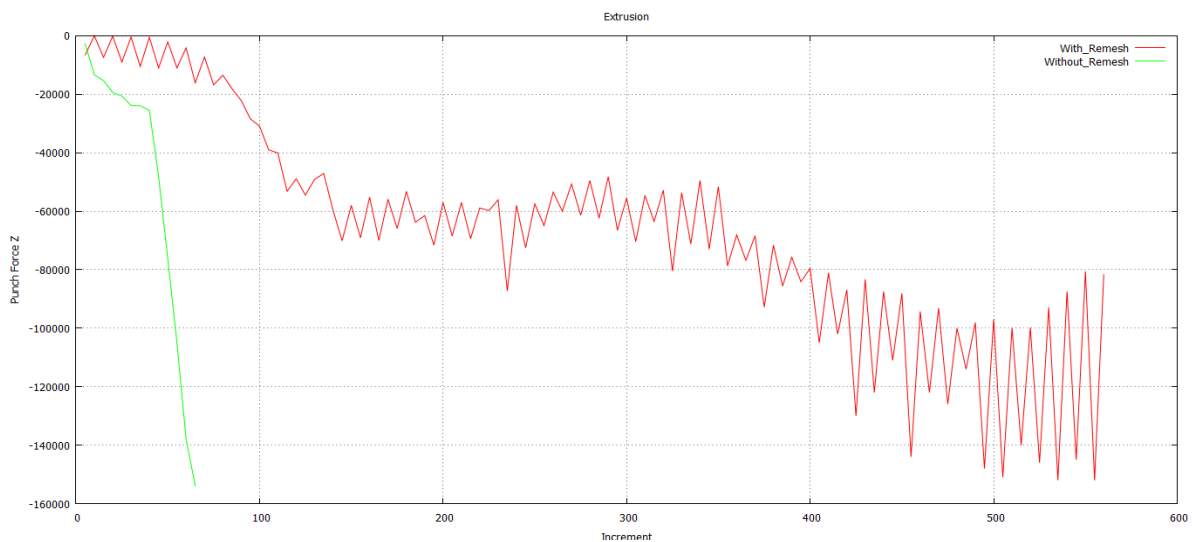
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 600, #nodes=9861, #elem=46918
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max IP. value
 min=0, at elem# 1
 max=69.3208, at elem# 11457



Σχήμα 4.245 Παραμορφωμένο πλέγμα διέλασης επανάληψη 17

Όπως βλέπουμε στο **Σχήμα 4.229** η επίλυση της διέλασης σταμάτησε διότι το πλέγμα διαπέρασε την μήτρα. Αυτό μας δείχνει την δυσκολία που αντιμετωπίζει το πρόγραμμα στο να δημιουργήσει καινούργιο πλέγμα σε πολύπλοκες γεωμετρίες.

4.5.3.15 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ



Σχήμα 4.246 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων διέλασης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν και αφορούν τα στοιχεία κατά την επίλυση (χρόνος, remeshing, μέγιστος αριθμός στοιχείων), καθώς και τη δύναμη του εμβόλου καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο.

| MSC.MARC | | | | | | |
|----------|-----------------|---------------|------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|
| A/A | ΥΛΙΚΟ | ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ | ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (sec.) | REMESHES | ΑΡΧΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | ΤΕΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ |
| 1 | | ΣΥΜΠΙΕΣΗ | 65.28 | 8 | 480 | 1339 |
| 2 | ΜΟΛΥΒΔΟΣ | ΕΠΙΠΕΔΗ ΕΛΑΣΗ | 3461.89 | 57 | 320 | 2767 |
| 3 | | ΔΙΕΛΑΣΗ | 2183.65 | 58 | 480 | 2747 |

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας επίλυσης με το πρόγραμμα Msc.Marc

| LS-DYNA | | | | | | |
|---------|-----------------|---------------|------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|
| A/A | ΥΛΙΚΟ | ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ | ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (sec.) | REMESHES | ΑΡΧΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | ΤΕΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ |
| 1 | | ΣΥΜΠΙΕΣΗ | 283.63 | 4 | 512 | 9856 |
| 2 | ΜΟΛΥΒΔΟΣ | ΕΠΙΠΕΔΗ ΕΛΑΣΗ | 20584.32 | 130 | 168 | 1153 |
| 3 | | ΔΙΕΛΑΣΗ | 2258.85 | 250 | 1200 | 46918 |

Πίνακας 5.2 Συγκεντρωτικός πίνακας επίλυσης με το πρόγραμμα

5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως φαίνεται και στους **Πίνακες 5.1, 5.2** η διαδικασία επίλυσης με την χρήση του προγράμματος Msc.Marc είναι πολύ πιο γρήγορη από ότι με την χρήση του Ls-Dyna. Με το Msc.Marc η διαδικασία της προσομοίωσης είναι πιο εύκολη και πιο γρήγορη λόγω της κατηγοριοποίησης των εντολών, που βοηθάει τον χειριστή. Είναι εμφανές ότι η κατεργασία της συμπίεσης και στις δύο περιπτώσεις είναι η πιο εύκολη αλλά και η πιο γρήγορη στην επίλυση της. Στην κατεργασία της έλασης λόγω κακών χειρισμών ή ελλείψεις γνώσεων στο πρόγραμμα Ls-Dyna η διαδικασία της επίλυσης πήρε αρκετό χρόνο, ωστόσο το αποτέλεσμα ήταν θετικό. Τέλος η κατεργασία της διέλασης με το Ls-Dyna δεν ολοκληρώθηκε σωστά λόγω της μεγάλης παραμόρφωσης του πλέγματος κατά την αναδημιουργία του. Αυτό δείχνει την δυσκολία στο πρόγραμμα να εφαρμόσει την αναδημιουργία του πλέγματος σε δύσκολες γεωμετρίες. Επίσης παρατηρείται ότι το Msc.Marc χρειάστηκε να εκτελέσει λιγότερες αναδημιουργίες του πλέγματος για την επίλυση της διέλασης και της επίπεδης έλασης, αυτό σημαίνει ότι το Msc.Marc χειρίζεται το πλέγμα με μεγαλύτερη ευελιξία κατά την επίλυση δηλαδή λιγότερος χρόνος επίλυσης αλλά και λιγότερη υπολογιστική μνήμη.

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία της αναδημιουργίας του πλέγματος εμφανίζει πολύ καλές επιδόσεις, για διαφορετικές καταστάσεις, στο να μας δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορεί να εμφανιστούν ή να εκτυπωθούν, και η απόδοση του προγράμματος επίλυσης μπορεί να παρακολουθείται και σε πραγματικό χρόνο. Στις κατεργασίες που παρουσιάστηκαν το δοκίμιο ήταν τότε κυλινδρικό και τότε ορθογώνιο για να δειχθεί η ευκολία αναδημιουργίας του πλέγματος τοπολογικά και στις δύο περιπτώσεις. Η αναδημιουργία του πλέγματος στα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων που αναλύθηκαν αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερη προσοχή στην ανάγκη να διατηρηθούν συνθήκες επαφής, έτσι ώστε να αποφεύγεται η διείσδυση του πλέγματος στα απαραμόρφωτα σώματα, και οι διαφορές να ελαχιστοποιούνται εντός ορισμένης ανοχής. Όπως φαίνεται στις κατεργασίες υλικών η λειτουργία αναδημιουργίας του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ σημαντική για να ολοκληρωθεί με επιτυχία μία προσομοίωση. Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η λειτουργία αναδημιουργίας του πλέγματος κατά την προσομοίωση με απλές γεωμετρίες στις κατεργασίες της συμπίεσης, επίπεδης έλασης και διέλασης. Τα περισσότερα στοιχεία των προσομοιώσεων, όπως οι συντελεστές τριβής, η ταχύτητα του εμβόλου, των ραούλων και το υλικό του δοκιμίου ελήφθησαν από επιστημονικά άρθρα. Στόχος της εργασίας ήταν η παρουσίαση της λειτουργίας της αναδημιουργίας του πλέγματος, πώς το χρησιμοποιούν κάποια προγράμματα που το διαθέτουν, ποία τα κριτήρια και οι

παράμετροι και η εφαρμογή του. Μία προσομοίωση με αναδημιουργία πλέγματος θέλει πολλές δοκιμές ώστε να βρεθούν τα κατάλληλα κριτήρια και οι κατάλληλοι παράμετροι για να προσεγγίσουμε τήν πραγματική λύση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. Δημητρίου Β., Προσαρμοστικά Πεπερασμένα Στοιχεία και Συναφή Πλέγματα, Διδακτορική Διατριβή (επιβλέπων καθ. Α. Κανάραχος), Ε.Μ.Π., Αθήνα, Αύγουστος 2004.
2. Cook, Robert D., David S. Malkus, Michael E. Plesha, Robert J. Witt, Concepts and Applications of
3. Finite Element Analysis. 4th ed. Madison: John Wiley & Sons, 2002.
4. Δ. Μανωλάκος, Σημειώσεις του μαθήματος Κατεργασίες Ι
5. Α. Γ. Μάμαλη, Κατεργασίες των Υλικών Ι, εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

1. Coupez T, Soyris N, Chenot JL. 3-D finite element modelling of the forging process with automatic remeshing. Journal of Materials Processing Technology 1991;27(1–3):119–33
2. Schneiders R, Bünten R. Automatic generation of hexahedral finite element meshes. Computer Aided Geometric Design 1995.
3. Chenot JL, Bay F. An overview of numerical modelling techniques. Journal of Materials Processing Technology 1998.
4. Benzley SE, Perry E, Merkley K, Clark B. A comparison of all hexagonal and all tetrahedral finite element meshes for elastic and elasto-plastic analysis, In: Proceedings of the 4th International Meshing Roundtable, 1995.
5. Kraft P. Automatic remeshing with hexahedral elements: problems, solutions and applications. In: Proceedings of the 8th international meshing roundtable. 1999.
6. <http://www.mscsoftware.com/product/patran>
7. Gay C, Montmionnet P, Coupez T, Chenot JL. Test of an element suitable for fully automatic remeshing in 3D elastoplastic simulation of cold forging. Journal of Materials Processing Technology 1994.
8. Coupez T, Soyris N, Chenot JL. 3-D finite element modelling of the forging process with automatic remeshing. Journal of Materials Processing Technology 1991.
9. Oh SI, Wu WT, Tang JP. Simulations of cold forging process by the DEFORM system. Journal of Materials Processing Technology 1992.
10. Γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο εάν διπλασιασθεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων) τότε διπλασιάζεται το μέγεθος του αποτελέσματος (π.χ. μετατοπίσεων). Τα περισσότερα προβλήματα της πράξης είναι

(ή μάλλον θεωρούνται) γραμμικά. Μη γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέρθηκε προηγούμενα. Σε «ελαστικά» προβλήματα η μη-γραμμικότητα μπορεί να οφείλεται στο ελαστοπλαστικό υλικό (material nonlinearity) ή στην μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων (geometrical nonlinearity). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το μητρώο δυσκαμψίας δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων. Μη-γραμμικότητες υπάρχουν και σε προβλήματα δυναμικού, π.χ. όταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.

11. Lagrange
12. MSC.Marc volume b ΠΙΝΑΚΕΣ σελ.34-50
13. Fernandes JLM, Martins PAF. All-hexahedral remeshing for the finite element analysis of metal forming processes. Finite Elements in Analysis and Design 2007
14. Alves ML, Rodrigues JMC, Martins PAF. Three-dimensional modelling of forging processes by the finite element flow formulation. Journal of Engineering Manufacture 2004
15. Kwak DY, Im YT. Remeshing for metal forming simulations—part II: threedimensional hexahedral mesh generation. International Journal for Numerical Methods in Engineering 2002
16. Karadogan C, Tekkaya AE. Geometry defeaturing and surface relaxation algorithms for all-hexahedral remeshing. In: Proceedings of the seventh NUMIFORM conference. 2001
17. Martins PAF, Marmelo JCP, Rodrigues JMC, Barata Marques MJM. Plarmsh3—a three dimensional program for remeshing in metal forming. Computers and Structures 1994
18. MSC.Marc User's Guided
19. Baehmann, P. L., Collar, R. R., Hattangady, N. V., and Shephard, M. S., "Geometry and Mesh Control for Automated Bulk Forming Simulations", Proc. ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, CA, Nov. 8-13, 1992
20. Fried, I., "Accuracy of Complex Finite Elements", AIAA Journal, Vol. 10, 1972.
21. Fried, I., "Possible Loss of Accuracy in Curved (Isoparametric) Finite Elements - Comment on Paper by Henshell, et. al.", J. Sound Vibration, Vol. 23, 1972.
22. Henshell, R. D., Walters, D. and Warburton, G. B., "On Possible Loss of Accuracy in Curved Finite Elements", J. Sound Vibration, Vol. 23, 1972.
23. Strang, G. and Fix, G. J., An Analysis of the Finite Element Method, Prentice Hall Series in Automatic Computation, Englewood Cliffs, New Jersey.
24. Babuska, M. and Aziz, K., "On the Angle Condition in the Finite Element Method", SIAM J. Numer. Anal., Vol. 13., no. 2, 1976.
25. Krizek, M., "On the Maximum Angle Condition for Linear Tetrahedral Elements", SIAM J. Numer. Anal., Vol. 29, no. 2, 1992.

26. Oddy, A., Goldak, J., McDill, M. and Bibby, M., "A Distortion Metric for Isoparametric Elements", Transactions of the CSME, 12(4), pp. 213-217, 1988.
27. Hughes, T. J. R., The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 1987.
28. Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L., The Finite Element Method – Volume 1, McGraw Hill Book Co., New York, 1987.
29. Yang, H. T. Y., Heinstein, M., and Shih, J. M., "Adaptive 2-D Finite Element Simulation of Metal Forming Processes", Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 28, 1989.
30. Habraken, A. M. and Cescotto, S., "An Automatic Remeshing Technique for Finite Element Simulation of Forming Processes", Int. J. Numer. Meth. Engng., vol. 30, 1990.
31. Dyduch, M., Habraken, A. M., and Cescotto, S., "Automatic Adaptive Remeshing for Numerical Simulations of Metal Forming", Comp. Meth. App. Mech. Engng., vol. 101, 1992.
32. Habraken, A. M. and Cescotto, S., "An Automatic Remeshing Technique for Finite Element Simulation of Forming Processes", Int. J. Numer. Meth. Engng., vol. 30, 1990.
33. Babuska, I. and Yu, D., "Asymptotically Exact A-posteriori Error Estimator for Biquadratic Elements", Technical Note BN-1050, Institute for Physical Science and Technology, Laboratory for Numerical Analysis, University of Maryland, College Park, MD, 1986.
34. Baehmann, P. L., Shephard, M. S. and Flaherty, J. E., "A posteriori Error Estimation for Triangular and Tetrahedral Quadratic Elements Using Interior Residuals", Int. J. Numer. Meth. Engng., vol. 34, 1992.
35. Shephard, M. S., Baehmann, P. L., Collar, R. R., Hattangady, N. V. and Niu, Q. "Automated Remodeling Techniques in Finite Element Analysis", in Advances in CAD/CAE, Academic Press, 1993.
36. Zienkiewicz, O. C., Huang, G. C., and Liu, Y. C., "Adaptive FEM Computation of Forming Processes - Application to Porous and Non-porous Materials", Int. J. Numer. Meth. Engng., vol. 30, 1990.
37. Zienkiewicz, O. C. and Zhu, J. Z., "A Simple Error Estimator and Adaptive Procedure for Practical Engineering Analysis", Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 24, 1987.
38. Zienkiewicz, O. C. and Zhu, J. Z., "Superconvergent Derivative Recovery Techniques and a posteriori Error Estimation in the Finite Element Method, part 1: A General Superconvergent Recovery Technique", Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 33, 1992.
39. Babuska, I., "Adaptive Mathematical Modeling", In Adaptive Methods for Partial

Differential Equations, Flaherty, J. E., Paslow, P. J., Shephard, M. S. and Vasilakis, J. D., eds., SIAM 1989, Philadelphia, PA.

40. Dukowicz, J. K., "Conservative Rezoning (Remapping) for General Quadrilateral Mesh", J. Comput. Physics, vol. 54, 1984.
41. Cheng, J. H. and Kikuchi, N., "A Mesh Rezoning Technique for Finite Element Simulations of Metal Forming Processes", Int. J. Numer. Meth. Engng., vol. 23, 1986.
42. Murti, V. and Valliappan, S., "Numerical Inverse Isoparametric Mapping in Remeshing and Nodal Quantity Contouring", Computers and Structures, vol.22, 1986.