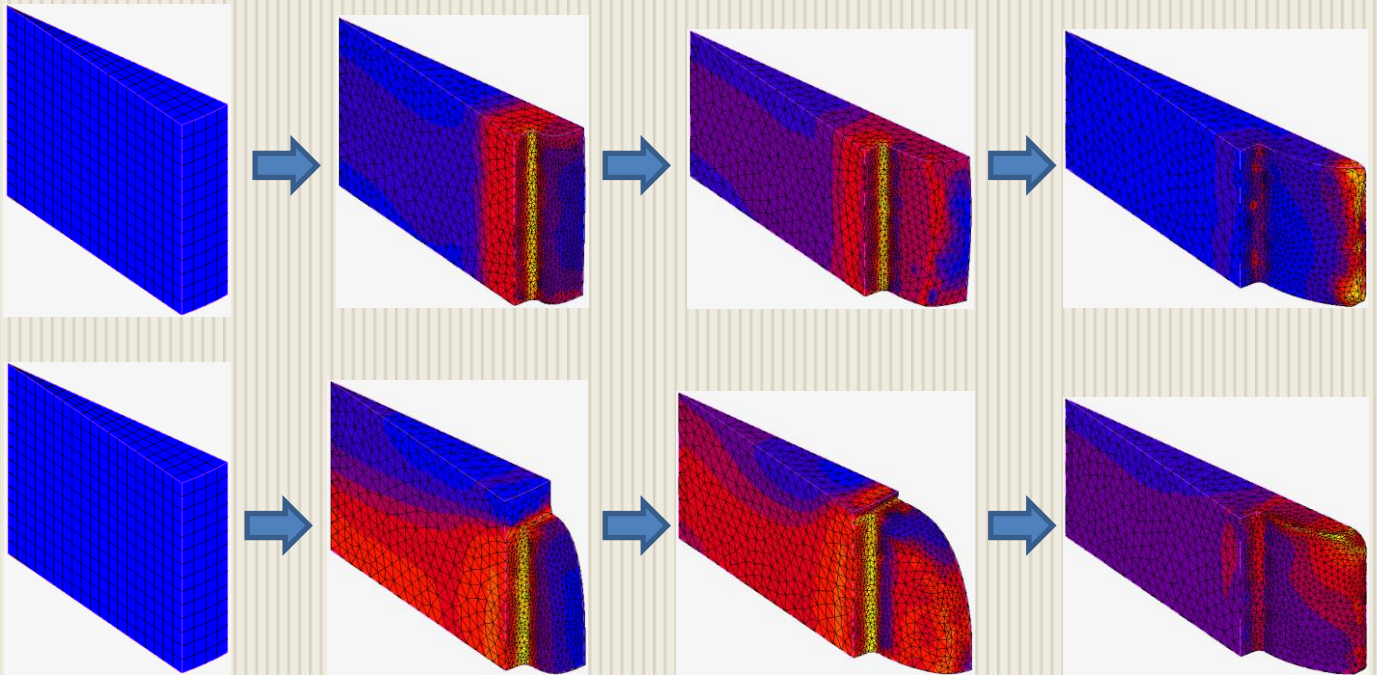




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ**  
**ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ΕΥΘΕΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΣΗΣ**



**ΖΗΡΔΕΛΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ  
**ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012

.....

*Ζηρδέλης Ανδρέας*

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

## 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 ιδιαίτερω τον επιβλέποντα για την εργασία καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας αλλά και για την πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του, αλλά και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Εμμανουήλ Γκιθώνα για την εποικοδομητική συνεργασία κατά την εκπόνησή της.

Αθήνα, Μάρτιος 2012

Ανδρέας Ζηρδέλης

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της μεθόδου της ψυχρής σφυρηλάτησης ακριβείας στην κατασκευή οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με τη βοήθεια του πακέτου MSC MARC. Βασικό πλεονέκτημα του εν λόγω πακέτου είναι η αναγέννηση πλέγματος, πράγμα απαραίτητο σε κατεργασίες μεγάλης παραμόρφωσης. Πολλά στοιχεία των προσομοιώσεων, λήφθησαν από επιστημονικά άρθρα παρόμοιων προσπαθειών.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στη μέθοδο της σφυρηλάτησης και περιγράφονται τα είδη σφυρηλάτησης που χρησιμοποιούνται σήμερα. Επίσης, απαριθμούνται οι μηχανές σφυρηλάτησης, καθώς και τα εργαλεία (καλούπια) που χρησιμοποιούνται. Τέλος, περιγράφονται οι παράμετροι και τα χαρακτηριστικά που παίζουν σημαντικό ρόλο στη συγκεκριμένη μέθοδο, όπως τα υλικά, η θερμοκρασία και η λίπανση.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται οι οδοντωτοί τροχοί και γίνεται αναφορά στα είδη που υπάρχουν. Ακόμη, αναφέρονται τα βασικά μεγέθη των οδοντώσεων, όπως, το βήμα, το module, το πάχος και η σχέση μετάδοσης.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, αναφέρονται οι μέθοδοι σφυρηλάτησης των διαφόρων ειδών οδοντωτών τροχών και γίνεται λόγος για την ακρίβεια και ποιότητά τους. Τέλος, γίνεται αναφορά στη σφυρηλάτηση ακριβείας, μια μέθοδος που αποσκοπεί στο να κατασκευαστεί το τελικό τεμάχιο χωρίς επιπλέον στάδια εκτός αυτού της σφυρηλάτησης.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, περιγράφεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), γίνεται αναφορά στη γένεση πλέγματος, και στα είδη ανάλυσης που μπορούν να πραγματοποιηθούν με αυτή τη μέθοδο.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο, γίνεται περιγραφή των συνθηκών των προσομοιώσεων σφυρηλάτησης και δίνονται τα χαρακτηριστικά του προς κατασκευή τροχού. Ακόμη, σχεδιάζονται οι μήτρες σφυρηλάτησης που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος περιγράφεται αναλυτικά μία προσομοίωση με το πακέτο MSC MARC και παρατίθενται τα αποτελέσματα.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα από όλες τις προσομοιώσεις, γίνεται επεξεργασία, και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα από τη σύγκρισή τους.

Τέλος, στα παραρτήματα της εργασίας, περιγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, τα είδη των πεπερασμένων στοιχείων των προσομοιώσεων, τα χαρακτηριστικά του H/Y στον οποίο και έγιναν οι προσομοιώσεις και τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνησή της.

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>3</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>4</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>5</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>8</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>11</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ</b> .....	<b>12</b>
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	12
1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ .....	12
1.2.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (OPEN-DIE FORGING).....	13
1.2.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (CLOSED-DIE FORGING).....	15
1.2.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΞΟΧΗ (IMPRESSION-DIE FORGING) 15	
1.2.4 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ.....	17
1.3 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ .....	18
1.3.1 ΣΦΥΡΕΣ .....	18
1.3.2 ΠΡΕΣΕΣ.....	21
1.3.3 ΑΛΛΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ .....	23
1.4 ΕΡΓΑΛΕΙΑ (ΚΑΛΟΥΠΙΑ) ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ .....	24
1.5 ΣΗΜΑΣΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ .....	25
1.5.1 ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ.....	25
1.5.2 ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ.....	26
1.5.3 ΝΕΥΡΑ.....	26
1.5.4 ΕΜΒΥΘΙΣΕΙΣ – ΚΟΡΜΟΙ - ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΕΣ .....	26
1.5.5 ΠΡΟΕΚΤΑΜΑ .....	27
1.5.6 ΥΛΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ .....	27
1.6 ΑΛΛΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ .....	28
1.6.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ .....	28
1.6.2 ΛΙΠΑΝΣΗ .....	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ</b> .....	<b>29</b>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ .....	29
2.2 ΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ .....	30
2.2.1 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ .....	30
2.2.2 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.....	32
2.2.3 ΕΛΙΚΟΙΕΙΔΕΙΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΑΣΥΜΒΑΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ .....	34
2.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΕΡΜΟΝΑ ΚΟΧΛΙΑ – ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ .....	35
2.3 ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ .....	36
2.3.1 ΒΗΜΑ ΟΔΟΝΤΩΝ – ΜΕΤΡΟ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ .....	36
2.3.2 ΠΑΧΟΣ ΟΔΟΝΤΩΝ .....	37
2.3.3 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ – ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΞΟΝΩΝ.....	39
2.3.4 ΓΩΝΙΑ ΕΠΑΦΗΣ .....	40
2.3.5 ΒΑΘΜΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΣ Ή ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ .....	40
2.4 ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ .....	47

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....</b>	<b>50</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	50
3.2 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ (BEVEL GEARS).....	50
3.3 ΤΡΟΧΟΙ ΧΩΡΙΣ ΟΔΟΝΤΩΣΗ (GEAR BLANKS).....	51
3.4 ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΜΕ ΕΘΥΕΙΑ ΚΑΙ ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΣΗ (SPUS AND HELICAL GEARS).....	54
3.5 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	55
3.6 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	58
3.7 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	61
3.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	64
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....</b>	<b>65</b>
4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	65
4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD.....	65
4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ CAE.....	66
4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	67
4.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	68
4.4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	72
4.4.3 ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	85
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ.....</b>	<b>88</b>
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	88
5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΑΚΕΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ SOLIDWORKS.....	91
5.2.1 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS.....	91
5.2.2 ΜΗΤΡΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ.....	93
5.2.3 ΜΗΤΡΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ.....	96
5.2.4 ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ & ΥΛΙΚΑ.....	99
5.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ MARC.....	100
5.3.1 ΠΑΚΕΤΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ MSC MARC.....	100
5.3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ MARC ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	103
5.3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	105
5.3.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	107
5.3.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	110
5.3.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	114
5.3.7 ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (REMESHING).....	117
5.3.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΠΟΘΕΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	120
5.3.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	124
5.3.10 ΛΗΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	131
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>149</b>
6.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	149
6.1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	149
6.1.2 ΔΥΝΑΜΗ ΕΜΒΟΛΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΥΛΙΚΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.....	150
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	152
6.2.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	152
6.2.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	152
6.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	156
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ.....</b>	<b>157</b>
ΠΑ.1 ΧΑΛΥΒΑΣ AISI, H-13 (ΥΛΙΚΟ ΜΗΤΡΑΣ & ΕΜΒΟΛΟΥ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ).....	157
ΠΑ.2 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ).....	159
ΠΑ.3 ΧΑΛΚΟΣ (ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ).....	160

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....</b>	<b>162</b>
ΠΒ.1    ΕΞΑΕΔΡΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ 7 .....	162
ΠΒ.2    ΤΕΤΡΑΕΔΡΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ 157 .....	168
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ &amp; ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ .....</b>	<b>171</b>
ΠΓ.1    ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ .....	171
ΠΓ.2    ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ .....	171
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>172</b>
ΠΔ.1    ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	172
ΠΔ.2    ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	173
ΠΔ.3    ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ.....	179

**ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ****ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

Σχήμα 1.1: Κατεργασίες σφυρηλάτησης. (α) Κατεργασία τύπωσης νομισμάτων, (β) Διαμόρφωση κεφαλής ήλων και κοχλιών, (γ) Διάτρηση, (δ) Διαμόρφωση μορφοδοκού, (ε) Κατεργασία διαπλάτυνσης ή διάνοιξης πλήμνης, (στ) Διαμόρφωση άκρου .....	13
Σχήμα 1.2: Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας .....	14
Σχήμα 1.3: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) Διαδικασία πλήρωσης του καλουπιού, (β) Σφυρηλάτηση ακριβείας: (i) Απλής μορφής, (ii) Τυπικής μορφής, (iii) Near-net-shape. ....	16
Σχήμα 1.4: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή .....	17
Σχήμα 1.5: Αρχή λειτουργίας της περιστροφικής σφυρηλάτησης .....	17
Σχήμα 1.6: Σφύρες για σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας .....	19
Σχήμα 1.7: Σφύρες για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) και (β): Σφύρες πίπτουσας μάζας. ....	20
Σχήμα 1.8: Σφύρα για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. Ατμόσφουρα .....	21
Σχήμα 1.9: (α): Βασικά μέρη μιας μηχανικής πρέσας σφυρηλάτησης .....	22
Σχήμα 1.10: Βασικά μέρη μιας υδραυλικής πρέσας σφυρηλάτησης .....	23
Σχήμα 1.11: Μηχανές σφυρηλάτησης με κυλινδρικά ράουλα .....	24
Σχήμα 1.12: Χαρακτηριστική ορολογία στην κατασκευή καλουπιού σφυρηλάτησης. (α) Εγκάρσια διατομή τεμαχίου/καλουπιού (β) Τρισδιάστατη μορφή σφυρηλάτου τεμαχίου .....	25
Σχήμα 1.13: Διαμόρφωση εμβυθίσεων, νεύρων και κορμού .....	27

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

Σχήμα 2.1: Σχετική θέση αξόνων συνεργαζομένων τροχών .....	30
Σχήμα 2.2: 3-D μοντέλο ζεύγους εξωτερικών μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως ...	31
Σχήμα 2.3: 3-D μοντέλο ζεύγους εξωτερικών μετωπικών οδοντωτών τροχών .....	32
Σχήμα 2.4: 3-D μοντέλο ζεύγους κωνικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως .....	33
Σχήμα 2.5: Βαθμίδα ελικοειδών τροχών ασυμβάτων τροχών .....	34
Σχήμα 2.6: 3-D μοντέλο συστήματος ατέρμονος κοχλία – οδοντωτού τροχού .....	35
Σχήμα 2.7: Πάχος οδόντος .....	38
Σχήμα 2.8: Συνεργαζόμενες κατατομές .....	42
Σχήμα 2.9: Χαρακτηριστικά μεγέθη συνεργαζομένων τροχών .....	45
Σχήμα 2.10: Βαθμός επικάλυψης $\epsilon$ συναρτήσει της σχέσης μεταδόσεως $i_{12}$ βαθμίδας .....	47
Σχήμα 2.11: Δυνάμεις επί των οδόντων .....	48

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

Σχήμα 3.1: Κλασική τεχνολογία σφυρηλάτησης οδοντωτού τροχού .....	50
Σχήμα 3.2: Μήτρα σφυρηλάτησης γωνιακού οδοντωτού τροχού .....	51
Σχήμα 3.3: Γρανάζια με κενή την περιοχή οδόντωσης- νέα τεχνολογία .....	52
Σχήμα 3.4: Γρανάζια με κενή την περιοχή οδόντωσης- παραδοσιακή τεχνολογία .....	53
Σχήμα 3.5: Τυπική γραμμή σφυρηλάτησης για τροχούς χωρίς οδόντωση .....	53
Σχήμα 3.6: Τελείως κλειστή μήτρα σφυρηλάτησης τροχών με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση .....	54
Σχήμα 3.7: Οδοντωτός τροχός .....	55
Σχήμα 3.8: Οδοντωτός τροχός .....	55
Σχήμα 3.9: Εξοικονόμηση υλικού/ βάρους χρησιμοποιώντας τη σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος (ASM International 2005). ....	56
Σχήμα 3.10: Παράδειγμα σφυρηλάτου οδοντωτού τροχού ακριβείας σχεδόν καθαρού σχήματος (ASM International 2005). ....	58
Σχήμα 3.11: Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια σφυρηλάτησης .....	59
Σχήμα 3.12: Σχετική επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην ακρίβεια σφυρηλάτησης .....	59
Σχήμα 3.13: Σχηματική παράσταση της μεθόδου «σιδερώματος» .....	60
Σχήμα 3.14: Αντοχή σε κόπωση οδοντωτών τροχών .....	63
Σχήμα 3.15: Αντοχή σε κόπωση οδοντωτών τροχών .....	63



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

Σχήμα 4.1: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) δισδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα.....	70
Σχήμα 4.2: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.....	72
Σχήμα 4.3: Μέθοδος γένεσης κόμβων κατά Cavendish.....	73
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay.....	75
Σχήμα 4.5: Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson.....	76
Σχήμα 4.6: Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης.....	76
Σχήμα 4.7: Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα.....	77
Σχήμα 4.8: Μέθοδοι εκλέπτυνσης τριγώνων.....	78
Σχήμα 4.9: Τελεστές αποσύζευξης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις.....	79
Σχήμα 4.10: Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line).....	80
Σχήμα 4.11: Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.....	80
Σχήμα 4.12: Χρήση ορθογωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based”.....	81
Σχήμα 4.13: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.....	82
Σχήμα 4.14: Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree.....	83
Σχήμα 4.15: Υποδιαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου.....	84

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

Σχήμα 5.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση του οδοντωτού τροχού με το SOLIDWORKS.....	88
Σχήμα 5.2: Διάφορες όψεις του οδοντωτού τροχού με το SOLIDWORKS.....	89
Σχήμα 5.3: Συμμετρικό τμήμα οδοντωτού τροχού που θα προσομοιωθεί.....	89
Σχήμα 5.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχικού δοκιμίου με το SOLIDWORKS.....	90
Σχήμα 5.5: Συναρμογή κατασκευασμένη στο SOLIDWORKS.....	92
Σχήμα 5.6: Πολύπλοκη συναρμογή κατασκευασμένη στο SOLIDWORKS.....	92
Σχήμα 5.7: Σκαρίφημα μήτρας σφυρηλάτησης με κυλινδρικό έμβολο.....	93
Σχήμα 5.8: Τρισδιάστατη τομή της μήτρας σφυρηλάτησης με κυλινδρικό έμβολο.....	94
Σχήμα 5.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση της μήτρας σφυρηλάτησης με κυλινδρικό έμβολο.....	95
Σχήμα 5.10: Σκαρίφημα μήτρας σφυρηλάτησης με έμβολο μορφής γριναζιού.....	96
Σχήμα 5.11: Τρισδιάστατη τομή της μήτρας σφυρηλάτησης με έμβολο μορφής γριναζιού.....	97
Σχήμα 5.12: Τρισδιάστατη απεικόνιση της μήτρας σφυρηλάτησης με έμβολο μορφής γριναζιού.....	98
Σχήμα 5.13: Παράδειγμα σφυρηλάτησης με το πακέτο MSC MARC.....	101
Σχήμα 5.14: Παράδειγμα θλίψης με το πακέτο MSC MARC.....	102
Σχήμα 5.15: Γεωμετρία που έχει εισαχθεί από SOLIDWORKS και έχει επεξεργαστεί στο MSC MARC.....	103
Σχήμα 5.16: Εισαγωγή επιφανειών συμμετρίας στο ½ του δοντιού.....	104
Σχήμα 5.17: Πλέγμα εξαδρικών πεπερασμένων στοιχείων.....	105
Σχήμα 5.18: Επιλογή του Χαλκού ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών του MSC MARC.....	108
Σχήμα 5.19: Επιλογή του Αλουμινίου ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών του MSC MARC.....	109
Σχήμα 5.20: Ορισμός της μήτρας σφυρηλάτησης ως απαραμόρφωτο σώμα.....	110
Σχήμα 5.21: Ορισμός του εμβόλου ως απαραμόρφωτο σώμα.....	111
Σχήμα 5.22: Ορισμός της ταχύτητας του εμβόλου κατά τον άξονα Z.....	111
Σχήμα 5.22: Ορισμός της πρώτης επιφάνειας συμμετρίας ως συμμετρικό σώμα.....	112
Σχήμα 5.23: Ορισμός της δεύτερης επιφάνειας συμμετρίας ως συμμετρικό σώμα.....	112
Σχήμα 5.24: Ορισμός του κυλινδρικού δοκιμίου ως παραμορφώσιμο σώμα.....	112
Σχήμα 5.26: Πλήρη στοιχεία του μοντέλου.....	113
Σχήμα 5.27: Ορισμός του πίνακα επαφών μεταξύ των στοιχείων.....	114
Σχήμα 5.28: Ορισμός της επαφής μεταξύ του εμβόλου και του δοκιμίου.....	115
Σχήμα 5.29: Ορισμός της επαφής μεταξύ της μήτρας και του δοκιμίου.....	115
Σχήμα 5.30: Ορισμός της επαφής μεταξύ του δοκιμίου και της 1 <sup>ης</sup> επιφάνειας συμμετρίας.....	116
Σχήμα 5.31: Ορισμός της επαφής μεταξύ του δοκιμίου και της 2 <sup>ης</sup> επιφάνειας συμμετρίας.....	116
Σχήμα 5.32: Σκαρίφημα του πεπερασμένου στοιχείου τύπου 157.....	117

Σχήμα 5.33: Επιλογή της επαναδημιουργίας πλέγματος με Patran Tetra .....	118
Σχήμα 5.34: Κριτήρια & παράμετροι επαναδημιουργίας πλέγματος Patran Tetra .....	119
Σχήμα 5.35: Επιλογές για προχωρημένους στα κριτήρια του Remeshing .....	119
Σχήμα 5.36: Επιλογές για προχωρημένους στις παραμέτρους του Remeshing .....	119
Σχήμα 5.37: Ορισμός της υπόθεσης φόρτισης στο μοντέλο .....	120
Σχήμα 5.38: Ορισμός των ιδιοτήτων της υπόθεσης φόρτισης .....	121
Σχήμα 5.39: Ορισμός του πίνακα επαφών .....	121
Σχήμα 5.40: Ορισμός της επαναδημιουργίας πλέγματος Patran Tetra .....	122
Σχήμα 5.41: Ορισμός επιλογών του ελέγχου επίλυσης .....	122
Σχήμα 5.42: Ορισμός επιλογών των κριτηρίων σύγκλισης .....	123
Σχήμα 5.43: Ορισμός αριθμητικών επιλογών .....	123
Σχήμα 5.44: Ορισμός της διεργασίας στο μοντέλο .....	124
Σχήμα 5.45: Ορισμός επιλογών της διεργασίας στο μοντέλο .....	125
Σχήμα 5.46: Ορισμός του μοντέλου τριβής .....	125
Σχήμα 5.47: Ορισμός των αρχικών συνθηκών επαφής .....	126
Σχήμα 5.48: Ορισμός των επιλογών της κατασκευαστικής ανάλυσης .....	126
Σχήμα 5.49: Ορισμός των αποτελεσμάτων της διεργασίας .....	127
Σχήμα 5.50: Ορισμός των παραμέτρων της διεργασίας .....	128
Σχήμα 5.51: Ορισμός τύπου των πεπερασμένων στοιχείων .....	129
Σχήμα 5.52: Ορισμός των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων .....	129
Σχήμα 5.53: Ορισμός των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων .....	130
Σχήμα 5.54: Ορισμός των γραφικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης .....	131
Σχήμα 5.55: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (1064 στοιχεία) .....	132
Σχήμα 5.56: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 1 (4528 στοιχεία) .....	133
Σχήμα 5.57: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 50 (5855 στοιχεία) .....	134
Σχήμα 5.58: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 100 (9077 στοιχεία) .....	135
Σχήμα 5.59: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 150 (7671 στοιχεία) .....	136
Σχήμα 5.60: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 200 (7819 στοιχεία) .....	137
Σχήμα 5.61: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 233 (8733 στοιχεία) .....	138
Σχήμα 5.62: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (1064 στοιχεία) .....	139
Σχήμα 5.63: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 1 (4590 στοιχεία) .....	140
Σχήμα 5.64: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 50 (7733 στοιχεία) .....	141
Σχήμα 5.65: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 100 (7821 στοιχεία) .....	142
Σχήμα 5.66: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 150 (8026 στοιχεία) .....	143
Σχήμα 5.67: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 200 (8994 στοιχεία) .....	144
Σχήμα 5.68: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 233 (10387 στοιχεία) .....	145
Σχήμα 5.69: Δύναμη εμβόλου κατά τον άξονα Z .....	146
Σχήμα 5.70: Δύναμη εμβόλου κατά τον άξονα Z .....	147
Σχήμα 5.71: Σύγκριση δυνάμεων εμβόλου κατά τον άξονα Z .....	148

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σχήμα 6.1: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει του χρόνου για όλες τις προσομοιώσεις του αλουμινίου .....	150
Σχήμα 6.2: Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει του χρόνου για όλες τις προσομοιώσεις του χαλκού .....	151
Σχήμα 6.3: Απεικόνιση της τελικής μορφής των οδοντωτών τροχών με έμφαση στα άνω και κάτω τμήματα για αλουμίνιο με $\mu_1 = 0.1$ .....	154
Σχήμα 6.3: Διάγραμμα μεταβολής του όγκου του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου για το αλουμίνιο με $\mu_1 = 0.1$ .....	155

**ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ****ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1****ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

Πίνακας 2.1: Τυποποιημένες τιμές του module m σε mm για οδόντες δι' εξειλιγμένης..... 36

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

Πίνακας 3.1: Αλλαγές στην ακρίβεια των τροχών με τη χρήση «σιδερώματος» ..... 61

Πίνακας 3.2: Αντοχή σε κρούση οδοντωτών τροχών ..... 62

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4****ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά του υπό κατασκευή οδοντωτού τροχού ..... 88

Πίνακας 5.2: Επιμέρους στοιχεία της μήτρας σφυρηλάτησης με κυλινδρικό έμβολο ..... 94

Πίνακας 5.3: Επιμέρους στοιχεία της μήτρας σφυρηλάτησης με έμβολο μορφής γριναζιού ..... 97

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

Πίνακας 6.1: Βασικά στοιχεία κατά την επίλυση των προσομοιώσεων ..... 149

Πίνακας 6.2: Βασικά στοιχεία κατά την επίλυση των προσομοιώσεων ..... 153

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

### 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η σφυρηλάτηση είναι μια από τις σημαντικότερες κατεργασίες του συμπαγούς υλικού. Η πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου επιτυγχάνεται με την άσκηση θλιπτικών φορτίων από το εργαλείο σφυρηλάτησης. Εφαρμόζεται σε μεγάλη ποικιλία μεγέθους και σχήματος τεμαχίων και από ποικιλία υλικών. Τυπικά σφυρήλατα προϊόντα είναι: εκκεντροφόροι άξονες, διωστήρες, χειροτροχοί, οδοντωτοί τροχοί, ήλοι, εργαλεία χειρός, πτερύγια ελίκων κλπ. Επίσης μπορούν να πραγματοποιηθούν διάφορες διαμορφώσεις, διάτρηση και εξειδικευμένες κατεργασίες. (Σχήμα 1.1)

Δυνατότητα σφυρηλάτησης (Forgability) ενός μετάλλου είναι η δυνατότητά του να παραμορφώνεται πλαστικά σε ορισμένη θερμοκρασία και ταχύτητα παραμόρφωσης. Για τον συνολικό χαρακτηρισμό της κατεργασιμότητας συνεκτιμώνται οι εξής ιδιότητες του προς κατεργασία υλικού: ολκιμότητα, αντοχή, απαιτούμενη θερμοκρασία κατεργασίας, συμπεριφορά έναντι τριβής και ποιότητα του τελικού προϊόντος. Την υψηλότερη κατεργασιμότητα παρουσιάζουν τα κράματα Al, Mg, Cu ακολουθούν οι ελαφρά κραματωμένοι ανθρακοχάλυβες, οι ανοξειδωτοί χάλυβες και κράματα Ti ενώ μικρή κατεργασιμότητα έχουν τα κράματα Ni, W και Be.

### 1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Η σφυρηλάτηση λαμβάνει χώρα εν ψυχρώ και σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Μια χονδρική ταξινόμηση βάση της θερμοκρασίας κατεργασίας (όπου  $T_m$  το σ.τ. του κατεργαζόμενου υλικού) είναι η παρακάτω:

*Ψυχρή σφυρηλάτηση:*  $T < 0,3T_m$

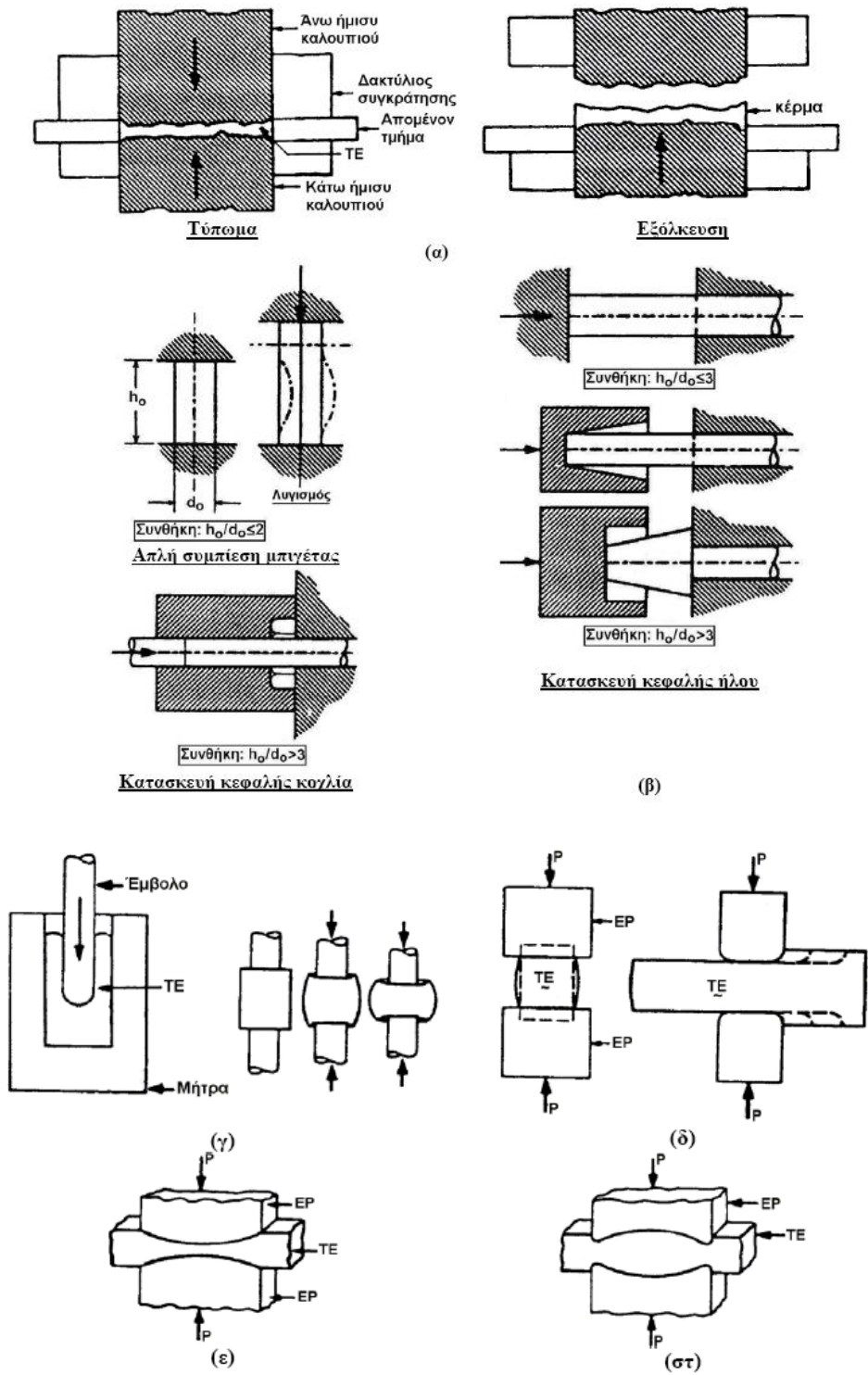
*Θερμή σφυρηλάτηση:*  $T > 0,5T_m$

*Ημίθερμη σφυρηλάτηση:*  $0,3T_m < T < 0,5T_m$

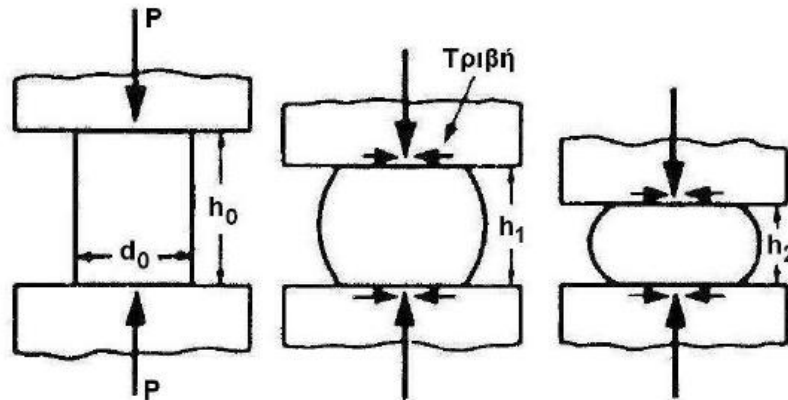
Μια διαφορετική ταξινόμηση των κατεργασιών σφυρηλάτησης με βάση τον τύπο (τη διάταξη) της κατεργασίας είναι η ακόλουθη:

1.2.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (OPEN-DIE FORGING)

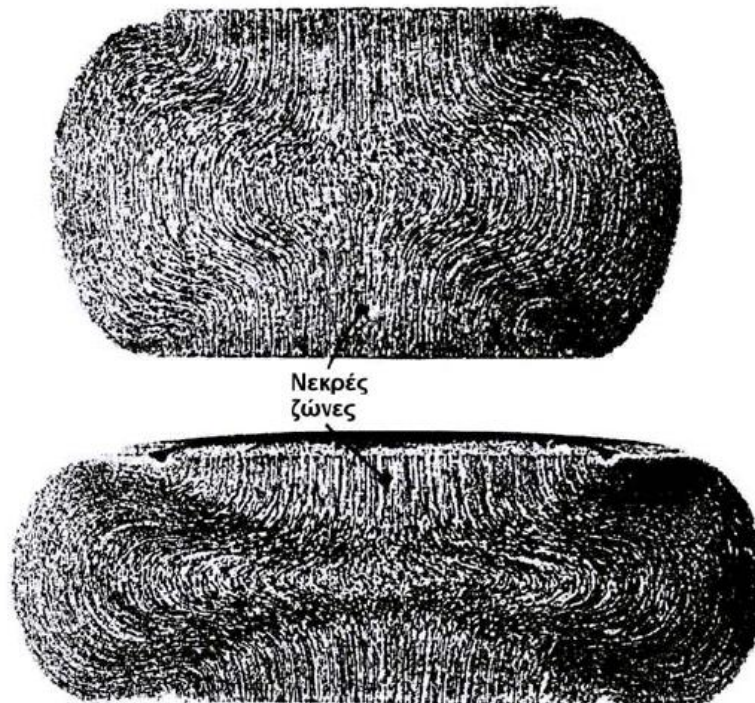
Στη σφυρηλάτηση ανοιχτής μήτρας οι δυνάμεις συμπίεσης παράγονται από εργαλεία χειρός ή μηχανικές σφύρες και ασκούνται τοπικά στο τεμάχιο (Σχήμα 1.2).



**Σχήμα 1.1:** Κατεργασίες σφυρηλάτησης. (α) Κατεργασία τύπωσης νομισμάτων, (β) Διαμόρφωση κεφαλής ήλων και κοχλιών, (γ) Διάτρηση, (δ) Διαμόρφωση μορφοδοκού, (ε) Κατεργασία διαπλάτυνσης ή διάνοιξης πλήμνης, (στ) Διαμόρφωση άκρου



Σχηματική παράσταση σφυρηλάτησης ανοικτής μήτρας



Ροή του υλικού κατά τη σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας

Σχήμα 1.2: Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας

Επίσης απουσιάζει ή περιορίζεται σε πολύ μικρή έκταση η πλευρική συγκράτηση της ροής του μετάλλου. Το επιθυμητό σχήμα αποδίδεται στο τεμάχιο με απλή μετακίνηση ή στροφή του μεταξύ διαδοχικών κυττημάτων. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου σφυρηλάτησης είναι ότι έχει απλά και φθηνά εργαλεία, είναι χρήσιμη για μικρή παραγωγή τεμαχίων αλλά για μεγάλη ποικιλία μεγεθών και αποδίδει χαρακτηριστικά καλής αντοχής στο τεμάχιο. Τα μειονεκτήματα του είναι ότι περιορίζεται σε απλές γεωμετρίες, η δυσκολία επίτευξης διαστασιακής ακρίβειας, είναι απαραίτητη η δευτερογενής κατεργασία για την

απόκτηση της τελικής μορφής του τεμαχίου, γίνεται σχετικά μικρή εκμετάλλευση του υλικού, έχει αργό ρυθμό παραγωγής και απαιτεί εμπειρία και τεχνική δεξιότητα σε μεγάλο βαθμό.

### **1.2.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (CLOSED-DIE FORGING)**

---

Σε αυτόν τον τύπο σφυρηλάτησης τα θλιπτικά φορτία που παράγονται από σφύρες ή πρέσες ασκούνται σε όλη την επιφάνεια του θερμαινόμενου μετάλλου. (Σχήμα 1.3(α)). Το κατεργαζόμενο υλικό παραμορφώνεται πλαστικά μέσα σε ειδικά διαμορφωμένο καλούπι (μήτρα, die) και καταλαμβάνει όλη τη διαθέσιμη κοιλότητα που έχει γεωμετρία και διαστάσεις ανάλογες με αυτές του τελικού τεμαχίου. Ανάλογα με την ακρίβεια των διαστάσεων που αποδίδει στο τελικό προϊόν, χαρακτηρίζεται και η αντίστοιχη κατεργασία κλειστής μήτρας, (Σχήμα 1.3(β)). Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου σφυρηλάτησης είναι ότι κάνει καλή εκμετάλλευση του υλικού, δίνει καλλίτερες ιδιότητες τεμαχίου από εκείνες της σφυρηλάτησης ανοιχτής μήτρας, καλύτερη προσέγγιση των διαστάσεων του τεμαχίου, έχει ταχύ ρυθμό παραγωγής και καλή παραγωγικότητα. Τα μειονεκτήματα του είναι ότι έχει υψηλό κόστος εργαλείων για μικρές ποσότητες παραγωγής και δεν αποκλείει δευτερογενείς κατεργασίες του τεμαχίου.

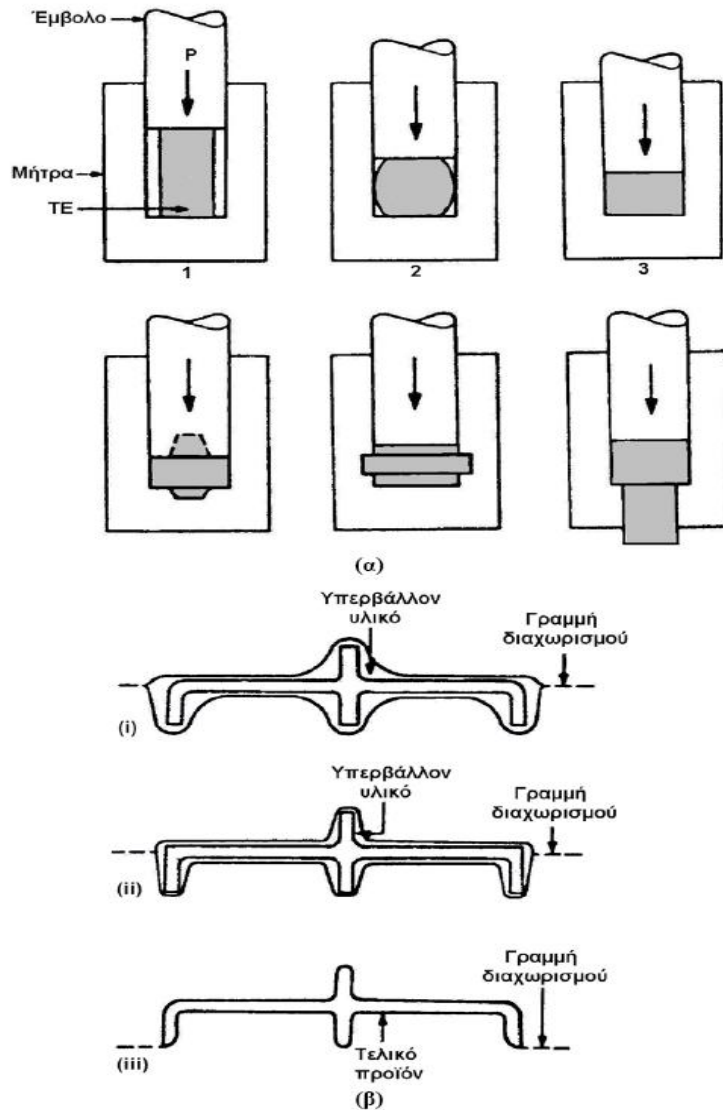
### **1.2.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΞΟΧΗ (IMPRESSION-DIE FORGING)**

---

Πρόκειται για παραλλαγή της σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας, (Σχήμα 1.4). Το υλικό του τεμαχίου είναι σε ποσότητα μεγαλύτερη από τον διατιθέμενο όγκο της κοιλότητας του καλουπιού, οπότε μέρος του υλικού εξέρχεται σε σχετικά αρχικό στάδιο ως προεξοχή ή προέκταμα (flash) μεταξύ των δύο μερών του καλουπιού έξω από την κοιλότητα αυτού, όπου και παραμορφώνεται.

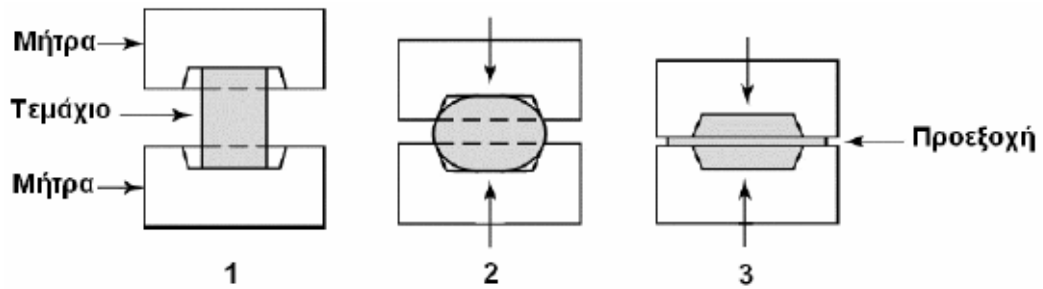
Στη ψυχρή σφυρηλάτηση, λόγω του μεγάλου λόγου μήκος/πάχος στην περιοχή της προεξοχής, αναπτύσσονται εκεί υψηλές κάθετες τάσεις (πιέσεις) και κατά συνέπεια μεγάλη αντίσταση τριβής στην ροή του υλικού προς τα έξω. Το υπόλοιπο υλικό μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού, αφού παρεμποδίζεται να κινηθεί προς τα έξω αναγκάζεται να κινηθεί προς άλλες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα την ασφαλή πλήρωση της κοιλότητας.

Στη θερμή σφυρηλάτηση, λόγω του μεγάλου λόγου επιφάνεια/πάχος στην περιοχή της προεξοχής, αυτή λειτουργεί ως περύγιο, το οποίο σύμφωνα με τις αρχές μετάδοσης θερμότητας αποψύχεται ταχύτερα από το υπόλοιπο υλικό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της αντίστασης του υλικού προς περαιτέρω παραμόρφωση στην περιοχή της προεξοχής και ο εξαναγκασμός της ροής του υπόλοιπου υλικού να κινηθεί μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού.



**Σχήμα 1.3:** Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) Διαδικασία πλήρωσης του καλουπιού, (β) Σφυρηλάτηση ακριβείας: (i) Απλής μορφής, (ii) Τυπικής μορφής, (iii) Near-net-shape.

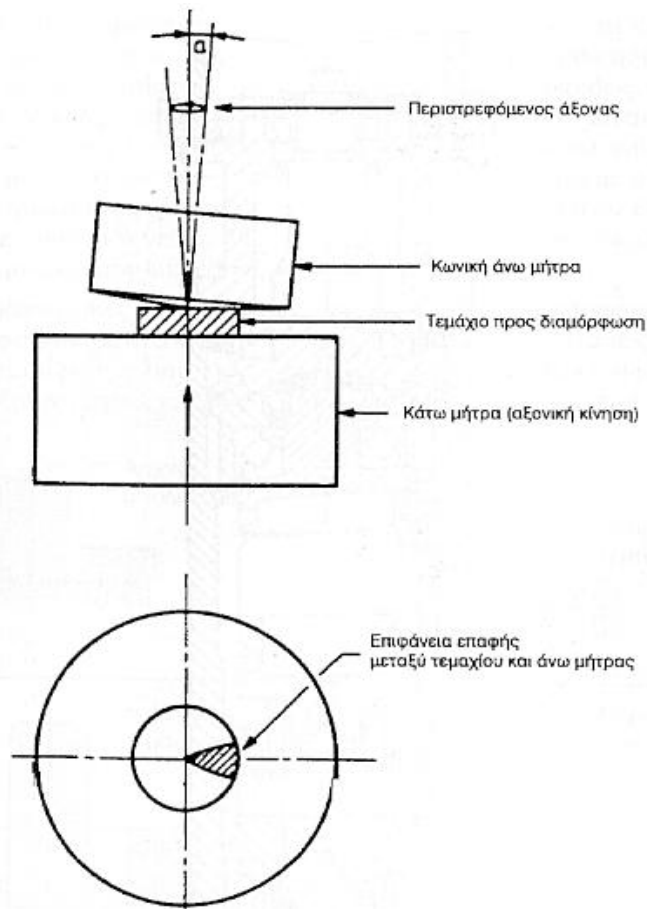




Σχήμα 1.4: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή

### 1.2.4 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

Η περιστροφική σφυρηλάτηση αποτελεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, μια περαιτέρω βελτίωση της συμβατικής σφυρηλάτησης. Η αρχή λειτουργίας της φαίνεται διαγραμματικά στο σχήμα 1.5 όπου το αντικείμενο, αντί να διαμορφωθεί σε μια συμβατική πρέσα ή σφύρα, υπόκειται σε ένα συνδυασμό περιστροφής και συμπίεσης μεταξύ μιας επίπεδης κάτω πλάκας και μιας ταλαντευόμενης άνω μήτρας με κωνική επιφάνεια επαφής.



Σχήμα 1.5: Αρχή λειτουργίας της περιστροφικής σφυρηλάτησης

### 1.3 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

---

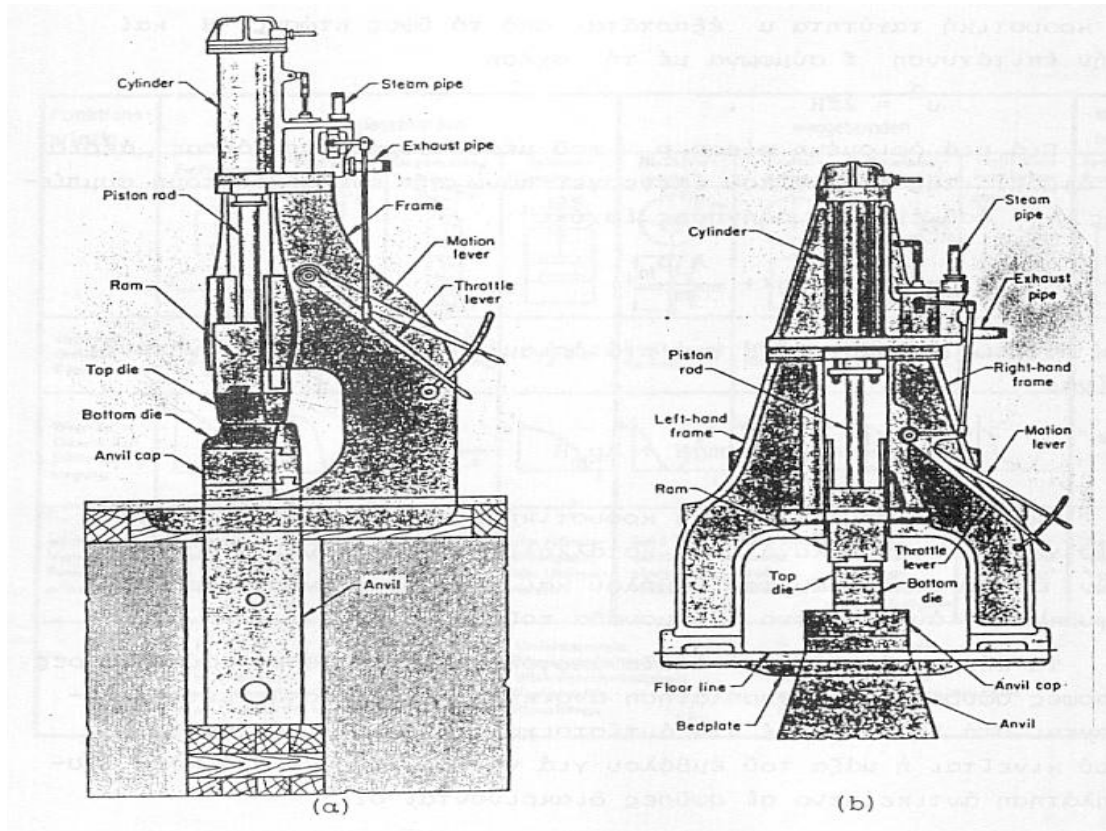
Μέχρι περίπου το 1820 η σφυρηλάτηση ήταν κυρίως αντικείμενο του σιδηρουργού. Η χρήση των εργαλείων χειρός (σφύρα και αμόνι) αντικαταστάθηκε σήμερα από μηχανικά μέσα που εκτελούν την κατεργασία σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα είχε ήδη αναπτυχθεί όχι μόνο η κατασκευή των σφυρών, αλλά και η κατασκευή διαφόρων άλλων μηχανών ισχύος για σιδηρουργεία. Σήμερα η σφυρηλάτηση πραγματοποιείται σε σφύρες και πρέσες (μηχανικές και υδραυλικές) οι οποίες ανάλογα με τη διάταξη των εργαλείων χρησιμοποιούνται σε σφυρηλάτηση ανοικτής ή κλειστής μήτρας. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή αυτών των μηχανών.

#### 1.3.1 ΣΦΥΡΕΣ

---

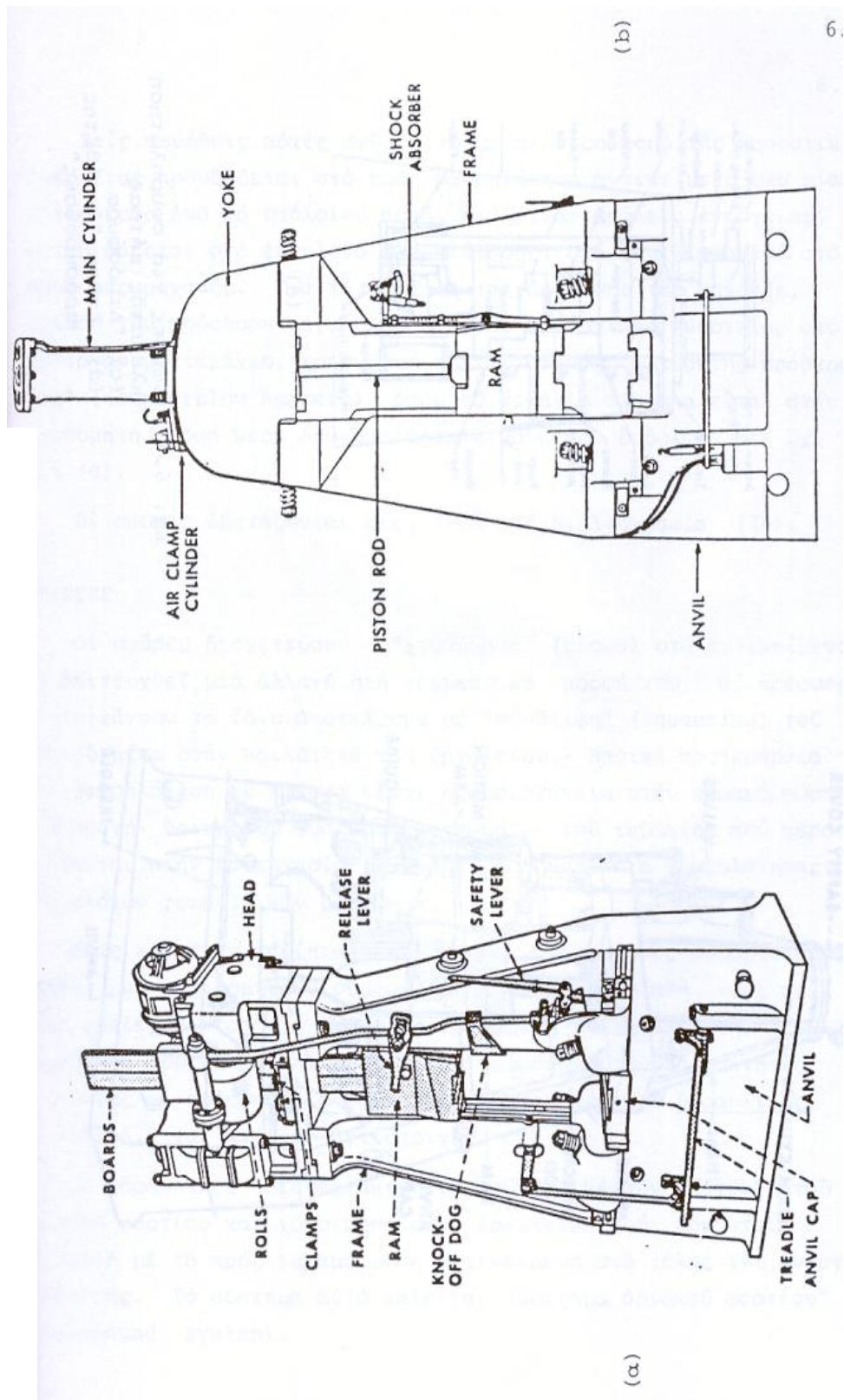
Οι σφύρες είναι μηχανές με κύριο χαρακτηριστικό την παραγόμενη κρουστική ενέργεια (energy bound) που το μεγαλύτερο μέρος της προσδίδεται στο προς σφυρηλάτηση αντικείμενο με τη μορφή πλαστικού έργου. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται μια σφύρα και διάφορες μορφές σφυρών για σφυρηλάτηση ανοικτής και κλειστής μήτρας δίνονται στα σχήματα 1.6, 1.7 και 1.8. Ανάλογα με τον τρόπο που κινείται η μάζα του εμβόλου για να προσκρούσει στο προς σφυρηλάτηση αντικείμενο οι σφύρες διακρίνονται σε:

- Σφύρες πίπτουσας μάζας, σχήμα 1.7 (α) και (b), που η ανύψωση της μάζας στο επιθυμητό ύψος επιτυγχάνεται είτε μηχανικά, είτε πνευματικά με πεπιεσμένο αέρα.
- Αερόσφυρες ή Ατμόσφυρες που η μάζα επιταχύνεται μέσω πεπιεσμένου αέρα, αερίου ή ατμού. σχήμα 1.6 (α) και (b) και Σχήμα 1.8.

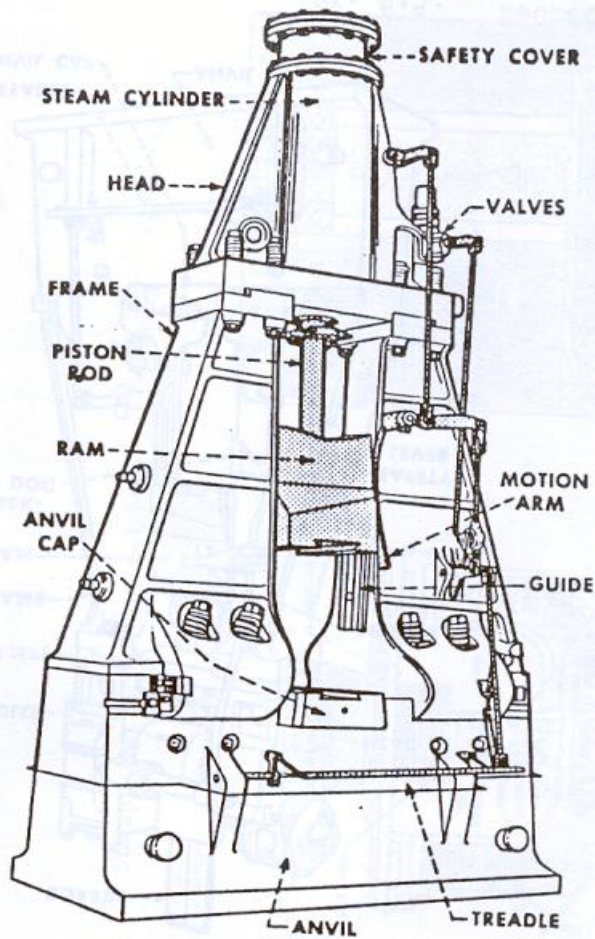


**Σχήμα 1.6:** Σφύρες για σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας

Στις συνήθεις αυτές σφύρες το μεγαλύτερο ποσό της κρουστικής ενέργειας προσδίδεται στο προς σφυρηλάτηση αντικείμενο σαν πλαστικό έργο ενώ το υπόλοιπο ποσό, που είναι απώλεια ενέργειας, μεταβιβάζεται στο εργαλείο σφυρηλάτησης, στη θεμελίωση και στο σώμα της μηχανής. Για την αύξηση της απόδοσης της μηχανής, δηλαδή την πρόσδοση μεγαλύτερου ποσού κρουστικής ενέργειας στο κατεργάσιμο τεμάχιο, χρησιμοποιούνται σφύρες «αντίθετης πρόσκρουσης» (counterblow hammers) όπου το τεμάχιο σφυρηλατείται στην επιθυμητή μορφή μέσω δυο αντίθετα κινουμένων εμβόλων.



Σχήμα 1.7: Σφύρες για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) και (β): Σφύρες πίπτουσας μάζας.



(c)

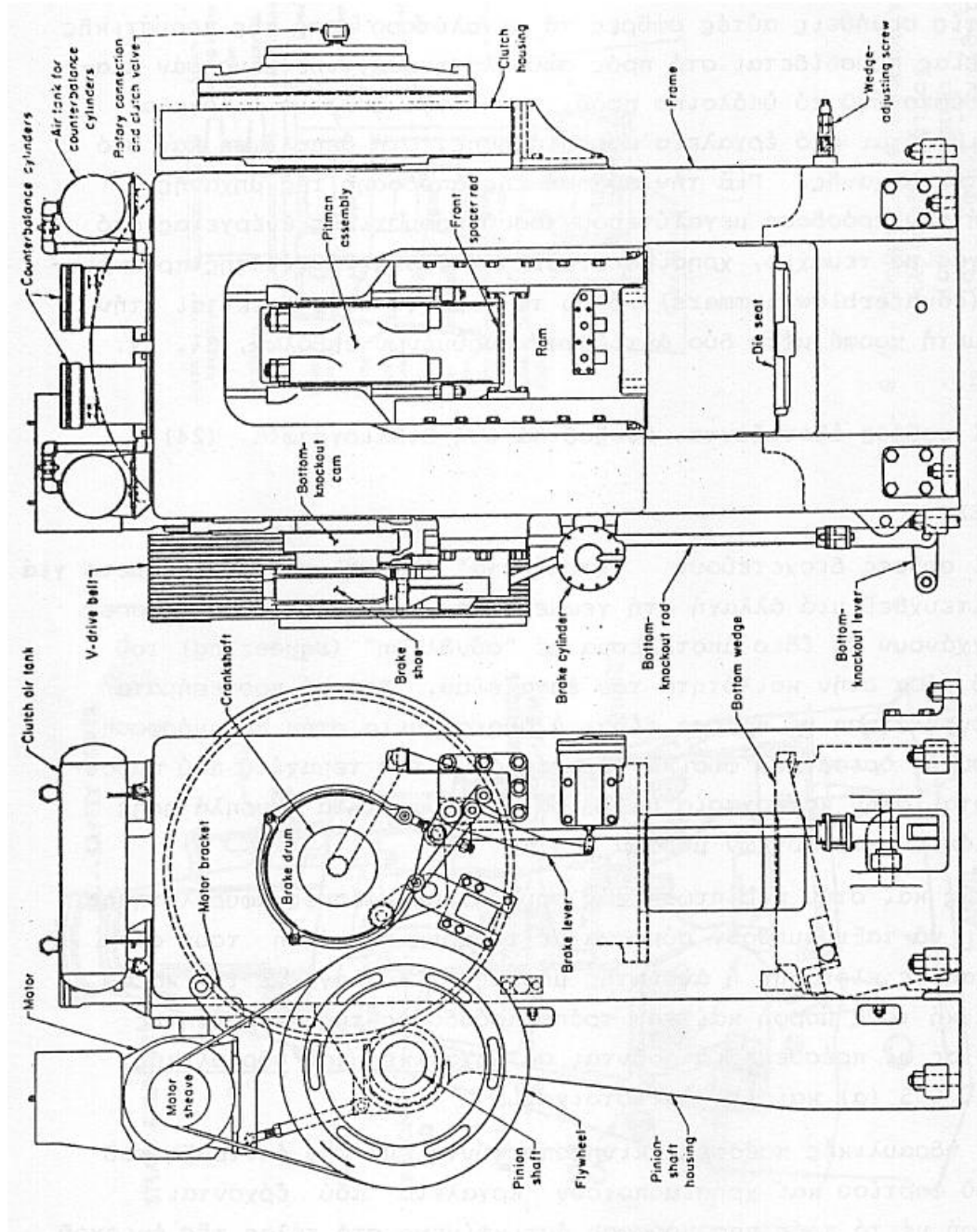
**Σχήμα 1.8:** Σφύρα για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. Ατμόσφουρα

### 1.3.2 ΠΡΕΣΕΣ

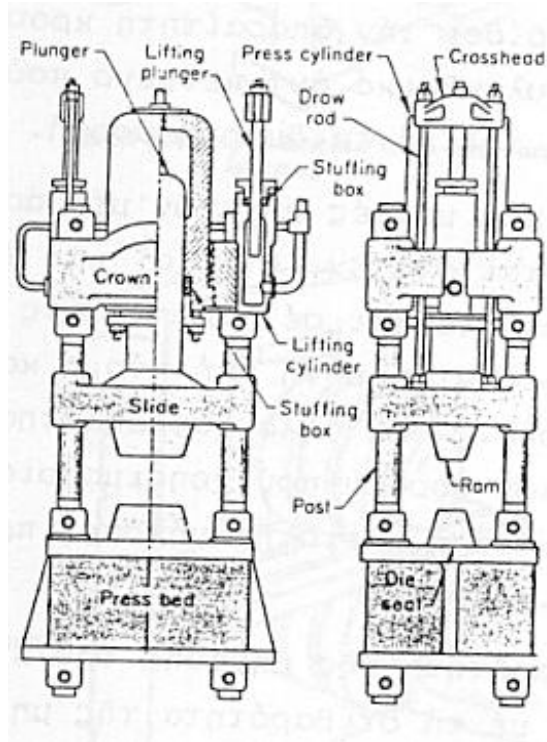
Οι σφύρες διοχετεύουν «χτυπήματα» (blows) στο αντικείμενο για να επιτευχθεί μια αλλαγή στη γεωμετρική μορφή του. Οι πρέσες επιτυγχάνουν το ίδιο αποτέλεσμα με «σύνθλιψη» (squeezing) του υλικού μέσα στην κοιλότητα του εργαλείου. Βασικά προτερήματα στη σφυρηλάτηση με πρέσα είναι η ομοιογένεια στην παραμόρφωση, η αποφυγή ορισμένων φυσικών ελαττωμάτων του τεμαχίου που παρουσιάζονται στην κατεργασία με σφύρα, η δυνατότητα σφυρηλάτησης πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών κλπ.

Όπως και στην περίπτωση των σφυρών, οι πρέσες σφυρηλάτησης μπορεί να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη χρησιμοποίησή τους σε κατεργασίες ανοικτής ή κλειστής

μήτρας. Ανάλογα με την κατασκευαστική τους μορφή και τον τρόπο πρόσδοσης της απαραίτητης ενέργειας οι πρέσες διαιρούνται σε μηχανικές και υδραυλικές, σχήμα 1.9 (α) και (β) αντίστοιχα.



Σχήμα 1.9: (α): Βασικά μέρη μιας μηχανικής πρέσας σφυρηλάτησης



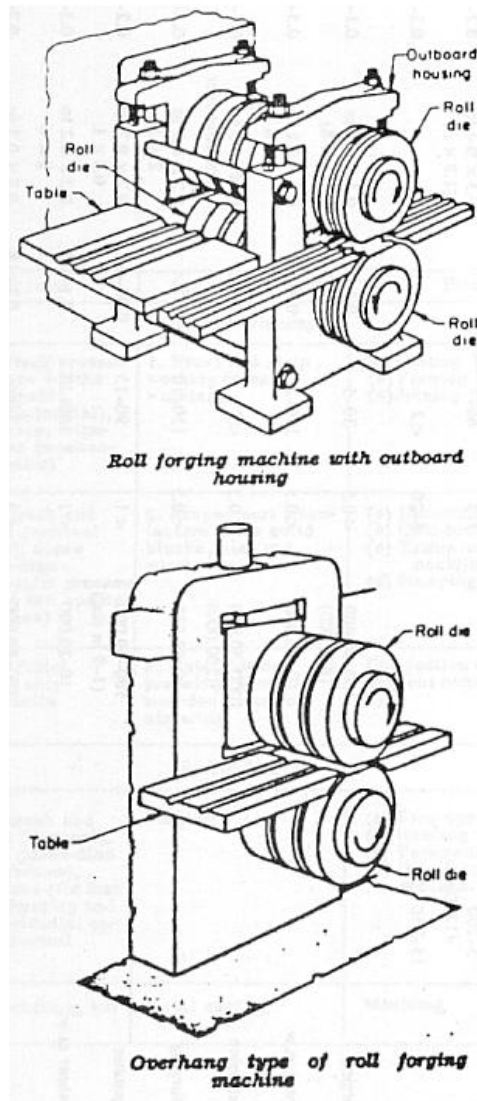
**Σχήμα 1.10:** Βασικά μέρη μιας υδραυλικής πρέσας σφυρηλάτησης

Οι υδραυλικές πρέσες ακινητοποιούνται με την επίτευξη του οριακού φορτίου και χρησιμοποιούν εργαλεία που έρχονται σε επαφή με το προς παραμόρφωση αντικείμενο στο τέλος της ενεργού διαδρομής. Το σύστημα αυτό καλείται «σύστημα οριακού φορτίου» (load-bound system).

Οι μηχανικές πρέσες (εκτός από τις πρέσες με κοχλία τριβής) έχουν μια προκαθορισμένη διαδρομή και αναπτύσσουν μια άπειρη δύναμη στο τέλος της διαδρομής. Το σύστημα αυτό καλείται «σύστημα οριακής διαδρομής» (stroke-bound system).

### 1.3.3 ΑΛΛΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Εκτός από τις δύο βασικές κατηγορίες σφυρηλάτησης κλειστής και ανοιχτής μήτρας, στην πράξη χρησιμοποιούνται η οριζόντια σφυρηλάτηση και η σφυρηλάτηση με ράουλα. Αντιπροσωπευτικές μορφές μηχανών με ράουλα για τη σφυρηλάτηση τεμαχίου φαίνονται στο σχήμα 1.11. Στην οριζόντια σφυρηλάτηση χρησιμοποιούνται σφύρες όπου το έμβολο κινείται οριζόντια και προσδίδει την απαραίτητη κρουστική ενέργεια στο προς σφυρηλάτηση κυλινδρικό αντικείμενο που σε μία διαδοχή φάσεων διαμορφώνεται στην τελική επιθυμητή μορφή.

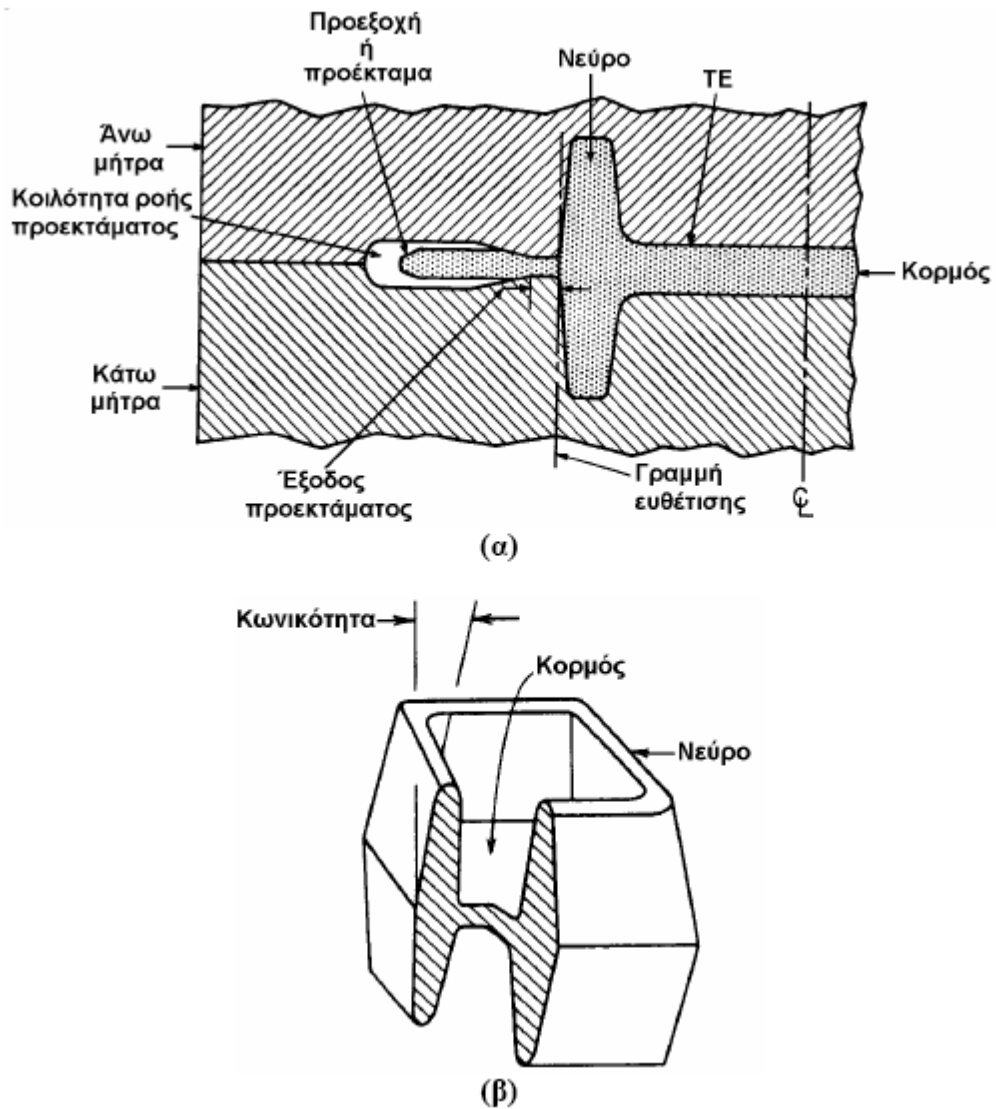


Σχήμα 1.11: Μηχανές σφυρηλάτησης με κυλινδρικά ράουλα

#### 1.4 ΕΡΓΑΛΕΙΑ (ΚΑΛΟΥΠΙΑ) ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Τα καλούπια σφυρηλάτησης κατασκευάζονται κατεξοχήν διμερή. Διακρίνουμε λοιπόν το άνω τμήμα και το κάτω τμήμα του καλουπιού. Οι κανόνες κατασκευής του καλουπιού αποβλέπουν αφενός στη διευκόλυνση της ροής του κατεργάσιμου υλικού και αφετέρου στην ευχερή απομάκρυνση του τεμαχίου από το καλούπι. Επομένως, η γεωμετρία του τεμαχίου σε κάθε φάση κατεργασίας (πάσο) παίζει πολύ ιδιαίτερο ρόλο στο σχεδιασμό του καλουπιού. Βάση των κατασκευαστικών στοιχείων που συναντώνται στα περισσότερα σφυρήλατα τεμάχια εισάγεται η ορολογία που περιγράφεται στο σχήμα 1.12.





**Σχήμα 1.12:** Χαρακτηριστική ορολογία στην κατασκευή καλουπιού σφυρηλάτησης. (α) Εγκάρσια διατομή τεμαχίου/καλουπιού (β) Τρισδιάστατη μορφή σφυρήλατου τεμαχίου

## 1.5 ΣΗΜΑΣΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Παρακάτω επισημαίνεται η σημασία διαφόρων παραμέτρων στο σχεδιασμό των καλουπιών.

### 1.5.1 ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ

Σε αυτή συναντιούνται τα δύο τμήματα του καλουπιού. Η μορφή και η θέση της γραμμής διαχωρισμού είναι το πιο σημαντικό θέμα στο σχεδιασμό σφυρήλατων τεμαχίων. Η

γραμμή διαχωρισμού μπορεί να είναι ευθεία (συμμετρικές μορφές σφυρήλατων) ή τεθλασμένη στον χώρο (πολύπλοκες γεωμετρικές μορφές). Εκτός από την προφανή ανάγκη εύκολης απομάκρυνσης του τεμαχίου από το καλούπι, επιδιώκεται η γραμμή διαχωρισμού να κείται σε ένα επίπεδο, να διευκολύνει τη ροή του υλικού, να μην οδηγεί σε ανισοζύγιο δυνάμεων στα τμήματα του καλουπιού και να εξασφαλίζει αποτελεσματικό προέκταμα.

### 1.5.2 ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ

---

Ο ρόλος της κωνικότητας είναι πρωταρχικά η διευκόλυνση απομάκρυνσης του σφυρήλατου από τη μήτρα και σε ορισμένες περιπτώσεις η επίτευξη της επιθυμητής ροής υλικού.

### 1.5.3 ΝΕΥΡΑ

---

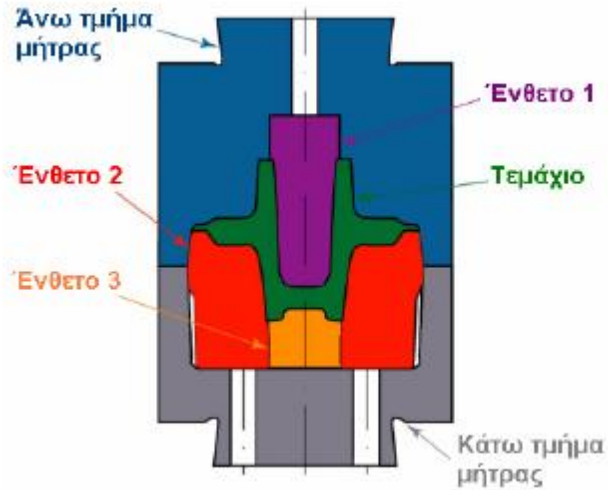
Τα νεύρα είναι τμήματα του σφυρήλατου τεμαχίου που κείνται κάθετα προς το επίπεδο της γραμμής διαχωρισμού. Στην κοινή πρακτική συνιστάται να αποφεύγονται ογκώδη νεύρα διότι οδηγούν σε υπέρβαρα τεμάχια. Υπάρχουν όμως περιορισμοί σε αυτή την επιδίωξη που υπαγορεύονται από τις συνθήκες κατεργασίας, την γεωμετρία του τεμαχίου, τη θέση και διάταξη της γραμμής διαχωρισμού και την ολκιμότητα του κατεργάσιμου υλικού.

### 1.5.4 ΕΜΒΥΘΙΣΕΙΣ – ΚΟΡΜΟΙ - ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΕΣ

---

Ο σχηματισμός εμβυθίσεων στο κατεργάσιμο υλικό επιδιώκεται στα αρχικά και ενδιάμεσα στάδια κατεργασίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ένθετα στοιχεία μέσα στο καλούπι που δρουν σαν είδος εμβόλου τοπικά (σχήμα 1.13). Οι εμβυθίσεις αυτές οδηγούν με τη σειρά τους στο σχηματισμό κορμών και νεύρων.

Οι καμπυλότητες στα άκρα των νεύρων και των κορμών πρέπει να εξασφαλίζουν την αύξηση της διάρκειας ζωής του καλουπιού, αφενός με διευκόλυνση της ροής του υλικού μέσα στο καλούπι και αφετέρου με εξασφάλιση απρόσκοπτης απομάκρυνσης του τεμαχίου από το καλούπι.



Σχήμα 1.13: Διαμόρφωση εμβυθίσεων, νεύρων και κορμού

### 1.5.5 ΠΡΟΕΚΤΑΜΑ

Συνιστώνται:

Τελικό πάχος προεκτάματος: ~3% του μέγιστου πάχους του σφυρήλατου τεμαχίου.

Μήκος εξόδου προεκτάματος: ~5πλάσιο του τελικού πάχους προεκτάματος.

### 1.5.6 ΥΛΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Επειδή οι περισσότερες σφυρηλατήσεις, και ειδικά οι μεγαλύτερου όγκου, πραγματοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, τα υλικά των καλουπιών πρέπει να έχουν αντοχή και δυσθραυστότητα στις θερμοκρασίες αυτές, εμβυθιότητα, αντίσταση σε μηχανικά και θερμικά σοκ, και αντίσταση σε φθορά- ειδικά σε φθορά λόγω τριβής.

Η επιλογή των υλικών των καλουπιών εξαρτάται από το μέγεθος, τη σύνθεση, τις ιδιότητες και την μορφή του τεμαχίου, τη θερμοκρασία σφυρηλάτησης, τον τύπο της κατεργασίας, το κόστος του υλικού του καλουπιού, τον αριθμό των πάσσων, τα θερμικά χαρακτηριστικά του υλικού. Συνήθη υλικά καλουπιών είναι εργαλειοχάλυβες που περιέχουν χρώμιο, νικέλιο, μολυβδαίνιο και βανάδιο.

## 1.6 ΑΛΛΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

---

### 1.6.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

---

Κράματα Al	400 – 450 °C
Κράματα Cu	625 – 950 °C
Χάλυβες	925 – 1250 °C
Κράματα Ti	750 – 975 °C
Δύστηκτα κράματα	975 – 1650 °C

### 1.6.2 ΛΙΠΑΝΣΗ

---

Η παρουσία του λιπαντικού, επηρεάζει θετικά την τριβή και τη φθορά στη διεπιφάνεια εργαλείου/τεμαχίου, διευκολύνει τη ροή του υλικού στην κοιλότητα του καλουπιού, αποτελεί θερμικό προστατευτικό στρώμα μεταξύ θερμού τεμαχίου και σχετικά ψυχρού καλουπιού, μειώνοντας έτσι το ρυθμό απόψυξης του τεμαχίου. Το λιπαντικό, παίζει επίσης το ρόλο διαχωριστικού μέσου που εμποδίζει το τεμάχιο να «κολλήσει» στο καλούπι.

Χρησιμοποιούμενα λιπαντικά στη θερμή σφυρηλάτηση είναι ο γραφίτης, το διθειώδες μολυβδαίνιο, ύαλος (στερεά λιπαντικά). Στη ψυχρή σφυρηλάτηση χρησιμοποιούνται σάπωνες και ορυκτέλαια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

---

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

---

Για την μετάδοση περιστροφικής κινήσεως και την μεταφορά ισχύος από κινητήρια σε κινούμενη άτρακτο, δηλαδή από την άτρακτο της κινητήριας μηχανής (ηλεκτροκινητήρας, μηχανή εσωτερικής καύσεως, αεριο-ατμο-υδρο-στρόβιλος κλπ.) στην άτρακτο της κινουμένης μηχανής (εργομηχανή) χρησιμοποιούνται, εκτός των άλλων μηχανικών (ιμάντες, αλυσίδες, σύνδεσμοι, κλπ.) ή υδραυλικών–πνευματικών κλπ. τρόπων, και διάφοροι συνδυασμοί οδοντωτών τροχών.

Οι οδοντωτοί τροχοί είναι στοιχεία μηχανών που επιτυγχάνουν μετάδοση κινήσεως και μεταφορά ισχύος με την κατάλληλη διαδοχική εμπλοκή συνεργαζομένων οδόντων. Οι οδόντες είναι αλληπάλληλες εσοχές και προεξοχές της επιφανείας ενός οδοντωτού τροχού, τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία του της εσοχής του ενός τροχού με την προεξοχή του συνεργαζομένου οδοντωτού τροχού.

Στους περισσότερους τύπους οδοντωτών τροχών οι οδόντες δεν είναι θεωρητικά απαραίτητοι για την μετάδοση περιστροφικής κινήσεως. Όμως, η ανάγκη μεταφοράς μεγάλης στρεπτικής ροπής (δηλαδή μεγάλης ισχύος) και σταθερής μεταδόσεως κινήσεως (δηλαδή σταθερών σχέσεων μεταδόσεως στροφών) από την κινητήρια στην κινούμενη άτρακτο καθιστά αναγκαία την ύπαρξη οδόντων.

## 2.2 ΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Οι άξονες περί τους οποίους περιστρέφονται δύο συνεργαζόμενοι οδοντωτοί τροχοί μπορεί να είναι:

- παράλληλοι σε απόσταση  $\alpha$
- τεμνόμενοι υπό γωνία  $\delta$
- ασύμβατοι σε απόσταση  $\alpha$  και υπό γωνία  $\delta$

όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1:** Σχετική θέση αξόνων συνεργαζόμενων τροχών

Η σχετική θέση των αξόνων αυτών είναι βασικής σημασίας για την μορφή των τροχών που θα χρησιμοποιηθούν. Έτσι οι τροχοί μπορεί να είναι:

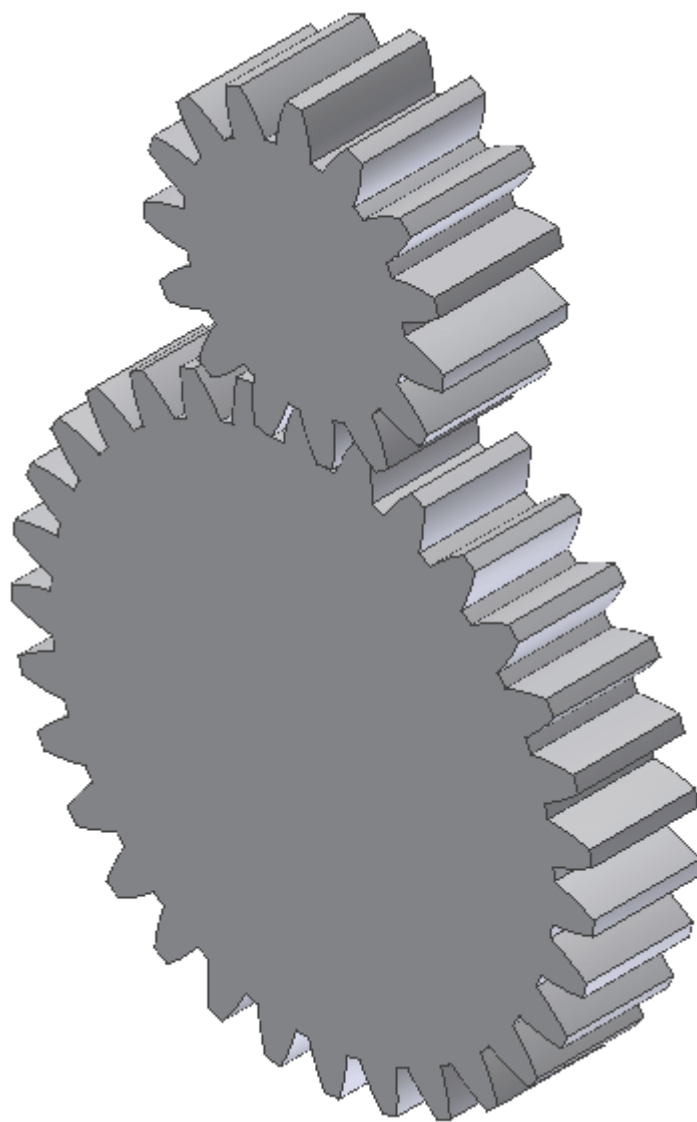
- Μετωπικοί (με ευθείς ή ελικοειδείς οδόντες) οι οποίοι ονομάζονται και κυλινδρικοί
- Κωνικοί
- Ελικοειδείς ασύμβατων αξόνων
- Σύστημα ατέρμονα κοχλία – οδοντωτού τροχού

όπως αναλυτικότερα παρουσιάζονται παρακάτω.

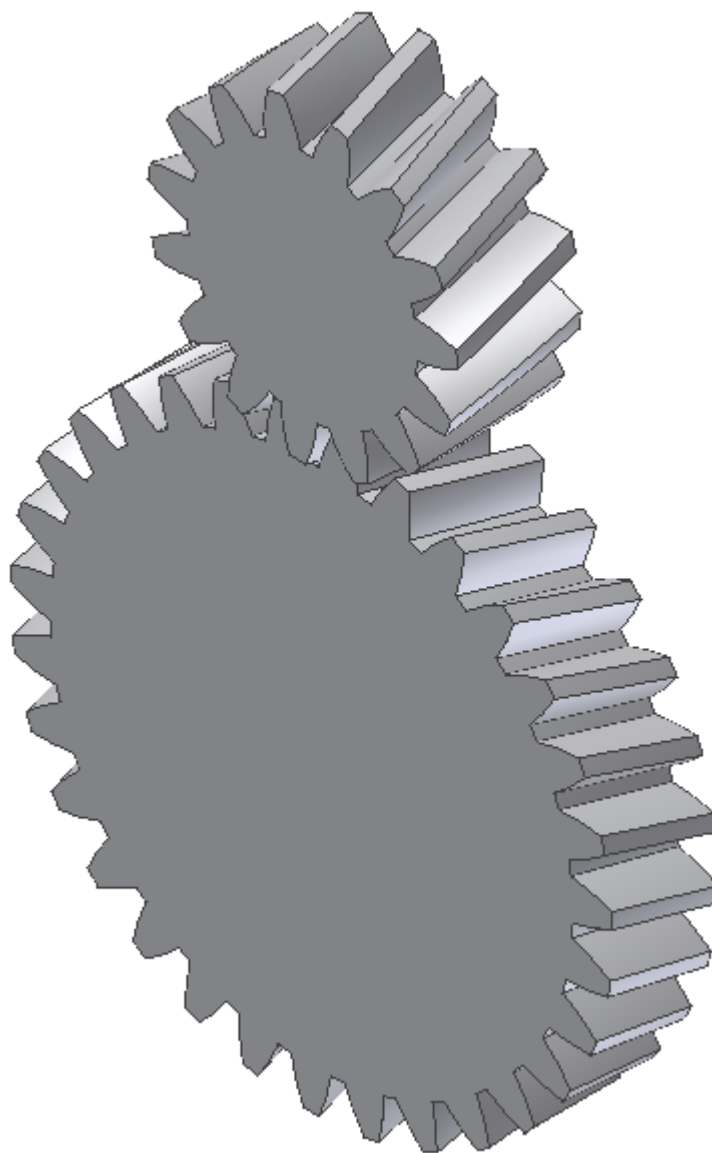
### 2.2.1 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί χωρίζονται σε αυτούς με ευθείς οδόντες και σε αυτούς με ελικοειδείς οδόντες. Στην πρώτη κατηγορία οι οδόντες είναι παράλληλοι με τον άξονα του τροχού, ενώ στη δεύτερη είναι κεκλιμένοι ως προς τον άξονα του τροχού, ως τμήματα έλικας, σχηματίζοντας σταθερή γωνία  $\mu'$  αυτόν, ενώ για μπορέσει να γίνει συνεργασία μεταξύ τους

πρέπει σε μία βαθμίδα ο ένας να έχει δεξιόστροφους και ο άλλος αριστερόστροφους οδόντες. Οι μετωπικοί τροχοί ευθείας οδοντώσεως έχουν βαθμό επικάλυψης 1 έως 2 ενώ δεν ενδείκνυνται για μεγάλα φορτία γιατί προκαλούν θόρυβο και δημιουργούν μεγάλα δυναμικά φορτία. Αντίθετα οι μετωπικοί τροχοί ελικοειδούς οδοντώσεως έχουν μεγαλύτερο βαθμό επικάλυψης, αλλά μειονεκτούν στο θέμα ότι η ύπαρξη της γωνίας έλικας έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αξονικού φορτίου επί των οδόντων, το οποίο καταπονεί τις σταθερές εδράσεις των ατράκτων. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να έχουν εξωτερική οδόντωση, δηλαδή οι οδόντες να βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια του τροχού ή εσωτερική οδόντωση, δηλαδή να βρίσκονται στην εσωτερική επιφάνεια του τροχού. 3-D μοντέλα ζευγών των παραπάνω τροχών παρατίθενται στα παρακάτω σχήματα 2.2 και 2.3 κατασκευασμένα με τη βοήθεια του προγράμματος CAD Autodesk Inventor.



**Σχήμα 2.2:** 3-D μοντέλο ζεύγους εξωτερικών μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως



**Σχήμα 2.3:** 3-D μοντέλο ζεύγους εξωτερικών μετωπικών οδοντωτών τροχών ελικοειδούς οδοντώσεως

### 2.2.2 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

---

Οι κωνικοί τροχοί χρησιμοποιούνται για την μετάδοση κινήσεως και μεταφορά ισχύος μεταξύ τεμνομένων ατράκτων. Οι τροχοί αυτοί έχουν μορφή κολουρου κώνου του οποίου οι οδόντες μπορεί να είναι ευθείς ή τμήματα εξειλιγμένης ή τόξα κύκλου κλπ. Περισσότερο χρησιμοποιούμενοι είναι οι κωνικοί τροχοί με άξονες τεμνόμενους υπό γωνία  $90^\circ$ . Μολονότι, τόσο η κατασκευή των κωνικών τροχών (η οποία γίνεται σε ειδικές μηχανές κοπής) όσο και η

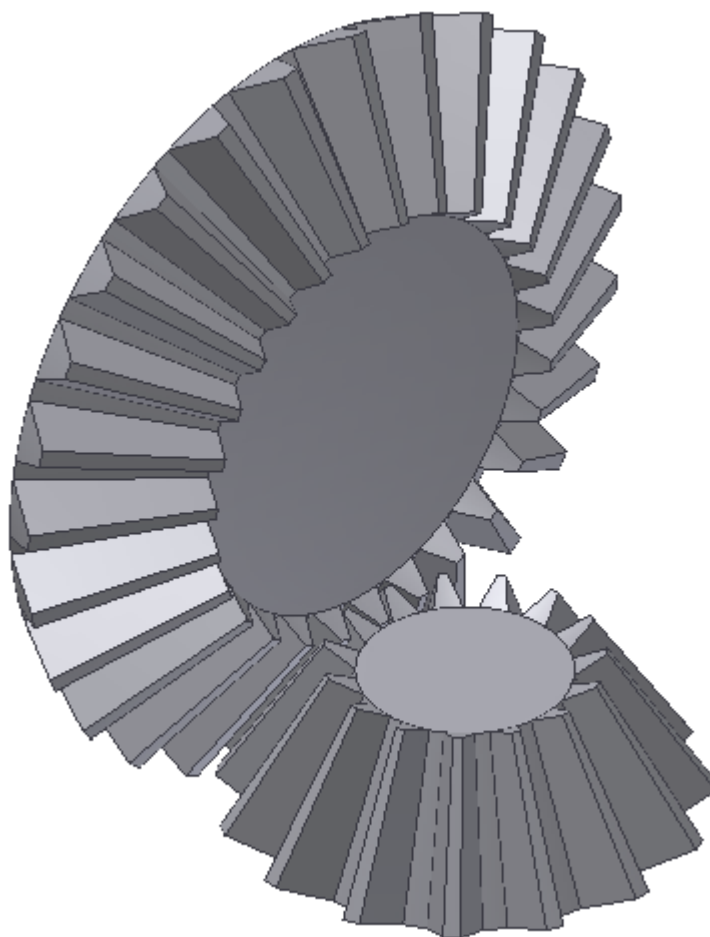


συναρμολόγηση του μηχανισμού είναι πολυπλοκότερη εκείνης των μετωπικών τροχών, εν τούτοις οι κωνικοί τροχοί εφαρμόζονται συχνά στη μετάδοση κινήσεως και μεταφορά ισχύος.

Υπάρχουν διάφορα είδη κωνικών τροχών:

- Κωνικοί τροχοί με ευθείς οδόντες (Straight Bevel Gears)
- Κωνικοί τροχοί ZEROL
- Τοξωτοί κωνικοί τροχοί (Spiral Bevel Gears)
- Υποειδείς τροχοί (Hypoid Gears)

Ένα 3-D μοντέλο ζεύγους κωνικών τροχών με ευθείς οδόντες παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα 2.4 κατασκευασμένο με τη βοήθεια του προγράμματος CAD Autodesk Inventor.



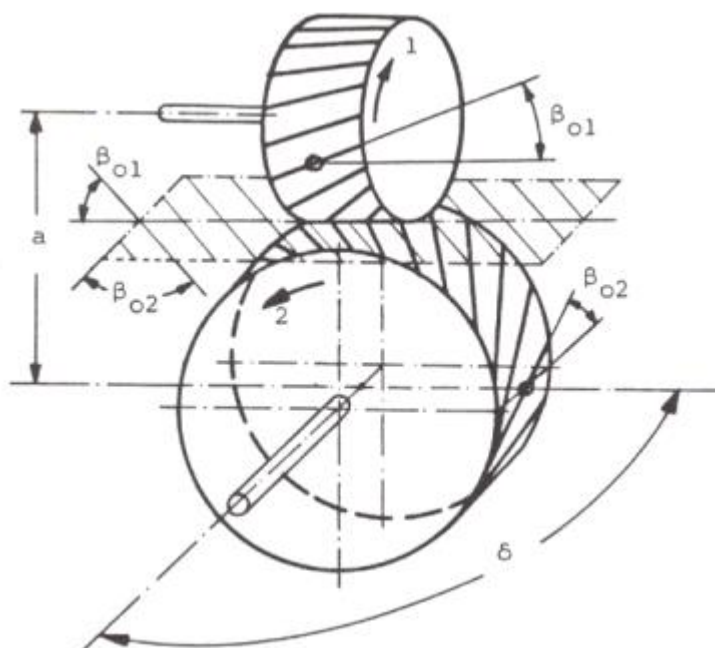
**Σχήμα 2.4:** 3-D μοντέλο ζεύγους κωνικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως

### 2.2.3 ΕΛΙΚΟΙΕΙΔΕΙΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΑΣΥΜΒΑΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ

Οι οδοντωτοί αυτοί τροχοί είναι κυλινδρικοί και έχουν άξονες ασύμβατους σε απόσταση  $a$  και υπό γωνία  $\delta$ , η οποία είναι τέτοια ώστε:

$$\delta = \beta_{o1} + \beta_{o2}$$

όπου  $\beta_{o1}$  και  $\beta_{o2}$  είναι οι κλίσεις των οδόντων των τροχών, σχήμα 2.5. Γενικώς είναι  $\beta_{o1} = \beta_{o2}$ .

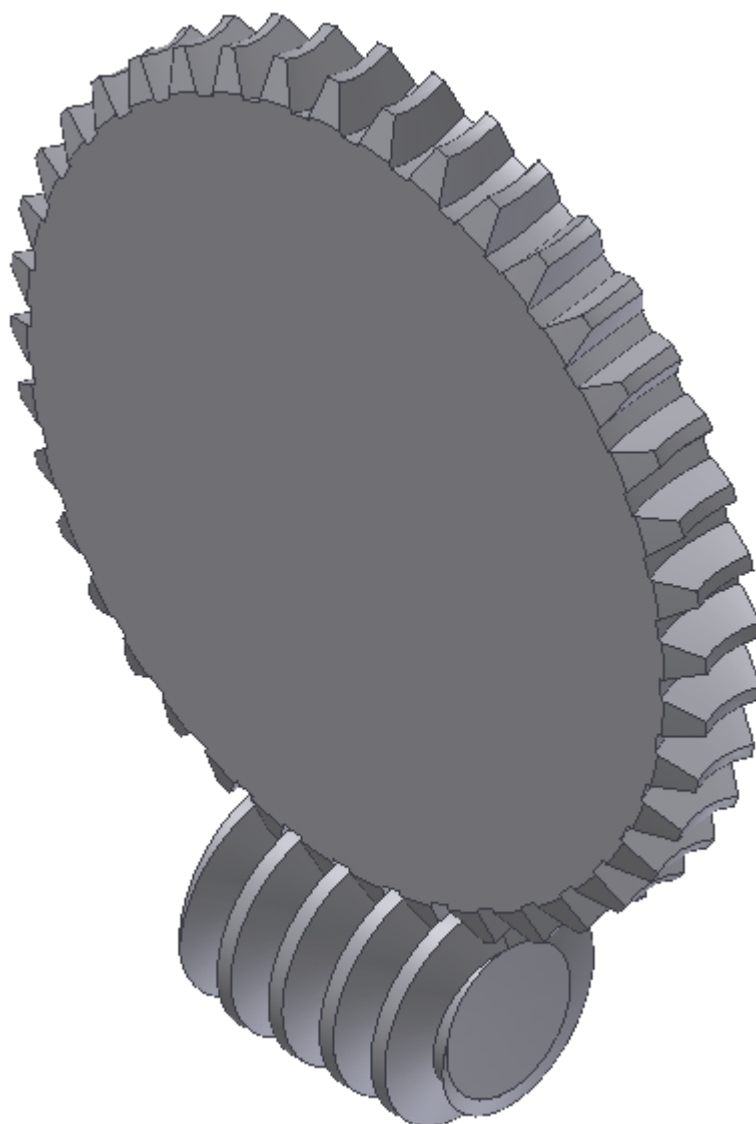


**Σχήμα 2.5:** Βαθμίδα ελικοειδών τροχών ασυμβάτων τροχών

Οι οδόντες δύο συνεργαζομένων ελικοειδών τροχών ασυμβάτων αξόνων έχουν σημειακή επαφή, η οποία μετατρέπεται σε γραμμική καθώς αυξάνει η φθορά των κατατομών. Λόγω του τρόπου επαφής τους οι τροχοί μπορούν να μεταφέρουν μικρά φορτία και για αυτό χρησιμοποιούνται κατά βάση μόνο για μετάδοση κινήσεως (όπως πχ. σε όργανα) και δεν ενδείκνυνται για μεταφορά ισχύος. Σ' αυτό συνηγορεί και ο μικρός βαθμός αποδόσεως των οδοντώσεως τους. Τέλος χρησιμοποιούνται για σχέσεις μεταδόσεως έως 5 και δεν είναι ευαίσθητοι σε μικρές μεταβολές αποστάσεως ή κλίσεως των αξόνων τους.

### 2.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΕΡΜΟΝΑ ΚΟΧΛΙΑ – ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ

Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν ατέρμονα κοχλία, που είναι ουσιαστικά ένας κοχλίας κινήσεως καταλλήλου σπειρώματος μίας η περισσοτέρων αρχών, ο οποίος συνεργάζεται με έναν οδοντωτό τροχό κατά τέτοιο τρόπο ώστε η συνεργασία τους μοιάζει με τον τρόπο εμπλοκής στη συνεργασία ενός κοχλία με το περικόχλιό του. Οι άξονές τους είναι συνήθως κάθετοι, αν και είναι δυνατόν να σχηματίζουν άλλη γωνία. Το σύστημα αυτό ενδείκνυται για μεταφορά μεγάλων φορτίων και για μεγάλες σχέσεις μεταδόσεως, έως και 200 : 1. Ένα 3-D μοντέλο του συγκεκριμένου συστήματος παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα 2.6 κατασκευασμένο με τη βοήθεια του προγράμματος CAD Autodesk Inventor.



**Σχήμα 2.6:** 3-D μοντέλο συστήματος ατέρμονος κοχλία – οδοντωτού τροχού

## 2.3 ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ

Με βάση όσα αναφέραμε παραπάνω είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τα βασικότερα μεγέθη των μετωπικών οδοντωτών τροχών κανονικής οδόντωσης δι' εξειλιγμένης.

### 2.3.1 ΒΗΜΑ ΟΔΟΝΤΩΝ – ΜΕΤΡΟ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ

Εάν  $Z$  είναι ο αριθμός οδόντων οδοντωτού τροχού, κανονικής μετωπικής τομής δι' εξειλιγμένης, το βήμα  $t_o$  στον αρχικό κύκλο θα είναι:

$$t_o = \frac{\pi d_o}{Z}$$

όπου:

- $d_o = 2 r_o$
- $r_o \rightarrow$  η ακτίνα του αρχικού κύκλου

Επίσης, ονομάζεται μέτρο οδοντώσεως (module) το μέγεθος:

$$m = \frac{d_o}{Z} = \frac{t_o}{\pi}$$

Το module είναι γεωμετρικό μέγεθος και λαμβάνει τυποποιημένες τιμές σε mm από τον πίνακα 2.1:

0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
3,25	3,50	3,75	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00
6,50	7,00	7,50	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00
13,00	14,00	15,00	16,00	18,00	20,00	22,00	24,00
27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00	50,00

**Πίνακας 2.1:** Τυποποιημένες τιμές του module  $m$  σε mm για οδόντες δι' εξειλιγμένης

Σε τυποποιημένες οδοντώσεις το ύψος κεφαλής  $h_k$  ισούται με 1 m ενώ το ύψος ποδός  $h_f$  λαμβάνεται συνήθως ίσο με (1.25 ÷ 1.30) m. Αν ληφθεί το ύψος ποδός ίσο με 1.25 m τότε η ακτινική χάρη ισούται με 0.25 m. Είναι προφανείς οι παρακάτω σχέσεις:

- Διάμετρος κύκλου κεφαλής:  $d_k = (Z + 2) m$
- Διάμετρος κύκλου ποδός:  $d_f = d_o - 2 h_f = (Z - 2.5) m$

Το εργαζόμενο ύψος οδόντος είναι ίσο με 2 m.

Είναι προφανές ότι δύο συνεργαζόμενοι τροχοί θα έχουν το ίδιο βήμα και συνεπώς το ίδιο module, ως ανήκοντες στην ίδια οικογένεια οδοντωτών τροχών όπως αναφέρθηκε στη γενικευμένη θεωρία οδοντώσεως.

### 2.3.2 ΠΑΧΟΣ ΟΔΟΝΤΩΝ

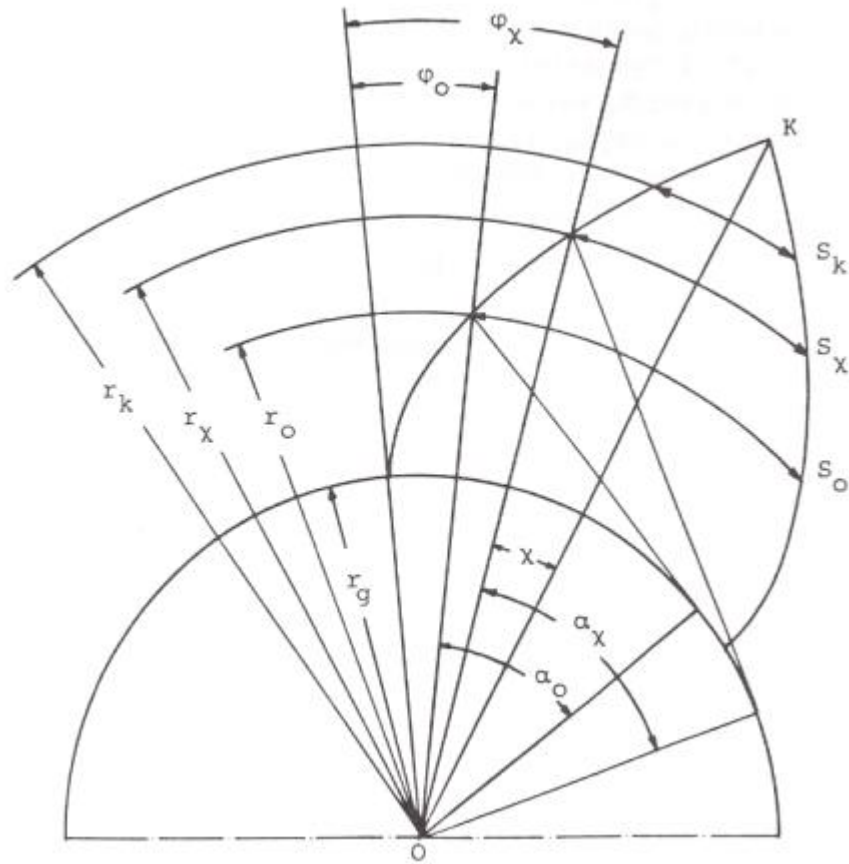
Με βάση αυτά που αναφέραμε παραπάνω περί εξελιγμένης καμπύλης μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το πάχος του οδόντος μετωπικού οδοντωτού τροχού στη μετωπική τομή σε ακτίνα  $r_x$ , σχήμα 2.7.

Εάν δεχθούμε ότι το πάχος του οδόντος στον αρχικό κύκλο είναι  $S_o$  τότε το διάκενο μεταξύ των οδόντων θα είναι:

$$l_o = t_o - S_o$$

Για να υπάρξει ομαλή συνεργασία των τροχών πρέπει να δεχθούμε την ύπαρξη τόσο χάρης των κατατομών  $S_e$  στον αρχικό κύκλο, όσο και ακτινικής χάρης. Η χάρη  $S_e$  των κατατομών στον αρχικό κύκλο δημιουργείται με την ελάττωση του πάχους των οδόντων και την αντίστοιχη αύξηση του διακένου τους, έτσι ώστε το άθροισμά τους να είναι το βήμα  $t_o$ . Συνήθως, ανάλογα με την κατεργασία του τροχού, λαμβάνεται:

$$S_o = (0.475 \div 0.5) t_o$$



Σχήμα 2.7: Πάχος οδόντος

Επομένως, σε κάθε περίπτωση είναι γνωστό το πάχος του οδόντος στον αρχικό κύκλο και με βάση αυτό υπολογίζεται το πάχος οδόντος σε οποιαδήποτε άλλη ακτίνα  $r_x$  ως κατωτέρω:

Στο σχήμα 2.8 η OK είναι ο άξονας συμμετρίας του οδόντος και  $S_o$ ,  $S_x$  είναι τα πάχη του στις ακτίνες  $r_o$ ,  $r_x$  αντίστοιχα, οπότε μπορούν να γραφούν οι εξής σχέσεις:

$$S_x = 2 \chi r_x$$

$$S_o = 2 (\varphi_x - \varphi_o + \chi) r_o$$

από τις οποίες με εξάλειψη του  $\chi$  προκύπτει:

$$\frac{S_x}{r_x} = \frac{S_o}{r_o} + 2 (\varphi_o - \varphi_x)$$

Λόγοι αντοχής δεν επιτρέπουν την κατασκευή οδόντος με μηδενικό πάχος κεφαλής. δηλαδή σχηματισμό ακμής ή κορυφής Κ. Αντιθέτως επιβάλλεται στον οδόντα πάχος κεφαλής  $S_k$ , το οποίο αντιστοιχεί στην ακτίνα κεφαλής  $r_k = r_o + h_k$  όπου το ύψος κεφαλής  $h_k$  σε τυποποιημένες οδοντώσεις λαμβάνεται ίσο με το module  $m$  της οδοντώσεως.

### 2.3.3 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ – ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΞΟΝΩΝ

Από κινηματικής πλευράς δύο συνεργαζόμενοι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί ισοδυναμούν με δύο κυλινδρικούς τροχούς χωρίς οδόντες, που έχουν ως άξονες περιστροφής τους ίδιους τους άξονες των οδοντωτών τροχών. Όταν οι δύο αυτοί κυλινδρικοί τροχοί κυλίσουν ο ένας επί του άλλου χωρίς ολίσθηση, τότε οι περιφερειακές του ταχύτητες στις κυλιόμενες επιφάνειες είναι ίσες, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο λόγος της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_1$  της κινητήριας ατράκτου προς την γωνιακή ταχύτητα  $\omega_2$  της κινουμένης ατράκτου ισούται με τον λόγο της ακτίνας  $r_2$  του τροχού 2 προς την ακτίνα  $r_1$  του τροχού 1, δηλαδή:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

όπως προκύπτει από την περιφερειακή ταχύτητα που είναι κοινή για τους τροχούς 1 και 2, δηλαδή:

$$V_1 = \omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 = V_2$$

Ο παρακάτω λόγος ονομάζεται σχέση μεταδόσεως της βαθμίδας και μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$i_{12} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_{o2}}{d_{o1}}$$

Εάν  $Z_1$  και  $Z_2$  είναι οι αριθμοί οδόντων δύο συνεργαζομένων τροχών με ευθείς οδόντες, η απόσταση αξόνων των τροχών αυτών βρίσκεται από την σχέση:

$$a_{12} = r_{o1} + r_{o2} = (1 + i_{12}) \frac{m Z_1}{2}$$

### 2.3.4 ΓΩΝΙΑ ΕΠΑΦΗΣ

Γωνία επαφής ( $\varphi$ ) είναι η οξεία γωνία μεταξύ της γραμμής ενεργείας και της κοινής εφαπτομένης των αρχικών κύκλων στο σημείο κυλίσεως C, εφ' όσων πρόκειται για κανονικές οδοντώσεις. Στις οδοντώσεις δι' εξειλιγμένης η γωνία αυτή είναι σταθερή και ονομάζεται γωνία εξειλιγμένης, ισούται επίσης με την ημιγωνία οδόντος του κανόνα, κατά τα προβλεπόμενα από την γενικευμένη θεωρία οδοντώσεως. Στο μετρικό σύστημα η γωνία εξειλιγμένης λαμβάνεται ίση με  $20^\circ$  για τυποποιημένες οδοντώσεις, ενώ στο αγγλοσαξονικό σύστημα η τιμή της μπορεί να είναι  $20^\circ$  ή  $14.5^\circ$ .

Σε μη τυποποιημένες οδοντώσεις η γωνία εξειλιγμένης μπορεί να λάβει οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή. Η μεταβολή της γωνίας αυτής έχει επίδραση στο μέγεθος των αναπτυσσομένων στους οδόντες φορτίων, στον βαθμό επικάλυψης και στον ελάχιστο αριθμό οδόντων του τροχού.

### 2.3.5 ΒΑΘΜΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΣ Ή ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ

Έχει ορισθεί ότι μήκος επαφών είναι το μήκος τόξου του αρχικού κύκλου το οποίο διατρέχει η εργαζόμενη πλευρά του οδόντος ενός οδοντωτού τροχού από το πρώτο μέχρι και το τελευταίο σημείο επαφής της με την συνεργαζόμενη πλευρά του οδόντος του άλλου τροχού.

Αναφερόμενοι στο σχήμα 2.8 της επόμενης σελίδας διακρίνουμε διάφορες θέσεις της κατατομής  $M_1$  του οδόντος του τροχού 1 καθώς αυτή συνεργάζεται, κατά μήκος του τμήματος επαφών AB, με την κατατομή  $N_2$  του οδόντος του τροχού 2. Όταν η κατατομή  $M_1$  διέρχεται από το αρχικό σημείο κυλίσεως C, φέρεται η ακτίνα καμπυλότητας  $MM'$  η οποία τέμνει τον αρχικό κύκλο του τροχού 1 στο σημείο F. Ομοίως όταν η κατατομή  $N_2$  διέρχεται από το



σημείο C φέρεται η ακτίνα καμπυλότητας της εξειλιγμένης στο σημείο N που είναι εφαπτόμενη του βασικού κύκλου.

Όταν ο τροχός 1 στραφεί κατά γωνία  $\theta_1$  τότε το σημείο F θα συμπίσει με το σημείο C και προφανώς το σημείο 1' θα συμπίσει με το σημείο 1 και το σημείο 1 θα συμπίσει με το σημείο 1'', δηλαδή:

$$\theta_1 = \widehat{FO_1C} = \widehat{1'O_11} = \widehat{1O_11''}$$

Από τις ιδιότητες της εξειλιγμένης ισχύει:

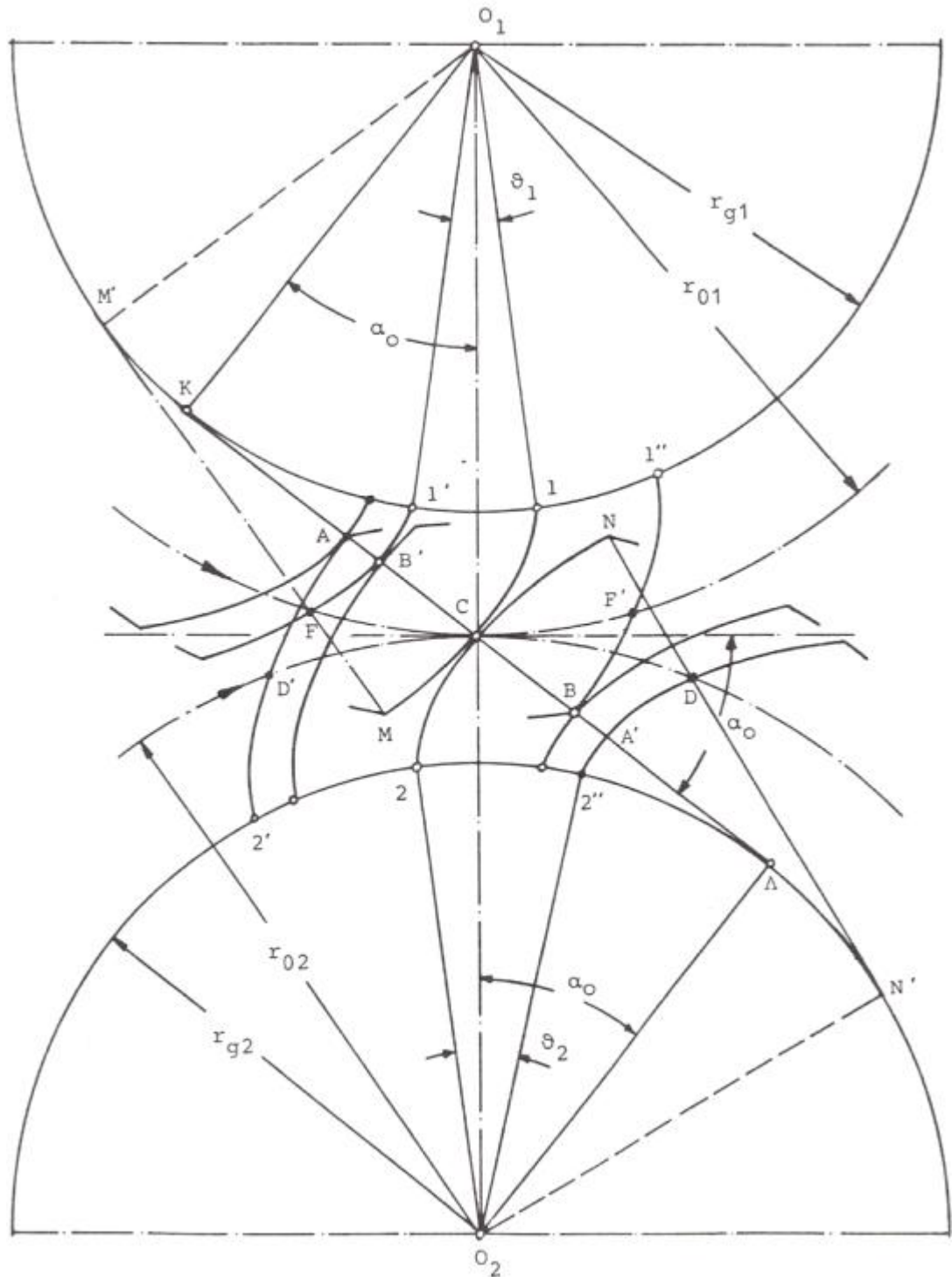
$$\overline{FM} = \widehat{1'1} = r_{g1}\theta_1 = r_{o1}\cos\alpha_o\theta_1$$

όμως

$$\widehat{FC} = \widehat{CF'} = r_{o1}\theta_1$$

οπότε,

$$\overline{FM} = \widehat{FC} \cos\alpha_o$$



**Σχήμα 2.8:** Συνεργαζόμενες κατατομές

Όταν το σημείο M λάβει την θέση B τότε η ακτίνα καμπυλότητας  $MM'$  θα συμπίσει με την τροχιά επαφών και θα λάβει την θέση BK. Έτσι, αφού το F θα συμπίσει με το C και η κατατομή 1M θα βρεθεί στη θέση  $1''B$ , από την ισότητα των τετραπλεύρων  $MM'O11$  και  $BKO11''$ , καθώς και από όσα αναφέρθηκαν για τις θέσεις της κατατομής M1 προκύπτει ότι το σημείο  $B'$  είναι συμμετρικό του σημείου B προς το σημείο C. Κατόπιν αυτών, θα είναι:

$$\overline{BC} = \overline{MF}$$

ως τμήματα της ακτίνας καμπυλότητας περιλαμβανόμενα μεταξύ κύκλου κεφαλής και αρχικού κύκλου. Επομένως,

$$\overline{BC} = \widehat{CF}' \cos \alpha_0$$

Με όμοιο τρόπο αποδεικνύεται ότι το σημείο A' είναι συμμετρικό του A ως προς το σημείο C και ότι

$$\overline{ND} = \overline{AC} = \overline{CA'}$$

$$\theta_2 = \widehat{CO_2D} = 2\widehat{O_2Z''}$$

$$\overline{ND} = \widehat{Z''} = r_{g2} \theta_2 = r_{o2} \cos \alpha_0 \theta_2$$

$$\overline{CD} = r_{o2} \theta_2$$

οπότε,

$$\overline{AC} = \widehat{D'C} \cos \alpha_0$$

Επειδή γίνεται κύλιση χωρίς ολίσθηση των αρχικών κύκλων, θα πρέπει τα επιμέρους τόξα των κυλιόμενων αρχικών κύκλων πριν και μετά το αρχικό σημείο C να είναι ίσα. Επομένως το μήκος επαφών eo είναι το τόξο D'CF' έτσι ώστε

$$e_o = \widehat{D'CF'} = \widehat{D'C} + \widehat{CF'}$$

Αθροίζοντας τις εξισώσεις κατά μέλη βρίσκουμε:

$$\overline{AC} + \overline{BC} = (\widehat{D'C} + \widehat{CF'})\cos\alpha_0$$

ή

$$AB = e_0\cos\alpha_0$$

Έχει ορισθεί ως βαθμός επικάλυψης ή διάρκεια επαφής  $\varepsilon$  ο λόγος του μήκους επαφών  $e_0$  προς το βήμα του αρχικού κύκλου  $t_0$ , δηλαδή:

$$\varepsilon = \frac{e_0}{t_0} = \frac{AB}{t_0\cos\alpha_0} = \frac{AB}{t_g}$$

όπου:  $t_g = t_0\cos\alpha_0 = \pi m \cos\alpha_0$

είναι το βήμα της οδοντώσεως στον βασικό κύκλο. Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι ο βαθμός επικάλυψης είναι και ο αριθμός των βημάτων του βασικού κύκλου  $t_g$  που περιέχονται στο τμήμα επαφών  $AB$ .

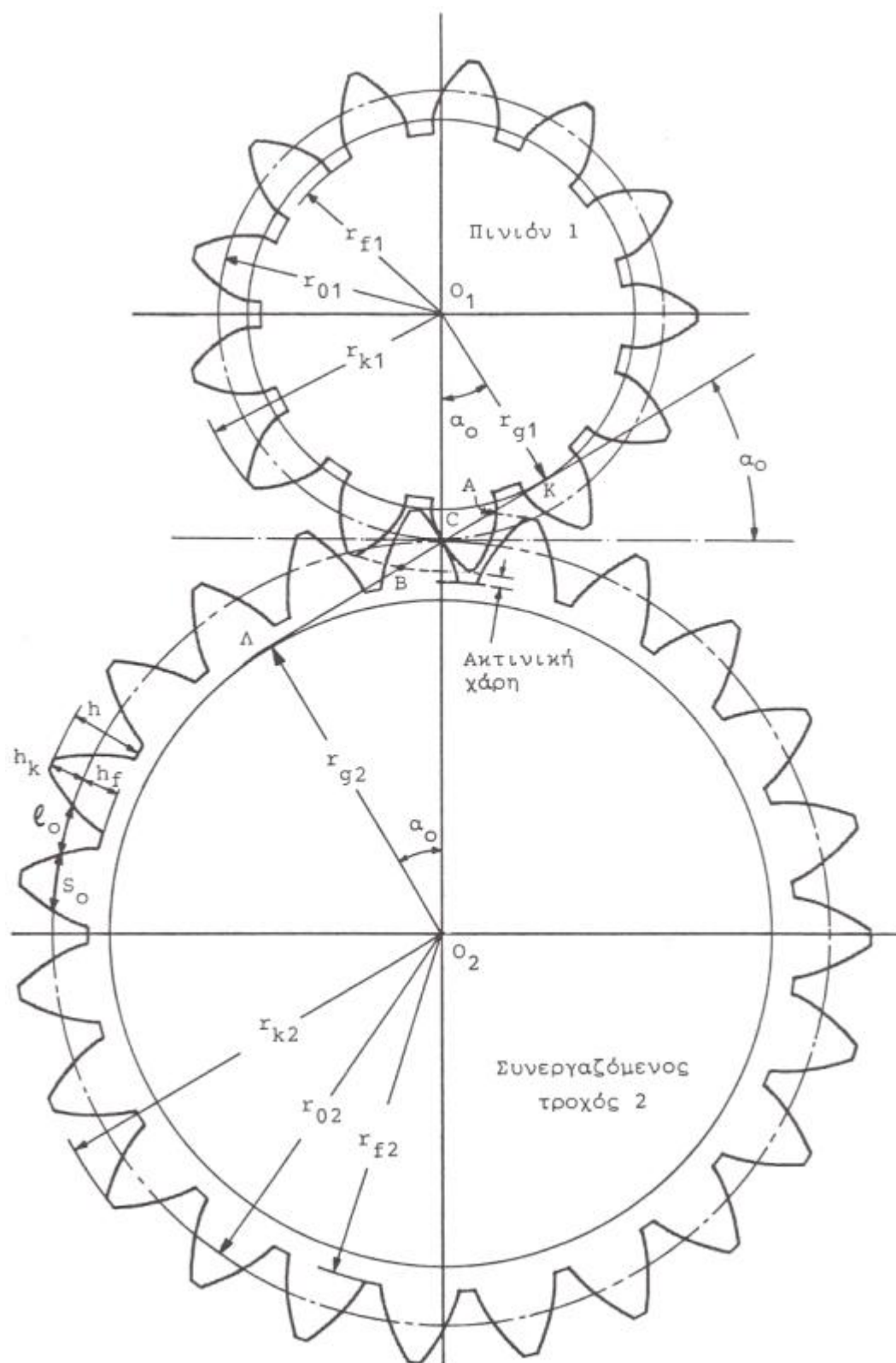
Στο σχήμα 2.9 δίνονται όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη δύο συνεργαζομένων τροχών με ευθείς οδόντες και κανονική οδόντωση δι' εξειλιγμένης και ζητείται να υπολογισθεί ο βαθμός επικάλυψης της βαθμίδας. Βάσει της ανωτέρω σχέσης αρκεί να υπολογισθεί το ευθύγραμμο τμήμα  $AB$ .

Έτσι:

$$AB = BC + CA$$

Όμως,

$$BC = BK + CK$$



Σχήμα 2.9: Χαρακτηριστικά μεγέθη συνεργαζομένων τροχών

όπου:

$$BK = \sqrt{BO_1^2 - KO_1^2}$$

$$BO_1 = r_{k1} = r_{o1} + h_{k1}$$

$$KO_1 = r_{g1} = r_{o1} \cos \alpha_o$$

Σε τυποποιημένες οδοντώσεις το ύψος κεφαλής οδόντος είναι ίσο με το module, δηλαδή:

$$h_{k1} = h_{k2} = h_k = 1,0 m$$

Από αντικατάσταση προκύπτει:

$$BC = \sqrt{(r_{o1} + m)^2 - r_{o1}^2 \cos^2 \alpha_o} - r_{o1} \sin \alpha_o$$

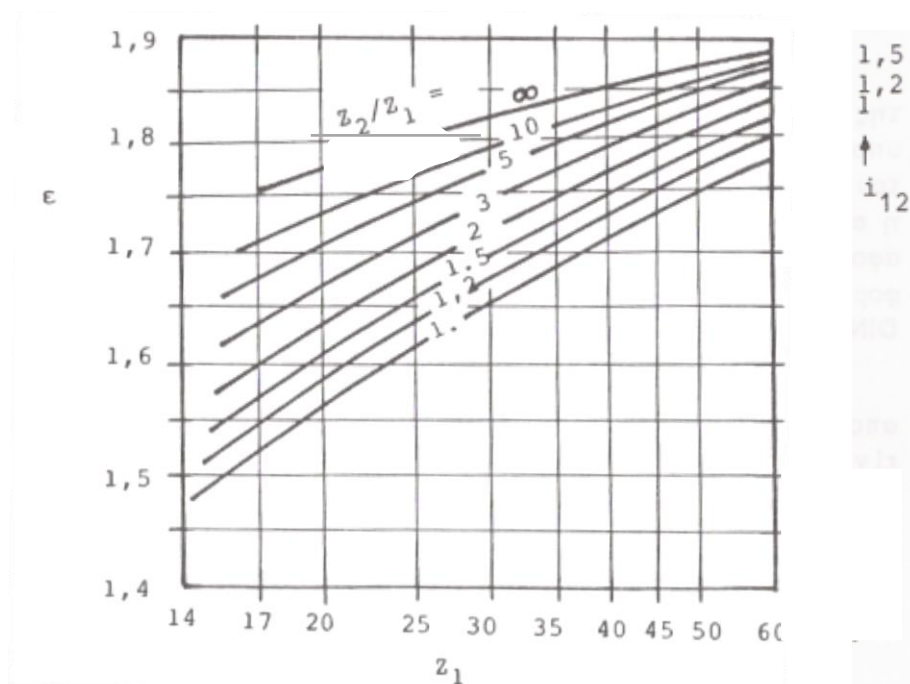
Ομοίως αποδεικνύεται ότι:

$$CA = \sqrt{(r_{o2} + m)^2 - r_{o2}^2 \cos^2 \alpha_o} - r_{o2} \sin \alpha_o$$

Τελικά, με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για τον βαθμό επικάλυψης:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(r_{o1} + m)^2 - r_{o1}^2 \cos^2 \alpha_o} + \sqrt{(r_{o2} + m)^2 - r_{o2}^2 \cos^2 \alpha_o} - (r_{o1} + r_{o2}) \sin \alpha_o}{\pi m \cos \alpha_o}$$

Ένας ακόμη τρόπος υπολογισμού του βαθμού επικάλυψης ο οποίος είναι πιο προσεγγιστικός για δεδομένο αριθμό οδόντων  $Z_1$  του πινιόν και δεδομένη σχέση μετάδοσης  $i_{12}$  της βαθμίδας, μπορεί γίνει από το παρακάτω σχήμα 2.10.

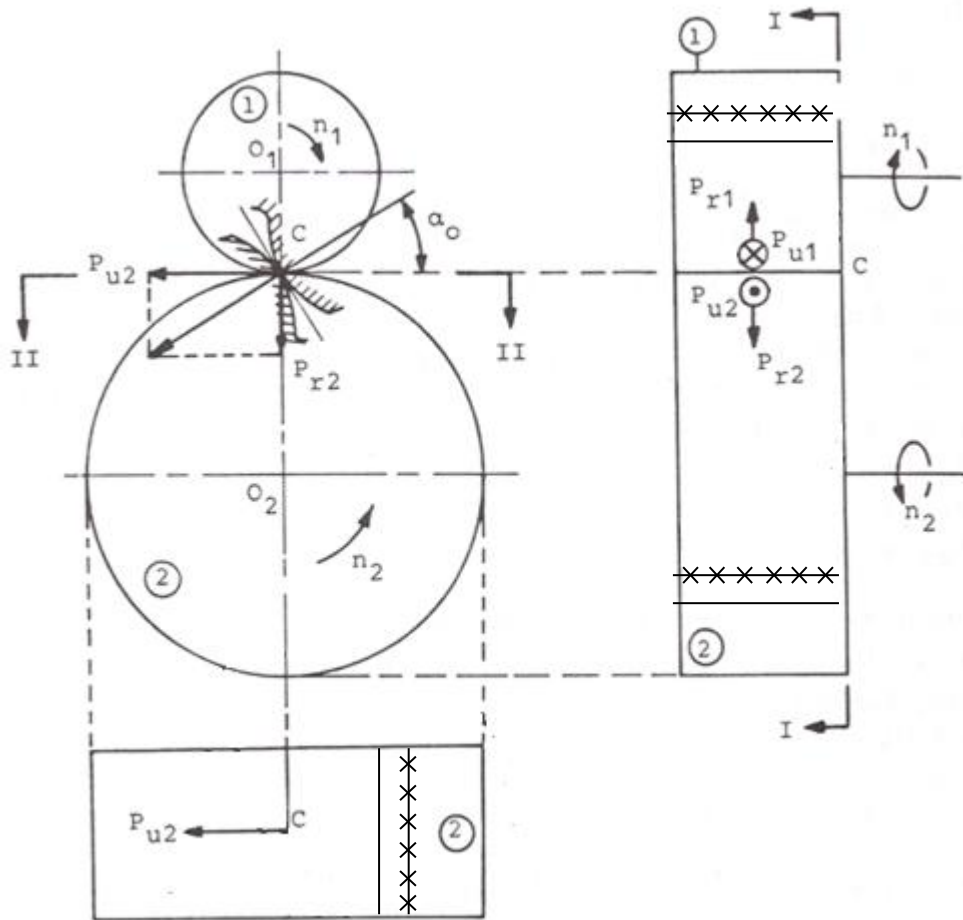


Σχήμα 2.10: Βαθμός επικάλυψως  $\epsilon$  συναρτήσει της σχέσης μεταδόσεως  $i_{12}$  βαθμίδας

## 2.4 ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Στο σχήμα 2.11 οι τροχοί της βαθμίδας είναι μετωπικοί με ευθεία οδόντωση δι' εξελιγμένης. Η ολική δύναμη  $P$  που ασκείται στον οδόντα του τροχού 2, επί της γραμμής ενεργείας, αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την ακτινική  $P_{r2}$  και την περιφερειακή  $P_{u2}$ . Οι δυνάμεις αυτές αναφέρονται στο σημείο κλίσεως  $C$ .

Στον τροχό 1 ασκούνται οι δυνάμεις  $P_{u1}$ ,  $P_{r1}$ , που λόγω της αρχής δράση = αντίδραση είναι ίσες και αντίθετες με τις αντίστοιχες δυνάμεις του τροχού 2. Επομένως θα λέμε ότι στο σημείο κλίσεως της βαθμίδας ασκούνται οι δυνάμεις  $P_u$ ,  $P_r$  και θα εννοούμε ότι αυτές οι δυνάμεις ασκούνται σε καθεμία από τις συνεργαζόμενες κατατομές.



**Σχήμα 2.11:** Δυνάμεις επί των οδόντων

Στην επάνω δεξιά θέση του σχήμα 2.11 φαίνονται οι εργαζόμενες πλευρές των οδόντων που συνεργάζονται στο σημείο κυλίσεως C. Η όψη I – I είναι η μετωπική τομή των τροχών και η όψη II – II εξετάζει τον τροχό 2.

Εάν υποθεθεί ότι η προς μεταφορά (μέσω της βαθμίδας) ισχύς είναι N με  $n_1$  στροφές (ανά μονάδα χρόνου) του πινιόν, τότε η στρεπτική ροπή στο πινιόν θα είναι:

$$M_{d1} = \frac{N}{\omega_1}$$

όπου:  $\omega_1 = 2 \pi n_1$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του πινιόν.



Ο παρακάτω τύπος χρησιμοποιείται με επιτυχία για τον υπολογισμό της στρεπτικής ροπής:

$$M_d = 71620 \frac{N}{n}$$

όπου:

- $M_d \rightarrow$  η στρεπτική ροπή του τροχού ( $Kp \cdot cm$ )
- $N \rightarrow$  η ισχύς που μεταφέρεται από την βαθμίδα (PS)
- $n \rightarrow$  ο αριθμός στροφών του τροχού (rpm)

Η περιφερειακή δύναμη που θα αναπτυχθεί στην βαθμίδα δίνεται από τη σχέση:

$$P_u = \frac{2 M_{d1}}{d_{o1}} = \frac{2 M_{d2}}{d_{o2}}$$

όπου:

- $d_{o1}, d_{o2} \rightarrow$  η διάμετρος του αρχικού κύκλου των τροχών 1 και 2 αντίστοιχα (mm)

Η ακτινική δύναμη προκύπτει από την όψη I – I μέσω της γωνίας  $\alpha_o$  ως εξής:

$$P_r = P_u \tan \alpha_o$$

Η συνολική δύναμη  $P$  που ασκείται στον τροχό δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = \sqrt{P_u^2 + P_r^2}$$

και με αντικατάσταση προκύπτει η τελική σχέση της συνολικής δύναμης  $P$ :

$$P = \sqrt{\left(\frac{2 M_{d1}}{d_{o1}}\right)^2 + \left(\frac{2 M_{d1}}{d_{o1}} \tan \alpha_o\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2 M_{d2}}{d_{o2}}\right)^2 + \left(\frac{2 M_{d2}}{d_{o2}} \tan \alpha_o\right)^2}$$

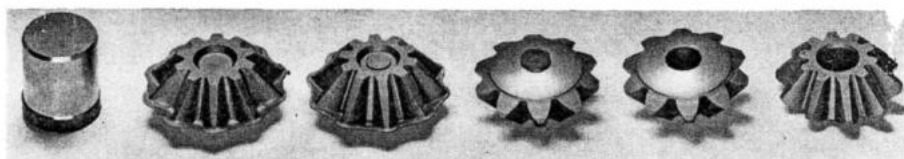
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευάζονται κυρίως με κατεργασίες κοπής μετάλλου ή με συνδυασμό συμβατικής θερμής σφυρηλάτησης και κοπής. Οι μέθοδοι αυτές είναι ιδιαίτερα ακριβές και απαιτούν μεγάλο χρόνο κατεργασίας. Οι νεότερες, όμως, εξελίξεις στη βιομηχανία σφυρηλάτησης επιτρέπουν την κατασκευή οδοντωτών τροχών και εξαρτημάτων τους με τεχνικές σφυρηλάτησης ακριβείας. Η σφυρηλάτηση ακριβείας έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους διαμόρφωσης των οδοντωτών τροχών, γιατί επιτρέπει την κατασκευή τους χωρίς προεξοχή και συνεπώς χωρίς την ανάγκη για πρόσθετες κατεργασίες. Κατά συνέπεια η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας παρέχει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη εξαιτίας της εξοικονόμησης υλικού αλλά και της υψηλότερης παραγωγικότητας. Επιπλέον, οι οδοντωτοί τροχοί που παράγονται με σφυρηλάτηση ακριβείας έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με εκείνους των συμβατικών μεθόδων. Αυτό κυρίως συμβαίνει γιατί η μικροδομή των πρώτων παραμένει αναλλοίωτη λόγω της απουσίας εκτεταμένων κατεργασιών.

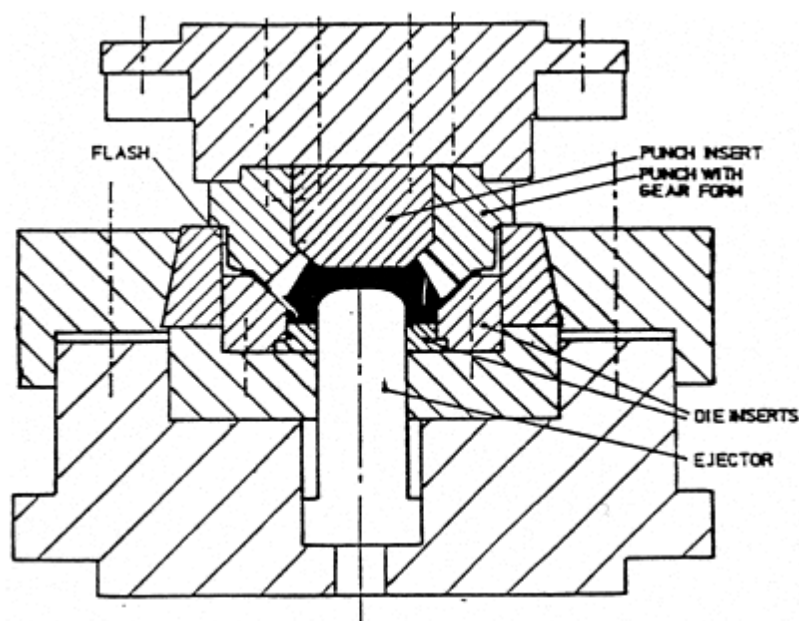
### 3.2 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ (BEVEL GEARS)

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η σειρά των κατεργασιών για την κατασκευή ενός κωνικού οδοντωτού τροχού.



**Σχήμα 3.1:** Κλασική τεχνολογία σφυρηλάτησης οδοντωτού τροχού

Από τα έξι στάδια μόνο τα δύο είναι σφυρηλάτηση. Η μπιγέτα βγαίνει από το καλούπι για να απομακρυνθεί το ελαττωματικό υλικό. Η υψηλή ποιότητα των σημερινών καλουπιών καθιστά μη απαραίτητη αυτή τη διαδικασία. Στο σχήμα 3.2 φαίνεται μια μήτρα σφυρηλάτησης δύο τμημάτων και η προεξοχή (flash) που είναι αναπόφευκτη. Η τελευταία απομακρύνεται συνήθως με τórνευση.



**Σχήμα 3.2:** Μήτρα σφυρηλάτησης γωνιακού οδοντωτού τροχού

Είναι όμως δυνατό να παραχθούν και οδοντωτοί τροχοί χωρίς προεξοχή με σφυρηλάτηση τελείως κλειστής μήτρας. Συνήθως χρησιμοποιείται ψυχρή σφυρηλάτηση για την επίτευξη μέγιστης ακρίβειας. Τέλος, κωνικοί τροχοί παράγονται με περιστροφική σφυρηλάτηση επιτρέποντας την χρήση μηχανών μικρότερης ισχύος για τέτοιου είδους κατεργασίες.

### 3.3 ΤΡΟΧΟΙ ΧΩΡΙΣ ΟΔΟΝΤΩΣΗ (GEAR BLANKS)

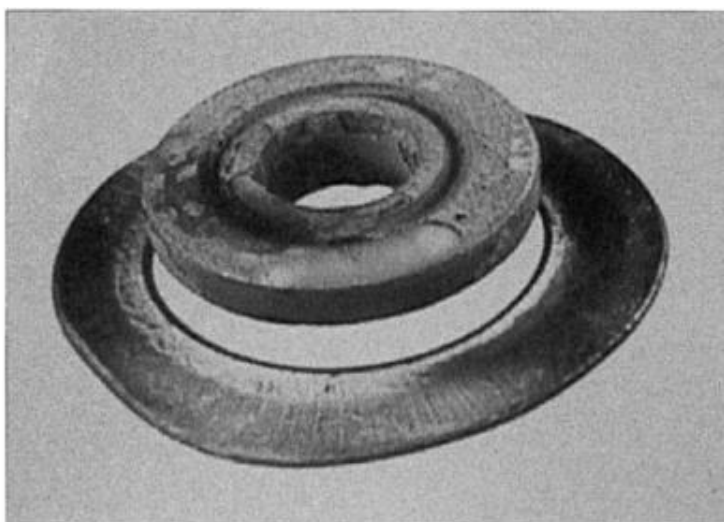
Οι οδοντωτοί τροχοί για μεταφορά ισχύος (γρανάζια κιβωτίων ταχυτήτων) είναι συνήθως λεπτοί σε σύγκριση με τις διαμέτρους τους και συχνά έχουν διάφορες διαμορφώσεις στη μία πλευρά γεγονός που καθιστά ακατάλληλη την παραγωγή τους με εκβολή. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την κατασκευή τους είναι η θερμή σφυρηλάτηση με τελείως κλειστή μήτρα. Ωστόσο η κατασκευή ελικοειδών οδοντώσεων με σφυρηλάτηση δεν είναι αποδεκτή μέθοδος γιατί τα δόντια δεν μπορούν να σφυρηλατηθούν στις τελικές τους

διαστάσεις. Επίσης διάφορα προβλήματα που σχετίζονται με τις κατεργασίες φινιρίσματος καθιστούν την σφυρηλάτηση των οδοντώσεων πολύ ακριβή σε σχέση με τις συμβατικές κατεργασίες. Γι' αυτούς τους λόγους τα γρανάζια για τη μεταφορά ισχύος σφυρηλατούνται έχοντας μόνο κάποιες διαμορφώσεις ενώ η περιοχή της βασικής οδόντωσης αφήνεται κενή για να διαμορφωθεί αργότερα με την παραδοσιακή μέθοδο. Το σχήμα 3.3 δείχνει τέτοια γρανάζια με κενή την περιοχή της οδόντωσης, που έχουν παραχθεί με ημίθερμη σφυρηλάτηση σε τελείως κλειστή μήτρα.



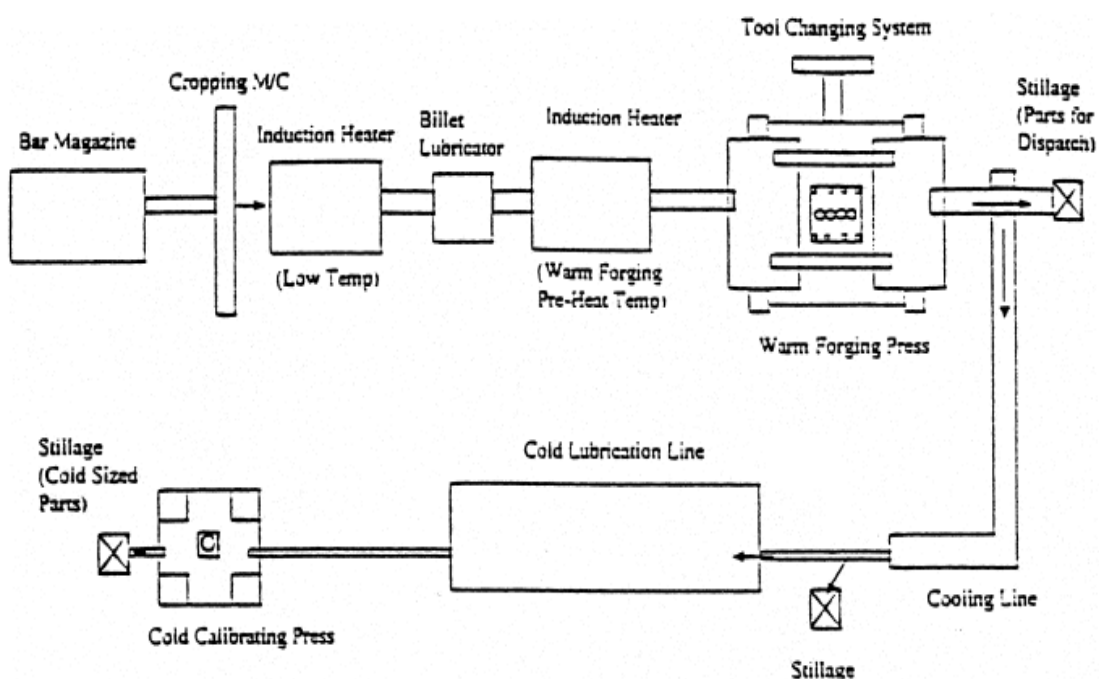
**Σχήμα 3.3:** Γρανάζια με κενή την περιοχή οδόντωσης- νέα τεχνολογία

Το σχήμα 3.4 δείχνει έναν τροχό με κενή περιοχή οδόντωσης που έχει παραχθεί με την παραδοσιακή μέθοδο της θερμής σφυρηλάτησης. Η προεξοχή και η κακή ποιότητα επιφάνειας είναι ορατές και η έλλειψη διαστασιακής ακρίβειας διαπιστώνεται εύκολα.



**Σχήμα 3.4:** Γρανάζια με κενή την περιοχή οδόντωσης- παραδοσιακή τεχνολογία

Αντίθετα τα γρανάζια στο σχήμα 3.3 έχουν καλή ποιότητα επιφάνειας, διαστασιακή ακρίβεια και συνεπώς μπορούν να διαμορφωθούν άμεσα με τórνευση οι οδοντώσεις. Η διάταξη μιας τυπικής γραμμής σφυρηλάτησης για την παραγωγή αυτού του τύπου τροχών (gear blanks) φαίνεται στο σχήμα 3.5.

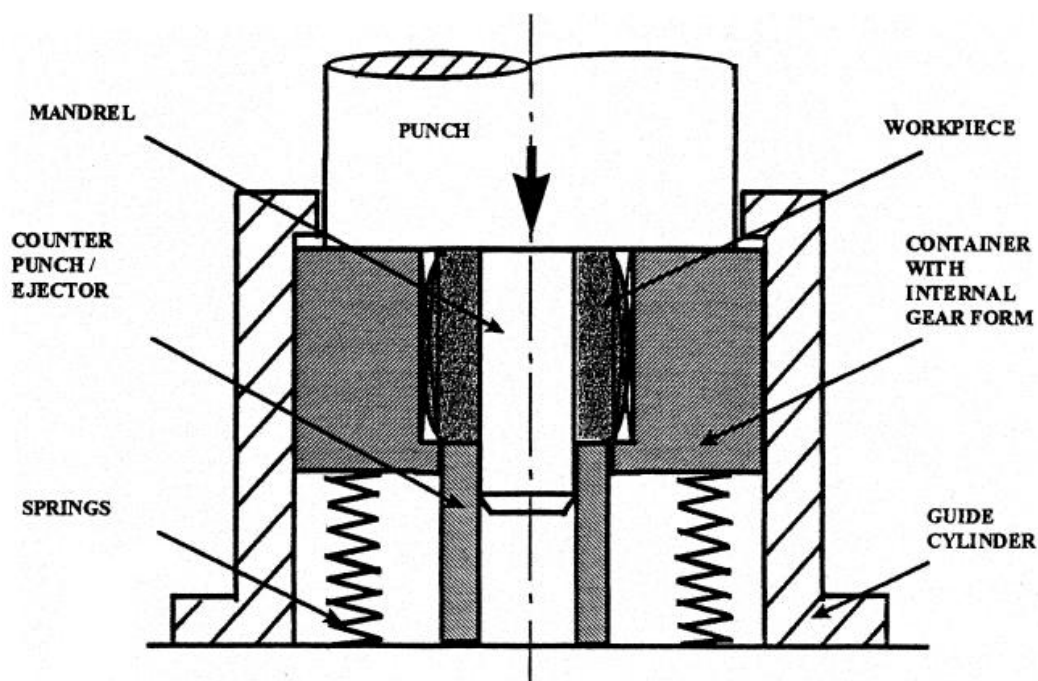


**Σχήμα 3.5:** Τυπική γραμμή σφυρηλάτησης για τροχούς χωρίς οδόντωση

Το ακατέργαστο υλικό είναι συνήθως χαλύβδινες μπιγέτες με τις κατάλληλες διαστάσεις και βάρος. Για υψηλή παραγωγικότητα η θέρμανση, η λίπανση και η σφυρηλάτηση πραγματοποιούνται διαδοχικά και αυτόματα στη γραμμή παραγωγής. Η θέρμανση γίνεται με συναγωγή και σε δύο στάδια. Ένας μικρός θερμαντήρας δίνει στην μπιγέτα μια θερμοκρασία μεταξύ 120 °C και 150 °C. Μετά οι μπιγέτες ψεκάζονται με το λιπαντικό και οδηγούνται στον κυρίως θερμαντήρα που τους προσδίδει την θερμοκρασία σφυρηλάτησης. Τουλάχιστον τρεις φάσεις σφυρηλάτησης λαμβάνουν χώρα. Μία για τη συμπίεση και τη μορφοποίηση της μπιγέτας, μια για τη διάνοιξη της οπής και μία για την πρόσδοση του τελικού σχήματος. Μετά τη σφυρηλάτηση τα τεμάχια ψύχονται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας υπάρχει έλεγχος της θερμοκρασίας της μήτρας και της λίπανσης ώστε να πάρουμε τις ακριβείς διαστάσεις των σφυρηλάτων τεμαχίων.

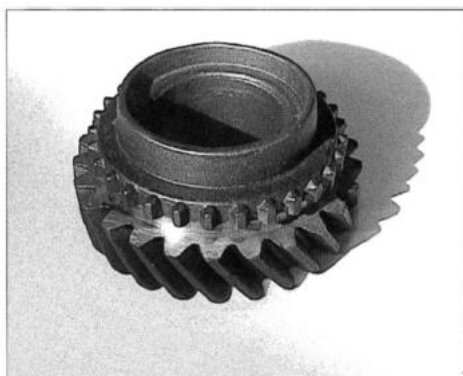
### 3.4 ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΜΕ ΕΘΥΕΙΑ ΚΑΙ ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΣΗ (SPUS AND HELICAL GEARS)

Μία εύχρηστη διάταξη μήτρας για την παραγωγή τροχών με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Τελείως κλειστή μήτρα σφυρηλάτησης τροχών με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση

Ένα συμπαγές τεμάχιο (workpiece) μορφοποιείται μεταξύ του άνω και κάτω μέρους της μήτρας ή οποία είναι τελείως κλειστή. Το υλικό ωθείται στην οπή του από ένα έμβολο (mandrel) προσαρμοσμένο στην πρέσα και η περιφερειακή του επιφάνεια ρέει ώστε να πληρώσει τη μήτρα (container). Υπό την πίεση της πρέσας η μήτρα ωθείται προς τα κάτω οδηγούμενη από τον εξωλκέα (counter punch/ejector). Επειδή η μήτρα είναι τελείως κλειστή, δε δημιουργείται προεξοχή, άλλα επειδή το τεμάχιο θερμαίνεται για να ρέει πιο εύκολα στη μήτρα, η οδόντωση δεν παίρνει την τελική, καθαρή της μορφή. Στα σχήματα 3.7 και 3.8 φαίνονται δυο οδοντωτοί τροχοί που φτιάχτηκαν με μια τέτοια μήτρα.



**Σχήμα 3.7:** Οδοντωτός τροχός



**Σχήμα 3.8:** Οδοντωτός τροχός

### 3.5 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Γενικά οι εκτεταμένες κατεργασίες χύτευσης και διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση σύνθετων υλικών. Εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας υλικού και ειδικά της εσωτερικής αντοχής των χυτών και διαμορφωμένων τεμαχίων όπως οι οδοντωτοί τροχοί τα τεμάχια αυτά σφυρηλατούνται και τελειώνουν με φινίρισμα. Η ακρίβεια στη σφυρηλάτηση είναι μια καινοτόμα κατεργασία για τη διαμόρφωση ιδιαίτερα υψηλών τάσεων σχεδόν καθαρού σχήματος συστατικών. Ανήκει στην κατηγορία της σφυρηλάτησης και είναι λιγότερο ακαριαία σε σχέση με την σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας.

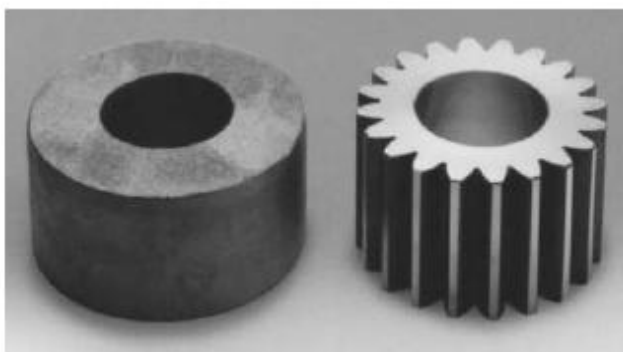
Είναι προφανές ότι ο όρος «ακρίβεια στη σφυρηλάτηση» αναφέρεται στην παραγωγή ενός καθαρού σχήματος ή σχεδόν καθαρού σχήματος στις συνθήκες σφυρηλάτησης. Ο όρος καθαρό σχήμα ή σχεδόν καθαρό υποδεικνύει ότι δεν απαιτείται καμία μεταγενέστερη κατεργασία ή φινίρισμα της επιφάνειας σφυρηλάτησης. Κατά συνέπεια ένα καθαρό σχήμα σφυρηλάτησης δεν απαιτεί περαιτέρω εργασία σε κάθε μια από τις σφυρηλατημένες

επιφάνειες παρά το γεγονός πως μπορεί να απαιτούνται δευτερεύουσες εργασίες για την παραγωγή μικρότερων οπών, στοιχείων κτλ (ASM International 2005).

Η σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος σημαίνει πως είτε μια είτε περισσότερες αλλά όχι όλες οι επιφάνειες είναι καθαρές ή υπάρχει μία επιφάνεια η οποία απαιτεί ελάχιστη περαιτέρω κατεργασία ή φινιρίσμα. Η ακριβής σφυρηλάτηση μερικές φορές περιγράφεται ως σφυρηλάτηση κλειστής ανοχής προκειμένου να δοθεί έμφαση στον αποκλειστικό στόχο επίτευξης μέσω της θερμής σφυρηλάτησης, των ανοχών στη διαστασιολόγηση και στην επιφάνεια του τελικού κομματιού.

Τα τελευταία χρόνια οι μέθοδοι διαμόρφωσης μέσω υπολογιστή (CAD/CAM) εφαρμόζονται στις διάφορες κατεργασίες. Αυτή η υπολογιστική προσέγγιση εφαρμόζεται στη θερμή σφυρηλάτηση ακριβείας των σπειροειδών κωνικών, των μετωπικών και των ελικοειδών οδοντωτών τροχών στις συμβατικές πρέσες, γεγονός που επιτρέπει στο σχεδιαστή της μήτρας να εξετάζει λεπτομερώς τις διάφορες λειτουργικές παραμέτρους (φορτία, τάσεις και θερμοκρασία) στο σχεδιασμό της μήτρας.

Οι ακριβείς οδοντωτοί τροχοί θερμής σφυρηλάτησης έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με τους οδοντωτούς τροχούς κοπής και τους χυτούς οδοντωτούς τροχούς όπου υπάρχει λίγη ή καθόλου απώλεια υλικού.



**Σχήμα 3.9:** Εξοικονόμηση υλικού/ βάρους χρησιμοποιώντας τη σφυρηλάτηση σχεδόν καθαρού σχήματος (ASM International 2005).

Η εξοικονόμηση υλικού συνοδεύεται από εξοικονόμηση κόστους τόσο του υλικού όσο και της κατεργασίας. Επιπλέον οι σφυρηλατοί οδοντωτοί τροχοί ακριβείας έχουν το πλεονέκτημα του αυξανόμενου φορτίου. Αυτή η επιπρόσθετη δύναμη στο σχηματισμό της αυξανόμενης κόπωσης οφείλεται στη διαφορετική ροή κόκκων ανάμεσα στους τροχούς κοπής και στους σφυρηλατούς. Η ροή των κόκκων στους οδοντωτούς τροχούς κοπής



καθορίζεται από τον προσανατολισμό της έλασης της ράβδου και δεν έχει καμία σχέση με το περίγραμμα των οδόντων του τροχού.

Οι περισσότεροι σφυρήλατοι τροχοί που παράγονται σήμερα είναι σχεδόν καθαρού σχήματος. Οι οδόντες των οδοντωτών τροχών σφυρηλατούνται με απομάκρυνση του υλικού γύρω από το προφίλ του οδόντα.

Οι κατεργασίες διαμόρφωσης ξεκινούν με χαλύβδινες ράβδους που συνήθως περιστρέφονται και γυαλίζονται προκειμένου να βελτιωθεί η επιφάνεια τους και κόβονται στο επιθυμητό ακριβές βάρος. Το ακριβές βάρος είναι κρίσιμο επειδή η ποσότητα του χάλυβα πρέπει να γεμίζει πλήρως τη μήτρα για να παράγεται πλήρως το προφίλ του τροχού. Πριν τη σφυρηλάτηση οι ράβδοι θερμαίνονται από τους 925 °C έως τους 1230 °C σε ηλεκτρικούς φούρνους που ελέγχονται από οπτικά πυρόμετρα με ακρίβεια  $\pm 14$  °C.

Οι μηχανικές πρέσες σφυρηλάτησης με ένα κτύπημα σχηματίζουν σχεδόν καθαρού σχήματος οδοντωτούς τροχούς με πλήρη αξιοποίηση των διαθέσιμων αποθεμάτων. Σκοπός της αρχικής κατεργασίας είναι να σπάσει τη ράβδο και να διαστασιολογηθεί η εξωτερική διάμετρος ακριβώς στην διάμετρο της μήτρας. Στη συνέχεια, οι ράβδοι τοποθετούνται στη μήτρα του φινιρίσματος. Μετά τη σφυρηλάτηση ένα υδραυλικό σύστημα εξώθησης αμέσως εξάγει τον οδοντωτό τροχό από τη μήτρα φινιρίσματος. Μετά από την υδραυλική εξαγωγή του ακατέργαστου οδοντωτού τροχού από τη μήτρα γίνεται η τοποθέτησή του σε μια μήτρα κοπής όπου ανοίγεται η οπή. Στη συνέχεια, ο τροχός ψύχεται σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία για περίπου 24 ώρες. Μετά την ψύξη είναι έτοιμος για φινίρισμα.

Οι οδοντωτοί τροχοί σχεδόν καθαρού σχήματος μπορούν να παραχθούν από οποιοδήποτε σκληρυμένο χάλυβα στις πέντε βασικές διαμορφώσεις τους: σπειροειδείς κωνικούς, ελικοειδείς, απευθείας κωνικοί, μετωπικοί τροχοί με 1mm ανοχή και μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ανοχές από 0.1 έως 0.3 mm. Οι διαμέτροι των σχεδόν καθαρού σχήματος οδοντωτών τροχών μπορούν να είναι πάνω από 425 mm με ανοχές από 0.1 έως 1.5 mm. ειδικότερα για τις διάφορες διαμορφώσεις οδοντωτών τροχών ισχύει:

- Οι σπειροειδείς κωνικοί τροχοί μπορούν να παραχθούν με διαμέτρους μεγαλύτερες των 425 mm με 0.5 mm ελάχιστο υλικό ανά πλευρά.
- Οι επίπεδοι κωνικοί τροχοί μπορεί να έχουν διαμορφώσεις και ιδιότητες παρόμοιες με τους σπειροειδείς κωνικούς τροχούς.
- Οι ελικοειδείς τροχοί μπορούν να έχουν διαμέτρους μεγαλύτερες από 250 mm και βάρος μεγαλύτερο από 40 kg.

- Οι μετωπικοί τροχοί με ανοχές της τάξης του 1 mm μπορούν να παραχθούν με διάμετρο μεγαλύτερη από 400 mm και βάρος 135 kg.
- Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ανοχή υλικού από 0.1 έως 0.3 mm μπορούν να παραχθούν με διάμετρο μεγαλύτερη των 250 mm και πάχος μετώπου μεγαλύτερο από 150 mm. Ο συγκεκριμένος τύπος οδοντωτών τροχών απαιτεί μια κατεργασία τελειώματος λείανσης ή στίλβωσης.

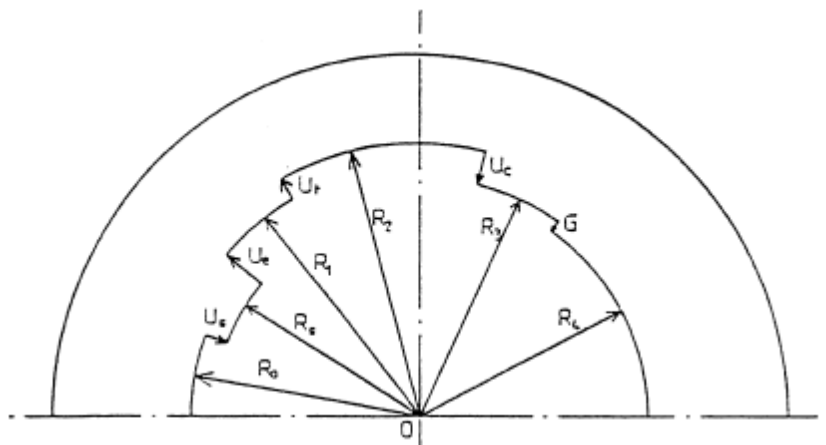


**Σχήμα 3.10:** Παράδειγμα σφυρήλατου οδοντωτού τροχού ακριβείας σχεδόν καθαρού σχήματος (ASM International 2005).

### 3.6 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

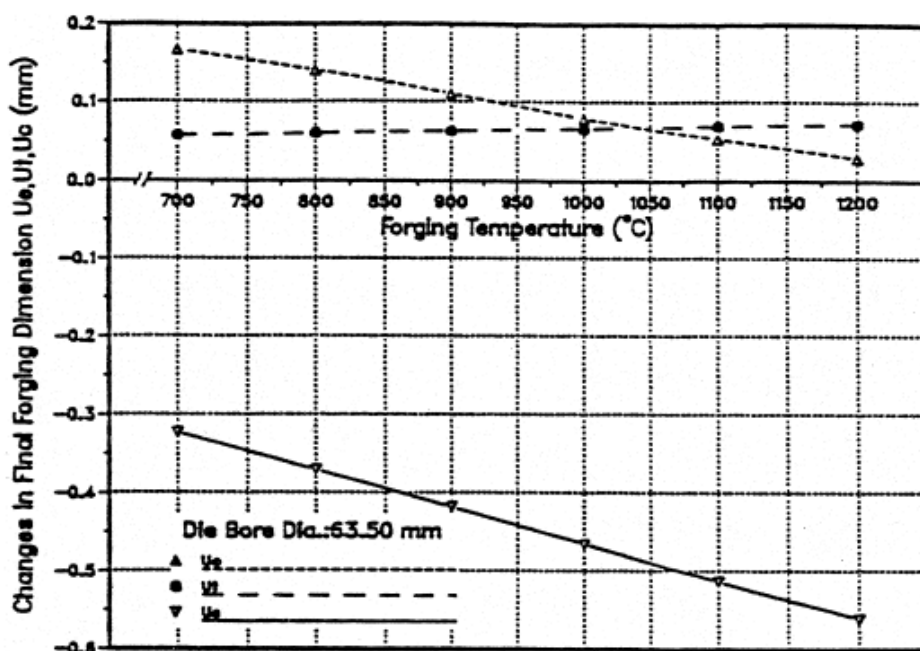
---

Η ακρίβεια των οδοντώσεων που παράγονται με σφυρηλάτηση εξαρτάται από την ακρίβεια των διαστάσεων της μήτρας και αυτή με τη σειρά της εξαρτάται από τρεις παράγοντες που φαίνονται στο σχήμα 3.11, για κυκλικές μορφές.



Σχήμα 3.11: Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια σφυρηλάτησης

Οι παράγοντες αυτοί είναι: διαστολή λόγω της πίεσης σφυρηλάτησης  $U_e$ , η θερμική διαστολή  $U_t$ , και η συστολή  $U_c$  που λαμβάνει χώρα κατά την απόψυξη του τεμαχίου ως την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διάσταση  $G$  που φαίνεται στο σχήμα 3.11 δείχνει την ανοχή που πρέπει να έχει η μήτρα όταν κατασκευάζεται με ηλεκτροδιάβρωση (EDM). Η επιθυμητή διάσταση  $R_0$  επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη την αθροιστική επίδραση και των τριών παραπάνω παραγόντων. Το σχετικό μέγεθος αυτών των επιδράσεων μπορεί να υπολογιστεί από το σχήμα 3.12 το οποίο αναφέρεται στη σφυρηλάτηση κυλινδρικών τεμαχίων ονομαστικής διαμέτρου 63,5 mm.

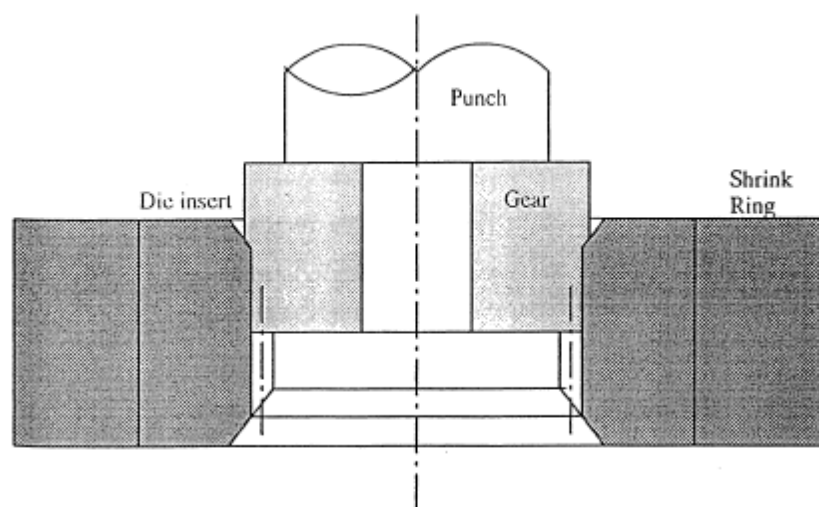


Theoretical variations of final forging dimension with forging temperature in forging steel cylinders

Σχήμα 3.12: Σχετική επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην ακρίβεια σφυρηλάτησης

Η ελαστική διαστολή της μήτρας μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία σφυρηλάτησης γιατί τότε αναπτύσσονται μικρότερες πιέσεις στα τοιχώματα της μήτρας. Αντίθετα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία σφυρηλάτησης τόσο αυξάνεται η θερμική διαστολή της μήτρας. Ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση στις διαστάσεις είναι η θερμική συστολή του σφυρηλατημένου τεμαχίου. Είναι προφανές ότι μεγάλη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν οι τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και η μέγιστη ακρίβεια επιτυγχάνεται όταν τα προς κατεργασία τεμάχια δεν προθερμαίνονται.

Για να βελτιώσουμε την ακρίβεια των οδοντωτών τροχών με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση προτείνονται διάφορες μέθοδοι ψυχρής σφυρηλάτησης. Έρευνες έδειξαν ότι μια κατεργασία τύπου «σιδερώματος» έχει την δυνατότητα να αυξήσει την ακρίβεια της οδόντωσης ικανοποιώντας τις υψηλές προδιαγραφές της βιομηχανίας αυτοκίνησης. Παρακάτω φαίνεται η σχηματική παράσταση της μεθόδου αυτής (Σχήμα 3.13). Το γρανάζι που σφυρηλατείται έχει μεγαλύτερη διάμετρο από τη μήτρα. Το «σιδερώμα» είναι βασικά η ώθηση του υπερμεγέθους τεμαχίου μέσα στη μήτρα όπως φαίνεται στο σχήμα. Έτσι μόνο ένα λεπτό εξωτερικό μέρος της οδόντωσης μορφοποιείται. Σε πειράματα που έγιναν διαπιστώθηκε ότι η επιφάνεια των δοντιών είχε φινίρισμα 0,5  $\mu\text{m}$  RMS.



**Σχήμα 3.13:** Σχηματική παράσταση της μεθόδου «σιδερώματος»

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στον πίνακα 3.1 δείχνουν ότι εκτός από το ίχνος των δοντιών, τα ελαττώματα των σφυρηλατών τροχών έχουν μειωθεί σημαντικά με τη μέθοδο του «σιδερώματος». Η επιφανειακή τραχύτητα RMS που επιτεύχθηκε είναι περίπου 1  $\mu\text{m}$ . Γενικά η ποιότητα των οδοντωτών τροχών βελτιώθηκε περίπου κατά δύο κλάσεις στην κλίμακα AGMA.

Changes in gear form accuracy through ironing

Feature	Finishing die		Induction hardened			
	LH	RH	As-forged		Ironed	
			LH	RH	LH	RH
Pressure angle deg.	0.12	0.10	0.73	0.58	0.19	0.16
Involute ( $\mu\text{m}$ )	15	13	57	46	27	22
Tooth trace ( $\mu\text{m}$ )	8	5	105	94	93	66
Max. cum pitch ( $\mu\text{m}$ )	38	25	180	163	113	101
Adj. pitch ( $\mu\text{m}$ )	12	9	73	28	21	16
Tooth thickness ( $\mu\text{m}$ )	31	12	468	285	55	46
Runout ( $\mu\text{m}$ )	32		96		62	

**Πίνακας 3.1:** Αλλαγές στην ακρίβεια των τροχών με τη χρήση «σιδερώματος»

### 3.7 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Οι επιδράσεις στη μικροδομή των οδοντωτών τροχών οι οποίες μπορούν να προκληθούν από την επιλογή διαφορετικών συνθηκών κατεργασίας, αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

- Η ροή των κόκκων ακολουθεί το προφίλ της οδόντωσης και το μέγεθος των κόκκων τείνει να είναι μικρότερο κοντά στην επιφάνεια των δοντιών, εξαιτίας της μεγαλύτερης παραμόρφωσης σε αυτή τη περιοχή.
- Η θέρμανση σε κανονική ατμόσφαιρα τείνει να προκαλέσει απανθράκωση η οποία είναι μεγαλύτερη στις άκρες των δοντιών.
- Οι οδοντωτοί τροχοί από κατάλληλα κράματα μπορεί να υποστούν σκλήρυνση με βαφή από τη θερμοκρασία της σφυρηλάτησης.
- Οι προεξανθρακωμένες μπιγέτες που πρόκειται να σφυρηλατηθούν, πρέπει να προθερμανθούν σε μη οξειδωτικό περιβάλλον για να αποφευχθεί απώλεια άνθρακα. Το στρώμα άνθρακα τείνει να διαχυθεί προς το εσωτερικό κατά τη θέρμανση και λεπταίνει στην άκρη των δοντιών κατά τη διάρκεια της σφυρηλάτησης.

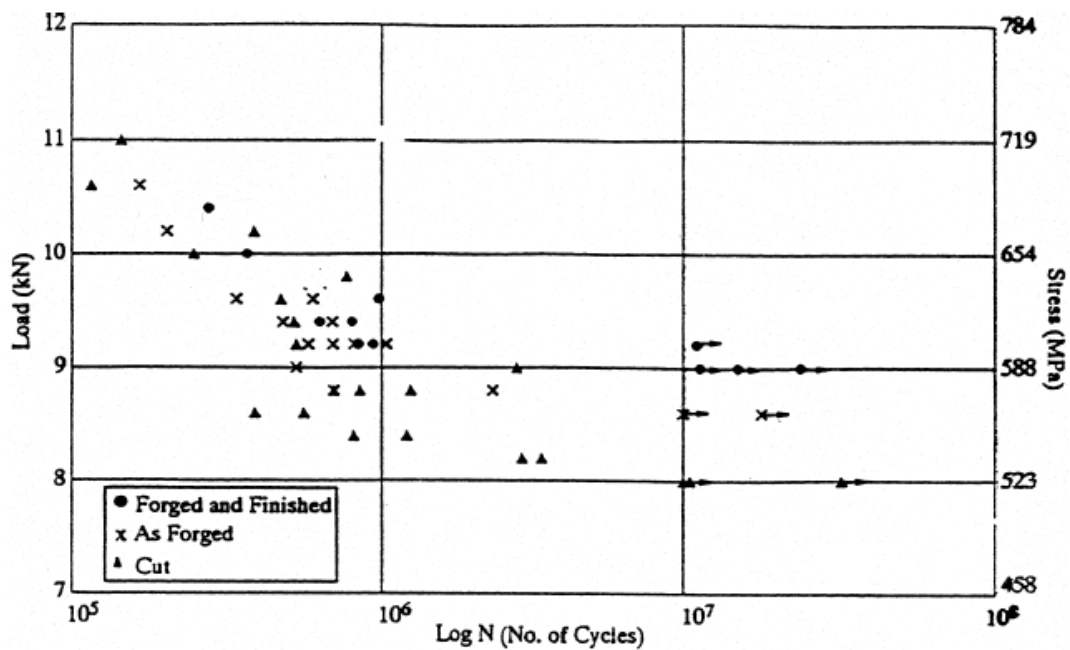
Η δυναμική αντοχή των σφυρηλατών οδοντώσεων είναι μεγαλύτερη από αυτών που φτιάχνονται με συμβατικές μεθόδους. Αυτό φαίνεται στον πίνακα 3.2 στην περίπτωση αντοχής σε κρούση, χαλύβδινων BS 817M40 οδοντωτών τροχών με σκληρότητα  $H_v$  300.

## Impact strength of gears 6

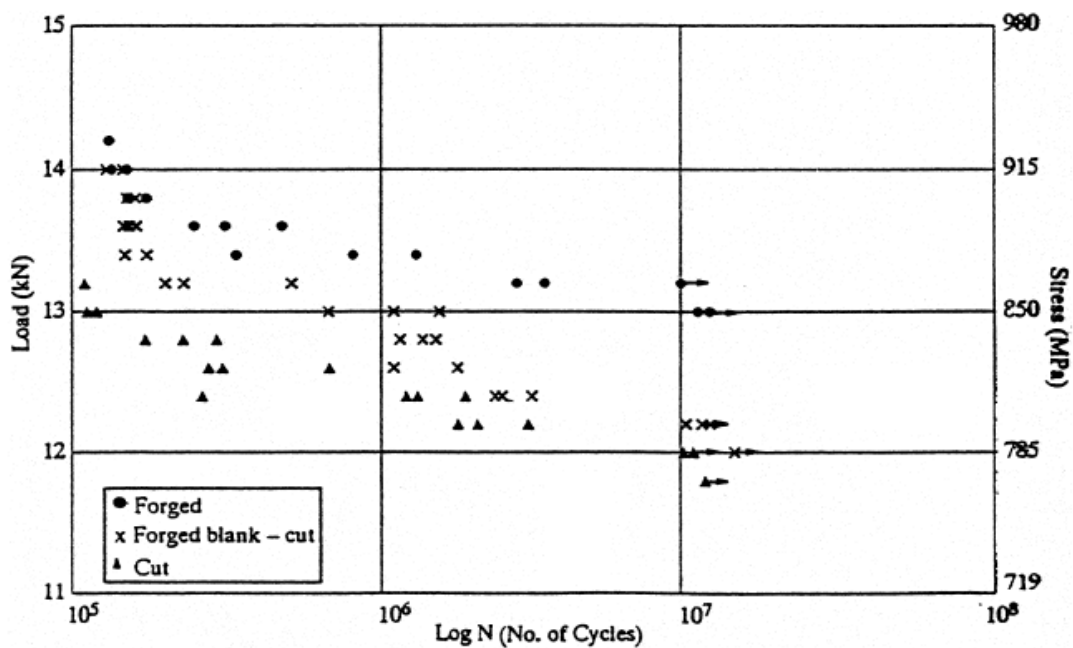
Method of manufacture		
Fully forged	Machined from forged blank	Machined from rolled bar
51.5	41.0	38.6
49.1	37.1	34.8
49.4	36.4	38.5
51.4	38.0	40.5
50.7	37.1	39.0
52.6	37.0	41.6

Πίνακας 3.2: Αντοχή σε κρούση οδοντωτών τροχών

Είναι φανερό ότι η αντοχή σε κρούση των πλήρως σφυρήλατων οδοντωτών τροχών είναι περίπου 30 % μεγαλύτερη από εκείνη των οδοντωτών τροχών που φτιάχνονται με κατεργασίες είτε από τροχούς χωρίς οδόντωση (gear blanks) είτε από μπιγέτες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών κοπώσεως σε οδοντωτούς τροχούς από χάλυβα BS 817M40 φαίνονται στα σχήματα 3.14 και 3.15. Είναι προφανές ότι το όριο κοπώσεως των σφυρήλατων οδοντώσεων είναι σημαντικά υψηλότερο από αυτών που παρήχθησαν με κοπή. Εξαιτίας του γεγονότος ότι μετά τη θερμική επεξεργασία τα πλαϊνά των οδοντώσεων είχαν φθαρεί μόνο πάνω από τον βασικό κύκλο, η επιφάνεια της ρίζας ποδός των σφυρήλατων οδοντώσεων, ήταν πιο τραχιά από την αντίστοιχη των προερχόμενων από κοπή. Για να επιτύχουμε ισοδυναμία των γραναζιών, η επιφάνεια της ρίζας ποδός ορισμένων σφυρήλατων οδοντωτών τροχών φινιρίστηκε με το χέρι. Αυτά αναφέρονται ως «forged and finished» (σφυρηλατημένα και φινιρισμένα) και τα αποτελέσματα του σχήματος 3.14 δείχνουν ότι η αντοχή τους σε κόπωση είναι η μεγαλύτερη. Ακολουθούν τα γρανάζια με επαγωγική θερμική σκλήρυνση με μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση από το γρανάζια με κοπή. Η ίδια σειρά αντοχής σε κόπωση προκύπτει και από τα αποτελέσματα του σχήματος 3.15.



Σχήμα 3.14: Αντοχή σε κόπωση οδοντωτών τροχών



Σχήμα 3.15: Αντοχή σε κόπωση οδοντωτών τροχών

### 3.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Η τεχνολογία σφυρηλάτησης βρίσκεται στο επίπεδο όπου κωνικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να σφυρηλατηθούν στο τελικό τους σχήμα (net-shape). Οδοντωτοί τροχοί με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση μπορούν να παραχθούν με ψυχρή σφυρηλάτηση με μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων. Ωστόσο, ορισμένα είδη οδοντωτών τροχών υψηλών απαιτήσεων (π.χ. γρανάζια για κιβώτια ταχυτήτων οχημάτων) δεν μπορούν ακόμα να παραχθούν με εμπορικά βιώσιμες τεχνικές σφυρηλάτησης. Συνολικά όμως μπορούμε να πούμε πως τα σφυρήλατα γρανάζια έχουν ίδιες και καλύτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τα παραχθέντα με μηχανουργικές κατεργασίες γι' αυτό και μπορούν να τα αντικαταστήσουν σε πολλές εφαρμογές.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

---

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

---

Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων ετών στη Μηχανολογία οφείλεται, χωρίς αμφιβολία, στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους επιμέρους τομείς της. Σε σχέση με τις κατασκευαστικές επιστήμες, η δυνατότητα “απεικόνισης” της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και η δυνατότητα “προσομοίωσης” της στατικής, δυναμικής, θερμικής, ρευστοδυναμικής, κλπ. συμπεριφοράς της, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και αλλάζουν σημαντικά τόσο την εκπαίδευση όσο και την επαγγελματική πράξη του μηχανολόγου μηχανικού.

- ✚ Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού.
- ✚ Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Η κυρίαρχη μέθοδος CAE είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM).

### 4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD

---

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού. Με τον όρο CAD εννοούμε τη δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Προφανώς δεν περιοριζόμαστε στην γνωστή διαδικασία αντικατάστασης του drafting, δηλ. του δισδιάστατου (2-D) παραδοσιακού σχεδίου του μηχανικού, αλλά κυρίως στην περίπτωση τρισδιάστατης (3-D) απεικόνισης κατασκευών ή δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών (μέσω των παρεμβολών Coons, Bezier και Nurbs) ή/και όγκων. Έτσι, είναι πολύ ευκολότερη και ελέγξιμη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος μέχρις ότου ο μελετητής καταλήξει σε μία καταρχήν αποδεκτή κατασκευαστική λύση. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD διαθέτουν κατάλληλα φίλτρα – interfaces (DXF, IGES, STEP) που δίνουν τη

δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο (εναλλαξιμότητα).

Τα εργαλεία CAD μπορούν να ποικίλουν μεταξύ γεωμετρικών εργαλείων διαχείρισης σχημάτων (ένα άκρο), μέχρι εξειδικευμένα προγράμματα εφαρμογών όπως ανάλυση και βελτιστοποίηση (άλλο άκρο). Μεταξύ αυτών των δύο άκρων, τυπικά εργαλεία που είναι διαθέσιμα επί του παρόντος, περιλαμβάνουν ανάλυση ανοχών, υπολογισμούς ιδιοτήτων μάζας (κέντρα βάρους, ροπές αδρανείας, κλπ.), μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) και οπτικής απεικόνισης (visualization) των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, μεταξύ άλλων. Ο σημαντικότερος ρόλος του CAD είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό σχεδιασμό προϊόντος που είναι ουσιώδης σε όλες τις επόμενες φάσεις του κύκλου. Στη συνέχεια, η εν λόγω γεωμετρία αξιοποιείται από το CAE.

### 4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ CAE

---

Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Τα εργαλεία CAE διατίθενται σε ευρεία κλίμακα αναλύσεων. Κινηματικά προγράμματα, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση λειτουργίας μηχανών. Προγράμματα δυναμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σύνθετων συναρμολογημένων δομών όπως λ.χ. τα οχήματα ή συσκευασιών σε πτώση επί του εδάφους.

Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων ανάλυσης είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM) που επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική και αεροδυναμική ανάλυση, ακουστική ανάλυση, κατανομή μαγνητικού πεδίου ή και άλλων πεδίων. Η εφαρμογή της FEM απαιτεί τη χρήση ενός απλουστευμένου αφαιρετικού μοντέλου που πρέπει να γεννηθεί είτε με αλληλεπίδραση του χρήστη ή και αυτόματα. Το λογισμικό που καθιστά δυνατή την κατασκευή του αφαιρετικού μοντέλου και τη γένεση των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τους προ-επεξεργαστές (pre-processors). Μετά την εκτέλεση της ανάλυσης σε κάθε στοιχείο, ο Η/Υ συγκεντρώνει τα αποτελέσματα και τα εμφανίζει με ευανάγνωστο οπτικό τρόπο. Περιοχές υψηλών τάσεων μπορεί να παριστάνονται με κόκκινο

χρώμα για παράδειγμα. Το λογισμικό τέτοιων απεικονίσεων αποτελεί τους λεγόμενους μετα-επεξεργαστές ( post-processors).

Επίσης, είναι διαθέσιμα πολλά εργαλεία βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Παρόλο που τα εργαλεία βελτιστοποίησης μπορούν να θεωρηθούν σαν εργαλεία CAE, συνήθως ταξινομούνται με ξεχωριστό τρόπο. Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες εξελίσσονται προς την κατεύθυνση αυτόματου σχεδιασμού με ολοκλήρωση των διαδικασιών βελτιστοποίησης και ανάλυσης. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, γίνεται η παραδοχή ενός απλού αρχικού σχήματος σχεδιασμού, όπως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο για δισδιάστατο εξάρτημα που αποτελείται από μικρά στοιχεία διαφορετικών πυκνοτήτων. Κατόπιν, εκτελείται η διαδικασία βελτιστοποίησης προς υπολογισμό των βέλτιστων τιμών αυτών των πυκνοτήτων που αποβλέπει στην επίτευξη ενός στόχου με παράλληλη ικανοποίηση των συνθηκών τάσεων ή/και μετατοπίσεων. Συνήθως ο στόχος είναι η επίτευξη του ελάχιστου βάρους. Με βάση τις βέλτιστες τιμές πυκνοτήτων, το βέλτιστο σχήμα του σχεδιασμού λαμβάνεται με απαλοιφή των στοιχείων χαμηλής πυκνότητας.

Η γοητεία των μεθόδων ανάλυσης και βελτιστοποίησης είναι ότι επιτρέπουν στον μηχανικό να δει τον τρόπο με τον οποίο το προϊόν θα συμπεριφερθεί και του επιτρέπει να επισημάνει τα όποια λάθη έχουν γίνει μέχρι τη στιγμή εκείνη, προτού προχωρήσει σε χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου φυσικών πρωτοτύπων. Επειδή το κόστος μελέτης μεταβάλλεται εκθετικά στα τελευταία στάδια ανάπτυξης και παραγωγής του προϊόντος, η πρώιμη βελτιστοποίηση και εξευγενισμός που επιτυγχάνεται από την ανάλυση CAE τελικά αποπληρώνεται με μείωση χρόνου και κόστους.

#### **4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

---

Ένα από τα πρώτα μελήματα του μηχανικού όταν αυτός αναλάβει την ανάπτυξη ενός μοντέλου είναι η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη και σε δισδιάστατες κατασκευές η χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων και τετραπλευρικών στοιχείων τεσσάρων κόμβων δεν είναι η μόνη επιλογή του, ανάλογα με τις δυνατότητες του διαθέσιμου λογισμικού. Πράγματι, μια από τις κρισιμότερες αποφάσεις είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από την διαθέσιμη βιβλιοθήκη στοιχείων. Επιπρόσθετα, το πλήθος των στοιχείων (με άλλα λόγια το μέσο μέγεθος των στοιχείων) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού. Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων (στην *h* version) ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (στην *p* version), τόσο

ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή είναι η επίλυση. Οι διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων εισάγονται παρακάτω. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατοώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (solid modeling).

Στην κλασική μέθοδο (στην h version) εάν  $n$  είναι το πλήθος των κόμβων τότε το πλήθος των βαθμών ελευθερίας είναι  $2n$  και  $3n$  για δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα, αντίστοιχα.

### **Σημειώσεις:**

- Στην κλασική μορφή των πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζεται h-version, χρησιμοποιούνται πολυώνυμα ορισμένου βαθμού οπότε η αύξηση της ακρίβειας επιτυγχάνεται με μείωση της μέσης διάστασης (π.χ. της ακτίνας,  $h$ , του περιγεγραμμένου κύκλου) των στοιχείων, με άλλα λόγια με αύξηση του πλήθους των αυτών (πύκνωση πλέγματος).
- Στην λεγόμενη p-version, χρησιμοποιείται ένα σταθερό πλέγμα αλλά επιτρέπεται η αύξηση του πολυωνυμικού βαθμού  $p$  της συνάρτησης μορφής. Στην p-version, οι συντελεστές του εν λόγω υψηλού βαθμού πολυωνύμου είναι επίσης άγνωστοι που υπολογίζονται σαν τμήμα της διαδικασίας επίλυσης.

#### **4.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλ. η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση του πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (finite-element modeling), η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια κατάλληλου προ-επεξεργαστή. Πολύ παλαιότερα, η εισαγωγή των δεδομένων δινόταν με γραμμές εντολών με τη βοήθεια ενός αυτόνομου αρχείου δεδομένων (batch file).

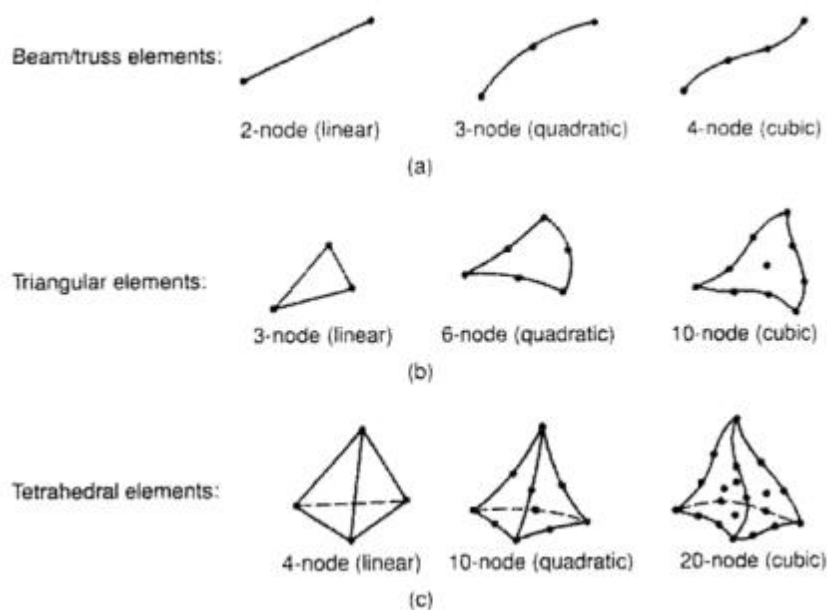
Ο προ-επεξεργαστής (pre-processor) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικείμενου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FEA (Finite Element Analysis) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε

προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης (με ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όγκου, επιφάνειας και wireframe, και παραμετρικών μεθόδων που στηρίζονται σε features) μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για ανάλυση. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων όπως το IGES ή απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD. Ωστόσο, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμη. Το μοντέλο μπορεί να φαίνεται στο μάτι ότι είναι τέλειο αλλά μπορεί στην πραγματικότητα να έχει σφάλματα που αποκαλύπτονται στο σύστημα FEA, κυρίως κατά την διαδικασία γένεσης πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία. Επιπλέον, ακόμη και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές του, οπότε μερικές από αυτές (π.χ. ένα fillet) θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να αντανakλάται αυτόματα στο πλέγμα.

Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Το Σχήμα

4.1 δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, οι ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων (όπως συγκέντρωση τάσεων γύρω από οπές) πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή.



**Σχήμα 4.1:** Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) δισδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα

Μια διαφορετική προσέγγιση στο δίλημμα του πλέγματος είναι η χρήση της p-version μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή στηρίζεται σε ένα απλούστερο, αυτόματα γεννημένο πλέγμα, αλλά κατόπιν μεταβάλλει αυτόματα τον πολυωνυμικό βαθμό των συναρτήσεων μορφής. Παρόλο που σήμερα είναι διαθέσιμα πολλά τέτοια προγράμματα FEA, δύο προγράμματα (PTC's Pro/MECHANICA και CADSI's PolyFEM) σχεδιάστηκαν ειδικά για ανάλυση τύπου p-version. Επιπλέον από το εύκολο πλέγμα, τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η ικανότητα να καθορίσουν όρια ακρίβειας και πλησιέστερης προσέγγισης της γεωμετρίας του μοντέλου CAD. Χρησιμοποιώντας χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας, ο σχεδιαστής μπορεί να πάρει γρήγορα αποτελέσματα ανάλυσης στο προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού.

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ., στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη

παραμορφωσιακή κατάσταση). Επίσης, οι άγνωστοι ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οριακές συνθήκες όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, και ο λόγος του Poisson (για ελαστικές κατασκευές). Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις. Άλλες ιδιότητες υλικών περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα, κλπ), ιξωδοελαστικότητα, κλπ, για άλλου τύπου προβλήματα. Γίνεται μόνο μια απλή παραδοχή: σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Αυτό λ.χ. δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναλύσει ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό. Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάλυση σύνθετων υλικών είναι η διαχείριση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων προκειμένου να υπολογισθεί η αποκόλληση (delamination).

Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (post-processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών «ισοτασικών» επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας. Στην περίπτωση

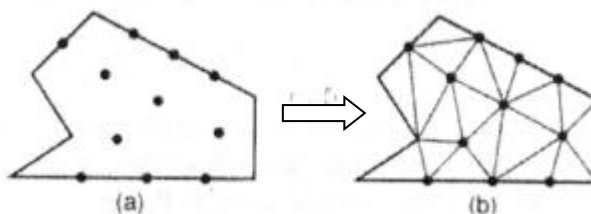
δυναμικής ανάλυσης όλα τα πακέτα διαθέτουν animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιόμορφων ταλάντωσης όσον και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων. Επίσης, πολλά συστήματα διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, σαν κείμενα, παρουσιάσεις, videos, e-mail, ή αποστολή στο διαδίκτυο.

#### 4.4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Η γένεση πλέγματος συνεπάγεται τη δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Περιλαμβάνει επίσης την αυτόματη αρίθμηση των κόμβων και στοιχείων βασισμένων στην ελάχιστη αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Έτσι, υποτίθεται ότι οι μέθοδοι αυτόματης γένεσης πλέγματος απαιτούν μόνο το γεωμετρικό μοντέλο (γεωμετρία και τοπολογία) του προς διακριτοποίηση αντικειμένου, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος όπως πυκνότητα πλέγματος και τύπος στοιχείου, και τις οριακές συνθήκες, περιλαμβάνοντας σαν είσοδο συνθήκες φόρτισης. Άλλες μέθοδοι που απαιτούν πρόσθετη είσοδο, όπως υποδιαίρεση του αντικειμένου σε υποχωρία ή υποπεριοχές, ταξινομούνται σαν ημιαυτόματες μέθοδοι. Εν συντομία, εισάγουμε τις μεθόδους γένεσης πλέγματος με βάση την ταξινόμηση που πρότεινε ο Ho-Le (1988).

- **Μέθοδος Σύνδεσης Κόμβων (N.C.A.)**

Η μέθοδος σύνδεσης κόμβων (node connection approach) προκειμένου να παράγουν πλέγμα είναι πολύ δημοφιλής διότι είναι πολύ απλή στη σύλληψη της. Οι δύο κύριες φάσεις αυτής της προσέγγισης είναι (i) η γένεση κόμβων που δείχνονται στο Σχήμα 4.2 (a), και (ii) η γένεση στοιχείων στο Σχήμα 4.2 (b).

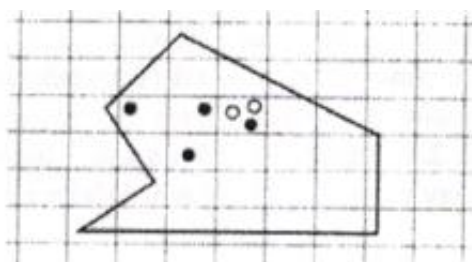


**Σχήμα 4.2:** Μέθοδος σύνδεσης κόμβων



**Γένεση κόμβων:** Δημοσιευμένα έργα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα.

- **Μέθοδος του Cavendish** (1974). Σε αυτή τη μέθοδο, εισάγονται αρχικά κόμβοι στο σύνορο του αντικειμένου με το χέρι του χρήστη (manually). Κατόπιν οι εσωτερικοί κόμβοι γεννώνται αυτόματα έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος. Το αντικείμενο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος ζωνών διαφορετικών επιθυμητών μεγεθών στοιχείων. Στη ζώνη  $i$ , υπερτίθεται ένα τετραγωνικό grid βήματος  $r(i)$ . Το Σχήμα 4.3 δείχνει ένα υπερτιθέμενο μονό grid, που βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος. Για κάθε τετράγωνο του grid, γεννιέται με τρόπο τυχαίο ένας εσωτερικός κόμβος. Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1 δύο φορές, μια για την κατεύθυνση  $x$  και μια για την κατεύθυνση  $y$ , και υπολογίζοντας την ισοδύναμη θέση των τιμών  $x$  και  $y$ . Εάν ο παραγόμενος κόμβος πέφτει μέσα στο αντικείμενο και έχει απόσταση από το σύνορο μεγαλύτερη από το  $r(i)$ , αλλά και από τους προηγούμενα παραγόμενους κόμβους, τότε γίνεται αποδεκτός. Εάν όχι, ένας άλλος κόμβος παράγεται τυχαία και ελέγχεται. Εάν δεν καταστεί δυνατόν να βρεθεί ένας αποδεκτός κόμβος μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών (ας πούμε, πέντε), τότε το εν λόγω τετράγωνο παραλείπεται και θεωρείται το επόμενο. Η μέθοδος αυτή είναι επεκτάσιμη και στις 3 διαστάσεις, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται τρισδιάστατο grid.
  
- **Μέθοδος του Shimada** (1992). Αυτή η μέθοδος γεμίζει το εσωτερικό του προς διακριτοποίηση αντικειμένου με «φουσαλίδες» όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, και λαμβάνει τα κέντρα τους σαν κόμβους. Το μέγεθος κάθε φουσαλίδας προσδιορίζεται από την κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν οι θέσεις των φουσαλίδων προσδιορίζονται από την ικανοποίηση της ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ αυτών.



Σχήμα 4.3: Μέθοδος γένεσης κόμβων κατά Cavendish

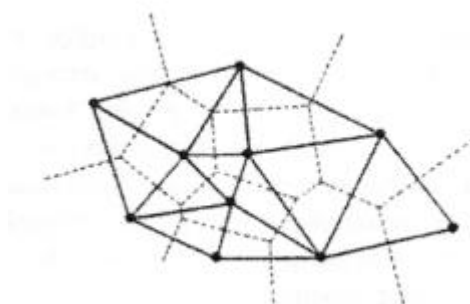
**Γένεση στοιχείων:** Σε αυτή τη δεύτερη φάση, κόμβοι που γεννήθηκαν στην προηγούμενη φάση συνδέονται για να αποτελέσουν στοιχεία έτσι ώστε να μην επικαλύπτονται και να καλύπτεται ολόκληρο το χωρίο. Αναφερόμαστε στη μέθοδο του Lee διότι αυτή μπορεί να οδηγήσει σε τετραπλευρικά στοιχεία. Ωστόσο, η μέθοδος τριγωνοποίησης του Delaunay είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος σύνδεσης κόμβων. Στις επεξηγήσεις που ακολουθούν, θεωρούμε στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους. Εάν επιθυμούμε στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους, τότε αυτοί προκύπτουν εύκολα από τους γωνιακούς.

- **Μέθοδος Lee** (1983). Σε αυτή τη μέθοδο, επί του αντικειμένου υπερτίθεται ένα τετραγωνικό πλέγμα υποβάθρου (grid) του οποίου το βήμα είναι ίσο προς το επιθυμητό μέγεθος στοιχείων. Κατόπιν οι κόμβοι που παρήχθησαν στην προηγούμενη φάση συσχετίζονται με τα κελιά του πλέγματος υποβάθρου. Τα κελιά και οι αντίστοιχοι κόμβοι επισκέπτονται στήλη-προς-στήλη από αριστερά προς τα δεξιά και, μέσα στην ίδια στήλη, από τα κάτω προς τα πάνω. Μέσα σε ένα κελί, οι κόμβοι διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τετμημένης  $x$ . Κόμβοι με την ίδια τετμημένη  $x$ , διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τεταγμένης  $y$ . Οι κόμβοι επισκέπτονται κατά σειρά και, για κάθε κόμβο, οι γειτονικοί κόμβοι βρίσκονται έτσι ώστε να διαμορφώνουν τους κόμβους ενός καλοσχηματισμένου τετραπλεύρου. Στην περίπτωση αδυναμίας σχηματισμού καλώς ορισμένου τετραπλεύρου, δημιουργείται αντίστοιχο τριγωνικό στοιχείο.
- **Μέθοδος τριγωνοποίησης Delaunay.** Αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος γένεσης τριγώνων που συνδέει δεδομένους κόμβους διότι μεγιστοποιεί το άθροισμα των μικρότερων γωνιών σε όλα τα τρίγωνα που δημιουργούνται. Έτσι, αποφεύγονται τα λεπτά τρίγωνα.

Μια τυπική τριγωνοποίηση Delaunay ξεκινάει από ένα διάγραμμα Voronoi ή Dirichlet tessellation. Ένα διάγραμμα Voronoi ενός συνόλου  $N$  σημείων,  $P_i (i=1,2,\dots,N)$ , αποτελείται από  $N$  πολύγωνα (πολύεδρα στις 3 διαστάσεις),  $V_i$  καθένα των οποίων έχει κέντρο το σημείο  $P_i$  έτσι ώστε ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του επιπέδου (του χώρου στις 3 διαστάσεις) που είναι πλησιέστερα στον κόμβο  $i$ , να περιλαμβάνονται στον  $V_i$ . Μαθηματικά, το  $V_i$  (επιφάνεια ή όγκος) εκφράζεται ως:

$$V_i = \{x: |x - P_i| < |x - P_j| \text{ για όλα τα } j \neq i\}$$

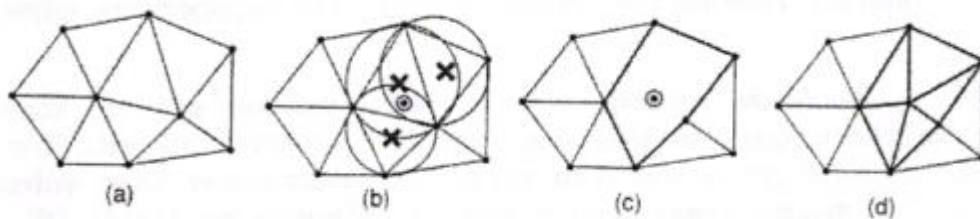
όπου  $|...|$  συμβολίζει το μέτρο του διανύσματος εντός του και κάθε  $V_i$ , είναι ένα κυρτό πολύγωνο (πολύεδρο) που περιβάλλεται από γραμμές (επίπεδα) τέμνοντα κάθετα τις γραμμές μεταξύ  $P_i$ , και των γειτονικών του κόμβων. Αυτή η διαίρεση του (δισδιάστατου ή τρισδιάστατου) χώρου από ένα σύνολο  $V_i$  καλείται Dirichlet tessellation. Κάθε πολύγωνο (πολύεδρο) Voronoi έχει έναν κόμβο που συνδέεται με αυτό. Μετά τη γένεση του διαγράμματος Voronoi, μπορούμε να δημιουργήσουμε τριγωνικά (τετραεδρικά, στις 3 διαστάσεις) στοιχεία συνδέοντας τα σημεία που σχετίζονται με γειτονικά πολύγωνα (πολύεδρα) Voronoi. Το Σχήμα 4.4 δείχνει το διάγραμμα Voronoi και την αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay για 10 κόμβους στη δισδιάστατη περίπτωση.



**Σχήμα 4.4:** Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay

Η τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το δεδομένο σύνολο σημείων (κόμβων) χωρίς να είναι απαραίτητη πρώτα να έχει γίνει το διάγραμμα Voronoi, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, και ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει καθόλου άλλα σημεία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται ως ακολούθως. Στην αρχή διαμορφώνεται ένα τρίγωνο  $T_0$ , που περιέχει όλους τους κόμβους· μπορεί να πρέπει να εισαχθούν επιπλέον σημεία στις κορυφές του  $T_0$ . Τότε εισάγουμε κόμβους από ένα δεδομένο σύνολο, έναν προς ένα, και βρίσκουμε τα τρίγωνα έκαστο των οποίων ο περιγεγραμμένος κύκλος περικλείει τον κόμβο. Αυτά τα πολύγωνα, που ονομάζονται τεμνόμενα πολύγωνα (intersection polygons), απαλείφονται. Στο Σχήμα 4.5 (b), τα τεμνόμενα πολυώνυμα συμβολίζονται με  $\times$  όταν ένας νέος κόμβος  $\odot$  εισάγεται στα υπάρχοντα τρίγωνα, όπως στο Σχήμα 4.5 (a), που γεννώνται από τους ήδη εισαχθέντες κόμβους. Το Σχήμα 4.5 (c) δείχνει το αποτέλεσμα μετά την απαλοιφή των τεμνόμενων αυτών πολυώνων. Κατόπιν, νέα τρίγωνα διαμορφώνονται συνδέοντας τον νέο κόμβο με τις

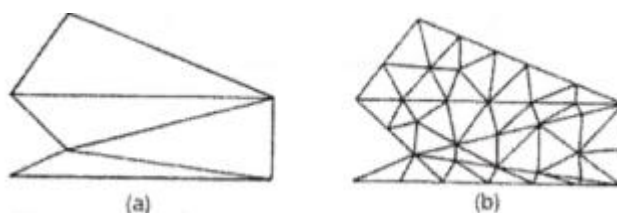
κορυφές των τεμνόμενων επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5 (d). Τελικά, τα τρίγωνα που είναι συνδεδεμένα με τα επιπλέον σημεία που διαμορφώνουν το  $T_0$ , απαλείφονται. Αυτή η διαδικασία μπορεί εύκολα να επεκταθεί για τρισδιάστατη γένεση πλεγμάτων στοιχείων χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένες σφαίρες από 4 κόμβους αντί περιγεγραμμένους κύκλους από 3 κόμβους. Ωστόσο, η τρισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να περιέχει πολύ λεπτά τετράεδρα, ενώ η δισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay είναι, με κάποια έννοια, η βέλτιστη τριγωνοποίηση για ένα δεδομένο σύνολο σημείων.



Σχήμα 4.5: Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson

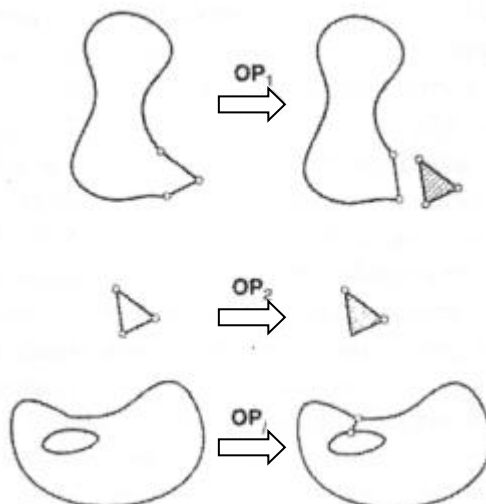
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας (T.D.A.)**

Η δισδιάστατη μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας (topology decomposition approach) αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύγωνο και το τελευταίο κατακερματίζεται σε ένα σύνολο μεγάλων στοιχείων συνδέοντας τις κορυφές προς διαμόρφωση τριγώνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 (a). Κατόπιν, αυτά τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτύνονται ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 (b). Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά διότι τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνο τους από την αρχική τοπολογία του αντικειμένου, ιδιαίτερα από την κατανομή των κορυφών. Οι κορυφές που ανήκουν στο ίδιο μεγάλο στοιχείο μπορούν να προσδιορισθούν από τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay που περιγράφηκε σε παραπάνω ενότητα.



Σχήμα 4.6: Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης

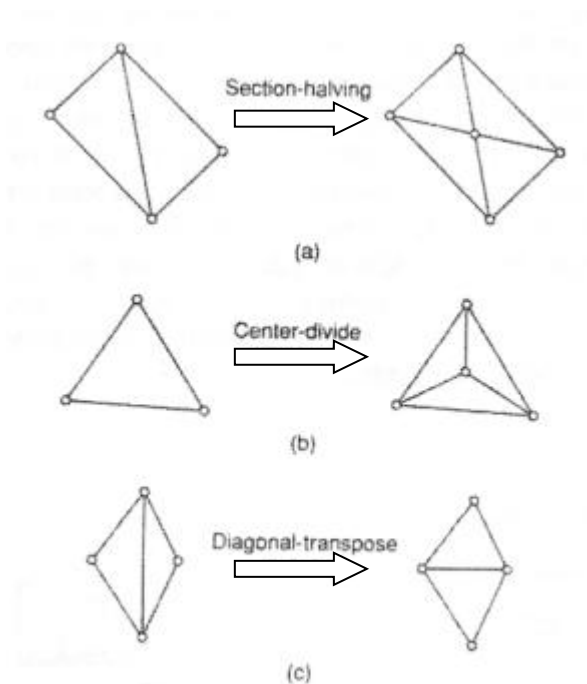
Κατά τη διαδικασία γένεσης ενός συνόλου τριγώνων από τις κορυφές, ο Wordenweber εισήγαγε και εφάρμοσε επίσης τους λεγόμενους τελεστές Euler με τον τρόπο που αυτοί χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση όγκων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, πρώτος εφαρμόζεται ο τελεστής Wordenweber (1984)  $OP_1$  για να απαλείψει τις τρύπες στο αντικείμενο. Κατόπιν διαμορφώνονται τα τρίγωνα από τις κορυφές και αποχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας επαναληπτικά τον τελεστή  $OP_1$  μέχρις ότου απομείνουν μόνον 3 κορυφές. Τελικά, εφαρμόζεται ο τελεστής  $OP_2$  για να διαμορφώσει το τελευταίο τρίγωνο.



**Σχήμα 4.7:** Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα

Μόλις το αντικείμενο μετατραπεί σε ένα σύνολο μεγάλων τριγώνων, κάθε τρίγωνο εκλεπτύνεται έτσι ώστε να υπακούει στην απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος. Για την εκλέπτυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τρεις μέθοδοι που δείχνονται στο Σχήμα 4.8. Το Σχήμα 4.8 (a) δείχνει μια μέθοδο που εφαρμόζεται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους. Δηλαδή, προστίθεται ένας κόμβος στην κοινή ακμή, και τα γειτονικά στοιχεία υποδιαιρούνται συνδέοντας τους κόμβους τους με τον νέο κόμβο. Σχήμα 4.8 (b), ένα μεγάλο τριγωνικό στοιχείο υποδιαιρείται προσθέτοντας ένα νέο κόμβο στο κέντρο βάρους του. Όταν το υποδιαιρέσουμε με τους τρόπους που περιγράψαμε παραπάνω, μπορεί να συναντήσουμε λεπτά τρίγωνα όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.8 (c). Αυτά τα τρίγωνα είναι ήδη αρκετά μικρά για τη δοθείσα πυκνότητα πλέγματος.

Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα του πλέγματος στρίβοντας τη διαγώνιο του τετραπλεύρου που διαμορφώνεται από τις κορυφές των δύο αρχικών τριγώνων. Παρατηρείστε ότι το αποτέλεσμα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να μην είναι αρκετά ακριβές εάν υπάρχουν πάρα πολλά λεπτά στοιχεία.



**Σχήμα 4.8:** Μέθοδοι εκλέπτυνσης τριγώνων

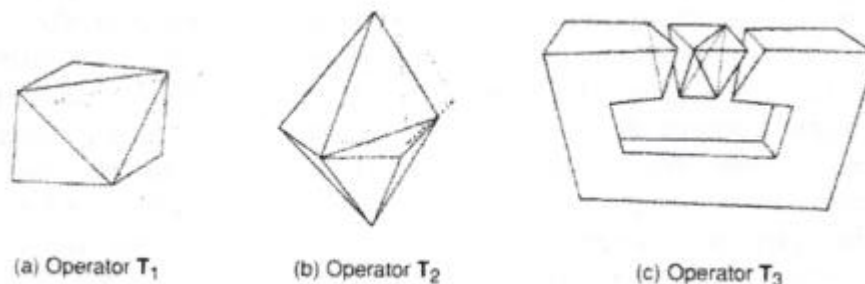
Η μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης μπορεί να επεκταθεί στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο, και το πολύεδρο κατατέμνεται σε τετραεδρικά στοιχεία συνδέοντας τις κορυφές τους. Κατόπιν, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση. Οι Woo και Thomasma (1984) πρότειναν τελεστές παραπλήσιους με αυτούς που πρότεινε ο Wordenweber για να διευκολύνει τον σχηματισμό των τετραεδρικών στοιχείων. Αυτοί οι τελεστές, που δείχνονται στο Σχήμα 4.9, χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό τετραέδρων ως εξής:

Πρώτα, εφαρμόζεται ο τελεστής  $T_3$  για να απαλείψει τις σπές του αντικειμένου αποτέμνοντας το κατάλληλο τμήμα του έτσι ώστε η σπή να αποκαλυφθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 (c). Σημειώστε ότι σε αυτό το στάδιο τρία τετράεδρα διαμορφώνονται σαν αποτέλεσμα παράπλευρης διαδικασίας.

Κατόπιν, οι κυρτές κορυφές στις οποίες όπου συναντώνται τρεις ακμές, που καλούνται convex trivalent vertices (κορυφές), διαχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας τον τελεστή  $T_1$ , όπως εικονίζεται στο Σχήμα 4.9 (a). Αυτός ο τελεστής εφαρμόζεται επαναληπτικά μέχρις ότου δεν υπάρξει καμία κυρτή trivalent κορυφή. Εάν όλες οι κορυφές που απομένουν δεν είναι convex trivalent, τότε ο τελεστής  $T_2$

εφαρμόζεται για να σκάψει ένα τετράεδρο, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 4.9 (b). Αυτός ο τελεστής παρέχει τις νέες convex trivalent κορυφές και έτσι ο  $T_1$  εφαρμόζεται ξανά.

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το αντικείμενο περιορισθεί σε ένα μονό τετράεδρο.

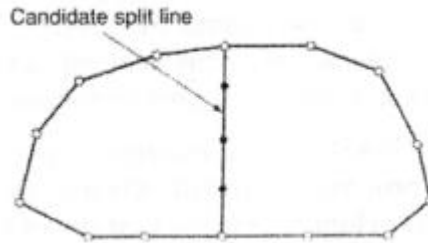


Σχήμα 4.9: Τελεστές αποσύνθεσης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις

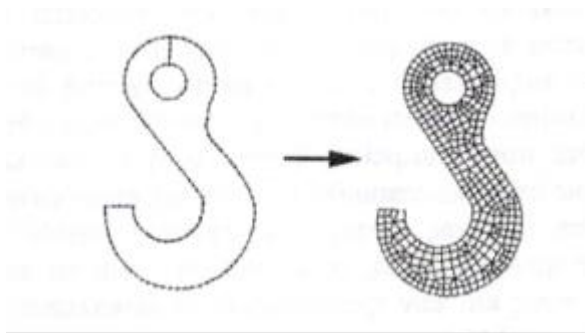
- **Μέθοδος Αποσύνθεσης Γεωμετρίας (G.D.A.)**

Οι μέθοδοι αποσύνθεσης γεωμετρίας (geometry decomposition approaches) εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που βασίζονται σε αναδρομές και αυτές που βασίζονται σε επαναλήψεις. Στη συνέχεια επεξηγούμε μόνο τη μέθοδο αναδρομής καθώς αυτή είναι επεκτάσιμη στις τρεις διαστάσεις.

Η μέθοδος αναδρομικής αποσύνθεσης (recursive geometry decomposition method) γεννά τριγωνικά και τετρακομβικά στοιχεία στις 2 διαστάσεις με τον ακόλουθο τρόπο. Πρώτα, το αρχικό αντικείμενο διαιρείται σε κυρτά μέρη είτε με το χέρι ή αυτόματα. Αυτόματη αποσύνθεξη αντικειμένου σε κυρτά τμήματα περιγράφεται από τον Bykat (1976). Για κάθε κυρτό τμήμα, εισάγονται κόμβοι στο σύνορο του έτσι ώστε να ικανοποιήσει την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν, κάθε κυρτό τμήμα υποδιαιρείται προσεγγιστικά στο μέσον του «μακρύτερου άξονα», όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Στη συνέχεια, εισάγονται περισσότεροι κόμβοι κατά μήκος της διαχωριστικής γραμμής σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πυκνότητας πλέγματος, και τα δύο ήμισυ υποδιαιρούνται επαναληπτικά μέχρις ότου γίνουν τρίγωνα ή τετράπλευρα. Μερικές μέθοδοι επαναλαμβάνουν την υποδιαίρεση μέχρις ότου μέχρις ότου καταλήξει σε εξάγωνα ή οκτάγωνα και παράγουν τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία από αυτά σύμφωνα με προ-αποθηκευμένα πρότυπα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να πάρουμε περισσότερα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Το Σχήμα 4.11 δείχνει ένα παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.



**Σχήμα 4.10:** Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line)



**Σχήμα 4.11:** Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου

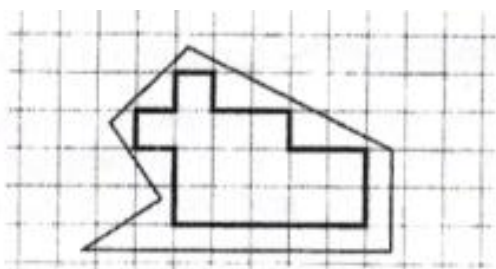
Η βασική μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να επεκταθεί και στη γένεση τρισδιάστατου πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση το αντικείμενο υποδιαιρείται σε δύο υπο-όγκους μέσω ενός διαχωριστικού επιπέδου, μέχρις ότου όλοι οι όγκοι περιορισθούν σε τετράεδρα. Σε αντίθεση με τη δισδιάστατη περίπτωση όπου μπορούν να παραχθούν τετράπλευρα, δεν είναι δυνατόν να γεννηθούν τετράεδρα με απευθείας τρόπο. Ωστόσο, κάθε τετράεδρο μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 4 εξάεδρα, ή στοιχεία brick, εάν είναι επιθυμητό.



- **Μέθοδος Βάσει Πλέγματος (G.B.A.)**

Η μέθοδος βάσει πλέγματος (grid-based approach) προκύπτει από την παρατήρηση ότι ένα grid μοιάζει με ένα πλέγμα και ότι αυτό μπορεί να μετασχηματισθεί στο τελευταίο υπό την προϋπόθεση ότι τα κελιά του grid κατά μήκος του συνόρου του αντικειμένου μπορούν να μετασχηματιστούν σε στοιχεία.

Η μέθοδος των Thacker, Gonzalez και Putland (1980) είναι ίσως η πρώτη σχετική δημοσίευση που έκανε χρήση της μεθόδου βάσει grid. Σε αυτή τη μέθοδο ένα αντικείμενο αρχικά επικαλύπτεται από ένα τριγωνικό grid και τα σημεία του grid που πέφτουν εκτός αντικειμένου εξαλείφονται, αφήνοντας ένα σύνορο μορφής zigzag. Τα σημεία του grid που βρίσκονται πάνω στο zigzag σύνορο μετακινούνται προς το σύνορο του αντικειμένου ώστε να αποτελέσουν το τελικό πλέγμα. Οι διαφοροποιήσεις αυτής έγκειται στον τρόπο διαχείρισης του συνόρου. Ο Kikuchi (1986) επέκτεινε τη μέθοδο έτσι ώστε εκτός από κυρίως τετράπλευρα να περιλαμβάνει ακόμη και μερικά τρίγωνα, χρησιμοποιώντας ορθογωνικό grid, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Ένα πρόβλημα και των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με πολύ μικρές ακμές σε σχέση με το βήμα του grid, χάνονται. Σε άλλες μεθόδους τα σημεία του zigzag συνόρου δεν μετακινούνται στο σύνορο του αντικειμένου. Αντ' αυτού, δημιουργούνται τριγωνικά στοιχεία στην περιοχή μεταξύ zigzag και συνόρου αντικειμένου μέσω ενός αλγορίθμου τριγωνοποίησης.

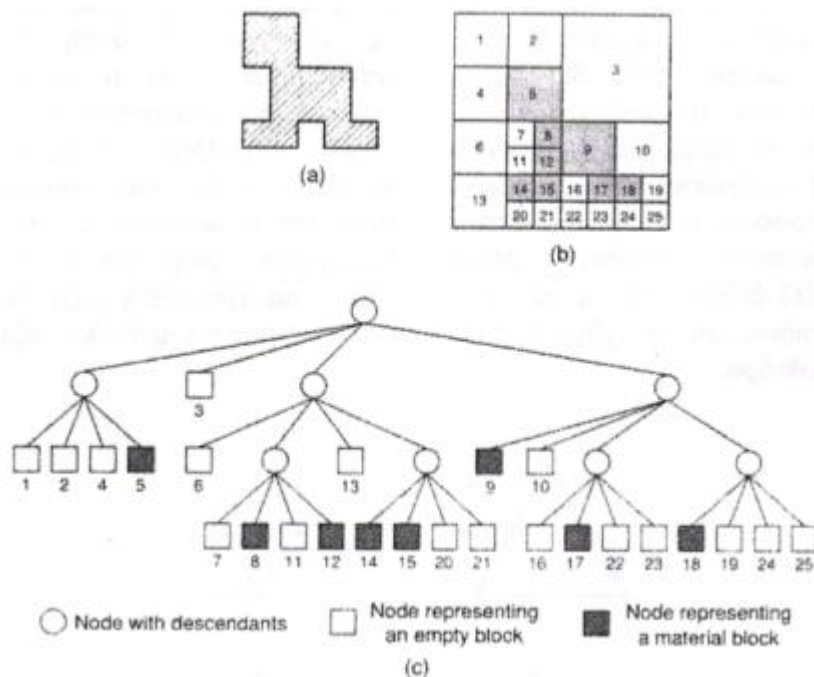


**Σχήμα 4.12:** Χρήση ορθογωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based”

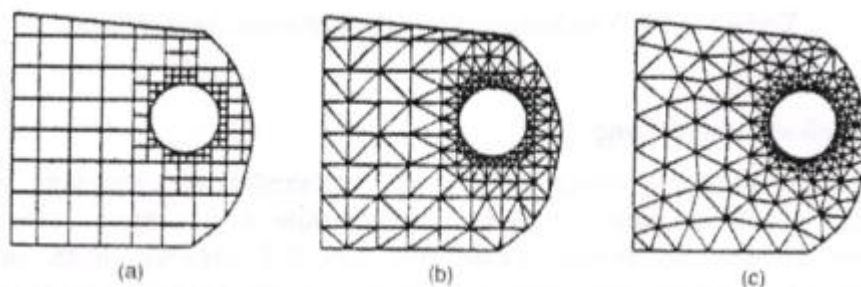
Οι Yerry και Shephard (1983) χρησιμοποίησαν μια δενδριτική (quadree) αναπαράσταση του αντικειμένου για τη γένεση πλεγμάτων. Ένα quadree είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Παριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο, σαν αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 4.13 (a), σαν ένα σύνολο τετραγώνων έκαστο διαφορετικού μεγέθους με επαναληπτική υποδιαίρεση της root square που περικλείει το αντικείμενο. Το Σχήμα 4.13 (b) δείχνει τη διαδικασία υποδιαίρεσης του αντικειμένου, και το Σχήμα 4.13 (c) δείχνει την αναπαράσταση quadree αυτής της υποδιαίρεσης. Τα πλέγματα γεννώνται ως εξής:

**Βήμα 1:** Δημιουργείται ένα root square που περικλείει το αντικείμενο και υποδιαιρείται σε τέσσερα τέταρτα (quadrants) υποδιπλασιάζοντας τις πλευρές του. Κατόπιν κάθε τέταρτο ταξινομείται ανάλογα με τη σχετική θέση του ως προς το αντικείμενο. Εάν το τέταρτο δεν είναι ούτε πλήρως εντός αλλά ούτε και πλήρως εκτός του αντικειμένου, τότε αυτό διαιρείται ξανά. Αυτή η διαδικασία υποδιαίρεσης επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί η κατανομή πυκνότητας πλέγματος και τα τέταρτα βρεθούν είτε πλήρως εντός ("completely inside") αντικειμένου ή επικαλύπτονται ("overlapping"). Έτσι, το αντικείμενο που θα παριστάνεται από τη συλλογή των πλήρως εντός και των τροποποιημένων επικαλυπτόμενων τετάρτων θα φαίνεται όπως στο Σχήμα 4.14 (a).

**Βήμα 2:** Κάθε τροποποιημένο επικαλυπτόμενο τέταρτο διαιρείται μέσα στα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο πρότυπο (prestored template) που βασίζεται στο σχήμα του τετάρτου. Κατόπιν, το «εντελώς εντός» τέταρτο επίσης υποδιαιρείται ώστε να ικανοποιήσει την προσαρμογή του πλέγματος με τα γειτονικά πλέγματα. Δυο γειτονικά στοιχεία ονομάζονται συμβατά (conforming) εάν μοιράζονται μια πλήρη ακμή (μια ολόκληρη έδρα σε 3-D στοιχεία). Το Σχήμα 4.14 (b) δείχνει το αποτέλεσμα της γένεσης πλέγματος.



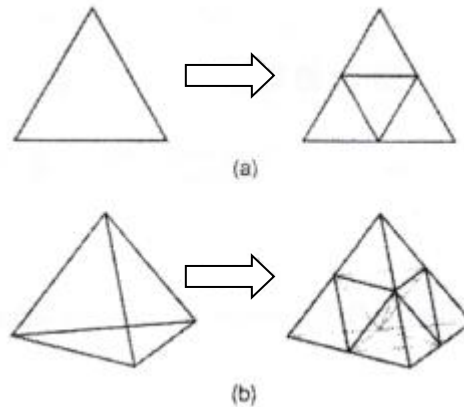
Σχήμα 4.13: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων



Σχήμα 4.14: Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree

**Βήμα 3:** Οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς (adjustment) έτσι ώστε να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων. Το Σχήμα 4.14 (c) δείχνει το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης του πλέγματος. Η μέθοδος εξομάλυνσης αναφέρεται αργότερα. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα «επικαλυπτόμενα» όγδοα (octants) τροποποιούνται έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μόνον τον εσωτερικό χώρο του αντικειμένου και κατόπιν διασπάζεται σε τετράεδρα όπως τα τροποποιημένα επικαλυπτόμενα τέταρτα διασπώνται σε τρίγωνα στις δύο διαστάσεις. Το τροποποιημένο επικαλυπτόμενο όγδοο πρέπει να διασπασθεί σε τετράεδρα που ικανοποιούν την συμβιβαστικότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό απαιτεί ένα περίπλοκο αλγόριθμο. Πράγματι, ούτε και η διάσπαση του τροποποιημένου τετάρτου στις δύο διαστάσεις είναι εύκολο πρόβλημα.

Οι Jung και Lee (1993) πρότειναν μια νέα μέθοδο, αρχίζοντας από τη τριγωνική ρίζα (τετράεδρη ρίζα στις 3 διαστάσεις) αντί της τετραγωνικής ρίζας (κυβικής ρίζας) για να αποφύγουν τη δυσκολία που μόλις αναφέραμε. Σε αυτή τη μέθοδο, η παράσταση quadree ενός δισδιάστατου αντικειμένου είναι η προσέγγιση του αντικειμένου σαν σύνολο τριγώνων. Παρόμοια, η αναπαράσταση octree ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ήταν ένα σύνολο τετράεδρων. Έτσι μπορούμε να λάβουμε τα πλέγματα συλλέγοντας τα «εντελώς εντός» και «επικαλυπτόμενα» τρίγωνα (τετράεδρα στις τρεις διαστάσεις) μετά από μετακίνηση των κορυφών των «επικαλυπτόμενων» τριγώνων (τετράεδρα) στο αρχικό σύνορο του αντικειμένου. Το Σχήμα 4.15 (a) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μια τριγωνική ρίζα διασπάζεται σε τέσσερα τρίγωνα, και το Σχήμα 4.15 (b) δείχνει πως μια τετραεδρική ρίζα διασπάζεται σε οκτώ τετράεδρα.



Σχήμα 4.15: Υποδιαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου

- **Μέθοδος Απεικόνισης**

Η μέθοδος απεικόνισης χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπορικές γεννήτριες πλέγματος. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την υποδιαίρεση του προς διακριτοποίηση αντικειμένου σε περιοχές ειδικής τοπολογίας. Στις 2 διαστάσεις, αυτές οι περιοχές έχουν τέσσερις πλευρές· στις τρεις διαστάσεις, αυτές οι περιοχές είναι μορφής «κουτιού» (boxlike). Μέσα σε κάθε περιοχή, το πλέγμα παράγεται αυτόματα με απεικόνιση της περιοχής προς ένα κανονικοποιημένο χωρίο αναφοράς (ένα κανονικό τρίγωνο ή τετράπλευρο στις δύο διαστάσεις και ένα κύβο στις τρεις διαστάσεις), δημιουργώντας διακριτοποίηση στο κανονικοποιημένο χωρίο με βάση την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος, και επαναπεικόνιση του διακριτοποιημένου χωρίου προς την αρχική περιοχή του πραγματικού αντικειμένου. Κατόπιν, το τελικό πλέγμα προκύπτει από συνένωση των περιοχών που διακριτοποιήθηκαν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι κοινές πλευρές που μοιράζονται σε γειτονικές περιοχές πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων έτσι ώστε να ικανοποιούν το συμβιβαστό του πλέγματος (mesh conformity). Η απαίτηση αυτή μπορεί να επιβληθεί με επέμβαση του χρήστη ή αλγοριθμικά την ώρα που παράγονται τα πλέγματα γειτονικών περιοχών. Πολλές μέθοδοι απεικόνισης μπορούν να εφαρμοσθούν.

- **Βελτίωση Ποιότητας Πλέγματος**

Μερικές μέθοδοι γένεσης πλέγματος, κυρίως εκείνες που βασίζονται στην προσέγγιση κατακερματισμού της τοπολογίας, δεν παράγουν αρχικό πλέγμα επαρκές για την περαιτέρω ανάλυση. Έτσι, πρέπει να ακολουθήσουμε μια πορεία τριών βημάτων ώστε να το βελτιώσουμε:

- Εάν τα στοιχεία που παράγονται δεν είναι του επιθυμητού τύπου, τότε τα υποδιαιρούμε στον επιθυμητό τύπο.
- Εάν τα στοιχεία δεν έχουν μεγέθη συμβατά με την επιθυμητή κατανομή πυκνότητας πλγματος, τότε τα εκλεπτύνουμε.
- Εάν τα στοιχεία δεν είναι καλοσχηματισμένα, τότε εφαρμόζουμε μια τεχνική εξομάλυνσης (smoothing technique).

#### 4.4.3 ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι δυνατότητες των πακέτων πεπερασμένων στοιχείων είναι πολλές. Εκτός από τις τετριμμένες ελαστικές αναλύσεις, σε πολλά από αυτά τα πακέτα υπάρχουν δυνατότητες επίλυσης ποικίλων άλλων προβλημάτων σε μεγάλο τμήμα των εξισώσεων που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα: θερμικά, ακουστικά, ηλεκτρικά, μαγνητικά (δινορεύματα: eddy-current), ηλεκτρομαγνητικά, υδροδυναμικά, ρευστομηχανικά, περιγραφής διάβρωσης υλικών, κλπ. Το σύνολο αυτό των δυνατοτήτων συνήθως αποδίδεται με τον όρο “Multi-Physics”, δηλαδή επίλυση των ποικίλων εξισώσεων της Φυσικής.

- **Καθορισμός του Είδους Ανάλυσης**

Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιήσουμε τον τρόπο ανάλυσης, στη συνέχεια θα δώσουμε κάποιες γενικές κατευθύνσεις.

Η πλέον αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου, το οποίο καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει. Για παράδειγμα, ελαστική ανάλυση (elastic analysis) ή πρόβλημα δυναμικού (potential problem). Τα προβλήματα δυναμικού αφορούν την επίλυση των εξισώσεων Laplace και Poisson που διέπουν τη μηχανική αττιβούς ρευστού, μετάδοση θερμότητας, κοκ.

Μια δεύτερη επιλογή που καλείται να κάνει ο μελετητής είναι ο καθορισμός του προβλήματος σαν:

*Στατικό πρόβλημα (static analysis), δηλαδή μη-εξαρτημένο από το χρόνο, ή*

*Δυναμικό πρόβλημα* (dynamic analysis), δηλαδή χρονικά εξαρτώμενο. Παραδείγματα είναι η ταλάντωση μιας μηχανής, ο ερπυσμός και η χαλάρωση, η διάδοση ήχου στον αέρα ή σε άλλο μέσον, κλπ.

Μια άλλη κατάταξη αφορά στο εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό (linear) ή μη-γραμμικό (nonlinear)

*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.

- **Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων**

Για τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία διακρίνουμε τα ακόλουθα στάδια:

1<sup>ο</sup> Στάδιο → Κατασκευή της γεωμετρίας.

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

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

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

5<sup>ο</sup> Στάδιο → Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους.

• **Είδος Πεπερασμένων Στοιχείων**

Τα βασικά πεπερασμένα στοιχεία είναι:

- Ράβδος (2 κόμβοι)
- Σύρμα – σχοινί
- Δοκός (2 κόμβοι)
- Επίπεδη εντατική καταπόνηση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές)
- Πλάκα (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Μembrάνη
- Κέλυφος
- Ορθοτροπικό – πολυστρωματικό υλικό
- Τετράεδρο (3 κόμβοι)
- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι)
- Εξάεδρο (8 κόμβοι)

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος, το πλήθος των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο ποικίλει.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ

### 5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

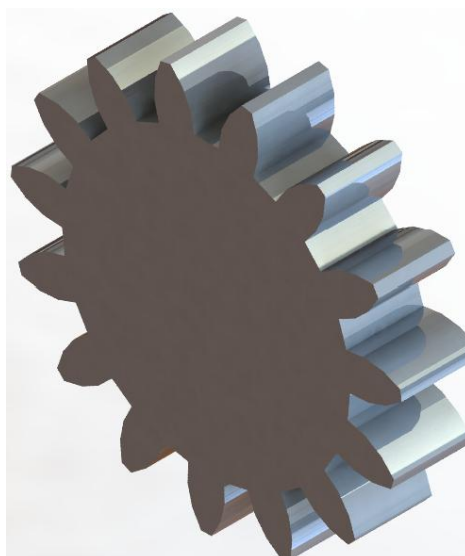
Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε σε προσομοίωση της σφυρηλάτησης ακριβείας οδοντωτού ευθείας οδόντωσης χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές μήτρες σφυρηλάτησης τις οποίες και θα συγκρίνουμε μετά το πέρας των προσομοιώσεων.

Τα χαρακτηριστικά του οδοντωτού τροχού που θέλουμε να πάρουμε ως αποτέλεσμα των προσομοιώσεων δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΤΙΜΗ
Αριθμός οδόντων	15
Module	3 mm
Γωνία εξειλιγμένης	20°
Ακτίνα ποδός	18,749 mm
Ακτίνα κεφαλής	25,5 mm
Συμμετρία	1/30 → 12°

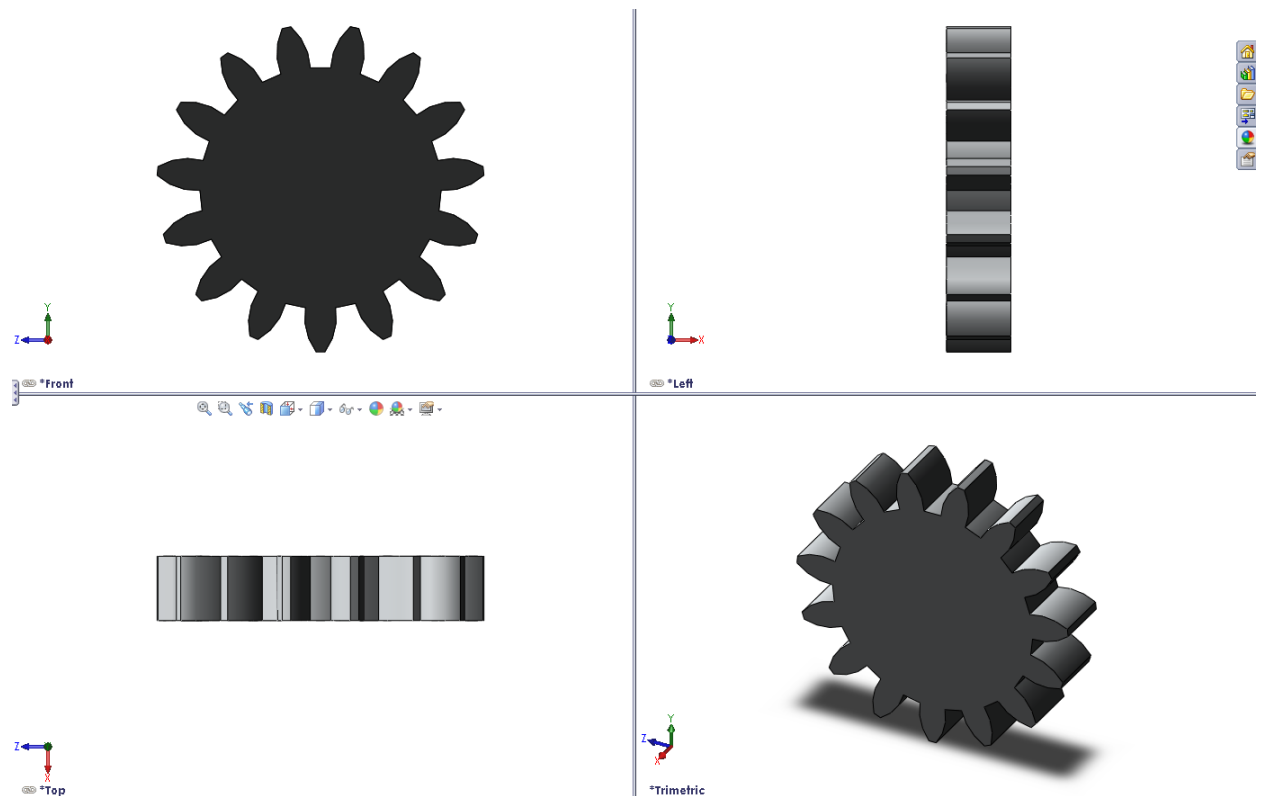
**Πίνακας 5.1:** Χαρακτηριστικά του υπό κατασκευή οδοντωτού τροχού

Η τελική μορφή του οδοντωτού τροχού παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω με τη βοήθεια του σχεδιαστικού πακέτου SOLIDWORKS:



**Σχήμα 5.1:** Τρισδιάστατη απεικόνιση του οδοντωτού τροχού με το SOLIDWORKS





**Σχήμα 5.2:** Διάφορες όψεις του οδοντωτού τροχού με το SOLIDWORKS

Όπως έχουμε προαναφέρει, έχουμε συμμετρία κατά το 1/30 του οδοντωτού τροχού, δηλαδή κατά το μισό του ενός δοντιού, το οποίο τμήμα και θα προσομοιώσουμε για να εξοικονομήσουμε υπολογιστική ισχύ και χρόνο επίλυσης του μοντέλου. Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται το συμμετρικό τμήμα του οδοντωτού τροχού:

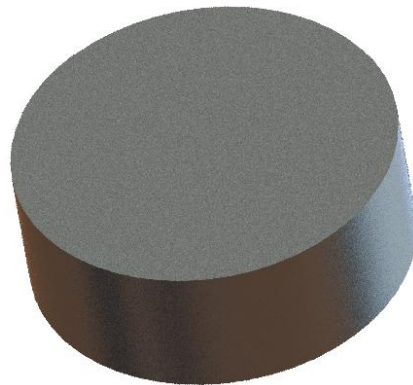


**Σχήμα 5.3:** Συμμετρικό τμήμα οδοντωτού τροχού που θα προσομοιωθεί

Ο όγκος του οδοντωτού τροχού ισούται με  $15124.265 \text{ mm}^3$  βάση του οποίου θα γίνει και ο υπολογισμός των διαστάσεων του κυλινδρικού δοκιμίου το οποίο και θα σφυρηλατηθεί. Η ακτίνα του δοκιμίου λαμβάνεται ελάχιστα μικρότερη από την ακτίνα ποδός του τροχού,  $r_{\delta} = 18,65 \text{ mm}$ . Κατά συνέπεια το ύψος του κυλινδρικού δοκιμίου θα ισούται με:

$$h_{\delta} = 15124.265 \text{ mm}^3 / 18,65 \text{ mm} = 13,85 \text{ mm}$$

Αμέσως παρακάτω, παρουσιάζεται το αρχικό κυλινδρικό δοκίμιο σχεδιασμένο με το σχεδιαστικό πακέτο SOLIDWORKS.



**Σχήμα 5.4:** Τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχικού δοκιμίου με το SOLIDWORKS

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο υλικά, απλό αλουμίνιο και απλός χαλκός. Τα χαρακτηριστικά των υλικών παρουσιάζονται στο «παράρτημα Α» της εργασίας και επιλέχθηκαν από τη βιβλιοθήκη του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε (MSC MARC).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε σφυρηλάτηση ακριβείας εν ψυχρώ, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{\theta} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  με ταχύτητα του εμβόλου σφυρηλάτησης πολύ μικρή,  $5 \text{ mm/min}$ , για να είναι το φαινόμενό μας στατικό και όχι δυναμικό, ενώ βασιστήκαμε στη βιβλιογραφία για την τιμή της. Οι συντελεστές τριβής που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις είναι  $\mu_1 = 0.1$  και  $\mu_2 = 0.2$  σύμφωνα με επιστημονικές μελέτες που έχουν γίνει σε παρόμοια θέματα με τα ίδια υλικά.

## 5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΑΚΕΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ SOLIDWORKS

---

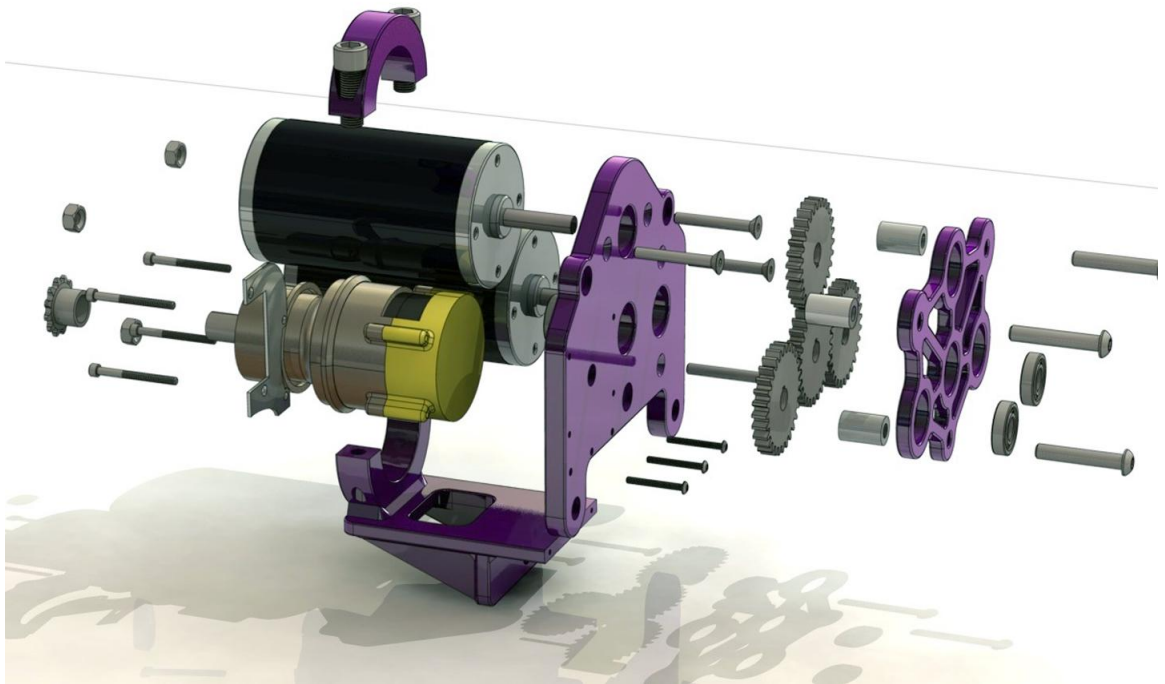
Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται τα σκαριφήματα και οι τρισδιάστατες απεικονίσεις των δύο διαφορετικών μητρών σφυρηλάτησης για τις δύο διαδικασίες που ακολουθήθηκαν στην έκθεση, αφού πρώτα γίνει μια αναφορά στο πακέτο σχεδιασμού SOLIDWORKS που χρησιμοποιήθηκε.

### 5.2.1 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS

---

Το λογισμικό SolidWorks είναι ένα **ολοκληρωμένο λογισμικό CAD–CAE–CAM–Flow** το οποίο είναι προσανατολισμένο κυρίως στο τομέα του ολοκληρωμένου σχεδιασμού μηχανημάτων και ενδείκνυται τόσο για **δισδιάστατα** (2D) όσο και για **τρειςδιάστατα** (3D) σχέδια αλλά και στην εναλλαγή μεταξύ τους. Οι δυνατότητες του λογισμικού είναι πάρα πολλές, μερικές από τις οποίες είναι:

- Μοντελοποίηση εξαρτημάτων και συναρμολογημάτων με αποτελεσματικότητα.
- Αυτόματη δημιουργία κατασκευαστικών σχεδίων.
- Προσομοίωση ρεαλιστικής μετάδοσης κίνησης και μηχανικών αλληλεπιδράσεων.
- **Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων** με το πρόσθετο: CosmosWorks.
- **Προσομοίωση ροής ρευστού** με το πρόσθετο: Flow Simulation.
- Έχει ενσωματωμένα εργαλεία:
  - τυποποιημένων **μηχανολογικών εξαρτημάτων** (ρουλεμάν, τροχοί, κοχλίες κτλ).
  - **συγκολλήσεων** και μεταλλικών κατασκευών.
  - σχεδίασης μεταλλικών επιφανειών (Sheet Metal).
  - σχεδίασης **καλουπιών**.



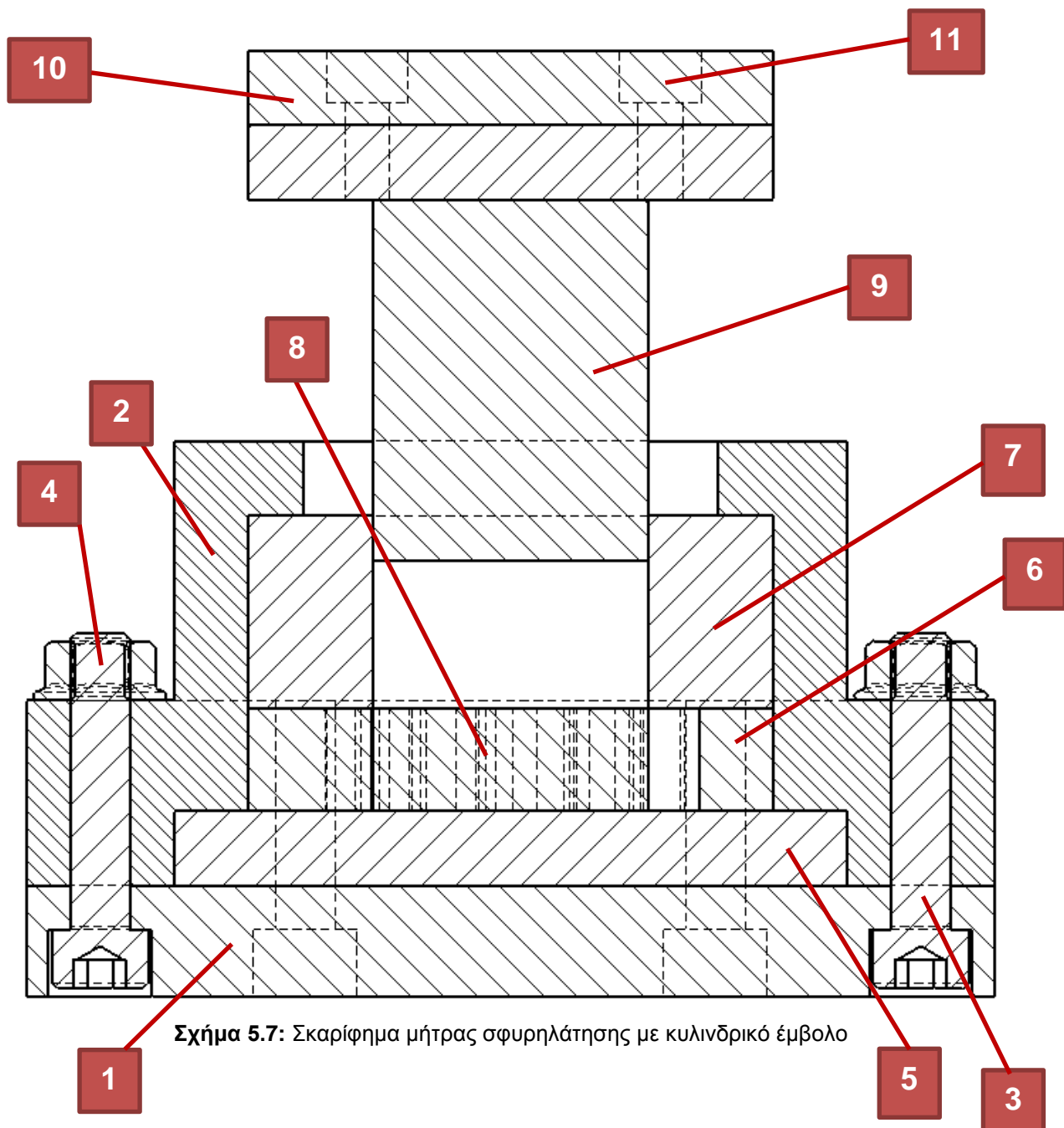
Σχήμα 5.5: Συναρμογή κατασκευασμένη στο SOLIDWORKS



Σχήμα 5.6: Πολύπλοκη συναρμογή κατασκευασμένη στο SOLIDWORKS

5.2.2 ΜΗΤΡΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ

Στη πρώτη μήτρα, το έμβολο (punch) έχει κυλινδρική μορφή και το σκαρίφημά της παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω:

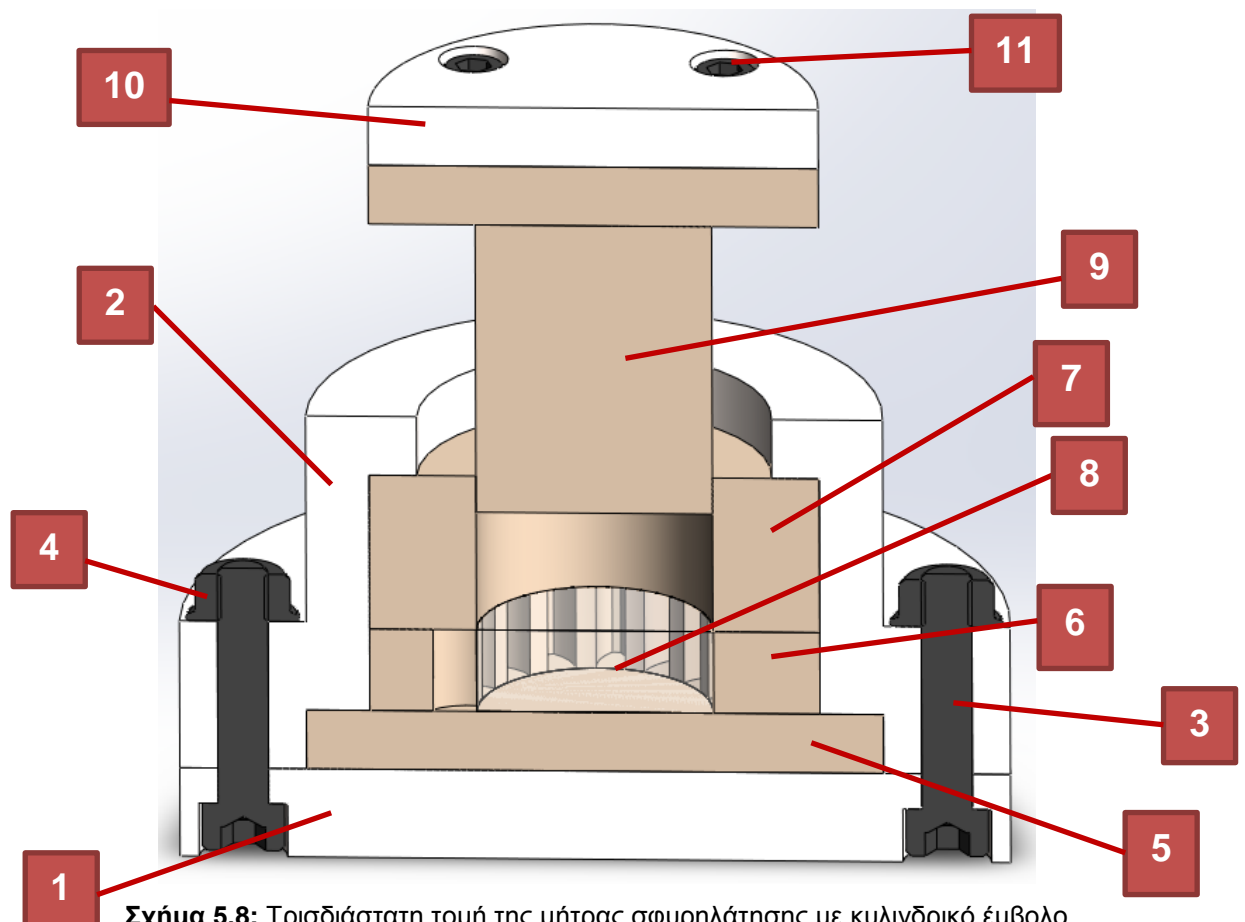


Σχήμα 5.7: Σκαρίφημα μήτρας σφυρηλάτησης με κυλινδρικό έμβολο

Τα επιμέρους στοιχεία της μήτρας σφυρηλάτησης παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	Βάση κελύφους
2	Κέλυφος
3	Κοχλίας συγκράτησης M4
4	Περικόχλιο M4
5	Βάση δοκιμίου
6	Εσωτερική μήτρα μορφής γκραναζιού
7	Δακτύλιος οδήγησης εμβόλου
8	Κυλινδρικό δοκίμιο
9	Έμβολο κυλινδρικής μορφής
10	Επάνω τμήμα εμβόλου
11	Κοχλίας συγκράτησης M3

Πίνακας 5.2: Επιμέρους στοιχεία της μήτρας σφυρηλάτησης με κυλινδρικό έμβολο



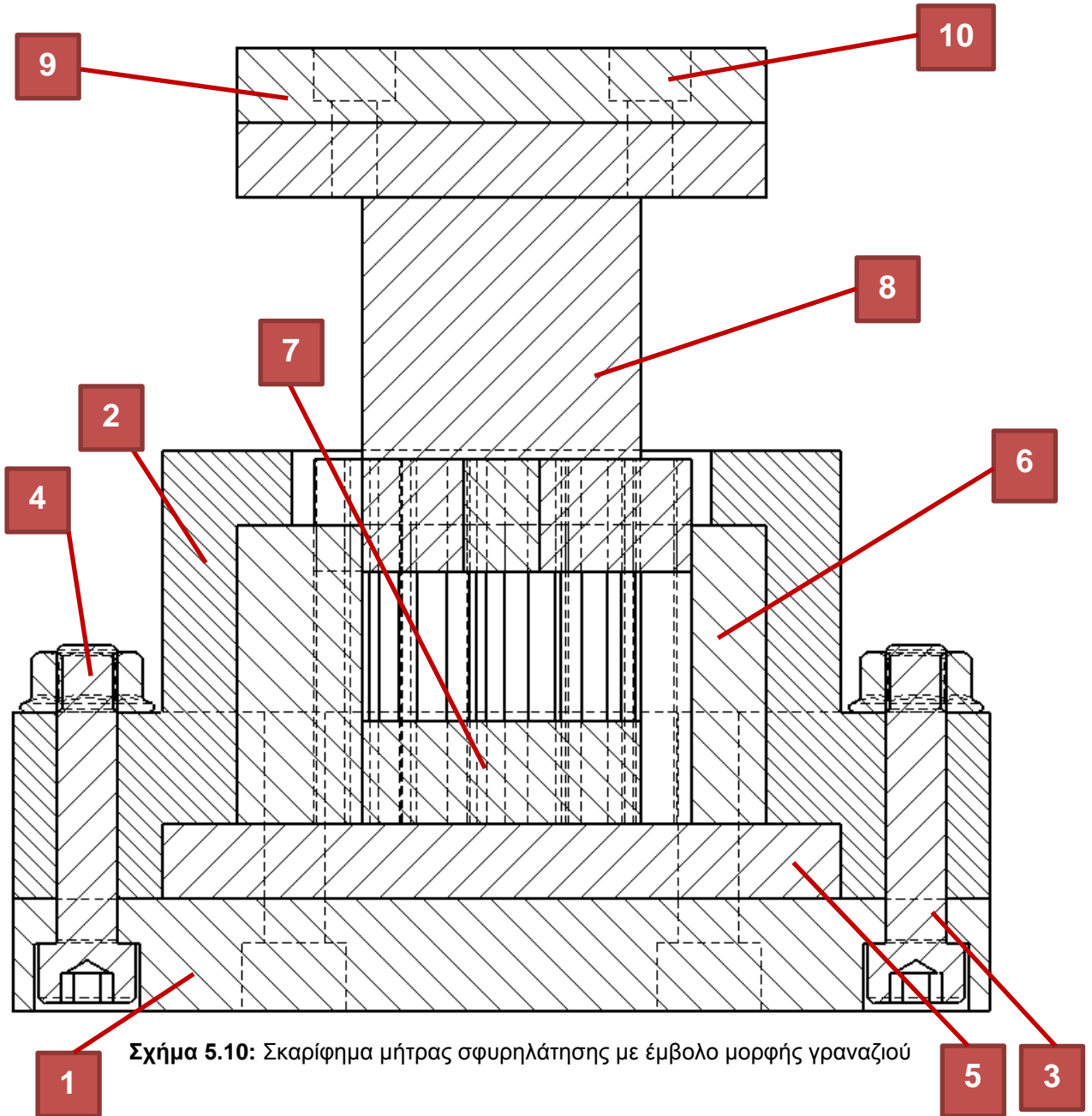
Σχήμα 5.8: Τρισδιάστατη τομή της μήτρας σφυρηλάτησης με κυλινδρικό έμβολο



**Σχήμα 5.9:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της μήτρας σφυρηλάτησης με κυλινδρικό έμβολο

5.2.3 ΜΗΤΡΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ

Στη δεύτερη μήτρα, το έμβολο (punch) έχει μορφή γραναζιού και το σκαρίφημά της παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω:



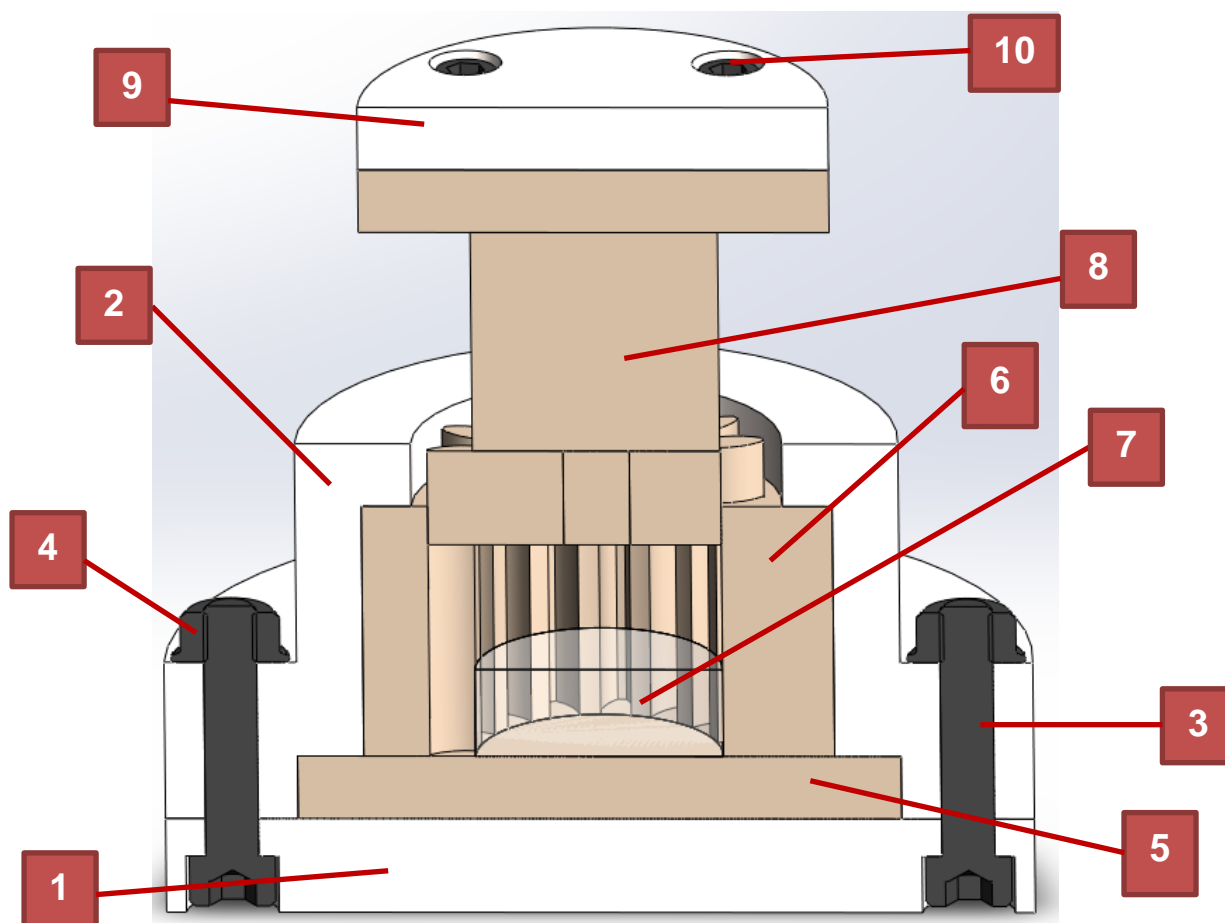
Σχήμα 5.10: Σκαρίφημα μήτρας σφυρηλάτησης με έμβολο μορφής γραναζιού



Τα επιμέρους στοιχεία της μήτρας σφυρηλάτησης παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	Βάση κελύφους
2	Κέλυφος
3	Κοχλίας συγκράτησης M4
4	Περικόχλιο M4
5	Βάση δοκιμίου
6	Εσωτερική μήτρα μορφής γραναζιού
7	Κυλινδρικό δοκίμιο
8	Έμβολο μορφής γραναζιού
9	Επάνω τμήμα εμβόλου
10	Κοχλίας συγκράτησης M3

Πίνακας 5.3: Επιμέρους στοιχεία της μήτρας σφυρηλάτησης με έμβολο μορφής γραναζιού



Σχήμα 5.11: Τρισδιάστατη τομή της μήτρας σφυρηλάτησης με έμβολο μορφής γραναζιού



**Σχήμα 5.12:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της μήτρας σφυρηλάτησης με έμβολο μορφής γραναζιού

#### 5.2.4 ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ & ΥΛΙΚΑ

---

Όσον αφορά την τοποθέτηση των μητρών σφυρηλάτησης πάνω στην πρέσα, το κέλυφος των μητρών δένεται στην τράπεζα της εργαλειομηχανής ενώ το άνω τμήμα του εμβόλου τοποθετείται στο έμβολο της πρέσας.

Το υλικό κατασκευής του εσωτερικού τμήματος της μήτρας, του σημείου του εμβόλου που έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο, καθώς και η βάση του δοκιμίου και ο δακτύλιος οδήγησης του εμβόλου είναι κατασκευασμένα από χάλυβα AISI, H-13. Αναλυτικές πληροφορίες για το υλικό στο «παράρτημα Α» της εργασίας. Προκειμένου να εξασφαλιστούν υψηλότερες πιέσεις διαμόρφωσης και ελαχιστοποίησης της ελαστικής παραμόρφωσης, τα τμήματα έχουν σκληρυνθεί σε 100 HRC.

Το εσωτερικό τμήμα της μήτρας που έχει το σχήμα του οδοντωτού τροχού, έχει κατασκευασθεί με ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire-cut EDM). Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι πριν την διαδικασία της ηλεκτροδιάβρωσης, το εσωτερικό τμήμα της μήτρας προσαρμόστηκε σφικτά προκειμένου να αποφευχθεί παραμόρφωση που θα μπορούσε να προκαλέσει σφάλματα οδοντωτών τροχών και λανθασμένο ταίριασμα των οδοντώσεων. Η τιμή της σφικτής συναρμογής (shrink-fit interference) θεωρήθηκε 0.05 mm σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό να μειωθεί το επίπεδο των περιμετρικών εφελκυστικών τάσεων που δημιουργούνται από την διαδικασία της σφυρηλάτησης. Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάζεται και το έμβολο οδοντωτής μορφής, δηλαδή με ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire-cut EDM).

Τέλος, κατά την κατεργασία χρησιμοποιήθηκε λίπανση, η οποία με την τραχύτητα των επιφανειών μας έδωσε τους συντελεστές τριβής που χρησιμοποιήθηκαν και αναφέρονται σε προηγούμενη παράγραφο.

### 5.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ MARC

---

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται τα βήματα της προσομοίωσης της σφυρηλάτησης ακριβείας. Στην αρχή γίνεται μια αναφορά στο λογισμικό πακέτο MSC MARC το οποίο και χρησιμοποιήθηκε και στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά μια προσομοίωση σφυρηλάτησης με τα ληφθέντα αποτελέσματα.

#### 5.3.1 ΠΑΚΕΤΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ MSC MARC

---

Το πακέτο λογισμικού **MSC MARC**, είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα CAD – CAE το οποίο υπολογίζει τις καταπονήσεις και παραμορφώσεις κατασκευών & συστημάτων που βρίσκονται σε φόρτιση.

Η προσομοίωση με **MSC MARC - FEA (Finite Element Analysis)** προσφέρει την ιδανική λύση για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση προϊόντων, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για δημιουργία πρωτοτύπων. Με το **MSC MARC - FEA** αντιμετωπίζονται τα πραγματικά προβλήματα ανάλυσης, καθιστώντας την ανάπτυξη προϊόντος λιγότερο δαπανηρή και πιά αξιόπιστη. Το πακέτο προσομοίωσης **MSC MARC - FEA** περιλαμβάνει μια σειρά από: στοιχεία (elements), επαφές (contacts), υλικά, λύτες (solvers), ενώ εκτός της δομικής ανάλυσης αντιμετωπίζει ταυτόχρονα και μεταφορά θερμότητας, ηλεκτρομαγνητισμό και ροή ρευστών (συζευγμένη φυσική - multiphysics).

**Το MSC MARC μπορεί να χρησιμοποιηθεί:**

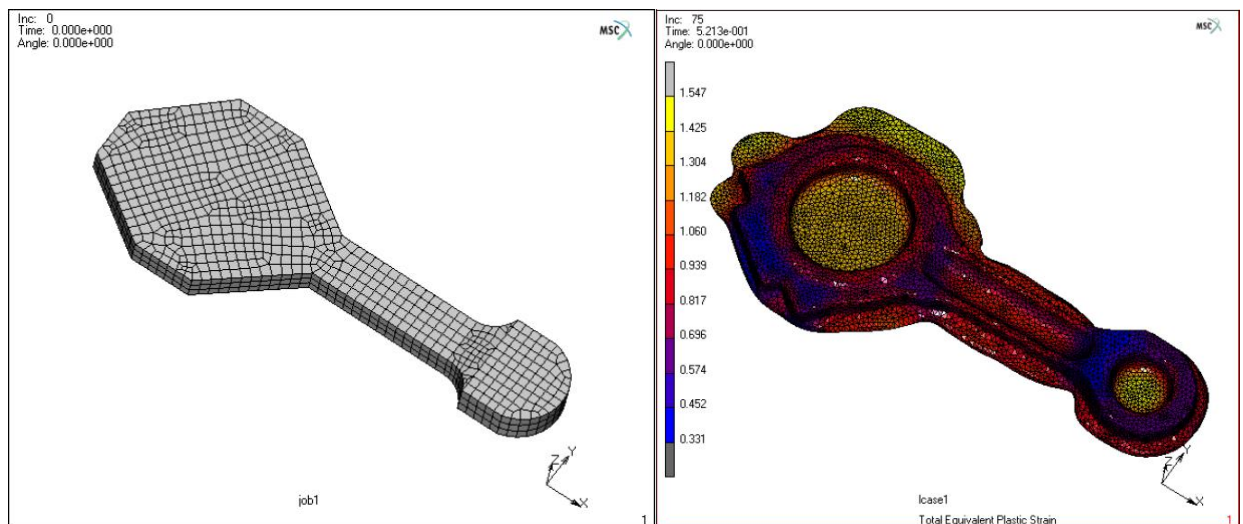
- Στον αρχικό σχεδιασμό (μελέτη σκοπιμότητας) μίας κατασκευής/προϊόντος.
- Στην ανεύρεση & εντοπισμό προβλημάτων (troubleshooting).
- Αναπαράγοντας την πραγματικότητα στο εικονικό περιβάλλον του H/Y, αναπαράγεται και το πρόβλημα, οπότε το επόμενο βήμα είναι η λύση του.
- Στη λεπτομερή ανάπτυξη του προϊόντος, όπου εξετάζουμε με λεπτομέρεια το προϊόν και τη συμπεριφορά του σε συνθήκες λειτουργίας όπως και σε ακραίες καταστάσεις.
- Στη βελτιστοποίηση του προϊόντος, με αλλητάλληλες επιλύσεις διαφορετικών σεναρίων, ώστε να δούμε ποιοι παράγοντες (διαστάσεις, υλικά, συνθήκες) είναι οι πιο επιδραστικοί.

Τα είδη ανάλυσης που μπορεί να επιλύσει το MSC MARC είναι:

- Γραμμική στατική & δυναμική φόρτιση.
- Ρευστο-μηχανική ανάλυση.
- Εύρεση ιδιοσυχνοτήτων.
- Αρμονική ή τυχαία ταλάντωση.
- Θερμική ανάλυση (υπολογισμός θερμικών τάσεων).
- Λυγισμός.
- Αποκοπή υλικού (μεταλλικές κατεργασίες) και σύντομα γεγονότα (crash, drop).
- Κατεργασίες διαμόρφωσης.
- Μηχανικές δοκιμές.

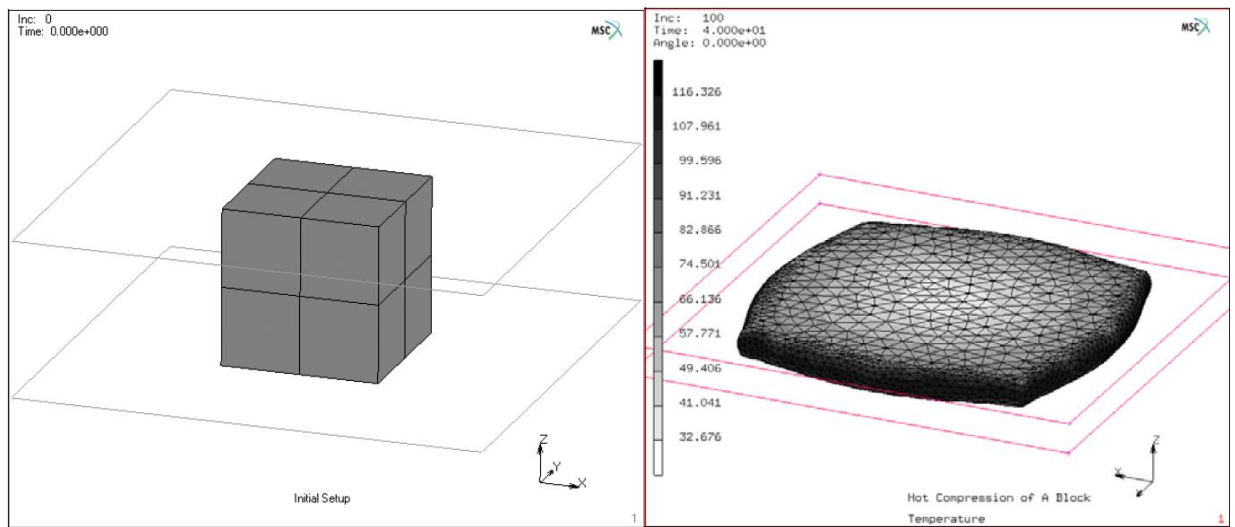
Σημαντικό πλεονέκτημα του MSC MARC σε σχέση με τα άλλα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα επαναδημιουργίας πλέγματος μετά από μεγάλη παραμόρφωση συγκεκριμένων πεπερασμένων στοιχείων, πράγμα που το καθιστά ιδανικό σε κατεργασίες διαμόρφωσης όπως η σφυρηλάτηση, η βαθεία κοίλανση, η έλαση, η διέλαση κ.τ.λ.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα διαμορφώσεων που έχουν πραγματοποιηθεί με το λογισμικό MSC MARC και έχει πραγματοποιηθεί επαναδημιουργία πλέγματος κατά την επίλυσή τους.



**Σχήμα 5.13:** Παράδειγμα σφυρηλάτησης με το πακέτο MSC MARC

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ



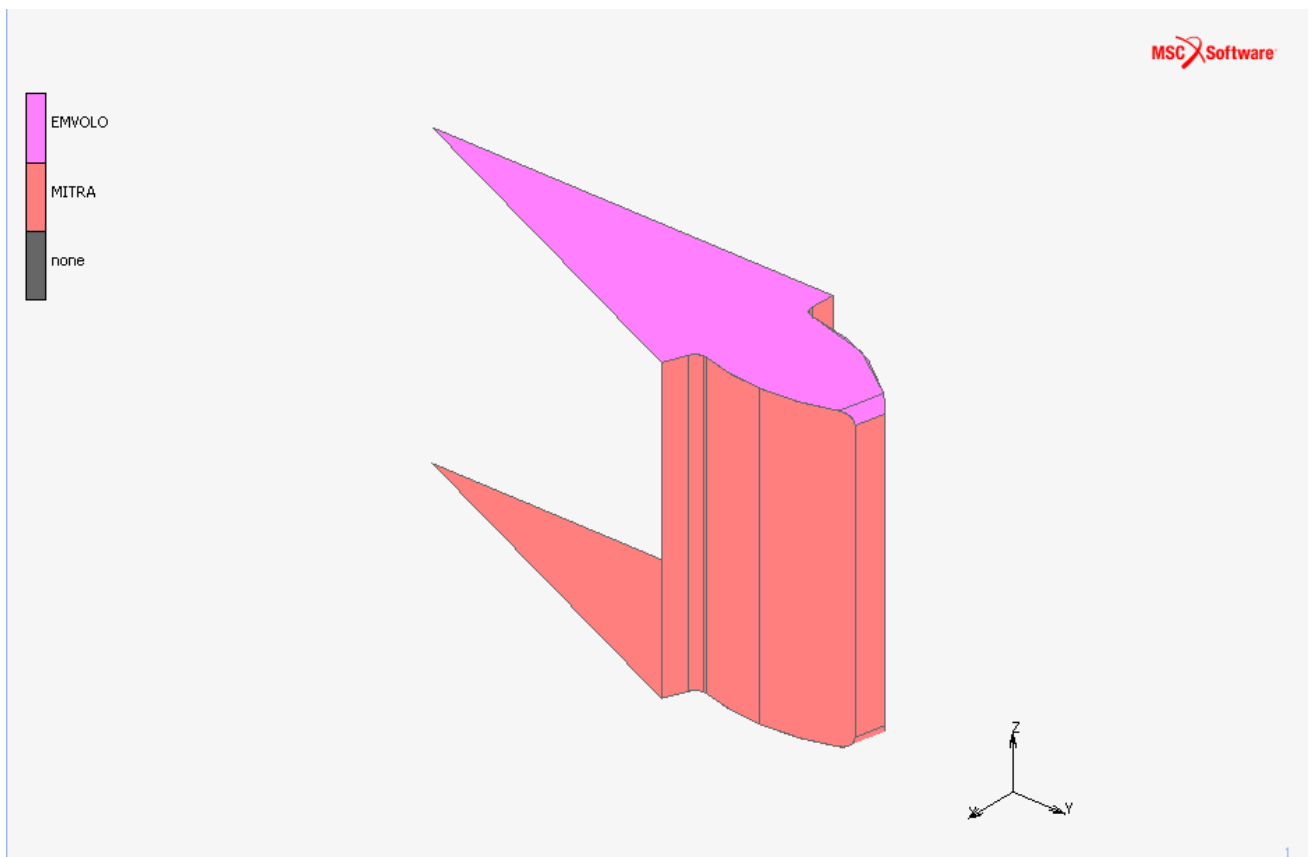
Σχήμα 5.14: Παράδειγμα θλίψης με το πακέτο MSC MARC

### 5.3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ MARC ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Χρησιμοποιώντας την εντολή:

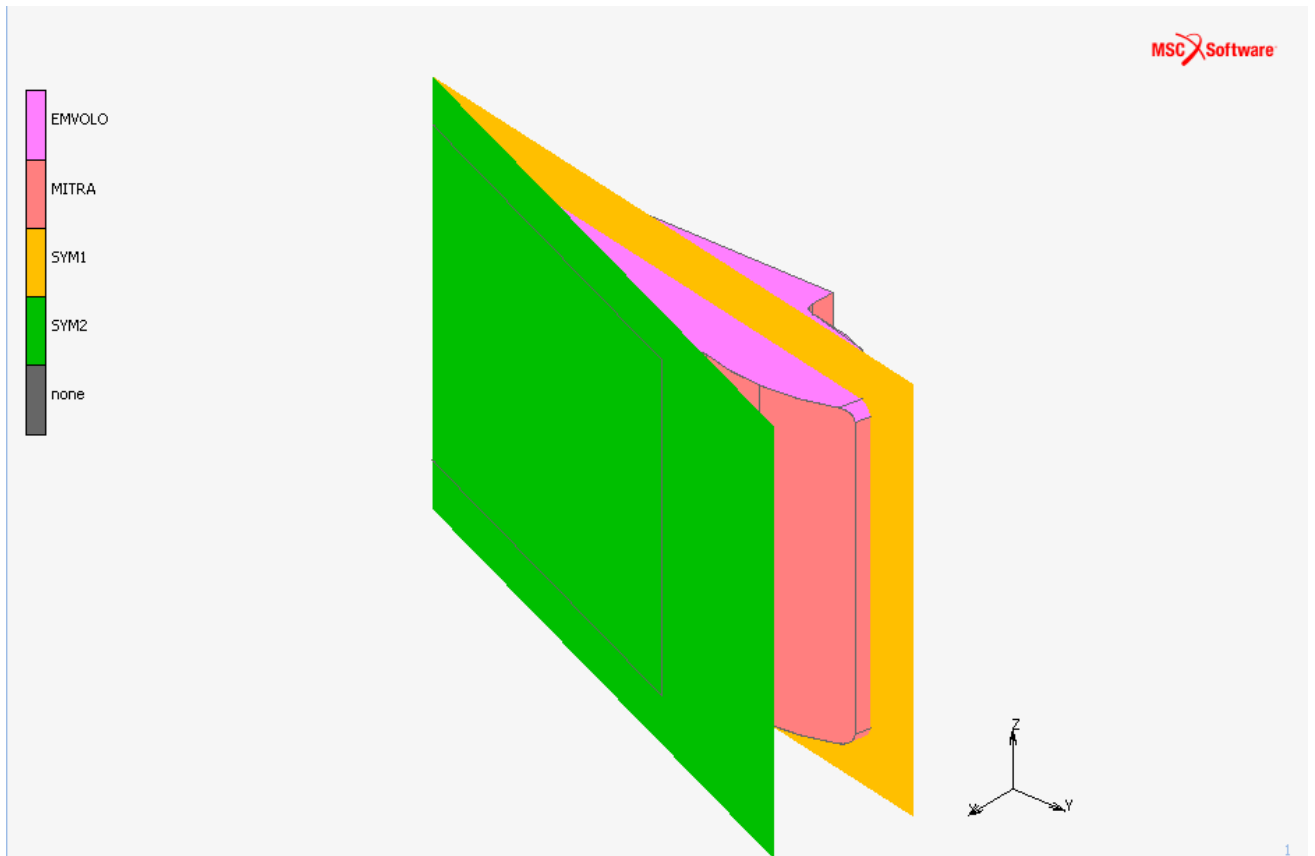
***File → Import → IGES***

εισάγουμε την γεωμετρία της μήτρας και του εμβόλου που έχουμε δημιουργήσει στο σχεδιαστικό πακέτο SOLIDWORKS. Στη συνέχεια, αφαιρούμε τις περιττές επιφάνειες και καμπύλες για να πάρουμε μόνο αυτές που μας ενδιαφέρουν, ώσπου παίρνουμε τελικά το παρακάτω σχήμα, όπου μπορούμε να διακρίνουμε τη μήτρα σφυρηλάτησης και το έμβολο σε συμμετρία ενός δοντιού.



**Σχήμα 5.15:** Γεωμετρία που έχει εισαχθεί από SOLIDWORKS και έχει επεξεργαστεί στο MSC MARC

Στη συνέχεια, εισάγουμε τις δύο επιφάνειες συμμετρίας του  $\frac{1}{2}$  του δοντιού με τη μεταξύ τους γωνία να ισούται με  $360^\circ / 15 \text{ οδόντες} / 2 = 12^\circ$ . Έτσι, καταλήγουμε στο ακόλουθο σχήμα όπου διακρίνονται πλέον και οι δύο συμμετρικές επιφάνειες.



**Σχήμα 5.16:** Εισαγωγή επιφανειών συμμετρίας στο  $\frac{1}{2}$  του δοντιού



### 5.3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

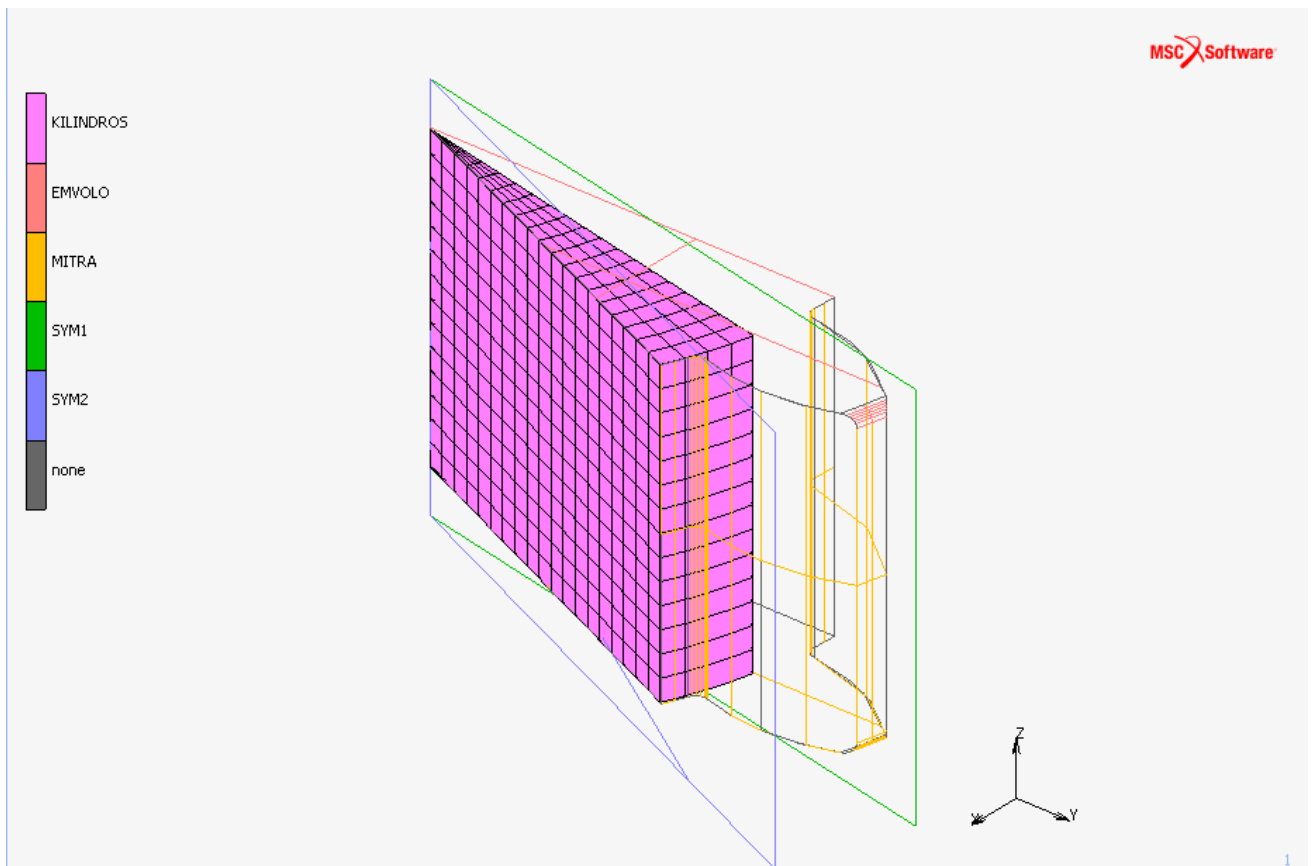
Τα πεπερασμένα στοιχεία που ενδείκνυνται σε κατεργασίες διαμόρφωσης υλικού είναι εξαεδρικά. Ο τρόπος δημιουργίας του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δημιουργία μιας επιφάνειας η οποία στη συνέχεια διαχωρίζεται σε τετραγωνικά στοιχεία πλευράς 1 mm περίπου χρησιμοποιώντας την εντολή:

***Geometry & Mesh → Convert → Surfaces to Elements***

Στη συνέχεια, επεκτείνουμε τα τετραγωνικά στοιχεία στον χώρο με γωνία κλίσης 3° χρησιμοποιώντας την εντολή:

***Geometry & Mesh → Expand → Elements***

και παίρνουμε τελικά το παρακάτω σχήμα όπου διακρίνονται καθαρά τα εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία που δημιουργήθηκαν.



**Σχήμα 5.17:** Πλέγμα εξαδρικών πεπερασμένων στοιχείων

Ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων είναι 1064, ενώ ο αριθμός των κόμβων που έχουν δημιουργηθεί είναι 1800.

Τέλος, κάνουμε χρήση της εντολής:

***Geometry & Mesh → Sweep → Nodes***

όπου ορίζουμε ως tolerance την τιμή 0.05 για να αφαιρεθούν από το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων οι “διπλοι” κόμβοι. Μετά τη χρήση της εντολής αφαιρέθηκαν 360 κόμβοι.

Τελικά το πλέγμα αποτελείται από 1064 πεπερασμένα στοιχεία και 1440 κόμβους.

### 5.3.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

---

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις λήφθηκαν από την ιστοσελίδα: [www.matweb.com](http://www.matweb.com) και είναι:

- Απλός Χαλκός (*Annealed Copper, Cu*)
- Απλό Αλουμίνιο (*Aluminum, Al*)

Η πλαστικότητα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις λήφθηκε από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος και είναι η παρακάτω:

- Χαλκός (*ASM Copper 31*)
- Αλουμίνιο (*ASM Aluminum 21*)

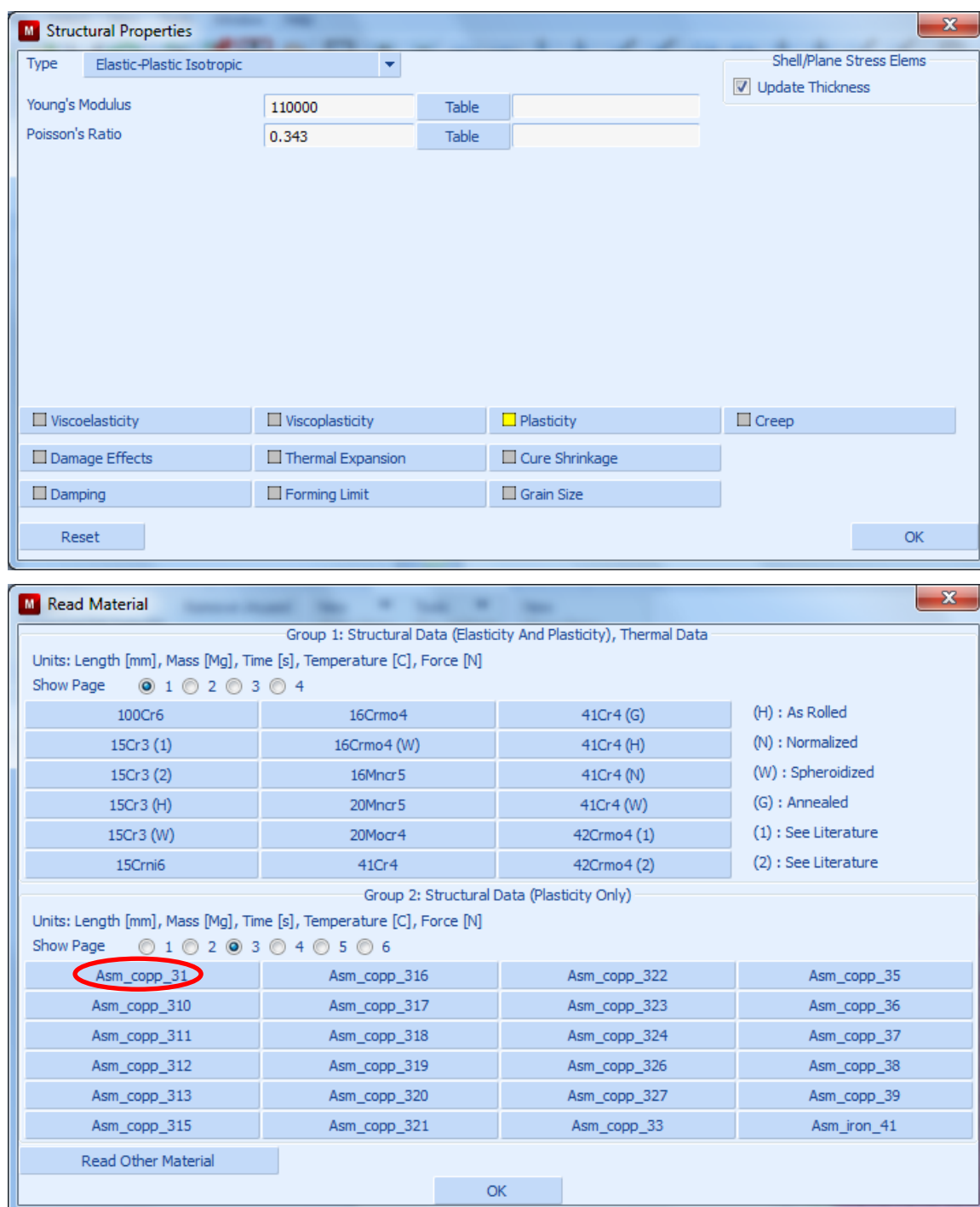
χρησιμοποιώντας την εντολή:

***Material Properties → Import → Read Material***

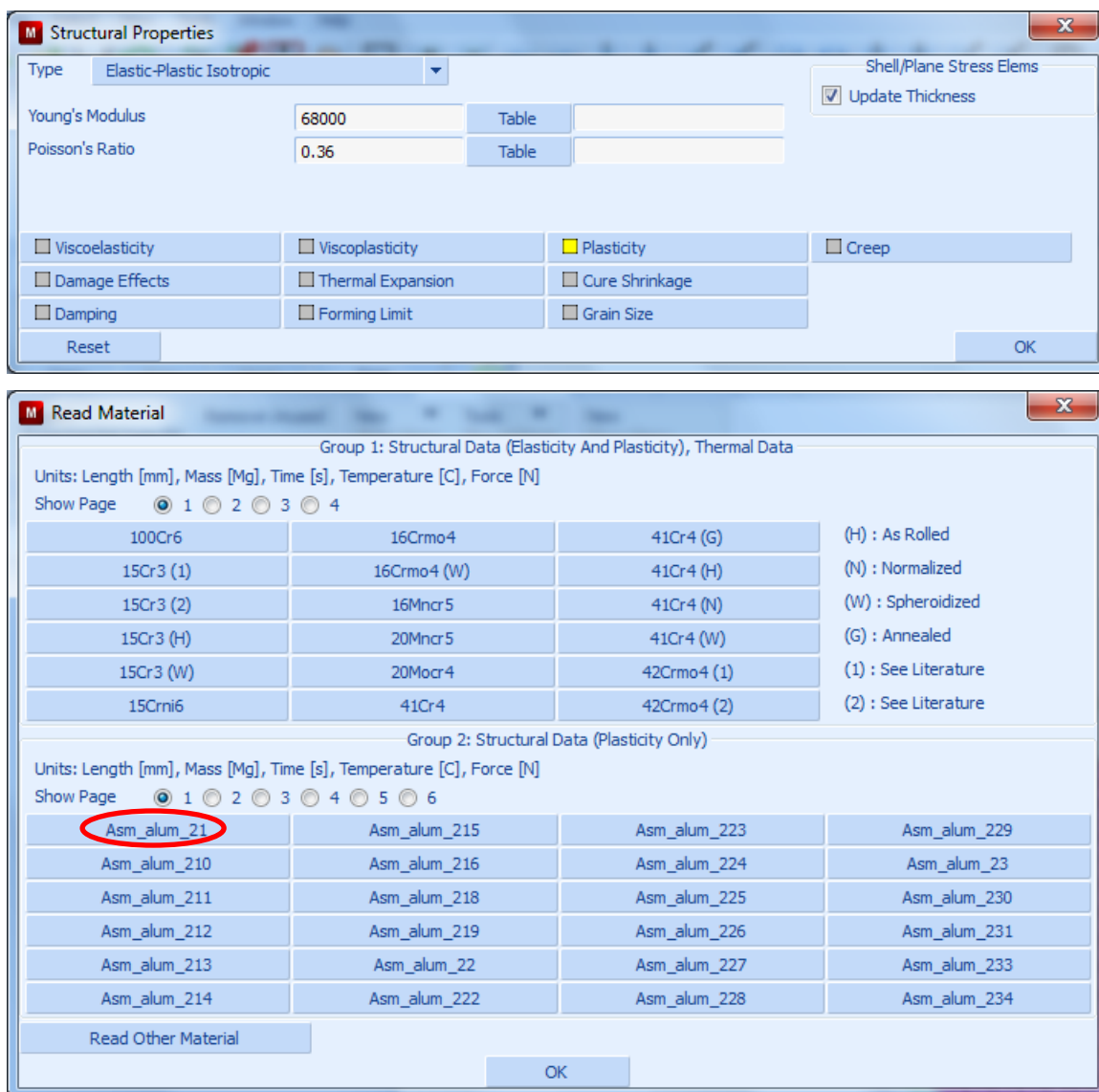
Και τα δύο υλικά είναι ισότροπα με πλαστικές και ελαστικές ιδιότητες, ενώ τα μέτρα ελαστικότητας και ο αριθμός Poisson για το καθένα, δίνονται αμέσως παρακάτω:

- Απλός Χαλκός (*Annealed Copper, Cu*)  
Μέτρο ελαστικότητας: 110 GPa  
Αριθμός Poisson: 0.343
- Απλό Αλουμίνιο (*Aluminum, Al*)  
Μέτρο ελαστικότητας: 68 GPa  
Αριθμός Poisson: 0.360

Αμέσως παρακάτω φαίνεται ορισμός των υλικών και η επιλογή της πλαστικότητας που έγινε από τη βιβλιοθήκη του MSC MARC.



Σχήμα 5.18: Επιλογή του Χαλκού ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών του MSC MARC



Σχήμα 5.19: Επιλογή του **Αλουμινίου** ως υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών του MSC MARC

Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται, όπως φαίνονται και στα σχήματα είναι:

- Μήκος (mm)
- Χρόνος (sec)
- Δύναμη (N)
- Τάση (MPa ή N/mm<sup>2</sup>)

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα προσομοίωσης, θα χρησιμοποιήσουμε τον χαλκό ως υλικό.

### 5.3.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

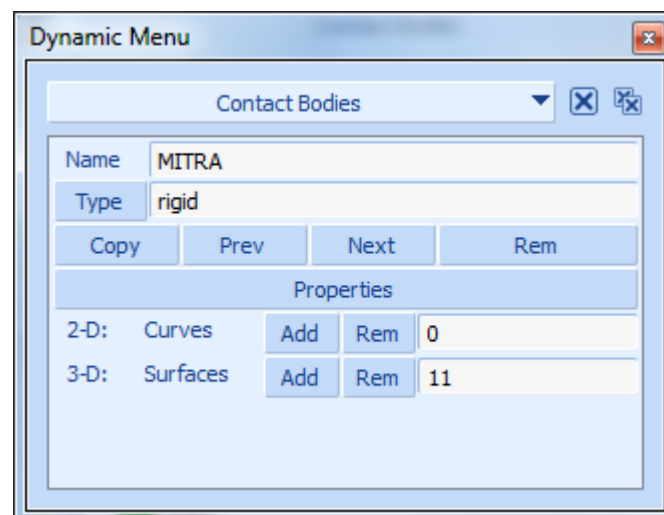
Έπειτα, ορίζουμε τα διάφορα στοιχεία που απαρτίζουν το μοντέλο προσομοίωσης και τα οποία είναι:

- Η μήτρα σφυρηλάτησης
- Το έμβολο
- Οι επιφάνειες συμμετρίας
- Το παραμορφώσιμο σώμα

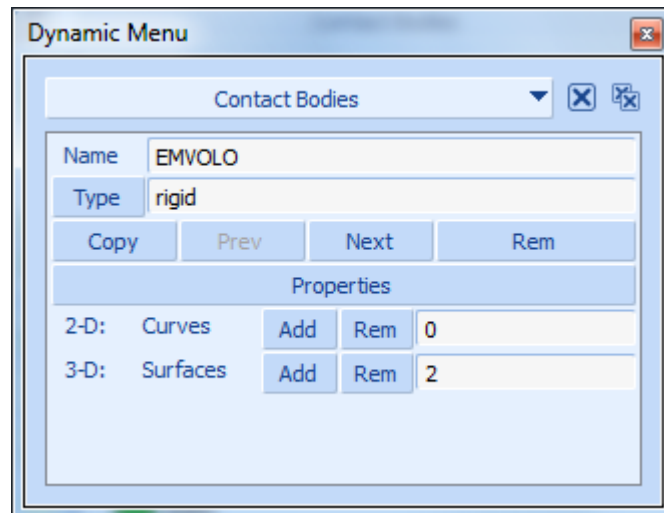
Για τον ορισμό των επιφανειών αυτών χρησιμοποιούμε την εντολή:

**Contact → Contact Bodies → New**

και ορίζουμε ως απαραμόρφωτα (Rigid) τη μήτρα και το έμβολο, ως συμμετρικές (Symmetry) τις επιφάνειες συμμετρίας και ως παραμορφώσιμο (Deformable) το παραμορφώσιμο σώμα. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραπάνω ορισμοί καθώς και ο ορισμός της ταχύτητας του εμβόλου.

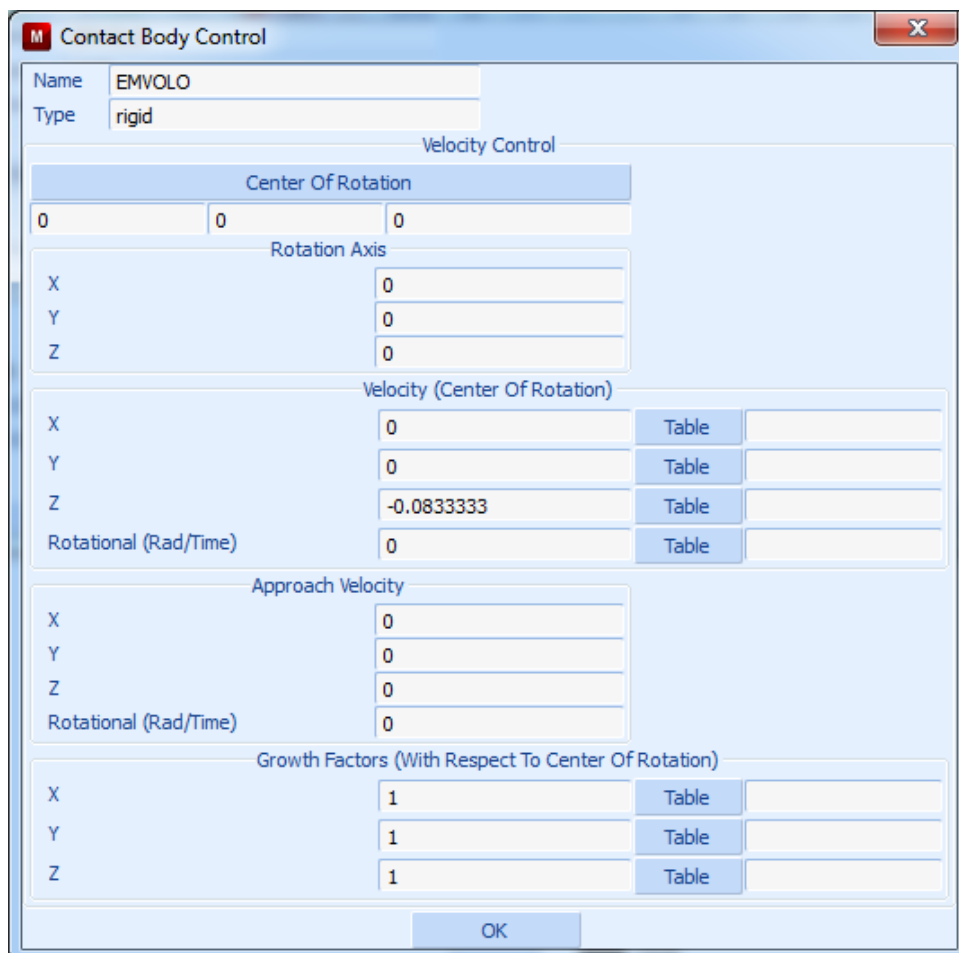


**Σχήμα 5.20:** Ορισμός της μήτρας σφυρηλάτησης ως απαραμόρφωτο σώμα

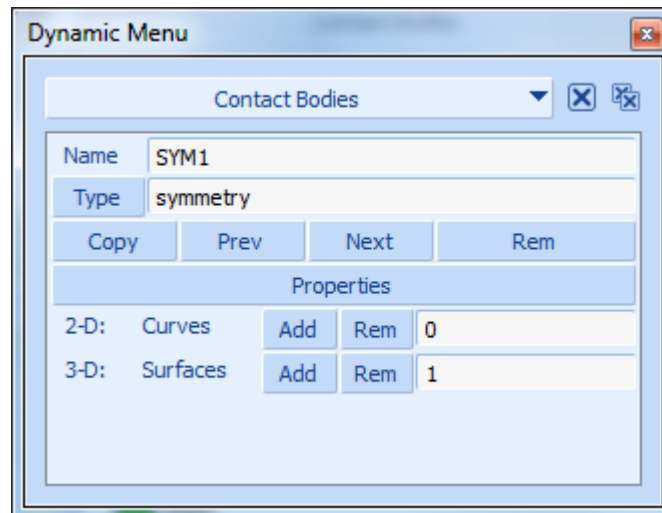


Σχήμα 5.21: Ορισμός του εμβόλου ως απαραμόρφωτο σώμα

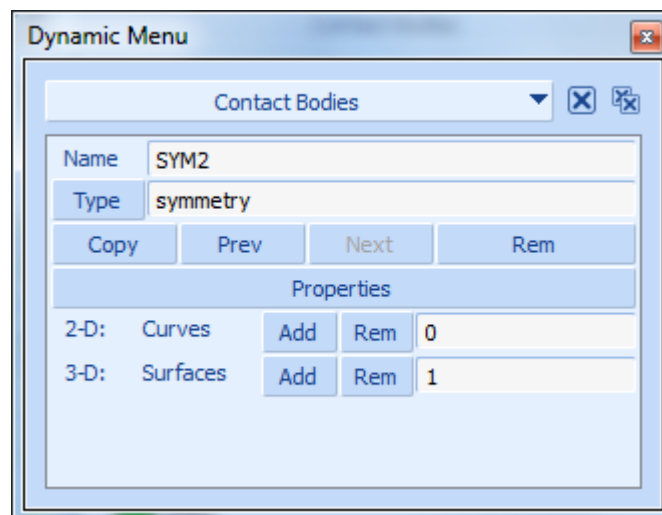
Εδώ θα πρέπει να ορίσουμε την ταχύτητα του εμβόλου που είναι σταθερή και ισούται με  $5 \text{ mm/min} = 5/60 = 0.08333 \text{ mm/sec}$ .



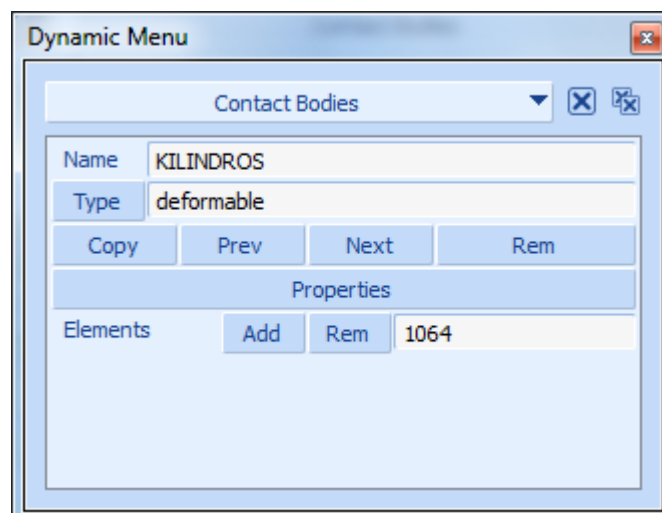
Σχήμα 5.22: Ορισμός της ταχύτητας του εμβόλου κατά τον άξονα Z.



Σχήμα 5.23: Ορισμός της πρώτης επιφάνειας συμμετρίας ως συμμετρικό σώμα



Σχήμα 5.24: Ορισμός της δεύτερης επιφάνειας συμμετρίας ως συμμετρικό σώμα



Σχήμα 5.25: Ορισμός του κυλινδρικού δοκιμίου ως παραμορφώσιμο σώμα



Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του μοντέλου που έχουμε κατασκευάσει:

Dynamic Menu	
Renumber	
Start	1
Increment	1
Nodes	1440
Nodes Directed	
Elements	1064
Elems Directed	
Points	650
Curves	70
Surfaces	16
Solids	0
All	

**Σχήμα 5.26:** Πλήρη στοιχεία του μοντέλου

### 5.3.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

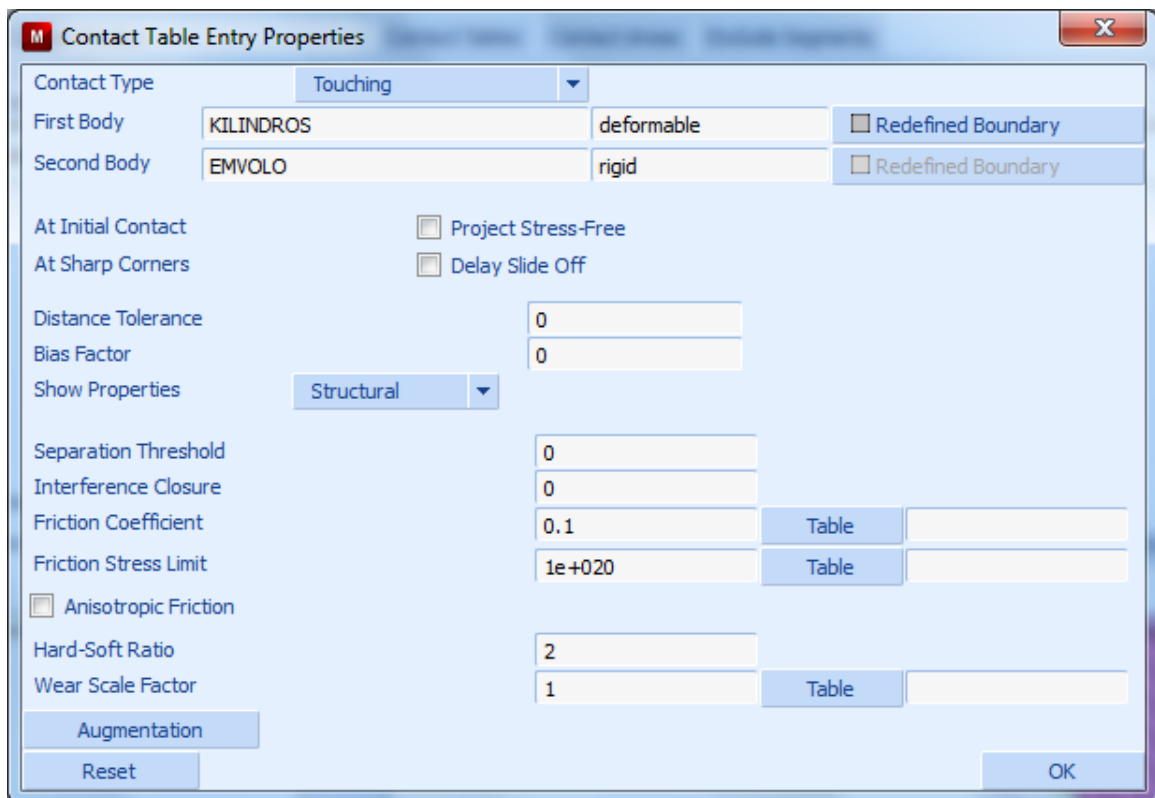
Στη συνέχεια ορίζουμε τον πίνακα επαφής μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του μοντέλου μας. Μεταξύ των στοιχείων ορίζουμε επαφή (Touching), η οποία μεταξύ των απαραμόρφωτων σωμάτων με το παραμορφώσιμο έχει και έναν συντελεστή τριβή, ο οποίος έχει προαναφερθεί και στη συγκεκριμένη προσομοίωση παίρνει την τιμή  $\mu_1 = 0.1$ .

Για τον ορισμό του πίνακα επαφών χρησιμοποιούμε την εντολή:

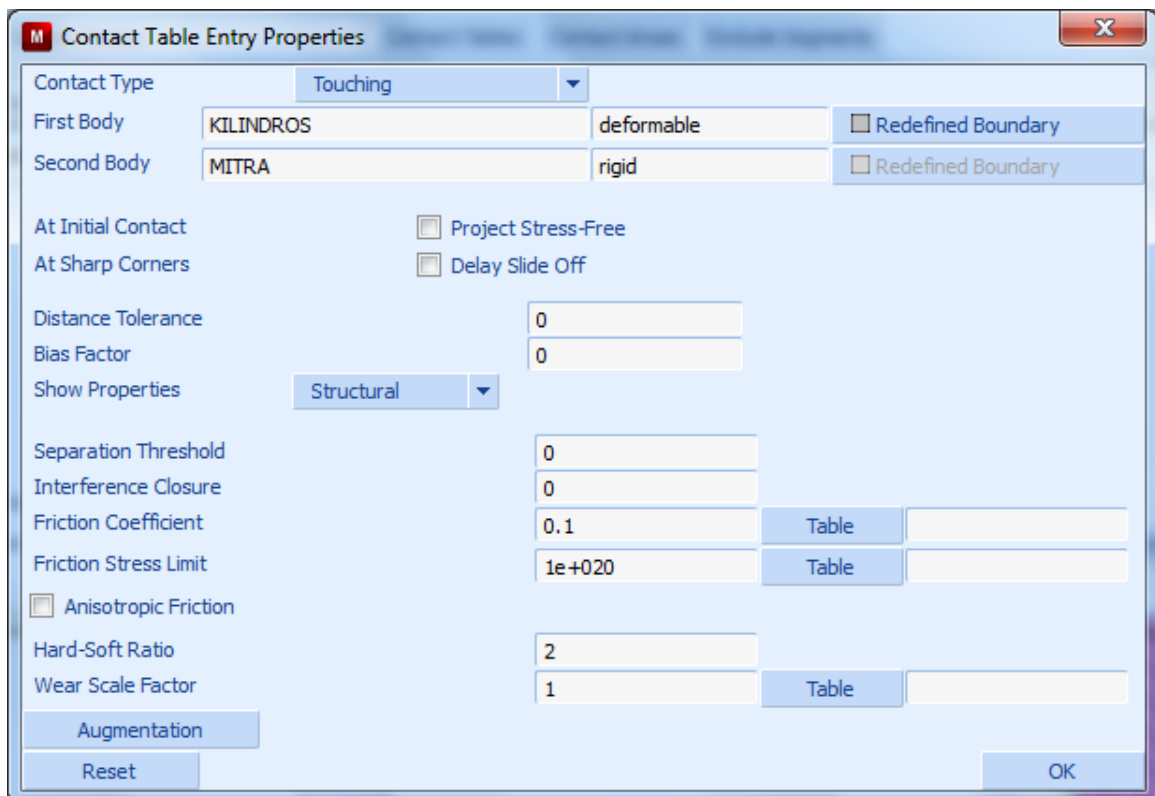
**Contact → Contact Tables → New**



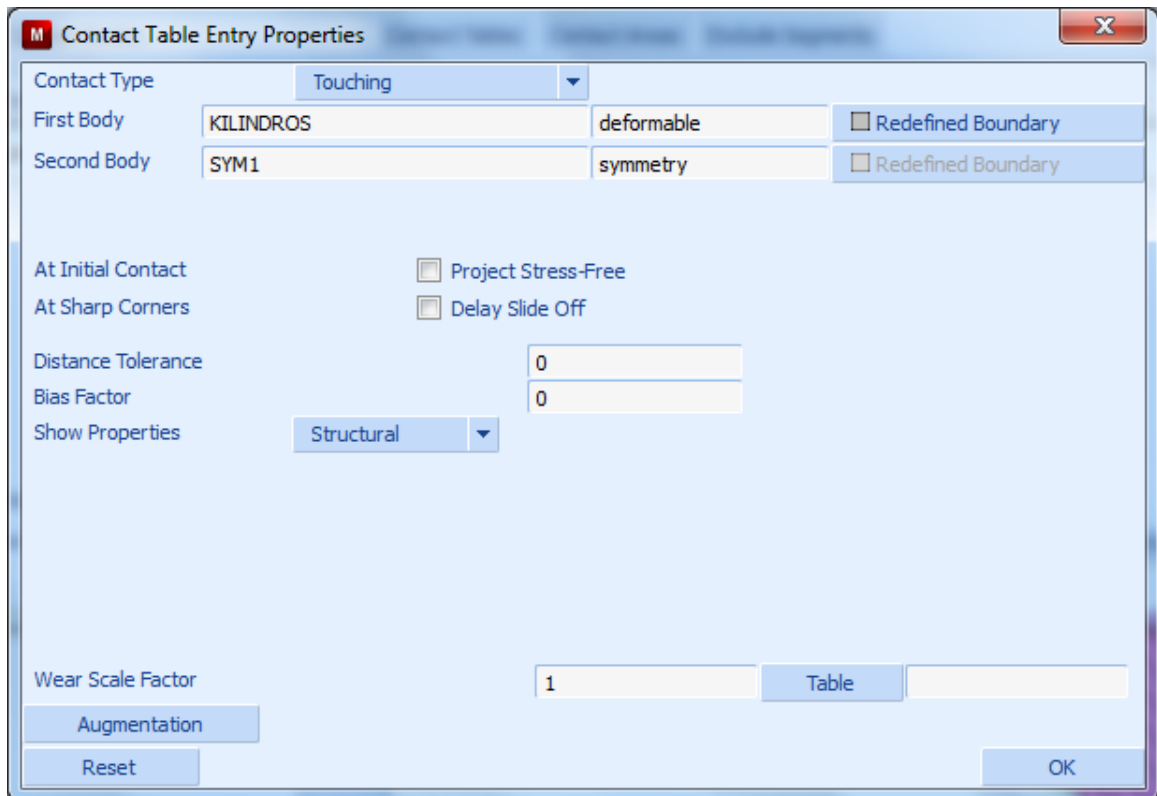
**Σχήμα 5.27:** Ορισμός του πίνακα επαφών μεταξύ των στοιχείων



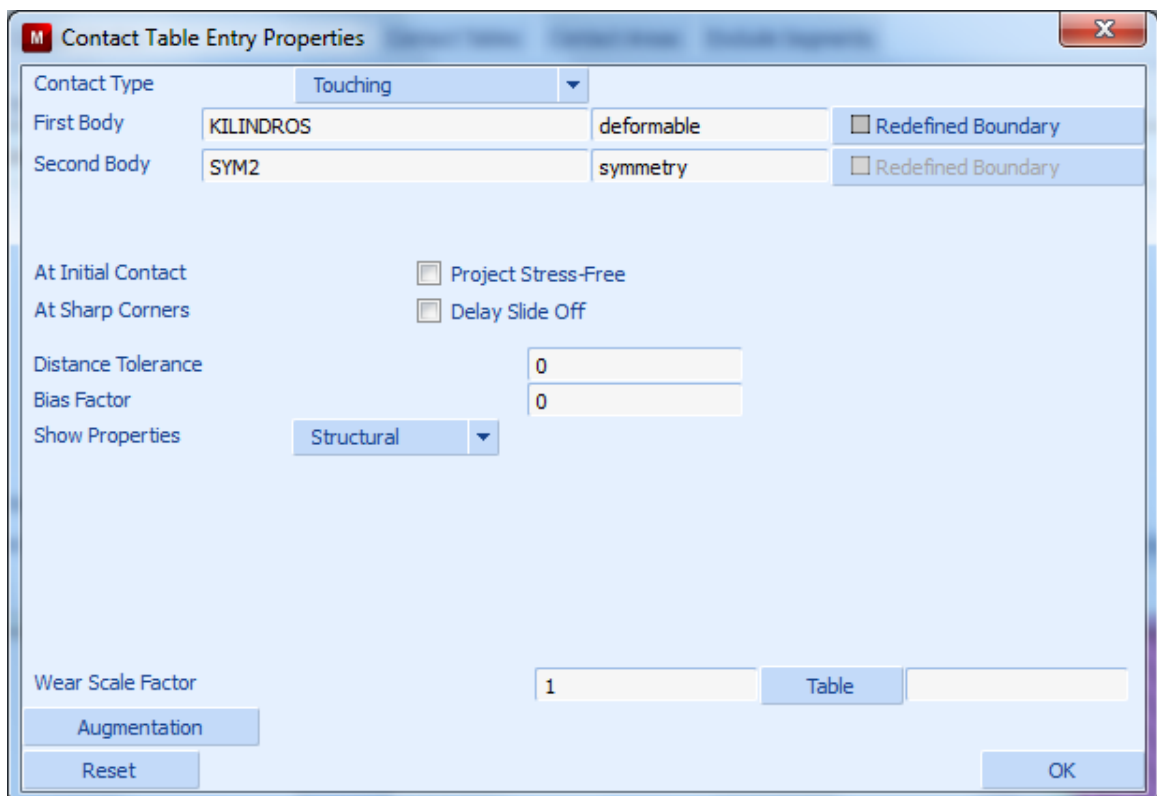
Σχήμα 5.28: Ορισμός της επαφής μεταξύ του εμβόλου και του δοκιμίου



Σχήμα 5.29: Ορισμός της επαφής μεταξύ της μήτρας και του δοκιμίου



Σχήμα 5.30: Ορισμός της επαφής μεταξύ του δοκιμίου και της 1<sup>ης</sup> επιφάνειας συμμετρίας



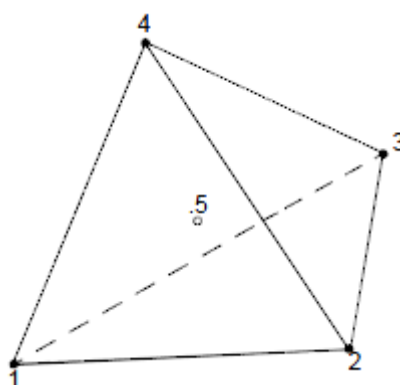
Σχήμα 5.31: Ορισμός της επαφής μεταξύ του δοκιμίου και της 2<sup>ης</sup> επιφάνειας συμμετρίας

### 5.3.7 ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (REMESHING)

Όπως έχουμε προαναφέρει, σημαντικό πλεονέκτημα του MSC MARC είναι η επαναδημιουργία πλέγματος (Remeshing). Στη κατεργασία της σφυρηλάτησης, αυτό το χαρακτηριστικό είναι απαραίτητο μιας και έχουμε μεγάλη παραμόρφωση των στοιχείων. Οι επιλογές του Remeshing χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές και διαφορετικές ρυθμίσεις μέχρι να καταλήξουμε σε αυτές που δεν επιβαρύνουν πολύ την επίλυση του μοντέλου και βγάζουν ακριβή αποτελέσματα. Βασικότερο ζητούμενο είναι η δημιουργία λεπτομερέστερου πλέγματος στις περιοχές όπου η γεωμετρία είναι πολυπλοκότερη και δημιουργεί μεγάλη παραμόρφωση των στοιχείων.

Θα χρησιμοποιήσουμε 3-D global remeshing με τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου 157. Έχει αποδειχθεί ότι η δημιουργία πλέγματος με τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία είναι πιο ακριβής και πιο γρήγορη στην επίλυση, σε σχέση με άλλα πλέγματα. Το MSC MARC χρησιμοποιεί τον δημιουργό πλέγματος από το λογισμικό PATRAN (GS-Mesher) για τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία τύπου 157 που χρησιμοποιεί είναι στοιχεία τύπου Hermann και χρησιμοποιούν τόσο την πίεση όσο και την μετατόπιση στην ανάλυση FEM. Τα συγκεκριμένα στοιχεία με ποικίλους βαθμούς ελευθερίας είναι κατάλληλα για μεγάλες παραμορφώσεις. Τα πεπερασμένα στοιχεία τύπου 157 αποτελούνται από 5 κόμβους, 4 στις γωνίες και 1 εσωτερικό. Υπάρχει ένας βαθμός ελευθερίας που αφορά την πίεση και 3 βαθμοί ελευθερίας που αφορούν την μετατόπιση σε κάθε γωνιακό κόμβο, ενώ στον εσωτερικό κόμβο δεν υπάρχει βαθμός ελευθερίας για την πίεση.

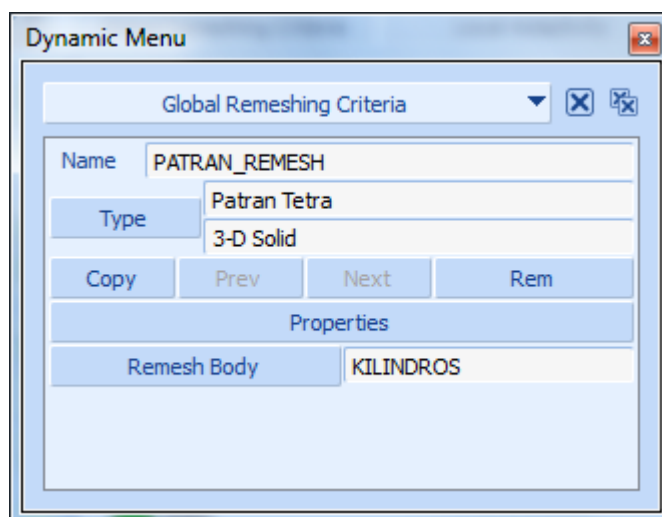
Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται η μορφή του πεπερασμένου στοιχείου τύπου 157 σε σκαρίφημα, ενώ αναλυτικά περιγράφεται στο «παράρτημα Β» της εργασίας.



Σχήμα 5.32: Σκαρίφημα του πεπερασμένου στοιχείου τύπου 157

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζουμε τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την επαναδημιουργία πλέγματος. Κατ' αρχήν χρησιμοποιούμε την εντολή:

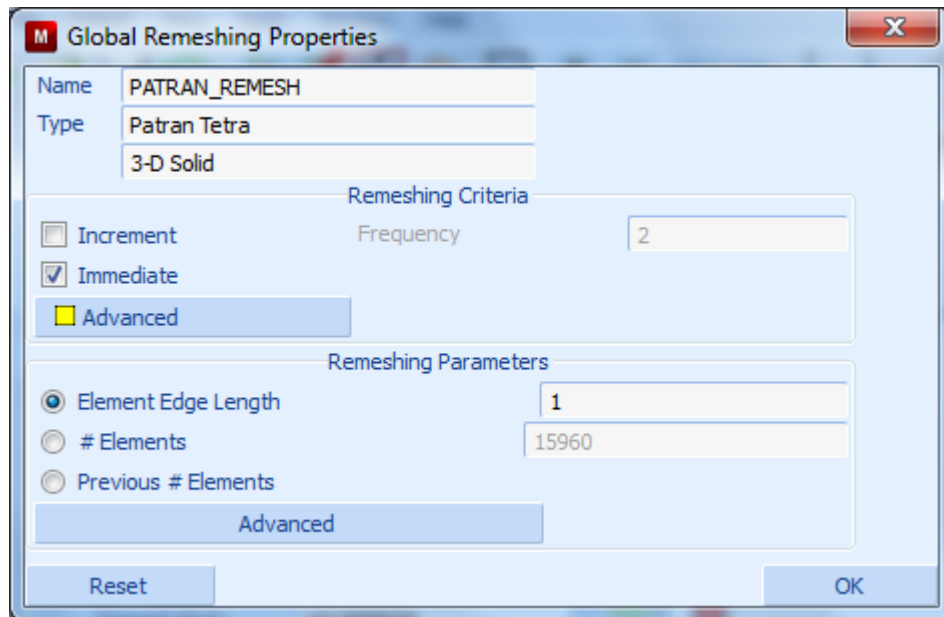
***Mesh Adaptivity → Global Remeshing Criteria → New → Patran Tetra***



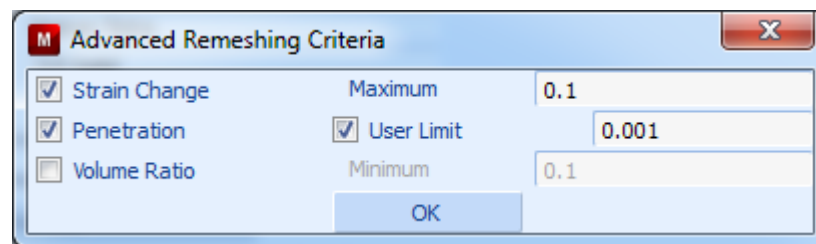
**Σχήμα 5.33:** Επιλογή της επαναδημιουργίας πλέγματος με Patran Tetra

Στη συνέχεια ορίζουμε τα κριτήρια επαναδημιουργίας του πλέγματος καθώς τις παραμέτρους για τα νέα στοιχεία που θα δημιουργηθούν. Επιλέγουμε την άμεση δημιουργία πλέγματος, από την πρώτη επανάληψη, και στις επιλογές για προχωρημένους επιλέγουμε την δημιουργία στοιχείων όταν η παραμόρφωση (Strain Change) ξεπεράσει τα 0.1 mm, καθώς και όταν η διείσδυση (Penetration) μεταξύ των στοιχείων και των απαραμόρφωτων σωμάτων ξεπεράσει τα 0.001 mm.

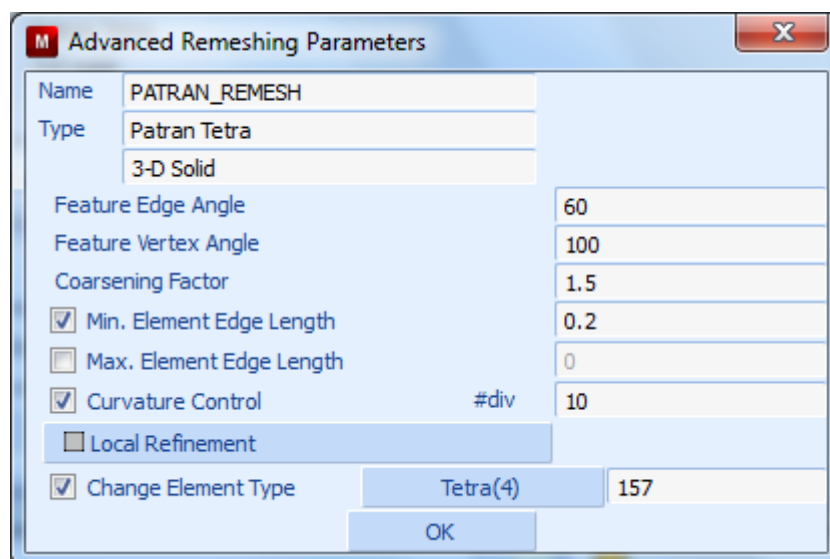
Στη συνέχεια, ορίζουμε τα νέα στοιχεία να έχουν μήκος ακμής (Element Edge Length) ίσο με 1 mm, ενώ στις ρυθμίσεις για προχωρημένους επιλέγουμε αλλαγή σε τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία (Change Element Type) τύπου 157, καθώς και έλεγχο της καμπυλότητας (Curvature Control) σε 10 τμήματα (Divisions) για καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος στις απότομες αλλαγές της γεωμετρίας.



Σχήμα 5.34: Κριτήρια & παράμετροι επαναδημιουργίας πλέγματος Patran Tetra



Σχήμα 5.35: Επιλογές για προχωρημένους στα κριτήρια του Remeshing



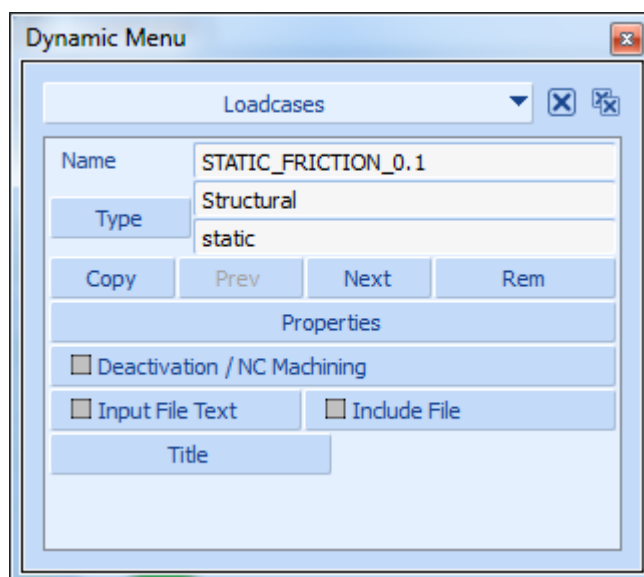
Σχήμα 5.36: Επιλογές για προχωρημένους στις παραμέτρους του Remeshing

### 5.3.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΠΟΘΕΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Στη συνέχεια, θα ορίσουμε την υπόθεση φόρτισης (Loadcase) του μοντέλου μας, χρησιμοποιώντας την εντολή:

**Loadcases → New → Static**

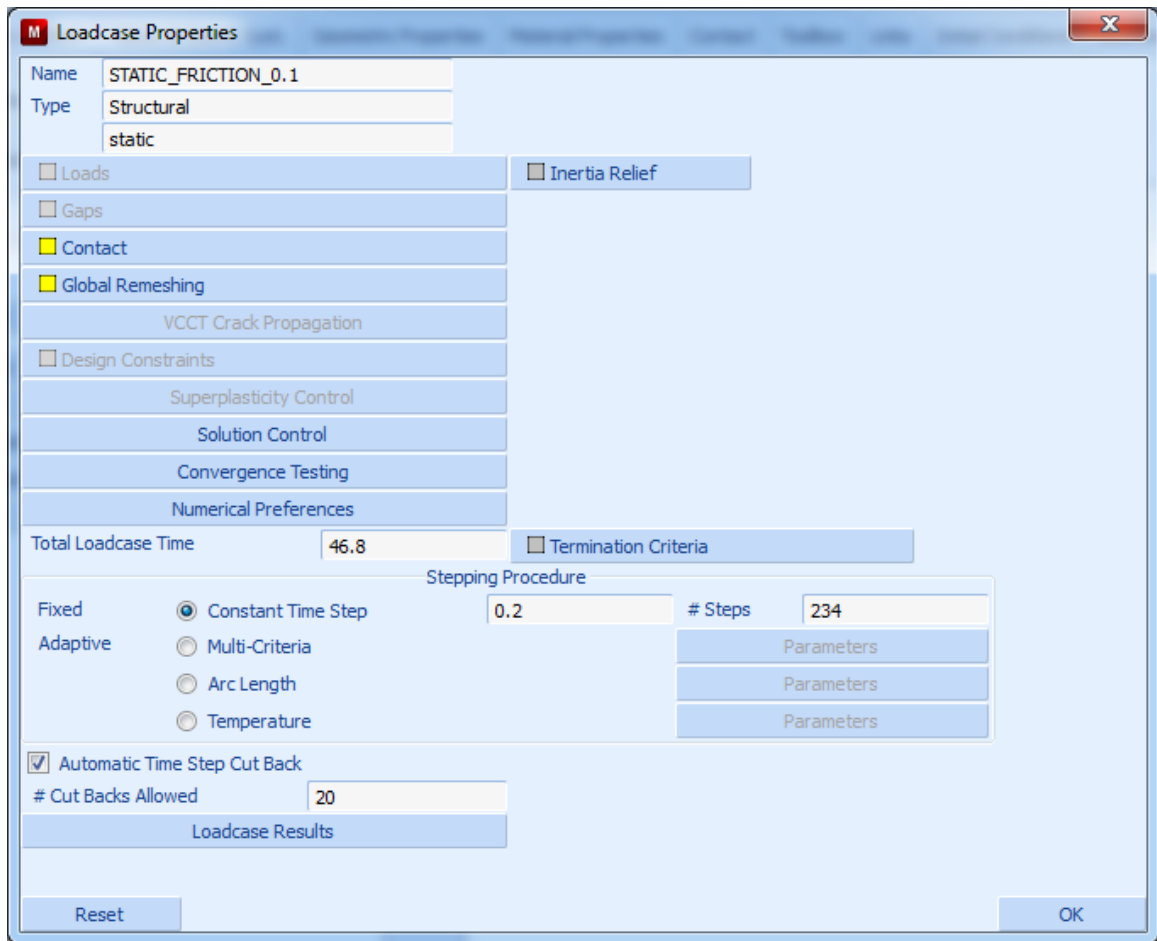
Αφού δώσουμε όνομα στην υπόθεση φόρτισης παίρνουμε το ακόλουθο παράθυρο επιλογής:



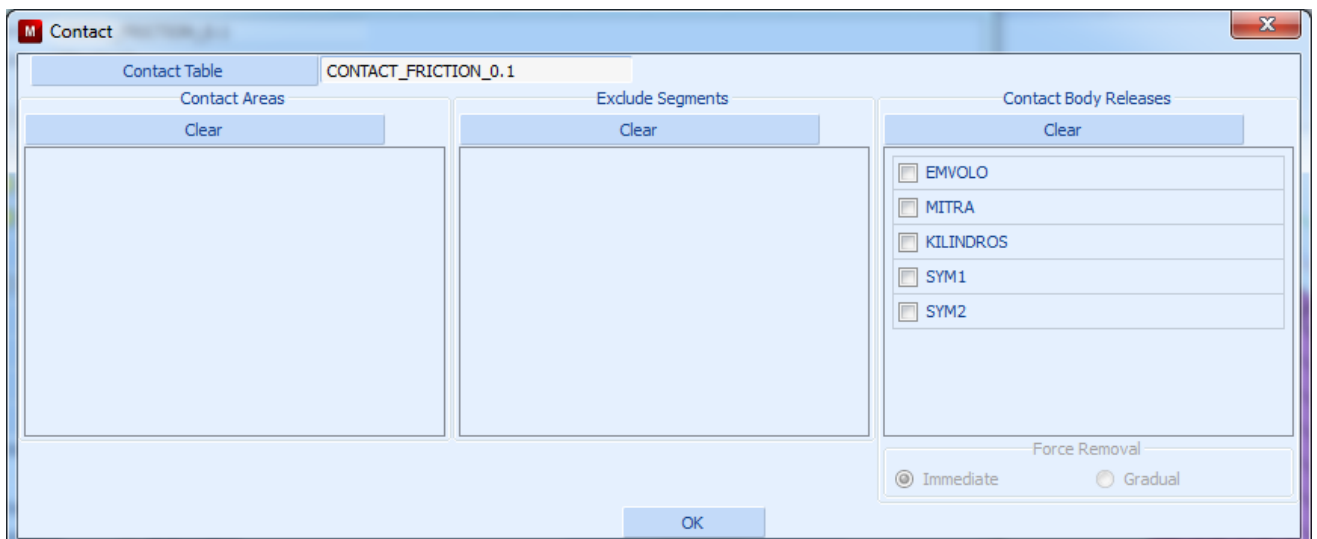
Σχήμα 5.37: Ορισμός της υπόθεσης φόρτισης στο μοντέλο

Στη συνέχεια, ορίζουμε τις επιλογές της υπόθεσης φόρτισης, όπου διακρίνουμε τον χρόνο φόρτισης, οποίος ισούται με 46.8 sec, όσος χρόνος χρειάζεται για κατέλθει το εμβολο 3.85 mm, σύμφωνα με την ταχύτητα εμβόλου που έχουμε ορίσει και ισούται με 5 mm/min. Ο χρόνος αυτός υποδιαιρείται σε 234 βήματα (Steps) των 0.2 sec το ένα. 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.

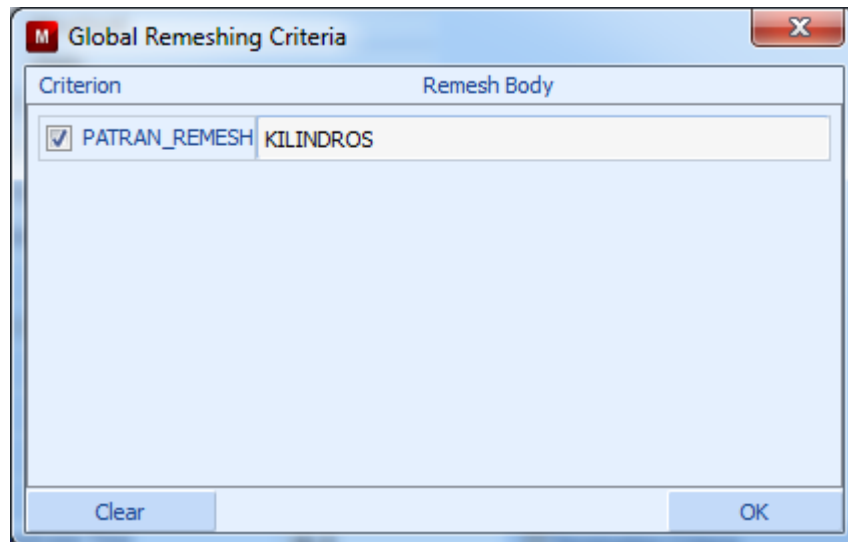




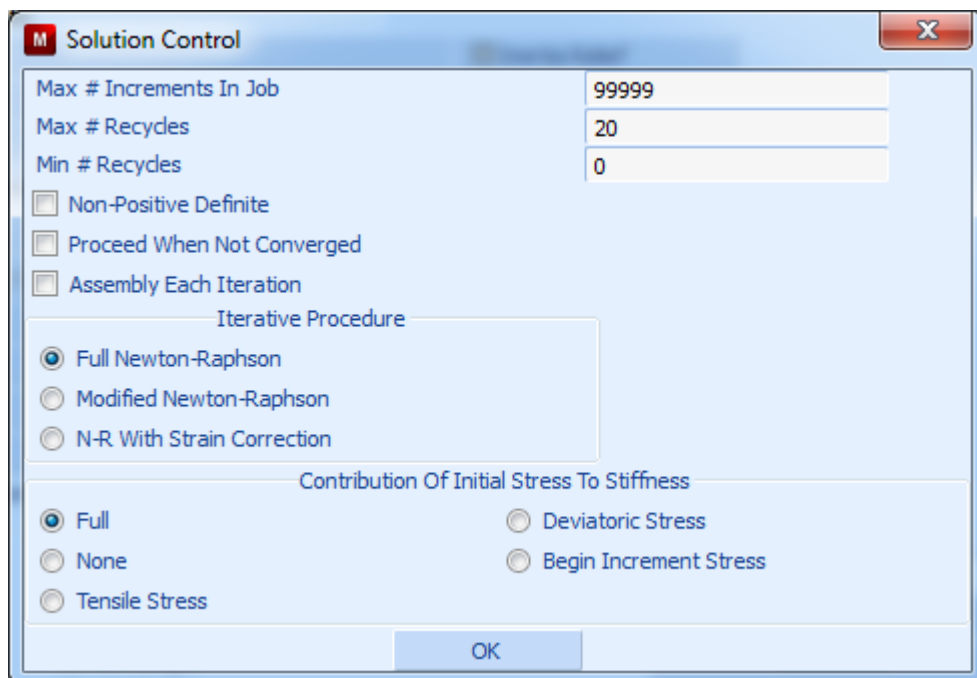
Σχήμα 5.38: Ορισμός των ιδιοτήτων της υπόθεσης φόρτισης



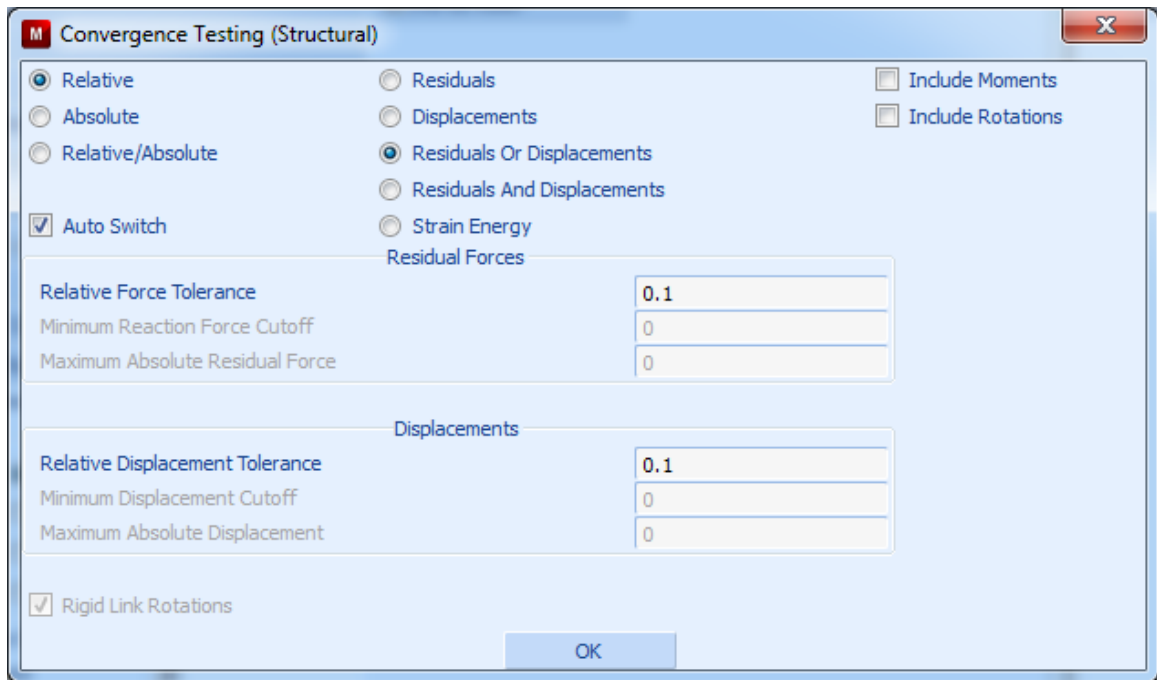
Σχήμα 5.39: Ορισμός του πίνακα επαφών



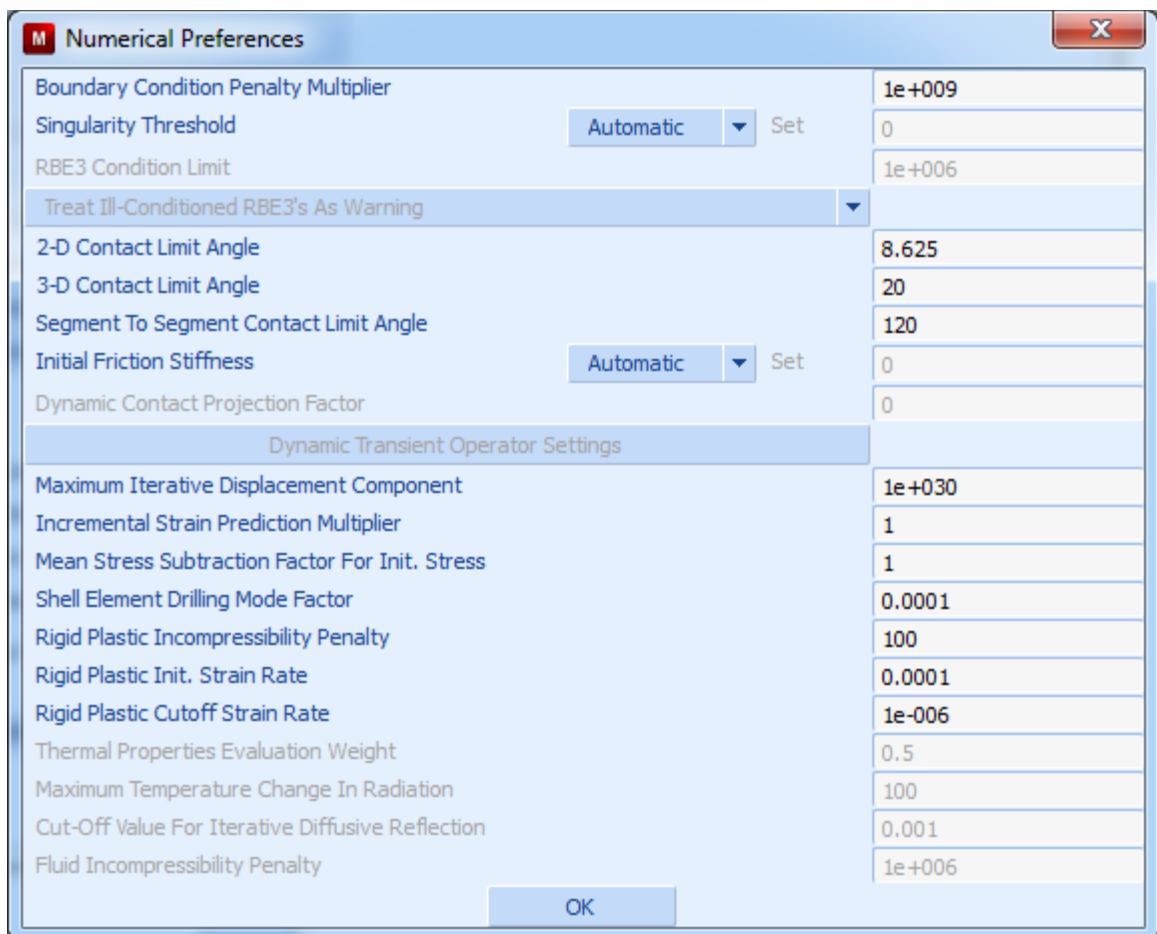
Σχήμα 5.40: Ορισμός της επαναδημιουργίας πλέγματος Patran Tetra



Σχήμα 5.41: Ορισμός επιλογών του ελέγχου επίλυσης



Σχήμα 5.42: Ορισμός επιλογών των κριτηρίων σύγκλισης



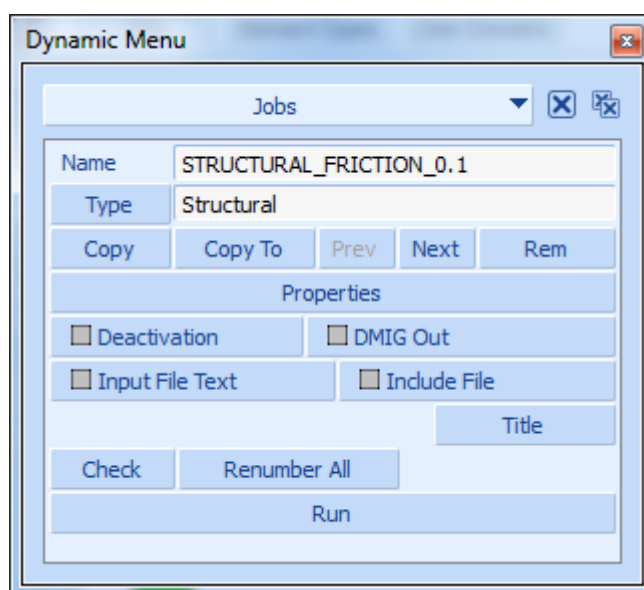
Σχήμα 5.43: Ορισμός αριθμητικών επιλογών

### 5.3.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πριν την επίλυση του μοντέλου, ορίζουμε της επιλογές της διεργασίας μας, χρησιμοποιώντας την εντολή!

#### ***Jobs → New → Structural***

Αφού δώσουμε όνομα στην διεργασία παίρνουμε το ακόλουθο παράθυρο επιλογής:

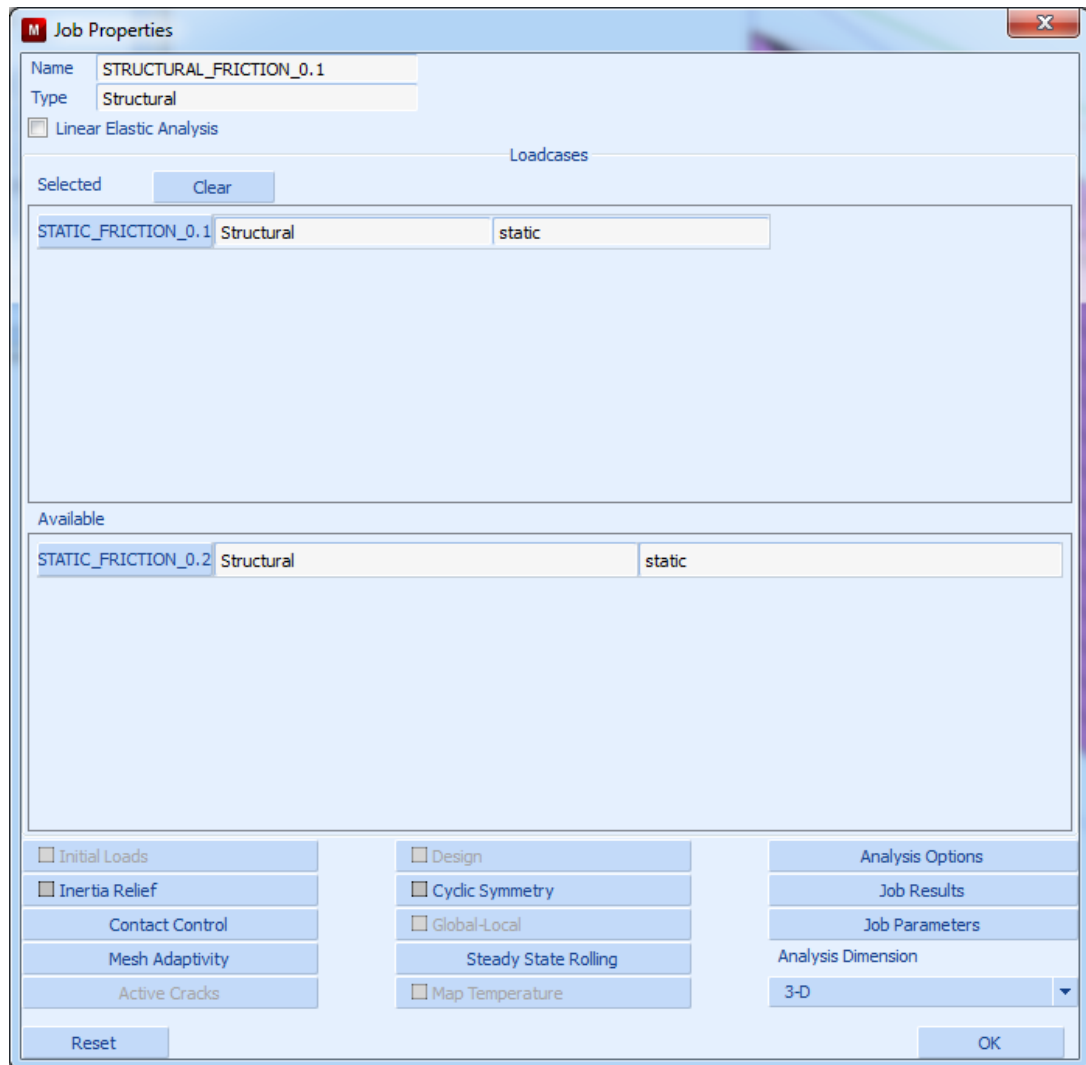


**Σχήμα 5.44:** Ορισμός της διεργασίας στο μοντέλο

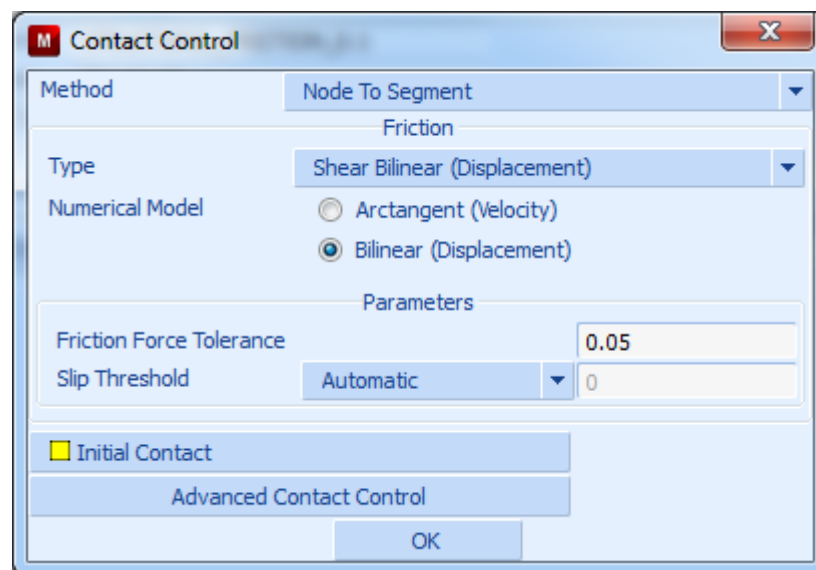
Στη συνέχεια ορίζουμε τις επιλογές της διεργασίας όπου ορίζουμε την υπόθεση φόρτισης που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα, επιλέγουμε το μοντέλο τριβής που ακολουθεί τη μέθοδο «κόμβος σε τεμάχιο» (Node To Segment) με διγραμμικό αριθμητικό μοντέλο (Bilinear Numerical Model). Στο ίδιο παράθυρο επιλογών ορίζουμε και τις αρχικές συνθήκες επαφής που δεν είναι άλλες από τον πίνακα επαφών που έχουμε δημιουργήσει.

Στις επιλογές της διεργασίας συμπεριλαμβάνονται οι επιλογές κατασκευαστικής ανάλυσης (Structural Analysis Options) όπου επιλέγουμε μεγάλη παραμόρφωση (Large Strain), τα αποτελέσματα της διεργασίας που θέλουμε να πάρουμε μετά την επίλυση, όπου επιλέγουμε εκτός των άλλων την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises και την συνολική παραμόρφωση. Επίσης, ορίζουμε τις παραμέτρους της διεργασίας, αφήνοντας τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του προγράμματος.

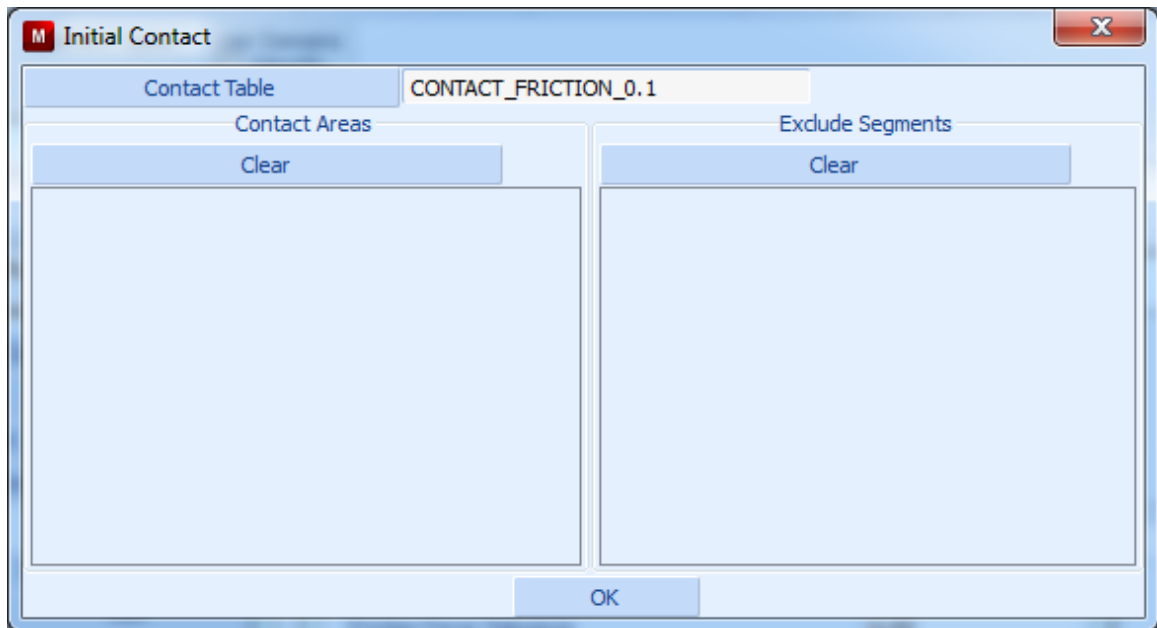
Αμέσως παρακάτω παρατίθενται όλα τα προαναφερθέντα βήματα αναλυτικά.



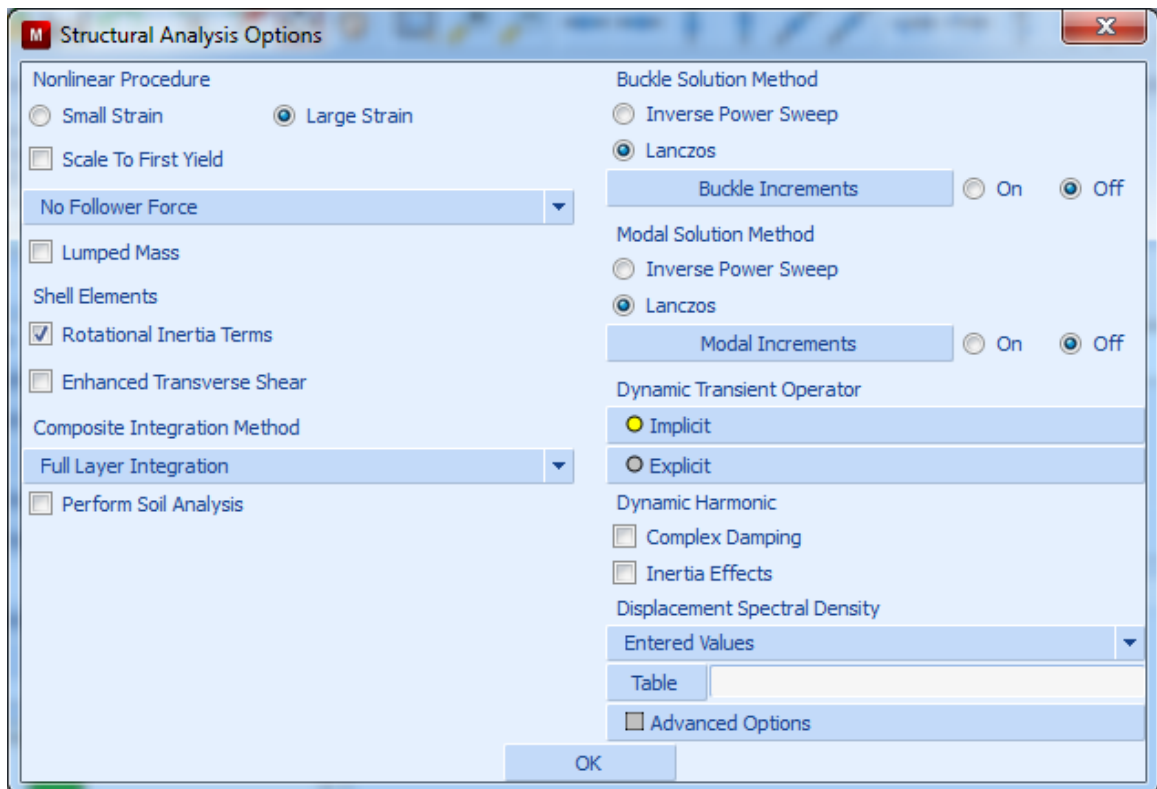
Σχήμα 5.45: Ορισμός επιλογών της διεργασίας στο μοντέλο



Σχήμα 5.46: Ορισμός του μοντέλου τριβής

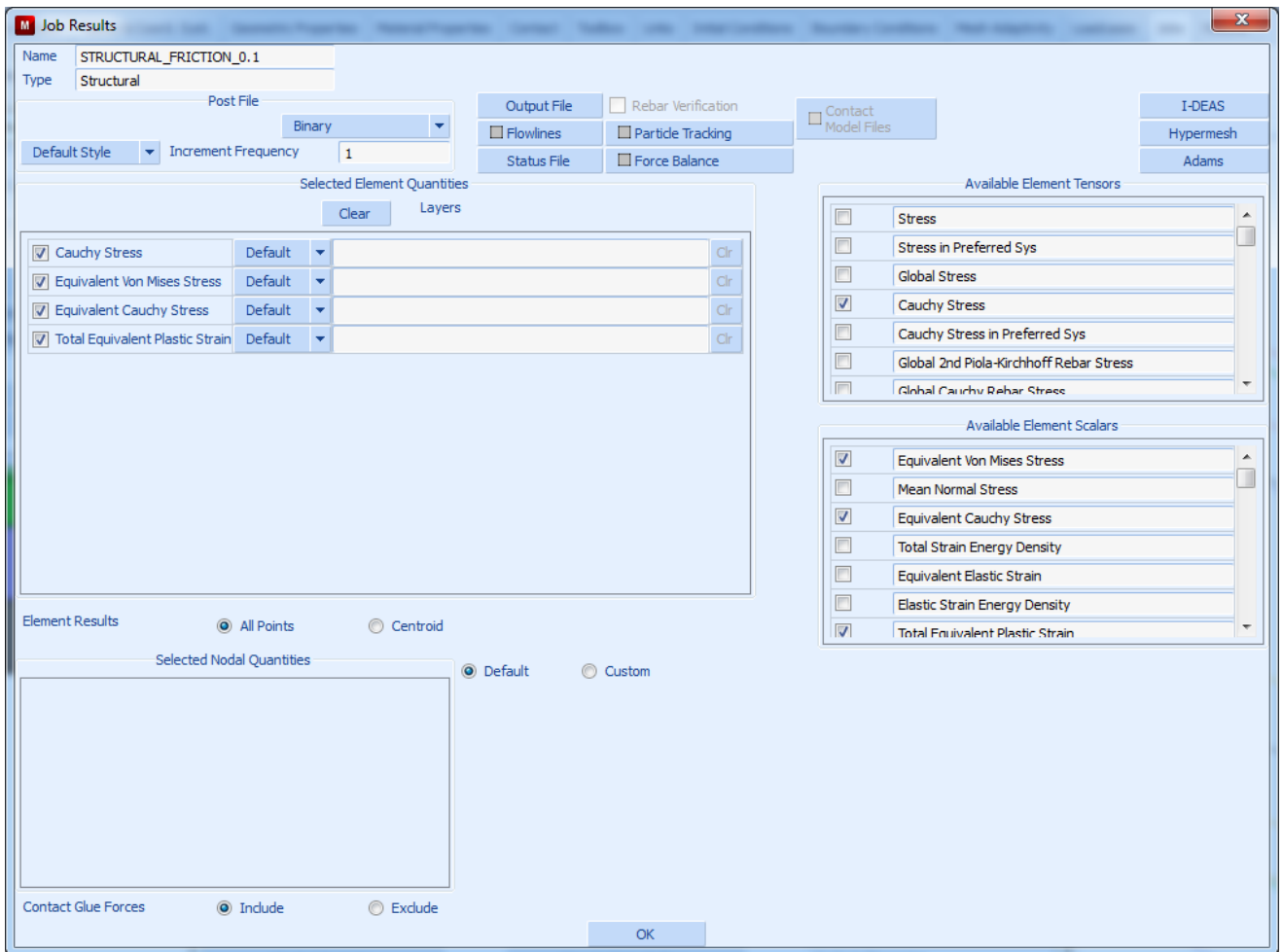


Σχήμα 5.47: Ορισμός των αρχικών συνθηκών επαφής

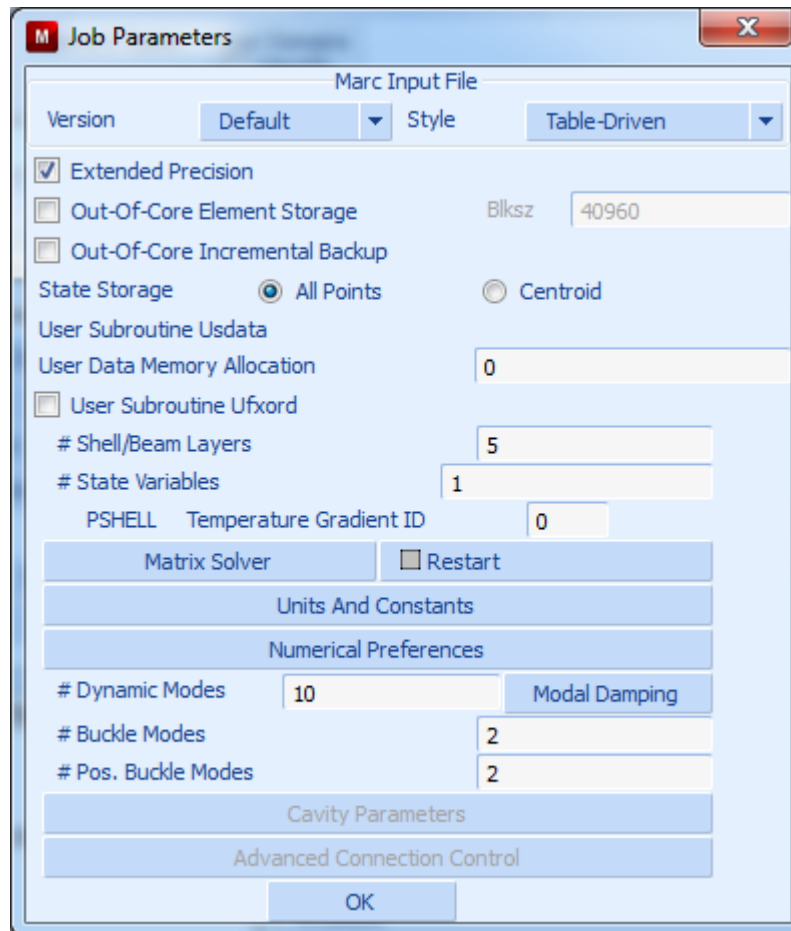


Σχήμα 5.48: Ορισμός των επιλογών της κατασκευαστικής ανάλυσης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ



**Σχήμα 5.49:** Ορισμός των αποτελεσμάτων της διεργασίας



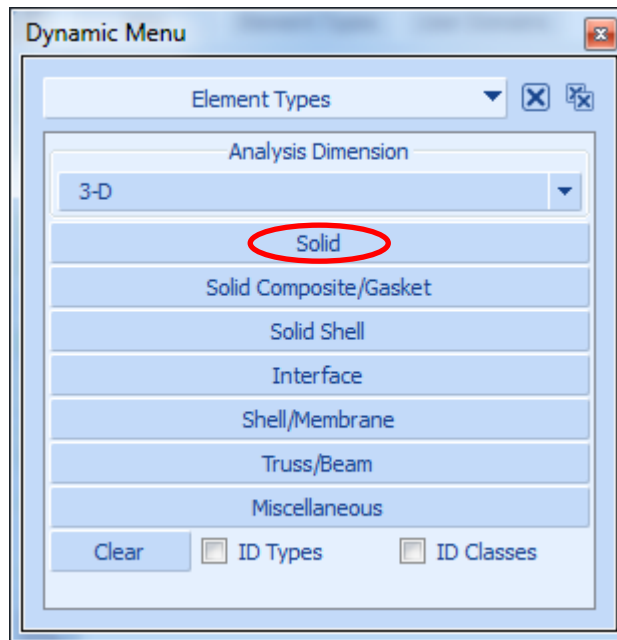
Σχήμα 5.50: Ορισμός των παραμέτρων της διεργασίας

Τέλος, ορίζουμε τον τύπο των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση, χρησιμοποιώντας την εντολή:

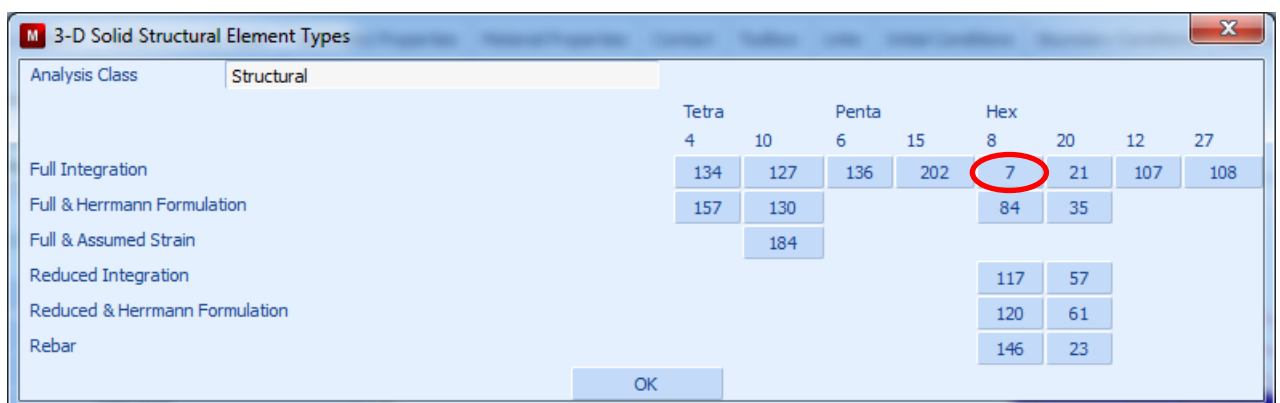
***Jobs → Element Types → Solid***

όπου επιλέγουμε τα εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου 7 (Hex 8 – Type 7), τα οποία, όπως προείπαμε μετατρέπονται σε τετραεδρικά στοιχεία τύπου 157 (Tetra 4 – Type 157) κατά την αναδημιουργία πλέγματος.





Σχήμα 5.51: Ορισμός τύπου των πεπερασμένων στοιχείων



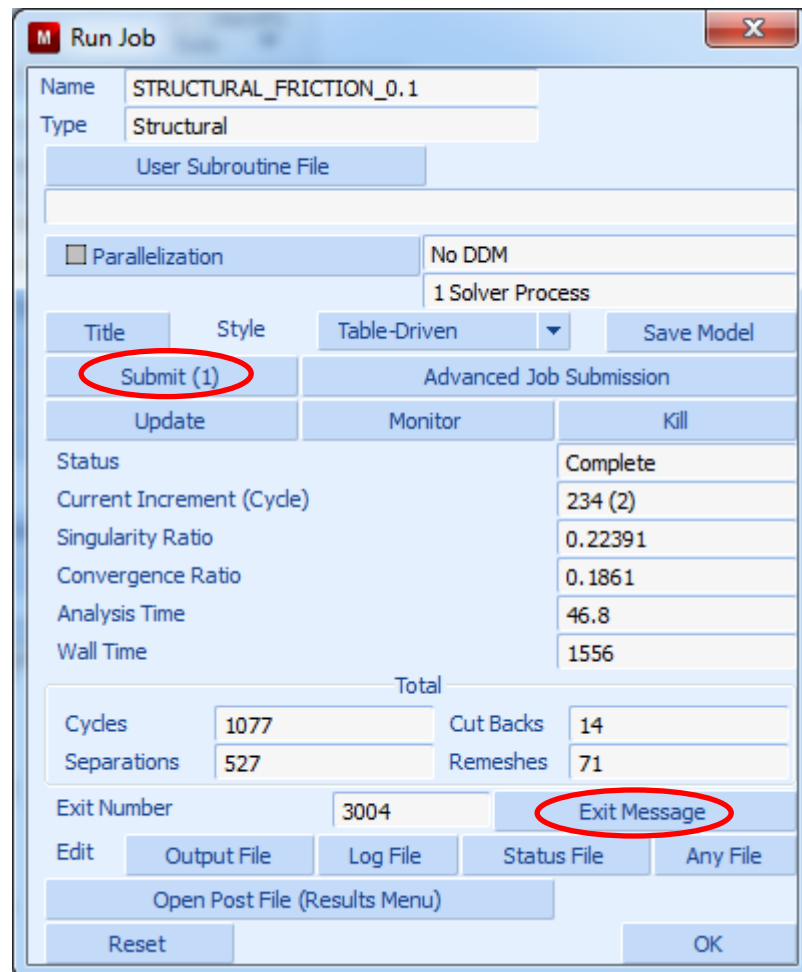
Σχήμα 5.52: Ορισμός των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων

Αφού ολοκληρώσαμε όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις της ανάλυσης, από το menu της διεργασίας επιλέγουμε την επιλογή Check όπου και εμφανίζει τα πιθανά σφάλματα που έχει το μοντέλο μας και πρέπει να διορθωθούν πριν προχωρήσουμε στην επίλυση.

Αφού δεν εμφανιστούν σφάλματα στο μοντέλο προχωρούμε στην επίλυσή του χρησιμοποιώντας την εντολή:

**Jobs → Run → Submit**

μετά την ολοκλήρωση της επίλυσης παίρνουμε το παρακάτω παράθυρο όπου παρατηρούμε ότι όλα τα βήματα έχουν ολοκληρωθεί και το μήνυμα εξόδου είναι το ζητούμενο (3004) που μας δείχνει ότι έχουμε σύγκλιση.



**Σχήμα 5.53:** Ορισμός των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων

Στο ίδιο παράθυρο μπορούμε να παρατηρήσουμε τον χρόνο επίλυσης του μοντέλου, τον αριθμό των Remeshings που δημιουργήθηκαν.

### 5.3.10 ΛΗΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μετά την επιτυχή επίλυση του μοντέλου, παίρνουμε τα ζητούμενα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την εντολή:

#### ***Run Job → Open Post File (Results Menu)***

έτσι, το πρόγραμμα μας οδηγεί στην εμφάνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της επίλυσης και βρισκόμαστε στο menu:

#### ***Results → Model Plot***

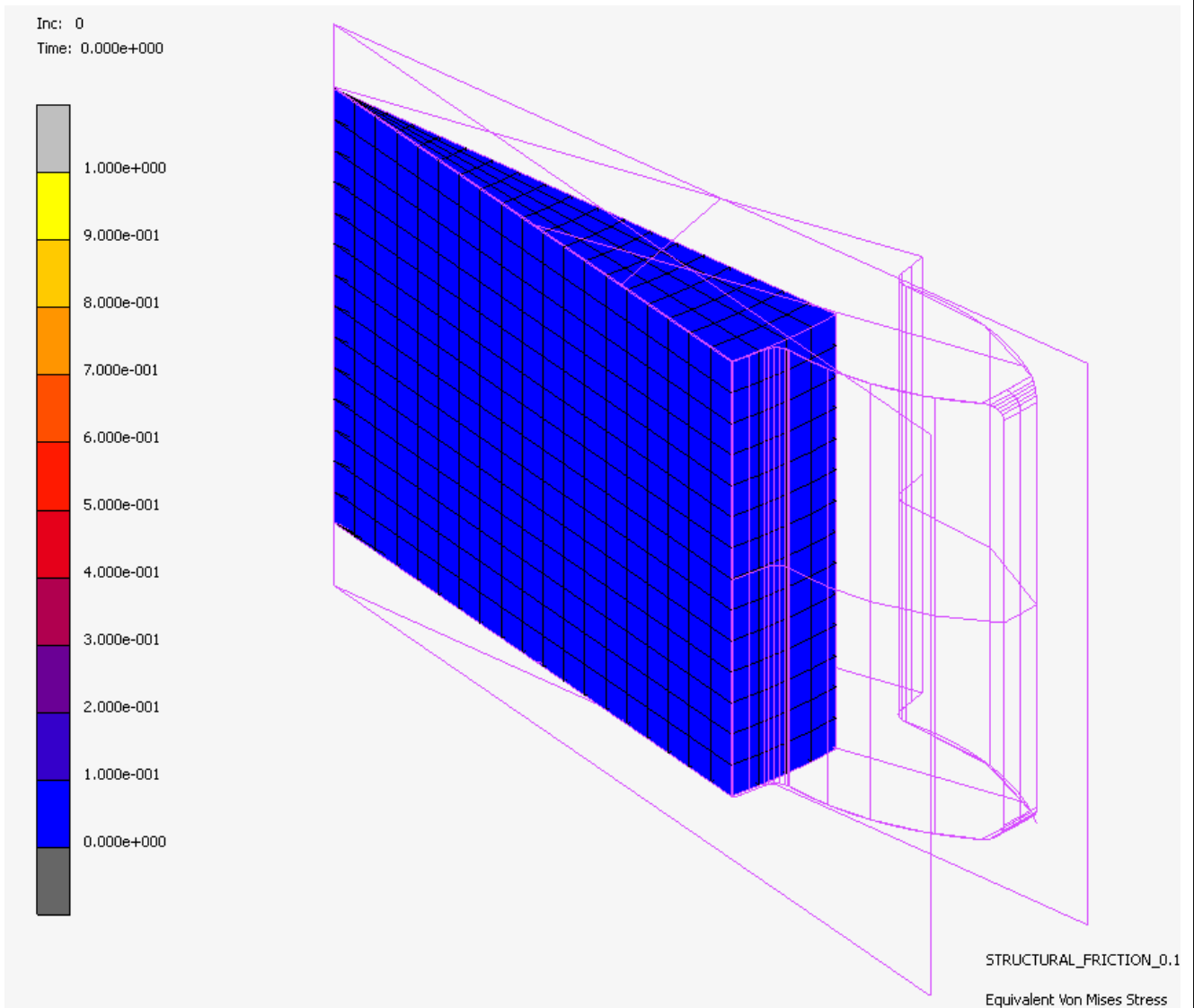
όπου ορίζουμε τα γραφικά αποτελέσματα της προσομοίωσης σύμφωνα με το παρακάτω παράθυρο:



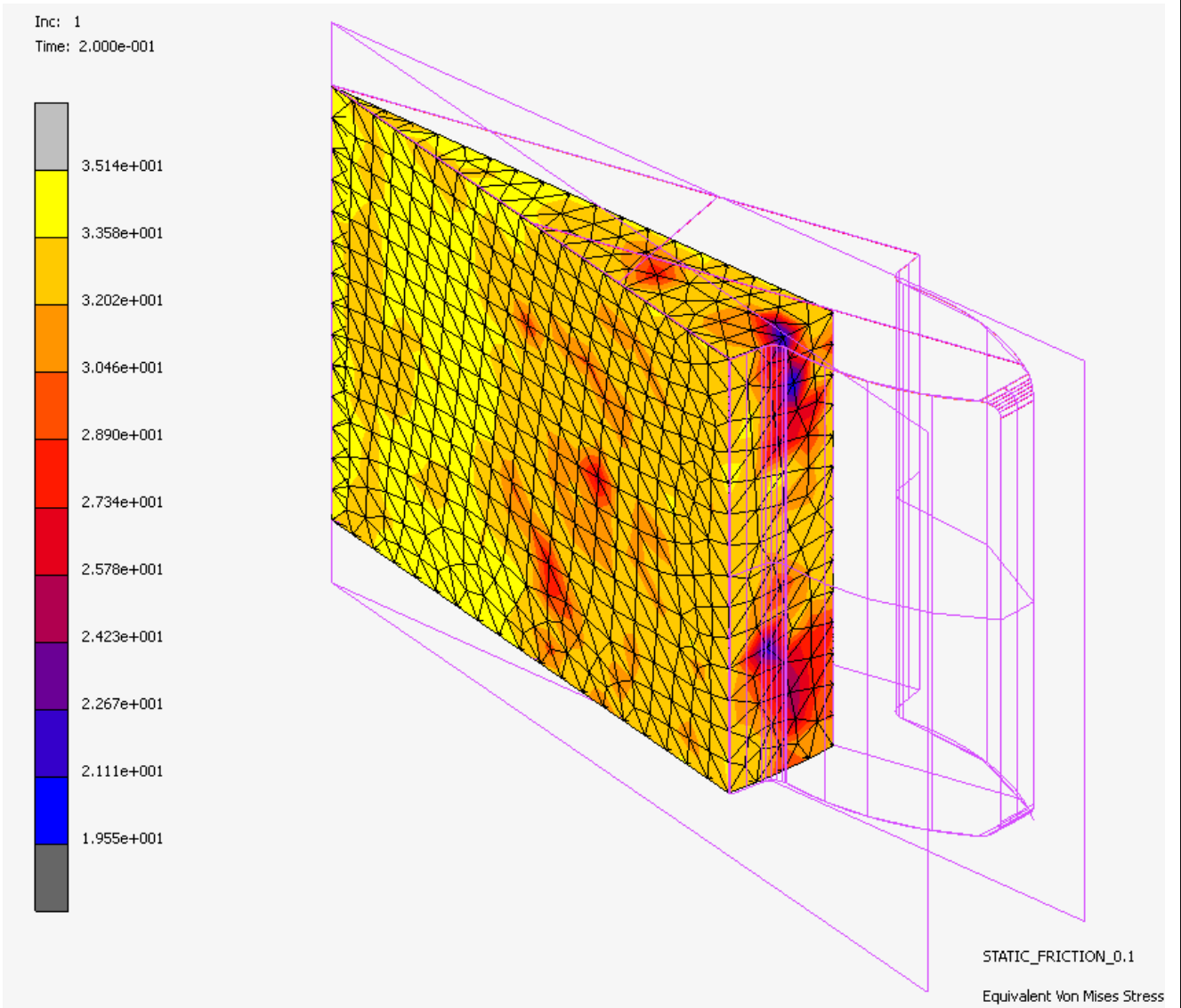
**Σχήμα 5.54:** Ορισμός των γραφικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Αμέσως παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises σε  $\text{N/mm}^2$  (MPa) για 0, 1, 50, 100, 150, 200 και 233 επαναλήψεις για τις δύο διαφορετικές μήτρες σφυρηλάτησης για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

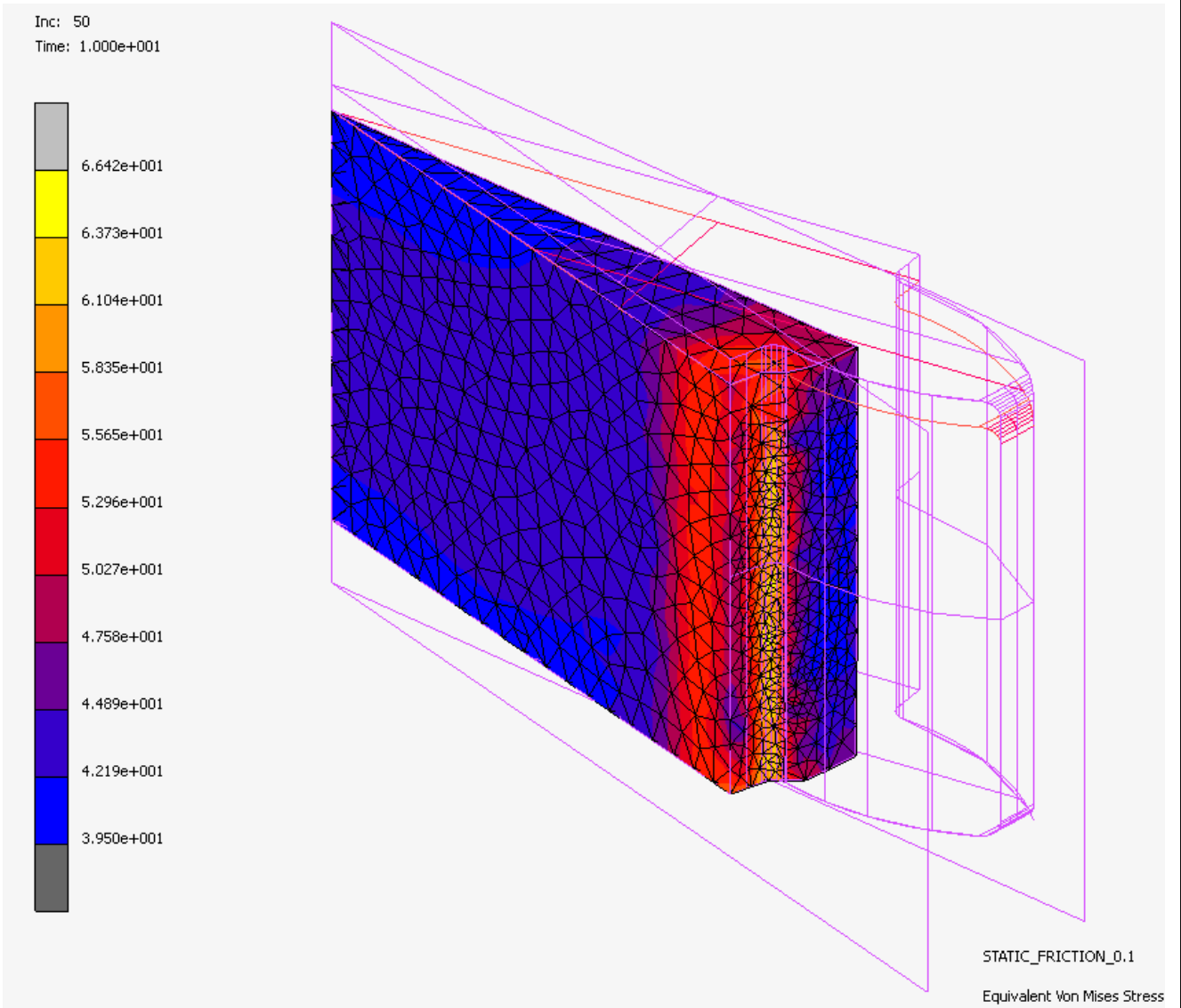
**ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΜΕ ΕΜΒΟΛΟ ΜΟΡΦΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ**



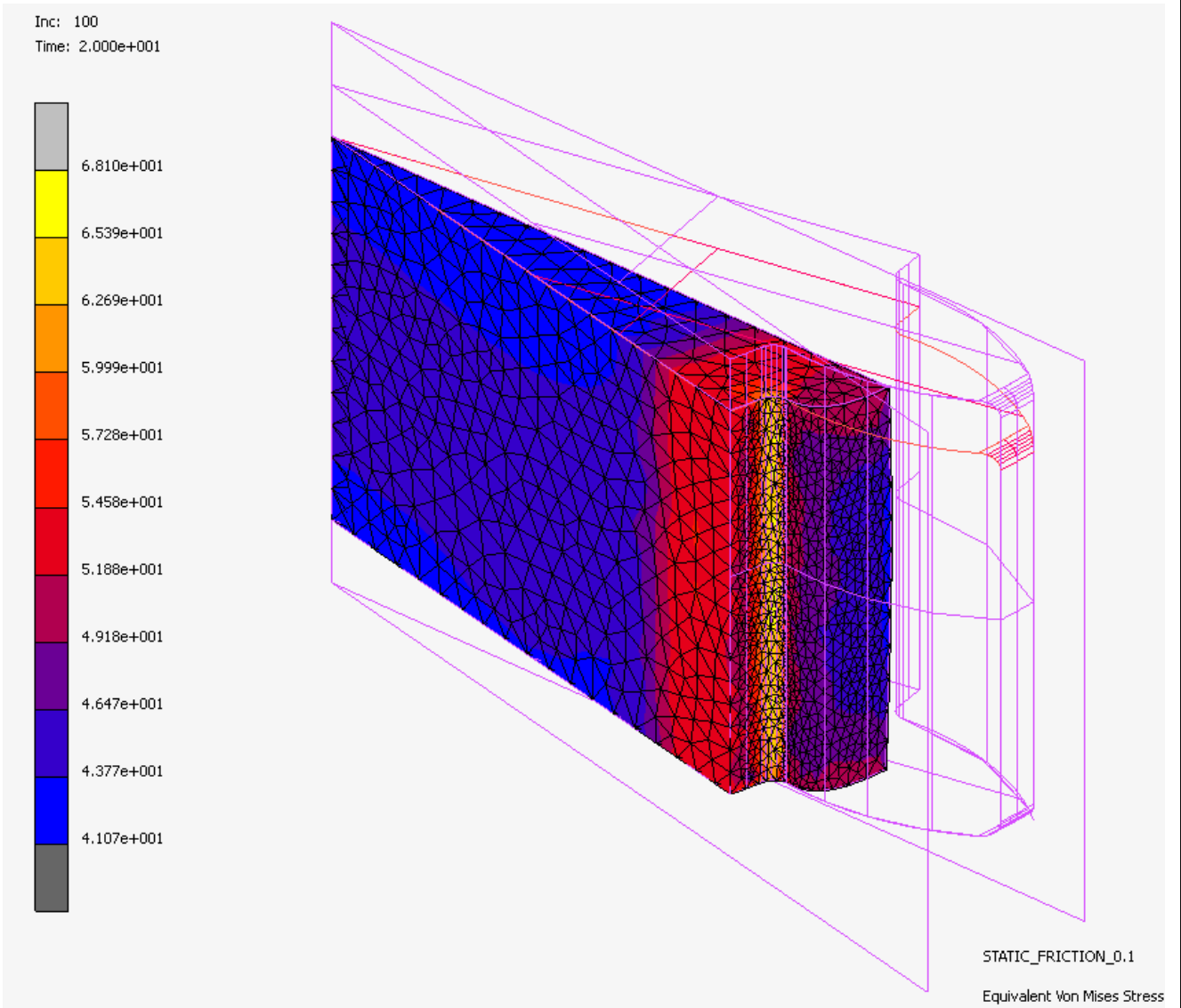
**Σχήμα 5.55:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (1064 στοιχεία)



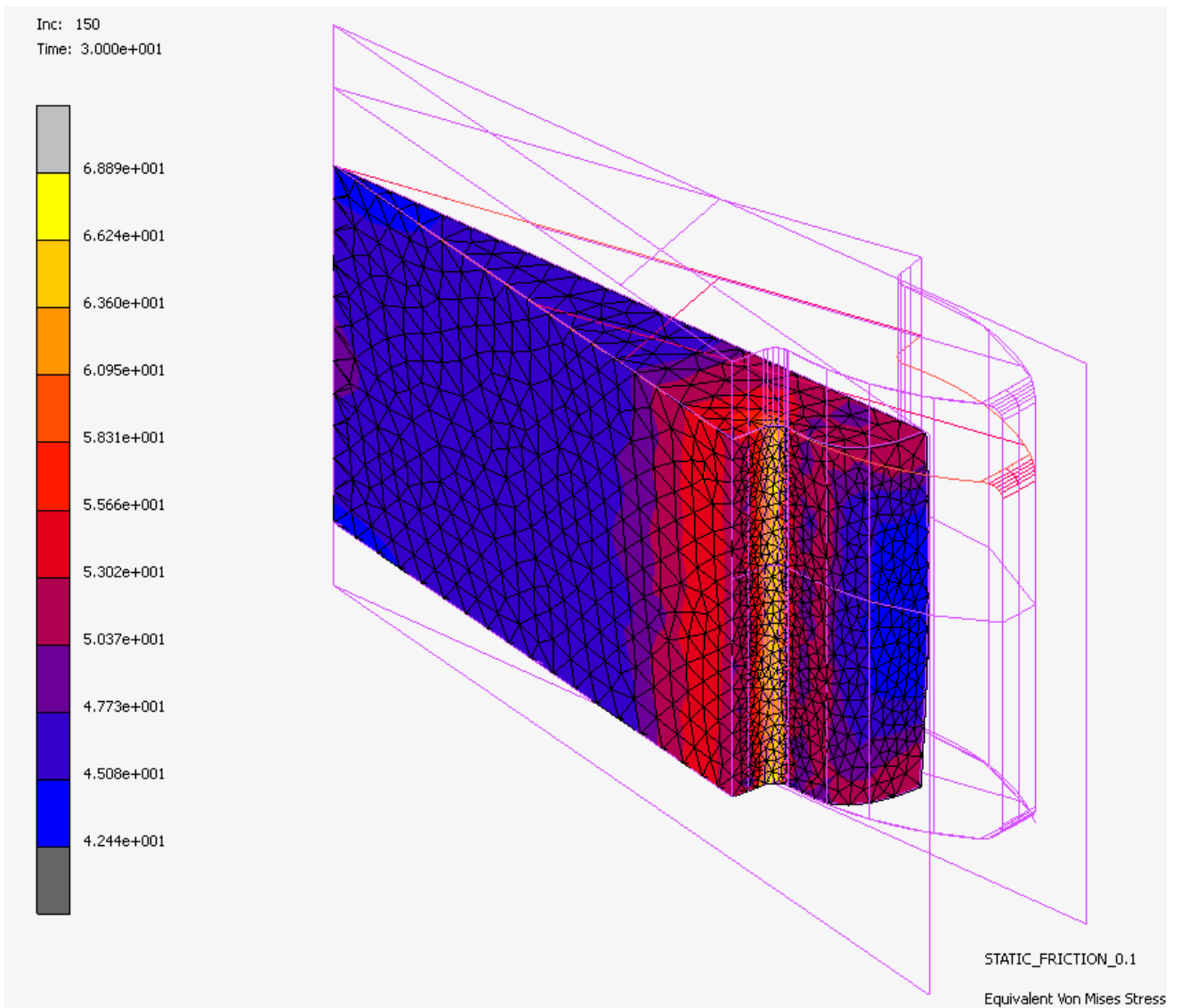
**Σχήμα 5.56:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 1 (4528 στοιχεία)



**Σχήμα 5.57:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 50 (5855 στοιχεία)

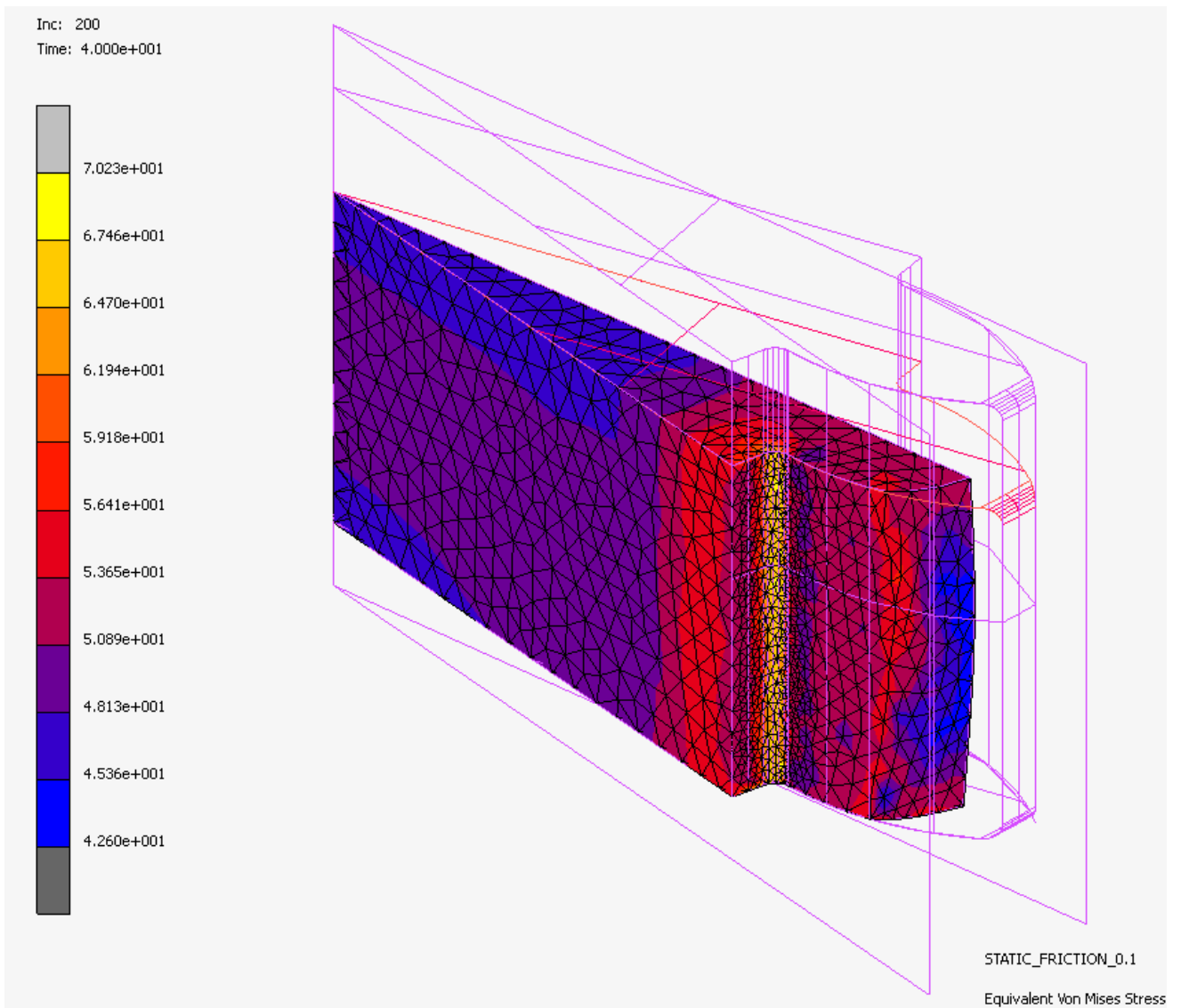


**Σχήμα 5.58:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 100 (9077 στοιχεία)

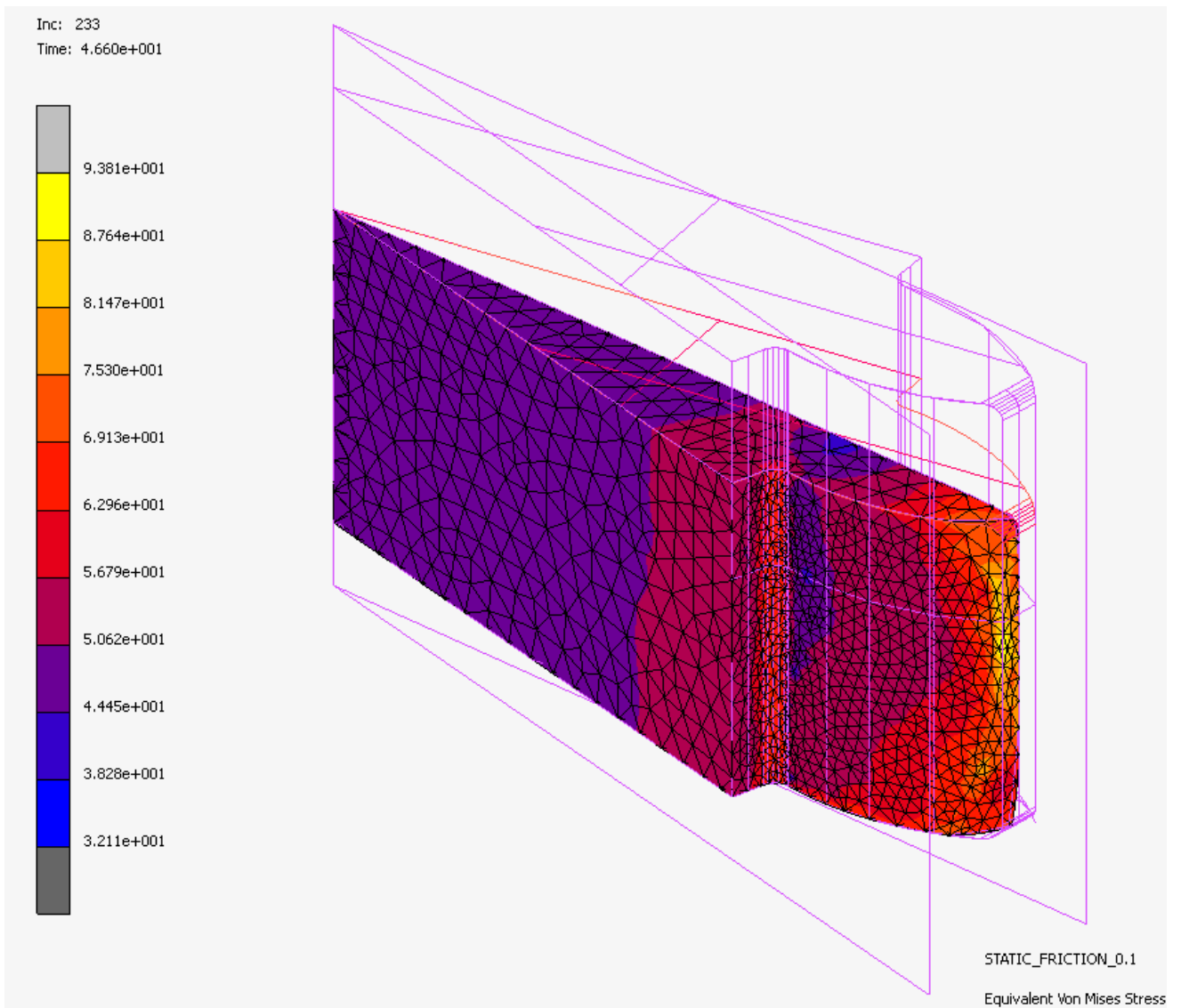


**Σχήμα 5.59:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 150 (7671 στοιχεία)



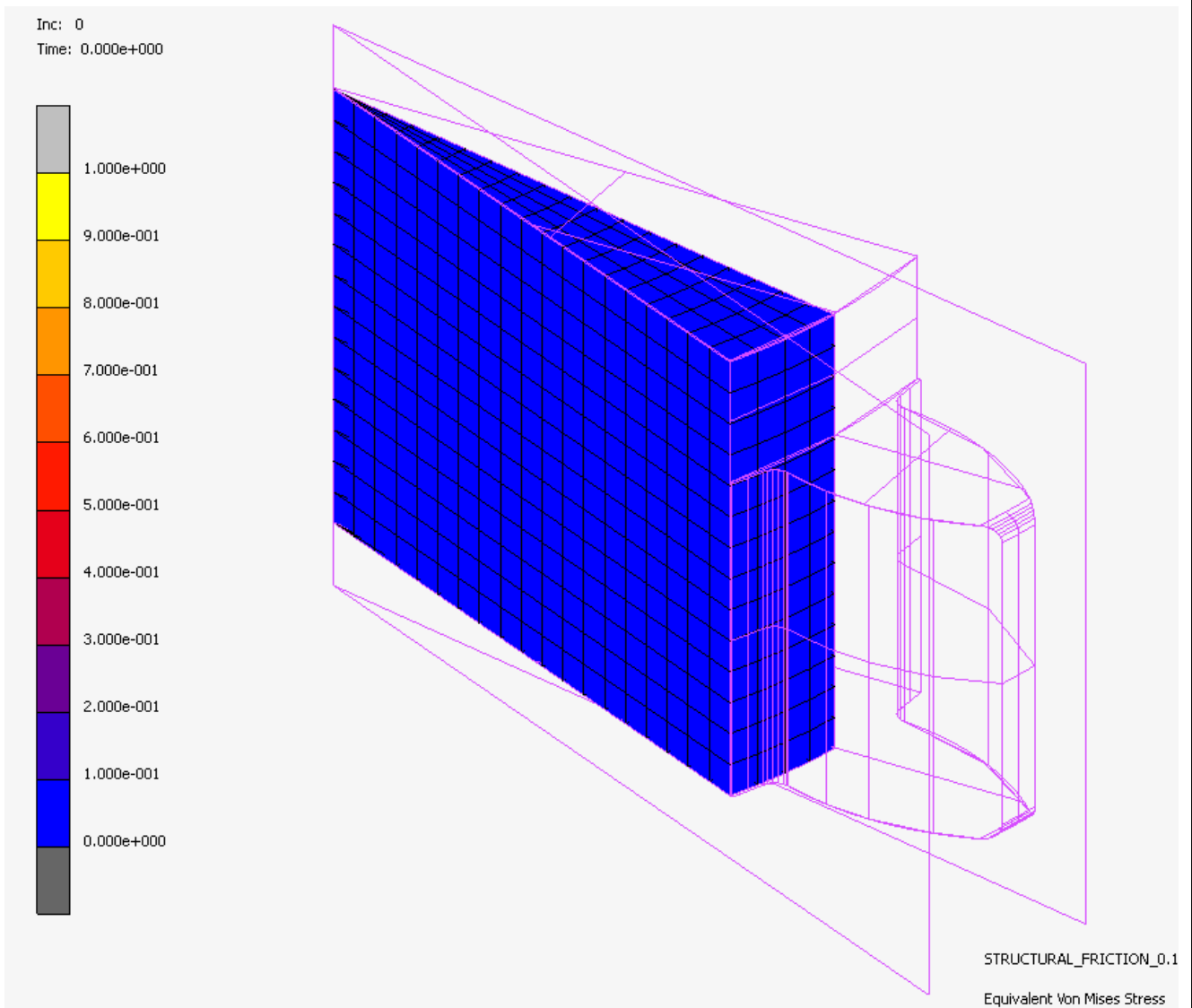


**Σχήμα 5.60:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 200 (7819 στοιχεία)

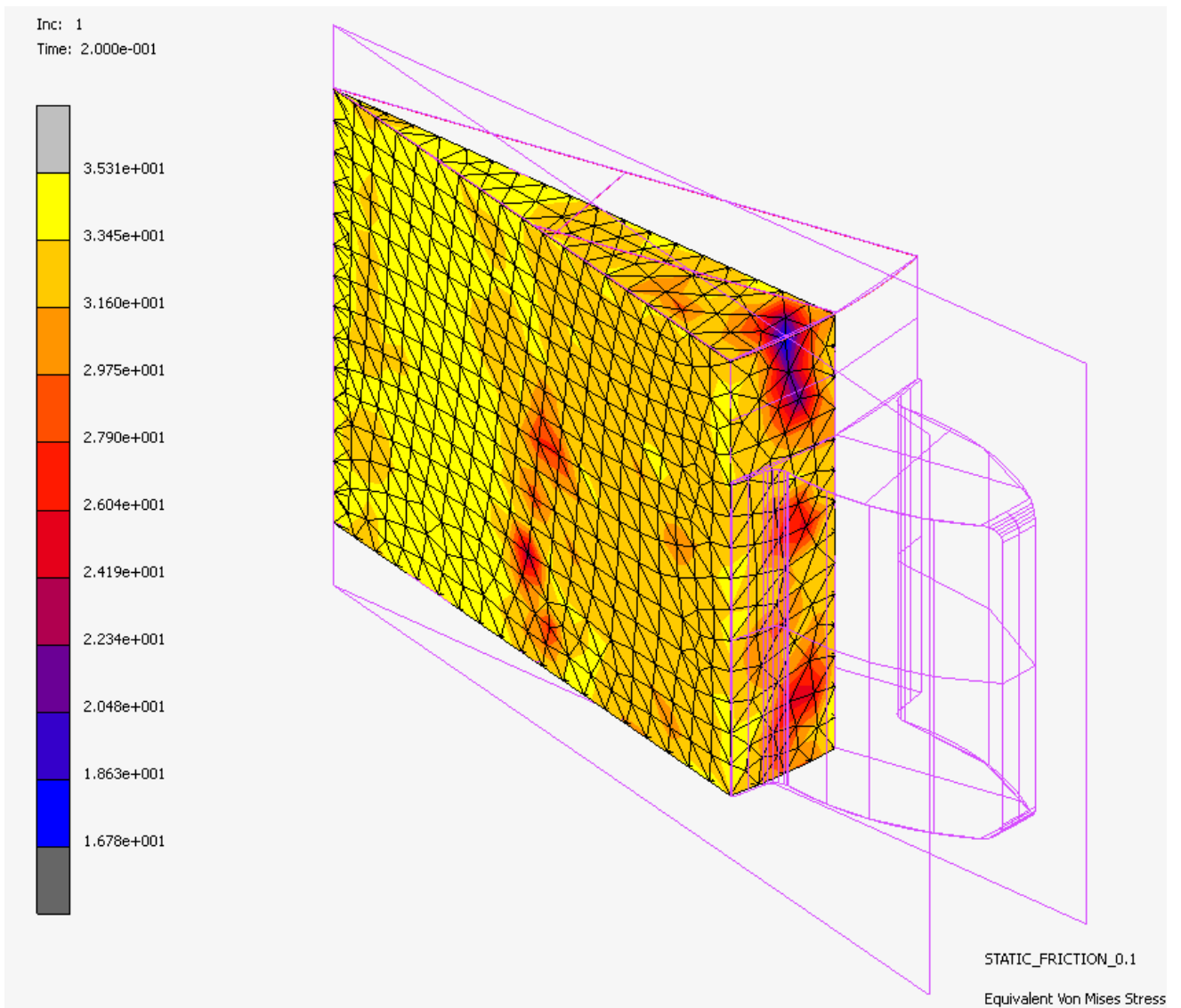


**Σχήμα 5.61:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 233 (8733 στοιχεία)

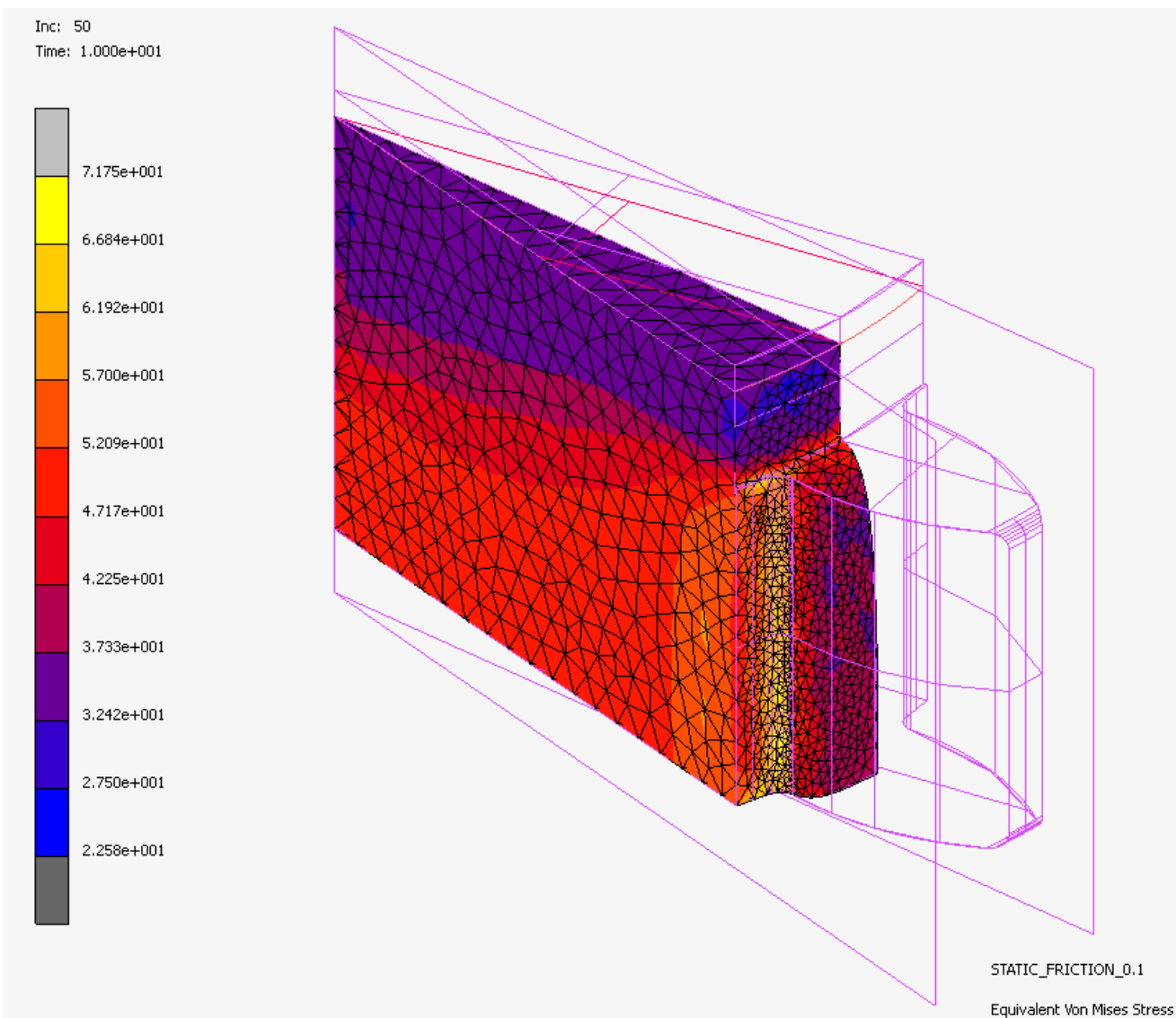
**ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΜΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΕΜΒΟΛΟ**



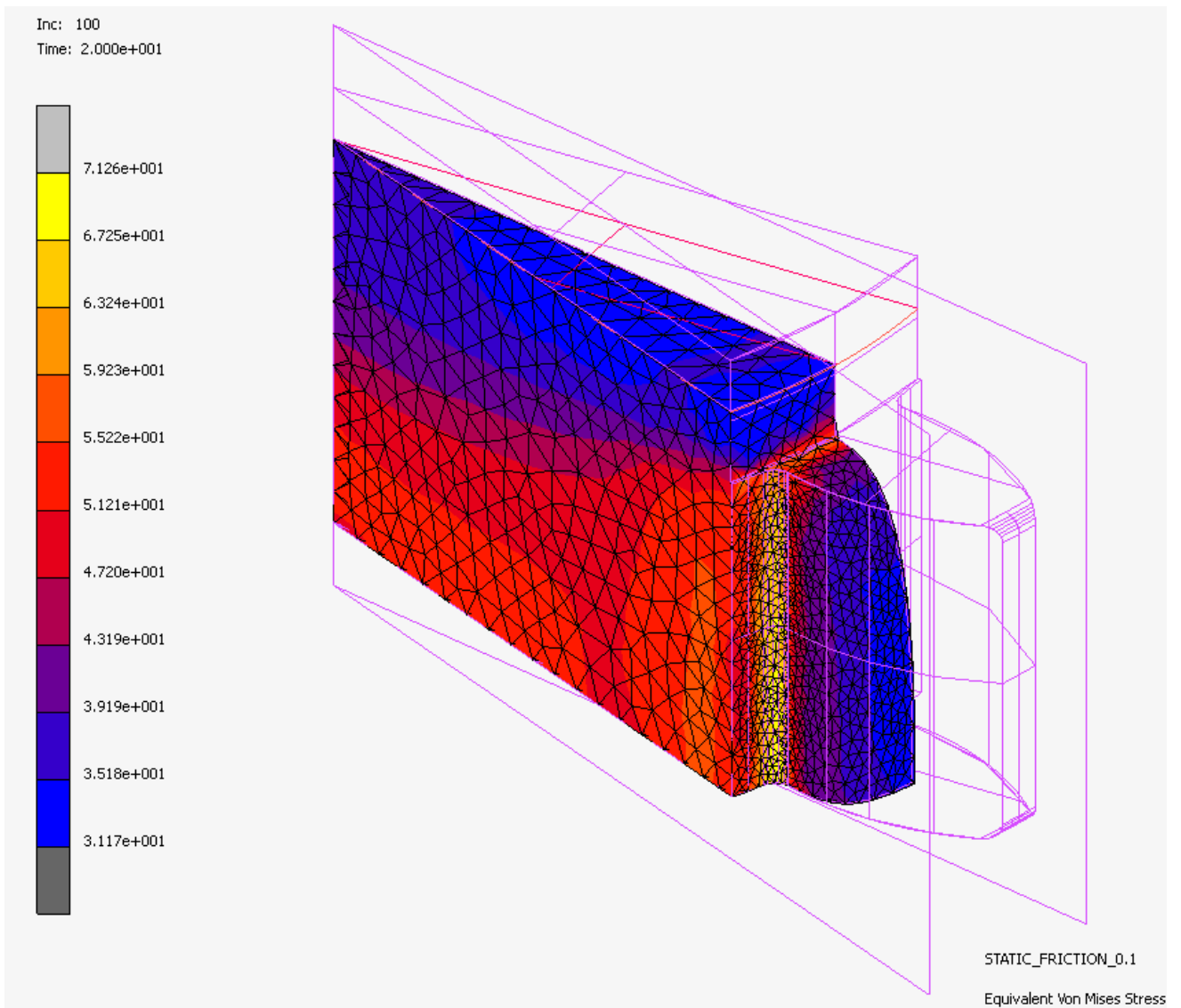
**Σχήμα 5.62:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 0 (1064 στοιχεία)



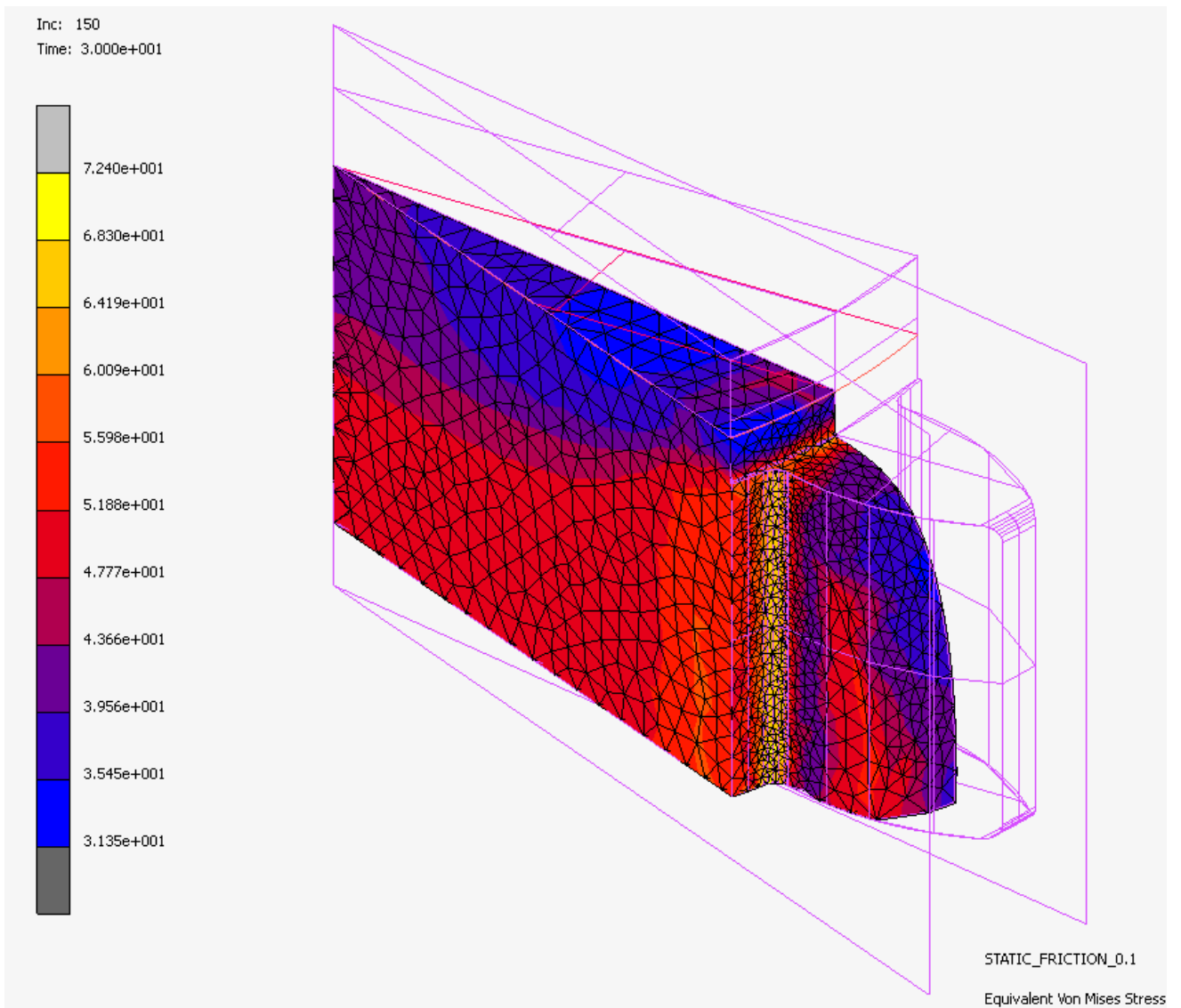
**Σχήμα 5.63:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 1 (4590 στοιχεία)



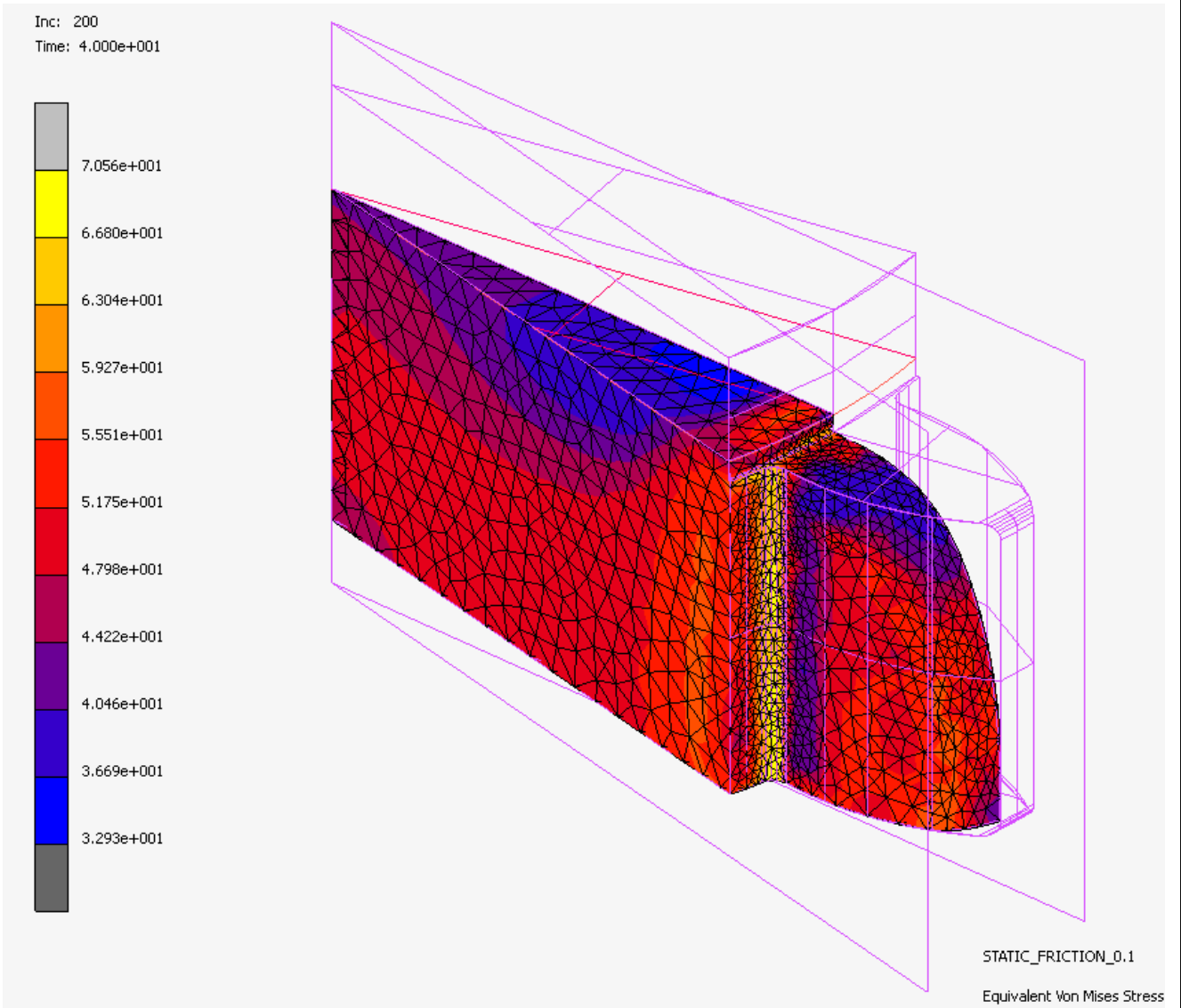
**Σχήμα 5.64:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 50 (7733 στοιχεία)



**Σχήμα 5.65:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 100 (7821 στοιχεία)

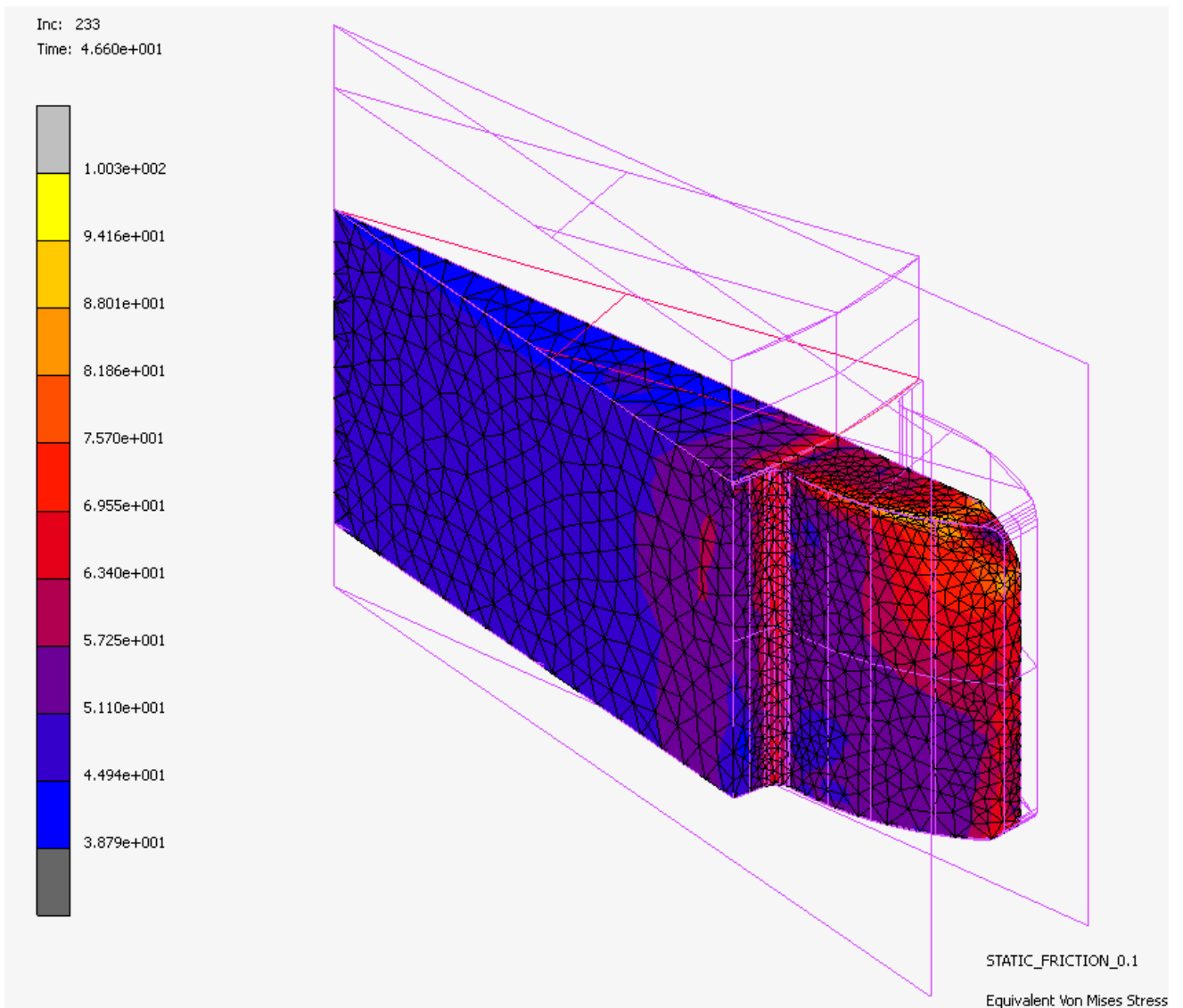


**Σχήμα 5.66:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 150 (8026 στοιχεία)



**Σχήμα 5.67:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 200 (8994 στοιχεία)





**Σχήμα 5.68:** Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για την επανάληψη 233 (10387 στοιχεία)

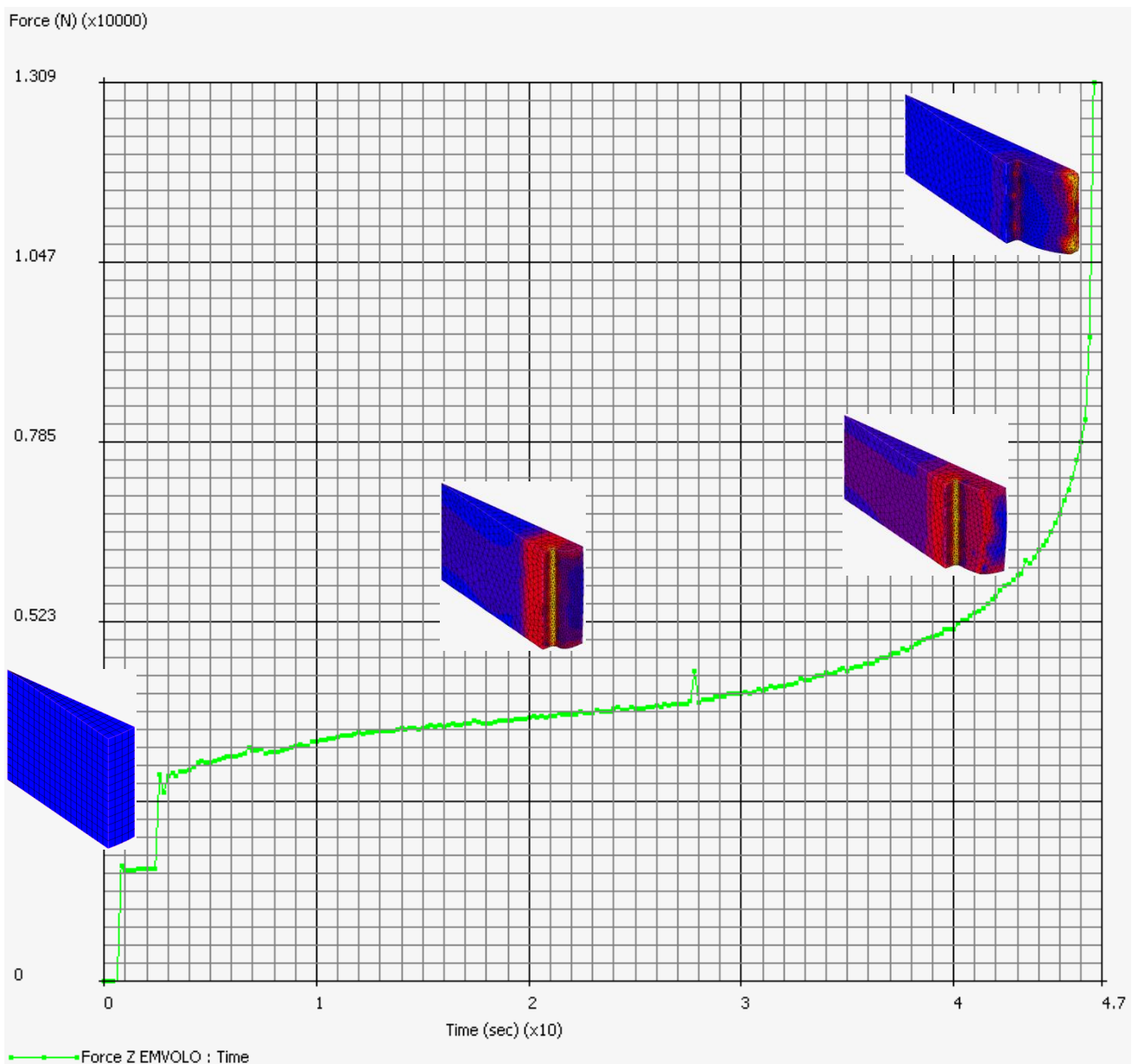
Από τα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι στη σφυρηλάτηση με το έμβολο μορφής οδοντωτού τροχού το άνω τμήμα του δοκιμίου διαμορφώνεται γρηγορότερα από το κάτω, λόγω της μορφής του εμβόλου, ενώ το αντίθετο γίνεται στη σφυρηλάτηση με κυλινδρικό έμβολο. Επίσης, οι τάσεις που παρουσιάζονται στα ίδια βήματα είναι μικρότερες στη σφυρηλάτηση με το έμβολο μορφής γριναζιού. Παραπάνω συμπεράσματα θα παραθέσουμε στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα συγκεντρώσουμε τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την εντολή:

**Results → History Plot**

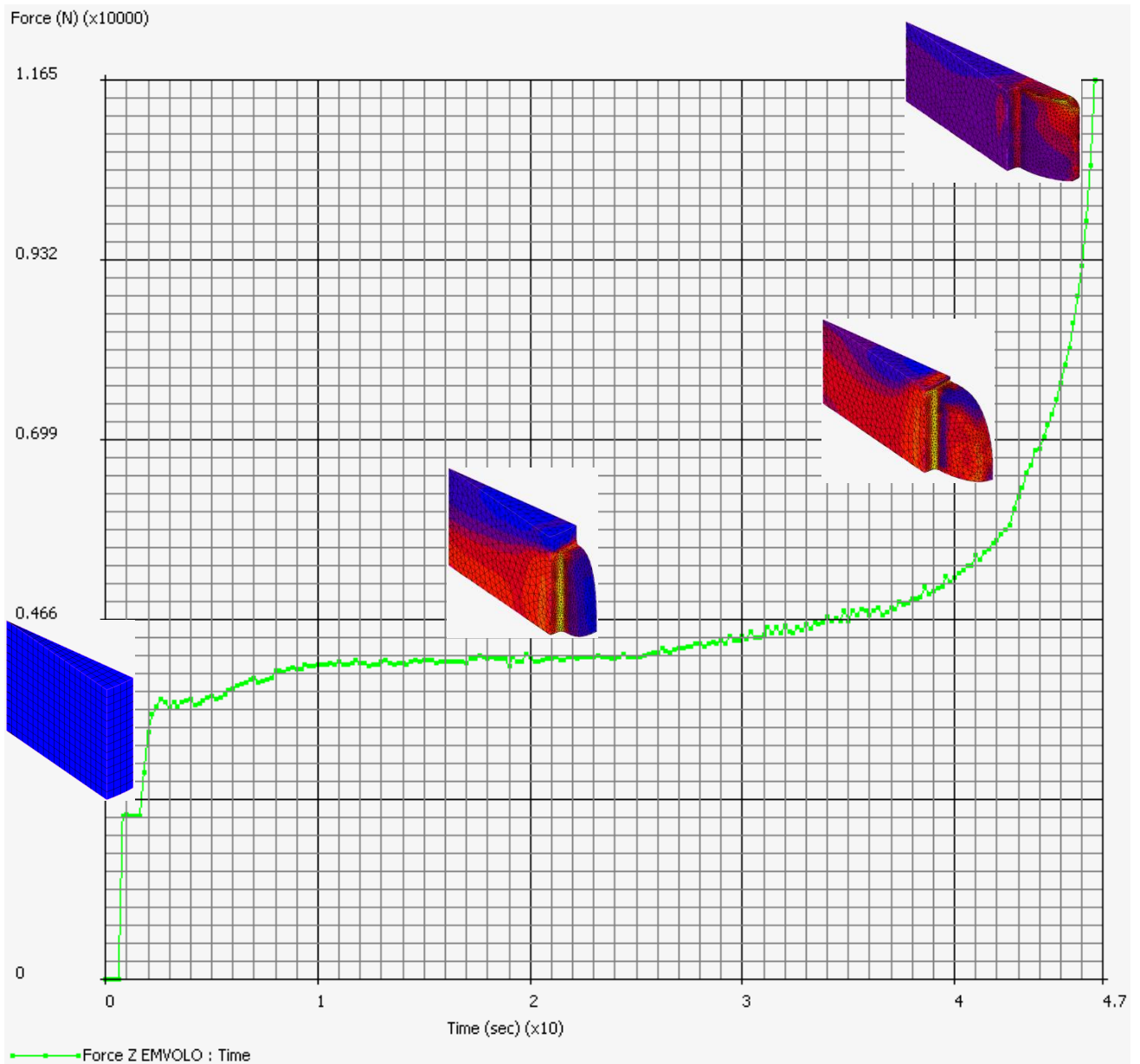
μπορούμε να υπολογίσουμε τη δύναμη που δέχεται το έμβολο κατά τον άξονα Z από τη παραμόρφωση του κυλινδρικού δοκιμίου.

**ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΜΕ ΕΜΒΟΛΟ ΜΟΡΦΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ**



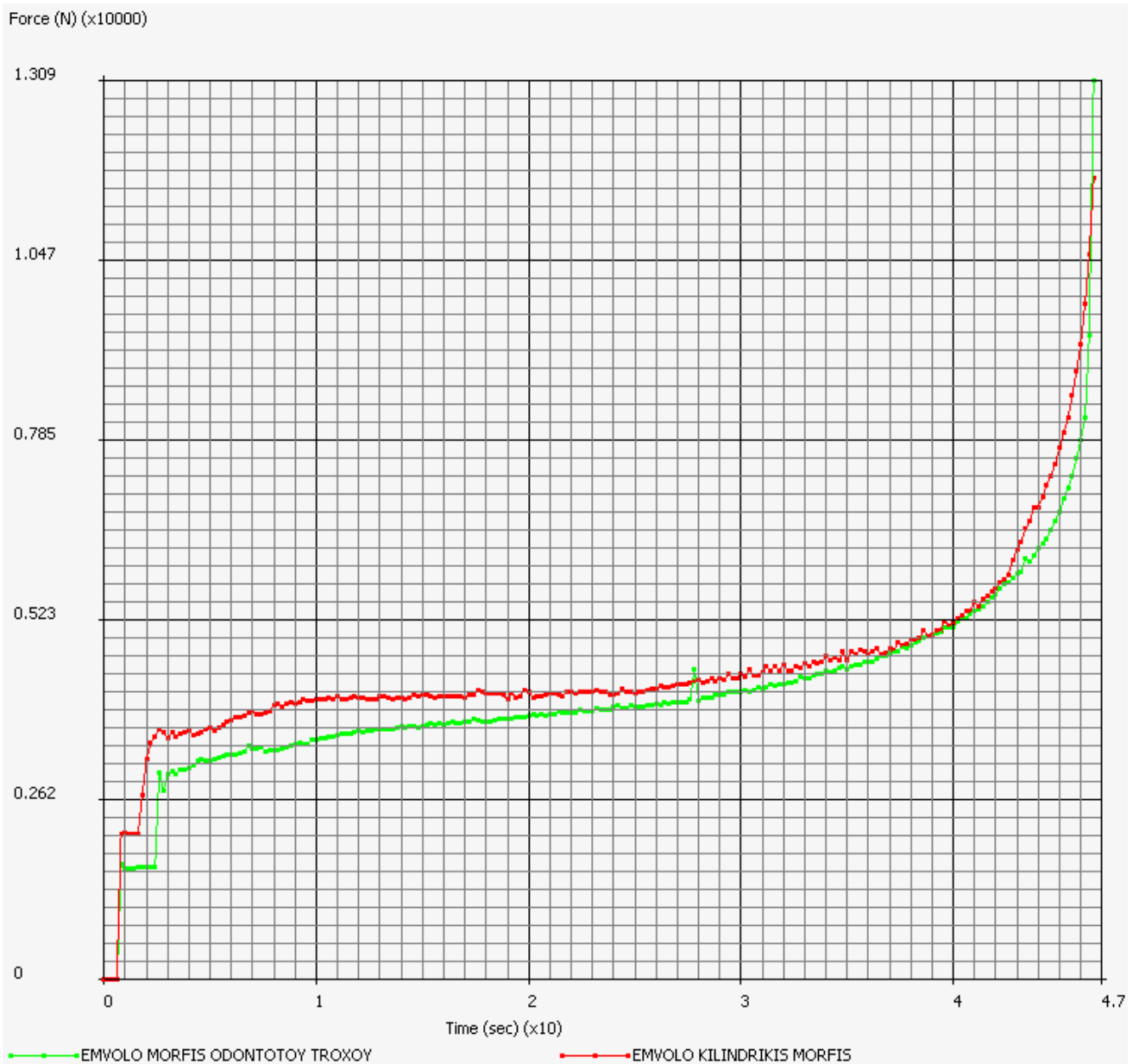
**Σχήμα 5.69:** Δύναμη εμβόλου κατά τον άξονα Z

**ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΜΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΕΜΒΟΛΟ**



**Σχήμα 5.70:** Δύναμη εμβόλου κατά τον άξονα Z

Τέλος, αμέσως παρακάτω παραθέτουμε τη σύγκριση των δυνάμεων που δέχεται το έμβολο για τις δύο διαφορετικές σφυρηλατήσεις.



**Σχήμα 5.71:** Σύγκριση δυνάμεων εμβόλου κατά τον άξονα Z

Παρατηρούμε ότι στη σφυρηλάτηση όπου το έμβολο έχει κυλινδρική μορφή οι δυνάμεις είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από την αντίστοιχη σφυρηλάτηση με το έμβολο μορφής γκραναζιού. Επίσης, πρέπει να αναφέρουμε ότι τα αποτελέσματα για τη δύναμη του εμβόλου αφορούν το 1/30 του συνολικού, λόγω συμμετρίας. Περισσότερα και πλήρη συμπεράσματα θα εξάγουμε στην επόμενη παράγραφο όπου και θα συγκεντρώσουμε όλα τα αποτελέσματα και θα μετατρέψουμε για ολόκληρο τον οδοντωτό τροχό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων (8) που πραγματοποιήθηκαν και αφορούν τα στοιχεία κατά την επίλυση (χρόνος, κύκλοι, remeshings, μέγιστος αριθμός στοιχείων), καθώς και τη δύναμη του εμβόλου καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο.

#### 6.1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Τα βασικά στοιχεία κατά την επίλυση των μοντέλων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

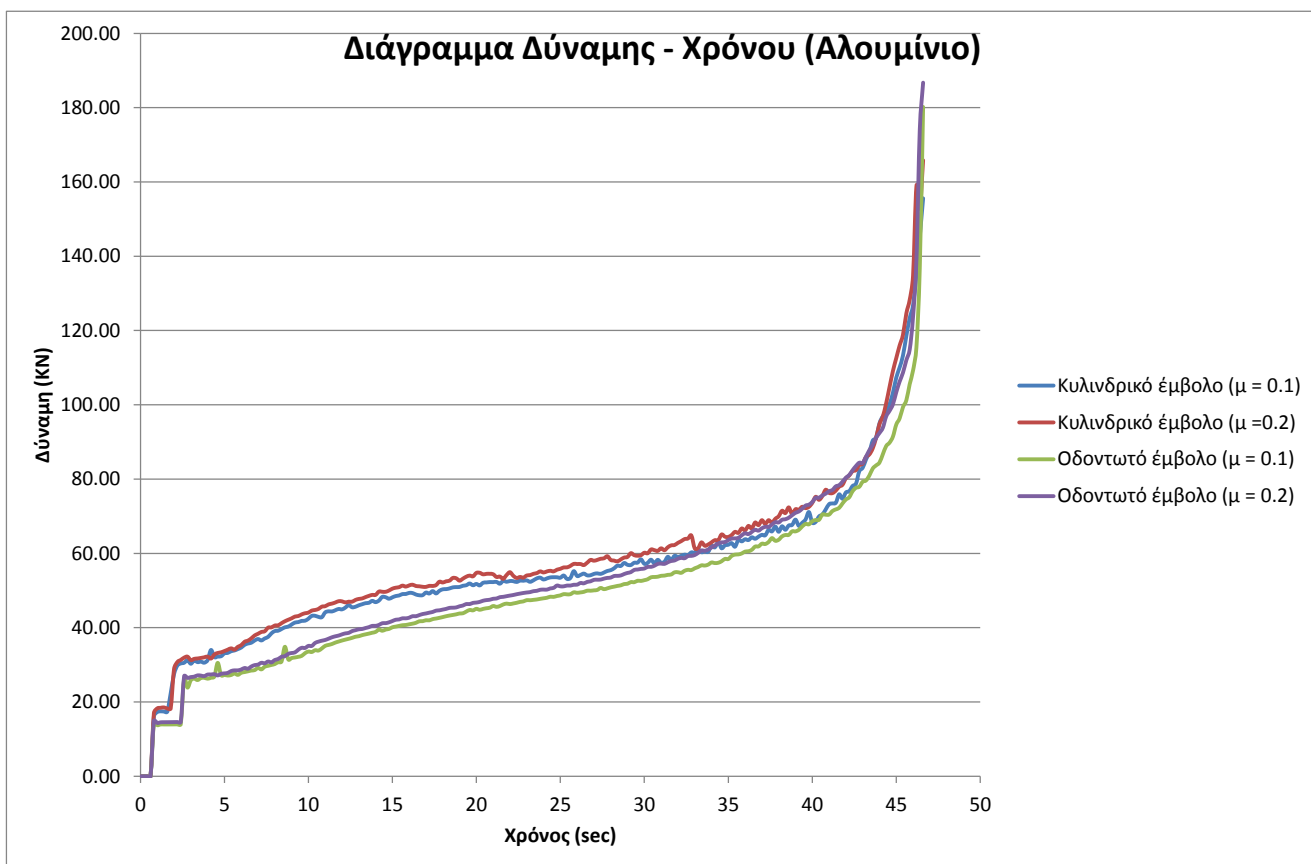
A/A	ΥΛΙΚΟ	ΜΟΡΦΗ ΕΜΒΟΛΟΥ	ΣΥΝΤ. ΤΡΙΒΗΣ μ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (SEC)	ΚΥΚΛΟΙ	REMESHES	ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ)
1	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ	0.1	2285	1382	100	13835 (222)
2			0.2	2033	1295	94	12670 (229)
3		ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΤΡΟΧΟΣ	0.1	1632	1021	78	9207 (233)
4			0.2	1489	951	74	10535 (132)
5	ΧΑΛΚΟΣ	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ	0.1	2093	1353	97	13422 (221)
6			0.2	2134	1340	100	12787 (226)
7		ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΤΡΟΧΟΣ	0.1	1556	1077	71	10636 (84)
8			0.2	1528	1007	75	11353 (75)

**Πίνακας 6.1:** Βασικά στοιχεία κατά την επίλυση των προσομοιώσεων

**6.1.2 ΔΥΝΑΜΗ ΕΜΒΟΛΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΥΛΙΚΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ**

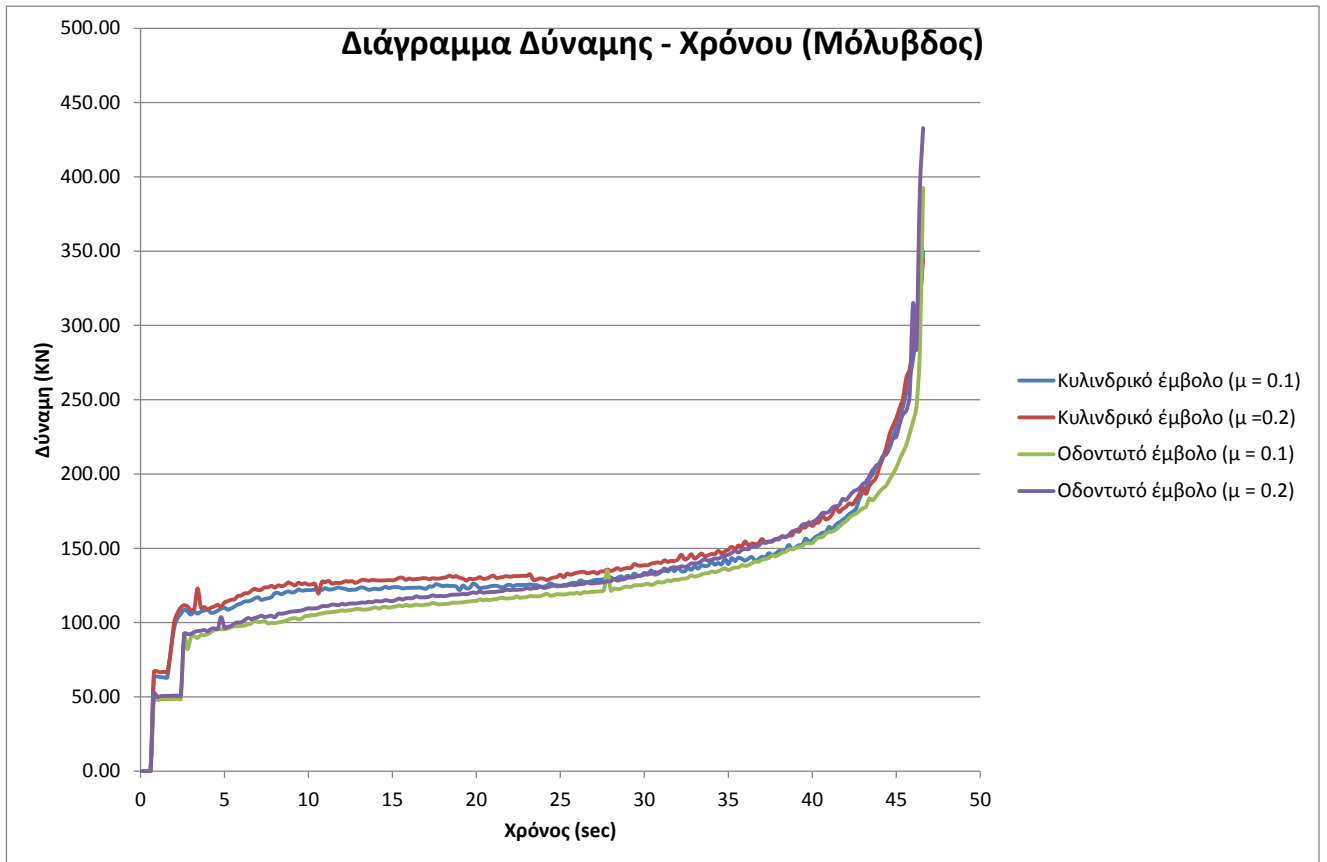
Αμέσως παρακάτω συγκεντρώνονται όλες οι προσομοιώσεις που έγιναν για κάθε υλικό ξεχωριστά και παρουσιάζονται οι δυνάμεις που δέχεται το έμβολο από ολόκληρο το δοκίμιο.

**ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ**



**Σχήμα 6.1:** Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει του χρόνου για όλες τις προσομοιώσεις του αλουμινίου

**ΧΑΛΚΟΣ**



**Σχήμα 6.2:** Διάγραμμα της δύναμης του εμβόλου συναρτήσει του χρόνου για όλες τις προσομοιώσεις του χαλκού

## 6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων και την συγκέντρωση των αποτελεσμάτων:

### 6.2.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

---

Βασιζόμενοι στον πίνακα 6.1 παρατηρούμε ότι για την ολοκλήρωση της σφυρηλάτησης με κυλινδρικό έμβολο απαιτείται περισσότερος χρόνος καθώς και μεγαλύτερος αριθμός αναγεννήσεων πλέγματος (remeshings) από την αντίστοιχη διαδικασία με οδοντωτό έμβολο. Ενδεικτικά, για το δοκίμιο του αλουμινίου με συντελεστή τριβής  $\mu_2 = 0.2$ , ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου ήταν 2033 sec = 33.88 min για το κυλινδρικό έμβολο, ενώ 1489 sec = 24.82 min. Μια διαφορά της τάξης των 9 min ή ποσοστιαία, χρειάστηκε 36.5 % περισσότερος χρόνος. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι ήταν απαραίτητη η δημιουργία περισσότερων πεπερασμένων στοιχείων καθώς και περισσότερες αναγεννήσεις πλέγματος (94 remeshes για το κυλινδρικό έναντι 74 remeshes για το οδοντωτό έμβολο – 27 % περισσότερα remeshes). Ανάλογα ποσοστά, με μικρές διακυμάνσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ζευγάρια προσομοιώσεων. Είναι ξεκάθαρο ότι η επίλυση της σφυρηλάτησης είναι ευκολότερη για το πρόγραμμα όταν το έμβολο είναι οδοντωτής μορφής. Επίσης, παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγαλύτερη ομοιομορφία στην παραμόρφωση του δοκιμίου όταν το έμβολο είναι οδοντωτής μορφής, όπου παρατηρείται μεγαλύτερη παραμόρφωση στο μέσο του δοκιμίου, ανάλογα και με τον συντελεστή τριβής και ακολουθούν με μικρότερη παραμόρφωση το άνω και το κάτω τμήμα. Από την άλλη, όταν το έμβολο είναι κυλινδρικής μορφής, η μεγαλύτερη παραμόρφωση παρατηρείται στο κάτω τμήμα του δοκιμίου, με το άνω τμήμα να έχει πολύ μικρή παραμόρφωση. Αυτό έχει ως συνέπεια να καλυφθεί πρώτα όλο το κάτω τμήμα της μήτρας και μετά να γεμίζει και το υπόλοιπο, έχοντας μεγάλη ανομοιογένεια στη ροή και απαιτώντας μεγαλύτερη δύναμη και ισχύ για την ολοκλήρωση της κατεργασίας.

### 6.2.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

---

Βασιζόμενοι στα σχήματα 6.1 και 6.2 παρατηρούμε ότι η δύναμη που χρειάζεται να ασκήσει ή πρέσα είναι μεγαλύτερη στη σφυρηλάτηση με κυλινδρικό έμβολο από την αντίστοιχη με οδοντωτό έμβολο. Στον πίνακα της επόμενης σελίδας παρατίθενται οι δυνάμεις του εμβόλου για όλα τα ζευγάρια προσομοιώσεων στο τελικό βήμα της προσομοίωσης, όπου το δοκίμιο παίρνει την τελική του μορφή. Παρατηρούμε ότι η παραπάνω δύναμη που

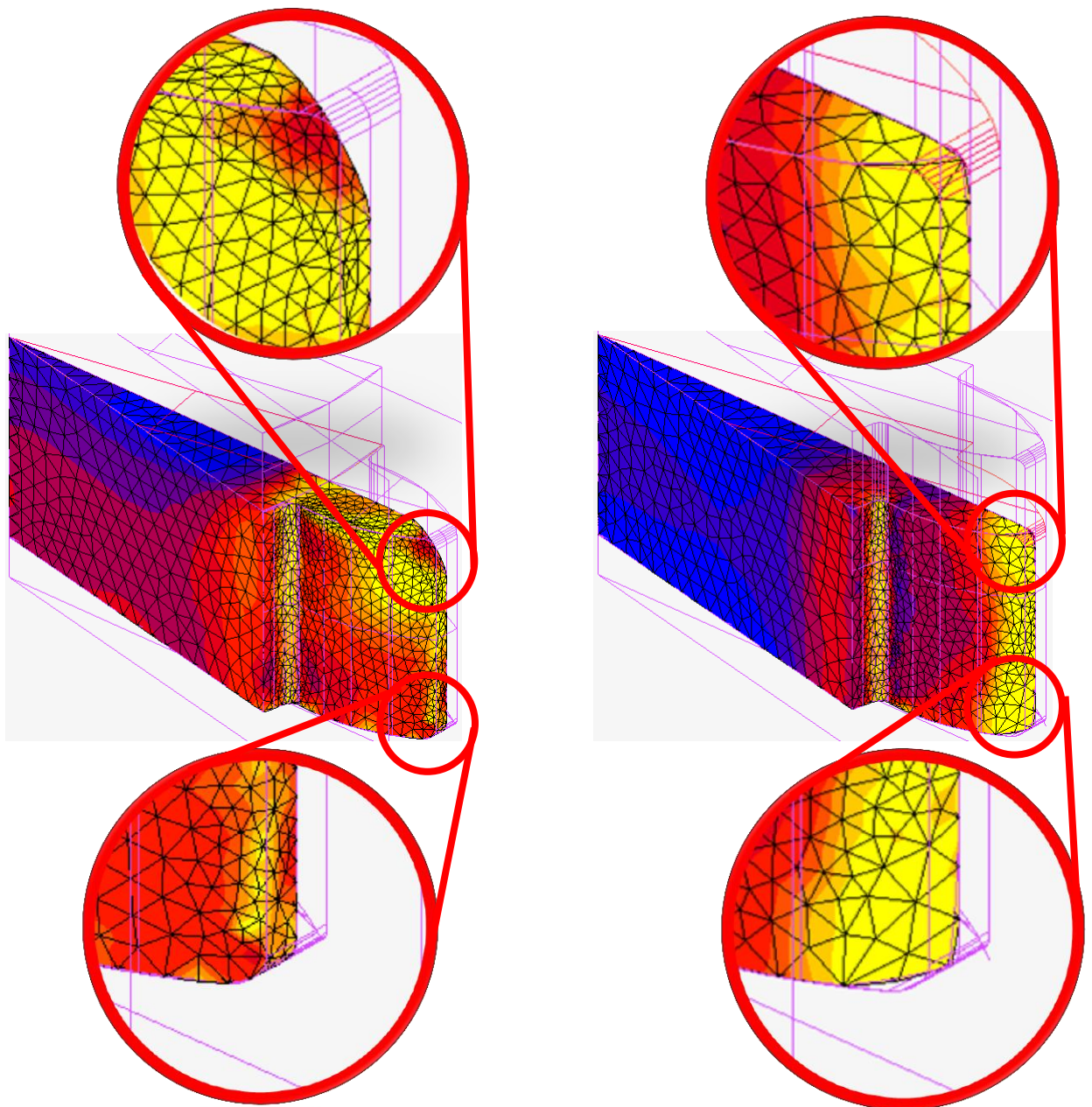


απαιτείται κυμαίνεται από 12.29 % έως και 25.53 %. Παρόμοια αποτελέσματα παίρνουμε και για τις ισοδύναμες τάσεις όπου οι τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες στη σφυρηλάτηση με κυλινδρικό έμβολο.

A/A	ΥΛΙΚΟ	ΜΟΡΦΗ ΕΜΒΟΛΟΥ	ΣΥΝΤ.ΤΡΙΒΗΣ μ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΕΜΒΟΛΟΥ FMAX (KN)	ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ
1	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ	0.1	155.60	15.81 %
2		ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΤΡΟΧΟΣ	0.1	180.20	
1	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ	0.2	165.84	12.60 %
2		ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΤΡΟΧΟΣ	0.2	186.74	
1	ΧΑΛΚΟΣ	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ	0.1	349.60	12.29 %
2		ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΤΡΟΧΟΣ	0.1	392.57	
1	ΧΑΛΚΟΣ	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ	0.2	344.82	25.53 %
2		ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΤΡΟΧΟΣ	0.2	432.86	

**Πίνακας 6.2:** Βασικά στοιχεία κατά την επίλυση των προσομοιώσεων

Τέλος, λόγω της μεγάλης παραμόρφωσης που δέχονται τα δοκίμια από τη σφυρηλάτηση παρατηρείται μείωση στον όγκο του δοκιμίου (συρρίκνωση) μικρής τάξης η οποία είναι μεγαλύτερη στις σφυρηλατήσεις με κυλινδρικό έμβολο λόγω μεγαλύτερων παραμορφώσεων και βαθύτερη είσοδο στην πλαστική ζώνη. Ενδεικτικά, για το αλουμίνιο με συντελεστή τριβής  $\mu_1 = 0.1$  από τον αρχικό όγκο του δοκιμίου  $504.245 \text{ mm}^3$  καταλήγουμε στα  $502.742 \text{ mm}^3$  για τη σφυρηλάτηση με κυλινδρικό έμβολο (μείωση 0.299 %) και  $503.404 \text{ mm}^3$  για τη σφυρηλάτηση με οδοντωτό έμβολο (μείωση 0.167 %). Παρατηρούμε πόσο μικρό είναι το ποσοστό συρρίκνωσης, αλλά παρόλα αυτά έπρεπε να ληφθεί υπόψη στον αρχικό όγκο των δοκιμίων. Η παραπάνω μείωση, σε συνδυασμό με τον τρόπο παραμόρφωσης των δοκιμίων στις διαφορετικές μήτρες, παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα στο άνω και κάτω τμήμα του τελικού τροχού για το αλουμίνιο με  $\mu_1 = 0.1$ :



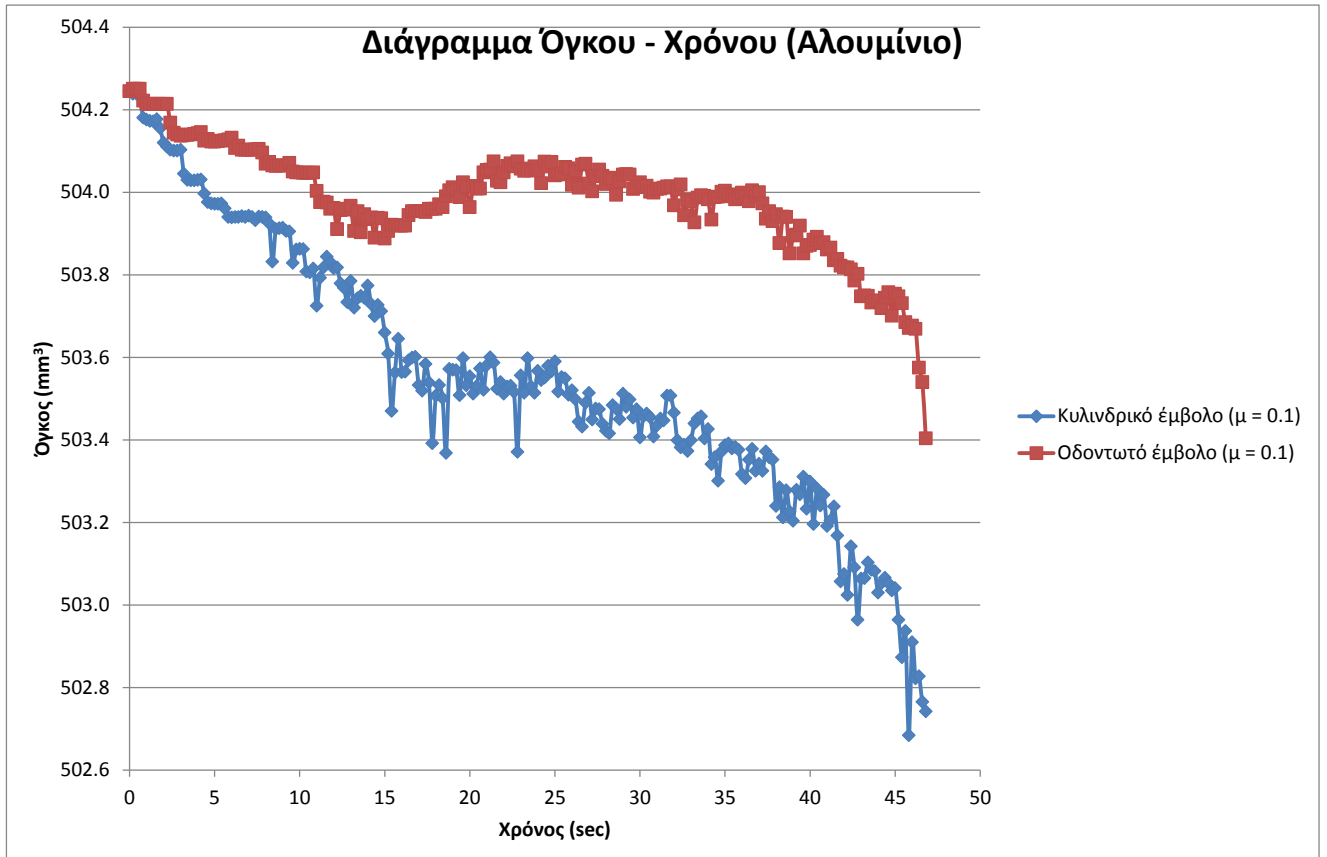
*Μήτρα με κυλινδρικό έμβολο*

*Μήτρα με οδοντωτό έμβολο*

**Σχήμα 6.3:** Απεικόνιση της τελικής μορφής των οδοντωτών τροχών με έμφαση στα άνω και κάτω τμήματα για αλουμίνιο με  $\mu_1 = 0.1$

Όπως έχουμε πει και παραπάνω, η μήτρα με οδοντωτό έμβολο έχει πιο ομοιόμορφη παραμόρφωση, ενώ στην αντίστοιχη με κυλινδρικό έμβολο παρατηρούμε ότι ενώ το κάτω τμήμα έχει καλυφθεί, το άνω παραμένει ημιτελές.

Τέλος, αμέσως παρακάτω (Σχήμα 6.3) παρουσιάζεται η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου για το αλουμίνιο με συντελεστή τριβής  $\mu_1 = 0.1$ , όπου καταγράφεται η πορεία μείωσης του όγκου μέχρι την τελική τιμή του. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται και στα υπόλοιπα ζευγάρια προσομοιώσεων.



**Σχήμα 6.4:** Διάγραμμα μεταβολής του όγκου του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου για το αλουμίνιο με  $\mu_1 = 0.1$

### 6.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

---

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε μια προσπάθεια προσομοίωσης της ψυχρής σφυρηλάτησης στην κατασκευή οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης. Λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{\theta} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  και η ταχύτητα του εμβόλου είναι πολύ μικρή (5 mm/min) δεν ελήφθησαν υπόψη φαινόμενα θερμοκρασιακής μεταβολής λόγω συστολής – διαστολής.

Τα περισσότερα στοιχεία των προσομοιώσεων, όπως οι συντελεστές τριβής, η ταχύτητα του εμβόλου και τα υλικά των δοκιμών ελήφθησαν από επιστημονικά άρθρα, στα οποία είχαν πραγματοποιηθεί παρόμοιες μελέτες.

Η πιο διαδεδομένη μορφή σφυρηλάτησης από τις δύο που προσομοιώθηκαν είναι αυτή με το έμβολο οδοντωτής μορφής, μιας και πραγματοποιείται πιο ομοιόμορφη παραμόρφωση του δοκιμίου, μικρότερες δυνάμεις του εμβόλου στο ίδιο ύψος της κατεργασίας και πληρέστερη μορφή του τελικού τεμαχίου, άρα και μικρότερη ισχύ από την πρέσα.

Στόχος της εργασίας δεν ήταν ο ακριβής σχεδιασμός των μητρών σφυρηλάτησης, μιας και δεν πραγματοποιήθηκε πείραμα κατασκευής των οδοντωτών τροχών. Για αυτό τον λόγο δεν έγινε μελέτη αντοχής της μήτρας στις δυνάμεις που δέχεται από το δοκίμιο κατά την κατεργασία. Πριν την κατασκευή της μήτρας μια τέτοια μελέτη είναι απαραίτητη για την πλήρη και σωστή διαστασιολόγηση της μήτρας, έλεγχο των κοχλιών συγκράτησης και επιλογή των κατάλληλων υλικών.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

## ΠΑ.1 ΧΑΛΥΒΑΣ AISI, H-13 (ΥΛΙΚΟ ΜΗΤΡΑΣ &amp; ΕΜΒΟΛΟΥ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ)

**Cincinnati Tool Steel Company**

Phone #: (815) 226-8800 (800) 435-0717 Fax #: (815) 226-4388

**AISI H13**

## Hot Work Steel

H13 combines good red hardness and abrasion resistance with the ability to resist heat checking. It is an AISI H13 hot work tool steel, the most widely used steel for aluminum and zinc die casting dies. It is also popular for extrusion press tooling because of its ability to withstand drastic cooling from high operating temperatures.

H13 is produced from vacuum degassed tool steel ingots. This manufacturing practice plus carefully controlled hot working provides optimum uniformity, consistent response to heat treatment, and long service life.

H13 is an outstanding die steel for die casting aluminum and manganese. It is used for zinc in long production runs, and also employed successfully for slides and cores in tool assemblies.

H13 in the hardness ranges from 45/52 RC is an excellent steel for plastic molds. It takes a high polish, making it suitable for lens and dinner ware molds.

Consider using this grade of hot work tool steel for applications where drastic cooling is required during the operation, and where high red hardness and resistance to heat checking are important. This grade has found wide acceptance for die casting dies for zinc, white metal, aluminum and magnesium. It is also widely used for extrusion dies, trimmer dies, gripper dies, hot shear blades, casings, and other similar hot work applications.

**Machinability** - In the thoroughly annealed condition, H13 may be machined without difficulty. It has a rating of 75 as compared with a 1 % carbon tool steel, which has a rating of 100.

**Dimensional Stability** - When air quenched from the proper hardening temperature, H13 generally expands 0.001 in./in. of cross section.

**Typical Analysis**

Carbon 0.400	Chromium 5.250
Silicon 1.000	Molybdenum 1.250
Vanadium 1.050	Manganese 0.400

**Annealing**

H13 may be annealed by heating to 1600°F. Soak one hour per inch of greatest thickness, and furnace cool at 30 degrees per hour to 900°F. Then air cool. Proper annealing procedure includes packing in a sealed container, using a neutral inert material. Result, maximum Brinell hardness of 207.

## Hardening

In a controlled atmosphere, preheat thoroughly at 1300 to 1400°F. Then heat to 1850°F and hold for an hour per inch of greatest cross section. Quench in still air and temper immediately. When maximum hardness is the primary requirement, H13 may be oil quenched, but keep in mind that when oil quenched, this grade is vulnerable to cracking and has the same distortional characteristics as an oil hardening tool steel.

Specimens 1 in. round by 3 in. long were pre-heated at 1350°F. They were then transferred to a high-heat furnace and air-quenched from various temperatures ranging from 1750 to 2000°F.

The hardness and fracture grain size of these specimens were as follows:

Quenching	Fracture	
Temperature - °F	rating	Rockwell C
1750	8-1/2	46
1800	8-3/4	52
1850	9	54
1900	9	54
1950	9	55
2000	8-1/2	56

## Tempering

For hot work applications, H13 is used in the hardness range of HRC 38 to 48. The usual hardness range for die casting dies is HRC 44 to 48 requiring a temper at approximately 1100°F. For improved shock resistance, the steel is often tempered at temperatures approaching 1150°F, resulting in hardnesses of HRC 40 to 44. The steel should be held at the tempering temperature for at least two hours per inch of greatest cross section. All hot work steel should be tempered at a minimum of 50 degrees above the expected maximum operating temperature of the tool or die. Double tempering, with the second temper of 25 to 50 degrees lower than the first temper is always advisable, particularly where heat checking is a problem.

Hardness tests were made on 1-in. round specimens of H13 which were air quenched from 1850°F and tempered for two hours at various temperatures. The results below may be used as a tempering guide, keeping in mind that tools of heavy section or mass may be several points lower in hardness.

Tempering	
Temperature - °F	Rockwell C
400	54
500	53
600	53
700	53
800	53
900	54
1000	52
1100	46
1200	38

Data shown are typical, and should not be construed as maximum or minimum values for specification or for final design. Data on any particular piece of material may vary from those herein.

## ΠΑ.2 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ)

## Aluminum, Al


Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [Pure Element](#)

**Material Notes:** Aluminum is a silver-colored, low density (2.7 g/cc) metal that finds use in a huge variety of commercial applications. Unalloyed aluminum is ductile, exhibits moderate strength, and is very resistant to corrosion under most circumstances. Aluminum can be dramatically strengthened by the addition of appropriate alloying elements (Cu, Mg, Mn, Si, etc.) and subsequent heat/work treatments. Aluminum is commonly used in both wrought and cast forms.


The low density of aluminum results in its extensive use in the aerospace industry, and in other transportation fields. Its resistance to corrosion leads to its use in food and chemical handling (cookware, pressure vessels, etc.) and to architectural uses.

Over 1400 Aluminum alloy entries are listed in MatWeb, each with specific property data. Aluminum 1199 is the highest purity (99.99% Al min.) commercially available in structural form.

**Vendors:** [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

 New suppliers have been added for this product during the past 60 days.

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.6989 g/cc	0.097504 lb/in <sup>3</sup>	
Chemical Properties	Metric	English	Comments
Atomic Number	13	13	
Thermal Neutron Cross Section	0.215 barns/atom	0.215 barns/atom	
X-ray Absorption Edge	7.9511 Å	7.9511 Å	K
	142.48 Å	142.48 Å	L <sub>I</sub>
	172.16 Å	172.16 Å	L <sub>II</sub>
	172.16 Å	172.16 Å	L <sub>III</sub>
Electrode Potential	-1.69 V	-1.69 V	
Electronegativity	1.61	1.61	Pauling
Ionic Radius	0.510 Å	0.510 Å	Crystal Ionic Radius for Valence +3
Electrochemical Equivalent	0.3354 g/A/h	0.3354 g/A/h	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Vickers	15.0	15.0	Annealed
Modulus of Elasticity	68.0 GPa	9860 ksi	
Poissons Ratio	0.360	0.360	calculated
Shear Modulus	25.0 GPa	3630 ksi	
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00000270 ohm-cm	0.00000270 ohm-cm	
Magnetic Susceptibility	6.00e-7	6.00e-7	cgs/g
Critical Magnetic Field Strength, Oersted	101.9 - 107.9	101.9 - 107.9	
Critical Superconducting Temperature	1.73 - 1.77 K	1.73 - 1.77 K	
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Heat of Fusion	386.9 J/g	166.4 BTU/lb	
Heat of Vaporization	9462 J/g	4071 BTU/lb	
CTE, linear 	24.0 µm/m-°C	13.3 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 100 °C	@Temperature 68.0 - 212 °F	
	25.5 µm/m-°C	14.2 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 300 °C	@Temperature 68.0 - 572 °F	
	27.4 µm/m-°C	15.2 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 500 °C	@Temperature 68.0 - 932 °F	
Specific Heat Capacity	0.900 J/g-°C	0.215 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	210 W/m-K	1460 BTU-in/hr-R <sup>2</sup> -°F	
Melting Point	660.37 °C	1220.7 °F	
Optical Properties	Metric	English	Comments
Emissivity (0-1)	0.0500	0.0500	polished 50-500°C
	0.200 - 0.300	0.200 - 0.300	strongly oxidized
Reflection Coefficient, Visible (0-1)	0.900	0.900	tungsten light
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	100 %	100 %	

## Descriptive Properties

## ΠΑ.3 ΧΑΛΚΟΣ (ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ)


## Copper, Cu; Annealed

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Copper Alloy](#); [Pure Element](#)



**Material Notes:** Annealed applies only to tensile and/or hardness values; other property values are typical of the element. This entry is for pure Cu, MatWeb also has entries for many alloys.

In general, copper alloys exhibit good to excellent corrosion resistance and high thermal conductivity and very high electrical conductivity. Pure copper's electrical conductivity is so high that many metals are measured against it in the form of the IACS (International Annealed Copper Standard). Applications include architectural uses, coinage, condenser/heat exchangers, plumbing, radiator cores, musical instruments, locks, fasteners, hinges, ammunition components, and electrical connectors. Small amounts of alloying elements are often added to copper to improve certain characteristics. Alloying can increase or reduce the strength, hardness, electrical and thermal conductivity, corrosion resistance, or change the color. Common primary alloying elements include tin (resulting in bronze) or zinc (resulting in brass).


**Vendors:** [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

 New suppliers have been added for this product during the past 60 days.

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density 	7.764 g/cc @Temperature 1300 °C	0.2805 lb/in <sup>3</sup> @Temperature 2370 °F	
	7.848 g/cc @Temperature 1200 °C	0.2835 lb/in <sup>3</sup> @Temperature 2190 °F	
	7.924 g/cc @Temperature 1100 °C	0.2863 lb/in <sup>3</sup> @Temperature 2010 °F	
	7.94 g/cc @Temperature 1083.6 °C	0.287 lb/in <sup>3</sup> @Temperature 1982.5 °F	
	8.93 g/cc @Temperature 20.0 °C	0.323 lb/in <sup>3</sup> @Temperature 68.0 °F	
Chemical Properties	Metric	English	Comments
Atomic Number	29	29	
Thermal Neutron Cross Section	3.80 barns/atom	3.80 barns/atom	
X-ray Absorption Edge	1.38 Å	1.38 Å	K
	11.289 Å	11.289 Å	L <sub>I</sub>
	12.994 Å	12.994 Å	L <sub>II</sub>
	13.2578 Å	13.2578 Å	L <sub>III</sub>
Electrode Potential	-0.520 V	-0.520 V	monovalent
	-0.340 V	-0.340 V	divalent
Electronegativity	1.90	1.90	Pauling
Ionic Radius	0.720 Å	0.720 Å	Crystal Ionic Radius for Valence +2
	0.980 Å	0.980 Å	Crystal Ionic Radius for Valence +1
Electrochemical Equivalent	1.185 g/A/h	1.185 g/A/h	divalent
	2.38 g/A/h	2.38 g/A/h	monovalent
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Vickers	50	50	
Tensile Strength, Ultimate	210 MPa	30500 psi	
Tensile Strength, Yield	33.3 MPa	4830 psi	
Elongation at Break	60.0 %	60.0 %	
Modulus of Elasticity	110 GPa	16000 ksi	
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	
Poissons Ratio	0.343	0.343	
Shear Modulus	46.0 GPa	6670 ksi	
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00000170 ohm-cm	0.00000170 ohm-cm	
Magnetic Susceptibility	-8.00e-8	-8.00e-8	ogs/g
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Heat of Fusion	204.8 J/g	88.10 BTU/lb	
Heat of Vaporization	5234 J/g	2252 BTU/lb	
CTE, linear 	16.4 μm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	9.11 μin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	
	18.5 μm/m-°C @Temperature 250 °C	10.3 μin/in-°F @Temperature 482 °F	
	20.2 μm/m-°C	11.2 μin/in-°F	



	@Temperature 500 °C	@Temperature 932 °F
	24.8 μm/m-°C	13.8 μin/in-°F
	@Temperature 925 °C	@Temperature 1700 °F
Specific Heat Capacity	0.385 J/g-°C	0.0920 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	385 W/m-K	2870 BTU-in/hr-R <sup>2</sup> -°F
	357 W/m-K	2480 BTU-in/hr-R <sup>2</sup> -°F
	@Temperature 727 °C	@Temperature 1340 °F
	398 W/m-K	2760 BTU-in/hr-R <sup>2</sup> -°F
	@Temperature 27.0 °C	@Temperature 80.6 °F
	401 W/m-K	2780 BTU-in/hr-R <sup>2</sup> -°F
	@Temperature 0.000 °C	@Temperature 32.0 °F
	483 W/m-K	3350 BTU-in/hr-R <sup>2</sup> -°F
	@Temperature -173 °C	@Temperature -279 °F
	10500 W/m-K	72900 BTU-in/hr-R <sup>2</sup> -°F
	@Temperature -253 °C	@Temperature -423 °F
	19600 W/m-K	138000 BTU-in/hr-R <sup>2</sup> -°F
	@Temperature -263 °C	@Temperature -441 °F
Melting Point	1083.2 - 1083.6 °C	1981.8 - 1982.5 °F

Optical Properties	Metric	English	Comments
Emissivity (0-1)	0.150	0.150	855 nm, 807°C, polished
Reflection Coefficient, Visible (0-1)	0.630	0.630	

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Copper, Cu	100 %	100 %	

#### Descriptive Properties

CAS Number	7440-50-8
------------	-----------

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

### ΠΒ.1 ΕΞΑΕΔΡΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ 7

#### Element 7

#### Three-dimensional Arbitrarily Distorted Brick

Element type 7 is an eight-node, isoparametric, arbitrary hexahedral. As this element uses trilinear interpolation functions, the strains tend to be constant throughout the element. This results in a poor representation of shear behavior. The shear (or bending) characteristics can be improved by using alternative interpolation functions. This assumed strain procedure is flagged through the **GEOMETRY** option.

In general, you need more of these lower-order elements than the higher-order elements such as types 21 or 57. Hence, use a fine mesh.

This element is preferred over higher-order elements when used in a contact analysis.

The stiffness of this element is formed using eight-point Gaussian integration.

For nearly incompressible behavior, including plasticity or creep, it is advantageous to use an alternative integration procedure. This constant dilatation method which eliminates potential element locking is flagged through the **GEOMETRY** option.

This element can be used for all constitutive relations. When using incompressible rubber materials (for example, Mooney and Ogden), the element must be used within the Updated Lagrange framework.

For rubber materials with total Lagrange procedure, element type 84 can be used. This is slightly more expensive because of the extra pressure degrees of freedom associated with element type 84.

**Notes:** For the assumed strain formulation, the interpolation functions are modified to improve the bending characteristics of the element.

As in all three-dimensional analyses, a large nodal bandwidth results in long computing times. Optimize the nodal bandwidth.

#### Quick Reference

##### Type 7

Three-dimensional, eight-node, first-order, isoparametric element (arbitrarily distorted brick).

##### Connectivity

Eight nodes per element. Node numbering must follow the scheme below (see [Figure 3-7](#)):

Nodes 1, 2, 3, and 4 are corners of one face, given in counterclockwise order when viewed from inside the element. Node 5 has the same edge as node 1. Node 6 has the same edge as node 2. Node 7 has the same edge as node 3. Node 8 has the same edge as node 4.

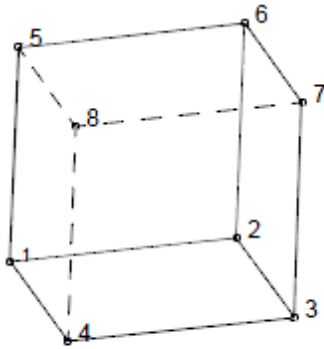


Figure 3-7 Arbitrarily Distorted Cube

**Geometry**

If the automatic brick to shell constraints are to be used, the first field must contain the transition thickness (see Figure 3-8). Note that in a coupled analysis, there are no constraints for the temperature degrees of freedom.

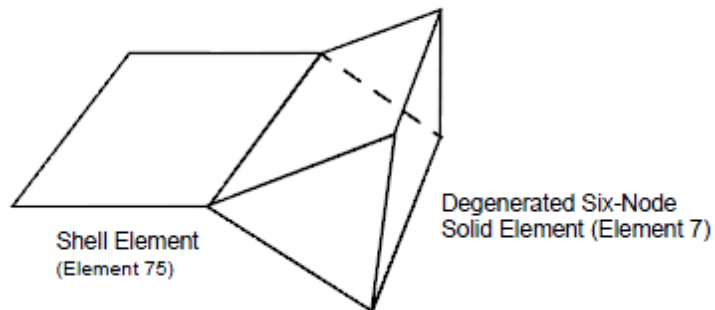


Figure 3-8 Shell-to-Solid Automatic Constraint

If a nonzero value is entered in the second data field (EGEOM2), the volumetric strain is constant throughout the element. This is particularly useful for analysis of approximately incompressible materials, and for analysis of structures in the fully plastic range. It is also recommended for creep problems in which it is attempted to obtain the steady state solution.

If a one is placed in the third field, the assumed strain formulation is activated.

**Coordinates**

Three coordinates in the global x-, y-, and z-directions.

**Degrees of Freedom**

Three global degrees of freedom u, v, and w per node.

**Distributed Loads**

Distributed loads chosen by value of **IBODY** are as follows:

<b>Load Type</b>	<b>Description</b>
0	Uniform pressure on 1-2-3-4 face.
1	Nonuniform pressure on 1-2-3-4 face; magnitude supplied through the <b>FORCEM</b> user subroutine.
2	Uniform body force per unit volume in -z-direction.
3	Nonuniform body force per unit volume (e.g., centrifugal force); magnitude and direction supplied through the <b>FORCEM</b> user subroutine.
4	Uniform pressure on 6-5-8-7 face.
5	Nonuniform pressure on 6-5-8-7 face ( <b>FORCEM</b> user subroutine).
6	Uniform pressure on 2-1-5-6 face.
7	Nonuniform pressure on 2-1-5-6 face ( <b>FORCEM</b> user subroutine).
8	Uniform pressure on 3-2-6-7 face.
9	Nonuniform pressure on 3-2-6-7 face ( <b>FORCEM</b> user subroutine).
10	Uniform pressure on 4-3-7-8 face.
11	Nonuniform pressure on 4-3-7-8 face ( <b>FORCEM</b> user subroutine).
12	Uniform pressure on 1-4-8-5 face.
13	Nonuniform pressure on 1-4-8-5 face ( <b>FORCEM</b> user subroutine).
20	Uniform pressure on 1-2-3-4 face.
21	Nonuniform load on 1-2-3-4 face; magnitude and direction supplied in the <b>FORCEM</b> user subroutine.
22	Uniform body force per unit volume in -z-direction.
23	Nonuniform body force per unit volume (e.g., centrifugal force); magnitude and direction supplied through the <b>FORCEM</b> user subroutine.
24	Uniform pressure on 6-5-8-7 face.
25	Nonuniform load on 6-5-8-7 face; magnitude and direction supplied in the <b>FORCEM</b> user subroutine.
26	Uniform pressure on 2-1-5-6 face.
27	Nonuniform load on 2-1-5-6 face; magnitude and direction supplied in the <b>FORCEM</b> user subroutine.
28	Uniform pressure on 3-2-6-7 face.
29	Nonuniform load on 3-2-6-7 face; magnitude and direction supplied in the <b>FORCEM</b> user subroutine.
30	Uniform pressure on 4-3-7-8 face.

Load Type	Description
31	Nonuniform load on 4-3-7-8 face; magnitude and direction supplied in the <b>FORCEM</b> user subroutine.
32	Uniform pressure on 1-4-8-5 face.
33	Nonuniform load on 1-4-8-5 face; magnitude and direction supplied in the <b>FORCEM</b> user subroutine.
40	Uniform shear 1-2-3-4 face in the 1-2 direction.
41	Nonuniform shear 1-2-3-4 face in the 1-2 direction.
42	Uniform shear 1-2-3-4 face in the 2-3 direction.
43	Nonuniform shear 1-2-3-4 face in the 2-3 direction.
48	Uniform shear 6-5-8-7 face in the 5-6 direction.
49	Nonuniform shear 6-5-8-7 face in the 5-6 direction.
50	Uniform shear 6-5-8-7 face in the 6-7 direction.
51	Nonuniform shear 6-5-8-7 face in the 6-7 direction.
52	Uniform shear 2-1-5-6 face in the 1-2 direction.
53	Nonuniform shear 2-1-5-6 face in the 1-2 direction.
54	Uniform shear 2-1-5-6 face in the 1-5 direction.
55	Nonuniform shear 2-1-5-6 face in the 1-5 direction.
56	Uniform shear 3-2-6-7 face in the 2-3 direction.
57	Nonuniform shear 3-2-6-7 face in the 2-3 direction.
58	Uniform shear 3-2-6-7 face in the 2-6 direction.
59	Nonuniform shear 3-2-6-7 face in the 2-6 direction.
60	Uniform shear 4-3-7-8 face in the 3-4 direction.
61	Nonuniform shear 4-3-7-8 face in the 3-4 direction.
62	Uniform shear 4-3-7-8 face in the 3-7 direction.
63	Nonuniform shear 4-3-7-8 face in the 3-7 direction.
64	Uniform shear 1-4-8-5 face in the 4-1 direction.
65	Nonuniform shear 1-4-8-5 face in the 4-1 direction.
66	Uniform shear 1-4-8-5 in the 1-5 direction.
67	Nonuniform shear 1-4-8-5 face in the 1-5 direction.

Load Type	Description
100	Centrifugal load; magnitude represents square angular velocity [rad/time]. Rotation axis is specified in the <a href="#">ROTATION A</a> option.
102	Gravity loading in global direction. Enter three magnitudes of gravity acceleration in the x-, y-, and z-direction.
103	Coriolis and centrifugal load; magnitude represents square of angular velocity [rad/time]. Rotation axis is specified in the <a href="#">ROTATION A</a> option.

Pressure forces are positive into element face.

For other types of distributed loads that are normally applicable for all types of elements, please refer to [Distributed Loads](#) in Chapter 1 of this manual.

#### Output of Strains

- 1 =  $\epsilon_{xx}$
- 2 =  $\epsilon_{yy}$
- 3 =  $\epsilon_{zz}$
- 4 =  $\gamma_{xy}$
- 5 =  $\gamma_{yz}$
- 6 =  $\gamma_{zx}$

#### Output of Stresses

Output of stresses is the same as for [Output of Strains](#).

#### Transformation

Standard transformation of three global degrees of freedom to local degrees of freedom.

#### Tying

No special tying available. An automatic constraint is available for brick-to-shell transition meshes (see [Geometry](#)).

#### Output Points

Centroid or the eight integration points as shown in [Figure 3-9](#).

#### Updated Lagrange Procedure and Finite Strain Plasticity

Capability is available.

#### Coupled Analysis

In a coupled thermal-mechanical analysis, the associated heat transfer element is type [43](#). See Element [43](#) for a description of the conventions used for entering the flux and film data for this element. Volumetric flux generated by dissipated plastic energy is specified with type [101](#).

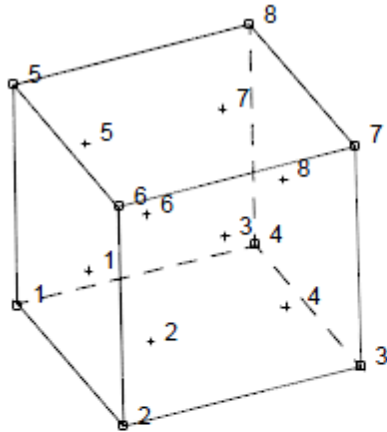


Figure 3-9 Eight-Point Gauss Integration Scheme for Element 7

#### Assumed Strain

The assumed strain formulation is available to improve the bending behavior. This increases the stiffness assembly costs per element, but it improves the accuracy.

---

**Notes:** The element can be collapsed to a tetrahedron.

By collapsing one plane of the element to a line (see [Figure 3-8](#)), a transition element for connecting bricks with four-node shell element type [75](#) is generated. Thickness of the shell must be specified in the geometry field of the brick element.

---

## ΠΒ.2 ΤΕΤΡΑΕΔΡΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ 157

**Element 157****Three-dimensional, Low-order, Tetrahedron, Herrmann Formulations**

This element is a three-dimensional, isoparametric, 4 + 1-node, low-order, tetrahedron with an additional pressure degree of freedom at each of the four corner nodes (see [Figure 3-234](#)). It is written for incompressible or nearly incompressible three-dimensional applications. The shape function for the center node is a bubble function. Therefore, the displacements and the coordinates for the element are linearly distributed along the element boundaries. The stiffness of this element is formed using four Gaussian integration points. The degrees of freedom of the center node are condensed out on the element level before the assembly of the global matrix.

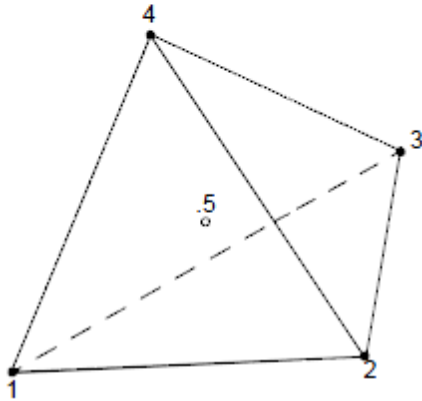


Figure 3-234 Form of Element 157

This element can be used for incompressible elasticity via total Lagrangian formulations or for rubber elasticity and elasto-plasticity via updated Lagrangian ( $F^e F^p$ ) formulations. To activate large strain analysis via updated Lagrangian formulations use either the **LARGE STRAIN,2** parameter (see *Marc Volume A: Theory and User Information* and *Marc Volume C: Program Input* for more information).

**Integration**

Four integration points are used to correctly interpolate the cubic shape function. For the mass matrix in volumetric loads, 16 integration points are used.

**Quick Reference****Type 157**

4 + 1-node, isoparametric, three-dimensional, tetrahedron using Herrmann formulation. Written for incompressible or nearly incompressible applications.

**Connectivity**

Five nodes per element (see [Figure 3-234](#)). Node numbering for the first four nodes is the same as for element type [134](#); that is, nodes 1, 2, 3, being the corners of the first face in counterclockwise order when viewed from inside the element and node 4 on the opposing vertex. The fifth node is located at the element center.



**Coordinates**

Three global coordinates in the x-, y- and z-directions. Marc automatically calculates the coordinates of the fifth (center) node of the element.

**Degrees of Freedom**

- 1 - u
- 2 - v
- 3 - w
- 4 - p

**Distributed Loads**

Distributed loads chosen by value of `IBODY` are as follows:

Load Type	Description
0	Uniform pressure on 1-2-3 face.
1	Nonuniform pressure on 1-2-3 face.
2	Uniform pressure on 1-2-4 face.
3	Nonuniform pressure on 1-2-4 face.
4	Uniform pressure on 2-3-4 face.
5	Nonuniform pressure on 2-3-4 face.
6	Uniform pressure on 1-3-4 face.
7	Nonuniform pressure on 1-3-4 face.
8	Uniform body force per unit volume in x direction.
9	Nonuniform body force per unit volume in x direction.
10	Uniform body force per unit volume in y direction.
11	Nonuniform body force per unit volume in y direction.
12	Uniform body force per unit volume in z direction.
13	Nonuniform body force per unit volume in z direction.
100	Centrifugal load, magnitude represents square of angular velocity [rad/time]. Rotation axis is specified in the <a href="#">ROTATION A</a> option.
102	Gravity loading in global direction. Enter three magnitudes of gravity acceleration in respectively global x, y, z direction.
103	Coriolis and centrifugal load; magnitude represents square of angular velocity [rad/time]. Rotation axis is specified in the <a href="#">ROTATION A</a> option.

For other types of distributed loads that are normally applicable for all types of elements, please refer to [Distributed Loads](#) in Chapter 1 of this manual.

**Output of Strain and Stresses**

Stresses and Strains are output at each integration point. For the case of large deformations, the stresses are the second Piola-Kirchhoff stresses and the strains are the Green strains.

- 1 = global xx strain
- 2 = global yy strain
- 3 = global zz strain
- 4 = global xy strain
- 5 = global yz strain
- 6 = global zx strain

If a 1 is entered in the 14th field of the 2nd data block of the **POST** option, the post file contains only one integration point for each element. The element stresses and strains in the point are the averaged results over three integration points of the element. This is to reduce the size of the post file.

**Transformation**

Any local set (u, v, w) can be used at any node.

**Updated Lagrange Procedure and Finite Strain Plasticity**

Capability is available.

---

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ & ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ**

---

**ΠΓ.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ**

---

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση της εργασίας περιγράφεται αμέσως παρακάτω:

+ Συγγραφή εργασίας:  
**Microsoft Word 2010**

+ Επεξεργασία δεδομένων:  
**Microsoft Excel 2010**

+ Σχεδιαστικό πακέτο:  
**SolidWorks 2012**

+ Πακέτο πεπερασμένων στοιχείων:  
**MSC Marc 2011**

---

**ΠΓ.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ**

---

Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε για να εκτελεστούν οι προσομοιώσεις είναι:

+ Επεξεργαστής:  
**Intel Core i7-2670QM 2.20 GHz**

+ Μνήμη RAM:  
**8 GB 1333 MHz**

+ Κάρτα γραφικών:  
**GeForce GT 555M 3 GB**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

---

**ΠΔ.1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

---

1. Δ.Μανωλάκος, Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες Ι, «Σφυρηλάτηση (forging)»
2. Δ.Μανωλάκος, Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες Ι, «Ελαττώματα σφυρηλάτησης (forging defects)»
3. Α.Γ.Μάμαλη, Κατεργασίες των Υλικών Ι, Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1998.
4. Α.Γ.Μάμαλη, Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μη Συμβατικές Κατεργασίες, Αθήνα 2000.
5. Π. Πισινάρας, Μέθοδοι Μοντελοποίησης της Σφυρηλάτησης οδοντωτών τροχών, μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2007.
6. Κωστόπουλος Θ. Ν., Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1991.
7. Προβατίδης Χ., Αντωνιάδης Ι., Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
8. Δημητρίου Β., Η Μέθοδος Coops στην Κατασκευή Πλεγμάτων, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ «Συστήματα Αυτοματισμού» (επιβλέπων καθ. Α. Κανάραχος), Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000.
9. Δημητρίου Β., Προσαρμοστικά Πεπερασμένα Στοιχεία και Συναφή Πλέγματα, Διδακτορική Διατριβή (επιβλέπων καθ. Α. Κανάραχος), Ε.Μ.Π., Αθήνα, Αύγουστος 2004.

**ΠΑ.2 ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

10. M. H. Sadeghi, Gear Forging: Mathematical Modeling and Experimental Validation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* -- November 2003 -- Volume 125, Issue 4, pp. 753-762.
11. Volker Szentmihali, Kurt Lange, Yves Tronel, Jean-Loup Chenot and Richard Ducloux, 3-D finite-element simulation of the cold forging of helical gear, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 43, Issues 2-4, June 1994, Pages 279-291.
12. R. Hill, A general method of analysis for metal-working process, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 11, Issue 5, September 1963, Pages 305-326.
13. V. M. Drecun and T. A. Dean, A parametric CAD program for die sets for precision forging spur gears, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 31, Issue 2, 1991, Pages 183-191.
14. Y. C. Chang, Z. M. Hu, B. S. Kang and T. A. Dean, A study of cold ironing as a post-process for net-shape manufacture, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 42, Issue 8, June 2002, Pages 945-952.
15. J. C. Choi, Y. Choi, K. D. Hur and C. H. Kim, A study on the forging of spur gears, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 38, Issue 12, December 1996, Pages 1333-1347.
16. J. H. Yoon and D. Y. Yang, A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of bevel gear forging by using a remeshing technique, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 32, Issue 4, 1990, Pages 277-291.
17. Mark Robinson Howard A. Kuhn, A workability analysis of the cold forging of gears with integral teeth, *Journal of Mechanical Working Technology*, Volume 1, Issue 3, February 1978, Pages 215-230.
18. A.G. Mamalis, Advanced manufacturing engineering, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 161, Issues 1-2, 10 April 2005, Pages 1-9.
19. Steffen Reinsch, Bernd Müssig, Bernd Schmidt and Kirsten Tracht, Advanced manufacturing system for forging products, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 138, Issues 1-3, 20 July 2003, Pages 16-21.
20. E. Oñate, J. Rojek, M. Chiumenti, S.R. Idelsohn, F. Del Pin and R. Aubry, Advances in stabilized finite element and particle methods for bulk forming processes, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, In Press, Corrected Proof, Available online 25 January 2006.
21. J. Cai, T. A. Dean and Z. M. Hu, Alternative die designs in net-shape forging of gears, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 150, Issues 1-2, 1 July 2004, Pages 48-55.

22. N. A. Abdul and T. A. Dean, An analysis of the forging of spur gear forms , International Journal of Machine Tool Design and Research, Volume 26, Issue 2, 1986, Pages 113-123.
23. Y. C. Leung , L. C. Chan , C. Y. Tang and T. C. Lee, An effective process of strain measurement for severe and localized plastic deformation, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 44, Issues 7-8, June 2004, Pages 669-676.
24. M. S. Konstantinov and N. V. Djamdjiev, An integrated bevel gears manufacturing system, Mechanism and Machine Theory, Volume 14, Issue 1, 1979, Pages 11-23.
25. Markus Knoerr, Joon Lee and Taylan Altan, Application of the 2D finite element method to simulation of various forming processes, Journal of Materials Processing Technology, Volume 33, Issues 1-2, August 1992, Pages 31-55.
26. E. Doege and R. Bohnsack, Closed die technologies for hot forging, Journal of Materials Processing Technology, Volume 98, Issue 2, 29 January 2000, Pages 165-170.
27. I. Moriguchi, Cold forging of gears and other complex shapes, Journal of Materials Processing Technology, Volume 35, Issues 3-4, October 1992, Pages 439-450.
28. M. L. Alves, J. M. C. Rodrigues and P. A. F. Martins, Cold forging of gears: experimental and theoretical investigation, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 37, Issues 6-7, June 2001, Pages 549-558.
29. G. Zhao, E. Wright and R. V. Grandhi, Computer aided preform design in forging using the inverse die contact tracking method, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 36, Issue 7, July 1996, Pages 755-769.
30. N.R. Chitkara and M.A. Bhutta, Computer simulation to predict stresses, working pressures and deformation modes in incremental forging of spur gear forms, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 38, Issues 8-9, August-September 1996, Pages 871-889.
31. S.R. Kalidindi, C.A. Bronkhorst and L. Anand, Crystallographic texture evolution in bulk deformation processing of FCC metals, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 40, Issue 3, 1992, Pages 537-569.
32. J.M.A. César de Sá, P.M.A. Areias and Cai Zhen, Damage modelling in metal forming problems using an implicit non-local gradient model, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, In Press, Corrected Proof, Available online 28 February 2006.
33. S. Mukherjee and Q. Zhang, Design sensitivities in problems involving material and geometric nonlinearities, International Journal of Solids and Structures, Volume 31, Issues 12-13, June-July 1994, Pages 1793-1827.
34. Yohng J. Kim and Naunit R. Chitkara, Determination of preform shape to improve dimensional accuracy of the forged crown gear form in a closed-die forging process,

- International Journal of Mechanical Sciences, Volume 43, Issue 3, December 2001, Pages 853-870.
35. D.H. Kim, B.M. Kim and C.G. Kang, Die life considering the deviation of the preheating billet temperature in hot forging process, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 41, Issue 13, July 2005, Pages 1255-1269.
  36. Manabu Gotoh and Yuji Shibata, Elastic-plastic FEM analysis of the heading process and the die-forging process of a gear blank, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 27, Issues 1-3, August 1991, Pages 193-211.
  37. Ângelo Caporalli, Luciano Antonio Gileno and Sérgio Tonini Button, Expert system for hot forging design, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 80-81, 1 August 1998, Pages 131-135.
  38. , Nitin V. Hattangady, Faster analysis of forming problems through use of coarse mesh models for dies *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 32, Issue 1, 15 March 1999, Pages 21-35.
  39. M. S. Joun, S. W. Lee and J. H. Chung, Finite element analysis of a multi-stage axisymmetric forging process having a spring-attached die for controlling metal flow lines, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 38, Issue 7, July 1998, Pages 843-854.
  40. M. S. Joun, M. C. Lee and J. M. Park, Finite element analysis of prestressed die set in cold forging, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 42, Issue 11, September 2002, Pages 1213-1222.
  41. J. M. C. Rodrigues and P. A. F. Martins, Finite element modelling of the initial stages of a hot forging cycle, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 38, Issue 3, January 2002, Pages 295-305.
  42. ,N. R. Chitkara and M. A. Bhutta, Forging and heading of hollow spur gear forms: an analysis and some experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 41, Issue 10, October 1999, Pages 1159-1189.
  43. Jongung Choi, Hae-Young Cho and Chang-Yong Jo, Forging of spur gears with internal serrations and design of the dies, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 104, Issues 1-2, 18 August 2000, Pages 1-7.
  44. J. H. Liou and D. Y. Jang, Forging parameter optimization considering stress distributions in products through FEM analysis and robust design methodology, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 37, Issue 6, June 1997, Pages 775-782.
  45. Richard Douglas and David Kuhlmann, Guidelines for precision hot forging with applications , *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 98, Issue 2, 29 January 2000, Pages 182-188.

46. Eckart Doege, Jürgen Thalemann and Frank Weber, Hot forging of precision parts, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 35, Issues 3-4, October 1992, Pages 469-481.
47. Jens Groenbaek and Torben Birker, Innovations in cold forging die design, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 98, Issue 2, 29 January 2000, Pages 155-161.
48. John N. Majerus, Methodology for quantitative error-assessment of finite element models, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 21, Issue 3, January 1996, Pages 213-223.
49. Zhenyan Gao and Ramana V. Grandhi, Microstructure optimization in design of forging processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 40, Issue 5, April 2000, Pages 691-711.
50. B. I. Tomov and V. I. Gagov, Modelling and description of the near-net-shape forging of cylindrical spur gears, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 92-93, 30 August 1999, Pages 444-449.
51. S. Serajzadeh, S. M. H. Mirbagheri, A. Karimi Taheri and S. M. Zebarjad, Modelling of metal flow during hot forging with regard to microstructural aspects, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, Issue 14, November 2004, Pages 1537-1545.
52. Naunit R. Chitkara and Yohng J. Kim, Near-net shape forging of a crown gear: some experimental results and an analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 41, Issue 3, February 2001, Pages 325-346.
53. N.R. Chitkara and M.A. Bhutta, Near-net shape forging of spur gear forms: An analysis and some experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 38, Issues 8-9, August-September 1996, Pages 891-916.
54. W. Bochniak, A. Korbel, R. Szyndler, R. Hanarz, F. Stalony-Dobrzański, L. Błaż and P. Snarski, New forging method of bevel gears from structural steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 173, Issue 1, 30 March 2006, Pages 75-83.
55. New starting points for the prediction of tool wear in hot forging, R. Turk, I. Peru and M. Terelj, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, Issues 12-13, October 2004, Pages 1319-1331.
56. Gyung-Ju Kang, Woo-Jin Song, Jeong Kim, Beom-Soo Kang and Hoon-Jae Park, Numerical approach to forging process of a gear with inner cam profile using FEM, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 164-165, 15 May 2005, Pages 1212-1217.
57. K. Kondo and K. Ohga, Precision cold die forging of a ring gear by divided flow method, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 35, Issue 8, August 1995, Pages 1105-1113.



58. H.Ferguson. (Metal Powder Products Co, USA.), Precision cold forging of a PM preform to make a high density spur gear, Metal Powder Report, Volume 55, Issue 11, November 2000, Page 48.
59. J. C. Choi and Y. Choi, Precision forging of spur gears with inside relief, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 39, Issue 10, October 1999, Pages 1575-1588.
60. M. H. Sadeghi and T. A. Dean, Precision forging straight and helical spur gears, Journal of Materials Processing Technology, Volume 45, Issues 1-4, September 1994, Pages 25-30
61. Y. K. Lee, S. R. Lee, C. H. Lee and D. Y. Yang, Process modification of bevel gear forging using three-dimensional finite element analysis, Journal of Materials Processing Technology, Volume 113, Issues 1-3, 15 June 2001, Pages 59-63.
62. Guoqun Zhao, Ed Wright and Ramana V. Grandhi, Sensitivity analysis based preform die shape design for net-shape forging, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 37, Issue 9, September 1997, Pages 1251-1271.
63. P. B. Hussain, J. S. Cheon, D. Y. Kwak, S. Y. Kim and Y. T. Im, Simulation of clutch-hub forging process using CAMPform, Journal of Materials Processing Technology, Volume 123, Issue 1, 10 April 2002, Pages 120-132.
64. A. G. Mamalis, D. E. Manolakos and A. K. Baldoukas, Simulation of the precision forging of bevel gears using implicit and explicit FE techniques , Journal of Materials Processing Technology, Volume 57, Issues 1-2, 1 February 1996, Pages 164-171.
65. D. H. Hristov B. I. Tomov and D. K. Kolev, Stresses and strains in a die for closed-die forging of cylindrical spur gears, Journal of Materials Processing Technology, Volume 23, Issue 1, October 1990, Pages 55-63.
66. M. H. Sadeghi T. A. Dean, The ejection of precision-forged straight and helical spur-gear forms, Journal of Materials Processing Technology, Volume 31, Issues 1-2, May 1992, Pages 147-160.
67. J.C. Choi, Y. Choi and S.J. Tak, The forging of helical gears (I): Experiments and upper-bound analysis, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 40, Issue 4, April 1998, Pages 325-337.
68. J. C. Choi, Y. Choi and S. J. Tak, The forging of helical gears (II): comparisons of the forging processes, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 41, Issue 6, June 1999, Pages 725-739.
69. T. A. Dean, The net-shape forming of gears , Materials & Design, Volume 21, Issue 4, 1 August 2000, Pages 271-278.
70. A. R. O. Abdel-Rahman and T. A. Dean, The quality of hot forged spur gear forms. Part I: Mechanical and metallurgical properties, International Journal of Machine Tool Design and Research, Volume 21, Issue 2, 1981, Pages 109-127.

71. A. R. O. Abdel-Rahman and T. A. Dean, The quality of hot forged spur gear forms. Part II: Tooth form accuracy, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Volume 21, Issue 2, 1981, Pages 129-141.
72. A. Forcellese and F. Gabrielli, Warm forging of aluminium alloys: a new approach for time compression of the forging sequence, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 40, Issue 9, July 2000, Pages 1285-1297.
73. W. He, Y. F. Zhang, K. S. Lee, L. Lu, S. S. Xie and Q. J. Jin, Microstructure and mechanical properties of an Al/SiCp composite cold die forged gear, *Materials & Design*, Volume 17, Issue 2, 1996, Pages 97-102.
74. Ramzy Boussetta, Thierry Coupez and Lionel Fourment, Adaptive remeshing based on a posteriori error estimation for forging simulation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 195, Issues 48-49, 1 October 2006, Pages 6626-6645.
75. F.Fereshteh-saniee, I.Pillinger, P.Hartley, Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology* 153-154 (2004) 151-156.
76. A.Erman Tekkaya, A Guide for Validation of FE-Simulation in Bulk Metal Forming, *The Arabian Journal of Science and Engineering*, Volume 30, Number IC.
77. Murat Arbak, A. Erman Tekkaya, Feridum Ozhan, Comparison of Various Performs for hot forging of bearing rings *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 72-82.
78. P.Hartley, C.E.N.Sturgess, T.A.Dean and G.W.Rowe, Forging Die Design and Flow Simulation: Their Integration in Intelligent Knowledge-Based Systems, *Journal of Mechanical Working Technology*, 15 (1987) 1-13.
79. C.A. Santos, M.T.P. Aguilar, H.B. Campos, A.E.M. Pertence and P.R. Cetlin, Failure analysis of the die in the third hot forging stage of a gear blank, *Engineering Failure Analysis*, Volume 13, Issue 6, September 2006, Pages 886-897.
80. Ibrahim Khoury, Laurence Giraud-Moreau, Pascal Lafon and Carl Labergère, Towards an optimisation of forging processes using geometric parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 177, Issues 1-3, 3 July 2006, Pages 224-227.
81. M. Skunca, P. Skakun, Z. Keran, L. Sidjanin and M.D. Math, Relations between numerical simulation and experiment in closed die forging of a gear, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 177, Issues 1-3, 3 July 2006, Pages 256-260.
82. B.A. Behrens, E. Doege, S. Reinsch, K. Telkamp, H. Daehndel and A. Specke, Precision forging processes for high-duty automotive components, *Journal of Materials Processing Technology*, In Press, Corrected Proof, Available online 19 June 2006.

## ΠΑ.3 ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- 
83. <http://www.matweb.com>
  84. <http://www.sciencedirect.com>
  85. <http://en.wikipedia.org/wiki/Forging>
  86. <https://www.google.gr/>
  87. <http://www.castings-forgings-news.com/forgings/>