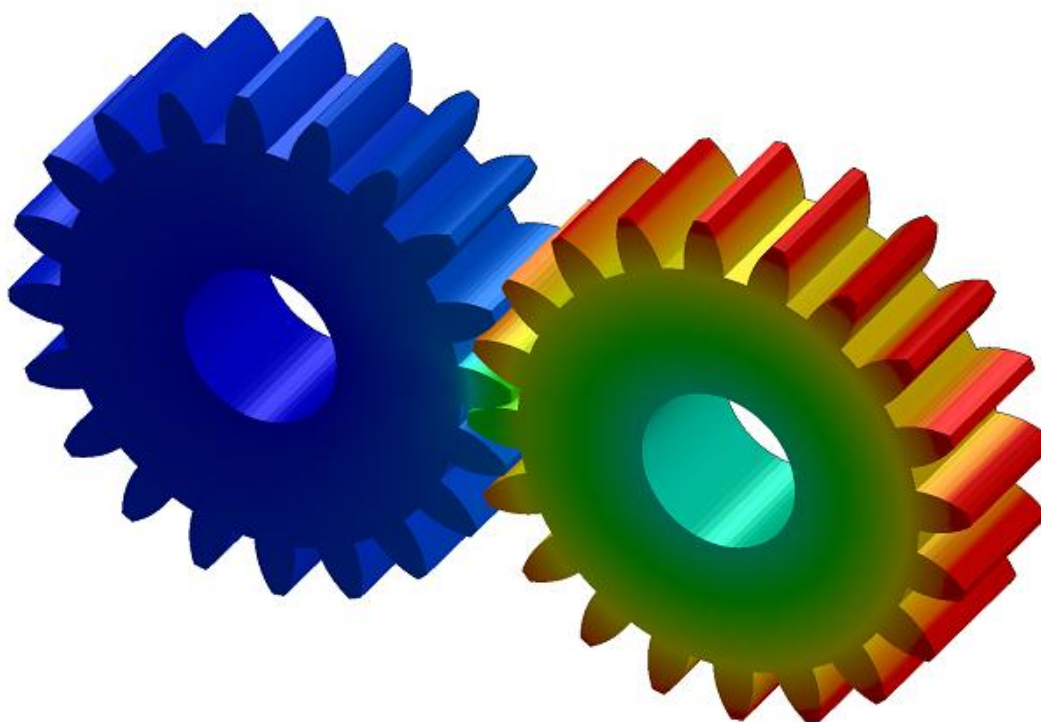


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΖΕΥΓΟΥΣ ΣΥΝΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:  
ΑΛΠΟΣ Λ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ (Α.Μ. 6309)  
ΜΥΛΩΝΑΣ Κ. ΖΩΗΣ (Α.Μ. 6307)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Ι. ΓΕΩΡΓΙΟΣ  
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2014



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρών τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας. Αναφέρεται στην εισαγωγή γεωμετρίας μετωπικών οδοντωτών τροχών, στην ανάλυση τους με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, εξάγοντας έτσι τα διαγράμματα τάσης επαφής, τάσης ρίζας οδόντα και στρεπτικής δυσκαμψίας του συστήματος, αλλά και στην τρισδιάστατη εκτύπωση τους με την μέθοδο της ταχείας πρωτοτυποποίησης.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας, κύριο Γεώργιο Γιαννόπουλο, Επιστημονικό Συνεργάτη του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε σε όλο το χρονικό διάστημα υλοποίησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Ακόμη ευχαριστούμε τους συναδέλφους Βασιλάκη Λάμπρο και Κιάφα Λουκά για την βοήθεια που μας προσέφεραν για την τρισδιάστατη εκτύπωση των οδοντωτών τροχών. Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για την συνεχή στήριξη τους.

Αλπός Νικόλαος – Μυλωνάς Ζώης

Πάτρα 2014





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι οδοντωτοί τροχοί είναι μία από τις σημαντικότερες εφευρέσεις που έχουν γίνει και χρησιμοποιούνται ευρέως στην καθημερινή μας ζωή, κάποια παραδείγματα είναι το κιβώτιο ταχυτήτων ενός αυτοκινήτου, ρολόγια, οικιακές συσκευές. Ο λόγος επιλογής τους είναι η μακροχρόνια διάρκεια ζωής τους, η δυνατότητα μεγάλης μεταφοράς ισχύος και σχετικά η μικρή συντήρησή τους.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται εισαγωγή γεωμετρίας μετωπικών οδοντωτών τροχών, ανάλυση με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό την χάραξη των διαγραμμάτων τάσης επαφής, τάσης ρίζας οδόντα και στρεπτικής δυσκαμψίας του μηχανικού συστήματος. Ακόμη κατασκευάζονται οι οδοντωτοί τροχοί με την μέθοδο της ταχείας πρωτοτυποποίησης και συγκεκριμένα με τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται γενική αναφορά στους οδοντωτούς τροχούς και συγκεκριμένα στα είδη αυτών, στην λίπανση τους, στις μεθόδους κατασκευής τους, στα υλικά κατασκευής, στις βλάβες τους και στα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα των οδοντωτών τροχών σε σχέση με διάφορα άλλα στοιχεία μετάδοσης κίνησης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση όλων των χαρακτηριστικών μεγεθών των μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθείς οδόντες.

Στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί η ανάλυση όλων των δυνάμεων που ενεργούν επάνω στους οδόντες των δύο συνεργαζόμενων τροχών, ενώ παρουσιάζονται με βάση την τυποποίηση κατά DIN 3990 οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της τάσης στον πόδα του οδόντα, με φόρτιση στο σημείο κεφαλής και του οδόντα σε πίεση επιφανείας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αριθμητική μοντελοποίηση όπου αρχικά γίνεται μια αναφορά στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Κάνουμε μια εισαγωγή στο σχεδιαστικό πακέτο Solidworks και στον παραμετρικό σχεδιασμό, ακόμη παρουσιάζεται η γεωμετρία, το υλικό, οι συνοριακές συνθήκες, η σύνδεση των τροχών, οι φορτίσεις τους και η διακριτοποίηση που έχει γίνει.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφερόμαστε για την στρεπτική δυσκαμψία του συστήματος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από την προσομοίωση των οδοντωτών τροχών, παρουσιάζουμε τα διαγράμματα τάσης επαφής, τάσης ρίζας οδόντα και στρεπτικής δυσκαμψίας που εξήχθησαν από την ανάλυση και μιλάμε για τα συμπεράσματα τα οποία προκύψαν από αυτήν την πτυχιακή εργασία.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σχετικά νέα και πρωτοποριακή μέθοδος στον τομέα της κατασκευής. Η μέθοδος αυτή είναι η ταχεία πρωτοτυποποίηση και βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων προσθέτοντας υλικό και όχι αφαιρώντας σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους. Αναλύονται όλες οι τεχνολογίες της ταχείας πρωτοτυποποίησης, οι εφαρμογές τις, και τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα αυτών. Επίσης γίνεται αναφορά στον τρισδιάστατο εκτυπωτή (PRUSA MENDEL LM8UU) και αναλύονται τα βασικά λειτουργικά εξαρτήματα του.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια μικρή παρουσίαση των βασικών εντολών σχεδιασμού του Solidworks, παρουσιάζεται βήμα – βήμα η σχεδίαση ενός οδοντωτού τροχού και η συναρμολόγηση ενός ζεύγους οδοντωτών τροχών από την βιβλιοθήκη που διαθέτει το πρόγραμμα. Επίσης παρουσιάζεται βήμα – βήμα η προσομοίωση που έγινε έτσι ώστε να πάρουμε τα αποτελέσματα τάσης και μετατόπισης που χρειαστήκαμε για την κατασκευή των διαγραμμάτων.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
<b>1. ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.....</b>	<b>3</b>
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	3
1.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΣ ΣΚΟΠΟΣ - ΧΡΗΣΕΙΣ.....	4
1.3 ΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	4
1.3.1 Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί.....	5
1.3.2 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί.....	6
1.3.3 Ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί ασύμβατων αξόνων.....	7
1.3.4 Σύστημα ατέρμονα κοχλία – οδοντωτού τροχού.....	8
1.4 ΛΙΠΑΝΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	9
1.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ.....	10
1.5.1 Κοπή σε φραιζομηχανή με εργαλείο μορφής (Milling cutter).....	10
1.5.2 Κοπή με οδοντωτό κανόνα (rack generation).....	11
1.5.3 Κοπή τροχών με την μέθοδο Fellows (Gear shaper).....	12
1.5.4 Κοπή οδόντων με κοπτικό εργαλείο Hob (Hobbing).....	13
1.5.5 Κοπή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching).....	14
1.5.6 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με χύτευση υπό πίεση.....	14
1.5.7 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με έλαση.....	15
1.5.8 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με την μέθοδο Sintering.....	15
1.5.9 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με την μέθοδο Stamping.....	16
1.5.10 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με την μέθοδο Injection Molding.....	17
1.6 ΥΛΙΚΑ - ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	18

1.6.1 Υλικά κατασκευής .....	18
<b>1.7 ΒΛΑΒΕΣ ΟΔΟΝΤΩΝ</b> .....	<b>20</b>
1.7.1 Θραύση δοντιών .....	22
1.7.2 Σημειακή διάβρωση δοντιού.....	23
1.7.3 Πλαστική παραμόρφωση των δοντιών .....	24
1.7.4 Αποξεστικό υλικό στο λιπαντικό .....	24
1.7.5 Υψηλή θερμοκρασία .....	25
1.7.6 Ανεπαρκής λίπανση.....	25
<b>1.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>26</b>
<b>2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ</b> .....	<b>27</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	27
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ .....	28
2.2.1 Βήμα οδόντων .....	28
2.2.2 Μέτρο οδόντωσης.....	28
2.2.3 Αρχική διάμετρος οδόντωσης .....	29
2.2.4 Ύψος κεφαλής οδόντα .....	29
2.2.5 Ύψος ποδός οδόντα .....	29
2.2.6 Πάχος οδόντωσης.....	30
2.2.7 Διάκενο μεταξύ οδόντων .....	30
2.2.8 Διάμετρος κύκλου κεφαλής .....	30
2.2.9 Διάμετρος κύκλου ποδός .....	31
2.2.10 Απόσταση αξόνων μεταξύ δύο συνεργαζόμενων τροχών .....	31
2.2.11 Σχέση μετάδοσης.....	31
2.2.12 Γωνία επαφής.....	32
2.2.13 Βαθμός επικάλυψης ή διάρκεια επαφής.....	33
2.2.14 Αγγλικό διαμετρικό βήμα (Pitch).....	34
2.2.15 Στοιχεία άλλων τύπων οδοντωτών τροχών .....	34
<b>3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ</b> .....	<b>37</b>
3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ .....	37
3.1.1 Στρεπτική ροπή οδοντωτού τροχού .....	39
3.1.2 Περιφερειακή δύναμη οδόντα.....	39

3.1.3	Ακτινική δύναμη οδόντα .....	40
3.1.4	Συνολική δύναμη οδόντα .....	40
3.2	ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΟΔΑ ΤΟΥ ΟΔΟΝΤΑ ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ ΣΗΜ. ΚΕΦΑΛΗΣ ..	41
3.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΔΟΝΤΑ ΣΕ ΠΙΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ .....	47
<b>4.</b>	<b>ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ .....</b>	<b>55</b>
4.1	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	55
4.2	ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS .....	56
4.2.1	Η ιστορία της εταιρίας .....	56
4.2.2	Τι είναι το SolidWorks .....	57
4.2.3	Μεθοδολογία μοντελοποίησης .....	57
4.2.4	Μορφές αρχείων .....	59
4.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ .....	60
4.4	ΥΛΙΚΟ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	61
4.5	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	61
4.5.1	Η εξελιγμένη καμπύλη .....	61
4.6	ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	64
4.7	ΣΥΝΔΕΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	65
4.8	ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ - ΔΥΝΑΜΕΙΣ .....	66
4.9	ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	66
<b>5.</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....</b>	<b>69</b>
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	69
5.2	ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΑΚΑΜΨΙΑ.....	69
5.3	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ.....	70
5.4	ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑΤΑ .....	74
5.5	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	80
<b>6.</b>	<b>ΤΑΧΕΙΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ .....</b>	<b>81</b>
6.1	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	81
6.2	ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	82
6.3	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	82
6.3.1	Στερεολιθογραφία Stereolithography (SLA).....	82
6.3.1.1	Η διαδικασία της στερεολιθογραφίας.....	83

6.3.1.2 Πλεονεκτήματα της στερεολιθογραφίας .....	83
6.3.1.3 Μειονεκτήματα της στερεολιθογραφίας .....	83
6.3.2 Στηρίγματα.....	84
6.3.3 Τομή και ένωση .....	85
6.3.3.1 Αντιστάθμιση πάχους Γραμμής ( <i>Line width compensation</i> ).....	87
6.3.3.2 Παράγοντας συστολής.....	87
6.3.3.3 Βάθος επίδρασης ( <i>Cure depth</i> ).....	87
6.3.4 Μια παραλλαγή της στερεολιθογραφίας – Solid ground curing (sgc).....	88
6.3.5 Επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτινών λέιζερ – Selective laser sintering (SLS).....	90
6.3.6 Παραγωγή αντικειμένων μέσω της συγκόλλησης λεπτών φύλλων Laminated object manufacturing (LOM).....	91
6.3.7 Κατασκευή μοντέλων μέσω εναπόθεσης / σύντηξης διαδοχικών στρώσεων – Fused deposition modeling (FDM) .....	91
6.3.8 Τρισδιάστατη εκτύπωση – Three dimensional printing (3DP).....	92
6.4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ RP .....	93
6.5 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ RP ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ.....	95
6.6 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ RP ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ .....	97
6.7 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ .....	97
6.8 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	99
6.8.1 Ταχεία πρωτοτυποποίηση στην κατασκευή προσθετικών μερών του ανθρώπινου σκελετού.....	99
6.8.2 Διάσωση πολιτιστικής κληρονομιάς .....	100
6.8.3 Λειτουργικά πρωτότυπα.....	101
6.9 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ (PRUSA MENDEL LM8UU) .....	102
6.10 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ .....	103
6.10.1 Κύριο σώμα .....	103
6.10.2 Τράπεζα.....	104
6.10.3 Εργαλειοφορείο .....	105
6.10.4 Πλακέτα αριθμητικού ελέγχου και ηλεκτρονικά μέρη .....	106
6.11 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ .....	108

<b>7. ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΖΕΥΓΟΥΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ</b>	
7.1 ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ SOLIDWORKS.....	111
7.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ SOLIDWORKS.....	112
7.2.1 Η περιοχή Command Manager .....	112
7.2.2 Η περιοχή Feature Manager .....	114
7.2.3 Η περιοχή Task Pane .....	114
7.2.4 Η περιοχή Status Bar.....	114
7.2.5 Το παράθυρο εντολών σχεδίασης (Sketch).....	114
7.2.6 Το παράθυρο εντολών χαρακτηριστικών (Features) .....	118
7.3 ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ .....	122
7.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΖΕΥΓΟΥΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΟΥ SOLIDWORKS .....	133
7.5 ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ .....	140
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>147</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>149</b>





## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα αρχαία χρόνια υπήρχε μια ανάπτυξη στην μηχανική και πιο συγκεκριμένα στη μετάδοση κίνησης από ένα σώμα σε ένα άλλο. Ανευρίσκονται συνεχώς αναφορές και αντικείμενα, όπως τροχαλίες, μοχλοί, γρανάζια, με σπουδαιότερη ανακάλυψη όλων αυτών τον μηχανισμό των Αντικυθήρων. Ο μηχανισμός των Αντικυθήρων ή υπολογιστής των Αντικυθήρων είναι μια αρχαία συσκευή η οποία όπως πιστεύεται λειτουργούσε σαν ένας μηχανικός υπολογιστής και είχε σχεδιαστεί σαν όργανο αστρονομικών παρατηρήσεων με πολύπλοκο ωρολογιακό μηχανισμό για να υπολογίζει τις κινήσεις των ουρανίων σωμάτων.

Ο μηχανισμός φέρει 30 οδοντωτούς τροχούς οι οποίοι περιστρέφονται γύρω από 10 άξονες. Η λειτουργία του μηχανισμού κατέληγε σε τουλάχιστον 5 καντράν, με ένα ή περισσότερους δείκτες για το καθένα.

Ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους μετάδοσης της περιστροφικής κίνησης είναι με τη χρήση εξαρτημάτων που φέρουν οδόντωση. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά είναι οι οδοντωτοί τροχοί (γρανάζια) διαφόρων ειδών και μορφών, οι οδοντωτοί κανόνες και οι ατέρμονες κοχλίες. Τα εξαρτήματα αυτά συνεργάζονται σε ζεύγη, δηλαδή δύο γρανάζια, γρανάζι και οδοντωτός κανόνας, ατέρμονας κοχλίας και γρανάζι (κορώνα). Οι οδοντωτοί τροχοί είναι ευρέως διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές διατάξεις.

Οι βλάβες των οδοντωτών τροχών αποτελούν εδώ και πολλά χρόνια ένα μεγάλο μέρος έρευνας και πιθανόν λύσεων για την αντιμετώπισή τους. Οι σχέσεις υπολογισμού των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την συνεργασία δύο οδοντωτών τροχών στην περιοχή επαφής τους, αλλά και στην περιοχή του πόδα είναι αρκετά δύσκολες έτσι ώστε να γίνονται με τον αναλυτικό τρόπο, δηλαδή την επίλυση με χαρτί και μολύβι.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές μπόρεσε να δημιουργήσει πακέτα τα οποία προσφέρουν τον παραμετρικό σχεδιασμό κάθε λογής αντικειμένου, χωρίς κανέναν γεωμετρικό περιορισμό, ενώ η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ήρθε για να δώσει την λύση στο πρόβλημα της

χρονοβόρας στατικής ή δυναμικής ανάλυσης των στοιχείων. Τα διάφορα πακέτα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούν κάποιες προσεγγιστικές μαθηματικές μεθόδους για τον υπολογισμό αυτών των τάσεων κάνοντας τους χρόνους υπολογισμού πολύ μικρούς.

Όσον αφορά στον τομέα της κατασκευής επιλέξαμε την μέθοδο της ταχείας πρωτοτυποποίησης, μια νέα τεχνολογία η οποία έχει πολύ μέλλον και συνεχώς εκσυγχρονίζεται με ταχείς ρυθμούς. Οι μέθοδοι της ταχείας πρωτοτυποποίησης είναι αρκετοί και ο καθένας έχει τα θετικά και αρνητικά στοιχεία.

Η μέθοδος με την οποία επιλέξαμε να γίνει η κατασκευή των οδοντωτών τροχών είναι με την εναπόθεση – σύντηξη διαδοχικών στρώσεων υλικού (FDM) ενώ η μηχανή που χρησιμοποιήσαμε είναι η Prusa Mendel LM8UU και ανήκει στην κατηγορία των μηχανών 3D Printers.

Από το αρχείο CAD το οποίο δημιουργήσαμε τους οδοντωτούς τροχούς δημιουργούμε ένα αρχείο με μορφοποίηση STL το οποίο ύστερα με την σειρά του θα φορτώσουμε στην μηχανή Prusa Mendel ώστε να εξάγουμε τον κώδικα G και M και να αρχίσουν να δημιουργούνται τα κομμάτια.

# 1. ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

## 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Ο οδοντωτός τροχός είναι συνήθως ένας ολόσωμος κύλινδρος ή δίσκος (για μικρές διαστάσεις) ή τροχός με βραχίονες [1]. Πολλές φορές ο δίσκος έχει τρύπες για μείωση του βάρους του γραναζιού. Στο κέντρο του γραναζιού υπάρχει ο «ομφαλός» σύνδεσης με την άτρακτο, η πλήμνη που φέρει το κατάλληλο αυλάκι για τη σφήνα, στη δε περιφέρειά του υπάρχει η οδόντωση.

Για μικρές διαμέτρους και μικρό αριθμό δοντιών μπορεί η οδόντωση να διαμορφωθεί πάνω στην αντίστοιχη άτρακτο. Ο οδοντωτός κανόνας είναι μια ράβδος, συνήθως ορθογωνικής αρχικής διατομής.

Η περιφερειακή επιφάνεια του οδοντωτού τροχού (στην περίπτωση των κωνικών γραναζιών η επιφάνεια αυτή είναι η παράπλευρη επιφάνεια ενός κώλορου κώνου) και η επιφάνεια εργασίας του κανόνα έχουν διαμορφωθεί, ώστε να φέρουν διαδοχικές εσοχές (αυλάκια) και προεξοχές (δόντια) κατάλληλης μορφής και διαστάσεων (οδόντωση).

Πολλές φορές η οδόντωση διαμορφώνεται στην εσωτερική επιφάνεια της στεφάνης του οδοντωτού τροχού.

Ο ατέρμονας είναι ένας κύλινδρος που στην παράπλευρη επιφάνεια του έχει χαραχτεί ελίκωση με μία ή δύο συνήθως αρχές, όπως στους κοχλίες.

Η εμπλοκή των οδοντώσεων των δύο συνεργαζόμενων στοιχείων, δηλαδή η συνεχής και διαδοχική είσοδος των δοντιών του ενός στις εσοχές (αυλάκια) του άλλου, έχει σαν αποτέλεσμα τη μετάδοση της κίνησης από το κινητήριο στο κινούμενο στοιχείο.

Εξυπακούεται ότι η μορφή και οι διαστάσεις των δοντιών συνεργαζόμενων στοιχείων είναι απόλυτες ίδιες.

## 1.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΣ ΣΚΟΠΟΣ – ΧΡΗΣΕΙΣ

Με την βοήθεια των κατάλληλων οδοντώσεων είναι δυνατή η μετάδοση κίνησης σε περιπτώσεις ατράκτων με γεωμετρικούς άξονες παράλληλους, τεμνόμενους (υπό οποιαδήποτε γωνία) και ασύμβατους [1].

Εκτός από τη μετάδοση κίνησης, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, επιτυγχάνουμε και μετατροπή βασικών χαρακτηριστικών της, δηλαδή των στροφών και της ροπής του κινούμενου άξονα σε σχέση με αυτές του κινητήριου.

Τέλος στην περίπτωση του ζεύγους οδοντωτού τροχού - κανόνα, μετατρέπεται η περιστροφική κίνηση σε ευθύγραμμη (ή αντίθετα).

Οι μεγαλύτερη εφαρμογή των οδοντωτών τροχών είναι στα κιβώτια ταχυτήτων των αυτοκινήτων και των εργαλειομηχανών, στο διαφορικό, και σε άλλους βοηθητικούς μηχανισμούς των αυτοκινήτων, στους μειωτήρες (διατάξεις μετατροπής στροφών – ροπής), στις συνεργασίες κινητήριων μηχανών – εργομηχανών που δε συμπίπτουν οι γεωμετρικοί άξονες των ατράκτων τους (αλλιώς χρησιμοποιούνται σύνδεσμοι) και σε άλλες περιπτώσεις μετάδοσης που δεν απέχουν πολύ οι συνεργαζόμενες άτρακτοι.

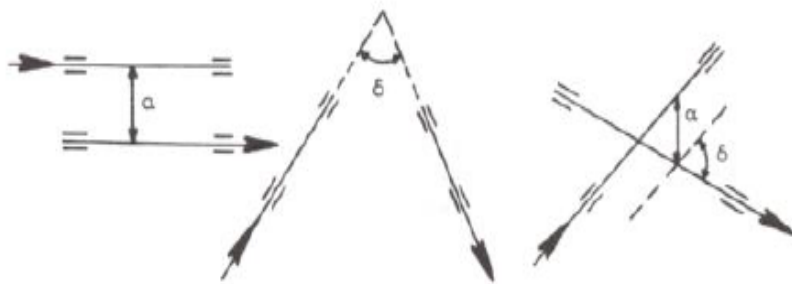
Είναι κατάλληλες για απαιτήσεις μεγάλων ροπών, πολλών στροφών, ακρίβειας στη σχέση μετάδοσης, χαμηλού σχετικά θορύβου (ιδίως όταν είναι καλή η ποιότητα κατασκευής και λιπαίνονται) και μεγάλης διάρκειας ζωής με ελάχιστη συντήρηση.

## 1.3 ΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Οι άξονες περί τους οποίους περιστρέφονται δύο συνεργαζόμενοι οδοντωτοί τροχοί μπορεί να είναι [4]:

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

όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 1-1



**Σχήμα 1 - 1:** Σχετική θέση αξόνων συνεργαζομένων τροχών

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

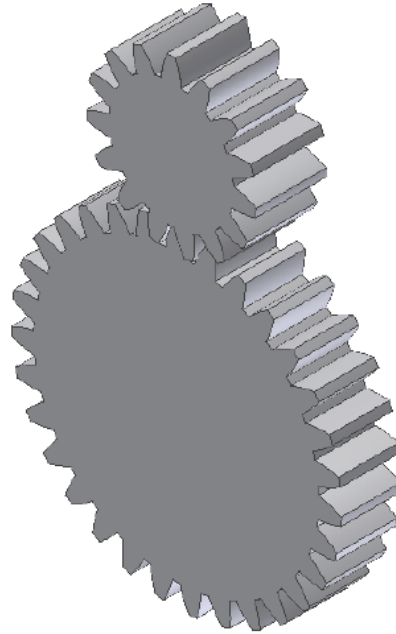
- Μετωπικοί (με ευθείς ή ελικοειδείς οδόντες) οι οποίοι ονομάζονται και κυλινδρικοί
- Κωνικοί
- Ελικοειδείς ασύμβατων αξόνων
- Σύστημα ατέρμονα κοχλία – οδοντωτού τροχού

όπως αναλυτικότερα παρουσιάζονται παρακάτω.

### 1.3.1 Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί

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 να 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. Μοντέλο ζευγών των παραπάνω τροχών παρατίθενται στα παρακάτω σχήμα 1-2.



**Σχήμα 1 - 2:** Μοντέλο ζεύγους εξωτερικών μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως.

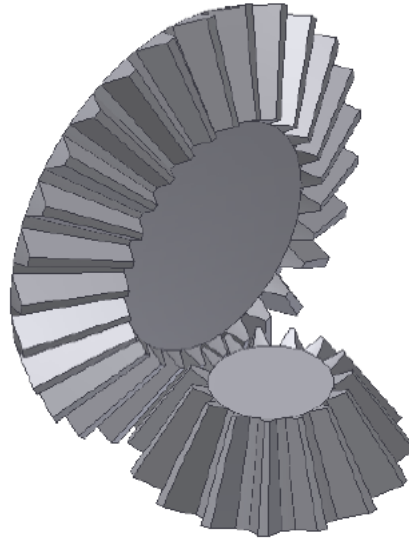
### 1.3.2 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί

Οι κωνικοί τροχοί χρησιμοποιούνται για την μετάδοση κινήσεως και μεταφορά ισχύος μεταξύ τεμνομένων ατράκτων. Οι τροχοί αυτοί έχουν μορφή κόλουρου κώνου του οποίου οι οδόντες μπορεί να είναι ευθείς ή τμήματα εξελιγμένης 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.

Τα είδη κωνικών τροχών είναι τα ακόλουθα:

- Κωνικοί τροχοί με ευθείς οδόντες
- Κωνικοί τροχοί ZEROL
- Τοξωτοί κωνικοί τροχοί
- Υποειδείς τροχοί

Ένα 3-D μοντέλο ζεύγους κωνικών τροχών με ευθείς οδόντες παρατίθεται στο σχήμα 1-3.



**Σχήμα 1 - 3:** Μοντέλο ζεύγους κωνικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδοντώσεως.

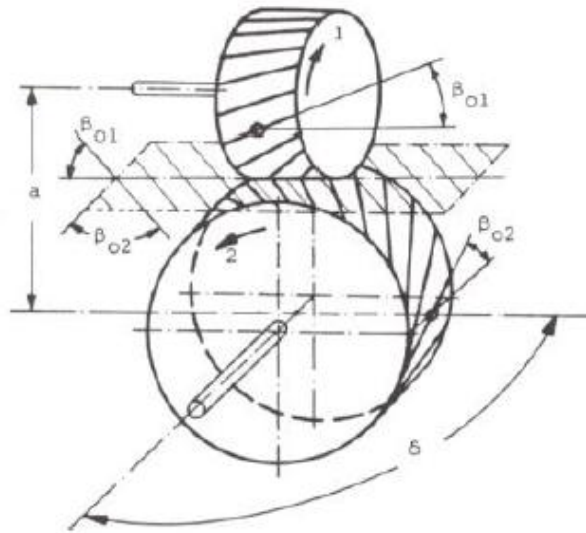
### 1.3.3 Ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί ασύμβατων αξόνων

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

$$\delta = \beta_{01} + \beta_{02}$$

όπου  $\beta_{01}$  και  $\beta_{02}$  είναι οι κλίσεις των οδόντων των τροχών, σχήμα 1- 4. Γενικώς είναι

$$\beta_{01} = \beta_{02}$$



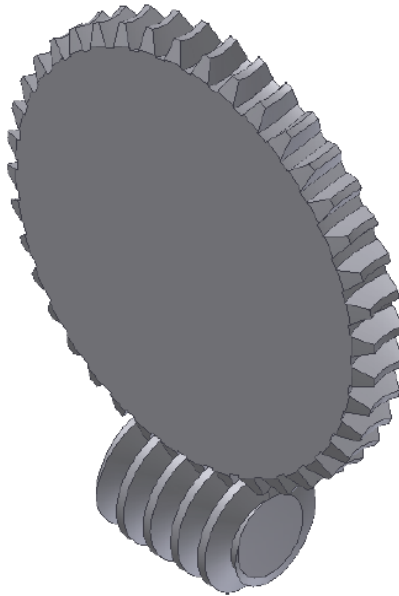
**Σχήμα 1 - 4:** Βαθμίδα ελικοειδών τροχών ασύμβατων τροχών.

Οι οδόντες δύο συνεργαζομένων ελικοειδών τροχών ασύμβατων 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.

#### **1.3.4 Σύστημα ατέρμονα κοχλία – οδοντωτού τροχού**

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 μοντέλο του συγκεκριμένου συστήματος παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα 1-5.





**Σχήμα 1 - 5:** Μοντέλο συστήματος ατέρμονος κοχλία – οδοντωτού τροχού.

#### **1.4 ΛΙΠΑΝΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ**

Η λίπανση έχει σκοπό να ελαττώσει την τριβή και επομένως τη φθορά στις κατανομές των οδόντων και να απάγει τη δημιουργούμενη θερμότητα. Το λιπαντικό θα πρέπει επιπλέον να μην έχει βλαβερή επίδραση στους οδοντωτούς τροχούς, τα έδρανα και τους δακτυλίους στεγανότητας και να μην αλλοιώνεται εύκολα κατά τη χρήση [1].

Τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα ορυκτά έλαια. Σε μικρές περιφερειακές ταχύτητες χρησιμοποιούνται λίπη. Λόγω της απλότητας της, η λίπανση με «εμβάπτιση» είναι σήμερα ο ποιο διαδεδομένος τρόπος λίπανσης. Οι οδοντωτοί τροχοί βυθίζονται στο λάδι (βάθος 1...6 module) που έρχεται σε επαφή με τις κατατομές των οδόντων άμεσα ή έμμεσα με εκτίναξη σταγόνων.

Για περιφερειακές ταχύτητες άνω των 12 *m/sec* χρησιμοποιείται η λίπανση με εκτόξευση. Εδώ το λάδι εκτοξεύεται με τη βοήθεια αντλίας, σε πλατεία δέσμη λίγο πριν ή ακριβώς στο σημείο επαφής των οδόντων. Ο πίνακας 1-1 δίνει τους διαφόρους τρόπους λίπανσης συναρτήσει της περιφερειακής ταχύτητας.

Περιφερειακή ταχύτητα $U$ (m/sec)	Είδος λίπανσης.
0÷0,8	με λίπος
0,8÷4	με λίπος ή εμβαπτισμό
4÷12	με εμβαπτισμό
12÷60	με εκτόξευση

**Πίνακας 1 - 1:** Τρόποι λίπανσης συναρτήσει της περιφερειακής ταχύτητας.

Το λάδι λίπανσης πρέπει να αλλαχθεί για πρώτη φορά μετά από 200 – 300 ώρες λειτουργίας. Η ποσότητα του λιπαντικού πρέπει να είναι τόση ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης. Σε διαρκή λειτουργία με το μέγιστο φορτίο η θερμοκρασία δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 60 °C (ανώτατο όριο 80 °C), διότι υψηλότερες θερμοκρασίες μειώνουν τη διάρκεια ζωής του λιπαντικού και τις ιδιότητες της λίπανσης.

## 1.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ

Οι οδοντωτοί τροχοί που είναι κατάλληλοι για μετάδοση κίνησης και μεταφορά ισχύος σε μηχανισμούς υψηλών απαιτήσεων κατασκευάζονται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους [7].

### 1.5.1 Κοπή σε φραιζομηχανή με εργαλείο μορφής (Milling cutter)

Για κοπή οδοντώσεων με αυτή τη μέθοδο απαιτείται κατάλληλο εργαλείο για συγκεκριμένη κατατομή οδόντων. Το εργαλείο αυτό έχει τη μορφή διακένου μεταξύ των οδόντων και χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει το υλικό μεταξύ των υπό κατασκευή οδόντων. Με τη μέθοδο αυτή κατασκευάζεται κάθε φορά ένα διάκενο και για να κατασκευαστεί το επόμενο διάκενο, ο υπό κατασκευή τροχός περιστρέφεται κατά  $2\pi/z$ , όπου  $z$  ο αριθμός των οδόντων που θα κατασκευαστούν.



Σχήμα 1 - 6 : Κοπή οδόντος με εργαλείο μορφής

Είναι φανερό ότι το κάθε κοπτικό εργαλείο είναι ικανό να κατασκευάσει μόνο ενός ζεύγους  $m$  και  $z$  τροχό. Όμως μια τόσο περιορισμένη χρήση του εργαλείου είναι τελείως αντισυμβαλλόμενη, γι' αυτό από κάθε τέτοιο εργαλείο κατασκευάζονται οκτώ έως δέκα διαφορετικοί τροχοί ίδιου module αλλά διαφορετικών αριθμών οδόντων  $z$ .

Φυσικά, από τους τροχούς της σειράς αυτής μόνο για μία τιμή του  $z$  επιτυγχάνεται ακριβής κατασκευή, ενώ για τις υπόλοιπες τιμές του  $z$  οι τροχοί που παράγονται δεν είναι ακριβείς.

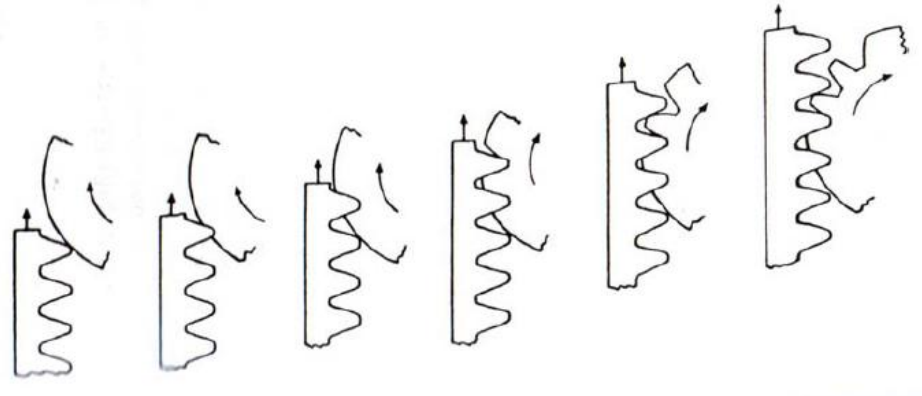
### 1.5.2 Κοπή με οδοντωτό κανόνα (rack generation)

Ο οδοντωτός κανόνας ουσιαστικά είναι ένας οδοντωτός τροχός με άπειρη ακτίνα και όπως ήδη αναφέρθηκε μπορεί να συνεργαστεί με όλους τους τροχούς της ίδιας οικογένειας τροχών, άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κοπτικό εργαλείο όλων αυτών των τροχών. Το υλικό του κανόνα είναι βαμμένος χάλυβας και οι ακμές του έχουν διαμορφωθεί με ιδιότητες κοπτικών εργαλείων.

Κατά τη διαδικασία της κοπής ο κανόνας παλινδρομεί παράλληλα με τον άξονα του υπό κατασκευή τροχού και μετά από κάθε αφαίρεση υλικού, ο τροχός περιστρέφεται κατά μικρή γωνία και ο κανόνας μετατοπίζεται κατά απόσταση ίση με το τόξο που διανύθηκε επί του αρχικού κύκλου του τροχού, ώστε να γίνεται κύλιση χωρίς ολίσθηση.

Προφανώς, απαιτείται ένας μόνο κανόνας για κάθε module, οποιοσδήποτε και να είναι ο αριθμός οδόντων των τροχών που κατασκευάζονται. Μόνο που αυτή η μέθοδος μειονεκτεί όσον αφορά τόσο την ταχύτητα κατασκευής των τροχών, καθώς

είναι πολύ μικρή, όσο και την ανακρίβεια που προκαλείται λόγω της αναγκαίας συχνής επανατοποθέτησης του κανόνα, ο οποίος διαθέτει περιορισμένο αριθμό οδόντων.

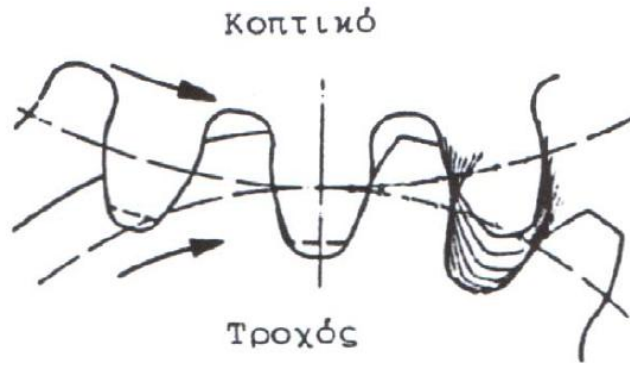


Σχήμα 1 - 7 : Κοπή τροχού με κανόνα

### 1.5.3 Κοπή τροχών με τη μέθοδο Fellows (Gear shaper)

Κατά τη μέθοδο Fellows η διαδικασία κοπής είναι παρόμοια με την κοπή από οδοντωτό κανόνα, με μόνη διαφορά ότι το κοπτικό εργαλείο είναι ένας οδοντωτός τροχός και όχι κανόνας. Οι δύο τροχοί περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα και ο τροχός – κοπτικό εργαλείο παλινδρομεί παράλληλα προς τον άξονά του αφαιρώντας υλικό και δημιουργώντας τα μεταξύ των οδόντων διάκενα.

Η μέθοδος αυτή παράγει τροχούς μεγαλύτερης ακρίβειας από την κοπή με κανόνα, καθώς με αυτή δεν υπάρχει η ανάγκη και συνεπώς το σφάλμα επανατοποθέτησης του κοπτικού εργαλείου. Αξίζει να σημειωθεί πως επιπλέον δίνεται η δυνατότητα κοπής ακόμα και εσωτερικής οδόντωσης, όμως το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το παραμικρό σφάλμα της κατατομής έστω και ενός οδόντος του κοπτικού εργαλείου, μεταφέρεται απ' ευθείας στις κατατομές των αντίστοιχων οδόντων του τροχού που κατασκευάζεται.

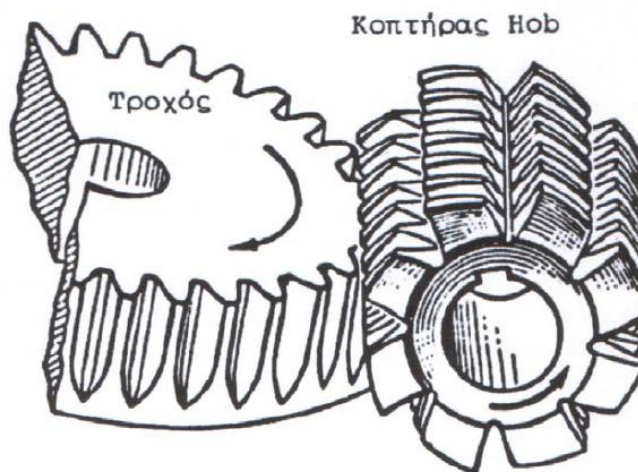


Σχήμα 1 - 8 : Κοπή με την μέθοδο Fellows

#### 1.5.4 Κοπή οδόντων με κοπτικό εργαλείο Hob (Hobbing)

Κατά τη μέθοδο αυτή περιστρέφονται τόσο ο κοπτήρας Hob όσο και ο υπό κατασκευή τροχός, συνδυάζοντας έτσι την κοπή με εργαλείο μορφής, όσον αφορά την αφαίρεση υλικού, και την κοπή με κανόνα, από κινηματικής πλευράς. Η κεφαλή της έλικας του κοπτικού υποκαθιστά τη μεταφορική κίνηση του κανόνα, ενώ η μετακίνηση του κοπτήρα Hob παράλληλα προς τον άξονα του τροχού μέχρι το απαιτούμενο πλάτος του τροχού, υποκαθιστά την κίνηση του εργαλείου μορφής.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται επανατοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου, καθώς επιπλέον ότι κάθε διάκενο δημιουργείται από πολλούς οδόντες του κοπτικού και έτσι η επίδραση τυχόν ατελειών ενός από αυτούς στην κατατομή των παραγόμενων οδόντων εξομαλύνεται από τη διαδικασία κοπής από τους υπόλοιπους οδόντες του κοπτήρα.



Σχήμα 1 - 9 : Κοπή με εργαλείο τύπου Hob

### **1.5.5 Κοπή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching)**

Η αφαίρεση υλικού επιτυγχάνεται με κοπτικό που ωθείται ή έλκεται πάνω σε μία επιφάνεια σε γλύφανο. Συνήθως εφαρμόζεται στην παραγωγή εσωτερικών οδοντώσεων, όπου όλοι οι οδόντες κατεργάζονται ταυτόχρονα, πράγμα που αποτελεί και βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου και την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογή σε μεγάλη παραγωγή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με τις μεθόδους Fellows και Hobbing οι οδοντώσεις που παράγονται έχουν πάχος οδόντος στην περιοχή της κεφαλής ελάχιστα μικρότερο από αυτό που προβλέπεται από τη θεωρητική ανάλυση, έχουν δηλαδή μία μικρή ανακούφιση ακμής στο πάχος κεφαλής. Τα αντίστοιχα κοπτικά εργαλεία έχουν υποστεί κάποια μετατροπή στην περιοχή της κατατομής ποδός των οδόντων τους για να μπορούν να κόψουν στον τροχό οδόντες στενότερους στην περιοχή της κεφαλής τους. Σε βαθμίδες συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών αυτού του είδους, τα ζεύγη οδόντων κατά την εμπλοκή τους, στο πρώτο σημείο της τροχιάς επαφών, παραλαμβάνουν το φορτίο τους πιο ομαλά. Έτσι αποφεύγεται η δημιουργία οξέων αδρανειακών φαινομένων και επιπλέον τυχόν σφάλματα κατατομών και τοποθετήσεων των αξόνων έχουν μικρότερη επίδραση στην εμφάνιση ταλαντώσεων και θορύβου.

Υπάρχουν και μέθοδοι παραγωγής οδοντωτών τροχών μεγάλων ποσοτήτων με μικρό κόστος, χαμηλότερης όμως ποιότητας. Αυτές είναι οι εξής παρακάτω:

### **1.5.6 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με χύτευση υπό πίεση**

Οι οδοντωτοί τροχοί που παράγονται με τη μέθοδο αυτή χυτεύονται υπό πίεση σε κατάλληλες μήτρες. Όπως ισχύει για όλες τις χυτεύσεις, οι μεταβολές του οδοντωτού τροχού λόγω συστολών και η ακρίβεια με την οποία είναι κατασκευασμένο το καλούπι, επηρεάζουν την ποιότητα του τροχού που παράγεται. Για τη βελτίωση της ποιότητας είναι απαραίτητες διεργασίες ποιοτικής αναβάθμισης της επιφάνειας του τροχού, που σαφώς επιδρούν αρνητικά στο κόστος παραγωγής. Πάντως τα χυτά δόντια δεν είναι κατάλληλα για περιφερειακές ταχύτητες μεγαλύτερες από  $2 \text{ m/sec}$ .



**Σχήμα 1 - 10 :** Οδοντωτός τροχός με χύτευση

### **1.5.7 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με έλαση**

Κατά την ψυχρή έλαση το μέταλλο περνάει μέσα από διαφορετικού μεγέθους ανοίγματα και το τελικό προϊόν είναι ένας οδοντωτός τροχός πολύ μεγάλου πλάτους, από τον οποίο κόβονται πολλοί περισσότεροι ίδιου module και ίδιου αριθμού οδόντων τροχοί με ίδια ή διαφορετικά πλάτη.

Κατά τη θερμή έλαση το υλικό ωθείται, παρά έλκεται όπως στην ψυχρή έλαση, μέσα από τον extruder. Η απώλεια υλικού είναι ελάχιστη και οι παραγόμενοι τροχοί έχουν μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις τους και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Η μέθοδος αυτή συμφέρει οικονομικά για παραγωγή οδοντωτών τροχών μικρών διαστάσεων, όπως είναι τα πινιόν, και πολλές φορές είναι αδύνατη η εφαρμογή οποιασδήποτε άλλης μεθόδου για την κατασκευή τέτοιων τροχών, ακριβώς λόγω των μικρών διαστάσεων.

### **1.5.8 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με την μέθοδο Sintering**

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μέθοδο κωνομεταλλουργίας, κατά την οποία μεταλλική σκόνη οδηγείται υπό πίεση σε κατάλληλα καλούπια για να πάρει τη μορφή οδοντωτού τροχού. Στη συνέχεια το προϊόν αυτό τοποθετείται σε κλίβανο ώστε θερμαινόμενο να αποκτήσει αντοχή. Συνεπώς το υψηλό κόστος των εγκατεστημένων

μηχανών, για μικρή παραγωγή κρίνεται απαγορευτικό, παρόλο που η ακρίβεια της κατασκευής είναι αρκετά καλή.



**Σχήμα 1 - 11 :** Οδοντωτοί τροχοί με την μέθοδο Sintering

### **1.5.9 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με την μέθοδο Stamping**

Με τη μέθοδο αυτή παράγονται οδοντωτοί τροχοί από μεταλλικά φύλλα με τη χρήση πρέσας και κατάλληλης μήτρας για την κοπή τους. Έχουν μικρό πλάτος, λόγω της φύσεως της μεθόδου, και για απαιτήσεις μεγαλύτερου πλάτους συνήθως συγκολλούνται ή τοποθετούνται μαζί πολλοί λεπτότεροι τροχοί, καθώς η εφαρμογή τους περιορίζεται σε κατασκευές μικρών έως ελαφρών φορτίων.



**Σχήμα 1 - 12 :** Οδοντωτός τροχός με την μέθοδο Stamping



### 1.5.10 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με την μέθοδο Injection molding

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλαστικών οδοντωτών τροχών με μικρό κόστος και σε μεγάλες ποσότητες, και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να παράγει τροχούς σε ασυνήθεις και πολύπλοκες μορφές. Κατά τη μέθοδο αυτή πρέπει να προβλέπονται μεγάλες χάρες κατατομών, λόγω του πολύ μεγαλύτερου θερμικού συντελεστή των πλαστικών υλικών από τον αντίστοιχο συντελεστή του χάλυβα, για την ομαλή συνεργασία των τροχών σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος που πρόκειται να λειτουργήσουν. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη την αντικατάσταση μεταλλικών τροχών από πλαστικούς.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου για ελαφρά φορτιζόμενους τροχούς από πλαστικά υλικά, είναι τα εξής:

- Παράγονται τροχοί οποιοδήποτε μεγέθους και πολύπλοκων μορφών
- Συνήθως δεν απαιτείται ποιοτική αναβάθμιση της επιφάνειάς τους
- Ενώ το αρχικά εγκατεστημένο κόστος είναι υψηλό, μεγάλη παραγωγή δίνει προϊόντα χαμηλού κόστους
- Απαιτούν ελάχιστη ή καθόλου λίπανση, λόγω του χαμηλού συντελεστή τριβής των υλικών αυτών
- Οι ανοχές δεν έχουν μεγάλη σημασία. Επειδή η ενδοτικότητα των υλικών αυτών επιτρέπει στους τροχούς να συνεργάζονται ομαλά και χωρίς θόρυβο.



**Σχήμα 1 - 13 :** Οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι με την μέθοδο Injection molding

## 1.6 ΥΛΙΚΑ-ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

### 1.6.1 Υλικά κατασκευής

Τα πιο συνηθισμένα υλικά κατασκευής οδοντώσεων είναι τα κράματα του σιδήρου, δηλαδή χυτοσίδηροι και χάλυβες [1].

Ο χυτοσίδηρος, ιδιαίτερα ο σκληρός, έχει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και στις φθορές από σκόνες, άμμο κλπ. και γι' αυτό τον προτιμάμε για εργασίες σε περιβάλλον με τέτοια στοιχεία ή υγρασία. Δεν είναι όμως κατάλληλος για μεγάλες ταχύτητες και μεγάλες απαιτήσεις κατασκευαστικής ακρίβειας.

Ο χάλυβας είναι πιο κατάλληλος για μεγάλες ταχύτητες και ακριβείς διαστάσεις, αλλά σε περιβάλλοντα με ρύπους και υγρασία χρειάζεται προστασία και λίπανση. Σε περιπτώσεις που η λειτουργία εμφανίζει κρουστικά φορτία οι χαλύβδινοι τροχοί υφίστανται επιφανειακή βαφή και σκλήρυνση (ενανθράκωση) μέχρι βάθους περίπου 1 mm. Διατηρούν έτσι εσωτερικά την ελαστικότητα του χάλυβα.

Όταν το βάρος της διάταξης επιβάλλεται να είναι όσο το δυνατό μικρότερο, χρησιμοποιούνται κράματα του αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται επίσης κοινοί και φωσφορούχοι ορείχαλκοι.

Όταν οι τροχοί εργάζονται σε διαβρωτικό και οξειδωτικό περιβάλλον, χρησιμοποιούνται ως υλικά κατασκευής κεραμικά, συνθετικές ρητίνες και πλαστικά. Τα τελευταία εργάζονται και με σχετικά χαμηλό θόρυβο, δεν έχουν όμως μεγάλη μηχανική αντοχή.

Για μικρές περιφερειακές ταχύτητες χρησιμοποιούνται συνήθως οδοντωτοί τροχοί με ευθείς οδόντες. Για μεγάλες περιφερειακές ταχύτητες προτιμούνται οδοντωτοί τροχοί με κεκλιμένους (πλάγιους) οδόντες, γιατί προκαλούν λιγότερο θόρυβο. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει βέβαια να ληφθούν υπόψη, κατά την έδραση των αξόνων και οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται.

Χονδρικά μπορούμε να εκλέξουμε το υλικό για την κατασκευή των οδοντωτών τροχών από τον πίνακα 1-2. Αν όμως το επιβάλλει ο υπολογισμός των οδόντων σε θραύση και πίεση επιφάνειας, θα πρέπει να γίνει αλλαγή του υλικού.

Χαρακτηριστικά	Υλικό	
	Πινιόν	Τροχού
1. Μικρή ισχύς και μικρός αριθμός στροφών (ανυψωτικά μηχανήματα).	Χυτοσίδηρος St42, St50	Χυτοσίδηρος
2. Μέση ισχύς και μέσος αριθμός στροφών (μικρές εργαλειομηχανές)	Χυτοσίδηρος, χυτοχάλυβας St50, St60	Χυτοσίδηρος, χυτοχάλυβας Σφαιροειδής χυτοσίδηρος
3. Μεγάλη ισχύς και μεγάλος αριθμός στροφών (μεγάλες εργαλειομηχανές)	St60, St70 Βελτιωμένοι χάλυβες	Χυτοσίδηρος, χυτοχάλυβας Σφαιροειδής χυτοσίδηρος Βελτιωμένοι χάλυβες
4. Τροχοί μεγάλων απαιτήσεων (πλοία αυτοκίνητα)	St60, St70 Βαμμένος και βελτιωμένος, βελτιωμένοι χάλυβες, χάλυβες ενανθράκωσης	Χυτοχάλυβες, βελτιωμένοι χάλυβες, χάλυβες ενανθράκωσης

**Πίνακας 1 - 2:** Εκλογή υλικών για την κατασκευή οδοντωτών τροχών.

Για το πινιόν χρησιμοποιείται συνήθως πιο ανθεκτικό υλικό από το υλικό του συνεργαζόμενου μεγάλου τροχού, διότι λόγω μεγαλύτερου αριθμού στροφών (περισσότερες εμπλοκές) καταπονείται περισσότερο.

Ίδιο υλικό για πινιόν και τροχό, σε μη σκληρυμένους οδοντωτούς τροχούς, θα πρέπει κατά το δυνατόν να αποφεύγεται και λόγω αυξημένου κινδύνου σε «άρπαγμα», ιδιαίτερα όταν ο υπολογισμός σε πίεση επιφάνειας είναι οριακός.

Επιφανειακή βαφή σε χαλύβδινους οδόντες προσδίδει μια ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή σε φθορά. Ο πυρήνας του οδόντα πρέπει να παραμένει συνεκτικός για την καλύτερη παραλαβή κρούσεων. Οι οδοντωτοί τροχοί που λειαίνονται μετά την θερμική επεξεργασία εργάζονται ιδιαίτερα αθόρυβα και ομαλά. Μη σκληρυμένοι οδοντωτοί τροχοί υφίστανται απόξεση σαν κατεργασία αποπεράτωσης.

Όταν το πινιόν, σε σχέση με το άξονα, έχει μικρή αρχική διάμετρο, τότε κατασκευάζεται ολόσωμα με τον άξονα. Μπορεί επίσης να συγκολληθεί πάνω στον άξονα ένας δακτύλιος πριν από την κοπή της οδόντωσης. Στην περίπτωση αυτή η κατεργασία στον τόρνο είναι μικρότερη, έτσι ώστε η κατασκευή πιθανόν να είναι φθηνότερη. Πινιόν με μεγαλύτερες διαστάσεις τοποθετούνται με σφήνα πάνω στον άξονα. Λόγω της συγκέντρωσης τάσεων στον σφηνόδρομο, η απόσταση από τον κύκλο κεφαλής μέχρι τη βάση του σφηνόδρομου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον  $4m$  ( $m$ =module).

Μεγάλοι οδοντωτοί τροχοί διαμορφώνονται με πλήμνη, στεφάνη και αρκετούς βραχίονες. Πολλές φορές φέρουν μία ξεχωριστή στεφάνη με τους οδόντες, τη στεφάνη επίσκεψης. Στην περίπτωση αυτή τα υπόλοιπα μέρη των τροχών (πλήμνη, βραχίονες κ.λπ.) κατασκευάζονται κατά κανόνα χυτά ή σε περίπτωση μικρού αριθμού τεμαχίων, συγκολλητά. Η συγκολλητή κατασκευή έχει επιπλέον το πλεονέκτημα να είναι ελαφρύτερη. Λεπτομερέστερα προβλέπεται εδώ η συγκόλληση, πάνω σε μία χαλύβδινη πλήμνη, ενός δίσκου που φέρει στεφάνη γυρισμένη από έλασμα κατάλληλου πάχους. Συγκολλητά νεύρα ενισχύουν την κατασκευή. Οι περιφερειακές ραφές στην πλήμνη ελέγχονται σε διάτμηση.

Πολύ μεγάλοι οδοντωτοί τροχοί κατασκευάζονται διαιρούμενοι για λόγους συναρμολόγησης ή μεταφοράς. Ο αρμός διαίρεσης τοποθετείται στο μέσο δύο βραχιόνων και δύο κενών οδόντων. Τα δύο μισά του τροχού συνδέονται κατόπιν με κοχλίες κοντά στη στεφάνη και στην πλήμνη.

## **1.7 ΒΛΑΒΕΣ ΟΔΟΝΤΩΝ**

Η γνώση των βλαβών που μπορεί να εμφανισθούν στους οδόντες ενός οδοντωτού τροχού καθώς και των αιτιών που τις προκαλούν, είναι ένα πολύ ουσιαστικό στοιχείο, απαραίτητο για το σωστό υπολογισμό, τη διαμόρφωση και την εκλογή του κατάλληλου υλικού ενός συστήματος οδοντωτών τροχών [1].

Έχουμε βλάβες θραύσης και βλάβες κατατομής. Η θραύση ενός οδόντα μπορεί να προέλθει από στατική ή δυναμική φόρτιση.

Η στατική θραύση οφείλεται σε στιγμιαία υπερφόρτιση του τροχού και εμφανίζεται στην βάση του οδόντα. Η θραύση αυτή μπορεί να προέλθει αν από την αρχή διευκρινισθούν τα πιθανά αίτια της υπερφόρτισης και ληφθούν αντίστοιχες επιτρεπόμενες τιμές στον υπολογισμό. Πρόληψη της θραύσης αυτής μπορεί επίσης να γίνει με χρησιμοποίηση συστημάτων προστασίας από υπερφόρτιση.

Η δυναμική θραύση οφείλεται σε συνεχώς επαναλαμβανόμενες φορτίσεις πάνω από τα όρια της δυναμικής ή χρονικής αντοχής του υλικού. Στη δυναμική θραύση παίζουν ρόλο σφάλματα υλικού, θερμικής επεξεργασίας, κατεργασίας των οδόντων και η συγκέντρωση τάσεων (π.χ. μικρή ακτίνα καμπυλότητας) στον πόδα του οδόντα.

Μέτρα για την αντιμετώπιση αυτής της θραύσης είναι η αύξηση της αντοχής του οδόντα στον πόδα π.χ. με θερμική κατεργασία βελτίωσης του υλικού, αύξηση του module, αποφυγή των σημείων συγκέντρωσης τάσεων ή λαμβάνοντας υπόψη πρόσθετες καταπονήσεις στον υπολογισμό.

Επίσης παρατηρούνται θραύσεις στη κεφαλή του οδόντα που οφείλονται π.χ. σε λάθη στην παραλληλότητα των αξόνων ή σε μεγάλη ελαστική παραμόρφωση ή σε λάθη κοπής των οδόντων, οπότε δεν έχουμε ομοιόμορφη κατανομή της φόρτισης σε όλο το πλάτος του οδόντα, ή σε χρησιμοποίηση πολύ σκληρού υλικού.

Θα πρέπει λοιπόν τα αίτια αυτά να ληφθούν υπόψη στην κατασκευή των τροχών παίρνοντας π.χ. μικρότερο πλάτος οδόντων, ιδιαίτερα σε πινιόν – πρόβολο, ή πιο μαλακό υλικό.

Πολλές φορές εμφανίζονται πάνω στην επιφάνεια των οδόντων, στην περιοχή του κύκλου κύλισης, εκκοιλάνσεις (μικρά «σκαψίματα» , pitting), που πιστεύεται ότι προέρχονται από τη συμπίεση λεπτόρευστου λαδιού λίπανσης μέσα σε μικρές χαραγές του υλικού που μεγαλώνουν σιγά – σιγά. Οι χαραγές αυτές μπορεί να οφείλονται, σε ανομοιόμορφη κατανομή της πίεσης επιφάνειας, από αιχμές πιέσεων που υπερβαίνουν το όριο ροής του υλικού. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό σε βελτιωμένους ή σκληρυμένους χάλυβες, ενώ σε μαλακότερους χάλυβες τα «σκαψίματα» επικαλύπτονται από φθορές ολίσθησης και πλαστικής παραμόρφωση. Για την αντιμετώπιση αυτής της βλάβης θα πρέπει να μειωθεί η τοπική υπερφόρτιση της κατανομής του οδόντα ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή του οδόντα (π.χ. με σκλήρυνση) ή να χρησιμοποιηθεί πιο παχύρευστο λάδι.

Φθορές των οδόντων («άρπαγμα», galling) εμφανίζονται και όταν δεν έχει γίνει καλή εκλογή των υλικών του ζεύγους των τροχών ή όταν έχουμε ανεπαρκή λίπανση. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως σε τροχούς με σχετικό μεγάλο module και μικρή περιφερειακή ταχύτητα, η δε επίδραση του μειώνεται με τη χρησιμοποίηση σκληρυμένων οδόντων και παχύρευστου λιπαντικού.

Στην συνέχεια παρατίθενται κάποιες φωτογραφίες με διάφορες φθορές που έχουν παρατηρηθεί επάνω σε οδοντωτούς τροχούς [23].

### 1.7.1 Θραύση δοντιών

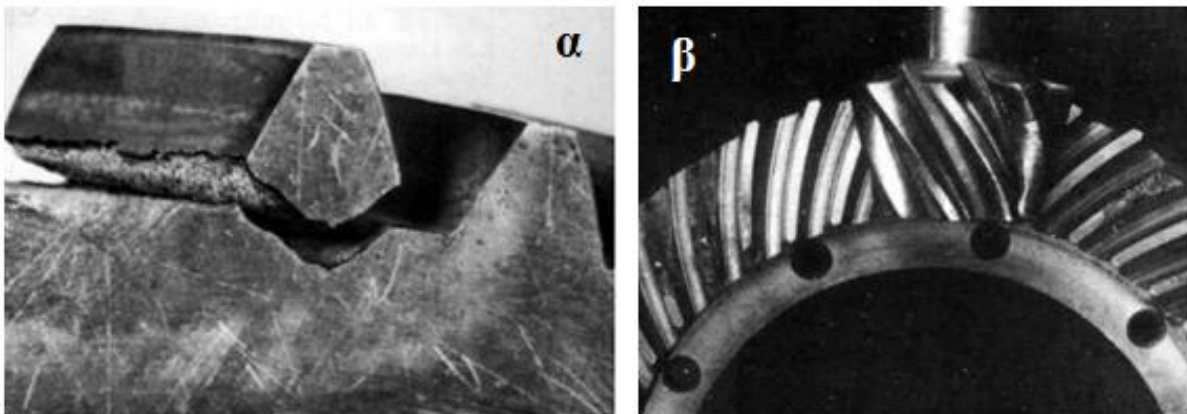
Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι θραύσης των δοντιών στα γρανάζια, εκείνης που απορρέει από υπερφόρτωση και εκείνο της κόπωσης.

#### Υπερφόρτωση

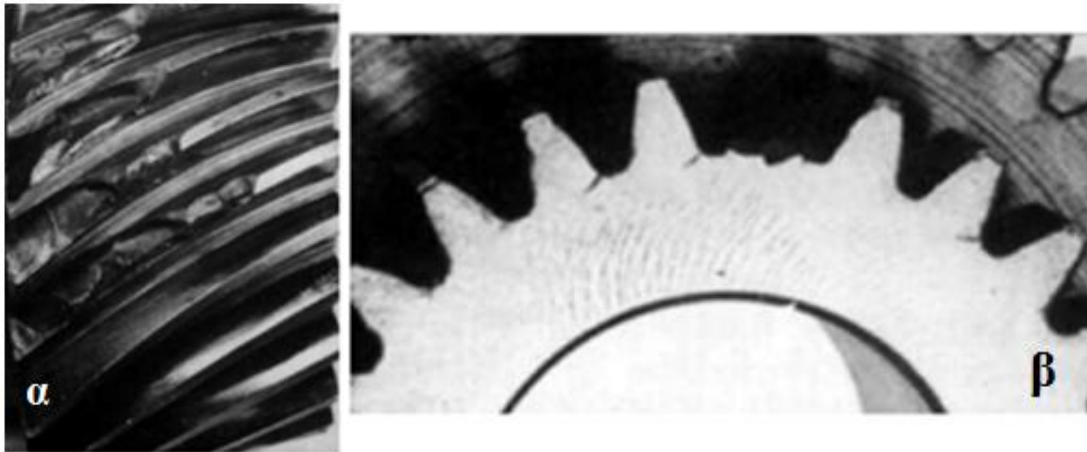
Υπερφόρτωση μπορεί να προκύψει από κάποια σημαντική στρεπτική ροπή στο σύστημα κίνησης, που συχνά συνδέεται με την αποτυχία μιας μηχανής και οδηγείται στο κιβώτιο ταχυτήτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι επιφάνειες παρουσιάζουν μια ενιαία ρήξη θραύσης χωρίς κανένα σημάδι κόπωσης και συνήθως ένα ή δύο δόντια επηρεάζονται. Εκτός από τα σπασμένα δόντια, τα υπόλοιπα είναι συνήθως σε καλή κατάσταση, χωρίς σημάδια ρωγμών. Παρόμοια αποτελέσματα μπορούν επίσης να προκύψουν εάν ένα ξένο σκληρό σώμα εισέρθει στο κιβώτιο ταχυτήτων. Αυτό είναι γενικά προφανές και το σώμα το οποίο έχει προκαλέσει το πρόβλημα μπορεί να βρεθεί στα συντρίμια στον πυθμένα του κιβωτίου ταχυτήτων.

#### Κόπωση

Η θραύση ενός δοντιού μπορεί επίσης να προκύψει από κόπωση των δοντιών κάτω των κυκλικών φορτίων κάμψης που εφαρμόζεται στα δόντια κατά την κανονική λειτουργία τους. Αυτό είναι ένα από τα βασικά κριτήρια αστοχίας και λαμβάνεται υπ' όψιν στον εξοπλισμό του σχεδιασμού των οδοντωτών τροχών. Η αποτυχία ξεκινά ως μια ρωγμή που συνήθως είναι στη ρίζα του δοντιού και προχωράει κατά μήκος της βάσης του δοντιού μέχρι να σπάσει πλήρες το δόντι. Όταν η αποτυχία προκύπτει από αυτήν την αιτία συχνά υπάρχουν άλλα παρακείμενα δόντια με εμφανείς ρωγμές σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης.



**Σχήμα 1 - 14 :** α) Θραύση δοντιού από φορτία κάμψης στην ρίζα του δοντιού  
β) Κωνικός οδοντωτός τροχός με σπασμένα δόντια λόγω του υψηλού φορτίου κραδασμών

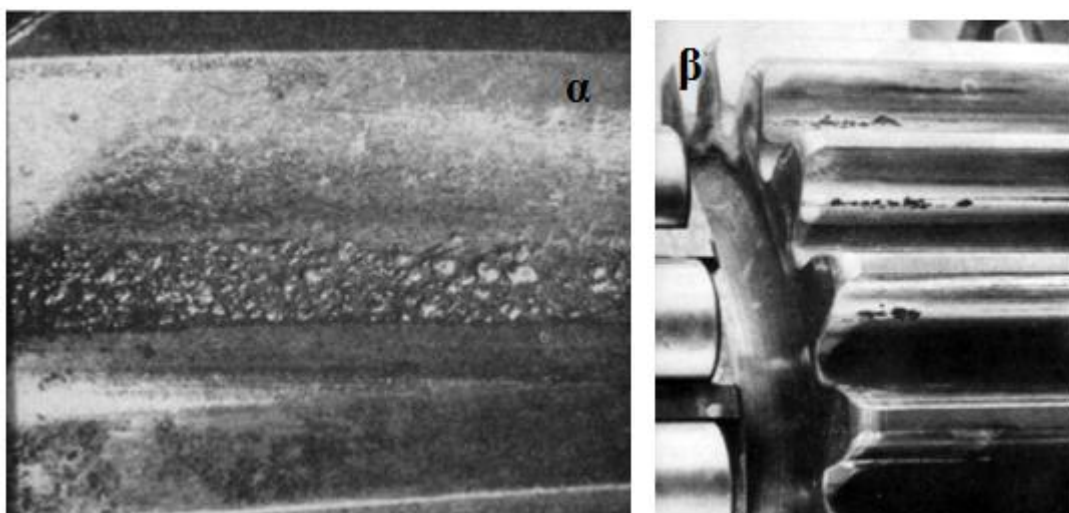


**Σχήμα 1 - 15 :** α) Θραύση δοντιού στο ένα άκρο ενός γριναζιού που σχετίζεται με κακή ευθυγράμμιση  
β) Ένα γριναζί με σπασμένο δόντι και παρακείμενα δόντια με ρωγμές.

### 1.7.2 Σημειακή διάβρωση δοντιού

Οι επιφάνειες των δοντιών ενός γριναζιού υποφέρουν από σημειακή διάβρωση όταν υπόκειται σε υπερβολική πίεση επαφής. Τέτοια «σκαψίματα» στα δόντια του γριναζιού συχνά θεραπεύονται και μπορεί να γίνει πάλι λείο μετά από περαιτέρω λειτουργία ο τροχός. Διάβρωση αυτού του χαρακτήρα έχουν την τάση να ξεκινούν κατά τη διάρκεια των πρώτων εκατό ωρών λειτουργίας.

Εάν ελέγχεται σε τακτά χρονικά διαστήματα η συχνότητα εμφάνισης του μπορεί να παρακολουθηθεί. Τα «σκαψίματα» αυτού του είδους θα μειώσουν τελικά το χρόνο ζωής του γριναζιού, ενώ προοδευτικά θα συνδέεται με τη συνεχή υπερφόρτωση και σταδιακά ίσως οδηγήσει σε θραύση των δοντιών.

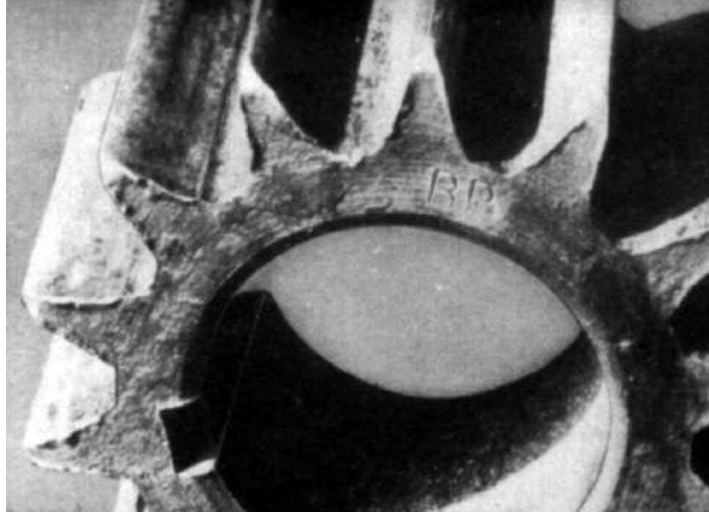


**Σχήμα 1 - 16 :** α) Σημειακή διάβρωση στο ύψος ποδός του δοντιού ενός ελικοειδούς γριναζιού  
β) Σημειακή διάβρωση στον αρχικό κύκλο, λειτουργεί σε υψηλό φορτίο και χαμηλή ταχύτητα



### 1.7.3 Πλαστική παραμόρφωση των δοντιών

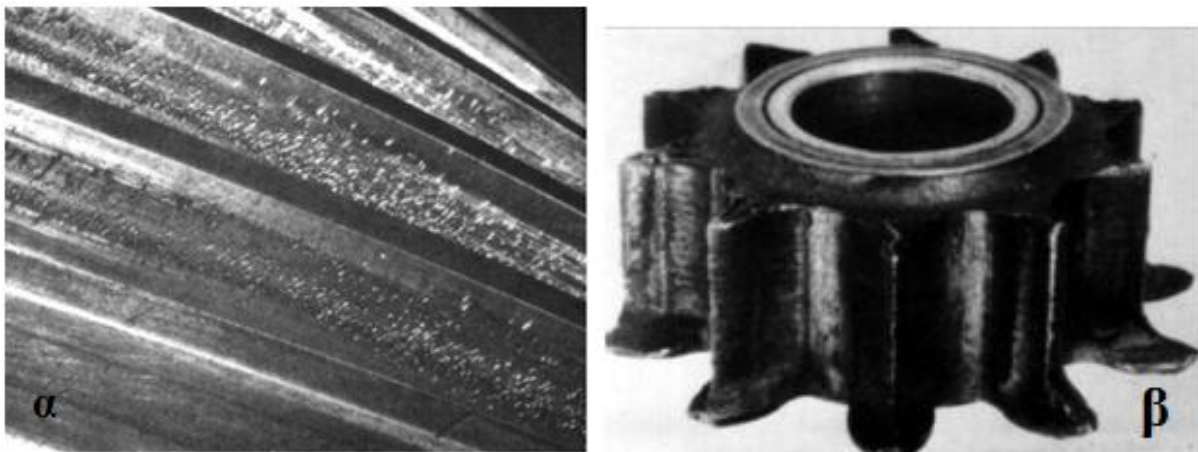
Όταν τα δόντια ενός οδοντωτού τροχού δεν έχουν υποστεί επιφανειακή σκλήρυνση και υποβάλλονται σε πολύ υψηλά φορτία, ειδικότερα κρουστικά φορτία, οι επιφάνειες των δοντιών μπορεί να διαμορφωθούν έτσι ώστε το υλικό να συμπιέζεται έξω στα άκρα και προς τις άκρες των δοντιών.



**Σχήμα 1- 17:** Υπερφορτωμένα μαλακά δόντια τα οποία έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση υλικού επί των άκρων των οδόντων

### 1.7.4 Αποξεστικό υλικό στο λιπαντικό

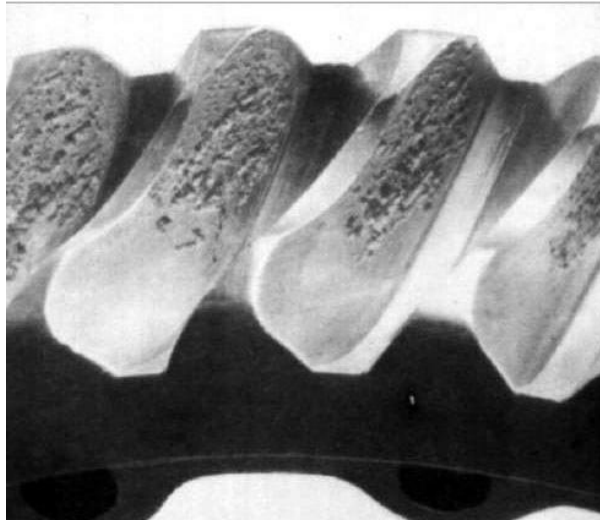
Όταν είναι παρόν αποξεστικό υλικό στο λιπαντικό τα δόντια μπορούν να παρουσιάσουν βλάβη οδηγώντας μερικές φορές σε επιφανειακή φθορά.



**Σχήμα 1 – 18:** α) Σκληρές προσμείξεις στο λάδι με εμφανή σημάδια στην επιφάνεια των δοντιών  
β) Σοβαρή φθορά, λόγω της μακράς συνεργασίας με έλαιο μολυσμένο με αποξεστικό



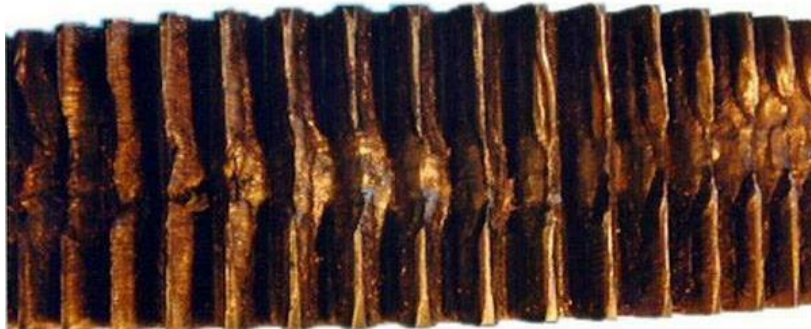
### 1.7.5 Υψηλή θερμοκρασία



**Σχήμα 1 – 19:** Ένας ατέρμονα τροχός δείχνει σημειακή διάβρωση λόγω κόπωσης μετά από εκτεταμένη υπηρεσία. Η σημειακή διάβρωση τείνει να εμφανιστεί κατά προτίμηση προς την οπίσθια ακμή της επαφής, όπου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη.

### 1.7.6 Ανεπαρκής λίπανση

Η λίπανση όπως αναφέραμε και παραπάνω είναι ένα από τα σπουδαιότερα πράγματα για την σωστή λειτουργία των οδοντωτών τροχών. Στο σχήμα 1-20 βλέπουμε έναν οδοντωτό τροχό από την κίνηση ενός μεγάλου βιομηχανικού φουσητήρα που απέτυχε λόγω έλλειψης λίπανσης. Προβλήθηκε ο ισχυρισμός ότι η αποτυχία οφείλεται σε εσφαλμένη επιφανειακή σκλήρυνση, αλλά μηχανικοί διαπίστωσαν ότι η κύρια αιτία της αστοχίας ήταν η ανεπαρκής λίπανση, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και οι οδοντωτοί τροχοί να μαλακώνουν.



**Σχήμα 1 – 20:** Αστοχία οδοντωτού τροχού λόγω ανεπαρκούς λίπανσης

## 1.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Χρησιμοποιούνται για όλες τις σχετικές θέσεις των ατράκτων στο χώρο.
- Μεταδίδουν την κίνηση στην κινούμενη άτρακτο με μικρότερη ή μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα ανάλογα με τον αριθμό δοντιών των δύο τροχών.
- Παρουσιάζουν ορισμένη σταθερή σχέση μεταδόσεως της κίνησης και αυτό γιατί λόγω της εμπλοκής των δοντιών δεν παρουσιάζεται απώλεια στροφών.
- Παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Απαιτούν μικρή συντήρηση.
- Έχουν πολύ καλό βαθμό απόδοσης, που εξαρτάται από το είδος των τροχών, την καλή κατασκευή και την κατάλληλη λίπανση.

### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Θορυβώδης λειτουργία.
- Σχετικά υψηλό κόστος κατασκευής.
- Μετάδοση της κινήσεως κατά μη ελαστικό τρόπο.

## 2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οδοντωτοί τροχοί είναι στοιχεία μηχανών που επιτυγχάνουν μετάδοση κίνησης και μεταφορά ισχύος μέσω της κατάλληλης εμπλοκής διαδοχικών ζευγών συνεργαζόμενων οδόντων κατά την περιστροφή των τροχών γύρω από άξονες που διέρχονται από τα κέντρα τους. Οι οδόντες είναι σχηματισμοί αλληπάλληλων εσοχών και προεξοχών στην περιφέρεια ενός οδοντωτού τροχού, τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία της εσοχής του ενός τροχού με την προεξοχή του συνεργαζόμενου οδοντωτού τροχού και κατασκευάζονται με διάφορα προφίλ κατατομών, όπως αυτό της εξελιγμένης, της ορθοκυκλοειδούς, της επικυκλοειδούς, της περικυκλοειδούς και της υποκυκλοειδούς καμπύλης, ή ακόμα τόξου κύκλου, ή σπείρας. Συνηθέστερη μεταξύ αυτών είναι η κατατομή εξελιγμένης, η οποία είναι η καμπύλη εκείνη που διαγράφει ένα σημείο ευθείας κυλιόμενης χωρίς ολίσθηση επί κύκλου [2].

Η ύπαρξη των οδόντων θεωρητικά δεν είναι απαραίτητη για τη μετάδοση περιστροφικής κίνησης, καθίσταται όμως αναγκαία για τη μεταφορά μεγάλης στρεπτικής ροπής (δηλαδή μεγάλης ισχύος), για τη μεταφορά της οποίας, δεν επαρκεί η τριβή που αναπτύσσεται στην επιφάνεια επαφής δυο συνεργαζόμενων κυλινδρικών τροχών, καθώς επίσης και λόγω της απαίτησης για σταθερή και δεδομένη σχέση μετάδοσης της κίνησης, ανεξαρτήτως του μεγέθους της εκάστοτε μεταφερόμενης ισχύος.

## 2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ

Για οδοντωτό τροχό, κανονικής μετωπικής τομής με προφίλ εξελιγμένης, αριθμού οδόντων  $z$ , ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη [1],[2],[3],[6]:

### 2.2.1 Βήμα οδόντων

Ως βήμα δοντιού, ορίζεται η απόσταση  $t_o$  ανάμεσα σε δύο αντίστοιχα σημεία δύο γειτονικών δοντιών, όταν αυτή η απόσταση μετρείται πάνω στην αρχική περιφέρεια, και είναι ίση με:

$$t_o = \pi \cdot \frac{d_o}{z} \quad (2.1)$$

Όπου  $d_o$  είναι η διάμετρος αρχικού κύκλου.

### 2.2.2 Μέτρο οδόντωσης

Το μέτρο της οδοντώσεως ή module, είναι γεωμετρικό μέγεθος και λαμβάνει τυποποιημένες τιμές που δίνονται στον πίνακα 2-1. Το module αποτελεί μαζί με τον αριθμό δοντιών  $z$  τα δύο μεγέθη που μπορούν να καθορίσουν τα υπόλοιπα γεωμετρικά μεγέθη μιας οδοντώσεως. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται στην πράξη από τους κατασκευαστές για την παραγωγή οδοντωτών τροχών. Το μέτρο της οδόντωσης ή module, είναι το μέγεθος:

$$m = \frac{t_o}{\pi} \quad (2.2)$$

Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3	Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3	Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3	Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3
0.1			1.25				7		50		
	0.15		1.5			8				55	
0.2				1.75			9		60		
	0.25		2			10					65
0.3				2.25			11			70	
	0.35		2.5			12				75	
0.4				2.75			14		80		
	0.45		3			16				85	
0.5				3.25			18		90		
	0.55			3.5		20				95	
0.6					3.75		22		100		
		0.65	4			25					
	0.7			4.5			28				
	0.75		5			32					
0.8				5.5			36				
	0.9		6			40					
1					6.5		45				

Η επιλογή του module γίνεται κατά προτεραιότητα από την σειρά 1, μετά από την σειρά 2 και τελευταία από την σειρά 3.

Πίνακας 2-1: Τυποποιημένες τιμές module σε mm

### 2.2.3 Αρχική διάμετρος οδόντωσης

Η περιφέρεια που περνά από τη μέση περίπου των δοντιών λέγεται αρχική περιφέρεια ενώ η αντίστοιχη διάμετρος  $d_o$  λέγεται αρχική διάμετρος. Εύκολα αν κάποιος διαθέτει το  $m$  και τον αριθμό  $z$  του επιθυμητού προς κατασκευή οδοντωτού τροχού από τις (2.1) και (2.2) μπορεί να υπολογίσει την αρχική διάμετρο ως εξής:

$$d_o = m \cdot z \quad (2.3)$$

### 2.2.4 Ύψος κεφαλής οδόντα

Το τμήμα  $h_k$  του ύψους του δοντιού, που βρίσκεται έξω από την αρχική περιφέρεια, λέγεται κεφαλή του δοντιού ή ύψος κεφαλής. Το ύψος της κεφαλής του οδόντα σε τυποποιημένες τιμές ισούται με:

$$h_k = 1 \cdot m \quad (2.4)$$

### 2.2.5 Ύψος ποδός οδόντα

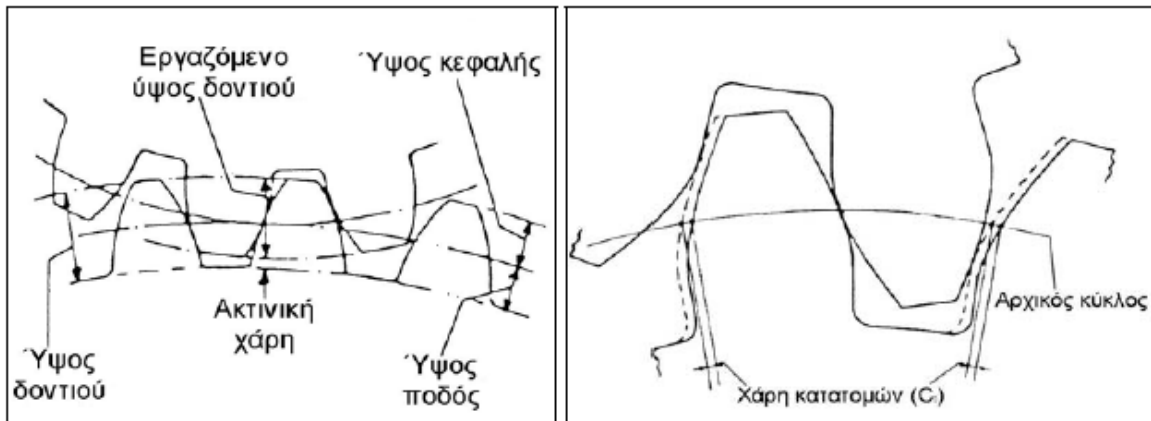
Το υπόλοιπο τμήμα  $h_f$  του ύψους του δοντιού, που βρίσκεται μέσα στα όρια της αρχικής περιφέρειας, ονομάζεται πόδι του δοντιού. Το ύψος ποδός αντίστοιχα ισούται με:

$$h_f = (1.25 - 1.30) \cdot m \quad (2.5)$$

Όταν συνεργάζονται δύο οδοντωτοί τροχοί, προκειμένου η συνεργασία των δοντιών να γίνεται χωρίς τον κίνδυνο ανεπιθύμητων επαφών των κεφαλών των δοντιών του ενός τροχού με τον κύκλο ποδός του άλλου επιβάλλεται η ύπαρξη μιας ακτινικής χάρης  $C_r$  μεταξύ του δυνητικού και του πραγματικού κύκλου ποδός (βλ. σχήμα 2.1). Η ακτινική χάρη καθορίζεται συνήθως ως ποσοστό του module και παίρνει τιμές στο εύρος 0.25% - 0.30%.

Κατ' αναλογία με την ακτινική χάρη ορίζεται και η χάρη των κατατομών  $C_t$  η οποία καθορίζεται ως ποσοστό του πάχους του δοντιού  $S_o$  στην περιφέρεια του αρχικού κύκλου εάν αυτό αντιστοιχούσε στο μισό του βήματος του τροχού (καθώς το άλλο μισό θα αποτελούσε το διάκενο ανάμεσα στα δόντια). Η προκύπτουσα τιμή αφαιρείται από το ήμισυ του βήματος και έτσι προκύπτει το πάχος του δοντιού πάνω

στον αρχικό κύκλο. Οι τιμές που παίρνει η χάρη κατατομών κυμαίνονται από 0% - 0.05% .



**Σχήμα 2-1:** Τα χαρακτηριστικά ύψη του δοντιού, η ακτινική χάρη και η χάρη των κατατομών

### 2.2.6 Πάχος οδόντωσης

Η σχέση που δίνει το πάχος του δοντιού στον αρχικό κύκλο είναι η ακόλουθη:

$$S_o = 0.5 \cdot (1 - C_t) \cdot t_o \quad (2.6)$$

### 2.2.7 Διάκενο μεταξύ οδόντων

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

$$l_o = t_o - S_o \quad (2.7)$$

### 2.2.8 Διάμετρος κύκλου κεφαλής

Η περιφέρεια που διέρχεται από τις κεφαλές των δοντιών λέγεται περιφέρεια κεφαλών και η διάμετρος  $d_k$  που της αντιστοιχεί ονομάζεται διάμετρος κεφαλής. Η διάμετρος κεφαλής ισούται:

$$d_k = (z + 2) \cdot m \quad (2.8)$$

## 2.2.9 Διάμετρος κύκλου ποδός

Η διάμετρος  $d_f$  που αντιστοιχεί στη βάση των δοντιών ονομάζεται διάμετρος ποδίου. Η διάμετρος ποδίου ισούται:

$$d_f = d_o - 2 \cdot h_f = (z - 2.5) \cdot m \quad (2.9)$$

### 2.2.10 Απόσταση αξόνων μεταξύ δύο συνεργαζόμενων τροχών

Απόσταση αξόνων  $\alpha$  είναι η απόσταση μεταξύ του κινητήριου τροχού (pinion) και του κινούμενου (gear). Η απόσταση των αξόνων δυο συνεργαζόμενων τροχών, που προφανώς θα έχουν ίδιο βήμα και module, αν  $z_1$  και  $z_2$  είναι οι αριθμοί των οδόντων τους και αυτοί είναι ευθείς, βρίσκεται από τη σχέση:

$$\alpha = r_{01} + r_{02} = (z_1 + z_2) \cdot \frac{m}{2} \quad (2.10)$$

Όπου  $r_{01}$  και  $r_{02}$  είναι οι αρχικές ακτίνες των δύο συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών.

### 2.2.11 Σχέση μετάδοσης

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 κυλίνουν ο ένας επί του άλλου χωρίς ολίσθηση, τότε οι περιφερειακές τους 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  $r_{02}$  του τροχού 2 προς την ακτίνα  $r_{01}$  του τροχού 1, δηλαδή:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_{02}}{r_{01}} \quad (2.11)$$

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

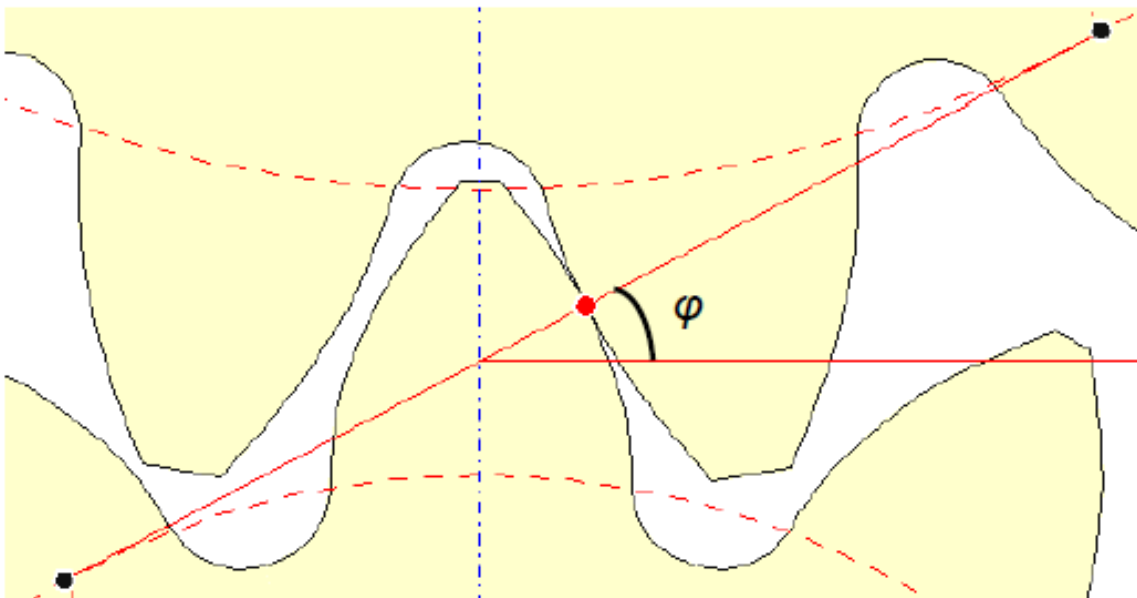
$$U_1 = \omega_1 \cdot r_1 = \omega_2 \cdot r_2 = U_2 \quad (2.12)$$

Έτσι λοιπόν προκύπτει ο παρακάτω λόγος, ο οποίος ονομάζεται σχέση μεταδόσεως της βαθμίδας και μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_{02}}{d_{01}} \quad (2.13)$$

### 2.2.12 Γωνία επαφής

Γωνία επαφής  $\varphi$  είναι η γωνία κατά την οποία μεταφέρονται φορτία από δόντι σε δόντι. Είναι η γωνία μεταξύ εφαπτομένης αρχικών κύκλων και οριζοντίου εφ' όσων πρόκειται για κανονικές οδοντώσεις, (βλ. Σχήμα 2-2). Στις οδοντώσεις δια εξελιγμένης η γωνία αυτή είναι σταθερή και ονομάζεται γωνία εξελιγμένης, ισούται επίσης με την ημιγωνία οδόντος του κανόνα, κατά τα προβλεπόμενα από την γενικευμένη θεωρία οδοντώσεως. Στο μετρικό σύστημα η γωνία εξελιγμένης λαμβάνεται ίση με  $20^\circ$  για τυποποιημένες οδοντώσεις, ενώ στο αγγλοσαξονικό σύστημα η τιμή της μπορεί να είναι  $20^\circ$  ή  $14.5^\circ$ .



Σχήμα 2-2 : Γωνία επαφής μεταξύ δύο συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών



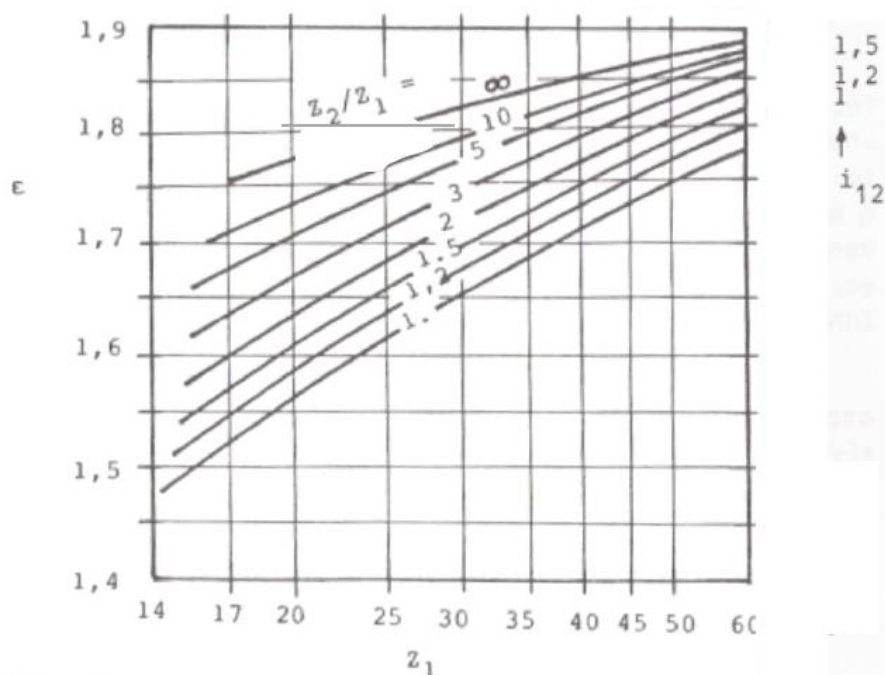
Σε μη τυποποιημένες οδοντώσεις η γωνία εξελιγμένης μπορεί να λάβει οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή. Η μεταβολή της γωνίας αυτής έχει επίδραση στο μέγεθος των αναπτυσσομένων φορτίων στους οδόντες, στον βαθμό επικάλυψης και στον ελάχιστο αριθμό οδόντων του τροχού.

### 2.2.13 Βαθμός επικάλυψης ή διάρκεια επαφής

Ο βαθμός επικάλυψης ή διάρκεια επαφής  $\varepsilon$ , είναι ο λόγος του μήκους επαφών  $e_o$  προς το βήμα του αρχικού κύκλου  $t_o$ . Ως μήκος επαφών ορίζεται το μήκος τόξου του αρχικού κύκλου το οποίο διατρέχει η εργαζόμενη πλευρά του οδόντος ενός οδοντωτού τροχού από το πρώτο έως το τελευταίο σημείο επαφής της με τη συνεργαζόμενη πλευρά του οδόντος του άλλου τροχού.

$$\varepsilon = \frac{e_o}{t_o} = \frac{e_o \cdot z}{\pi \cdot d_o} \quad (2.14)$$

Ένας ακόμη τρόπος υπολογισμού του βαθμού επικάλυψης ο οποίος είναι πιο προσεγγιστικός για δεδομένο αριθμό οδόντων  $z_1$  του πινιόν και δεδομένη σχέση μετάδοσης  $i$  της βαθμίδας, μπορεί γίνει από το παρακάτω σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3: Βαθμός επικάλυψης  $\varepsilon$  συναρτήσει της σχέσης μετάδοσης  $i$

### 2.2.14 Αγγλικό διαμετρικό βήμα (Pitch)

Για οδοντώσεις που κατασκευάζονται στις χώρες που ακόμα χρησιμοποιούν το Αγγλοσαξονικό σύστημα μονάδων, η τυποποίηση βασίζεται στο αντίστοιχο με το module μέγεθος, το circular pitch ( $C_p$ ), που ισούται επίσης με  $\frac{t}{\pi}$ , ( $C_p = \frac{t}{\pi}$ ) και μετριέται σε ίντσες.

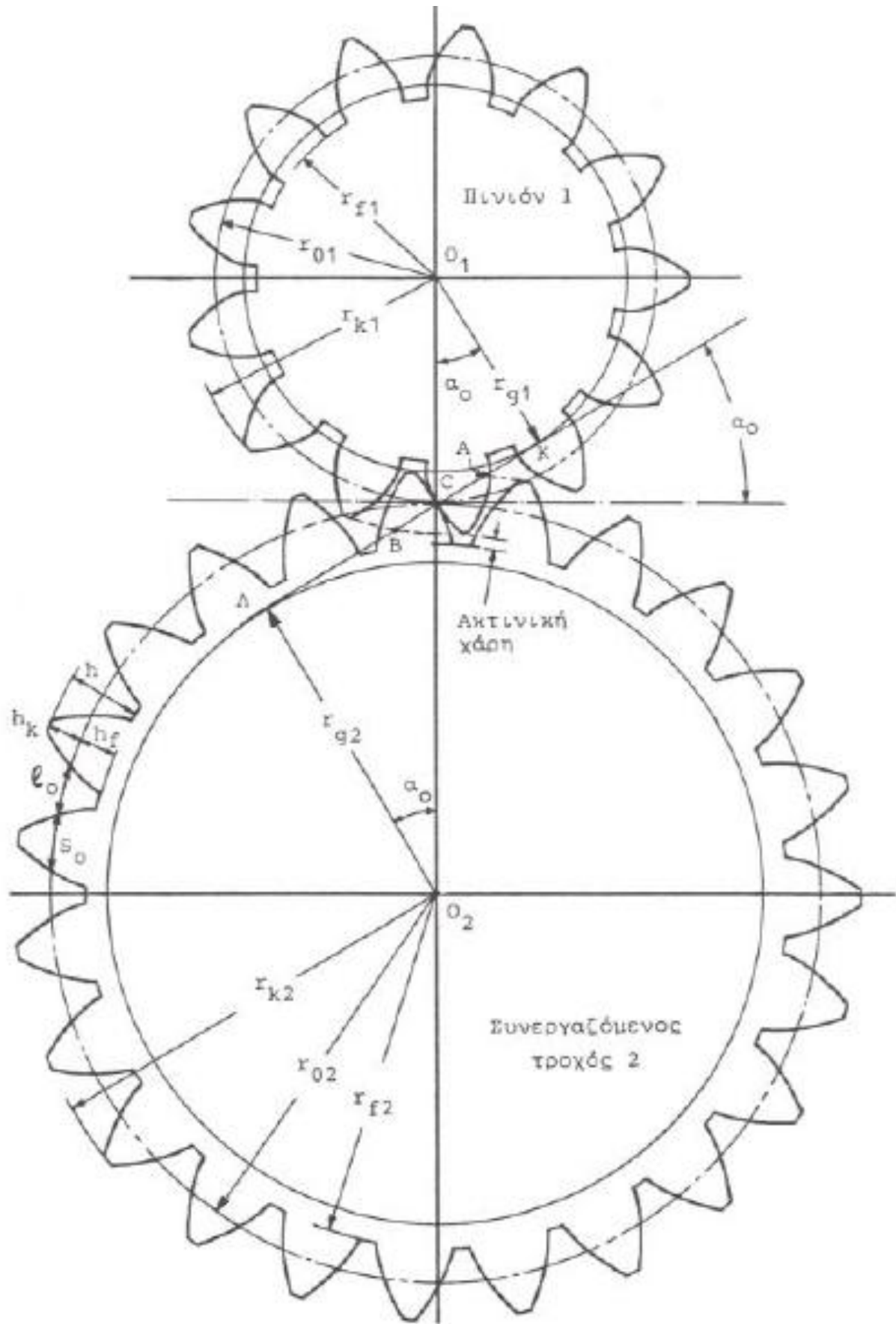
Υπάρχει επίσης και το αντίστροφο του  $C_p$  μέγεθος, το diametrical pitch ( $D_p$ ) που μας δείχνει πόσα δόντια αντιστοιχούν σε μήκος 1'' της αρχικής διαμέτρου. Είναι

$$D_p = \frac{z}{d_o}.$$

### 2.2.15 Στοιχεία άλλων τύπων οδοντωτών τροχών

Στους ελικοειδείς οδοντωτούς τροχούς διακρίνουμε δύο βήματα: Το μετωπικό ( $t_s$ ), που μετριέται σε επίπεδο κάθετο στον άξονα του τροχού και το κάθετο ( $t_n$ ), που μετριέται σε επίπεδο κάθετο στο ίχνος του δοντιού. Αντίστοιχα υπάρχουν και μετωπικό και κάθετό module.

Για τη χάραξη των ελικοειδών οδοντώσεων χρησιμοποιείται το κάθετο module. Στους κωνικούς οδοντωτούς τροχούς, αφού ο κώλυρος κώνος έχει δύο διαμέτρους, διακρίνουμε τη μεγάλη ή εξωτερική ( $d_a$ ) και τη μικρή ή εσωτερική ( $d_e$ ) αρχική διάμετρο. Επομένως θα υπάρχουν και δύο διαμετρικά module. Εκείνο που τυποποιείται είναι το μεγάλο και στη συνέχεια προσδιορίζονται τα υπόλοιπα στοιχεία της οδόντωσης με σχέσεις αντίστοιχες των παράλληλων τροχών.



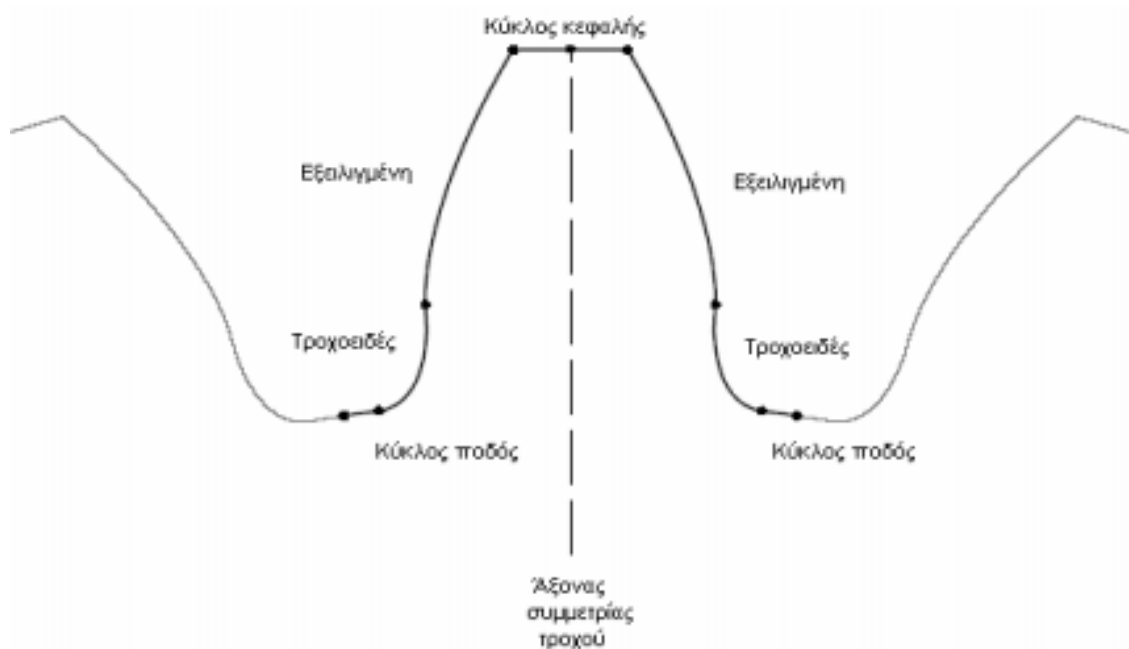
Σχήμα 2-4: Χαρακτηριστικά μεγέθη συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών



### 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

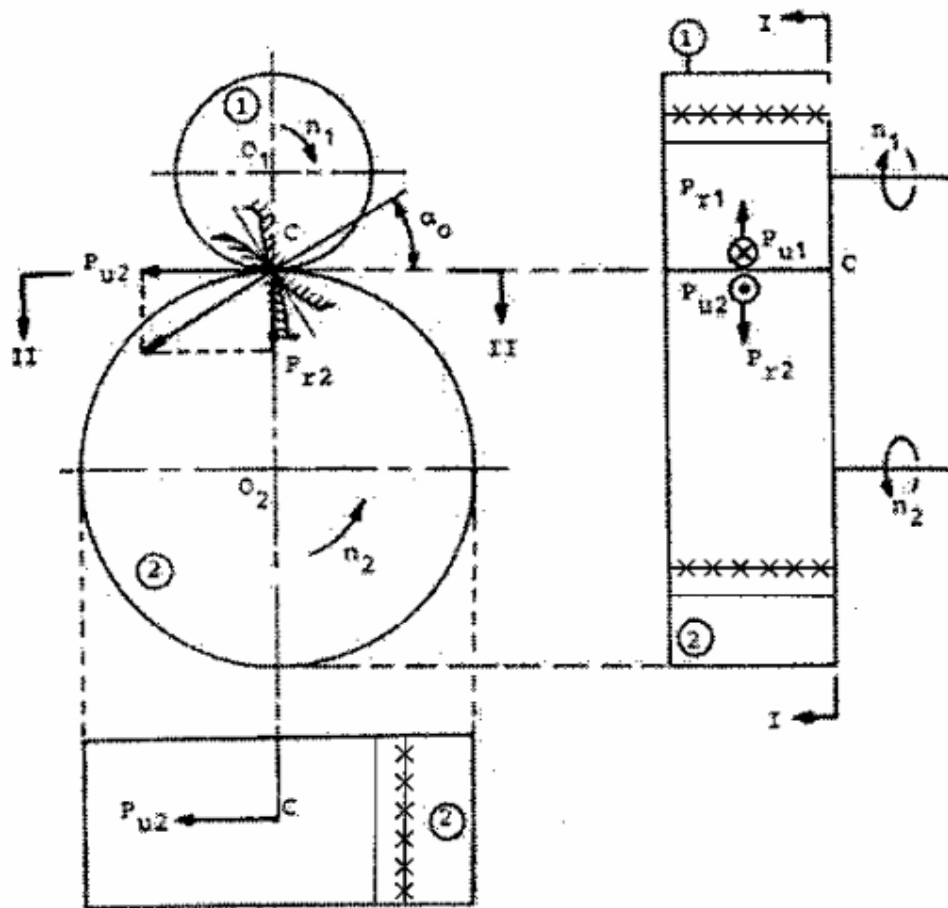
#### 3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Όταν δύο μετωπικοί τροχοί διαφορετικού μεγέθους εμπλέκονται, ο μεγαλύτερος καλείται κορώνα και ο μικρότερος πινιόν [5]. Σε μια απλή βαθμίδα τροχών μείωσης η εισερχόμενη ισχύς και δύναμη εφαρμόζονται στο κινητήριο τροχό, το πινιόν. Η εξερχόμενη από την βαθμίδα ισχύς και δύναμη μεταφέρονται από τον κινούμενο τροχό. Ο κινητήριος τροχός περιστρέφει τον κινούμενο χωρίς ολίσθηση. Αντίθετα, σε μια βαθμίδα τροχών αύξησης, κινητήριος τροχός θεωρείται ο μεγαλύτερος. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται, η μορφή μιας κατατομής ενός δοντιού ενός τροχού ευθείας μετωπικής οδόντωσης δια εξελιγμένης.



Σχήμα 3-1:Μορφή κατατομής δοντιού τροχού ευθείας μετωπικής οδόντωσης.

Για να παρουσιάσουμε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σημείο κυλίσεως μιας βαθμίδας οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης παραθέτουμε το Σχήμα 3-2.



Σχήμα 3-2: Δυνάμεις επί των οδόντων μετωπικών οδοντωτών τροχών

Σε αυτό η ολική δύναμη που ασκείται στον οδόντα του τροχού 2, επί της γραμμής ενέργειας, αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την ακτινική  $P_{r2}$  και την περιφερειακή  $P_{u2}$ . Το σημείο κυλίσεως στο παραπάνω σχήμα σημειώνεται ως  $C$ . Στον τροχό 1 ασκούνται οι δυνάμεις  $P_{r1}$ ,  $P_{u1}$  που λόγω της αρχής δράσης - αντίδρασης είναι ίσες και αντίθετες με τις αντίστοιχες δυνάμεις του τροχού 2.

Επομένως θα λέμε ότι στο σημείο κυλίσεως της βαθμίδας ασκούνται οι δυνάμεις  $P_u$ ,  $P_r$  και θα εννοούμε ότι αυτές οι δυνάμεις ασκούνται σε καθεμία από τις συνεργαζόμενες κατατομές. Στην επάνω δεξιά πλευρά του σχήματος 2 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.

### 3.1.1 Στρεπτική ροπή οδοντωτού τροχού

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:

$$Md_1 = \frac{N}{\omega_1} \quad (3.1)$$

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

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

$$Md = 71620 \cdot \frac{N}{n} \quad (3.2)$$

Όπου:

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

### 3.1.2 Περιφερειακή δύναμη οδόντα

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

$$P_u = \frac{2 \cdot Md_1}{d_{01}} = \frac{2 \cdot Md_2}{d_{02}} \quad (3.3)$$

Όπου:  $d_{01}$ ,  $d_{02}$ : η διάμετρος του αρχικού κύκλου των τροχών 1,2 αντίστοιχα.

### 3.1.3 Ακτινική δύναμη οδόντα

Η ακτινική δύναμη προκύπτει από την όψη I-I μέσω της οξείας γωνίας  $a_0$  ως εξής:

$$P_r = P_u \cdot \tan a_0 \quad (3.4)$$

### 3.1.4 Συνολική δύναμη οδόντα

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

$$P = \sqrt{P_u^2 + P_r^2} \quad (3.5)$$

Και με αντικατάσταση των σχέσεων για τις  $P_r$  και  $P_u$  έχουμε:

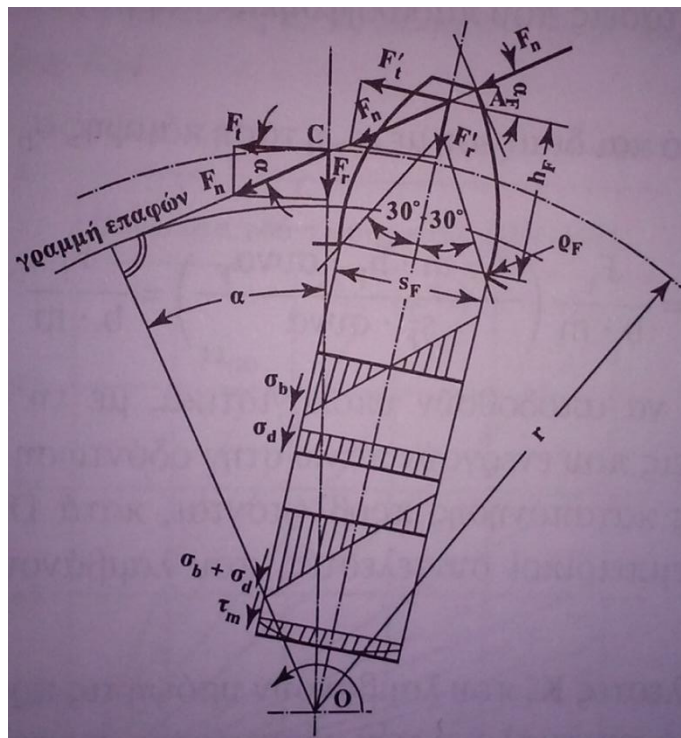
$$P = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot Md_1}{d_{01}}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot Md_1}{d_{01}} \cdot \tan a_0\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot Md_2}{d_{02}}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot Md_2}{d_{02}} \cdot \tan a_0\right)^2} \quad (3.6)$$



### 3.2 ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΟΔΑ ΤΟΥ ΟΔΟΝΤΑ ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΚΕΦΑΛΗΣ

Σαν διατομή για το υπολογισμό λαμβάνεται η επιφάνεια του ορθογωνίου παραλληλογράμμου με τις διαστάσεις  $b$  (πλάτος οδόντα) και  $s_F$  (Απόσταση των σημείων επαφής υπό γωνία  $30^\circ$  εφαπτόμενων στην στρογγύλευση του πόδα) [2].

Αν η  $F_n$  αναλυθεί στις συνιστώσες  $F_r'$  και  $F_t'$ , είναι προφανές ότι η  $F_r'$  προκαλεί τάσεις θλίψεις  $\sigma_d$  και η  $F_t'$  τάσεις κάμψης  $\sigma_b$  και επιπλέον διάτμηση  $\tau_m$  (Σχήμα 3-3).



Σχήμα 3-3: Τάσεις στον πόδα του οδόντα με φόρτιση στο σημείο κεφαλής

Θα έχουμε λοιπόν:

- Τάση κάμψης: 
$$\sigma_b = \frac{M}{W_b} = \frac{F_t' \cdot h_F \cdot 6}{b \cdot s_F^2} = \frac{F_t'}{b} \cdot \frac{6 \cdot h_F \cdot \cos \alpha_F}{s_F^2 \cdot \cos \alpha} \quad (3.7)$$

- Τάση θλίψης: 
$$\sigma_d = \frac{F_r'}{b \cdot s_F} = \frac{F_t'}{b} \cdot \frac{\sin \alpha_F}{s_F \cdot \cos \alpha} \quad (3.8)$$

- Τάση διάτμησης: 
$$\tau_m = \frac{F_t'}{b \cdot s_F} = \frac{F_t'}{b} \cdot \frac{\cos \alpha_F}{s_F \cdot \cos \alpha} \quad (3.9)$$

Αυτές οι επιμέρους τάσεις δίνουν όλες μαζί μια ισοδύναμη τάση  $\sigma_v$ . Έχει όμως αποδειχθεί πειραματικά ότι, αν στον υπολογισμό παραληφθούν οι τάσεις θλίψης και διάτμησης, το αποτέλεσμα ελάχιστα μεταβάλλεται. Γι' αυτό το λόγο ο υπολογισμός γίνεται με ικανοποιημένη ακρίβεια με βάση μόνο την καθαρή τάση κάμψης  $\sigma_b$ , ενώ οι δε τάσεις που παραλήφθηκαν λαμβάνονται υπόψη με συντελεστές διόρθωσης.

Με πολλαπλασιασμό και διαίρεση με  $m$ , η τάση κάμψης  $\sigma_b$  στον πόδα του οδόντα θα είναι:

$$\sigma_b = \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot \left( \frac{6 \cdot m \cdot h_F \cdot \cos a_F}{s_F^2 \cdot \cos a} \right) = \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot Y_{Fa} \quad (3.10)$$

Για να μπορέσουν να αποδοθούν υπολογιστικά, με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, οι δυνάμεις που ενεργούν πάνω στην οδόντωση καθώς και οι ιδιαίτερες συνθήκες της καταπόνησης προβλέπονται, κατά DIN 3990, ορισμένοι πειραματικοί και εμπειρικοί συντελεστές, που λαμβάνουν υπόψη διάφορες επιρροές.

Έτσι έχουμε συντελεστές  $K$ , που λαμβάνουν υπόψη τις πραγματικές συνθήκες των δυνάμεων κατά την εμπλοκή των οδόντων και συντελεστές  $Y$  και  $Z$  που λαμβάνουν υπόψη επιρροές αντίστοιχα στον έλεγχο της θραύσης ( $Y$ ) και της πίεσης επιφανείας ( $Z$ ).

Με βάση τα ανωτέρω, η γενική σχέση που δίνει την τάση στον πόδα του οδόντα θα είναι:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{Fa} \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_e \leq \sigma_{FP} \approx \frac{\sigma_{Fl}}{S_F} \quad (3.11)$$

Όπου:

$\sigma_F$  : τάση στον πόδα του οδόντα σε  $N/mm^2$

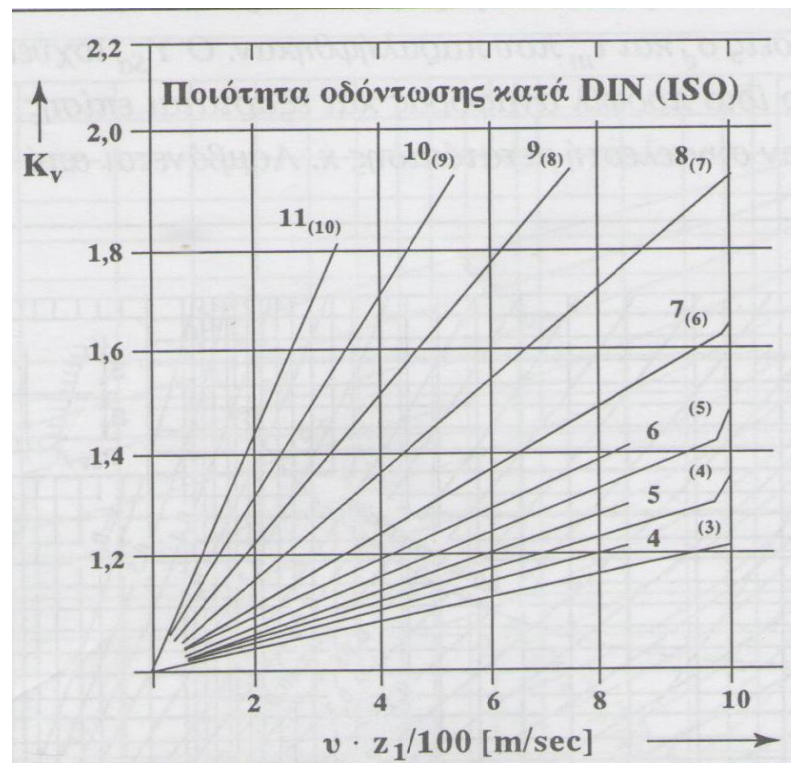
$F_t$  : περιφερειακή δύναμη σε  $N$

$m$  : module σε  $mm$

$b$  : πλάτος οδόντα σε  $mm$ . Για άνισα πλάτη το μέγιστο φέρον πλάτος μπορεί να είναι όσο το μικρότερο, αυξημένο κατά  $2m$

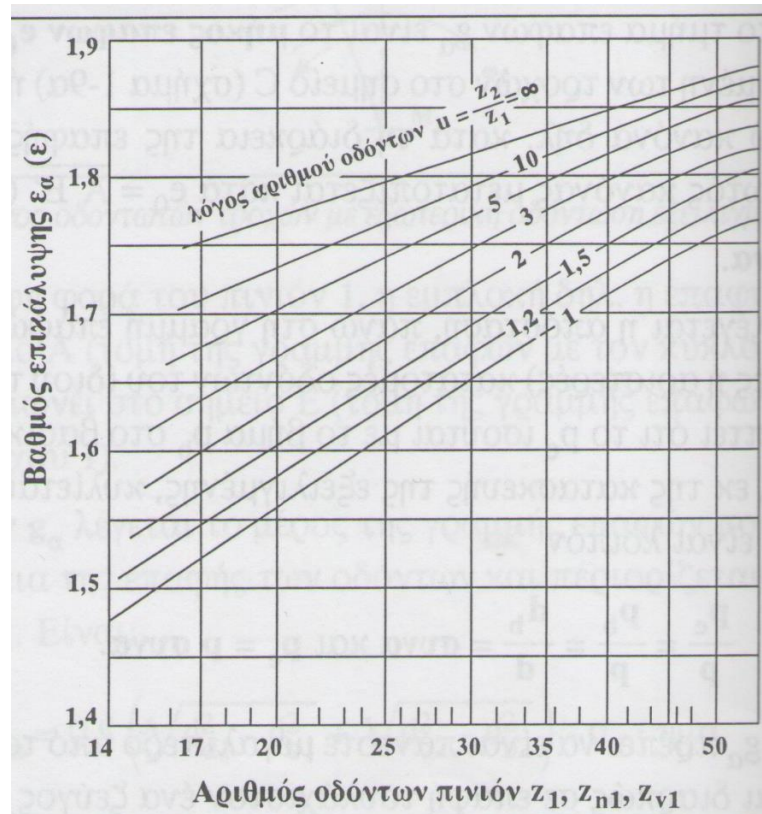
$K_A$  : συντελεστής εφαρμογής. Λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις του φορτίου που εξαρτώνται από το είδος της κινητήριας μηχανής και της εργομηχανής ανάμεσα στις οποίες είναι τοποθετημένος ο μειωτήρας. Οι διακυμάνσεις αυτές εμφανίζονται με τη μορφή κρούσεων, αιχμών φορτίου και μεταβολών στην ροπή στρέψης.

$K_V$  : συντελεστής δυναμικών καταπονήσεων. Λαμβάνει υπόψη τις δυναμικές καταπονήσεις που προέρχονται από την ακρίβεια κατασκευής της οδόντωσης και του μεγέθους  $u \cdot z_1/100$  με  $u = \pi \cdot d_1 \cdot n_1/60$  σε  $m/sec$ . Λαμβάνεται από το σχήμα 3-4.



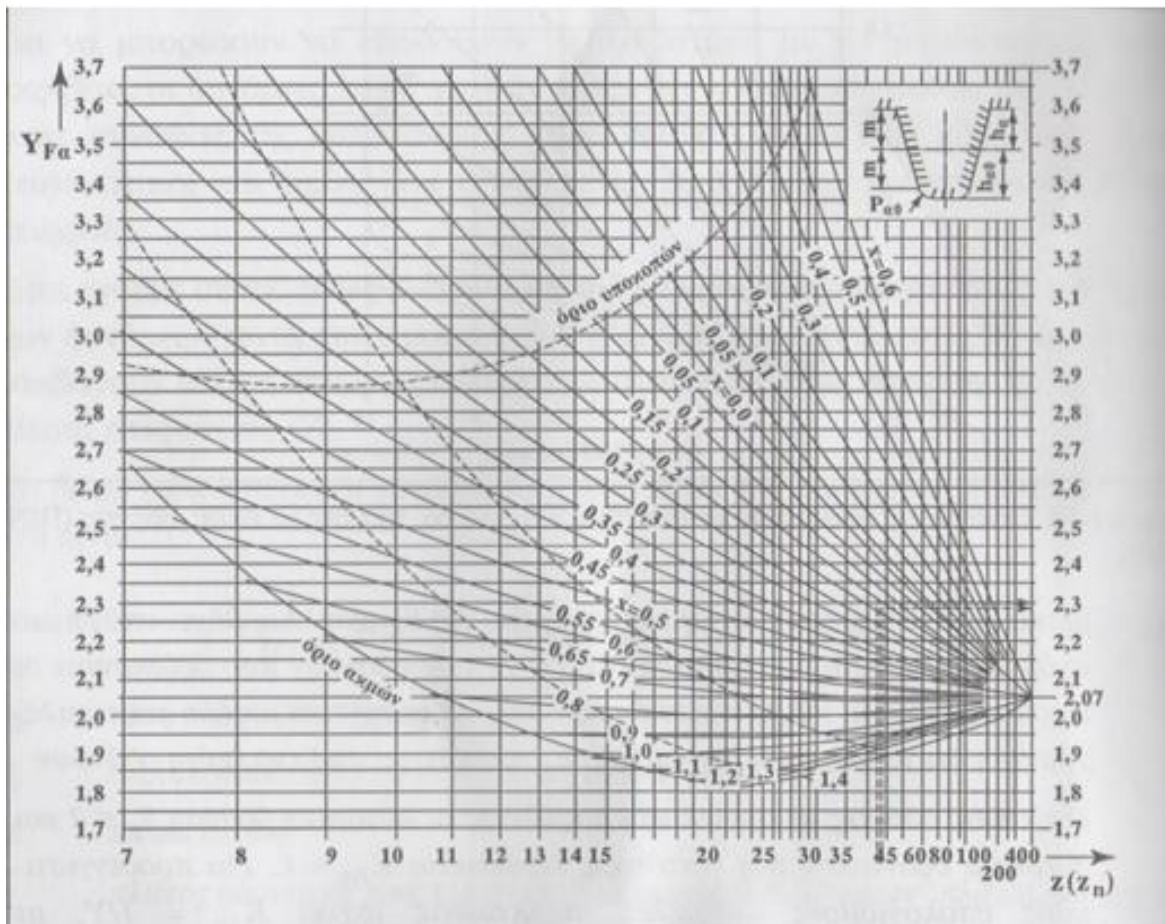
**Σχήμα 3-4:** Συντελεστής δυναμικών καταπονήσεων  $K_V$  για οδοντωτούς τροχούς με ευθείς οδόντες (DIN 3990)

$K_{Fa}$  : μετωπικός συντελεστής κατανομής φορτίου για θραύση. Λαμβάνει υπόψη μια ανόμοια κατανομή του φορτίου στα ζεύγη οδόντων. Για ευθείς οδόντες με συντελεστή ασφάλειας σε δυναμική θραύση  $S_F \leq 2$  και ποιότητα οδόντωσης 8 ή λεπτότερη, λαμβάνεται  $K_{Fa} = 1/Y_\epsilon$  με  $Y_\epsilon = 0,25 + (0,75/\epsilon_\alpha)$  για  $\epsilon_\alpha < 2$ . Ο βαθμός επικάλυψης  $\epsilon_\alpha$  προσδιορίζεται από τη σχέση 3-5.



Σχήμα 3-5: Διάγραμμα υπολογισμού βαθμού επικάλυψης  $\epsilon_{\alpha}$  σε τροχούς χωρίς μετατόπιση

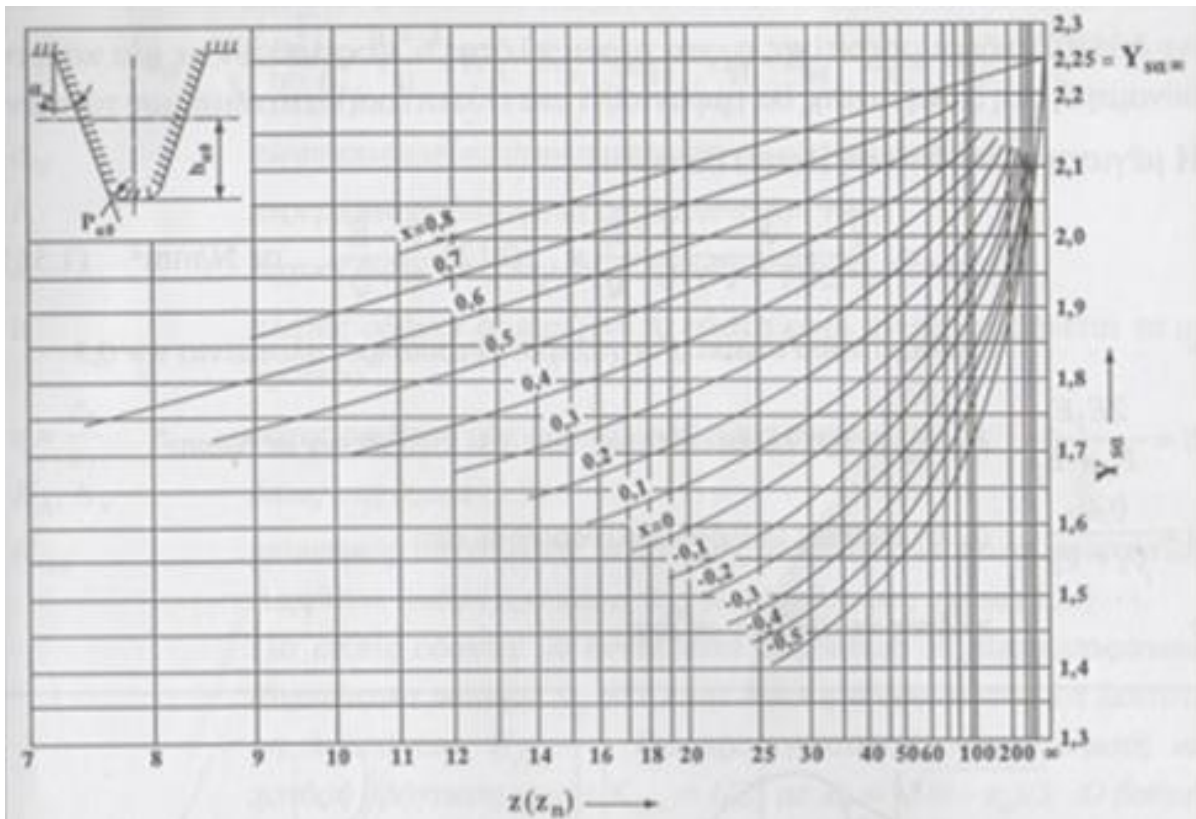
$Y_{Fa}$ : συντελεστής μορφής. Λαμβάνει υπόψη την επιρροή της μορφής του οδόντα πάνω στην τάση κάμψης  $\sigma_b$  και είναι ανεξάρτητος από τον συνεργαζόμενο τροχό. Για διαστάσεις οδόντων σύμφωνα με το προφίλ αναφοράς κατά DIN, ο  $Y_{Fa}$  εξαρτάται από τον αριθμό οδόντων  $z_1$  και  $z_2$  για πινιόν και τροχό και από τον συντελεστή μετατόπισης  $x$  ( $x=0$  για τροχούς χωρίς μετατόπιση). Λαμβάνεται από το σχήμα 3-6. Για εσωτερική οδόντωση λαμβάνεται περίπου  $Y_{Fa} = 2,0$ .



Σχήμα 3-6: Συντελεστής μορφής  $Y_{Fa}$  για εξωτερική οδόντωση (DIN 3990)

$Y_{Sa}$ : συντελεστής διόρθωσης της τάσης. Λαμβάνει υπόψη την αύξηση της τάσης που προκαλεί η καμπυλότητα στον πόδα του οδόντα (συγκέντρωση τάσεων), διότι στο σημείο αυτό, όπως ήδη αναφέρθηκε, εκτός από την τάση κάμψης  $\sigma_b$  ενεργούν και οι τάσεις  $\sigma_d$  και  $\tau_m$  που παραλήφθηκαν. Ο  $Y_{Sa}$  ισχύει σε συνδυασμό με τον  $Y_{Fa}$  για το ίδιο προφίλ αναφοράς και εξαρτάται επίσης, όπως ο  $Y_{Fa}$ , από τα  $z_1, z_2$  και τον συντελεστή μετατόπισης  $\chi$ . Λαμβάνεται από το Σχήμα 3-7.





**Σχήμα 3-7:** Συντελεστής διόρθωσης τάσης  $Y_{S\alpha}$  για εξωτερική οδόντωση (DIN 3990)

$Y_\varepsilon$  : συντελεστής επικάλυψης. Λαμβάνει υπόψη την προσδιοριστική θέση εφαρμογής στην κεφαλή του οδόντα.  $Y_\varepsilon = 0,25 + (0,75/\varepsilon_\alpha)$

$\sigma_{FP}$  : επιτρεπόμενη τάση στον πόδα σε  $N/mm^2$ . Υπολογίζεται χωριστά για το πινιόν και το τροχό.

$\sigma_{Fl}$  : δυναμική αντοχή διάρκειας σε επαναλαμβανόμενη καμπτική καταπόνηση (σε  $N/mm^2$ ) για υλικά κατάλληλα για οδοντωτούς τροχούς (πίνακας 3-1). Για αντιστροφόμενη καμπτική καταπόνηση (π.χ. σε ενδιάμεσους τροχούς) λαμβάνεται το 70% των τιμών του πίνακα 3-1.

$S_F$  : συντελεστής ασφάλειας για την καταπόνηση στον πόδα. Όσο ακριβέστερα προσδιορίστηκαν οι συντελεστές επιρροής, τόσο μικρότερος μπορεί να είναι ο  $S_F$  και τόσο οικονομικότερη η κατασκευή. Λαμβάνεται  $S_F = 1,5$  έως  $3,5$  για μειωτήρες συνεχούς λειτουργίας. Εάν ο συντελεστής ασφαλείας  $S_F$  αυξηθεί κατά περίπου 0,5

τότε είναι δυνατός ένας κατά προσέγγιση υπολογισμός του  $\sigma_F$  χωρίς να ληφθούν υπόψη οι συντελεστές  $K_V$  και  $K_{F\alpha}$ .

Η τάση  $\sigma_F$  προσδιορίζεται χωριστά για το πινιόν ( $\sigma_{F1}$ ) και τον τροχό ( $\sigma_{F2}$ ). Επειδή πολύ συντελεστές είναι ίδιοι για το πινιόν και τον τροχό, ο έλεγχος του τροχού 2 μπορεί να γίνει και από την σχέση:

$$\sigma_{F2} = \sigma_{F1} \cdot \frac{Y_{Fa2} \cdot b_1}{Y_{Fa1} \cdot b_2} \quad (3.12)$$

### 3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΔΟΝΤΑ ΣΕ ΠΙΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο υπολογισμός σε πίεση επιφανείας βάση του τον τύπο του Hertz που αναφέρεται στην πίεση μεταξύ δύο ακίνητων κυλίνδρων (Σχήμα 3-8).

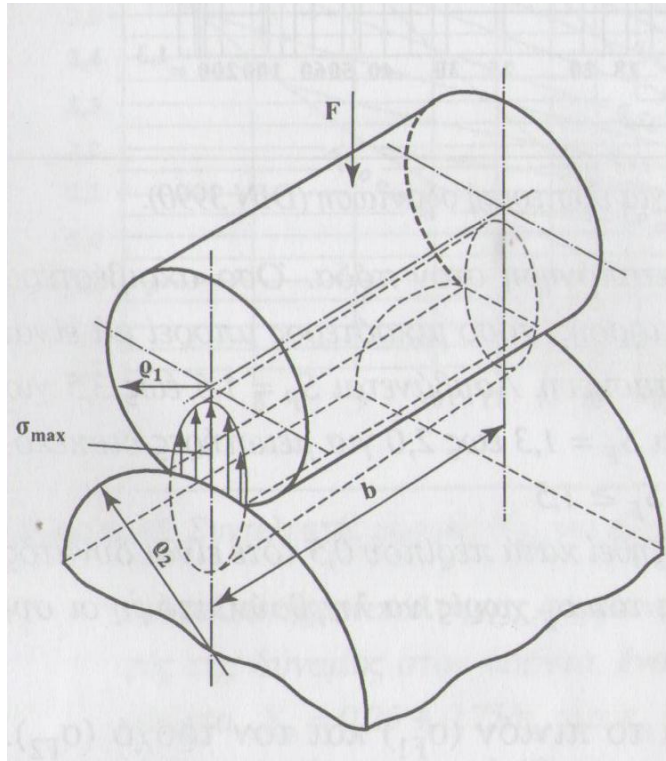
Αν δύο κύλινδροι με ακτίνες  $\rho_1$  και  $\rho_2$  και πλάτος  $b$ , φορτισθούν με μία κάθετη δύναμη  $F$ , στην ζώνη πίεσης θα εμφανισθεί μία ελλειπτική κατανομή των τάσεων. Η μέγιστη πίεση (πίεση Hertz) (σε  $N/mm^2$ ) θα είναι:

$$\sigma_{H\max} = \sqrt{\frac{1}{2\pi \cdot (1-\nu^2)} \cdot \frac{F \cdot E}{b \cdot \rho}} = \sqrt{0,175 \cdot \frac{F \cdot E}{b \cdot \rho}} \quad (3.13)$$

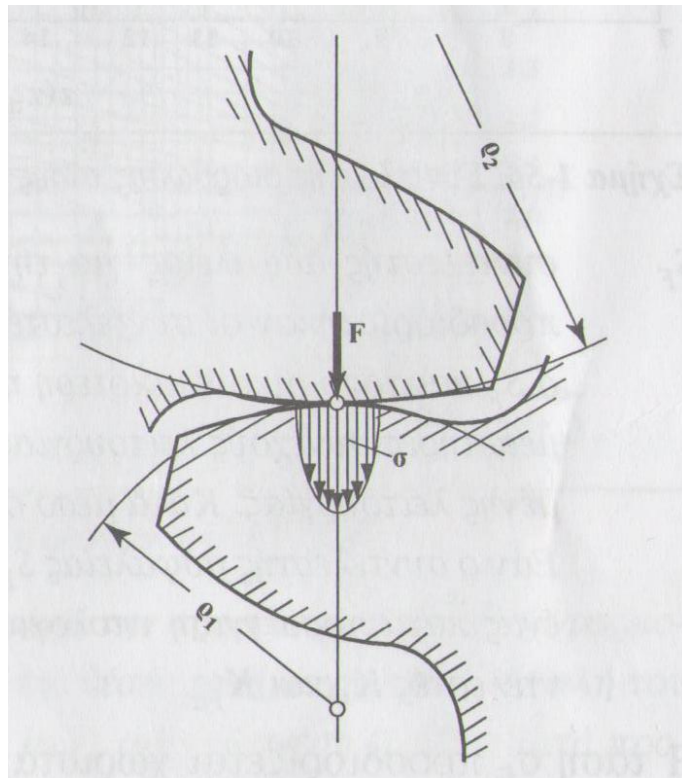
$\nu$  : σταθερά του Poisson. Για χάλυβα, χυτοσίδηρο, αλουμίνιο  $\nu = 0,3$

$$E = \frac{2E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} : E_1, E_2 \text{ μέτρα ελαστικότητας των δύο κυλίνδρων σε } N/mm^2$$

$$\rho = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} : \rho_1, \rho_2 \text{ ακτίνες των δύο κυλίνδρων σε } mm$$



**Σχήμα 3-8:** Πίεση μεταξύ δύο κυλίνδρων



**Σχήμα 3-9:** Πίεση μεταξύ δύο οδόντων



Αν θεωρήσουμε τους συνεργαζόμενους οδόντες σαν δύο κυλίνδρους (σχήμα 3-9) και λάβουμε υπόψη και εδώ (όπως στον υπολογισμό σε θραύση) διάφορους συντελεστές επιρροής, καταλήγουμε στην σχέση (3.14) που δίνει την πίεση επιφανείας και για τους δύο τροχούς στη δυσμενέστερη περιοχή όπου κυρίως εμφανίζονται τα «σκαψίματα» (pitting) στον οδόντα δηλαδή στον κύκλο κύλισης.

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{u+1}{u} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{Ha} \cdot Z_H \cdot Z_M \cdot Z_\varepsilon} \leq \sigma_{HP} = \frac{\sigma_{HI}}{S_H} \quad (3.14)$$

$\sigma_H$  : πίεση επιφανείας στην κατατομή του οδόντα σε  $N/mm^2$

$F_t$  : περιφερειακή δύναμη σε  $N$

$d_1$  : αρχική διάμετρος πινιόν σε  $mm$  (πάντοτε  $d_1$ , ποτέ  $d_2$ )

$b$  : πλάτος οδόντα σε  $mm$ . Αν τα πλάτη είναι άνισα λαμβάνεται το μικρότερο

$u = \frac{z_2}{z_1}$  : λόγος αριθμού οδόντων τροχού προς πινιόν

$K_A$  : συντελεστής εφαρμογής. Λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις του φορτίου που εξαρτώνται από το είδος της κινητήριας μηχανής και της εργομηχανής ανάμεσα στις οποίες είναι τοποθετημένος ο μειωτήρας. Οι διακυμάνσεις αυτές εμφανίζονται με τη μορφή κρούσεων, αιχμών φορτίου και μεταβολών στην ροπή στρέψης

$K_V$  : συντελεστής δυναμικών καταπονήσεων. Λαμβάνει υπόψη τις δυναμικές καταπονήσεις που προέρχονται από την ακρίβεια κατασκευής της οδόντωσης ( ποιότητα οδόντωσης, και του μεγέθους  $u \cdot z_1/100$  με  $u = \pi \cdot d_1 \cdot n_1/60$  σε  $m/sec$ . Λαμβάνεται από το σχήμα 3-4)

$K_{Ha}$  : μετωπικός συντελεστής κατανομής φορτίου για πίεση επιφανείας. Λαμβάνει υπόψη ό,τι και ο  $K_{Fa}$  για θραύση. Για ευθείς οδόντες με συντελεστή ασφάλειας σε πίεση επιφανείας (δημιουργία pitting)  $S_H < 1,3$  και ποιότητα οδόντωσης 8 ή λεπτότερη, λαμβάνεται  $K_{Ha} \approx 1$ . Για προσεγγιστικούς υπολογισμούς και χονδρή οδόντωση ισχύει  $K_{Ha} = 1/Z_\varepsilon^2$  με  $Z_\varepsilon = \sqrt{(4 - \varepsilon_\alpha)/3}$ . Ο βαθμός επικάλυψης  $\varepsilon_\alpha$  προσδιορίζεται από το σχήμα 3-5

$Z_H$ : συντελεστής ζώνης. Λαμβάνει υπόψη την καμπυλότητα της κατατομής στο σημείο κύλισης. Για οδοντωτούς τροχούς με ευθείς οδόντες ( $\beta = 0^\circ$ ) και ( $\alpha = 20^\circ$ ), εξαρτάται από το λόγο  $(x_1 + x_2)/(z_1 + z_2)$  ο οποίος είναι 0 για τροχούς χωρίς μετατόπιση. Στην περίπτωση αυτή είναι  $Z_H = 2,5$  (σχήμα 3-10).

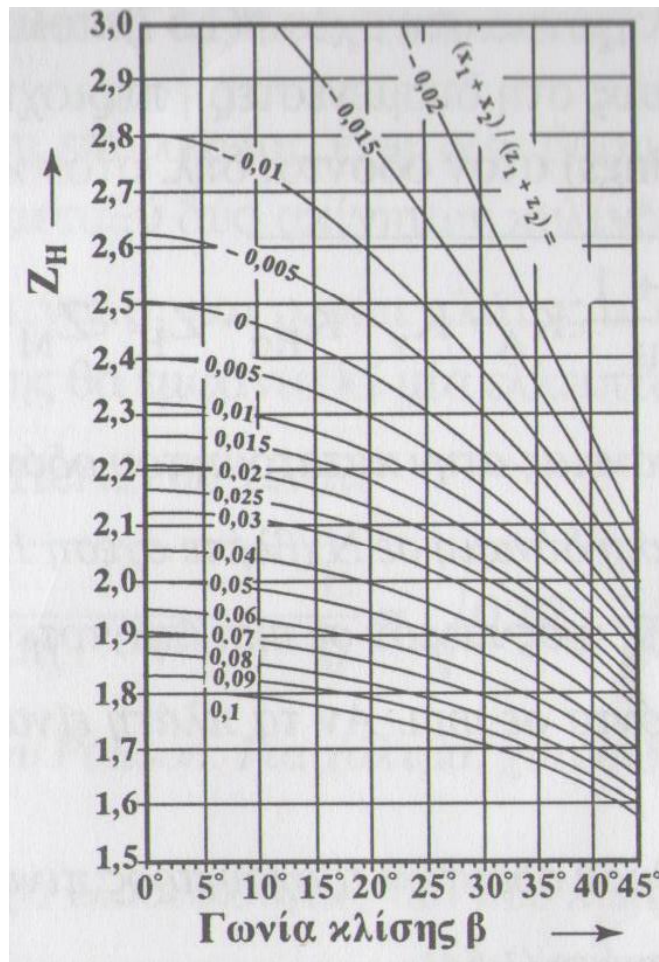
$Z_M = \sqrt{0,175 \cdot E}$ : συντελεστής υλικού σε  $\sqrt{N/mm^2}$ . Λαμβάνει υπόψη τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών των οδοντωτών τροχών. Λαμβάνεται από τον πίνακα 1-2

$Z_\varepsilon = \sqrt{(4 - \varepsilon_\alpha)/3}$ : συντελεστής επικάλυψης. Λαμβάνει υπόψη την επιρροή του βαθμού επικάλυψης.

$\sigma_{HP}$ : επιτρεπόμενη τάση για πίεση επιφανείας σε  $N/mm^2$ . Υπολογίζεται χωριστά για το πινιόν ( $\sigma_{HP1}$ ) και τον τροχό ( $\sigma_{HP2}$ )

$\sigma_{HL}$ : αντοχή διάρκειας των κατατομών των οδόντων σε πίεση επιφανείας σε  $N/mm^2$ .  
πίνακας 1-1

$S_H$ : συντελεστής ασφαλείας σε πίεση επιφανείας. Λαμβάνεται κατά μέσο όρο  $S_H > 1,35$ . Εάν ο συντελεστής ασφαλείας  $S_H$  αυξηθεί κατά περίπου 0,5 τότε είναι δυνατός ένας κατά προσέγγιση υπολογισμός του  $\sigma_H$  χωρίς να ληφθούν υπόψη οι συντελεστές  $K_V$  και  $K_{Ha}$ .



Σχήμα 3-10: Συντελεστής ζώνης  $Z_H$

Ομάδα υλικού	Σύμβολο υλικού κατά DIN (παλαιό)	Σκληρότητα του τροχού στην επιφάνεια $N/mm^2$	Δυναμική αντοχή	
			στον πόδα σε επαναλαμβανόμενο φορτίο $\sigma_{Fe} N/mm^2$	σε πίεση επιφανείας $\sigma_{He} N/mm^2$
Χυτοσίδηρος με δισκοειδή γραφίτη	GG - 20	1800 HB	80	300
	GG - 25	2200HB	110	360
Χυτοσίδηρος με σφαιροειδή γραφίτη	GGG - 40	1800 HB	370	370
	GGG - 60	2500 HB	450	490
	GGG - 80	3200 HB	500	610
Μαύρος μαλακτός χυτοσίδηρος	GTS - 35	1500 HB	330	320
	GTS - 65	2200 HB	410	460
Χυτοχάλυβες	GS - 52	1600 HB	280	320
	GS - 60	1750 HB	320	380
Χάλυβες κατασκευών	St50	1600 HB	320	370
	St60	1900 HB	350	430
	St70	2080 HB	510	460
Βελτιωμένοι χάλυβες	C45	1850 HV10	410	530
	34CrMo4	2700 HV10	520	530
	42CrMo4	3000 HV10	570	600
	34CrNiMo6	3100 HV10	610	630
Βελτιωμένοι χάλυβες, βαμμένοι με φλόγα ή επαγωγικά	C45	4200 HV10	620	710
	16MnCr5	5600 HV10	650	770
	42CrMo4	6100 HV10	680	830
	34Cr4	6500 HV10	900	1350
Βελτιωμένοι χάλυβες εναζωτωμένοι	42CrMo4	5500 HV10	770	1070
	16MnCr5	5500 HV10	810	1100
	31CrMoV9	7800 HV10	840	1230
Χάλυβες επιφανειακής βαφής	16MnCr5	7200 HV10	860	1470
	15CrNi6	7200 HV10	920	1490
	17CrNiMo6	7400 HV10	1000	1510

Πίνακας 3-1: Υλικά για οδοντωτούς τροχούς με ενδεικτικές τιμές αντοχής.

Τροχός 1		Τροχός 2		
Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας $N/mm^2$	Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας $N/mm^2$	$\frac{Z_M}{\sqrt{N/mm^2}}$
Χάλυβας	206000	Χάλυβας	206000	189,8
		Χυτοχάλυβας	202000	188,9
		Χυτοσίδηρος με σφαιροειδή γραφίτη	173000	181,4
		Χυτός κασσιτερούχος ορείχαλκος	103000	155
		Κασσιτερούχος ορείχαλκος	113000	159,8
		Χυτοσίδηρος με δισκοειδή γραφίτη (φαιός χυτοσίδηρος)	126000 έως 118000	165,4 έως 162,0
Χυτοχάλυβας	202000	Χυτοχάλυβας	202000	188
		Χυτοσίδηρος με σφαιροειδή γραφίτη	173000	180,5
		Χυτοσίδηρος με δισκοειδή γραφίτη (φαιός χυτοσίδηρος)	118000	161,4
Χυτοσίδηρος με σφαιροειδή γραφίτη	173000	Χυτοσίδηρος με σφαιροειδή γραφίτη	173000	173,9
		Χυτοσίδηρος με δισκοειδή γραφίτη (φαιός χυτοσίδηρος)	118000	156,6
Χυτοσίδηρος με δισκοειδή γραφίτη (φαιός χυτοσίδηρος)	126000 έως 118000	Χυτοσίδηρος με δισκοειδή γραφίτη (φαιός χυτοσίδηρος)	118000	146,0 έως 143,7
Χάλυβας	206000	Σκληρό πλέγμα με $\nu = 0,5$	7850 i.M.	56,4

**Πίνακας 3-2:** Συντελεστής υλικού  $Z_M$  (DIN 3990)



## 4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

### 4.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλ. μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων [21].

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρώϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και έγινε από διάφορους σπουδαίους επιστήμονες όπως Ιωάννης Αργύρης, ο Ρέι Κλάφ, ο Βάλτερ Ρίτζ, ο Μπόρις Γκαλέρκιν και άλλοι.

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

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor.
3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
4. Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

## 4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS

### 4.2.1 Η ιστορία της εταιρίας

Η εταιρία SolidWorks Corporation ιδρύθηκε το Δεκέμβριο του 1993 από τον απόφοιτο του ινστιτούτο έρευνας και τεχνολογίας της Μασαχουσέτης Jon Hirschtick [19],[20]. Ο Hirschtick και ένα ακόμη μέλος του MIT Blackjack Team χρησιμοποίησαν 1.000.000 δολάρια για να συσταθεί η εταιρεία, η οποία βασίζεται αρχικά στην πόλη Waltham της Μασαχουσέτης. Ο Hirschtick προσέλαβε μια ομάδα μηχανικών με στόχο την οικοδόμηση 3D CAD λογισμικού που ήταν εύκολο στη χρήση και διαθέσιμο στο λογισμικό των Microsoft Windows. Λειτουργικά το πρώτο προϊόν κυκλοφόρησε από την Concord – SolidWorks το 1995 με την ονομασία SolidWorks 95. Το 1997, η εταιρία Dassault, καλύτερα γνωστή για το λογισμικό του CATIA CAD, απέκτησε την SolidWorks έναντι 310 εκατομμυρίων.



#### **4.2.2 Τι είναι το SolidWorks**

Το SolidWorks είναι ένα 3D σχεδιαστικό εμπορικό πακέτο το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη του να παράγει τρισδιάστατα μοντέλα σε πραγματική κλίμακα, χρησιμοποιώντας περιβάλλον προσομοίωσης με ικανότητα σχεδιασμού και ανάλυσης.

Η χρήση του σήμερα είναι ευρεία σε εκπαιδευτικό και ερευνητικό επίπεδο (από σπουδαστές σχολών) και επαγγελματικό (από επαγγελματίες σχεδιαστές εξαρτημάτων με τελικό αποδέκτη την βιομηχανία), με σκοπό την παραγωγή απλών αλλά και σύνθετων κομματιών, μηχανισμών και σχεδίων.

Ο σχεδιασμός με ένα πακέτο όπως το SolidWorks έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το συμβατικό σχέδιο, αφού εξοικονομεί στον χρήστη του χρόνο, δυναμικό προσωπικό και σαν επέκταση αυτών χρηματικό κέρδος.

Οι δυνατότητες που έχει το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι να παράγει τρισδιάστατα απλά μοντέλα, σύνθετα εξαρτήματα με την τεχνική της συναρμολόγησης (assembly), κατασκευαστικά σχέδια, κινηματική προσομοίωση, ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων κ.α.

Ένα όμως από τα χαρακτηριστικότερα στοιχεία του SolidWorks είναι η προσομοίωση της διεργασίας κατασκευής ενός εξαρτήματος με την χρήση εργαλειομηχανών και η διασύνδεση του με τις ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές (CNC).

Το SolidWorks είναι το πλέον καταξιωμένο λογισμικό παγκοσμίως, στο χώρο του 3D μηχανολογικού σχεδιασμού, εφόσον στις αρχές του 2013 περισσότεροι των 2.080.000 σχεδιαστών προϊόντων και μηχανικών χρησιμοποιούν το SolidWorks. Τα έσοδα της εταιρίας το 2011 ξεπέρασαν τα 483 εκατομμύρια δολάρια.

#### **4.2.3 Μεθοδολογία μοντελοποίησης**

Το SolidWorks είναι ένα πρόγραμμα το οποίο έχει βάση την στερεά μοντελοποίηση, και χρησιμοποιεί ένα παραμετρικό χαρακτηριστικό που βασίζεται στην προσέγγιση και τη δημιουργία μοντέλων.

Οι παράμετροι αναφέρονται οι τιμές των οποίων καθορίζουν το σχήμα ή τη γεωμετρία του μοντέλου. Οι παράμετροι μπορεί να είναι είτε αριθμητικές, όπως μήκη γραμμών ή διάμετροι κύκλων, είτε γεωμετρικές, όπως είναι η εφαπτομένη, η παράλληλη, η ομόκεντρος, η οριζόντια, η κατακόρυφος, κλπ. Οι αριθμητικοί

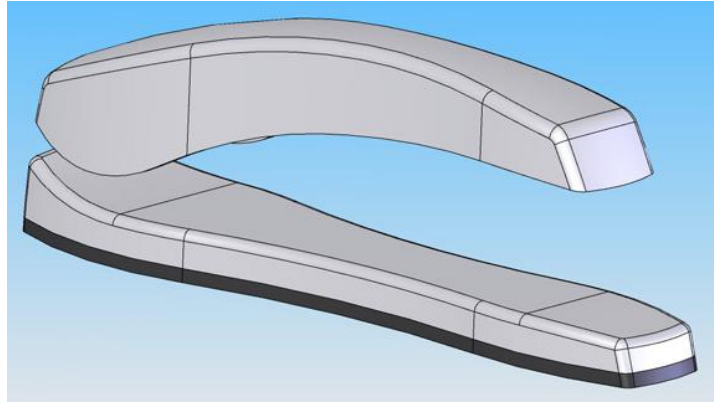
παράμετροι μπορούν να σχετίζονται μεταξύ τους μέσω της χρήσης των σχέσεων, που τους επιτρέπει να καταγράψουν το σκοπό του σχεδιασμού .

Σκοπός του σχεδιασμού είναι το πώς ο δημιουργός του αντικειμένου θέλει να ανταποκρίνεται στις αλλαγές και στις ενημερώσεις . Για παράδειγμα, θέλουμε στην κορυφή ενός μπουκαλιού να παραμείνει η τρύπα στην πάνω επιφάνεια, ανεξάρτητα από το ύψος ή το μέγεθος του μπουκαλιού. Το SolidWorks επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει ότι η τρύπα είναι ένα χαρακτηριστικό στην πάνω επιφάνεια, και στη συνέχεια θα τηρήσει αυτό τον σκοπό του σχεδιασμού, οπότε δεν έχει σημασία τι ύψος θα αναθέσει ο σχεδιαστής αργότερα στο δοχείο .

Χαρακτηριστικά αναφέρονται τα δομικά στοιχεία του τμήματος. Είναι τα σχήματα και οι πράξεις που κατασκευάζουν το αντικείμενο. Τα χαρακτηριστικά βασίζονται συνήθως σε ένα 2D ή 3D σκίτσο σχημάτων, όπως οι οπές, σχισμές, κλπ. Αυτό το σχήμα στην συνέχεια εξωθείται ή κόβεται, δηλαδή προσθέτετε ή αφαιρείτε αντίστοιχα υλικό από το αντικείμενο.

Το χτίσιμο ενός μοντέλου σε SolidWorks συνήθως ξεκινά με ένα σχέδιο 2D (αν και 3D σχέδια είναι διαθέσιμα για τους χρήστες) . Το σχέδιο αποτελείται από γεωμετρικά σχήματα, όπως σημεία, γραμμές, τόξα και καμπυλότητες (εκτός της υπερβολής ). Οι διαστάσεις προστίθενται στο σχέδιο για να καθοριστεί το μέγεθος και η θέση της γεωμετρίας. Οι αναφορές χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά όπως, επαφή, παραλληλισμό, καθετότητα και ομοκεντρία. Η παραμετρική φύση του SolidWorks σημαίνει ότι οι διαστάσεις και οι αναφορές οδηγούν την γεωμετρία του μοντέλου και όχι άλλο μέσο γύρω του. Οι διαστάσεις στο σχέδιο μπορούν να ελέγχονται ανεξάρτητα, ή και από τις αναφορές με άλλες παραμέτρους εντός ή εκτός σχεδίου .

Το SolidWorks περιλαμβάνει επίσης πρόσθετα προηγμένα εργαλεία συναρμολόγησης, που επιτρέπουν μοντελοποιημένη συναρμολόγηση για να αναπαράγουν με ακρίβεια την περιστροφική κίνηση ενός πραγματικού συστήματος ζεύγους οδοντωτών τροχών.



**Σχήμα 4-1** : Σχεδιασμός γεωμετρίας συρραπτικού μέσω SolidWorks

#### **4.2.4 Μορφές αρχείων**

Τα αρχεία SolidWorks χρησιμοποιούν μια δομημένη μορφή αρχείου αποθήκευσης της Microsoft. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν διάφορα αρχεία ενσωματωμένα σε κάθε SLDDRW (σχεδιαστικό αρχείο), SLDPRT (αρχείο τμήματος), SLDASM (αρχείο συναρμολόγησης) αρχείο. Επίσης το SolidWorks μπορεί να ανοίγει ή να αποθηκεύει αντίστοιχα στις ακόλουθες μορφές αρχείων:

- Part Files (\*.prt, \*.sldprt),
- Assembly Files (\*.asm, \*.sldasm),
- Drawing Files (\*.drw, \*.slddrw),
- DXF (\*.dxf), DWG (\*.dwg),
- Adobe Illustrator Files (\*.ai),
- Lib Feat Part (\*.lfp, \*.sldlfp),
- Template (\*.prtdot, \*.asmdot, \*.drwdot),
- Parasolid (\*.x\_t, \*.x\_b, \*.smt\_txt, \*.xmt\_bin),
- Stereolithographic STL (\*.stl)
- IGES (\*.igs, \*.iges),
- STEP AP203/214 (\*.step, \*.stp),
- ACIS (\*.sat), VDAFS (\*.vda),
- Catia Graphics (\*.cgr),
- Pro Engineer Part (\*.prt, \*.prt.\*, \*.xpr),
- Pro Engineer Assembly (\*.asm, \*.asm.\*, \*.xas),
- Autodesk Inventor Part (\*.ipt),
- Autodesk Assembly (\*.iam),
- Solid Edge Part (\*.par, \*.psm),
- Solid Edge Assembly (\*.asm),
- CADKEY (\*.prt, \*.ckd),
- IDF (\*.emn, \*.brd, \*.bdf, \*.idb).

### 4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Η έννοια του παραμετρικού σχεδιασμού αναφέρεται σε μεθόδους χρήσης του υπολογιστή για την κατασκευή πολύπλοκων κατά κανόνα γεωμετριών με οικονομικό τρόπο. Αυτό γίνεται με την παραμετροποίηση σε εξειδικευμένα προγράμματα των κατασκευών αυτών και την εξάρτηση των μερών με το σύνολο, με συγκεκριμένους συσχετισμούς. Σε ένα τέτοιο παραμετρικό μοντέλο οι αλλαγές που γίνονται στη γεωμετρία του «ενημερώνουν» αυτόματα τις γεωμετρίες κατώτερων ιεραρχικά στοιχείων (π.χ. κατασκευαστικοί κόμβοι), αλλά και η προσαρμογή της ίδιας της λεπτομέρειας σε διαφορετικές συνθήκες αυτοματοποιείται.

Εφ' όσον βρισκόμαστε στο περιβάλλον του υπολογιστή, το Output του παραμετρικού μοντέλου μπορεί να είναι η πληροφορία που χρειάζονται μηχανές καθοδηγούμενες από υπολογιστή (CNC) για να κατασκευάσουν τη δεδομένη γεωμετρία. Συνεπώς μέσα στο ίδιο το παραμετρικό μοντέλο εμπεριέχεται η μορφή, οι εν δυνάμει παραλλαγές της και οι οδηγίες κατασκευής κάθε μιας από αυτές.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία (μέθοδος) χρησιμοποιείται ευρέως από τη βιομηχανία κατασκευής μηχανολογικών εξαρτημάτων, αλλά και από την επιστήμη της αρχιτεκτονικής και είναι απαραίτητη για την εξαγωγή μιας πληθώρας λύσεων με την βοήθεια του υπολογιστή. Με βάση τα παραπάνω, η χρησιμότητα του παραμετρικού σχεδιασμού εντοπίζεται:

1. Στην κατασκευή πολύπλοκων μορφών και γεωμετριών που δεν θα μπορούσαν να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους.
2. Στην εισαγωγή σε έναν ιεραρχημένο τρόπο σχεδιασμού.
3. Στην επαφή και το σχεδιασμό με βάση το υλικό, μια και είμαστε αναγκασμένοι να δουλεύουμε ευθύς εξ' αρχής με το υλικό και τις ιδιότητές του.
4. Στην έμφαση στην κατασκευαστική λεπτομέρεια.
5. Στην δυναμική αντιμετώπιση μηχανολογικών προβλημάτων, δηλαδή στη δημιουργία μοντέλων ή συστημάτων τα οποία μπορούν να ανταποκριθούν σε διαφορετικές συνθήκες.

#### 4.4 ΥΛΙΚΟ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Το υλικό των οδοντωτών τροχών που επιλέξαμε για την παρούσα μελέτη είναι ανοξείδωτος χάλυβας (Stainless Steel) και στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται κάποιες από τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού.

<b>ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ</b>	<b>ΤΙΜΗ</b>	<b>ΜΟΝΑΔΕΣ</b>
Μέτρο Ελαστικότητας	200	<i>GPa</i>
Λόγος Poisson	0,28	-
Μέτρο Διάτμησης	77	<i>GPa</i>
Πυκνότητα	7800	<i>Kg/m<sup>3</sup></i>
Ειδική θερμότητα	460	<i>J/(Kg K)</i>
Θερμική αγωγιμότητα	18	<i>W/(m K)</i>
Συντελεστής θερμικής διαστολής	1,10E-05	<i>1/K</i>
Αντοχή σε εφελκυσμό	513,6	<i>MPa</i>

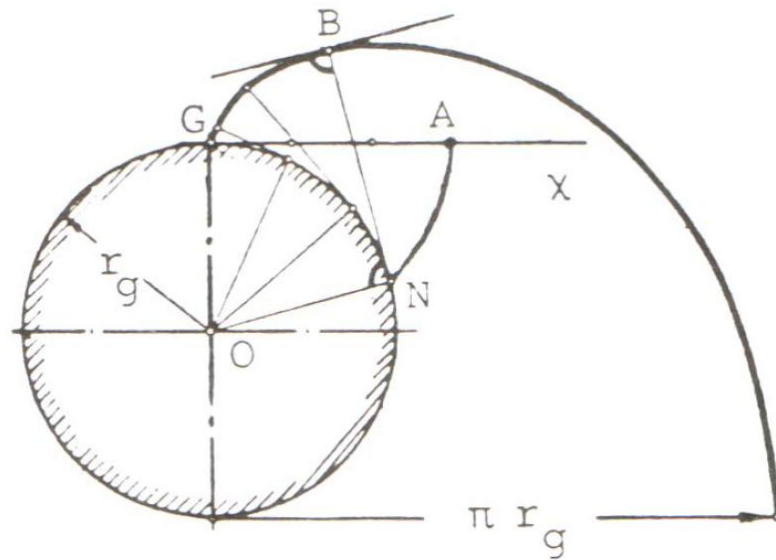
Πίνακας 4 - 1 : Ιδιότητες υλικού

#### 4.5 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

##### 4.5.1 Η εξελεγμένη καμπύλη

Η εξελεγμένη καμπύλη προκύπτει από την τροχιά που διαγράφει ένα σημείο ευθείας γραμμής, όταν αυτή κυλιέται χωρίς ολίσθηση επί της περιφέρειας κύκλου, τον οποίο αποκαλούμε βασικό (O,rg).

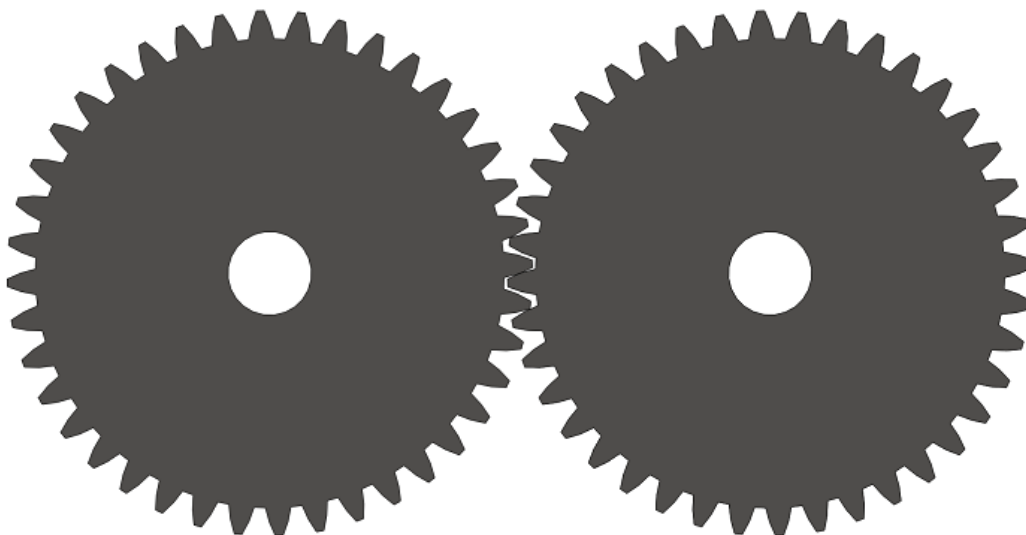
Όπως προκύπτει από το σχήμα που ακολουθεί, το σημείο G διαγράφει την εξελεγμένη GB ενώ ταυτόχρονα το σημείο A διαγράφει την εξελεγμένη AN. Προφανώς τα μήκη GB και AN είναι ίσα μεταξύ τους, ενώ τα GA και BN είναι ίσα με το μήκος του τόξου GN [3].



**Σχήμα 4 - 2 :** Η εξελεγμένη καμπύλη

Το σχεδιαστικό πακέτο Solidworks παρέχει βιβλιοθήκη διαφόρων στοιχείων τα οποία μπορείς να εισάγεις, οπότε τα μοντέλα που δημιουργήσαμε είναι τυποποιημένα κατά ISO και κατά AGMA για διάφορες σχέσεις μετάδοσης και το πάχος των τροχών είναι  $12\text{ mm}$ . Παρακάτω μπορούμε να δούμε την γεωμετρία των οδοντωτών τροχών για τις διάφορες τυποποιήσεις και σχέσεις μετάδοσης.

Για σχέση μετάδοσης 1:1 και τυποποίηση κατά ISO προκύπτει η παρακάτω γεωμετρία, τα χαρακτηριστικά για κάθε τροχό φαίνονται στον πίνακα 4-2.

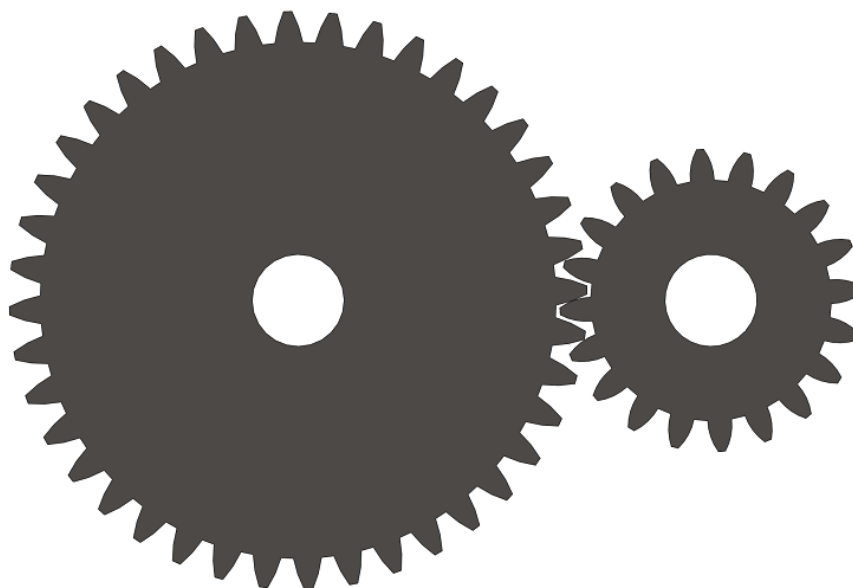


**Σχήμα 4 - 3:** Γεωμετρία τροχών κατά ISO και σχέση μετάδοσης 1:1.

	<b>Τροχός 1</b>	<b>Τροχός 2</b>
<b><i>m</i></b>	1,5	1,5
<b><i>z</i></b>	40	40
<b><i>d<sub>ο</sub> (mm)</i></b>	60	60
<b><i>d<sub>κ</sub> (mm)</i></b>	63	63
<b><i>b (mm)</i></b>	12	12
<b><i>φ (°)</i></b>	20	20

Πίνακας 4 - 2 : Χαρακτηριστικά τροχών κατά ISO για σχέση μετάδοσης 1:1

Για σχέση μετάδοσης 1:2 και τυποποίηση κατά ISO προκύπτει η παρακάτω γεωμετρία, τα χαρακτηριστικά για κάθε τροχό φαίνονται στον πίνακα 4-3.

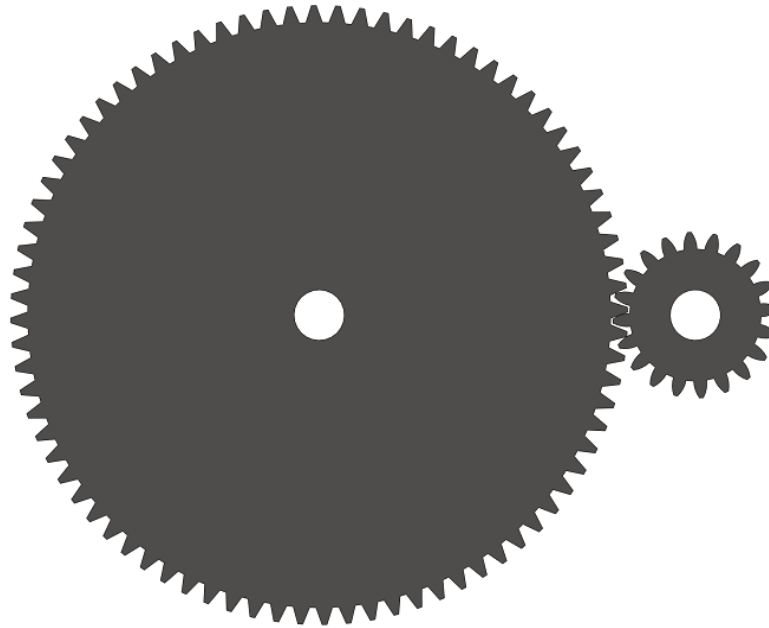


Σχήμα 4 - 4: Γεωμετρία τροχών κατά ISO και σχέση μετάδοσης 1:2

	<b>Τροχός 1</b>	<b>Τροχός 2</b>
<b><i>m</i></b>	1,5	1,5
<b><i>z</i></b>	40	20
<b><i>d<sub>ο</sub> (mm)</i></b>	60	30
<b><i>d<sub>κ</sub> (mm)</i></b>	63	31,5
<b><i>b (mm)</i></b>	12	12
<b><i>φ (°)</i></b>	20	20

Πίνακας 4 - 3 : Χαρακτηριστικά τροχών κατά ISO για σχέση μετάδοσης 1:2

Για σχέση μετάδοσης 1:4 και τυποποίηση κατά ISO προκύπτει η παρακάτω γεωμετρία, τα χαρακτηριστικά για κάθε τροχό φαίνονται στον πίνακα 4-4.



**Σχήμα 4 - 5:** Γεωμετρία τροχών κατά ISO και σχέση μετάδοσης 1:4

	<b>Τροχός 1</b>	<b>Τροχός 2</b>
<b><i>m</i></b>	1,5	1,5
<b><i>z</i></b>	80	20
<b><i>d<sub>o</sub> (mm)</i></b>	120	30
<b><i>d<sub>k</sub> (mm)</i></b>	126	31,5
<b><i>b (mm)</i></b>	12	12
<b><i>φ (°)</i></b>	20	20

**Πίνακας 4 - 4 :** Χαρακτηριστικά τροχών κατά ISO για σχέση μετάδοσης 1:4

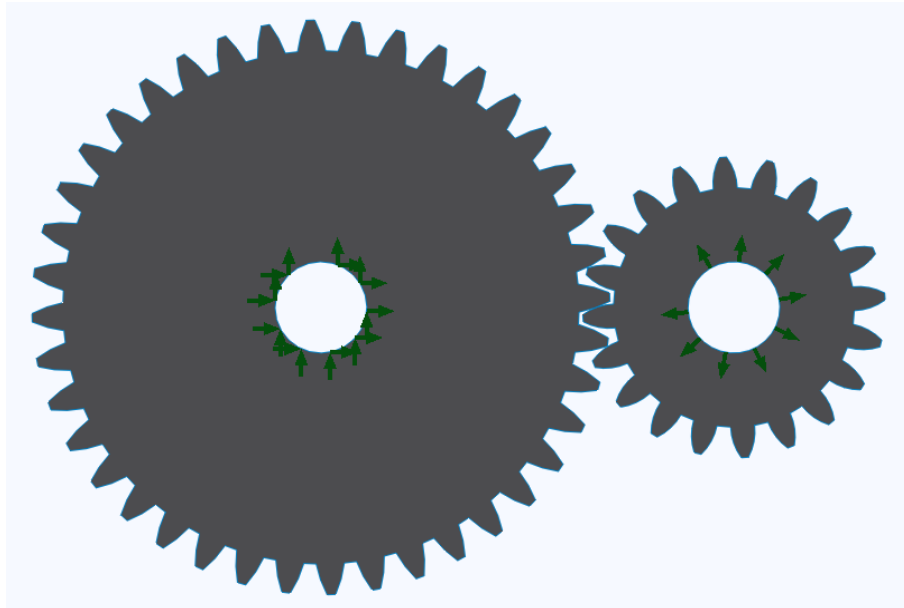
Οι ίδιες γεωμετρίες εισάγονται και για την τυποποίηση κατά AGMA με τους ίδιους αριθμούς οδόντων.

#### **4.6 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

Αφού έχουμε εισάγει την γεωμετρία των τροχών και το υλικό με όλες τις μηχανικές ιδιότητες του, τώρα θα πρέπει να εισάγουμε τις συνοριακές συνθήκες των οδοντωτών τροχών και πιο συγκεκριμένα θα επιβάλουμε μια πάκτωση στον αριστερό



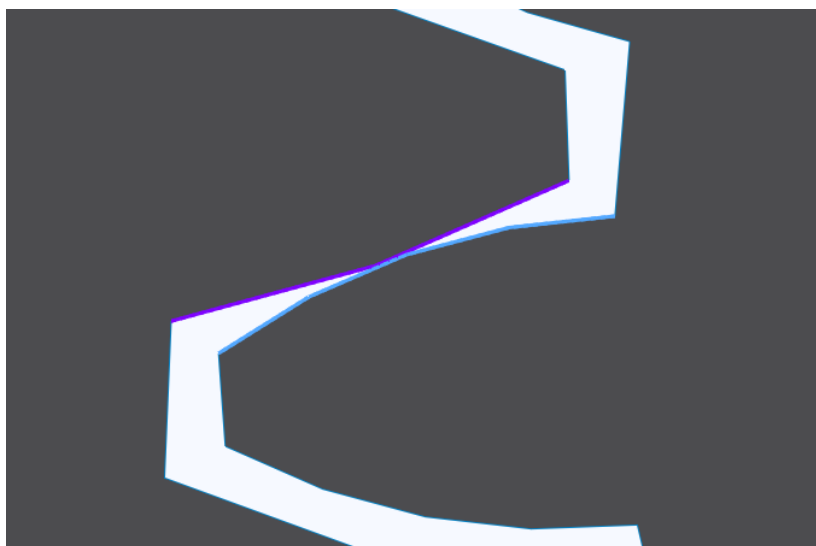
τροχό (τροχός 1), ενώ στο δεξί τροχό (τροχός 2) θα του επιβάλουμε μια άρθρωση. Στο σχήμα 4-6 φαίνονται οι στηρίξεις που έχει το ζεύγος οδοντωτών τροχών.



Σχήμα 4 - 6 : Συνοριακές συνθήκες που έχουν επιβληθεί επάνω στους τροχούς

#### 4.7 ΣΥΝΔΕΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

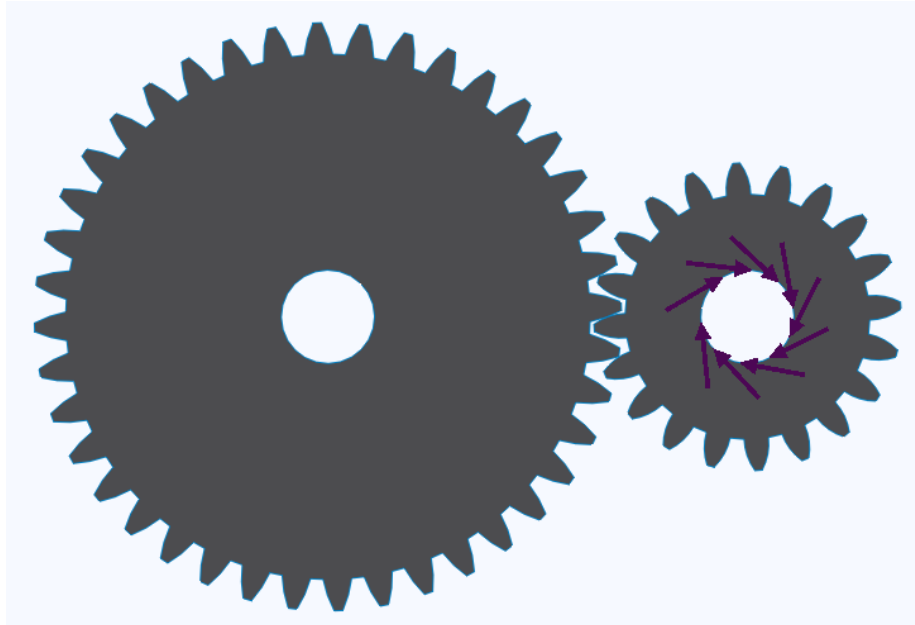
Η σύνδεση των οδοντωτών τροχών θα οριστεί έτσι ώστε κάθε φορά θα εμπλέκεται μόνο ένα δόντι κάθε τροχού. Επίσης στην σύνδεση των τροχών θα λάβουμε υπ' όψιν μας και την τριβή η οποία ασκείται επάνω στην επιφάνεια των οδόντων. Θα εισάγουμε λοιπόν και τον συντελεστή τριβής με  $\mu=1$ .



Σχήμα 4 - 7 : Σύνδεση οδοντωτών τροχών

#### 4.8 ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ - ΔΥΝΑΜΕΙΣ

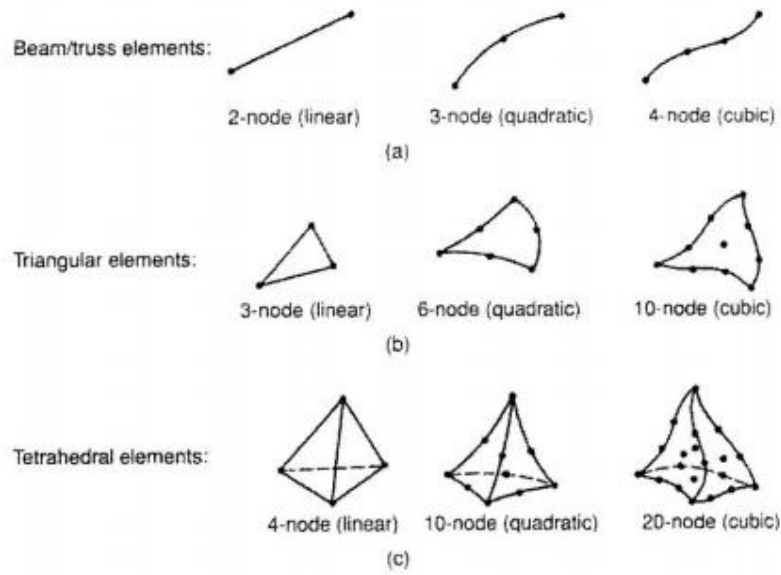
Η φόρτιση την οποία επιβάλλουμε στους τροχούς είναι μια περιφερειακή δύναμη και συγκεκριμένα την επιβάλλουμε γύρω από τον άξονα συμμετρίας του τροχού 2 με μέγεθος  $1N$ .



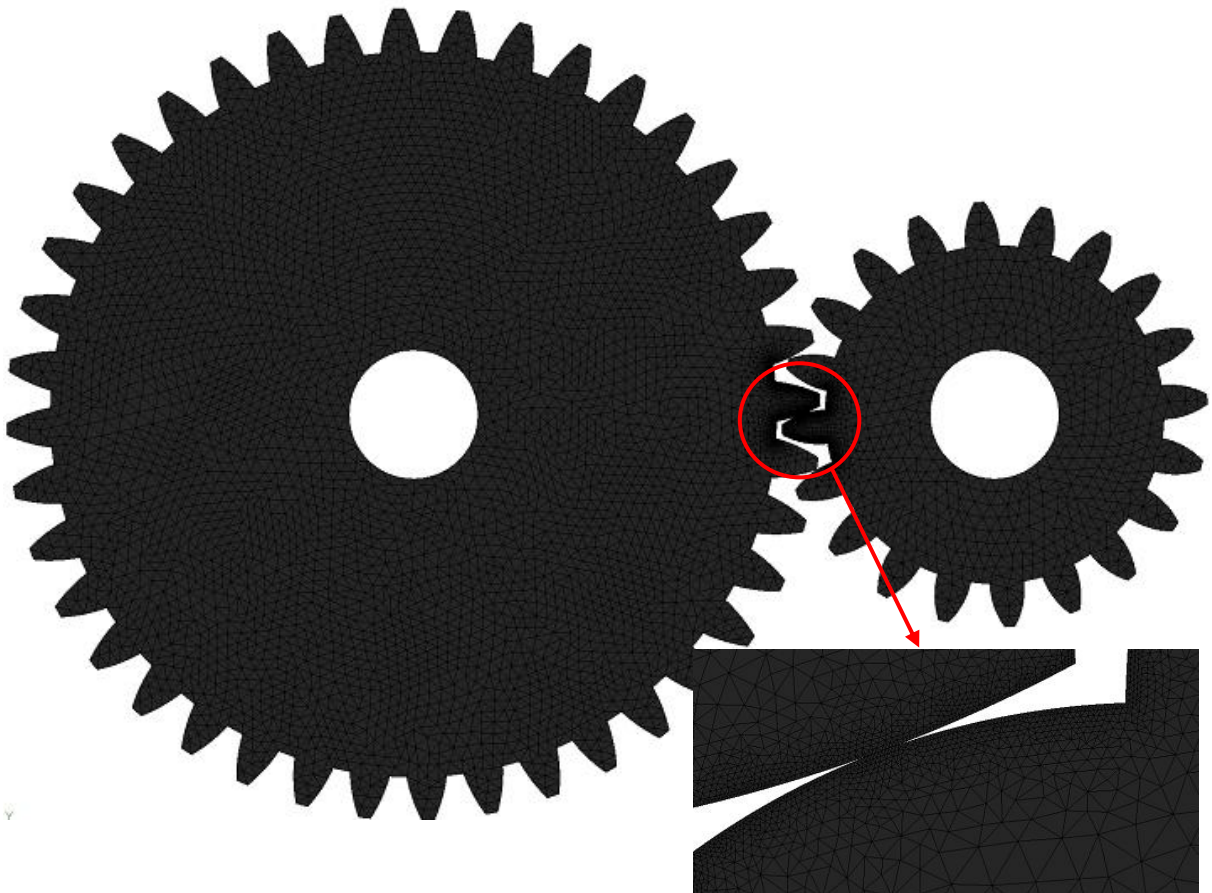
Σχήμα 4 - 8 : Φορτίσεις οδοντωτών τροχών

#### 4.9 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Σε αυτή την παράγραφο παρατίθενται κάποιες πληροφορίες σχετικά με το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήσαμε, στο σχήμα 4-9 απεικονίζονται μονοδιάστατα, δισδιάστατα και τρισδιάστατα αντίστοιχα πεπερασμένα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούμε σε διάφορα προβλήματα. Στην περίπτωση μας έχουμε χρησιμοποιήσει τριεδρικά γραμμικά στοιχεία με τρεις κόμβους ανά στοιχείο. Το μέγεθος των στοιχείων που επιλέχθηκε για τους τροχούς είναι  $1,00\text{ mm}$  ενώ έχουμε πυκνώσει αρκετά το πλέγμα στα δόντια τα οποία έρχονται σε επαφή με το μέγεθος των στοιχείων να είναι  $0,03\text{ mm}$ . Στο σχήμα 4-10 απεικονίζονται οι τροχοί με το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.



**Σχήμα 4 - 9 :** Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) δισδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα



**Σχήμα 4 - 10 :** Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων



## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μιλήσουμε για τα αποτελέσματα τα οποία θα εξάγουμε, επίσης θα παρουσιάσουμε τα διαγράμματα τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση των οδοντωτών τροχών.

### 5.2 ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

Η στρεπτική δυσκαμψία των δοντιών είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των μετωπικών οδοντωτών τροχών [8],[9],[10]. Λόγω των σύντομων χρόνων υπολογισμού, το 2D μοντέλο είναι κατάλληλο για να προσομοιώσει μια ποικιλία διαφορετικών ζευγών γραναζιών σε σύντομο χρονικό διάστημα . Το πιο πολύπλοκο μοντέλο 3D διαθέτει περισσότερες επιλογές όσον αφορά τη διερεύνηση, τροποποιήσεις προσώπου δοντιών για περαιτέρω μελέτη . Η στρεπτική δυσκαμψία μπορεί να χρησιμοποιηθεί (για παράδειγμα) σε προσομοιώσεις πολλαπλών σωμάτων, στα κιβωτία ταχυτήτων.

Για τον υπολογισμό της στρεπτικής δυσκαμψίας θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την σχέση 5.1

$$M_z = K_\phi \cdot \theta_z \quad (5.1)$$

Όπου:

- $M_z$  : Η επιβαλλόμενη ροπή στους τροχούς ( $N \cdot mm$ )
- $K_\phi$  : Η στρεπτική δυσκαμψία του συστήματος ( $N \cdot mm / rad$ )
- $\theta_z$  : Η μετατόπιση των τροχών ( $rad$ )

Χρησιμοποιώντας την σχέση 5.1 και λύνοντας ως προς  $K$  έχουμε:

$$K_{\phi} = \frac{M_z}{\theta_z} \Rightarrow$$

$$K_{\phi} = \frac{F \cdot R}{\theta_z} \quad (5.2)$$

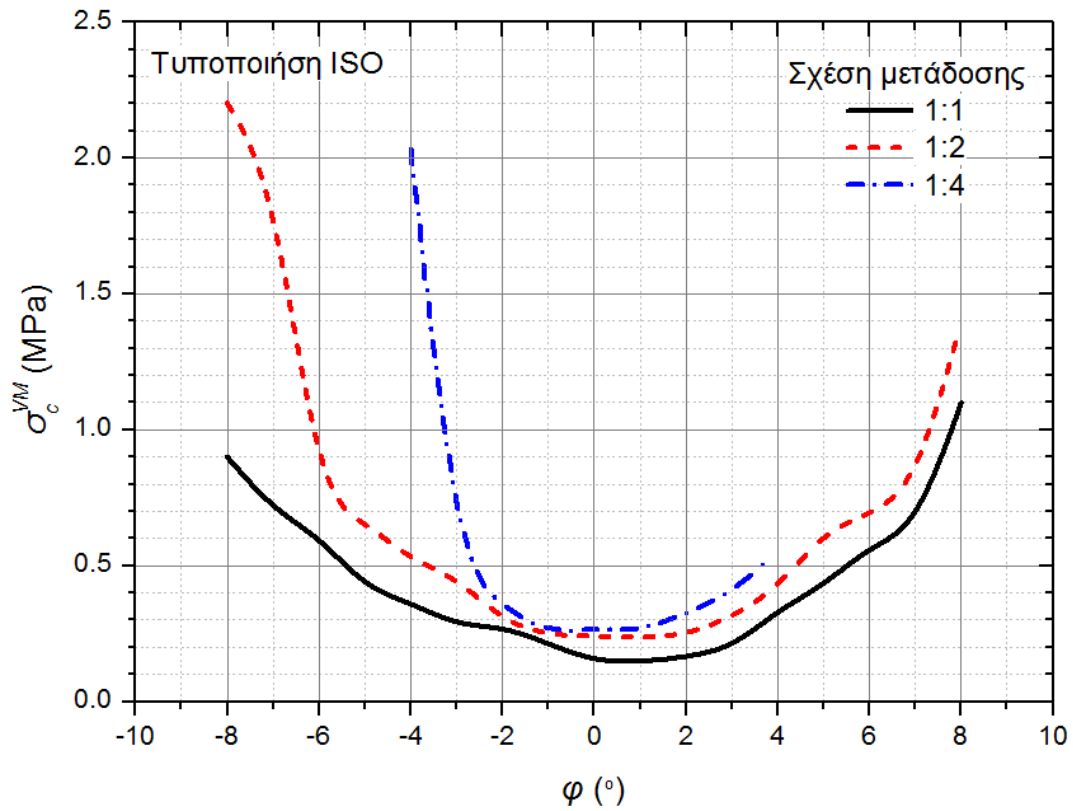
Όπου:

- $F$  : Η περιφερειακή δύναμη που έχουμε επιβάλλει στον τροχό ( $N$ )
- $R$  : Η ακτίνα της σπής του τροχού ( $mm$ )

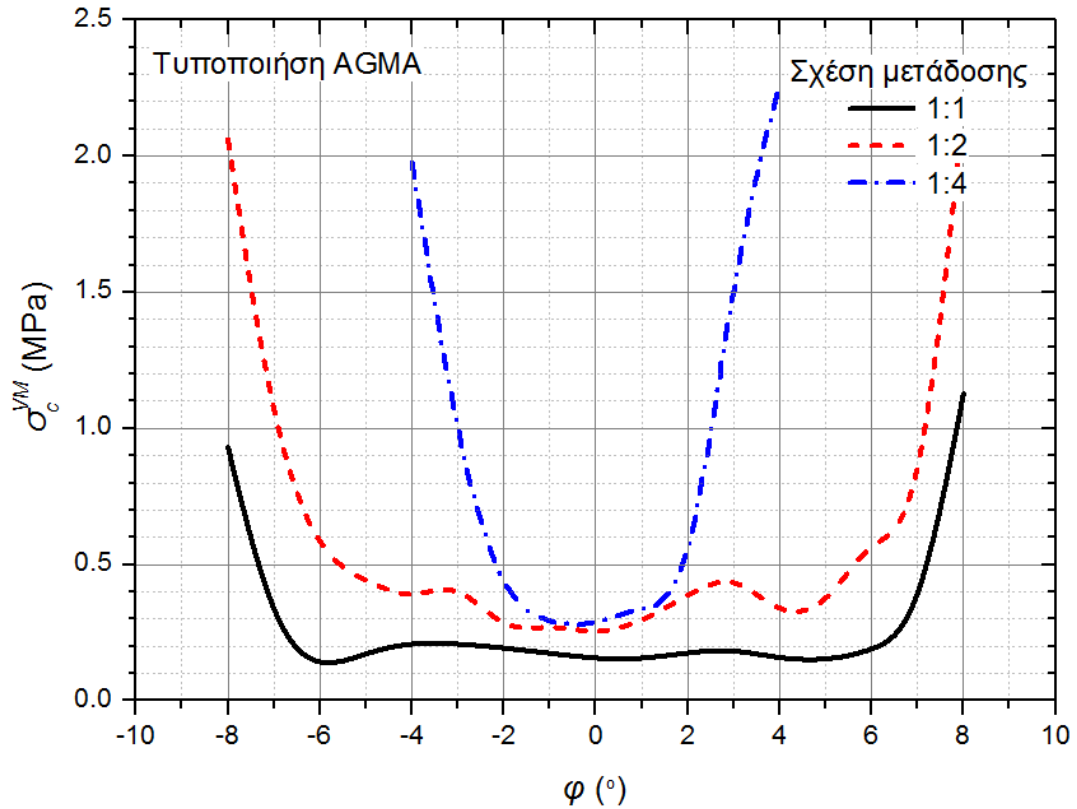
### 5.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Στρέφοντας κάθε φορά κατά μία μοίρα το αντίστοιχο ζεύγος οδοντωτών τροχών παίρναμε κάποιες τιμές τάσης και μετατόπισης (Solidworks), αυτές τις τιμές ύστερα με κατάλληλο πρόγραμμα (Microsoft Excel) τις επεξεργαστήκαμε και πήραμε τα αποτελέσματα που ζητούσαμε για διάφορες γωνίες επαφής των τροχών. Στην συνέχεια με την βοήθεια προγράμματος, (OriginPro) κατασκευάσαμε τα διαγράμματα τάσης επαφής, τάσης στην ρίζα του δοντιού και στρεπτικής δυσκαμψίας του συστήματος τα οποία παρουσιάζονται και αναλύονται στην παρακάτω παράγραφο.

Στο διάγραμμα 1 – 1 παρουσιάζεται η τάση Von Mises στο σημείο επαφής των οδοντωτών τροχών συναρτήσει της γωνίας επαφής για όλες τις σχέσεις μεταδόσεως και τυποποίηση κατά ISO ενώ στο διάγραμμα 1 – 2 παρουσιάζεται για τυποποίηση κατά AGMA.

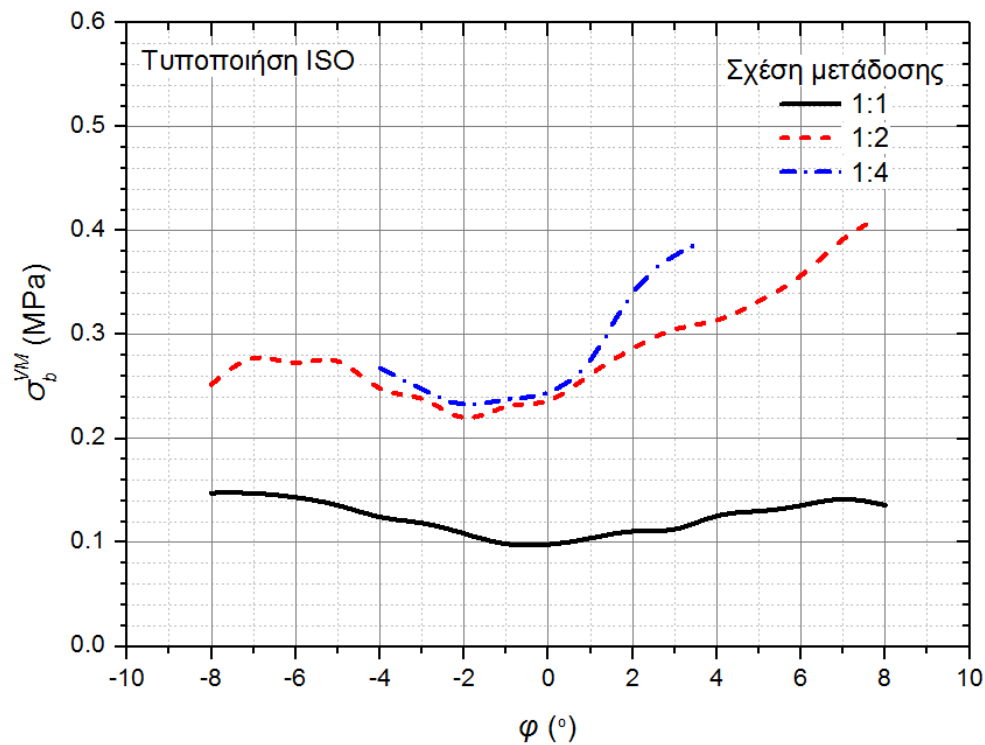


Διάγραμμα 1 – 1 : Τάση επαφής για τυποποίηση ISO

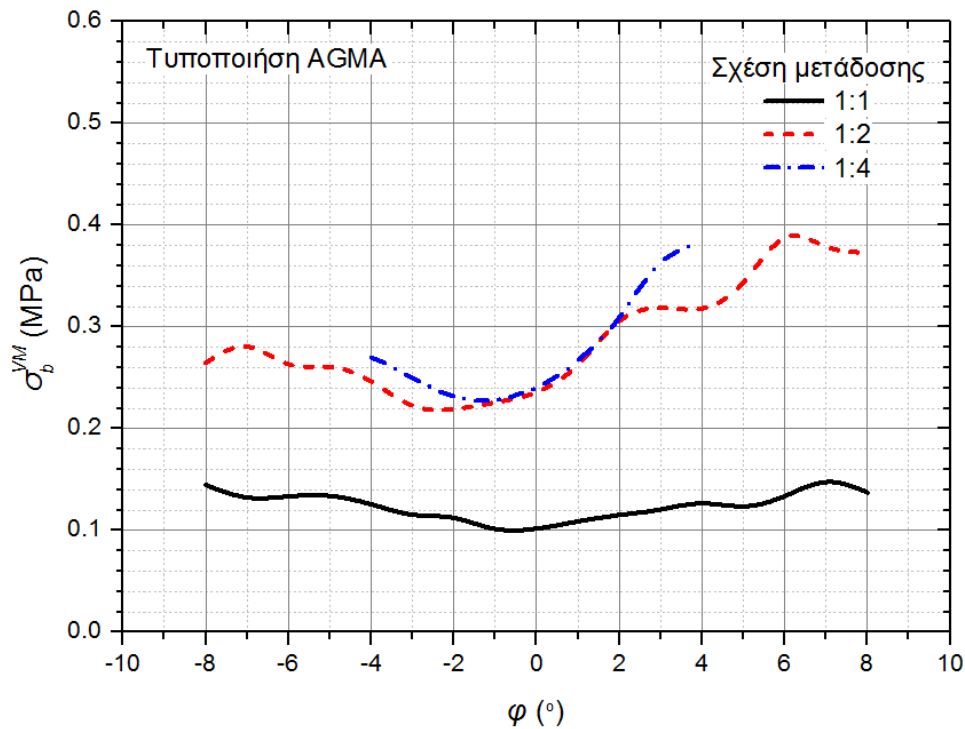


Διάγραμμα 1 – 2 : Τάση επαφής για τυποποίηση AGMA

Στο διάγραμμα 1 – 3 παρουσιάζεται η τάση Von Mises στο σημείο της ρίζας του οδόντα συναρτήσει της γωνίας επαφής για όλες τις σχέσεις μετάδοσης και τυποποίηση κατά ISO ενώ στο διάγραμμα 1 – 4 για τυποποίηση κατά AGMA.



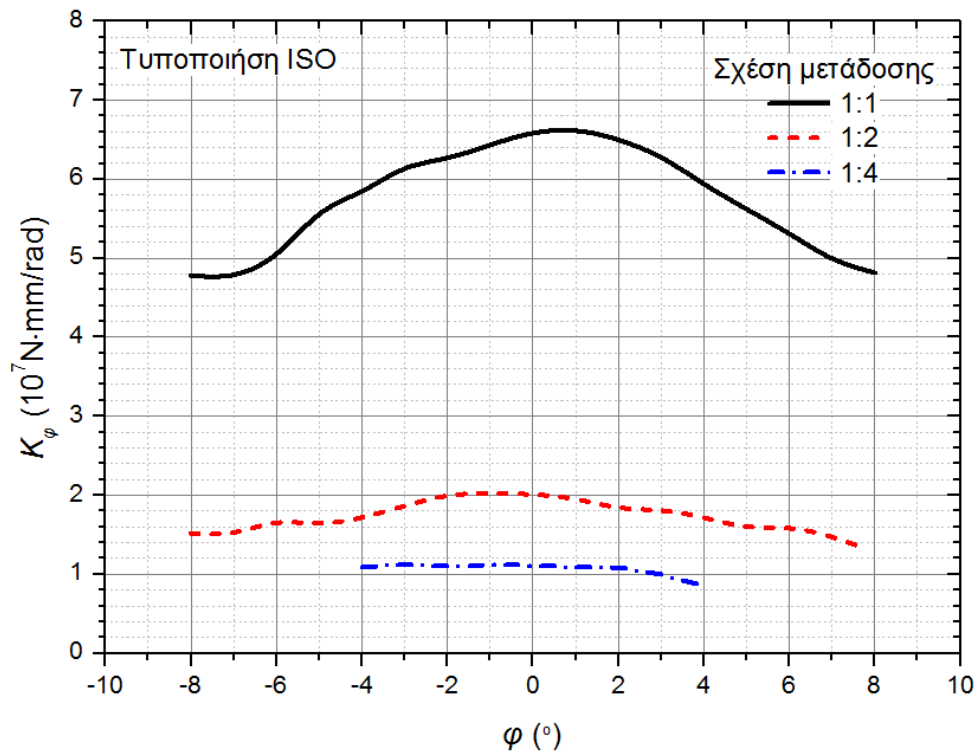
**Διάγραμμα 1 – 3 :** Τάση ρίζας οδόντα για τυποποίηση ISO



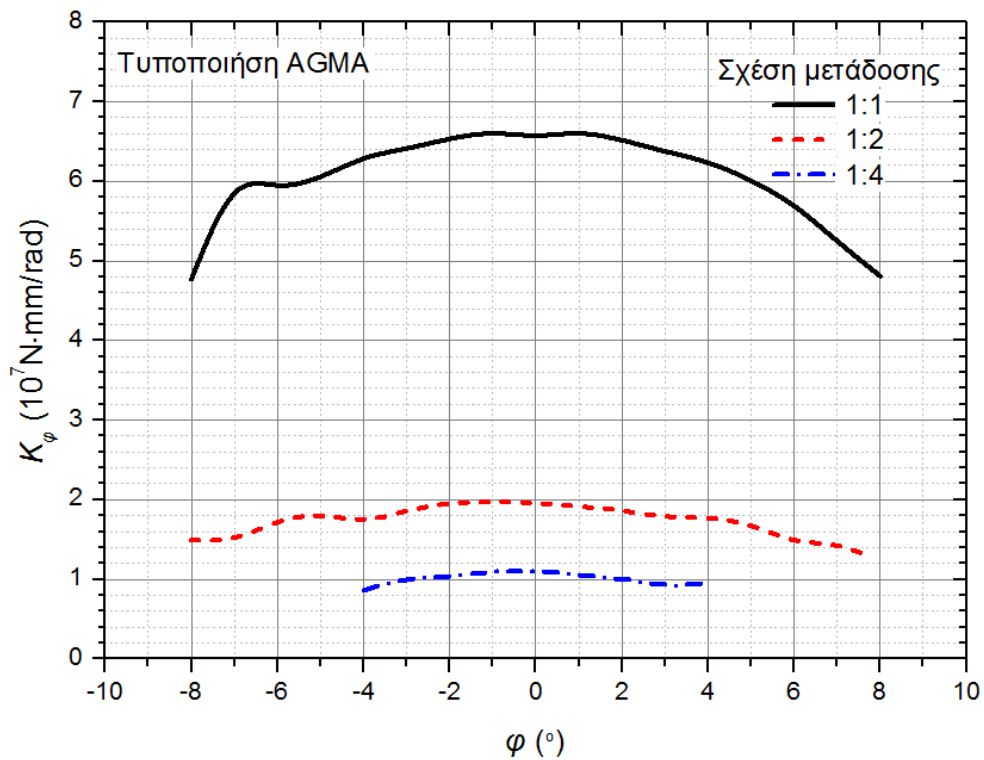
**Διάγραμμα 1 – 4 :** Τάση ρίζας οδόντα για τυποποίηση AGMA



Στο διάγραμμα 1 – 5 παρουσιάζεται η στρεπτική δυσκαμψία του μηχανικού συστήματος συναρτήσει της γωνίας επαφής για όλες τις σχέσεις μετάδοσης και τυποποίηση κατά ISO ενώ στο διάγραμμα 1 – 6 για τυποποίηση κατά AGMA.



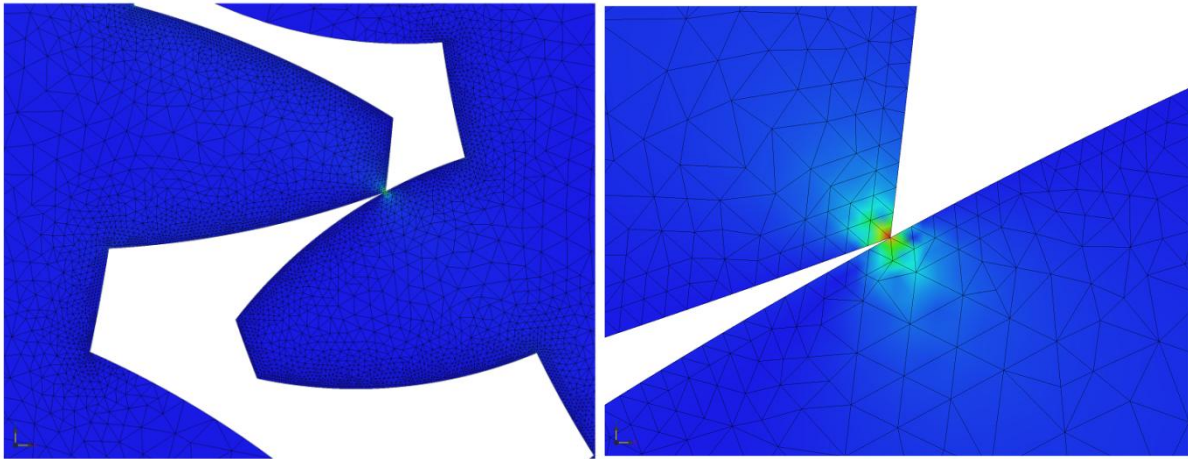
Διάγραμμα 1 – 5 : Στρεπτική δυσκαμψία συστήματος για τυποποίηση ISO



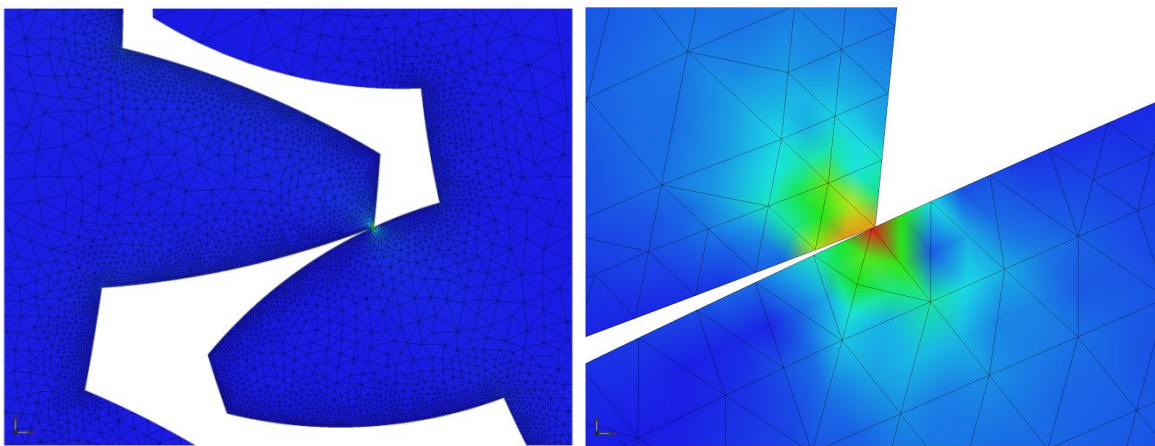
Διάγραμμα 1 – 6 : Στρεπτική δυσκαμψία συστήματος για τυποποίηση AGMA

## 5.4 ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑΤΑ

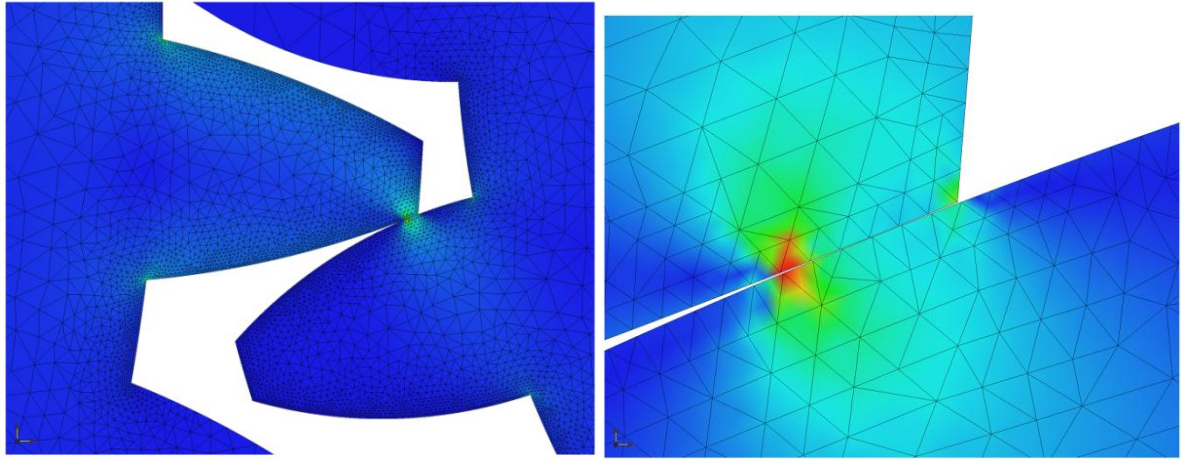
Στην συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα για διάφορες γωνίες επαφής του ζεύγους των οδοντωτών τροχών που σχεδιάσαμε, ποιο συγκεκριμένα για σχέση μετάδοσης 1/2 και για γωνίες από  $-8^\circ$  έως  $+8^\circ$ .



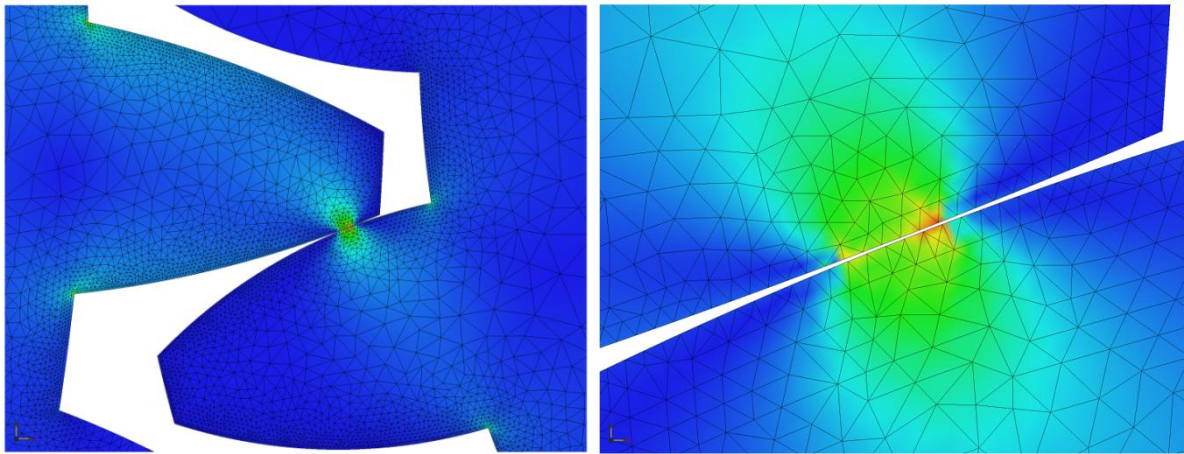
Σχήμα 5 - 1: Γωνιά επαφής  $\varphi = -8^\circ$



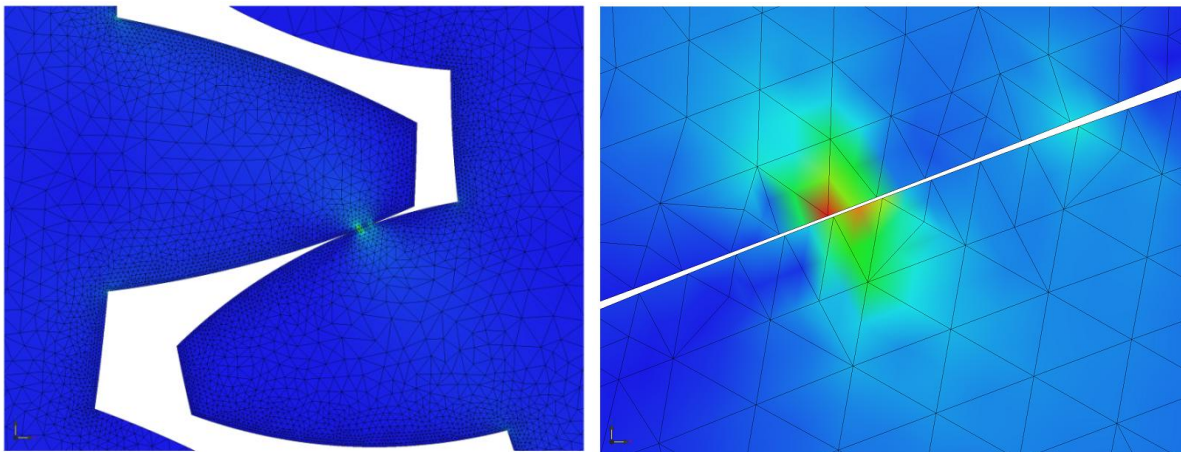
Σχήμα 5 - 2: Γωνιά επαφής  $\varphi = -7^\circ$



Σχήμα 5 - 3: Γωνιά επαφής  $\varphi = - 6^\circ$

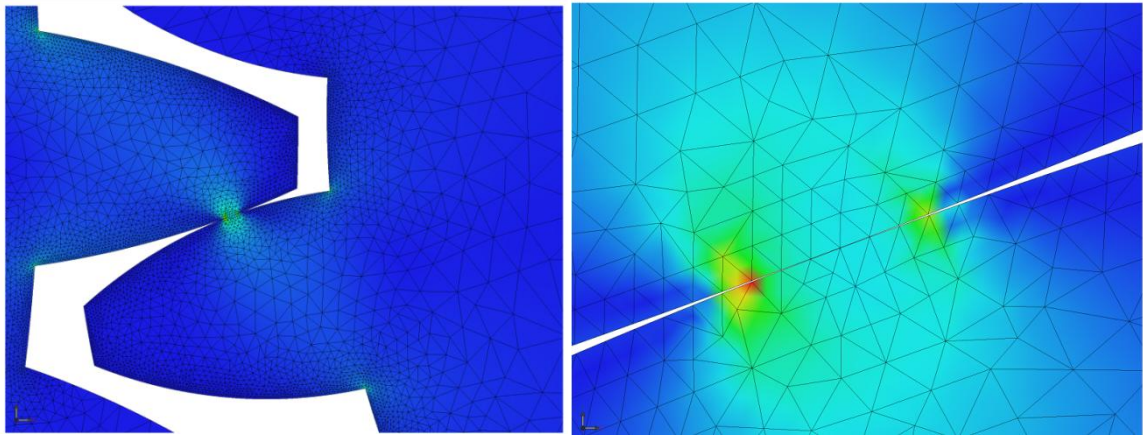


Σχήμα 5 - 4: Γωνιά επαφής  $\varphi = - 5^\circ$

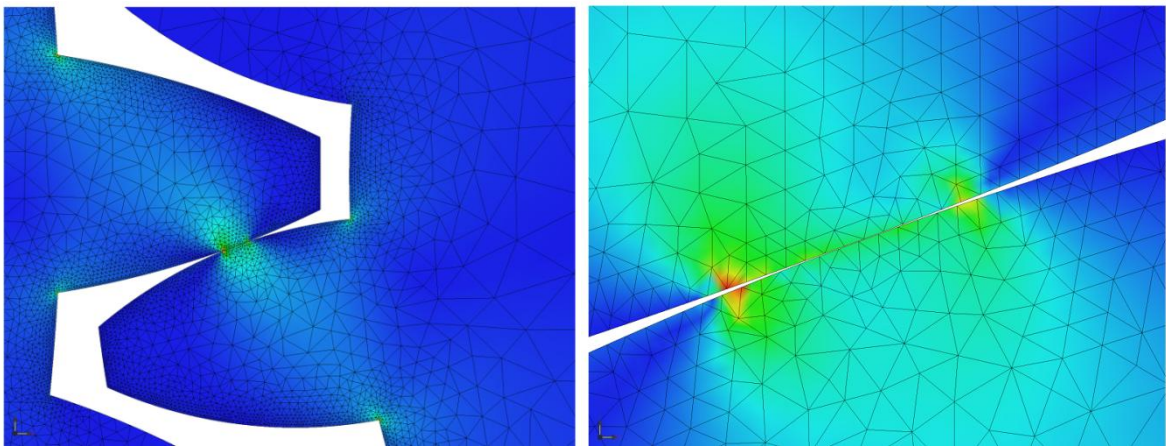


Σχήμα 5 - 5: Γωνιά επαφής  $\varphi = - 4^\circ$

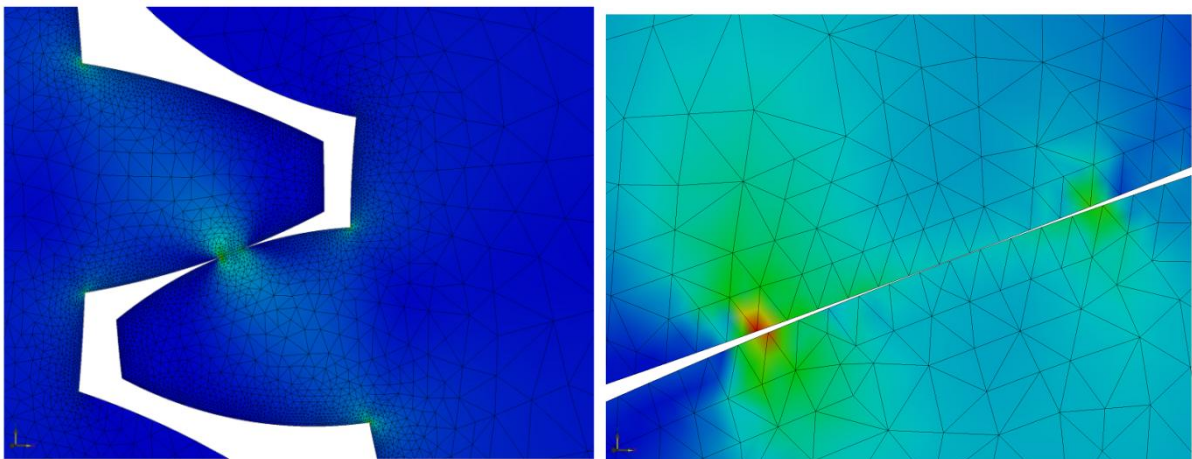




Σχήμα 5 - 6: Γωνιά επαφής  $\varphi = - 3^\circ$

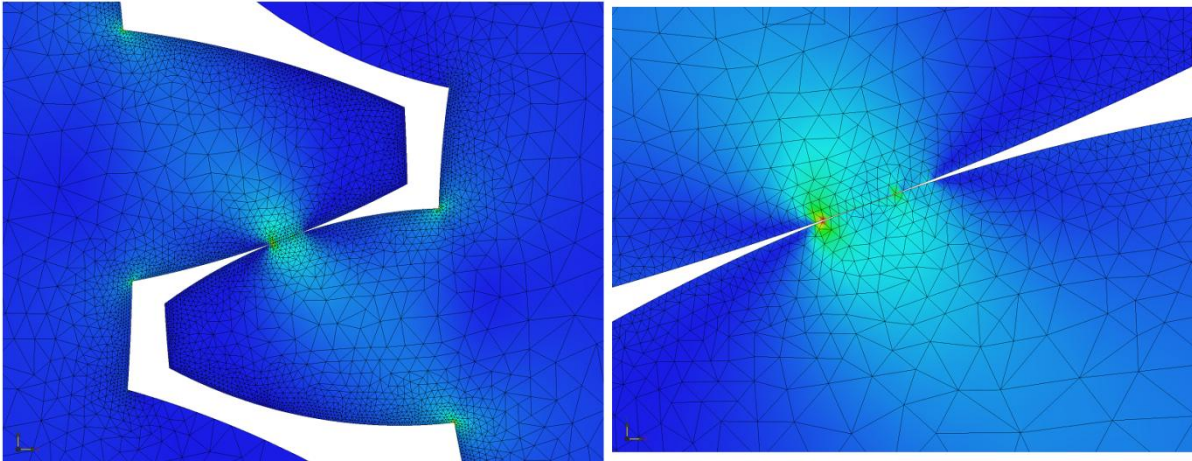


Σχήμα 5 - 7: Γωνιά επαφής  $\varphi = - 2^\circ$

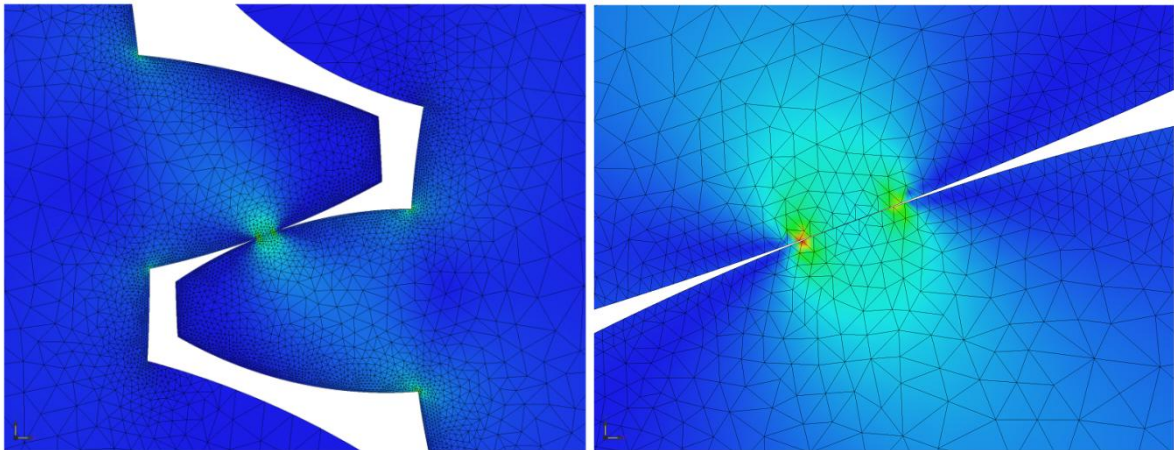


Σχήμα 5 - 8: Γωνιά επαφής  $\varphi = - 1^\circ$

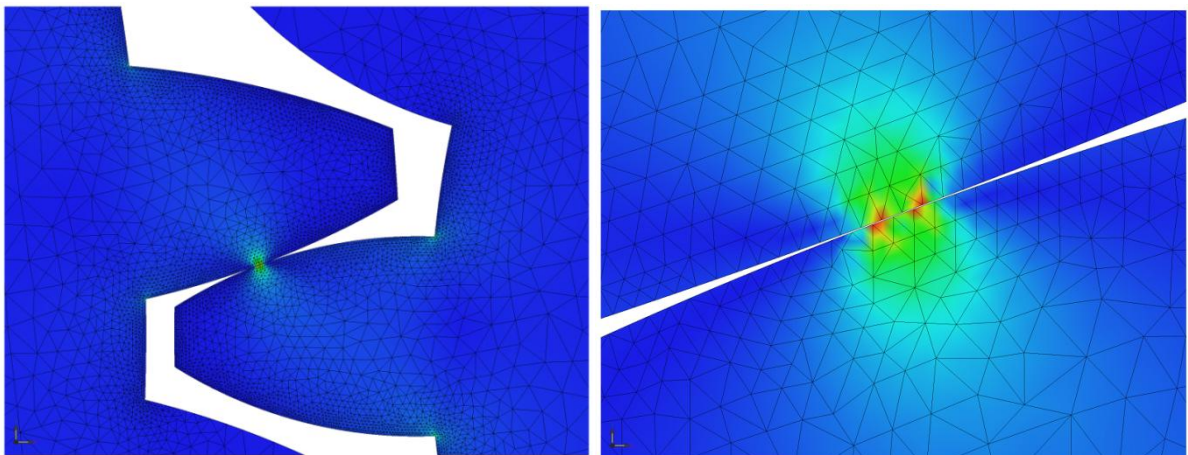




Σχήμα 5 - 9: Γωνιά επαφής  $\varphi=0^\circ$

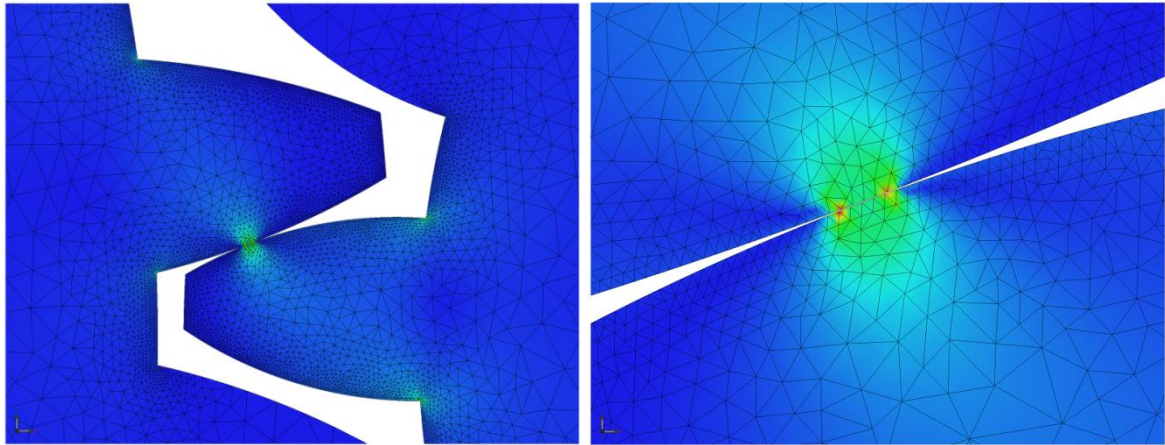


Σχήμα 5 - 10: Γωνιά επαφής  $\varphi=+1^\circ$

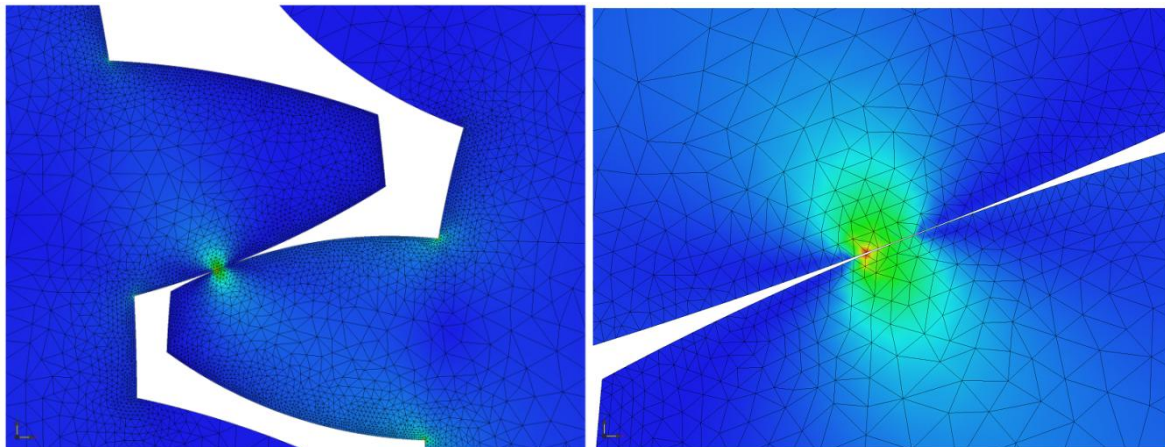


Σχήμα 5 - 11: Γωνιά επαφής  $\varphi=+2^\circ$

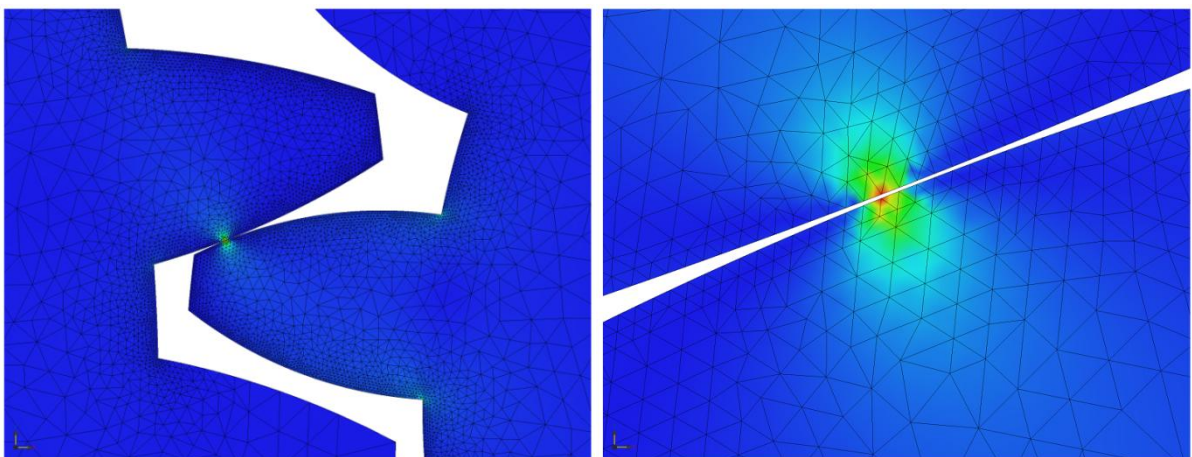




Σχήμα 5 - 12: Γωνιά επαφής  $\varphi=+3^\circ$

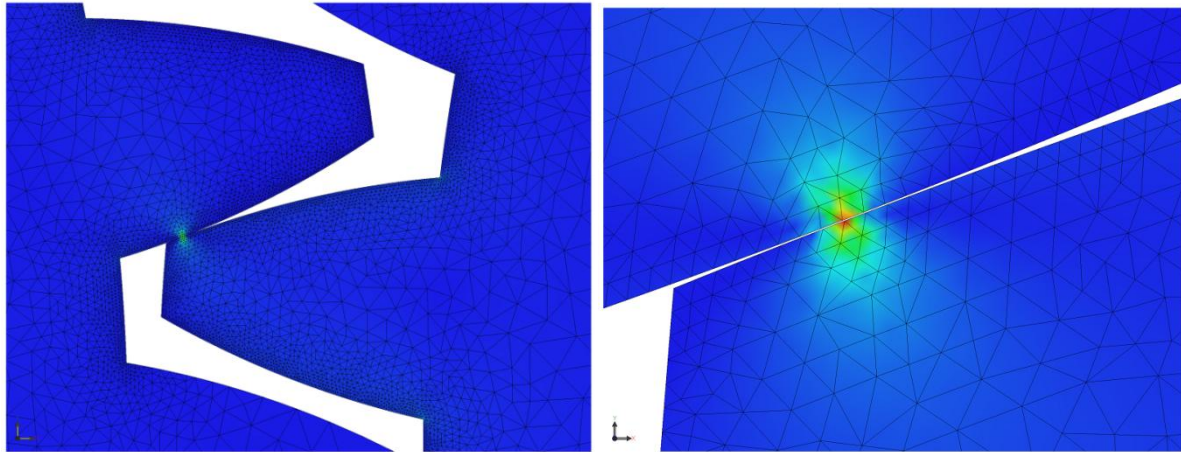


Σχήμα 5 - 13: Γωνιά επαφής  $\varphi=+4^\circ$

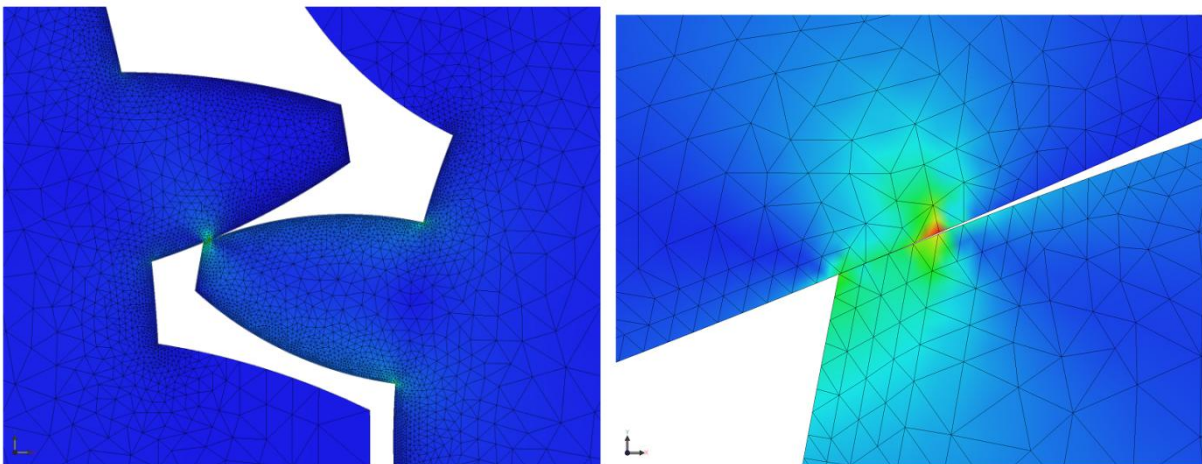


Σχήμα 5 - 14: Γωνιά επαφής  $\varphi=+5^\circ$

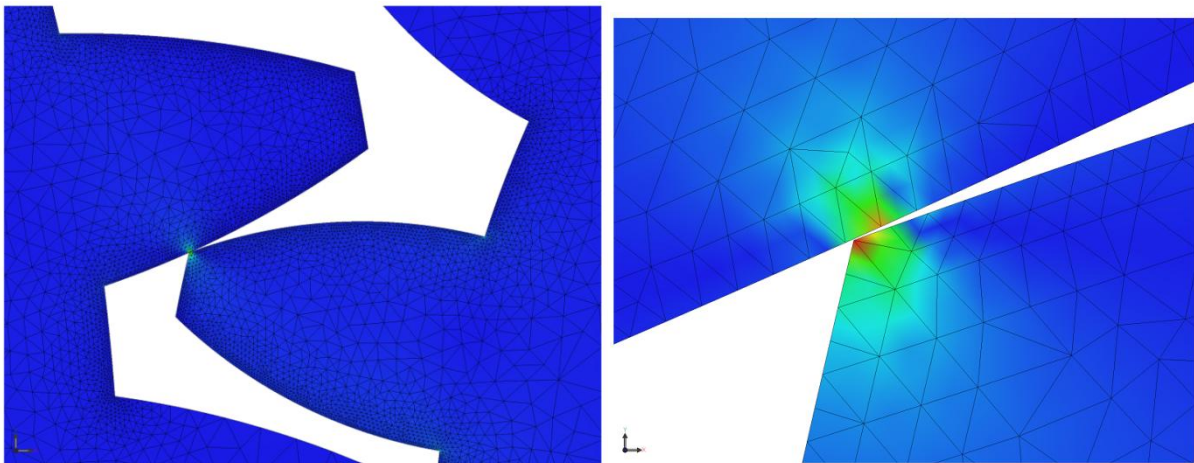




Σχήμα 5 - 15: Γωνιά επαφής  $\varphi=+6^\circ$



Σχήμα 5 - 16: Γωνιά επαφής  $\varphi=+7^\circ$



Σχήμα 5 - 17: Γωνιά επαφής  $\varphi=+8^\circ$

## 5.5 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Τα συμπεράσματα τα οποία μπορούμε να εξάγουμε με βάση τα διαγράμματα είναι τα εξής παρακάτω:

1. Η τάση επαφής για την τυποποίηση κατά AGMA βαίνει πιο ομαλά, σχεδόν συμμετρικά, σε σχέση με την τυποποίηση κατά ISO.
2. Παρατηρούμε ότι κατά ISO αλλά και κατά AGMA και για σχέση μετάδοσης 1:1 έχουμε τις μικρότερες τάσεις επαφής, ενώ όσο μικραίνει η σχέση μετάδοσης τόσο υψηλότερες τιμές τάσης επαφής παίρνουμε.
3. Οι τάσεις επαφής μεγιστοποιούνται στα δύο άκρα, δηλαδή για γωνίες επαφής  $-8^\circ$  ,  $+8^\circ$  για σχέση μετάδοσης 1:1 και 1:2 όπως και  $-4^\circ$  ,  $+4^\circ$  για σχέση μετάδοσης 1:4, εκεί όπου αρχίζει η επαφή του οδόντα και τελειώνει αντίστοιχα.
4. Οι τάσεις στην ρίζα του οδόντα κατά ISO και AGMA και για σχέση μετάδοσης 1:1 βλέπουμε ότι είναι μικρές ενώ όσο χαμηλώνουμε την σχέση μετάδοσης τόσο αυξάνονται.
5. Οι μικρότερες τιμές τάσης που παίρνουμε και στις δύο τυποποιήσεις είναι για γωνία επαφής  $0^\circ$
6. Η τυποποίηση κατά AGMA δίνει τις μικρότερες τάσεις στην ρίζα του οδόντα σε σχέση με την τυποποίηση κατά ISO.
7. Η στρεπτική δυσκαμψία του συστήματος και για τις δύο τυποποιήσεις παρατηρούμε ότι μειώνεται καθώς μειώνουμε αντίστοιχα και την σχέση μετάδοσης.
8. Η στρεπτική δυσκαμψία και για τις δύο τυποποιήσεις μεγιστοποιείται για γωνία επαφής  $0^\circ$  ενώ ελαχιστοποιείται στα άκρα, όταν το δόντι δηλαδή έρχεται σε εμπλοκή,  $-8^\circ$  για σχέση μετάδοσης 1:1 και 1:2 ή  $-4^\circ$  για σχέση μετάδοσης 1:4 και όταν αποσυμπλέκεται με γωνίες επαφής  $+8^\circ$  και  $+4^\circ$  αντίστοιχα.



## 6. ΤΑΧΕΙΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

### 6.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΠΡΩΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ταχεία πρωτοτυποποίηση είναι μια νέα τεχνολογία κατασκευής μοντέλων στρώμα - στρώμα (layer by layer) που μείωσε το χρόνο κατασκευής μοντέλων κάθε πολυπλοκότητας σε ώρες αντί για ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες [11],[12], [13],[14],[22]. Αποτελεί πλέον για πολλές εταιρείες έναν απαραίτητο κρίκο στην διαδικασία εξέλιξης των προϊόντων. Η πρώτη εμπορική διαδικασία παρουσιάστηκε στην Έκθεση Autofact στο Detroit, το Νοέμβριο του 1987, από την εταιρεία 3D Systems Inc. Σήμερα υπάρχουν πάνω από 30 διαδικασίες, μερικές από τις οποίες είναι εμπορικές, ενώ άλλες βρίσκονται υπό εξέλιξη σε εργαστήρια έρευνας. Η ακρίβεια έχει βελτιωθεί σημαντικά και οι επιλογές των υλικών είναι σχετικά πολλές. Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά για λειτουργικές δοκιμές ή για να παράγονται εργαλεία. Είναι αλήθεια πως μπορούμε να πετύχουμε ταχεία πρωτοτυποποίηση και με συμβατικές μεθόδους, όπως με μηχανές NC. Παρ' όλα αυτά, ο όρος RP έχει καθιερωθεί να περιγράφει τις νέες τεχνολογίες που κατασκευάζουν μοντέλα προσθέτοντας υλικό και όχι αφαιρώντας. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε τα πρωτότυπα στην ανάπτυξη νέων προϊόντων είναι:

- Λήψη πληροφοριών σχετικά με το προϊόν
- Επικοινωνία μεταξύ των μελών της ομάδας ανάπτυξης του προϊόντος
- Ολοκλήρωση των επιμέρους τμημάτων ενός προϊόντος
- Έλεγχος και αξιολόγηση στο προϊόν των προδιαγραφών που έχουν οριστεί κατά τον σχεδιασμό.

## **6.2 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

Από τα συστήματα στερεάς μοντελοποίησης παίρνουμε ένα αρχείο τύπου STL. Αυτό τροφοδοτείται στο σύστημα RP που κόβει λεπτές οριζόντιες διατομές διαμέσου του αρχείου STL, στο επιθυμητό πάχος (πχ. 0.2mm). Το εξάρτημα δημιουργείται σε στρώματα. Το σύστημα RP χειρίζεται τη στοίβα των ψηφιακών διατομών για να παράγει το κάθε επίπεδο υλικού, το ένα πάνω από το άλλο.

## **6.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΠΡΩΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ**

### **6.3.1 Στερεολιθογραφία – Stereolithography (SLA)**

Αναπτύχθηκε και εκμεταλλεύθηκε εμπορικά από την εταιρεία 3D Systems Inc. Αρχικά, ο ανελκυστήρας βρίσκεται σε μια απόσταση από την επιφάνεια του ρευστού ίση με το πάχος του πρώτου στρώματος. Η ακτίνα laser σαρώνει την επιφάνεια. Το ρευστό είναι φωτοπολυμερές και με τις υπεριώδης ακτίνες laser στερεοποιείται. Ο ανελκυστήρας μετακινείται προς τα κάτω και με την ίδια διαδικασία παράγεται το επόμενο επίπεδο. Στο τέλος το μοντέλο αφαιρείται από το διάλυμα και το παγιδευμένο στο εσωτερικό του μοντέλου ρευστό, αφαιρείται σε ειδικό φούρνο. Η ακτίνα laser που στερεοποιεί το ρευστό είναι η ακτίνα HeCd. Μια δεύτερη ακτίνα laser χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώνει ότι η επιφάνεια του ρευστού βρίσκεται στη σωστή θέση. Ο σαρωτής «σπάει» τις επιφανειακές εντάσεις, επιβεβαιώνει ότι πετυχαίνουμε επίπεδη επιφάνεια και ελαχιστοποιεί το χρόνο διαδικασίας για κάθε layer. Απαιτούνται υποστηρικτικές κατασκευές που αφαιρούνται συνήθως χειροκίνητα στο τέλος. Ο χρόνος σάρωσης εξαρτάται από την γεωμετρία των περιγραμμάτων και την ταχύτητα του laser. Το πάχος των επιπέδων μπορεί να είναι 0.1 mm, κατασκευάζει μοντέλα βάρους μέχρι και 68 kg, λειτουργεί σε Windows NT, και έχει βάρος σχεδόν 1700 kg.

#### 6.3.1.1 Η διαδικασία της στερεολιθογραφίας

Απαιτείται μοντέλο στερεών ή μοντέλο επιφανειών. Τα δεδομένα που δέχονται οι μηχανές είναι τύπου STL. Το αντικείμενο αναπαρίσταται ως πλέγμα συνδεδεμένων τριγώνων. Η φορά περιγραφής των κορυφών κάθε τριγώνου μας προσδιορίζει και τη γεμάτη πλευρά του μοντέλου. Το κάθετο διάνυσμα κατευθύνεται προς τα έξω του εξαρτήματος. Το STL αρχείο είναι σε ASCII ή σε Binary format.

#### 6.3.1.2. Πλεονεκτήματα της στερεολιθογραφίας

Το STL αρχείο έχει προτερήματα και μειονεκτήματα. Τα προτερήματα είναι :

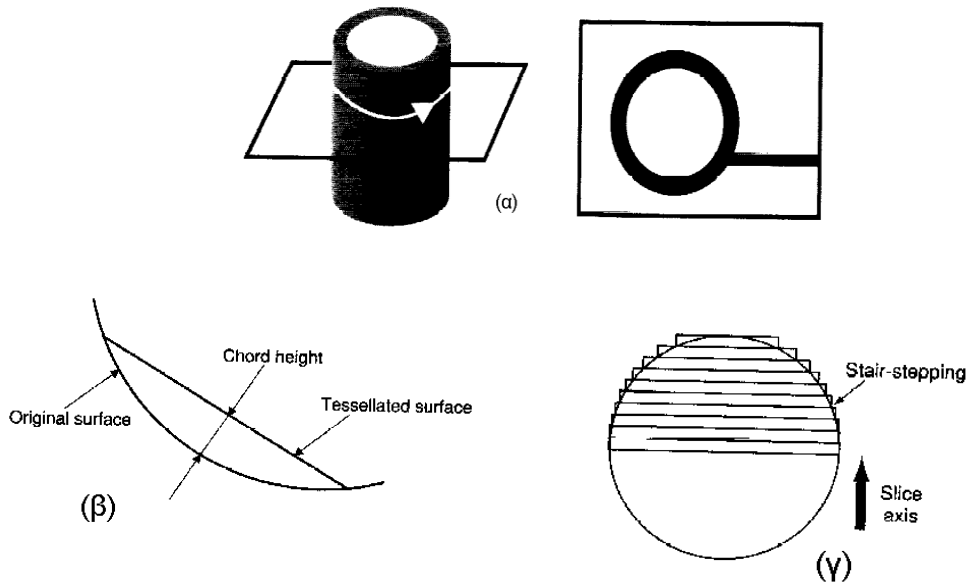
- Απλή μετατροπή
- Οι αλγόριθμοι είναι γνωστοί
- Η ακρίβεια ελέγχεται με ευκολία
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών
- Οι αλγόριθμοι τομής του μοντέλου, για τη λειτουργία της μηχανής είναι απλοί
- Ευκολία στη διαίρεση του μοντέλου σε τμήματα

#### 6.3.1.3. Μειονεκτήματα της στερεολιθογραφίας

Τα μειονεκτήματα είναι:

- Πληθώρα και περίσσεια δεδομένων
- Σφάλμα προσέγγισης καμπυλών
- Σφάλματα στρογγυλοποίησης
- Έλλειψη πληροφόρησης

Η διαίρεση του μοντέλου σε τρίγωνα μπορεί να έχει προβλήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6-1(α, β, γ). Η διαίρεση αφήνει ένα κενό, που μας δίνει μια μη έγκυρη διατομή.

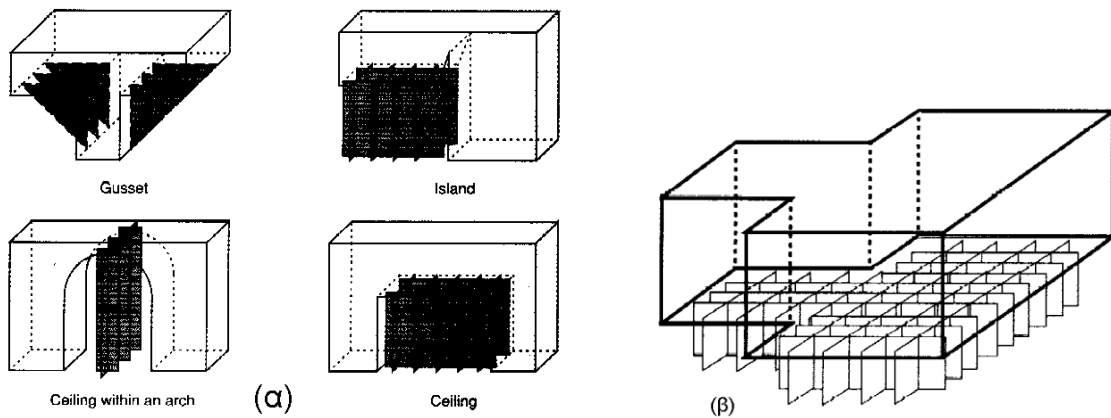


**Σχήμα 6-1(α, β, γ):** Προβλήματα που προκαλούνται κατά την μέθοδο της στερεολιθογραφίας. (α) Προβλήματα από την τριγωνοποίηση μοντέλου (β) Έλεγχος ακριβείας μοντέλου STL (γ) Η βηματική απόδοση των καμπύλων επιφανειών.

Το μέγεθος και η ακρίβεια της διαίρεσης του αντικειμένου μπορεί να ελεγχθεί από το χρήστη, σχήμα 6-1β. Ένας δεύτερος παράγοντας είναι και το βήμα που δίνουμε για κάθε στρώμα υλικού. Προφανώς, καμπύλες επιφάνειες βγαίνουν βηματικά, σχήμα 6-1γ. Το μέγεθος του βήματος εξαρτάται από την επιλεγείσα ακρίβεια, καθώς και ο χρόνος παραγωγής του πρωτότυπου.

### 6.3.2 Στηρίγματα

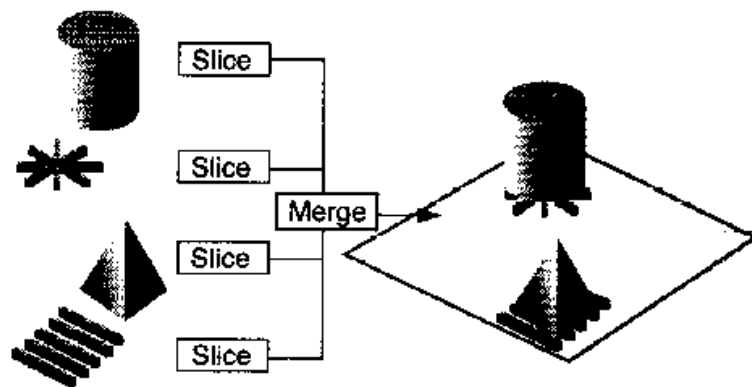
Υποστηρίζουν την διαδικασία με πολλούς τρόπους. Στηρίγματα απαιτούνται για περιπτώσεις που η άνω επιφάνεια που δημιουργείται είναι μεγαλύτερη από τη βάση, σχήμα 6-2α, και για την αρχική στήριξη του αντικειμένου, σχήμα 6-2β. Η μορφή τους επηρεάζει σημαντικά το τελικό πρωτότυπο, και καλό θα είναι ο χρήστης να μοντελοποιεί αυτά τα στηρίγματα.



**Σχήμα 6-2:** (α) Τέσσερις περιπτώσεις που τα στηρίγματα κρίνονται απαραίτητα  
(β) στήριξη βάσης τεμαχίου

### 6.3.3. Τομή και ένωση

Το μοντέλο τέμνεται με μια σειρά από επίπεδα, που ενώνονται στη συνέχεια μεταξύ τους. Το πάχος κάθε στρώματος εξαρτάται από τη μηχανή. Μπορούμε να έχουμε και περισσότερα του ενός τεμάχια σε μια πλατφόρμα, σχήμα 6-3. Ο τρόπος με τον οποίο γεμίζει η μηχανή με υλικό το τεμάχιο ονομάζεται μέθοδος γεμίσματος (Hatch Style), και σημαντικοί παράγοντες είναι η απόσταση μεταξύ γραμμών γεμίσματος (Hatch Spacing), αντιστάθμιση πλάτους γραμμής και συντελεστής συστολής (Shrinkage Factor).

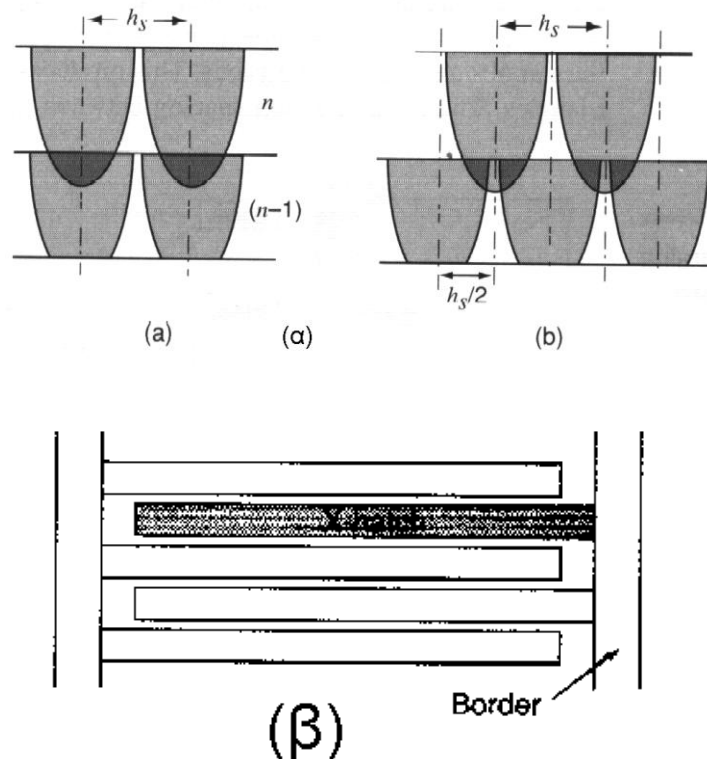


**Σχήμα 6-3:** Τοποθέτηση περισσότερων τεμαχίων στην ίδια βάση.

Στο γέμισμα πρώτα γίνεται η περιβάλλουσα και μετά γεμίζει το εσωτερικό (Internal Hatch). Το εσωτερικό γεμίζει με διαφορετικές μεθόδους, όπως:

- Tri-Hatch. το γέμισμα γίνεται παράλληλα στον  $x$ , και υπό γωνία 60° και 120° ως προς τον  $x$ . Απόσταση μεταξύ γραμμών 1,27 mm.
- Weave. Γραμμές παράλληλα ως προς  $x$  και  $y$ . Απόσταση 2,794 mm. Επιτυγχάνει καλή ακρίβεια.
- Star (Staggered Alternate Retract)-Weave. Εισάγει την έννοια του Staggered hatch, σχήμα 6-4α, Alternate Hatch και Retract Hatch, σχήμα 6-4β.
- Quick Cast χρησιμοποιείται όταν το πρωτότυπο χρησιμοποιείται για καρδιά σε Investment Casting. Η απόσταση γέμισματος είναι μεγάλη και το πρωτότυπο είναι μισογεμάτο.
- Aces (Accurate, Clear, Epoxy Solid).

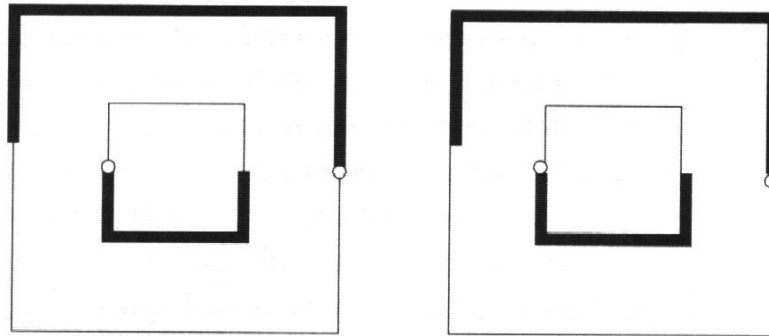
Οι διάφοροι μέθοδοι αποσκοπούν στο να εξαλείψουν τις εσωτερικές τάσεις.



**Σχήμα 6-4(α, β):** Σύγκριση μεθόδων γέμισματος, (α) Staggered hatch, (β) Retracted hatch.

### 6.3.3.1 Αντιστάθμιση Πάχους Γραμμής (Line width compensation)

Έχει την ίδια σημασία με την αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου, σχήμα 6-5. Η τιμή της αντιστάθμισης είναι θέμα και εμπειρίας.



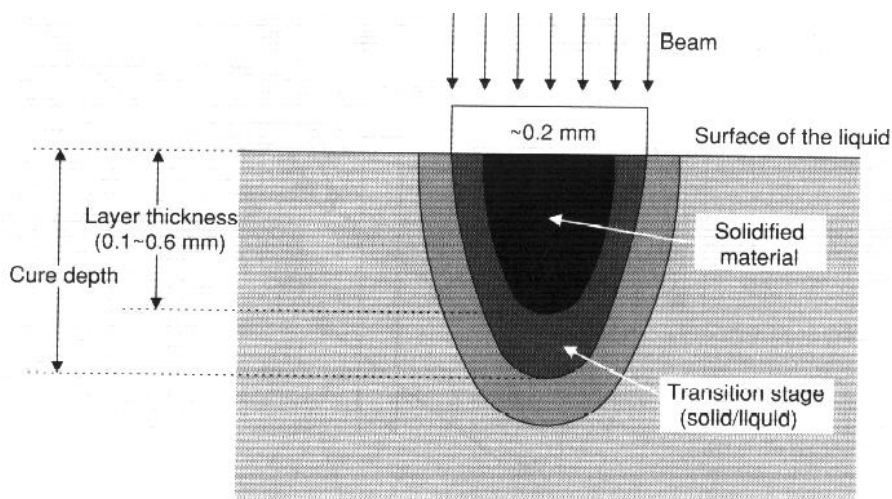
Σχήμα 6–5: Αντιστάθμιση Πάχους Γραμμής

### 6.3.3.2 Παράγοντας Συστολής

Ο πολυμερισμός αυξάνει την πυκνότητα του υλικού με συνέπεια να μειώνεται ο όγκος του. Μετά τη στερεοποίηση συστέλλεται. Πρέπει να το έχουμε προβλέψει.

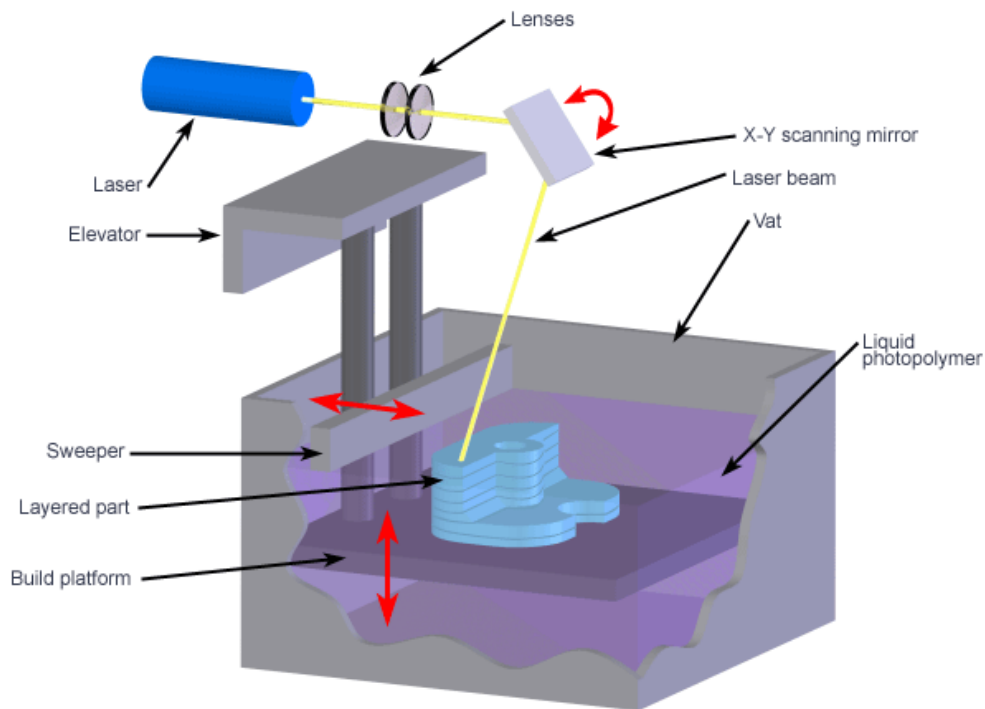
### 6.3.3.3 Βάθος Επίδρασης (Cure Depth)

Είναι το βάθος μέχρι το οποίο η ακτίνα laser έχει επίδραση στο υλικό. Πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το πάχος της στρώσης, σχήμα 6-6.



Σχήμα 6–6: Βάθος επιρροής και πάχος στρώματος

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ακολουθεί η απομάκρυνση του πρωτοτύπου, ο καθαρισμός του από τα στηρίγματα, η δεύτερη επεξεργασία και η αποπεράτωση του πρωτοτύπου.



Σχήμα 6-7: Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας διαδικασίας SLA

### 6.3.4 Μια παραλλαγή της στερεολιθογραφίας – Solid ground curing (sgc)

Το σύστημα SOLIDER αναπτύχθηκε από την εταιρεία Cubital. Έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με την στερεολιθογραφία, με σημαντικά όμως διαφορετική διαδικασία.

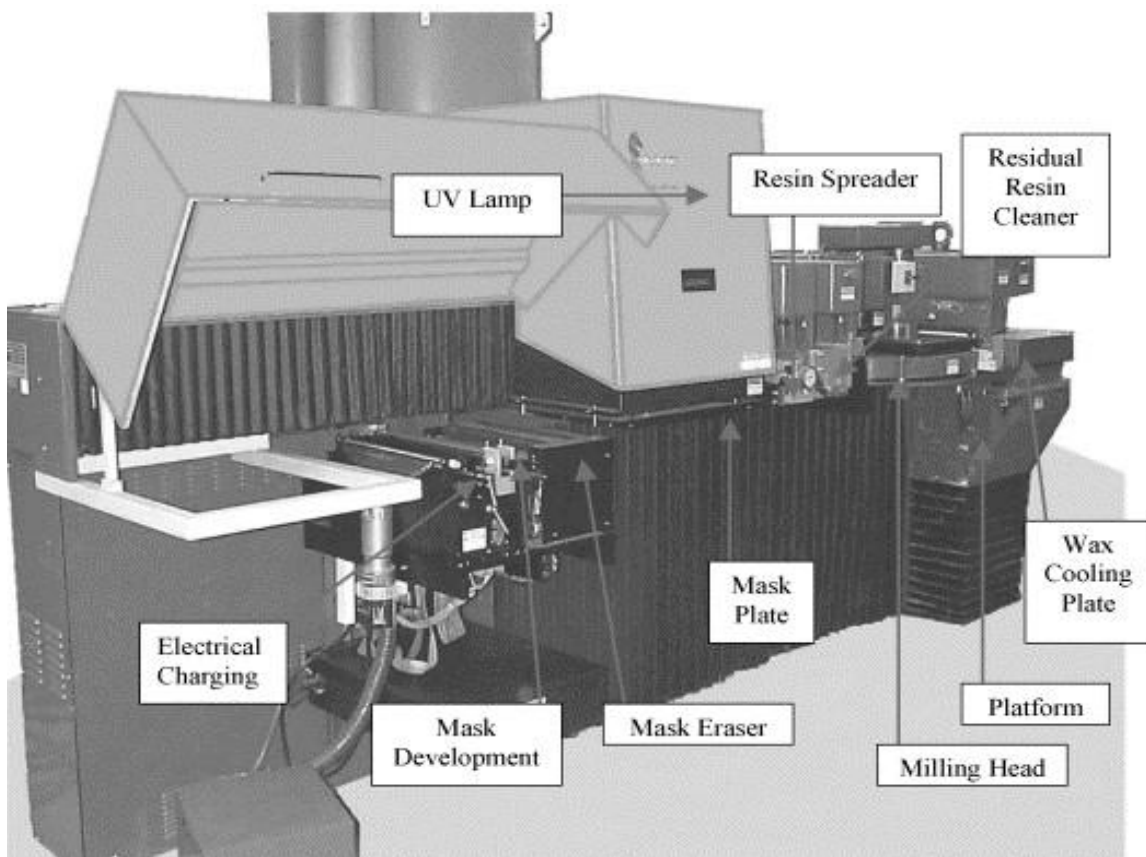
**Πρώτη διαφορά.** Το διάλυμα μετακινείται και οριζόντια μεταφέροντας τον ενεργό χώρο διαδικασίας σε διαφορετικούς σταθμούς στη μηχανή.

**Δεύτερη διαφορά.** Η πηγή φωτός και η διαδικασία. Χρησιμοποιείται λάμπα υπεριώδους φωτός που φωτίζει το θάλαμο και στερεοποιείται όλη η στρώση. Για να διαλέξουμε την περιοχή που πρέπει να στερεοποιηθεί, δημιουργείται μια μάσκα σε μια γυάλινη επιφάνεια και σβήνεται διαδοχικά μετά τη χρήση της. Η γυάλινη πλάκα με τη μάσκα τοποθετείται μεταξύ της λάμπας και της επιφάνειας του χώρου εργασίας.



**Τρίτη διαφορά.** Τα μοντέλα χτίζονται περικυκλωμένα από κερί, περιορίζοντας την ανάγκη χρήσης κατασκευών για υποστήριξη. Μόλις μια στρώση έχει εκτεθεί στο υπεριώδες φως της λάμπας, οι περιοχές που δεν έχουν στερεοποιηθεί, αυτές που γεμίζουν με υπολείμματα, αντικαθίστανται με κερί. Αυτό επιτυγχάνεται με εξάλειψη των καταλοίπων και στρώνοντας έναν layer από κερί. Πετυχαίνουμε την σκλήρυνση του κεριού με μια παγωμένη μεταλλική πλάκα και διαδοχικά ο layer επεξεργάζεται στο σωστό ύψος.

Επίσης, ο σταθμός κατεργασίας δίνει τη δυνατότητα να αφαιρεθούν layers. Ο νέος layer του πολυμερούς έχει εφαρμοστεί όταν ο χώρος εργασίας μετακινείται από το χώρο κατεργασίας πίσω στο θάλαμο έκθεσης φωτός. Οι τελευταίες βελτιώσεις που ανακοινώθηκαν από την Cubital είναι η δυνατότητα να αλλάζει το μέγεθος του χώρου κατεργασίας και μια επιπλέον λάμπα υπεριώδους φωτός. Το σύστημα αυτό της Cubital μπορεί να πετύχει πάχος layer ίσο με 0.1-0.2 mm, μπορεί να κατασκευάσει έναν layer σε 70 sec και κοστίζει 470.000 \$.



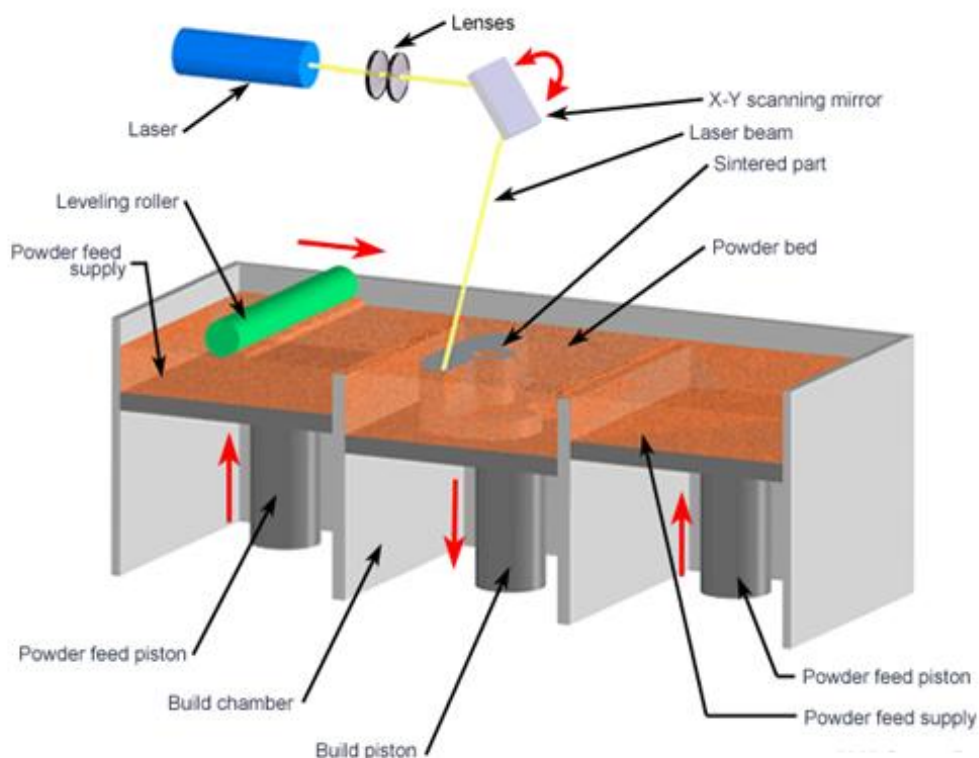
**Σχήμα 6-8:** Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας Κυβοειδούς διαδικασίας SGC.

### 6.3.5 Επιλεκτική σύντηξη με τη χρήση ακτινών λέιζερ – Selective laser sintering (SLS)

Η μέθοδος SLS αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Austin του Τέξας. Στη θέση του ρευστού πολυμερούς, σκόνης από διάφορα υλικά απλώνονται σε μια πλατφόρμα από έναν κύλινδρο. Ένα laser συμπυκνώνει επιλεγμένες περιοχές, αναγκάζοντας τα σωματίδια να λιώσουν και να στερεοποιηθούν. Αντίθετα με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν πιο πριν, όπου υπάρχει μόνο μια μεταβατική φάση, στην διαδικασία SLS υπάρχουν δύο: από στερεό σε ρευστό και πίσω πάλι σε στερεό.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται και διερευνούνται είναι: πλαστικό, κερί, μέταλλο και επικαλυμμένα κεραμικά. Πιστεύεται πως θα είναι εφικτό να κατασκευάζονται μοντέλα και από άλλα υλικά, εκτός από πλαστικό, που να έχουν τις απαιτούμενες ιδιότητες με αυτές τις μεθόδους.

Η διαδικασία που αναπτύχθηκε στο Austin εκμεταλλεύεται εμπορικά η εταιρεία DTM Corp. Επίσης η εταιρεία EOS GmbH έχει παρουσιάσει στην αγορά μια διαδικασία που διεξάγεται με τις ίδιες αρχές.

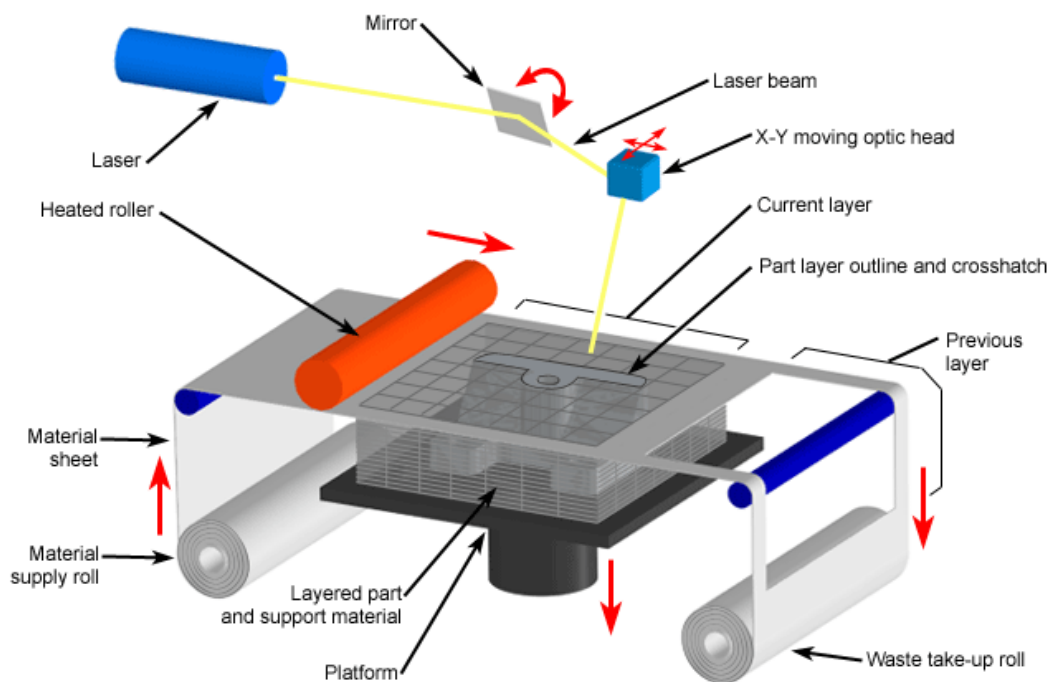


Σχήμα 6-9: Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας διαδικασίας SLS.

### 6.3.6 Παραγωγή αντικειμένων μέσω της συγκόλλησης λεπτών φύλλων Laminated object manufacturing (LOM)

Η εταιρεία HELISYS ανέπτυξε και εκμεταλλεύεται εμπορικά ένα σύστημα το οποίο «κόβει» και «ενοποιεί» ελάσματα. Το κάτω μέρος της επιφάνειας του ελάσματος έχει μια συγκολλητική ουσία, η οποία όταν πιεσθεί και θερμανθεί από έναν κύλινδρο, την αναγκάζει να κολλήσει πάνω στο προηγούμενο έλασμα.

Το έλασμα κόβεται από ένα laser ακολουθώντας το περίγραμμα της τομής. Το πάχος του ελάσματος δεν είναι σταθερό. Συνεπώς, ένας αισθητήρας μετράει το πάχος του παρόντος ελάσματος και το μοντέλο κόβεται ανάλογα.



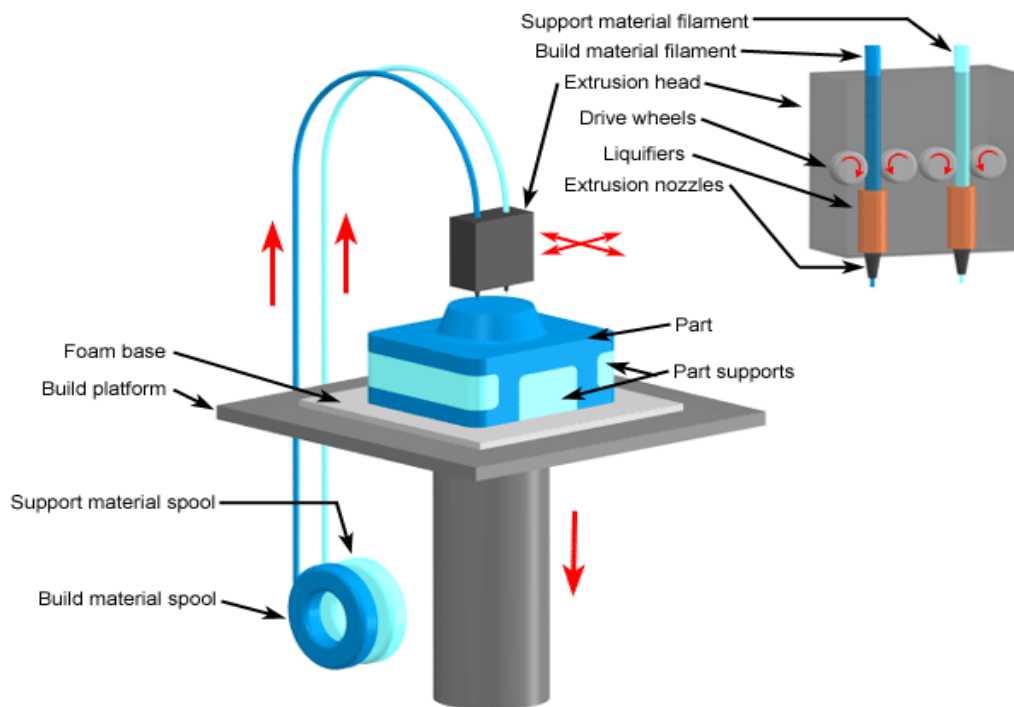
Σχήμα 6-10: Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας διαδικασίας LOM.

### 6.3.7 Κατασκευή μοντέλων μέσω εναπόθεσης/σύντηξης διαδοχικών στρώσεων Fused deposition modeling (FDM)

Η διαδικασία FDM αναπτύχθηκε από την εταιρεία Stratasys Inc. Υλοποιείται εξωθώντας λιωμένο υλικό διαμέσου ενός x-y ελεγχόμενου στομίου, πάνω σε ένα αφρώδες υπόστρωμα.

Το υλικό έρχεται σε νηματώδη μορφή σε ένα καρούλι, το οποίο τροφοδοτείται στο πίσω μέρος της μηχανής. Το νήμα σπρώχνεται μέσω θερμαινόμενων άκρων στο στόμιο καθώς κινείται και εξωθείται. Η κίνηση και προέκταση ελέγχονται έτσι ώστε το υλικό να κατατίθεται παίρνοντας τη μορφή διαδοχικών layers ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Η κεφαλή εξώθησης του συστήματος, περιέχει μια μονάδα ελέγχου ηλεκτρομαγνητικής κίνησης και κινείται πάνω από την μεταλλική πλάκα. Η κεφαλή απωθείται από την πλάκα από ένα κύμα αέρα για να διατηρείται στο επιθυμητό ύψος.

Αυτός ο τρόπος επιτρέπει στην κεφαλή να κινείται με μεγάλες ταχύτητες, όταν οι προστριβές τείνουν στο μηδέν. Το σύστημα Quantum έχει τη δυνατότητα να κατασκευάσει μοντέλα με διαστάσεις ως 600x500x600 mm.



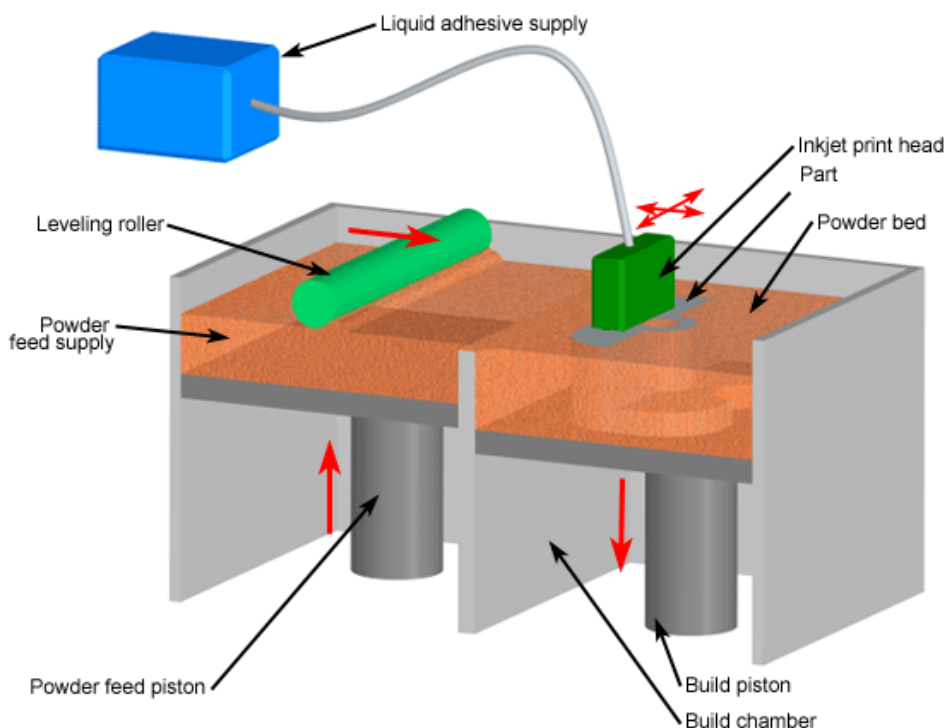
Σχήμα 6-11: Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας διαδικασίας FDM.

### 6.3.8 Τρισδιάστατη εκτύπωση – Three dimensional printing (3DP)

Η διαδικασία 3D Printing είναι μια διαδικασία Ταχείας Πρωτοτυποποίησης η οποία αναπτύχθηκε από την IBM και στη συνέχεια πουλήθηκε στην εταιρεία Stratasys Inc. Και αυτή η διαδικασία κατασκευάζει μοντέλα «χτίζοντας» γραμμή – γραμμή.

Αρχικά, στρώνεται ένα μικρό στρώμα από σκόνη στην επιφάνεια του εμβόλου. Από ένα μοντέλο σχεδιασμένο σε σύστημα CAD, υπολογίζονται οι απαραίτητες πληροφορίες για τα στρώματα, μέσω ενός αλγορίθμου. Χρησιμοποιώντας τεχνολογία παρόμοια με αυτή των ink-jet εκτυπωτών, ένα υλικό ενοποιεί τα σωματίδια στα σημεία εκείνα όπου το αντικείμενο πρέπει να είναι ένα σώμα. Το έμβολο τότε, χαμηλώνει τόσο ώστε να απλωθεί η νέα σκόνη και να ενοποιηθεί επιλεκτικά.

Αυτή η διαδικασία, στρώμα – στρώμα επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το μοντέλο. Με μια κατάλληλη θερμική διαδικασία, αφαιρείται η ελεύθερη σκόνη αφήνοντας πίσω το μοντέλο. Πολλοί επιμένουν πως η διαδικασία 3D Printing είναι πιο ευέλικτη από όλες τις τεχνολογίες.

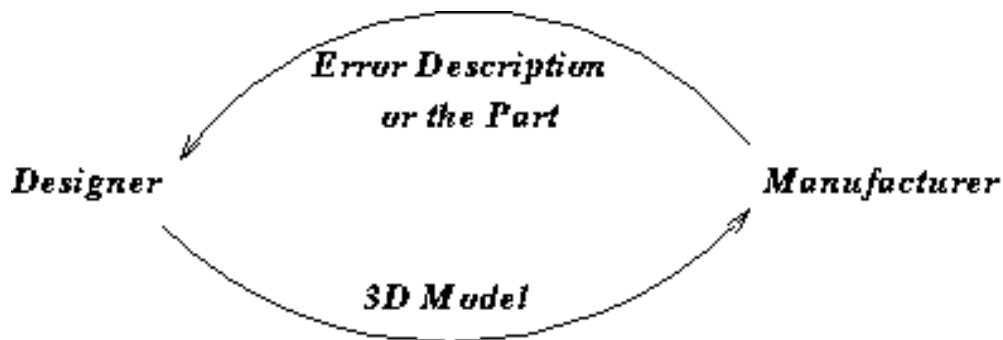


Σχήμα 6-12: Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας διαδικασίας 3DP.

#### 6.4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ RP

Όπως αναφέρθηκε πριν, η ταχύτητα είναι ένα από τα πιο διακεκριμένα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας RP, όταν συγκρίνεται με συμβατικές μεθόδους. Στην πραγματικότητα, η χρήση της RP δικαιώνεται μόνο αν το μοντέλο μπορεί να δημιουργηθεί γρήγορα. Πολύ συχνά ωστόσο, ο περιοριστικός παράγοντας είναι ο χρόνος που ξοδεύεται για να προετοιμαστούν τα δεδομένα. Εάν τα δεδομένα είναι

σωστά, ο χρόνος κατασκευής είναι γνωστός και σχετικά γρήγορος. Στο σχήμα 6-13, φαίνεται ένα τυπικό σενάριο:



**Σχήμα 6-13:** Επικοινωνία μεταξύ Σχεδιασμού και Κατασκευής

Μια από τις πιο σημαντικές λειτουργίες είναι ο έλεγχος του μοντέλου STL και η διόρθωσή του. Τα συνήθη σφάλματα είναι, τα κενά (Gaps), ασυνεχή κάθετα διανύσματα (inconsistent normal), λάθος κάθετα διανύσματα (αυτά που παρέχονται δεν συμφωνούν με αυτά που υπολογίζονται), λάθος τομές μεταξύ facets, δημιουργία από λάθος εσωτερικών τοίχων και στηριγμάτων, εκφυλισμένα facets που δεν έχουν κάθετο διάνυσμα.

Συνήθη σφάλματα σε αρχείο STL:

- Κενά (Gaps)
- Ασυνεχή κάθετα διανύσματα (inconsistent normal)
- Λάθος τομές μεταξύ facets
- Δημιουργία εσωτερικών τοίχων και στηριγμάτων

Ο κατασκευαστής βρίσκεται τότε αντιμέτωπος με τα εξής προβλήματα:

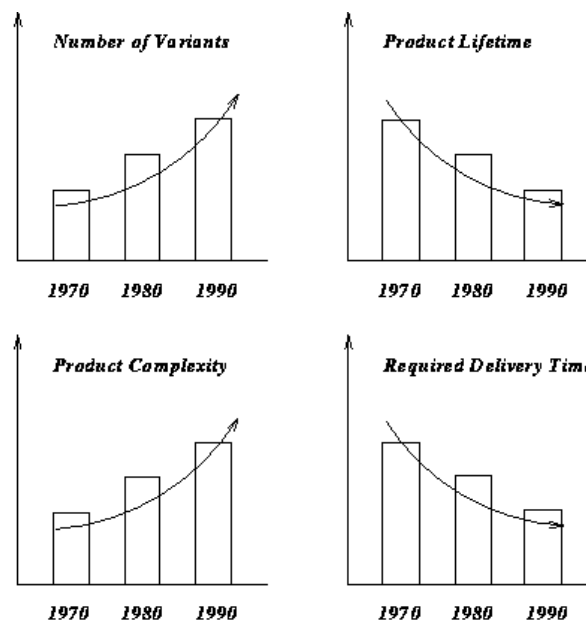
- Είναι σωστό το μοντέλο;
- Αν όχι, ποια είναι η φύση των λαθών και αν είναι δυνατό να διορθωθούν τοπικά.
- Αν δεν είναι δυνατόν τα λάθη να διορθωθούν τοπικά, πως μπορεί να τα περιγράψει στο σχεδιαστή.

Οι μηχανές RP δεν είναι ακόμα κοινότοπες και η φυσική διαφορά που υπάρχει μεταξύ του σχεδιαστή και του κατασκευαστή, έχει κάποια σημασία στον χρόνο διανομής, που οφείλεται στις δυσκολίες και καθυστερήσεις στις επικοινωνίες.

Επιπλέον, το κόστος κατασκευής συνδέεται άμεσα με την ποσότητα της δουλειάς που ξοδεύεται για την προετοιμασία των δεδομένων και το πραγματικό χτίσιμο του μοντέλου. Αυτό το κόστος μπορεί να αναπαρασταθεί σαν τα 2/3 του συνολικού κόστους. Συνεπώς, οποιοδήποτε εργαλείο λογισμικού που μπορεί να ελαχιστοποιήσει το πλήθος των επαφών που πρέπει να κάνουν ο σχεδιαστής και ο κατασκευαστής ή να κάνει την επικοινωνία τους πιο αποτελεσματική, είναι προνομιούχο. Τέτοια εργαλεία είναι ο 3D Verify της 3D Systems και το MagicsRP της Materialise.

## 6.5 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ RP ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Η τεχνολογία RP μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη σε οποιονδήποτε κατεργάζεται κάποιο προϊόν ή χρειάζεται ένα φυσικό μοντέλο. Το σχήμα 6-14 απεικονίζει πώς οι απαιτήσεις της βιομηχανίας έχουν αλλάξει τις 3 τελευταίες δεκαετίες.



**Σχήμα 6-14:** Οι αλλαγές που έχουν γίνει στις ανάγκες των βιομηχανιών.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάπτυξης, κάποιος βρίσκεται συχνά αντιμέτωπος με την επιλογή ή να επεκτείνει το χρόνο ανάπτυξης ή να αυξήσει τους πόρους, για να προλάβει τις προθεσμίες. Κάτω από αυτές τις περιστάσεις, ο χρόνος

έχει ταυτισθεί σαν παράγοντας κλειδί στην αποδοτικότητα. Περισσότερο σημαντικό για τα αποτελέσματα, είναι ο χρόνος ανάπτυξης και όχι το κόστος. Αυτό το σενάριο απαιτεί αλλαγές στον τρόπο ανάπτυξης του προϊόντος. Διαφορετικές ομάδες, σχεδιασμού, μηχανικής, μάρκετινγκ, παραγωγής, πρέπει να συνεργαστούν περισσότερο στενά προς ένα κοινό στόχο και να εργαστούν παράλληλα.

Ο στόχος πρέπει να είναι ξεκάθαρος σε όποιον αναμιγνύεται και για να είναι αποτελεσματική η συνεργασία, είναι απαραίτητο να αποφευχθούν προβλήματα επικοινωνίας. Η RP επιτρέπει να ετοιμάζεται ένα φυσικό μοντέλο, όσο γρήγορα ετοιμάζεται και ένα μοντέλο σε τρισδιάστατη μορφή σε ένα σύστημα CAD. Το φυσικό μοντέλο είναι ένα τέλειο εργαλείο επικοινωνίας. Αν μια εικόνα αξίζει όσο χίλιες λέξεις, τότε ένα φυσικό μοντέλο αξίζει όσο χίλιες εικόνες.

Επιπρόσθετα, τα μοντέλα που παράγονται μέσω της RP χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τεστ λειτουργικότητας και για την επίτευξη εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν για δοκιμές πριν την παραγωγή. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατόν τα λάθη να εντοπισθούν σε πιο πρώιμο στάδιο, όπου οι αλλαγές δεν κοστίζουν πολύ. Οι απαιτήσεις είναι δυνατόν να ξεκαθαριστούν και να κατανοηθούν καλύτερα, οδηγώντας σε καλύτερα προϊόντα που συναντούν τις απαιτήσεις της αγοράς.

Έχει εκτιμηθεί πως εφαρμόζοντας RP αποτελεσματικά, ο χρόνος ανάπτυξης για εργαλεία μπορεί να μειωθεί στο μισό. Άλλη μια σημαντική όψη είναι το κόστος της εισαγωγής αλλαγών στο σχεδιασμό ενός προϊόντος. Υπό την εκτίμηση αυτή, η ανάπτυξη ενός φυσικού προϊόντος δεν διαφέρει από την ανάπτυξη λογισμικού, το κόστος εισαγωγής αλλαγών αυξάνει σημαντικά όσο φτάνουμε στα τελευταία στάδια της ανάπτυξης.

Η RP μπορεί να αποτελέσει σημαντικό μέσο για την απόκτηση ενός σχεδίου πριν να γίνουν δαπανηρές δεσμεύσεις, οι οποίες θα επηρεάσουν το κόστος της μηχανικής κατεργασίας και το συνολικό κόστος του προϊόντος. Η αναλογία διατηρείται, η ανάπτυξη λογισμικού για πρωτοτυποποίηση αναπτύσσεται για τον ίδιο λόγο.

Ωστόσο, η RP δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την ανάπτυξη προϊόντων αν δεν χρησιμοποιείται ένα 3D CAD σύστημα για να δημιουργηθεί πρώτα το μοντέλο του προϊόντος.



## 6.6 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ RP ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

Η τεχνολογία RP δεν αντικαθιστά, ούτε πρόκειται να αντικαταστήσει ολοκληρωτικά τις συμβατικές τεχνολογίες, όπως πχ. η κατεργασία με NC. Μάλλον κάποιος πρέπει να θεωρεί την RP σαν μια ακόμα επιλογή στις μεθόδους για την κατασκευή μοντέλων, όσον αφορά το κόστος και το χρόνο κατασκευής ενός μοντέλου, σε συνάρτηση με την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Γενικά, η πολυπλοκότητα ενός κομματιού δεν μπορεί να καθοριστεί απόλυτα, όμως σίγουρα περιέχει τα παρακάτω συστατικά:

- Το μέγεθος του μοντέλου
- Το ύψος και πάχος των τοιχωμάτων
- Την αναλογία μεταξύ αυτών των δύο
- Το συνολικό αριθμό επιφανειών στο μοντέλο που έχει εξαχθεί από το σύστημα CAD
- Τις απαιτήσεις των ανοχών
- Τον τύπο του συστήματος CAD, που δημιουργεί τα μονοπάτια των εργαλείων

Ο ορισμός της πολυπλοκότητας ενός μοντέλου διαφέρει για κάθε εταιρεία. Χρησιμοποιώντας κοπτικά εργαλεία, κάποιος παίρνει κατευθείαν ένα κομμάτι με τις επιθυμητές μηχανικές προδιαγραφές. Αυτή είναι συνήθως η επιλογή, όταν η διαδικασία κατασκευής είναι εξοπλισμένη με τα κατάλληλα εργαλεία. Όμως, όπως ειπώθηκε προηγουμένως, χρησιμοποιώντας μια αλυσίδα διαδικασιών που περιλαμβάνει εφαρμογή της τεχνολογίας RP, είναι πολύ πιθανό να αποκτηθούν έμμεσα τα ίδια αποτελέσματα σε πολύ μικρότερο χρόνο.

## 6.7 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η ταχεία πρωτοτυποποίηση έχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με τη συμβατική πρωτοτυποποίηση και εξέλιξε τις τεχνολογίες οι οποίες έχουν λάβει την ιδέα της παραπάνω. Η τεχνολογία αυτή ήταν επαναστατική λόγω του ότι εισήγαγε την αυτόματη δημιουργία μορφών 3D από τον υπολογιστή.

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της είναι ότι μειώνει τον χρόνο ανάπτυξης καθώς επιτρέπει τις διορθώσεις σε ένα προϊόν, που πρέπει να γίνουν στα πρώτα στάδια της διαδικασίας. Έχοντας την προεπισκόπηση της

μηχανικής και της δομής του αντικειμένου νωρίς στη διαδικασία του σχεδιασμού, τα λάθη μπορούν να διορθωθούν και να αποφευχθούν ανέξοδα. Ακόμα η αύξηση του αριθμού των παραλλαγών και της πολυπλοκότητας των προϊόντων λύνει τα χέρια των βιομηχανιών όπως επίσης και η μείωση του χρόνου παράδοσης. Επιτρέπει στους εμπόρους και τους σχεδιαστές να είναι σίγουροι ότι οι ανάγκες των πελατών ικανοποιούνται. Η ομάδα σχεδιασμού κατανοεί έγκαιρα τις λειτουργίες του προϊόντος και από τη μεριά τους μπορούν να προτείνουν βελτιώσεις που ανταποκρίνονται στις ανάγκες των πελατών. Καθώς δημιουργείται ο κώδικας, δίνει την δυνατότητα όλοι οι συντελεστές δημιουργίας του προϊόντος, να μπορούν να εργάζονται δίπλα – δίπλα για την ανάπτυξη περιβάλλοντος εργασίας του χρήστη (οπτικοποίηση, βοήθεια και τεκμηρίωση) για να είναι απλό και εύκολο στη χρήση. Η ταχύτητα του συστήματος αυξάνεται και μπορείς να πάρεις πληροφορίες για το αντικείμενο άμεσα από το χρήστη.

Έχουμε ένα 60 - 90 % μείωση στην δημιουργία πρωτότυπου που έχει άμεσες επιπτώσεις από το πόσο γρήγορα οι εταιρείες μπορεί να απελευθερώσουν τα προϊόντα τους στην αγορά.

Όμως αυτή η τόσο αποτελεσματική τεχνολογία έχει και μειονεκτήματα και το πιο σημαντικό είναι ότι δεν μπορείς να την εφαρμόσεις σε αντικείμενα μεγάλου μεγέθους, έτσι θα πρέπει να κατευθυνθείς στις συμβατικές μεθόδους.

Επίσης η γνώμη αρκετών ανθρώπων είναι ότι η ταχεία πρωτοτυποποίηση δεν είναι αποτελεσματική γιατί, στην πραγματικότητα, αποτυγχάνει στην αντιγραφή του πραγματικού προϊόντος ή του συστήματος. Θα μπορούσε έτσι να παραλείψει σημαντικά αναπτυξιακά βήματα για να πάρει ένα γρήγορο και φθηνό μοντέλο εργασίας. Ένα άλλο μειονέκτημα της ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων είναι εκείνο κατά την οποία πολλά προβλήματα αγνοούνται με αποτέλεσμα, ατελείωτες διορθώσεις και αναθεωρήσεις.

Αμφισβητήσιμο είναι το πλεονέκτημα της RP για μείωση κόστους αφού παίζει ρόλο η τεχνική που θα χρησιμοποιήσεις για να δημιουργήσεις το προϊόν αλλά καθώς μειώνονται τα έξοδα ανάπτυξης, η ταχεία πρωτοτυποποίηση αποδεικνύεται ότι είναι οικονομικά αποδοτική.

Ως μειονέκτημα μπορούμε να πούμε ότι η τεχνολογία της ταχείας πρωτοτυποποίησης δεν αντικαθιστά ούτε πρόκειται να αντικαταστήσει ολοκληρωτικά τις συμβατικές τεχνολογίες, όπως π.χ. η κατεργασία με NC. Η μέθοδος αυτή δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την ανάπτυξη προϊόντων, αν δεν

χρησιμοποιείται ένα 3D σύστημα για να δημιουργηθεί πρώτα το μοντέλο του προϊόντος. Ωστόσο μειώνει το χρόνο που απαιτείται για τη δημιουργία ενός προϊόντος συγκεκριμένων προδιαγραφών. Αντί να υπάρχει κάποιο βοηθητικό εγχειρίδιο γράφοντας τις προδιαγραφές του αντικειμένου και την χρησιμοποίησή του, χρησιμοποιείς το πρωτότυπο ως μέσο για την ενημέρωση των λειτουργικών προδιαγραφών του.

Χρησιμοποιώντας το πρωτότυπο θα εξοικονομήσετε σημαντικό χρόνο τεκμηρίωσης και θα είναι ένας πολύ εύκολος τρόπος για τους ανθρώπους να κατανοήσουν το προτεινόμενο προϊόν.

Συν των άλλων υπάρχουν πολλοί καινοτόμοι τρόποι όπου η ταχεία πρωτοτυποποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί δίνοντας της ένα ακόμα προτέρημα στη χρήση της. Δημιουργώντας τα εργαλεία για πρωτότυπα έγχυσης δεν είναι μόνο επίπονο, αλλά και ακριβό. Επιπλέον, τα εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την δημιουργία του συγκεκριμένου τμήματος.

Το σύστημα της ταχείας πρωτοτυποποίησης «χτίζει» το αντικείμενο με τον τρόπο της πρόσθετης ύλης, layer by layer. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά και ξανά για να οικοδομήσουμε μια ποικιλία από διαφορετικά μέρη εντός του κατασκευαστικού μεγέθους.

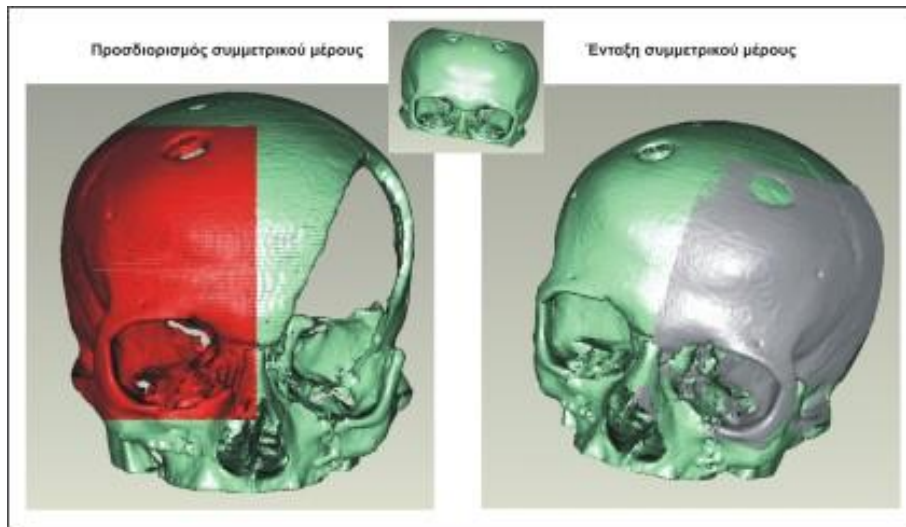
## **6.8 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ**

### **6.8.1 Ταχεία πρωτοτυποποίηση στην κατασκευή προσθετικών μερών ανθρώπινου σκελετού.**

Η εφαρμογή των αρχών της αντίστροφης μηχανικής και της ταχείας παραγωγής πρωτοτύπων στη βιοτεχνολογία έχει ξεκινήσει από πολύ παλαιά. Σημαντική είναι η πρόοδος στην οπτικοποίηση και αναπαράσταση στις τρεις διαστάσεις των δεδομένων που λαμβάνονται από μαγνητικές και αξονικές τομογραφίες. Η βασική αρχή είναι η εξαγωγή του επιφανειακού μοντέλου από τα σημεία που δίνει μια μαγνητική ή αξονική τομογραφία. Επίσης, η ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων και η ταχεία κατασκευή εμφυτευμάτων είναι μια περιοχή της επιστήμης που πρόσφατα έχει λάβει αυξημένο ενδιαφέρον. Σήμερα η έρευνα στον τομέα αυτό ακολουθεί την εξέλιξη που γίνεται στα συστήματα αντίστροφης μηχανικής και ταχείας

πρωτοτυποποίησης και έχουν αναφερθεί πειραματικές μηχανές οι οποίες μπορούν να κατασκευάσουν απευθείας βιοσυμβατά εμφυτεύματα.

Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση και δημιουργία εμφυτευμάτων μέσω λογισμικών αντίστροφης μηχανικής και ταχείας πρωτοτυποποίησης. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και αναπτύσσεται βρήκε εφαρμογή σε περιστατικά ασθενών στο Πανεπιστημιακό Νοσοκομείο Ηρακλείου με μεγάλη επιτυχία.

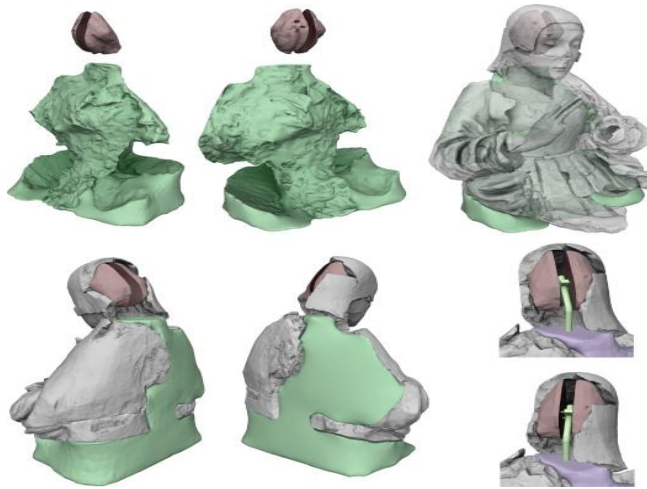


Σχήμα 6-15: Εφαρμογή στην ιατρική μοντελοποίηση

### 6.8.2 Διάσωση πολιτιστικής κληρονομιάς

Πρόκειται για καταγραφή πολιτιστικού περιεχομένου, κινητών μνημείων όπως είναι αγγεία διαφόρων ειδών, αγαλματίδια, εικόνες, άμφια και εκκλησιαστικά σκεύη καθώς και παλαίτυπα, χειρόγραφα και ποικίλα έγγραφα (πατριαρχικά σιγίλλια, επιτίμια, διαφόρων περιόδων).

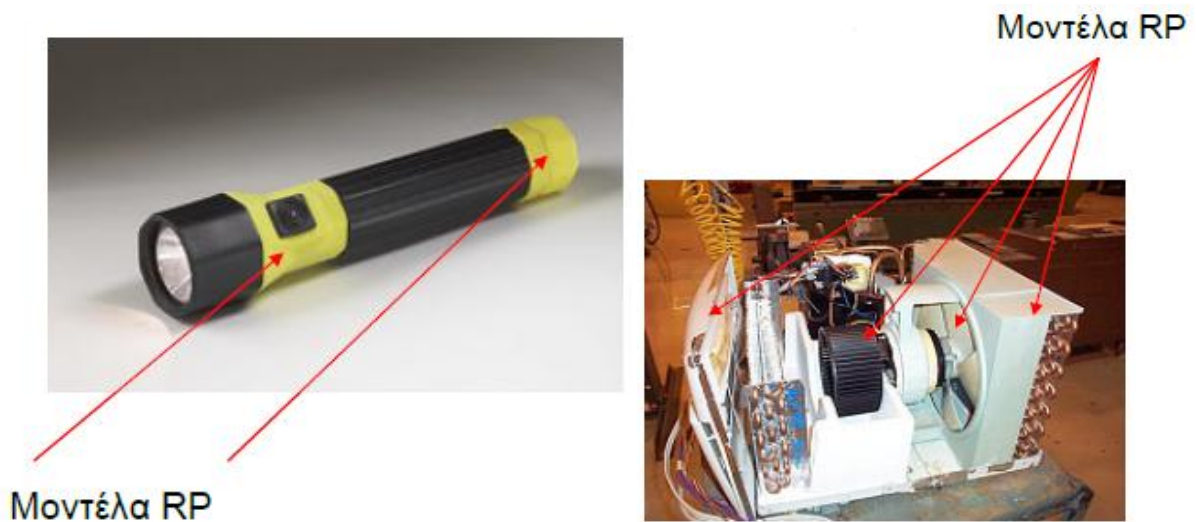
Η ψηφιοποίηση του υλικού το καθιστά προσβάσιμο σε ποικίλες ομάδες χρηστών, στην ευρύτερη επιστημονική κοινότητα και ειδικότερα στους μελετητές και φοιτητές, που ασχολούνται με το συγκεκριμένο αντικείμενο ή την ιστορία των μεταβυζαντινών χρόνων.



**Σχήμα 6-16:** Εφαρμογή στην αρχαιολογία και πολιτιστική κληρονομιά

### 6.8.3 Λειτουργικά πρωτότυπα

Έχει εφαρμογή επάνω σε κομμάτια τα οποία βγαίνουν στην αγορά και κάποια μέρη τους είναι κατασκευασμένα από διάφορα μηχανήματα ταχείας πρωτοτυποποίησης. Στο σχήμα 6-17 παρουσιάζονται μερικά αντικείμενα.



**Σχήμα 6-17 :** Εφαρμογή σε λειτουργικά πρωτότυπα

## 6.9 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ (PRUSA MENDEL LM8UU)

Το PRUSA MENDEL LM8UU ανήκει στην κατηγορία των RepRap (Σχήμα 6-18). Οι RepRap μηχανές είναι τρισδιάστατοι εκτυπωτές γραφείου (Desktop 3D Printers), οι οποίοι είναι ικανοί να δημιουργούν αντικείμενα τριών διαστάσεων σχεδιασμένα από Η/Υ [15]. Το RepRap δημιουργήθηκε από μια ομάδα μηχανικών από όλη την Ευρώπη, με επικεφαλής τον Adrian Bowyer που είχε ως στόχο την δημιουργία ενός project ελεύθερο στο κοινό, για την κατασκευή πλαστικών αντικειμένων. Το Prusa Mendel πήρε το όνομά του από τον δημιουργό του Josef Prusa ο οποίος βασιζόμενος στο project του Bowyer κατασκεύασε και εξέλιξε την μηχανή Prusa Mendel LM8UU.

Είναι μια μηχανή ταχείας πρωτοτυποποίησης η οποία ανήκει στην κατηγορία των F.D.M. μηχανών. Έχει την δυνατότητα κατασκευής μικρών αντικειμένων, μεγάλης ακρίβειας, σχεδιασμένα σε ψηφιακά αρχεία C.A.D. Ως πρώτη ύλη, χρησιμοποιεί πλαστικό νήμα (ABS ή PLA) το οποίο τίκτεται σε κατάλληλη θερμοκρασία, με σκοπό την κατασκευή του επιθυμητού αντικειμένου.

Αποτελείται από το κύριο σώμα, που πάνω σε αυτό, βρίσκονται οι βηματικοί κινητήρες οι οποίοι εκτελούν τις κινήσεις των τεσσάρων αξόνων (X,Y,Z,E). Η τράπεζα μαζί με την θερμαινόμενη πλάκα (Heatbed), αποτελούν την περιοχή εκτύπωσης και καθορίζουν το μέγιστο μέγεθός τις. Επιπλέον στο κύριο σώμα, είναι τοποθετημένο το εργαλειοφορείο της μηχανής, το οποίο φέρει πάνω του το θερμαινόμενο ακροφύσιο (Hotend), καθώς και τον μηχανισμό εξώθησης του πλαστικού (Extruder). Η μετάδοση κίνησης, από τις βηματικούς κινητήρες γίνεται με διάταξη κοχλία-περικόχλιο για τον άξονα Z, ενώ για του άξονες X και Y χρησιμοποιείται οδοντωτός ιμάντας σε συνεργασία με οδοντωτό τροχό. Η κίνηση αυτή μεταφέρεται πάνω σε λείους άξονες (γλίστρες) οι οποίοι λειτουργούν σαν οδηγοί για την τράπεζα και το εργαλειοφορείο. Η πλακέτα αριθμητικού ελέγχου (NC), ελέγχει τους βηματικούς κινητήρες, με την χρήση εντολών (κώδικας G και M) τις οποίες μπορούμε να εισάγουμε μέσω κάρτας μνήμης ή του Control panel είτε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

## 6.10 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Το Prusa Mendel αποτελείται από 4 βασικά κομμάτια:

- Κύριο σώμα
- Τράπεζα
- Εργαλειοφορείο
- Πλακέτα αριθμητικού ελέγχου και ηλεκτρονικά μέρη

### 6.10.1 Κύριο σώμα

Το κύριο σώμα χρησιμεύει για την στήριξη όλων των εξαρτημάτων, τράπεζα, εργαλειοφορείο και ηλεκτρονικά μέρη. Αποτελείται από χαλύβδινες ντίζες, και με ειδικά σχεδιασμένες πλαστικές ενώσεις, δημιουργούν τον σκελετό της μηχανής. Η στιβαρότητά της κατασκευής εξαρτάται από την επιλογή της διαμέτρου που έχουν οι ντίζες και από την πυκνότητα πλήρωσης των εκτυπωμένων πλαστικών ενώσεων. Στο κύριο σώμα βρίσκονται:

- Δυο βάσεις για την τοποθέτηση βηματικών κινητήρων, οι οποίες βρίσκονται στο επάνω μέρος της μηχανής, συγκρατούν τα ηλεκτρονικά μοτέρ σε 4 σημεία με κοχλίες, και χρησιμεύουν για την κίνηση του άξονα Z. Ακόμη έχουμε μια βάση η οποία βρίσκεται στο κάτω – εμπρός μέρος του κύριου σώματος, και συγκρατεί το μοτέρ του άξονα Y σε 3 σημεία. Στο πίσω μέρος, απέναντι από την βάση στήριξης, υπάρχει η τροχαλία καθοδήγησης του ιμάντα που κινεί , την πλατφόρμα της τράπεζας στις γλίστρες.
- Η κίνηση του άξονα X, γίνεται πάνω σε μια πλατφόρμα που προσαρμόζεται με ειδικές βάσεις, στο κύριο σώμα. Αποτελείται από τις γλίστρες του εργαλειοφορείου, καθώς και το εργαλειοφορείο. Στην αριστερή πλευρά της πλατφόρμας, έχουμε την βάση του βηματικού κινητήρα η οποία τον συγκρατεί σε 3 σημεία ενώ στην δεξιά πλευρά υπάρχει η τροχαλία όπου καθοδηγεί τον ιμάντα και μεταφέρει την κίνηση.
- Στις ράβδους που βρίσκονται στο επάνω μέρος του σκελετού, έχει τοποθετηθεί ο οδηγός για το υλικό κατεργασίας. Αυτός βοηθάει στην ομαλή τροφοδοσία με υλικό, σε όποια κίνηση και να κάνει η μηχανή, καθ' όλη την διάρκεια εκτύπωσης. Ο τρόπος συγκράτησης όλων των πλαστικών εξαρτημάτων, είναι της μορφής περικόχλιο-ροδέλα-πλαστικές ενώσεις-ροδέλα-περικόχλιο.

### 6.10.2 Τράπεζα

Η πλατφόρμα της τράπεζας, προσαρμόζεται πάνω στο κύριο σώμα, με την χρήση ειδικών πλαστικών βάσεων, που συγκρατούν τις γλίστρες και πάνω σε αυτές γίνεται η κίνηση στον άξονα Υ. Αποτελείται από:

- Μια γυάλινη επιφάνεια, η οποία αποτελεί τον χώρο εκτύπωσης της μηχανής. Εξυπηρετεί στην επιπεδότητα της τράπεζας, στην ομοιόμορφη επαγωγή της θερμότητας, και τέλος κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης, η αποκόλληση του κομματιού γίνεται ευκολότερη.
- Την θερμαινόμενη πλάκα (Heated bed) η οποία, καθορίζει τον μέγιστο χώρο εκτύπωσης. Αποτελείται από μια αντίσταση την οποία η μηχανή τροφοδοτεί με ρεύμα και την ελέγχει με την χρήση ενός αισθητήρα θερμοκρασίας ο οποίος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της πλάκας. Ο σκοπός του heated bed είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας του κομματιού και η αποφυγή της απότομης μεταβολής της θερμοκρασίας του. Αυτό βελτιώνει κατά πολύ την ποιότητα του αντικειμένου καθώς το λιωμένο πλαστικό ψύχεται από τον αέρα και συστέλλεται. Όταν η συστολή δεν γίνεται ομοιόμορφα σε όλο το κομμάτι, το αποτέλεσμα είναι ένα αλλοιωμένο προϊόν, κακής ποιότητας επιφάνειας και μη σωστή ένωση των στρωμάτων (Layers). Το φαινόμενο αυτό της αλλοίωσης είναι πιο έντονο στις γωνίες, όπου τις παρατηρούμε να σηκώνονται από την τράπεζα εκτύπωσης. Η θερμαινόμενη πλατφόρμα επιτρέπει στο εκτυπωμένο προϊόν να παραμένει ζεστό καθ' όλη την διαδικασία εκτύπωσης κάνοντας στο τέλος την συστολή του κομματιού ομοιόμορφη .
- Το σύστημα ρύθμισης της ευθυγράμμισης, είναι μια διάταξη κοχλιών και ελατήριων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στις 4 γωνίες του heated bed. Η χρήση τους είναι να ρυθμίζουμε το ύψος της εκάστου γωνίας με σκοπό την απόλυτη επιπεδότητα του τραπέζιου έτσι ώστε το πρώτο layer να έχει το επιθυμητό πάχος. Η ρύθμιση αυτή γίνεται, βιδώνοντας η ξεβιδώνοντας τον εκάστοτε κοχλία αλλάζοντας έτσι το ύψος της αντίστοιχης γωνίας.
- Τέλος έχουμε μια επιφάνεια που εξυπηρετεί στην συγκράτηση των παραπάνω και την προσαρμογή του τραπέζιου στις γλίστρες. Πάνω σε αυτή βρίσκονται οι βάσεις συγκράτησης του ιμάντα για την μεταφορά της κίνησης, ο τανυστήρας του ιμάντα καθώς και οι βάσεις ενώσεις της πλατφόρμας στις γλίστρες. Επιπλέον συγκρατεί το heated bed με το σύστημα ρύθμισης ευθυγράμμισης και την γυάλινη επιφάνεια.



### 6.10.3 Εργαλειοφορείο

Το εργαλειοφορείο είναι τοποθετημένο πάνω στην πλατφόρμα του άξονα X και φέρει πάνω του τα εργαλεία που χρησιμεύουν για την εκτύπωση του αντικειμένου. Αυτά αναλύονται σε:

- Ο extruder είναι ο μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η τροφοδοσία της μηχανής με το υλικό κατεργασίας. Η συναρμολόγησή του αποτελείται από έναν βηματικό κινητήρα, μια διάταξη οδοντωτών τροχών, και έναν κοχλία που διαθέτει οδόντωση όπου λειτουργεί σαν αρπάγη. Ανάλογα με τους ηλεκτρονικούς παλμούς που στέλνονται στον βηματικό κινητήρα περιστρέφονται οι οδοντωτοί τροχοί και ο κοχλίας με σκοπό να ωθήσει με συγκεκριμένο βήμα το υλικό κατεργασίας στη θερμαινόμενη κεφαλή εκτύπωσης (hotend). Το hotend, τοποθετείτε στην απόληξη του extruder, και τροφοδοτείται από αυτόν. Καθώς το υλικό εισέρχεται στο hotend αυτό τήκεται και εξέρχεται σε μορφή νήματος. Έχει σαν βάση ένα ακροφύσιο (nozzle) φτιαγμένο από ορείχαλκο ή αλουμίνιο ώστε να έχει καλή επαγωγή θερμότητας. Συνήθως, χρησιμοποιείται συνδεσμολογία κεραμικών αντιστάσεων μεγάλης ισχύος ή μερικές φορές καλώδιο από nichrome που, είναι ένα μη μαγνητικό κράμα, νικελίου, χρωμίου και μερικές φορές σιδήρου. Η διάταξη αυτή, επιτρέπει στο hotend να φτάνει στη θερμοκρασία τήξης του υλικού κατεργασίας, η οποία κυμαίνεται από 185 °C μέχρι 240 °C ανάλογα με το υλικό. Πάνω από οποιαδήποτε εστία θέρμανσης, τοποθετείται μόνωση που είναι είτε μια ειδική ταινία, είτε μια επικάλυψη από ένα κεραμικό υλικό υγρής μορφής καθώς μετά την θέρμανση του στερεοποιείται και λειτουργεί σαν μονωτής. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας χρησιμοποιούμε έναν αισθητήρα που βρίσκεται πάνω στο μεταλλικό περίβλημα και μέσω του αλγορίθμου της μηχανής γνωρίζουμε την θερμοκρασία του οποιαδήποτε χρονική στιγμή.
- Δίπλα στην κεφαλή του hotend είναι τοποθετημένος ένας ανεμιστήρας. Αυτό εξυπηρετεί στην άμεση ψύξη του υλικού κατεργασίας που εξέρχεται, για την κατασκευή ιδιόμορφων επιφανειών. Ο έλεγχος της λειτουργιάς του γίνεται αυτόματα από τον αλγόριθμο της μηχανής μέσω του προγράμματος C.A.M. όπου αυτό το κρίνει απαραίτητο. Η κατασκευή γεφυρών χωρίς ενδιάμεσες βάσεις στήριξης και χωρίς την χρήση ανεμιστήρα δεν θα ήταν δυνατή, καθώς το νήμα εξέρχεται σε υψηλές θερμοκρασίες και δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί άμεσα. Έτσι, αυτό που επιτυγχάνεται με την χρήση του ανεμιστήρα, είναι η άμεση κατασκευή γεφυρών μεγάλου μήκους, χωρίς την αλλοίωση του αποτελέσματος.

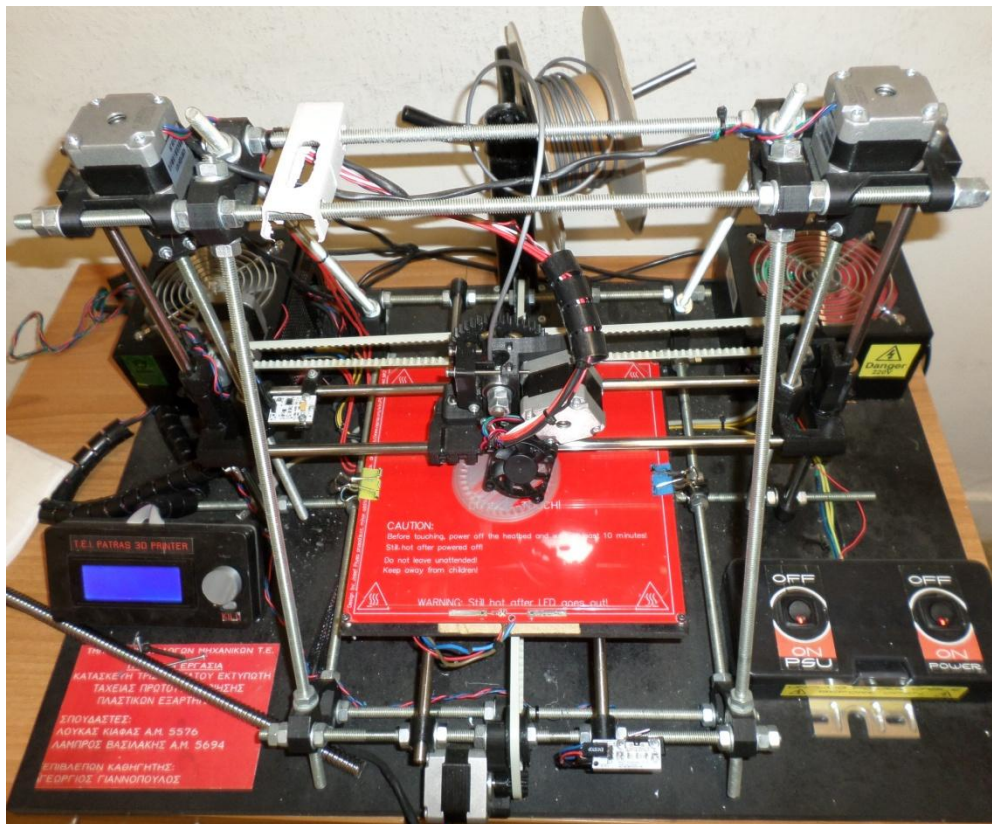
#### 6.10.4 Πλακέτα αριθμητικού ελέγχου και ηλεκτρονικά μέρη.

Η πλακέτα αριθμητικού έλεγχου, μαζί με τα ηλεκτρονικά μέρη, αποτελεί τον εγκέφαλο και τα αισθητήρια όργανα της μηχανής. Οποιαδήποτε λειτουργία κάνει, ορίζεται μέσω του κώδικα G και M, τον οποίο μετατρέπει, σε κινήσεις των αξόνων και σε λειτουργίες των εξαρτημάτων. Η σύνδεση τους, με τους βηματικούς κινητήρες, τους διακόπτες ορίων (endstops), τους αισθητήρες θερμοκρασίας και τα θερμαινόμενα μέρη, μας δίνουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειαζόμαστε για την ασφαλή λειτουργία της μηχανής. Η διάταξη των πλακετών αποτελείται από ένα Arduino και μια πλακέτα RAMPS, οι οποίες συνδέονται με καλώδιο USB στον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή. Με την χρήση προγραμμάτων C.A.D/C.A.M. παίρνουν τα δεδομένα και καθορίζουν την λειτουργία της. Οι ηλεκτρονικές πλακέτες ελέγχουν την διεργασία της εκτύπωσης και οι βασικές λειτουργίες τους είναι:

- **Επεξεργασία των πληροφοριών του κώδικα G και M.** Ο κώδικας αυτός, είναι η γλωσσά επικοινωνίας του χρηστή με όλες τις εργαλειομηχανές C.N.C. Συντάσσεται είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα μέσω του προγράμματος C.A.M. και οι πλακέτες μετατρέπουν τις εντολές του, σε κινήσεις και λειτουργίες της μηχανής.
- **Οδήγηση των βηματικών κινητήρων.** Η οδήγηση των βηματικών κινητήρων, επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρονικών οδηγών, που είναι τοποθετημένοι πάνω στην RAMPS, και μετατραπούν τις εντολές, σε παλμούς ρεύματος για την κίνηση τους.
- **Έλεγχος της θερμοκρασίας** του hotend και του heated bed. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω της ύπαρξης αισθητήρων, οι όποιοι στέλνουν τα δεδομένα για την θερμοκρασία στην πλακέτα αριθμητικού έλεγχου και αυτή μας εμφανίζει μέσα στο γραφικό περιβάλλον του Υπολογιστή, και στον controller την θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (°C).
- **Έλεγχος των endstops (όρια μηχανής).** Τα endstops είναι διακόπτες είτε μαγνητικοί, είτε απλοί και καθορίζουν την μέγιστη διαδρομή της κάθε πλατφόρμας. Είναι τοποθετημένοι στα άκρα των αξόνων, και στέλνουν τα δεδομένα στην πλακέτα αριθμητικού έλεγχου, προστατεύοντας έτσι τα κινούμενα μέρη από τυχόν χτυπήματα στα άκρα.
- **Έλεγχος λειτουργιάς του ανεμιστήρα.** Το Arduino Mega 2560 είναι ένας μικροελεγκτής με βάση το κύκλωμα ATmega2560. Διαθέτει 54 ψηφιακούς

ακροδέκτες εισόδου / εξόδου (εκ των οποίων 14 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι PWM), 16 αναλογικές εισόδους, 4 UARTs (σειριακές θύρες), ένα 16 MHz κρύσταλλο, μια σύνδεση USB, μια υποδοχή για τροφοδοσία ρεύματος και ένα κουμπί επαναφοράς (RESET). Συνδέεται σε έναν υπολογιστή με ένα καλώδιο USB ή με τροφοδοτικό ή μπαταρία για να ξεκινήσει η λειτουργία του.

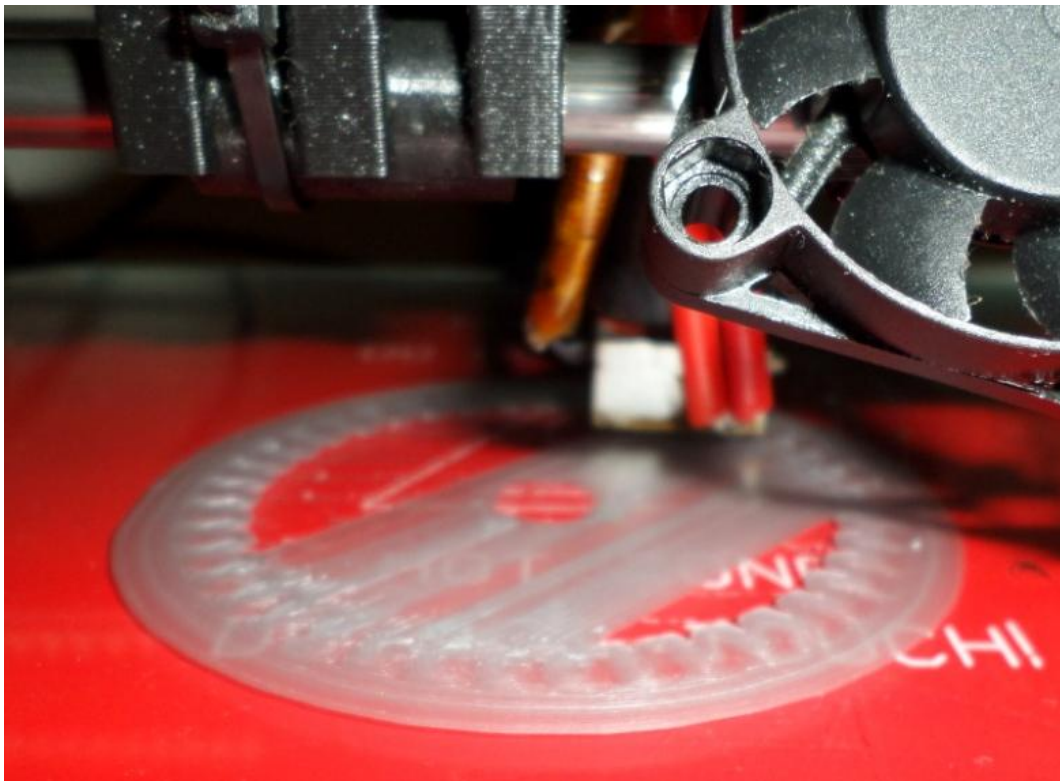
- Το **RepRap Arduino Mega Pololu Shield** ή εν συντομία RAMPS είναι μια ηλεκτρονική πλακέτα σχεδιασμένη να διαθέτει όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα για την λειτουργία μιας μηχανής RepRap (πρωτοτυποποίησης). Το RAMPS συνδέεται με την πλατφόρμα Arduino και έχει χώρο για αρκετές επεκτάσεις. Η διάταξή του περιλαμβάνει βύσματα για οδηγούς βηματικών κινητήρων και ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου τα οποία είναι εύκολα στην λειτουργία από ένα Arduino και έχουν την δυνατότητα αναβάθμισης όπως κάρτα μνήμης SD, Bluetooth οθόνη ενδείξεων και άλλα.



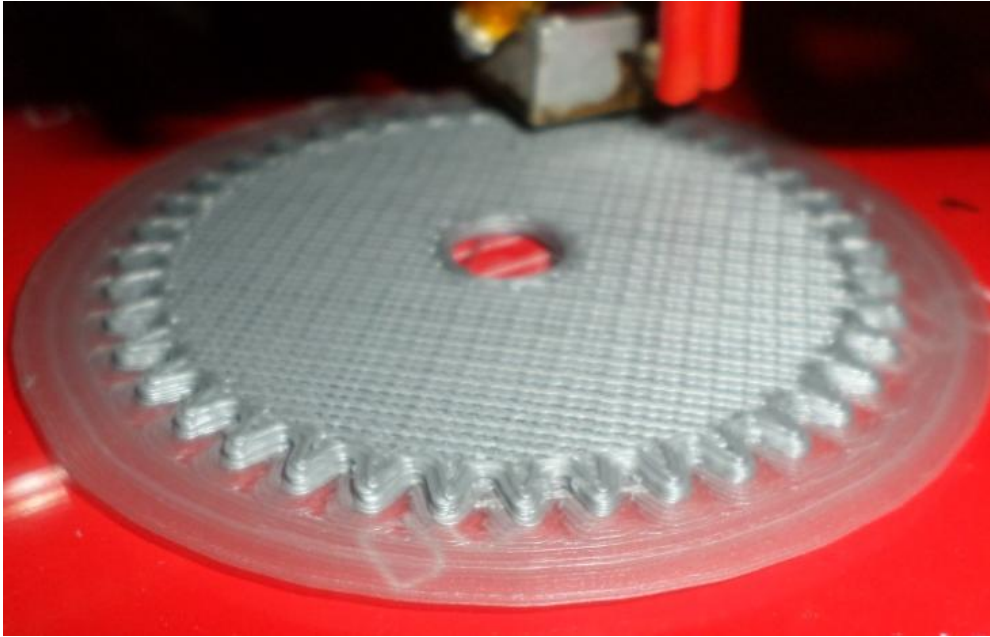
Σχήμα 6-18 : Μηχανή Prusa Mendel LM8UU

## 6.11 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

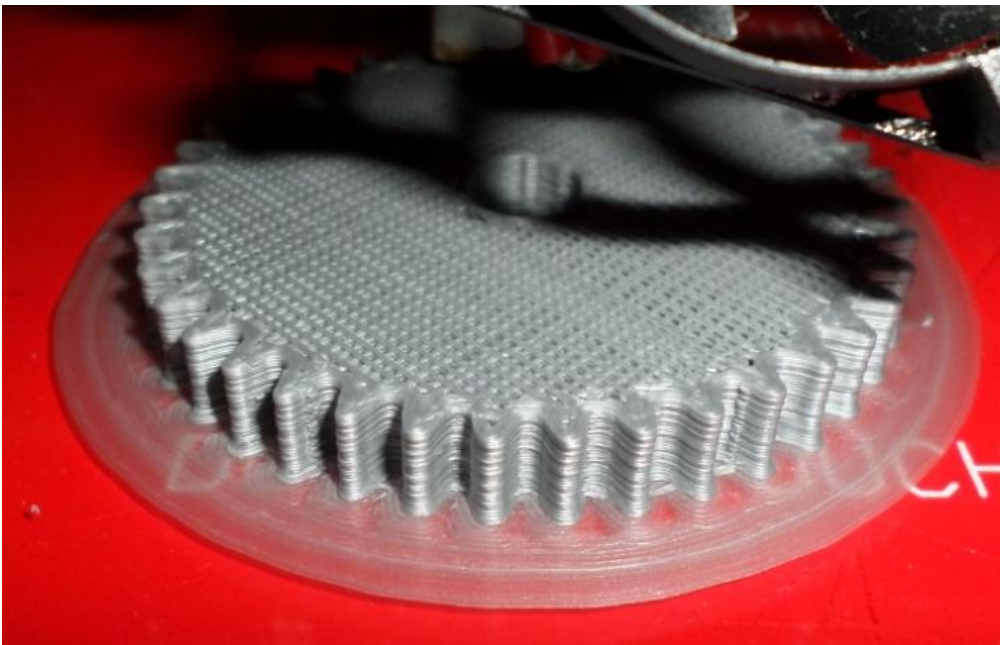
Η εκτύπωση των οδοντωτών τροχών έγινε με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή του σχήματος 6-18 και έχει σχέση μετάδοσης 1:2. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τροχών αναφέρονται στον πίνακα 4-3 και η κλίμακα τους είναι 1:1. Από τα μοντέλα που δημιουργήσαμε στο Solidworks αποθηκεύσαμε τα αρχεία με την μορφοποίηση stl και στην συνέχεια εισάγαμε αυτά τα αρχεία στην μηχανή και εξάγαμε τον κώδικα G και M. Τα layer (γραμμές) τα οποία θα γίνουν διαδοχικά για την κατασκευή του κάθε τροχού είναι 55. Το αρχικό layer έχει πάχος 0,1 mm και γεμίζει το υλικό 100%, ενώ στην συνέχεια το πάχος της κάθε γραμμής ανεβαίνει στα 0,22 mm ενώ το υλικό δεν γεμίζει πλήρως αλλά μόνο στο 40% για λόγους εξοικονόμησης υλικού. Στα σχήματα 6-19 έως 6-23 φαίνονται οι φωτογραφίες κατά την σταδιακή κατασκευή των οδοντωτών τροχών.



**Σχήμα 6-19** : Layer 1 με πάχος γραμμής 0,1 mm

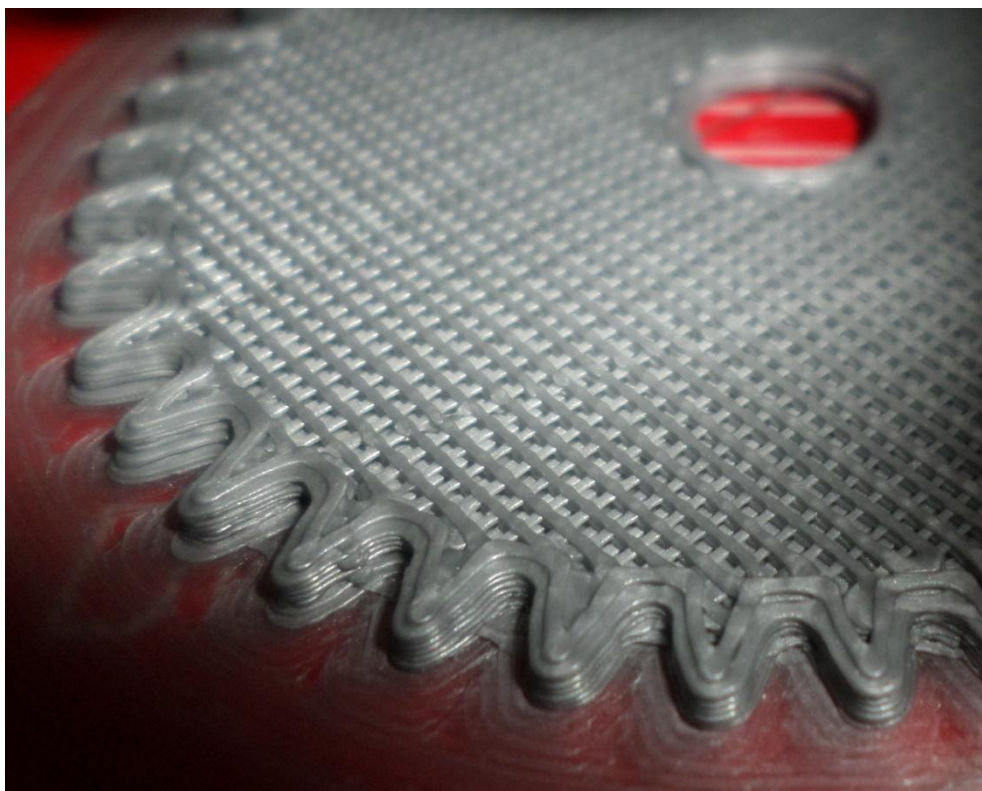


**Σχήμα 6-20:** Layer 10 με πάχος γραμμής 0,22 mm



**Σχήμα 6-21:** Layer 50 με πάχος γραμμής 0,22 mm





**Σχήμα 6-22** : Γέμισμα υλικού στο 40%

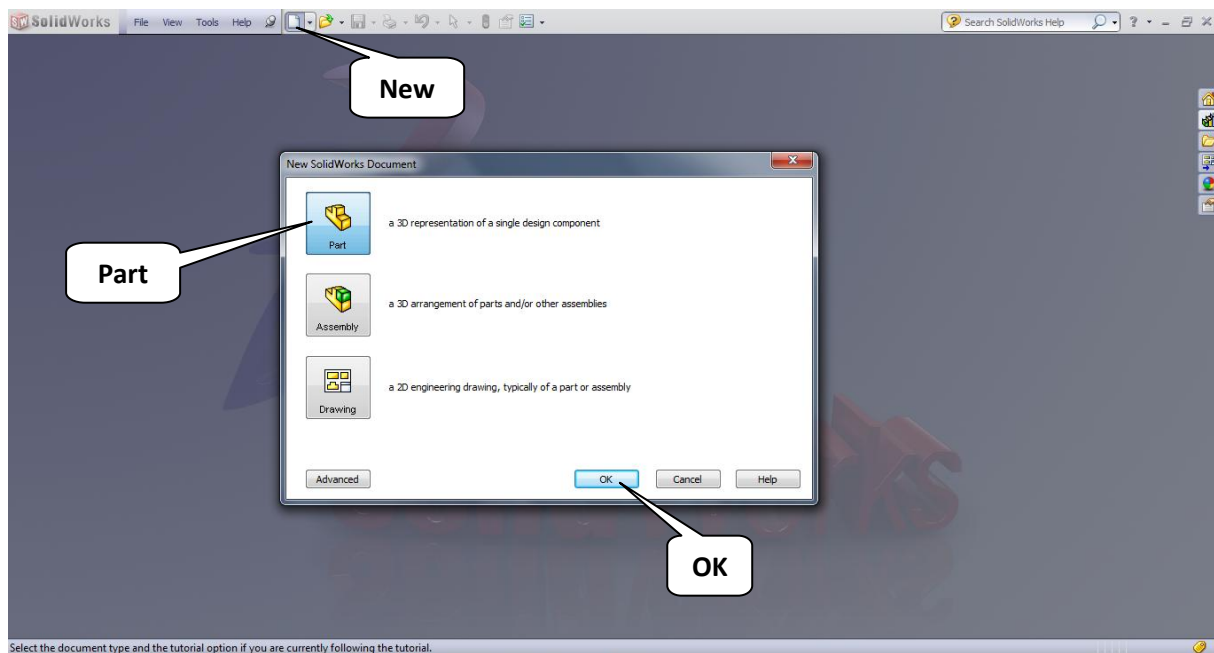


**Σχήμα 6-23** : Τρισδιάστατοι εκτυπωμένοι οδοντωτοί τροχοί

## 7. ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΖΕΥΓΟΥΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

### 7.1 ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ SOLIDWORKS

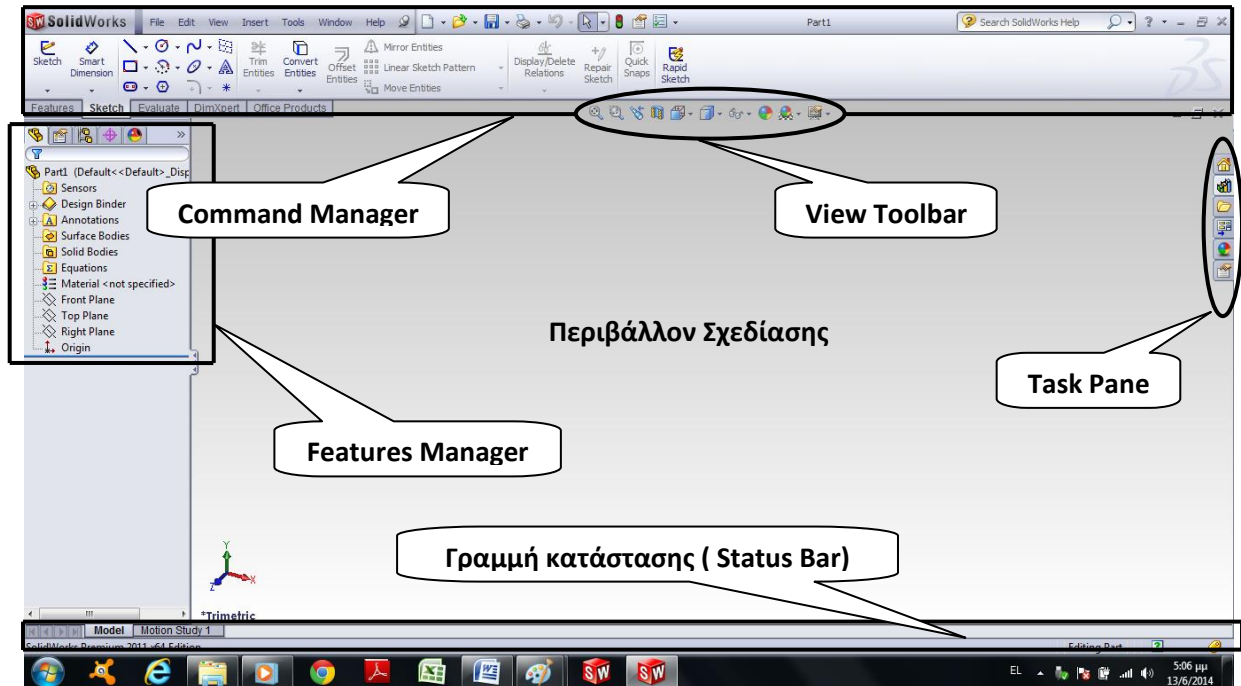
Για να ανοίξουμε το SolidWorks, πηγαίνουμε στο Start → All Programs → SolidWorks και εμφανίζεται η αρχική οθόνη του προγράμματος (Σχήμα 7-1) [17] , [18]. Αυτή τη στιγμή δεν υπάρχει κάποιο αρχείο σχεδίου ανοιχτό. Για να δημιουργήσουμε ένα νέο αρχείο, πάμε στο μενού File και επιλέγουμε New. Τότε, ανοίγει ένα νέο παράθυρο. Πατάμε την επιλογή Part και μετά OK.



Σχήμα 7-1 : Εκκίνηση του προγράμματος SolidWorks

## 7.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ SOLIDWORKS

Αφού ανοίξουμε το πρόγραμμα, το περιβάλλον του εμφανίζεται στην οθόνη και απαρτίζεται από επιμέρους μενού, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 7-2. Παρακάτω ακολουθεί σύντομη επεξήγηση αυτών.



Σχήμα 7-2 : Κύριο μενού SolidWorks

### 7.2.1 Η περιοχή Command Manager

Το Command Manager περιλαμβάνει όλες τις εντολές που διαθέτει το πρόγραμμα για σχεδίαση, επεξεργασία και όλες τις διαθέσιμες επιλογές. Τα μενού που υπάρχουν στον Command Manager είναι τα εξής: File, Edit, View, Insert, Tools, Window και Help. Τα πιο σημαντικά εκ των οποίων είναι τα μενού που φαίνονται στο σχήμα 7-3.

Το μενού **File** είναι ο διαχειριστής των αρχείων επεξεργασίας που μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε ένα νέο (New), να ανοίξουμε ένα υπάρχον (Open), να κλείσουμε ένα τρέχον (Close), να αποθηκεύσουμε (Save), να εκτυπώσουμε (Print) ή να διαμορφώσουμε τις ιδιότητες ενός αρχείου (Properties).

Το μενού **Edit** με το οποίο μπορούμε να κάνουμε εργασίες όπως να αναιρέσουμε μια ενέργεια (Undo), να αντιγράψουμε ή να επικολλήσουμε τμήματα σχεδίου (Copy-Paste).



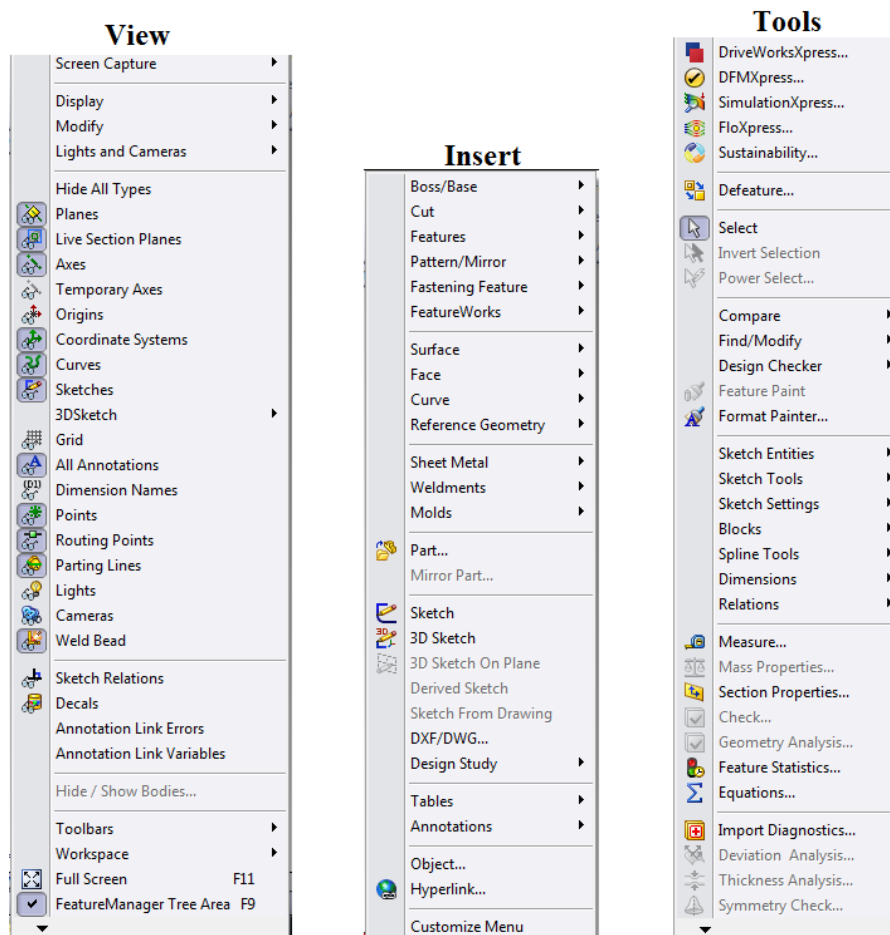
Το μενού **View** χρησιμοποιείται για να ενεργοποιείται και να απενεργοποιείται η ορατότητα διαφόρων οντοτήτων, όπως είναι οι όψεις, τα επίπεδα, διάφορα σχήματα ή άξονες.

Το μενού **Insert** χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία διαφόρων χαρακτηριστικών, για τα οποία δεν υπάρχει μενού συντόμευσης στο περιβάλλον του προγράμματος.

Το μενού **Tools** χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον για τις σχεδιαστικές οντότητες. Επίσης, εδώ υπάρχουν άλλα χρήσιμα εργαλεία, όπως το Measure, Equation, Customize και Options.

Το μενού **Window** δίνει την δυνατότητα στο χρήστη του προγράμματος να διαχειριστεί όπως αυτός επιθυμεί το περιβάλλον σχεδιασμού, για παράδειγμα το διαχωρισμό του κεντρικού παραθύρου σε περισσότερα παράθυρα με διαφορετική οπτική γωνία στο καθένα (Viewport).

Μέσα από το μενού **Help** μπορούμε εισάγοντας λέξεις κλειδιά και να βρούμε απαντήσεις για διάφορα στοιχεία του προγράμματος.



Σχήμα 7-3 : Μενού View, Insert και Tools

Οτιδήποτε σχεδιάζουμε εμφανίζεται στο λεγόμενο περιβάλλον σχεδίασης. Κάθε φορά μπορούμε να εργαστούμε σε ένα και μόνο περιβάλλον σχεδίασης.

## 7.2.2 Η περιοχή Feature Manager

Το παράθυρο Feature Manager είναι αυτό που βρίσκεται στο αριστερό μέρος της οθόνης και σε αυτό εμφανίζεται με τη σειρά μια λίστα με όλα τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο χτίστηκε το κομμάτι μας.

## 7.2.3 Η περιοχή Task Pane

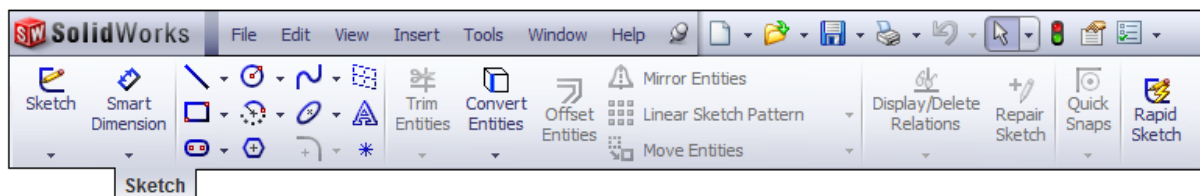
Δεξιά της οθόνης εμφανίζεται το Task pane, όπου υπάρχουν διάφορες βοηθητικές λειτουργίες, όπως το SolidWorks Search, το File Explorer, κτλ.

## 7.2.4 Η περιοχή Status bar

Τέλος, το Status bar είναι ένας τρόπος επικοινωνίας του SolidWorks με το χρήστη. Βρίσκεται στο κάτω μέρος της οθόνης και ενεργοποιείται από το μενού View. Στο Status bar μπορούν να εμφανιστούν διάφορες πληροφορίες, όπως η διαδικασία φόρτωσης ενός σχεδίου ή συναρμολόγησης, συμβουλές για διάφορες εντολές, μετρήσεις, η κατάσταση ενός ενεργούς σχεδίου κτλ.

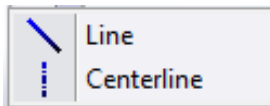
## 7.2.5 Το παράθυρο εντολών σχεδίασης (Sketch)

Η καρτέλα Sketch (σχήμα 7-4) έχει όλες τις εντολές σχεδίασης ενός δισδιάστατου σχεδίου (2D), οι πιο σημαντικές από αυτές αναλύονται παρακάτω.



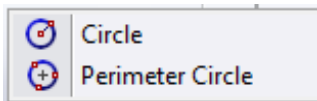
Σχήμα 7-4 : Καρτέλα σχεδίασης (Sketch)

### Line (Γραμμή)



Δημιουργεί ευθείες γραμμές συγκεκριμένου τύπου, όπως οριζόντιες, κατακόρυφες, υπό γωνία ή ευθείες απείρου μήκους με δύο κλικ του ποντικιού. Επίσης με την centerline σχεδιάζουμε αξονικές γραμμές.

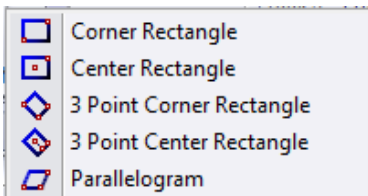
### Circle (Κύκλος)



Δημιουργεί έναν κύκλο με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Center Circle: Κλικάρουμε στο κέντρο του κύκλου και σύρουμε το ποντίκι για να δημιουργήσουμε την ακτίνα του.
- Perimeter Circle: Ορίζοντας τρία διαφορετικά σημεία της περιφέρειας του κύκλου.

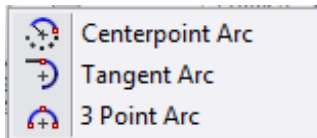
### Rectangle (Ορθογώνιο)



Δημιουργεί ένα ορθογώνιο με τους εξής τρόπους:

- Corner Rectangle: Επιλέγοντας τη μία γωνία του τετραγώνου με το ποντίκι και σύροντας το για να επιλέξει τη γωνία στην απέναντι διαγώνιο.
- Center Rectangle: Επιλέγοντας το κέντρο του ορθογωνίου και μια γωνία.
- 3-Point Corner Rectangle: Επιλέγοντας τρεις γωνίες του ορθογωνίου.
- 3-Point Center Rectangle: Επιλέγοντας το κέντρο του ορθογωνίου, το σημείο τομής της καθέτου σε μια πλευρά και μία γωνία.
- Parallelogram: Δημιουργεί παραλληλόγραμμο με επιλογή τριών γωνιών.

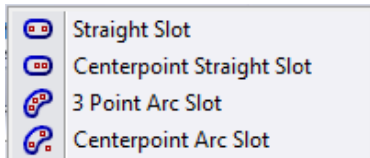
## Arc (Τόξο)



Δημιουργεί ένα τόξο με τρεις τρόπους:

- Centerpoint Arc: Επιλέγοντας το κέντρο του τόξου, το μήκος της ακτίνας του και σε ένα τρίτο σημείο που θα καθορίσει τη γωνία του τόξου.
- Tangent Arc: Τόξο που εφάπτεται σε μια ήδη υπάρχουσα οντότητα.
- 3 Point Arc: Επιλέγοντας πρώτα τα δύο άκρα του και στη συνέχεια ένα σημείο πάνω στην περιφέρεια του τόξου.

## Slot



Δημιουργεί ένα οβάλ σχήμα με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Straight Slot: Κλικάρουμε τα σημεία που ενώνουν τα κέντρα των καμπυλοτήτων δημιουργώντας έναν άξονα συμμετρίας και σύρουμε το ποντίκι για να δημιουργήσουμε το πλάτος του.
- Centerpoint Straight Slot : Κλικάρουμε τα σημεία που ενώνουν το κέντρο του σχήματος και μιας καμπυλότητας δημιουργώντας έναν άξονα συμμετρίας και σύρουμε το ποντίκι για να δημιουργήσουμε το πλάτος του.

Δημιουργεί ένα οβάλ τόξο με δύο διαφορετικούς τρόπους:

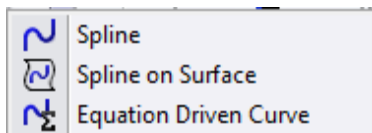
- 3 Point Arc Slot: Κλικάρουμε τρία σημεία του τόξου δημιουργώντας έναν άξονα συμμετρίας και σύρουμε το ποντίκι για να δημιουργήσουμε το πλάτος του.
- Centerpoint Arc Slot: Κλικάρουμε τα σημεία που ενώνουν τα κέντρα των καμπυλοτήτων και το κέντρο του τόξου και σύρουμε το ποντίκι για να δημιουργήσουμε το πλάτος του.

### Polygon (Πολύγωνο)



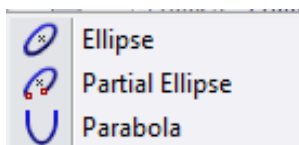
Δημιουργεί ένα κανονικό πολύγωνο επιλέγοντας το κέντρο του και την επιθυμητή ακτίνα. Επίσης πρέπει να καθοριστεί ο αριθμός των πλευρών του μέσα από το παράθυρο του Property Manager που εμφανίζεται.

### Spline (Καμπύλη)



Δημιουργεί μια καμπύλη ελεύθερης μορφής. Ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει είτε στο επιλεγμένο επίπεδο είτε σε μια επιλεγμένη επιφάνεια (Spline on Surface). Επίσης, μπορεί να σχεδιαστεί καμπύλη καθορισμένη μέσω εξίσωσης που δίνεται μέσα από το παράθυρο του Property Manager.

### Ellipse (Ελλειψη)



Δημιουργεί μια έλλειψη επιλέγοντας το κέντρο της, και καθορίζοντας ένα άξονα της πρώτα και ύστερα τον άλλο. Επίσης, με τον ίδιο τρόπο μπορεί να δοθεί είτε τμήμα έλλειψης (Partial Ellipse) είτε παραβολή (Parabola).

### Fillet (Καμπυλότητα - Σπάσιμο)



- Sketch Fillet: Δημιουργεί καμπυλότητα με δύο τρόπους: είτε επιλέγοντας το σημείο επαφής των δύο οντοτήτων είτε επιλέγοντας απευθείας τις δύο οντότητες κλικάροντας το τμήμα τους εκείνο που καλούμε να κρατήσουμε.
- Sketch Chamfer: Δημιουργεί σπάσιμο γωνίας μεταξύ δύο γραμμών.

### Plane (Επίπεδο)



Εισάγει ένα επίπεδο σε μια τρισδιάστατη οντότητα.

### Sketch Text (Κείμενο Σχεδίου)



Δημιουργεί επεξεργάσιμο κείμενο στα σχέδια.

### Point (Σημείο)



Δημιουργεί ένα σημείο στο σχέδιο μας.

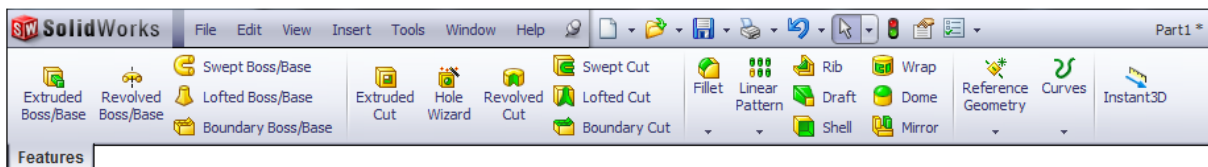
### Smart Dimension (Διαστάσεις)



Μας επιτρέπει να διαστασιολογούμε το σχέδιο μας καθώς το σχεδιάζουμε.

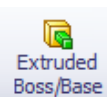
## 7.2.6 Το παράθυρο εντολών χαρακτηριστικών (Features)

Η καρτέλα Features (σχήμα 7-5) έχει όλες τις εντολές ώστε να δώσουμε κάποια χαρακτηριστικά στο δισδιάστατο σχέδιο μας (2D) και να μπορέσουμε να το κάνουμε τρισδιάστατο (3D) , τα πιο σημαντικά από αυτά αναλύονται παρακάτω.



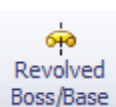
Σχήμα 7-5 : Καρτέλα Χαρακτηριστικών (Features)

### Extruded Boss/Base



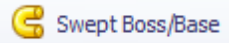
Δίνει βάθος σε μια ή δυο διευθύνσεις μιας επιλεγμένης δισδιάστατης οντότητας δημιουργώντας έναν όγκο τριών διαστάσεων.

### Revolved Boss/Base



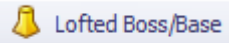
Περιστρέφει μια επιλεγμένη δισδιάστατη οντότητα γύρω από έναν άξονα σχηματίζοντας έναν όγκο τριών διαστάσεων.

### Swept Boss/Base



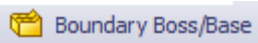
Σαρώνει ένα κλειστό δισδιάστατο προφίλ κατά μήκος μιας καμπύλης δημιουργώντας μια τρισδιάστατη οντότητα.

### Lofted Boss/Base



Προσθέτει υλικό μεταξύ δυο προφίλ δημιουργώντας μια τρισδιάστατη οντότητα.

### Boundary Boss/Base



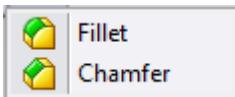
Προσθέτει υλικό μεταξύ προφίλ σε δυο διευθύνσεις δημιουργώντας μια τρισδιάστατη οντότητα.

### Hole Wizard



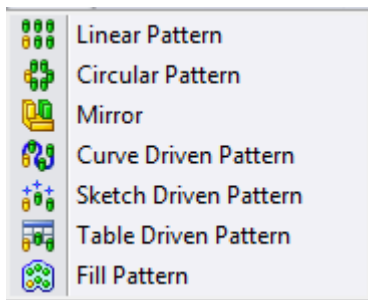
Δημιουργεί μια τρύπα χρησιμοποιώντας προεπιλεγμένες μορφές από πρότυπα που εμφανίζονται στο παράθυρο του Property Manager.

### Fillet



Δημιουργεί μια καμπύλη (Fillet) όψη εσωτερική ή εξωτερική μεταξύ μιας ή περισσοτέρων ακμών σε όγκο ή επιφάνεια. Ενώ το Chamfer δημιουργεί ένα σπάσιμο κατά μήκος μιας ακμής του αντικειμένου.

## Pattern



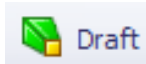
- Linear Pattern: Δημιουργεί ένα πλέγμα από οντότητες σε γραμμές δυο διαστάσεων.
- Circular Pattern: Δημιουργεί ένα πλέγμα από οντότητες σε κυκλική διάταξη.
- Mirror: Δημιουργεί συμμετρικές μορφές όγκων ή επιφανειών ως προς συγκεκριμένο επίπεδο συμμετρίας.
- Curve Driven Pattern: Δημιουργεί ένα πλέγμα από οντότητες σε συγκεκριμένο μονοπάτι καμπυλότητας.
- Sketch Driven Pattern: Δημιουργεί ένα πλέγμα από οντότητες σε συγκεκριμένα σημεία.
- Table Driven Pattern: Δημιουργεί έναν πίνακα από οντότητες.
- Fill Pattern: Δημιουργεί ένα πλέγμα γεμίσματος από οντότητες.

## Rib



Δημιουργεί μια λεπτότοιχη στήριξη σε έναν όγκο.

## Draft



Δημιουργεί κωνικότητα σε έναν όγκο με καθορισμένη γωνία.

## Shell



Αφαιρεί υλικό από έναν όγκο για την δημιουργία λεπτότοιχης διατομής.

## Wrap



Τυλίγει μια οντότητα πάνω σε μια επιφάνεια όγκου.



### Dome



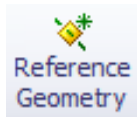
Δημιουργεί έναν θόλο ή τρούλο σε επιλεγμένες όψεις.

### Mirror



Δημιουργεί συμμετρικές μορφές όγκων ως προς συγκεκριμένο επίπεδο.

### Reference Geometry



Μπορούμε να εισάγουμε στο αντικείμενο μας έναν άξονα συμμετρίας, ένα νέο επίπεδο, ένα σημείο ή ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

### Curves



Δημιουργεί καμπύλες με διάφορους τρόπους, είτε μέσω σημείων XYZ, είτε μέσω δύο στερεών, ελικοειδή καμπύλη, σπείρα, κτλ.

### 7.3 ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ


Ο οδοντωτός τροχός που θα σχεδιάσουμε είναι με βάση τυποποιημένες διαστάσεις και συγκεκριμένα με την τυποποίηση κατά iso class 8 (S10T15M042S1210), σχήμα 7-6 [16].

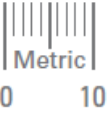
SPUR GEARS • MODULE 1.5

SDPSI

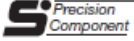
ISO CLASS 8  
12 mm FACE  
10 mm BORE  
20° PRESSURE ANGLE

PHONE: 516.328.3300 • FAX: 516.326.8827 • WWW.SDP-SI.COM



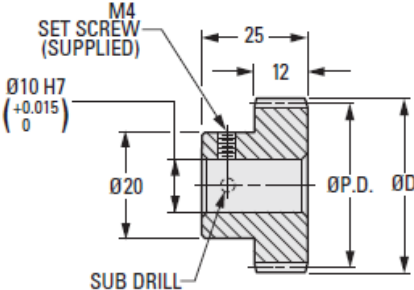


0 10



► **MATERIAL:**  
303 Stainless Steel

Available as special order:  
Number of teeth not listed, different bore size and / or material, passivation for stainless steel.



#### METRIC COMPONENT

Catalog Number	No. of Teeth	P.D.	D Dia.
S10T15M018S1210	18	27	30
S10T15M020S1210	20	30	33
S10T15M024S1210	24	36	39
S10T15M028S1210	28	42	45
S10T15M030S1210	30	45	48
S10T15M032S1210	32	48	51
S10T15M036S1210	36	54	57
S10T15M040S1210	40	60	63
S10T15M042S1210	42	63	66
S10T15M045S1210	45	67.5	70.5
S10T15M048S1210	48	72	75
S10T15M050S1210	50	75	78
S10T15M056S1210	56	84	87
S10T15M060S1210	60	90	93
S10T15M064S1210	64	96	99

Σχήμα 7-6 : Τυποποιημένοι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί

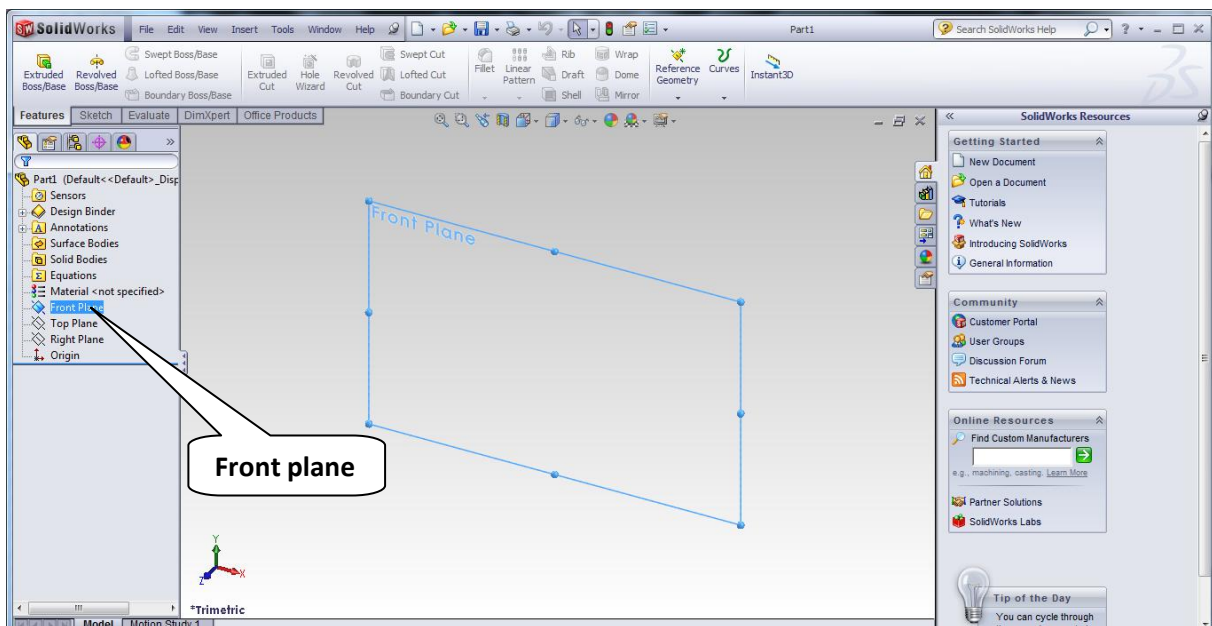
Με βάση λοιπόν τον αριθμό δοντιών ( $Z = 42$ ), την αρχική διάμετρο ( $d_0 = 63$ ) και το module ( $m = 1.5$ ) μπορούμε να υπολογίσουμε με την βοήθεια των σχέσεων 2.1 έως 2.9 όλες τις υπόλοιπες διαστάσεις του οδοντωτού τροχού οι οποίες είναι απαραίτητες για τον σχεδιασμό του και απεικονίζονται στον πίνακα 7-1 που ακολουθεί. Όλες οι διαστάσεις είναι σε χιλιοστά ( $mm$ ).

Αριθμός οδόντων	$z$	42
Αρχική διάμετρος	$d_0$	63
Βήμα οδόντων	$t_0$	4,712
Module	$m$	1,5
Ύψος κεφαλής	$h_k$	1,5
Ύψος ποδός	$h_f$	1,95
Ύψος οδόντων	$h$	3,45
Διάμετρος κεφαλής	$d_k$	66
Διάμετρος ποδός	$d_f$	59,1
Πάχος οδόντων	$S_0$	2,35608
Διάκενο οδόντων	$l_0$	2,35631
Γωνία επαφής	$\varphi$	20

Πίνακας 7-1 : Διαστάσεις οδοντωτού τροχού

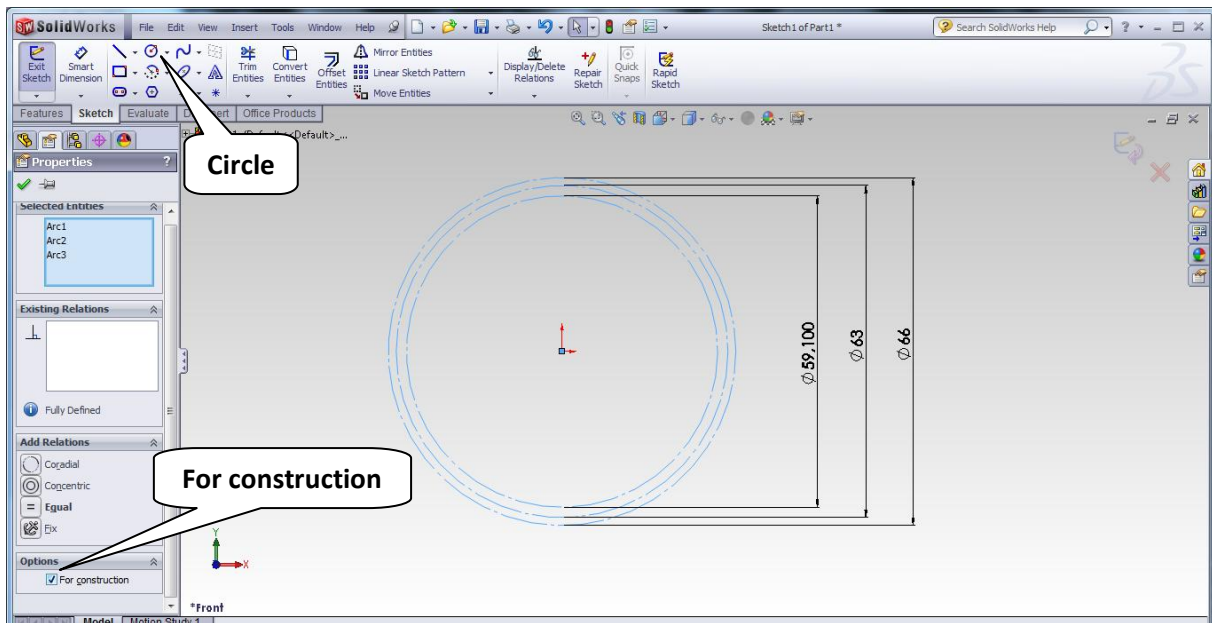
### Βήμα 1<sup>ο</sup>

Από το Feature Manager επιλέγουμε επίπεδο σχεδίασης (Front plane).



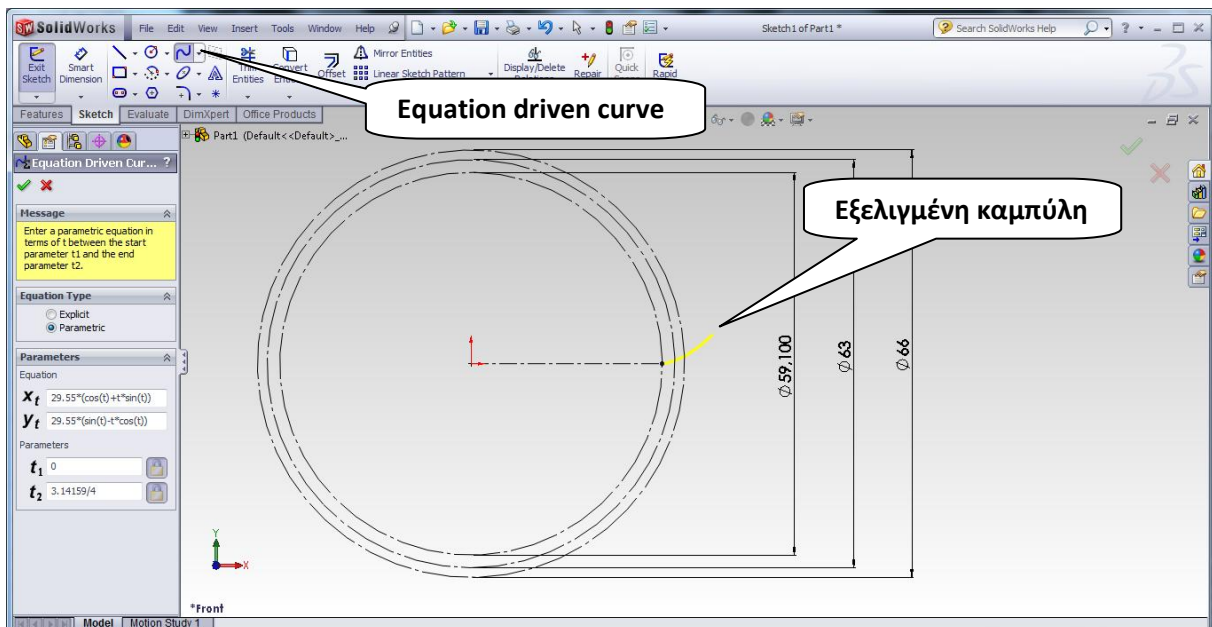
## Βήμα 2°

Από την καρτέλα σχεδίασης (Sketch) θα επιλέξουμε την εντολή **circle** και θα σχεδιάσουμε τρεις κύκλους με αντίστοιχες διαμέτρους  $d_k = 66$ ,  $d_o = 63$  και  $d_f = 59.1$ . Στην συνέχεια επιλέγουμε τους 3 κύκλους κρατώντας πατημένο το πλήκτρο Ctrl και κάνοντας κλικ σε κάθε κύκλο και επιλέγουμε την εντολή στο παράθυρο που θα ανοίξει αριστερά μας **For construction**, τέλος πατάμε OK.



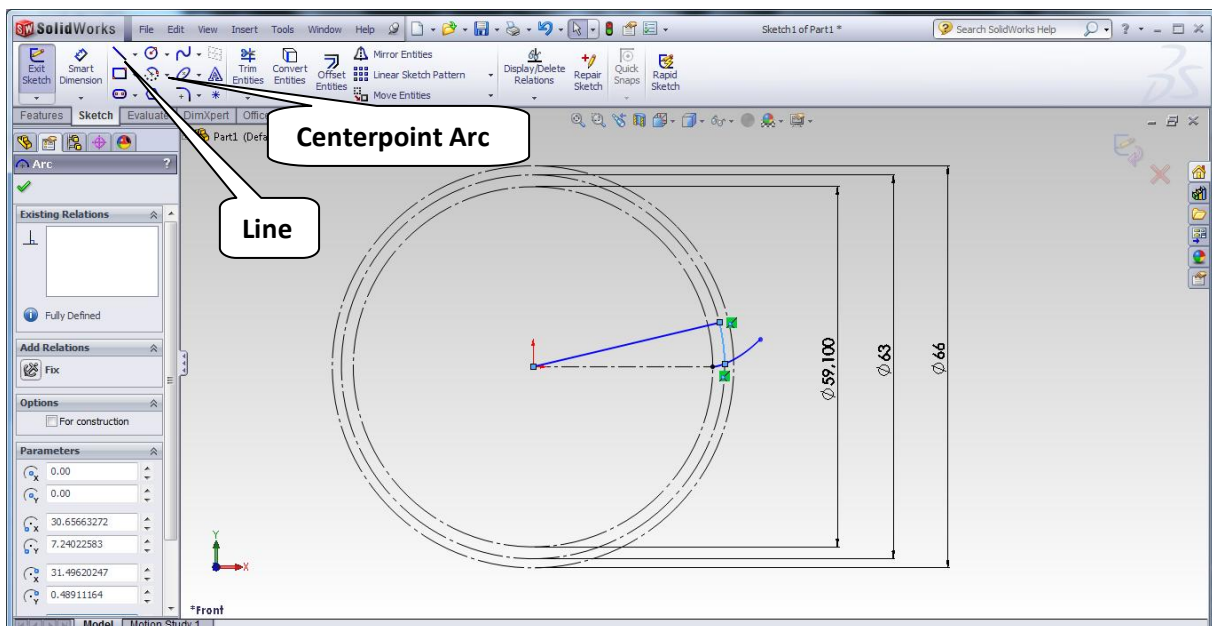
## Βήμα 3°

Επιλέγουμε **centerline** και ενώνουμε με μια γραμμή από το κέντρο των κύκλων έως την περιφέρεια ποδός. Στην συνέχεια επιλέγουμε την εντολή **Equation driven curve** και στο παράθυρο που θα μας ανοίξει επιλέγουμε **parametric** και ύστερα στα κουτάκια  $x(t)$  γράφουμε  $29.55*(\cos(t)+t*\sin(t))$  ενώ αντίστοιχα στο  $y(t)$  γράφουμε  $29.55*(\sin(t)-t*\cos(t))$ . Επίσης στα κουτάκια  $t_1$  βάζουμε τον αριθμό μηδέν και στο  $t_2$  γράφουμε  $3,14159/4$ . Με αυτόν τον τρόπο έχουμε σχεδιάσει την εξελιγμένη καμπύλη.



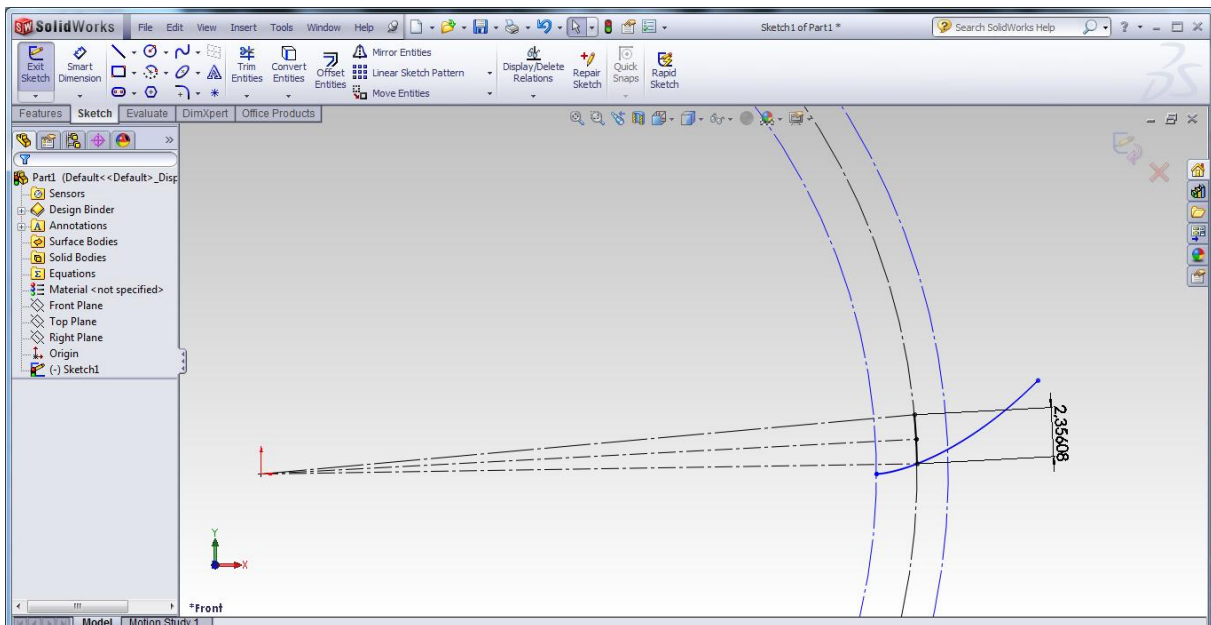
#### Βήμα 4<sup>ο</sup>

Επόμενο βήμα είναι να επιλέξουμε την εντολή **line** και να σχεδιάσουμε μια γραμμή επάνω από την προηγούμενη centerline από το κέντρο των κύκλων και με μήκος 31.5. Ύστερα επιλέγουμε την εντολή **centerpoint arc** και δημιουργούμε ένα τόξο με ακτίνα 31.5 ανάμεσα στην εξελιγμένη καμπύλη και την γραμμή.



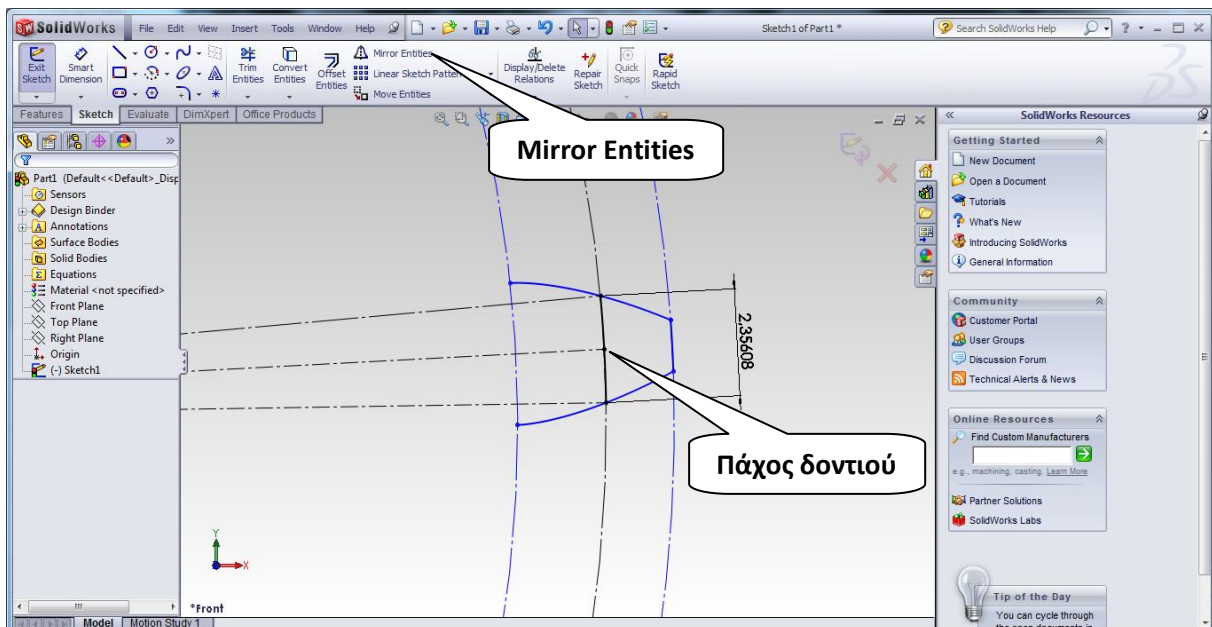
### Βήμα 5°

Έπειτα επιλέγουμε το σημείο που ενώνει το τόξο με την εξελεγμένη καμπύλη και πατάμε στο παράθυρο που θα ανοίξει αριστερά **fix** και αφού επιλέξουμε την εντολή **smart dimension** δίνουμε την τιμή του πάχους του δοντιού. Στην συνέχεια φτιάχνουμε τρεις καινούριες **centerline** με αρχή το κέντρο των κύκλων και τέλος τα δύο άκρα καθώς και το μέσο του τόξου.



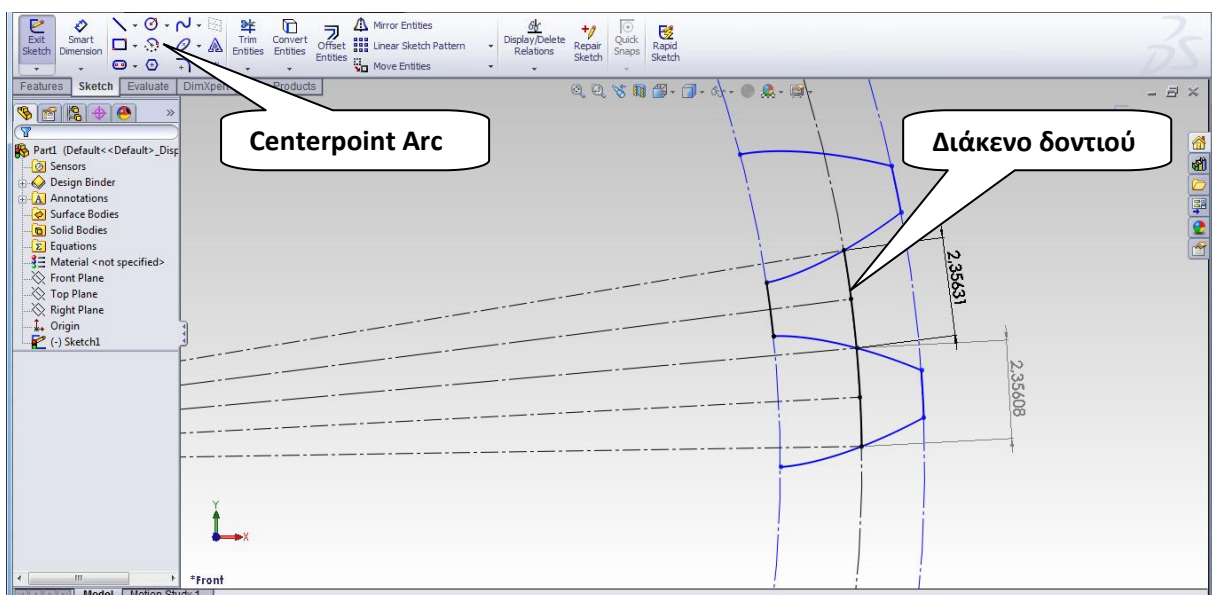
### Βήμα 6°

Στην συνέχεια με την εντολή **Mirror entities** επιλέγουμε την εξελεγμένη καμπύλη και σαν Mirror about επιλέγουμε την centerline η οποία βρίσκεται στο μέσο του τόξου. Αφού κάνουμε το Mirror επιλέγουμε την εντολή **Trim entities** και από το παράθυρο που θα ανοίξει το **Power trim**. Με το Power trim πάμε και «κόβουμε» όποια γραμμή δεν μας χρησιμεύει. Με αυτό τον τρόπο σχεδιάσαμε ολόκληρο το προφίλ του δοντιού.



### Βήμα 7<sup>ο</sup>

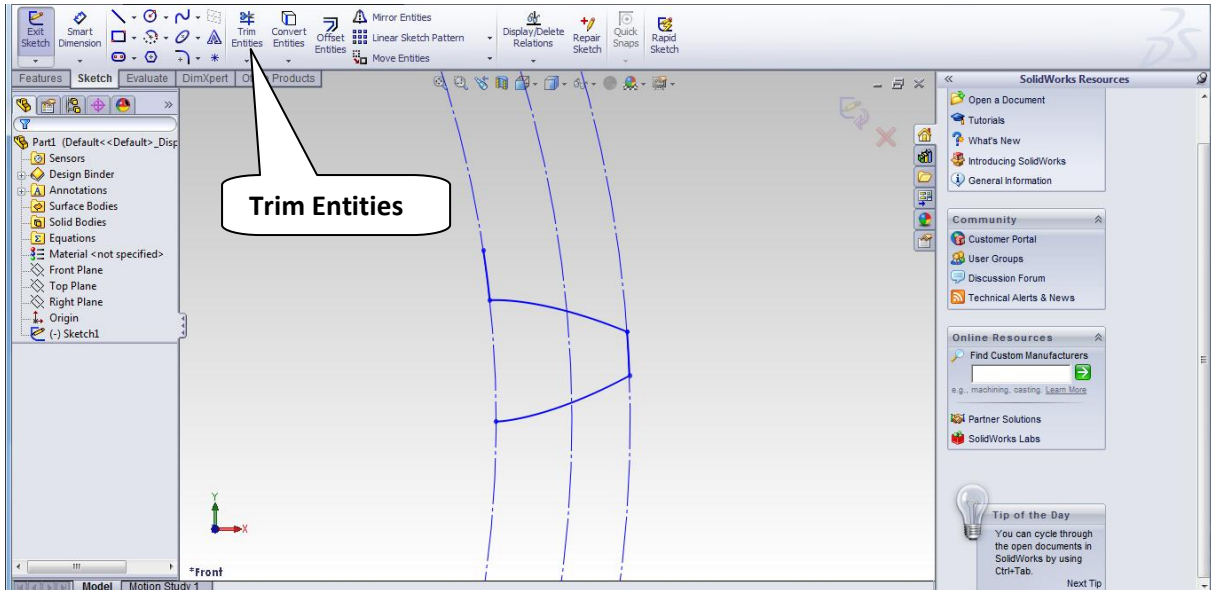
Τώρα θα πρέπει να σχεδιάσουμε το διάκενο που θα υπάρχει ανάμεσα στους οδόντες, οπότε επαναλαμβάνουμε το 4<sup>ο</sup> βήμα και σχεδιάζουμε ένα νέο τόξο στην περιφέρεια του αρχικού κύκλου με μήκος  $l_0=2.35631$  στο επάνω μέρος του προφίλ του δοντιού. Στην συνέχεια σχεδιάζουμε άλλες δύο **Centerline** και κάνουμε ξανά **Mirror entities** το προφίλ του δοντιού προς τα άνω, και ενώνουμε με την εντολή **Centerpoint arc** το κενό που υπάρχει στην περιφέρεια κύκλου ποδός.





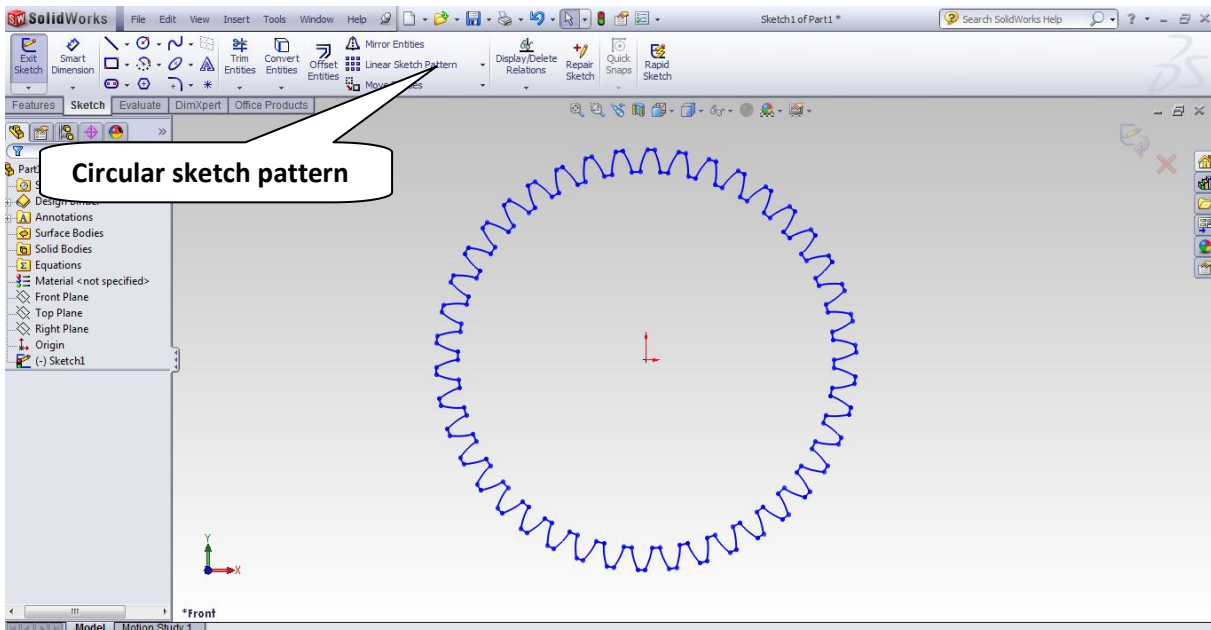
## Βήμα 8<sup>ο</sup>

Τώρα επιλέγουμε **Trim Entities** και με την εντολή **Power trim** σβήνουμε όσες γραμμές δεν χρειαζόμαστε και αφήνουμε μόνο το ένα προφίλ δοντιού και το τόξο που σχεδιάσαμε στην περιφέρεια του κύκλου ποδός.



## Βήμα 9<sup>ο</sup>

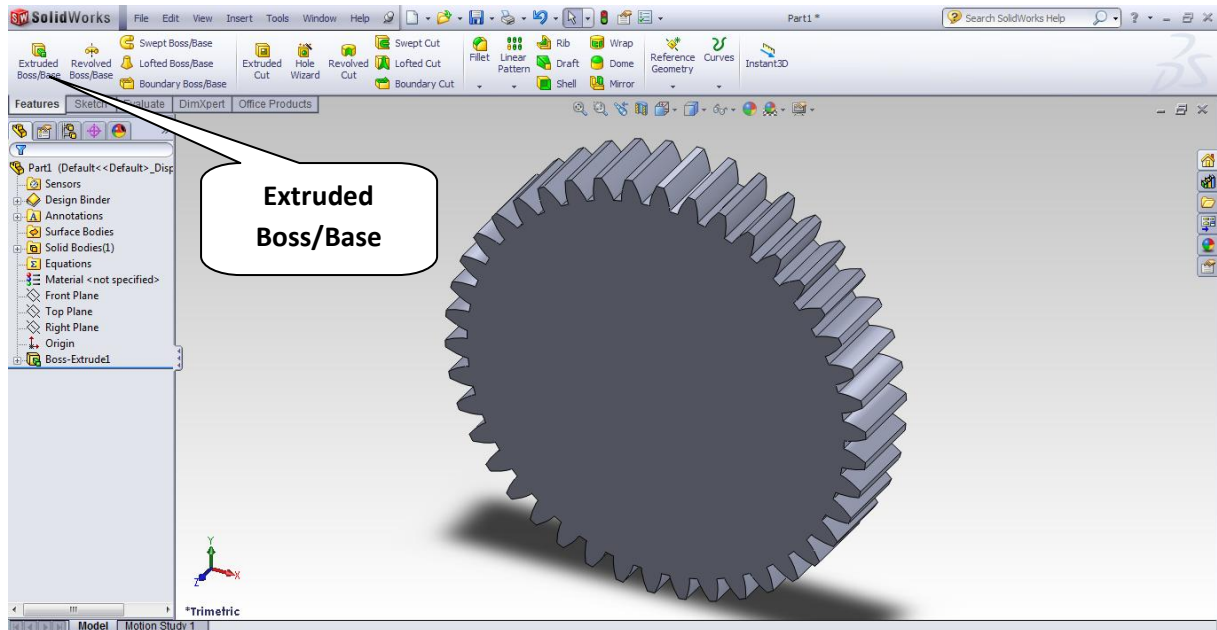
Με την εντολή **Circular sketch pattern** επιλέγουμε τις γραμμές που έχουμε αφήσει μόνο. Στο κουτί **Number of instances** βάζουμε τον αριθμό των δοντιών, δηλαδή 42, ενώ στο **Spacing** βάζουμε 360<sup>ο</sup> και στην συνέχεια πατάμε OK.





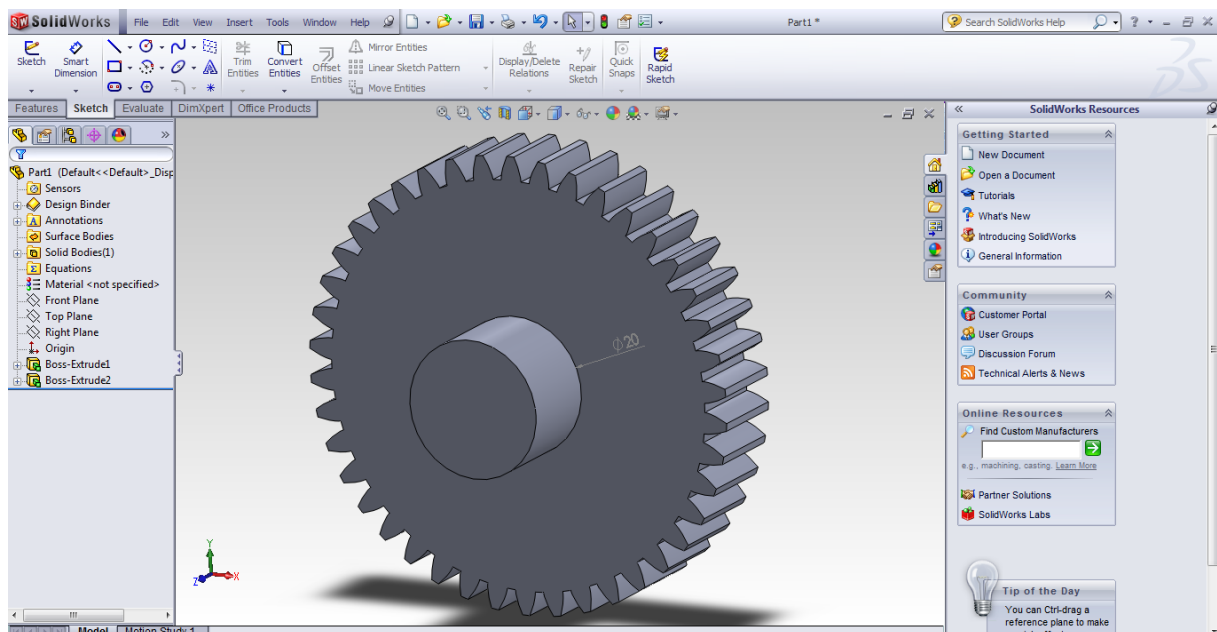
## Βήμα 10°

Στην συνέχεια από την καρτέλα Features θα δώσουμε στον οδοντωτό τροχό τρισδιάστατη μορφή. Επιλέγοντας λοιπόν την εντολή **Extruded Boss/Base** δίνουμε το επιθυμητό πάχος στον τροχό, 12mm.



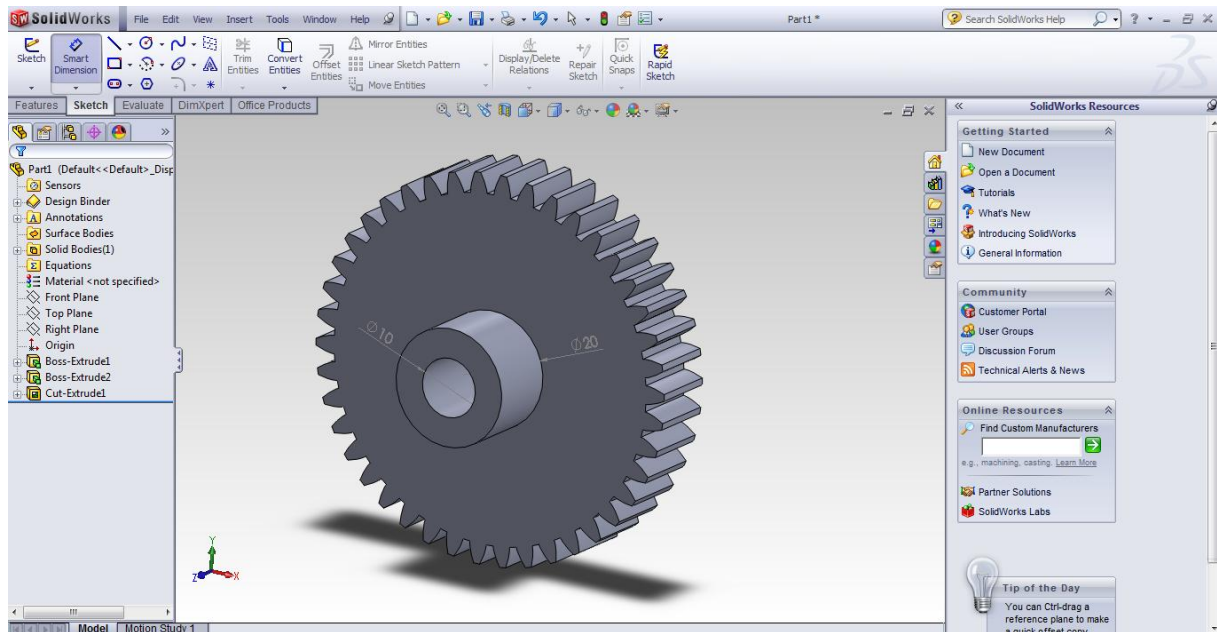
## Βήμα 11°

Τώρα θα σχεδιάσουμε την πατούρα που έχει ο τροχός. Επιλέγουμε από την καρτέλα σχεδίασης (sketch) **circle** και επιλέγουμε επίπεδο σχεδίασης την πρόσοψη του τροχού και σχεδιάζουμε ένα κύκλο με διάμετρο 20mm. Έπειτα από την καρτέλα Features δίνουμε πάχος στον κύκλο 13mm.



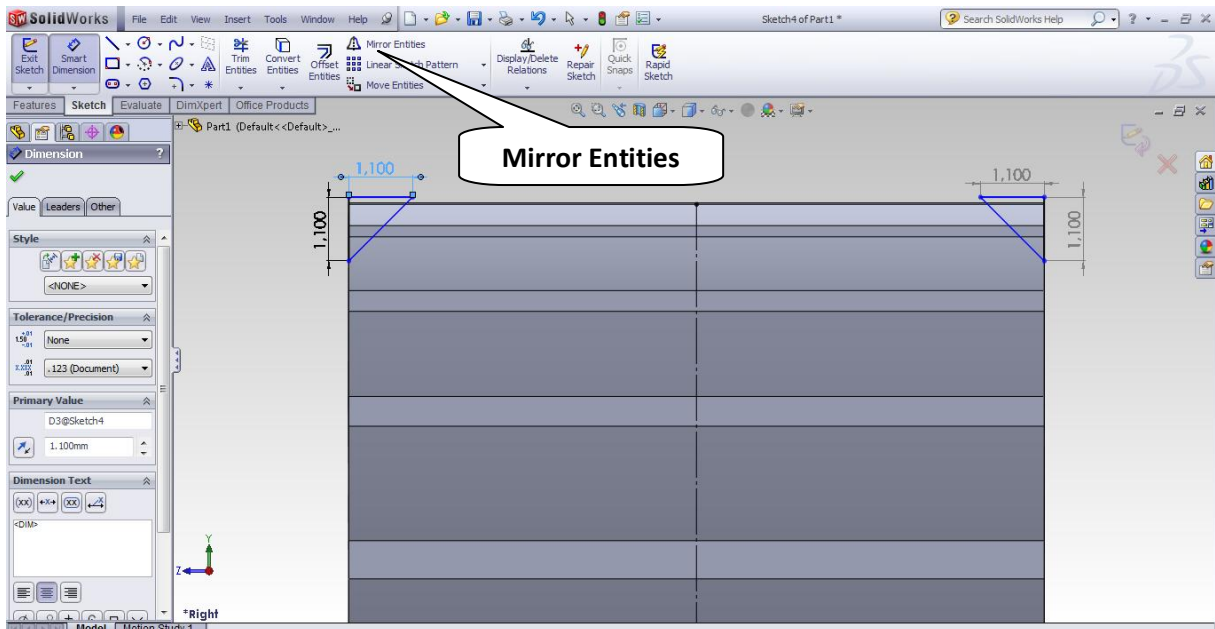
## Βήμα 12°

Επόμενο βήμα είναι να σχεδιάσουμε την οπή την οποία θα φέρει ο τροχός ώστε να συνδέεται με τον κατάλληλο άξονα. Από την καρτέλα σχεδίασης λοιπόν επιλέγουμε **circle** και σαν επίπεδο σχεδίασης επιλέγουμε το πρόσωπο της πατούρας. Σχεδιάζουμε λοιπόν έναν κύκλο με διάμετρο 10mm και έπειτα από την καρτέλα Features επιλέγουμε την εντολή **Extruded cut** και δημιουργούμε μια οπή με βάθος 25mm.



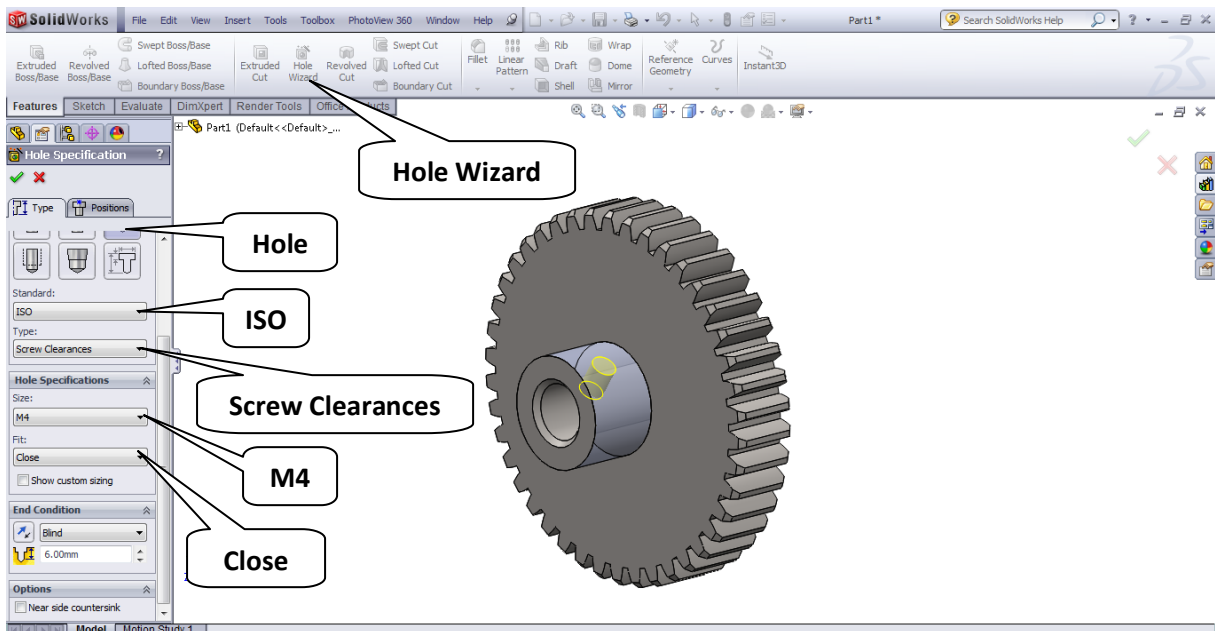
## Βήμα 13°

Επίσης θα κάνουμε το σπάσιμο το οποίο έχει στους οδόντες και το σπάσιμο που έχει στην οπή που μπαίνει ο άξονας. Από την καρτέλα Features λοιπόν επιλέγουμε **Chamfer**. Στο παράθυρο που θα ανοίξει αριστερά κάνουμε κλικ στην επιλογή **Angle distance** και δίνουμε σαν απόσταση 1mm και γωνία 45°. Στην συνέχεια επιλέγουμε τους κύκλους της πατούρας διαμέτρου 10mm και πατάμε OK. Ενώ για το σπάσιμο των οδόντων αντίστοιχα επιλέγουμε από το Feature Manager το επίπεδο σχεδίασης **Right plane** και σχεδιάζουμε ένα ορθογώνιο τρίγωνο με κάθετες πλευρές διαστάσεων 1,1mm. Ύστερα σχεδιάζουμε μια γραμμή στο μέσο των οδόντων και με την εντολή **Mirror entities** κάνουμε και από την άλλη πλευρά των οδόντων το τρίγωνο. Στην συνέχεια με την εντολή **Revolved cut** από την καρτέλα Features επιλέγουμε άξονα περιστροφής στο κέντρο του τροχού και περιστρέφουμε 360° ώστε να αφαιρέσει το υλικό που επιθυμούμε.



### Βήμα 14<sup>ο</sup>

Ακόμη θα δημιουργήσουμε μια τρύπα στην πατούρα του τροχού ώστε να ασφαλίσει με μια βίδα ο τροχός με τον άξονα. Επιλέγουμε λοιπόν από την καρτέλα σχεδίασης (sketch) την εντολή **Point** και βάζουμε ένα σημείο στο μέσο της πατούρας, ύστερα από την καρτέλα Features επιλέγουμε την εντολή **Hole wizard** και από το παράθυρο που θα ανοίξει αριστερά στην θέση Hole Type επιλέγουμε **Hole, ISO** και **Screw Clearances**, στην θέση Hole Specification επιλέγουμε **M4** και **Close** ενώ στην θέση End condition επιλέγουμε **6mm** και στην συνέχεια πατάμε **OK**.



### Βήμα 15°

Το τελευταίο που θα κάνουμε είναι να ορίσουμε στον τροχό μας το υλικό, από την περιοχή Feature Manager λοιπόν κάνουμε δεξί κλικ στην εντολή **Material** και επιλέγουμε **Edit material**. Από το παράθυρο που θα ανοίξει επιλέγουμε το υλικό **Stainless Steel (ferritic)**. Ο μετωπικός οδοντωτός τροχός έχει κατασκευαστεί πλήρως και απεικονίζεται παρακάτω (Σχήμα 7-7).

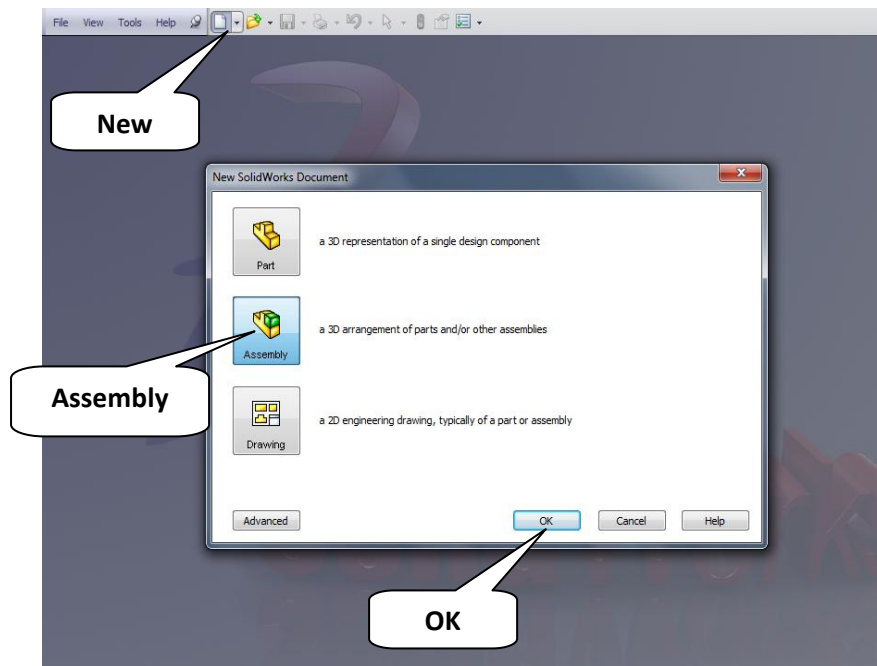


**Σχήμα 7-7** : Τελική μορφή οδοντωτού τροχού

## 7.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΖΕΥΓΟΥΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΟΥ SOLIDWORKS

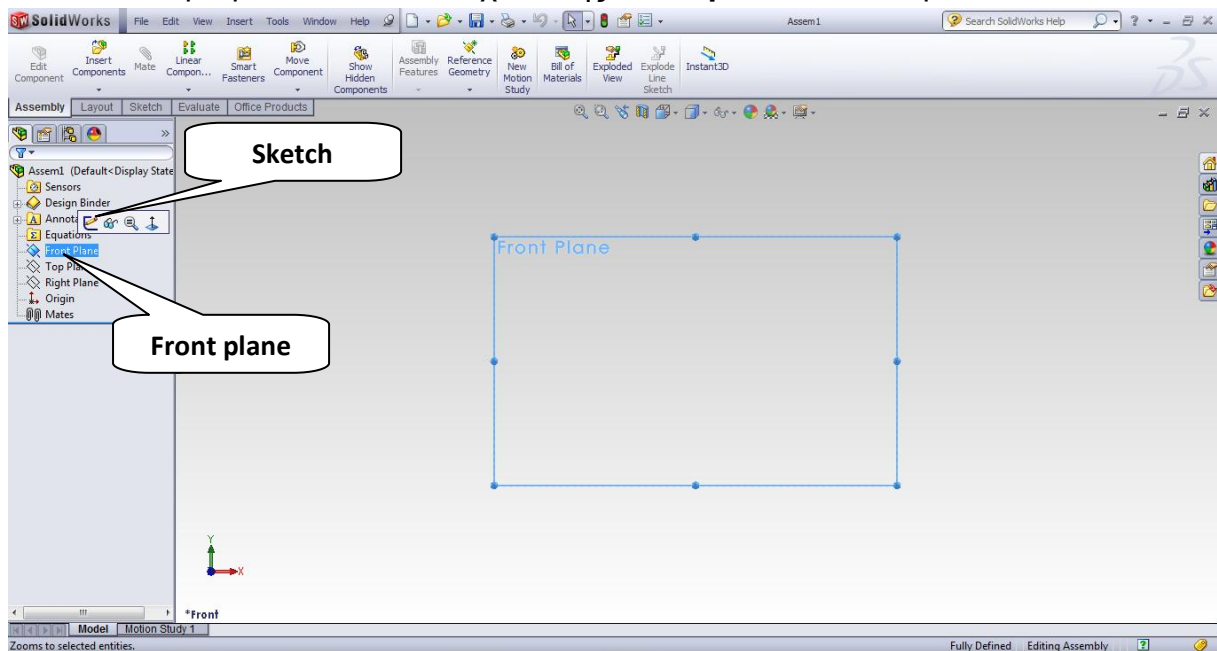
### Βήμα 1<sup>ο</sup>

Αφού ανοίξουμε το solidworks επιλέγουμε **New, Assembly** και πατάμε **OK**.



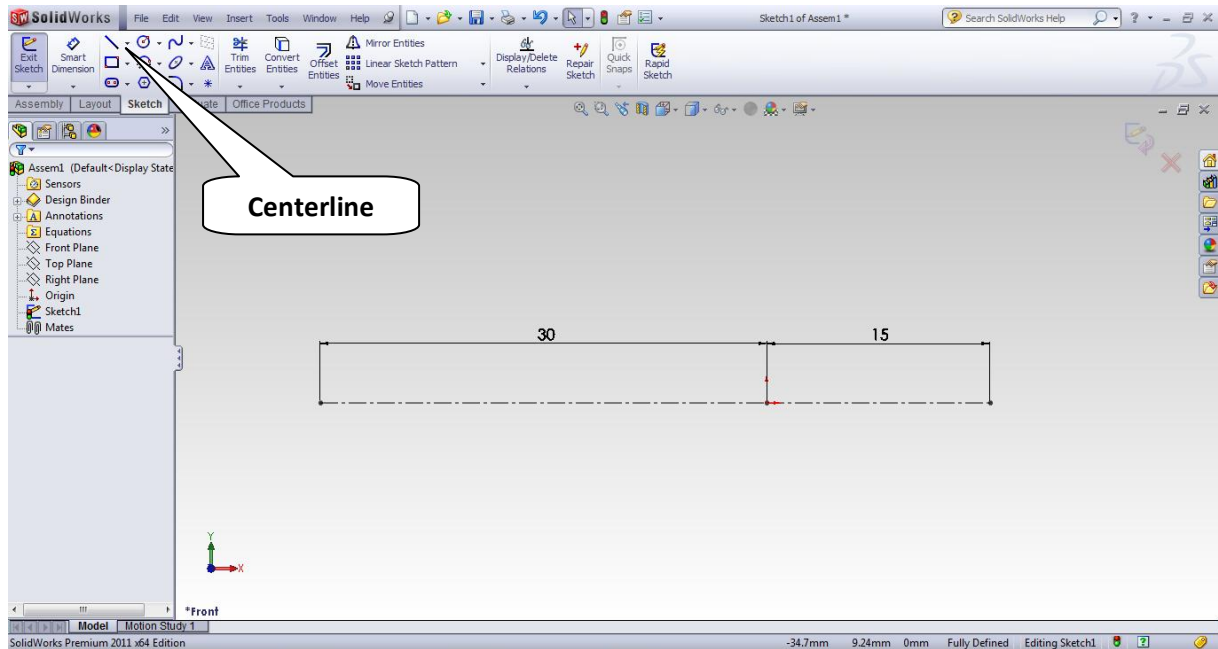
### Βήμα 2<sup>ο</sup>

Επιλέγουμε σαν επίπεδο σχεδίασης **Front plane** και πατάμε **sketch**.



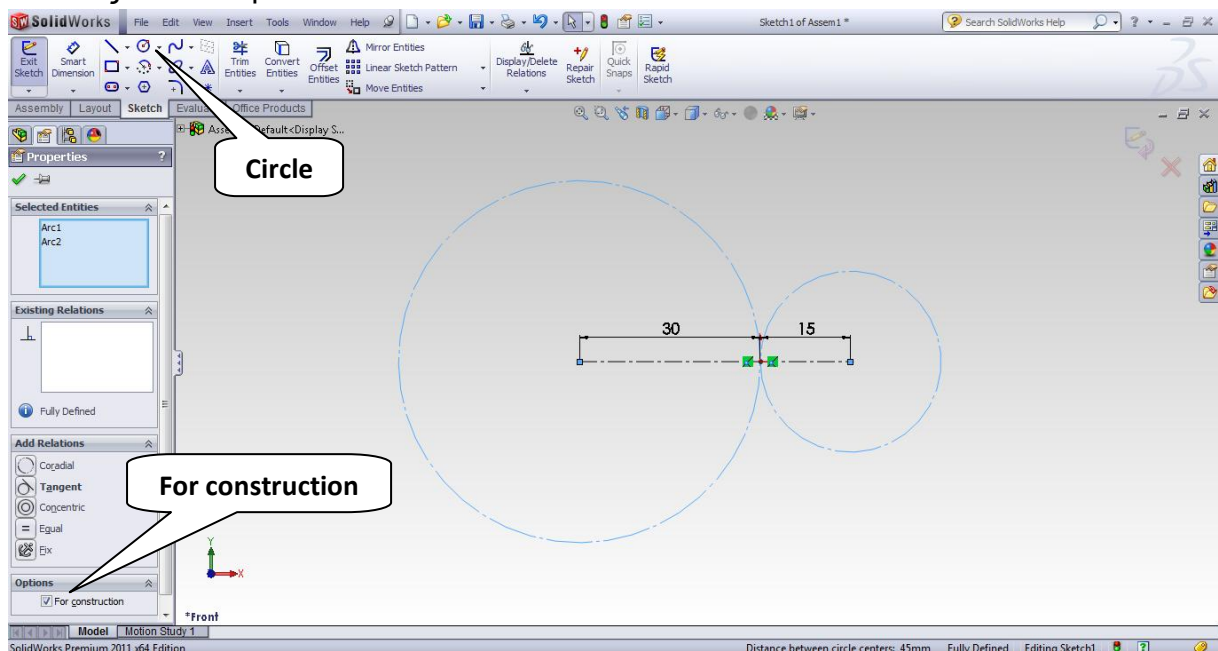
### Βήμα 3<sup>ο</sup>

Επιλέγουμε την καρτέλα **Sketch** και στην συνέχεια **Centerline** και σχεδιάζουμε μια αξονική γραμμή με μήκος ίσο με την αρχική ακτίνα του οδοντωτού τροχού που θέλουμε να φτιάξουμε. Επιλέγουμε να φτιάξουμε ένα οδοντωτό τροχό με 40 δόντια και ένα οδοντωτό τροχό με 20 δόντια. Επομένως φτιάχνουμε 2 αξονικές γραμμές με μήκος 30mm και 15mm αντίστοιχα.



### Βήμα 4<sup>ο</sup>

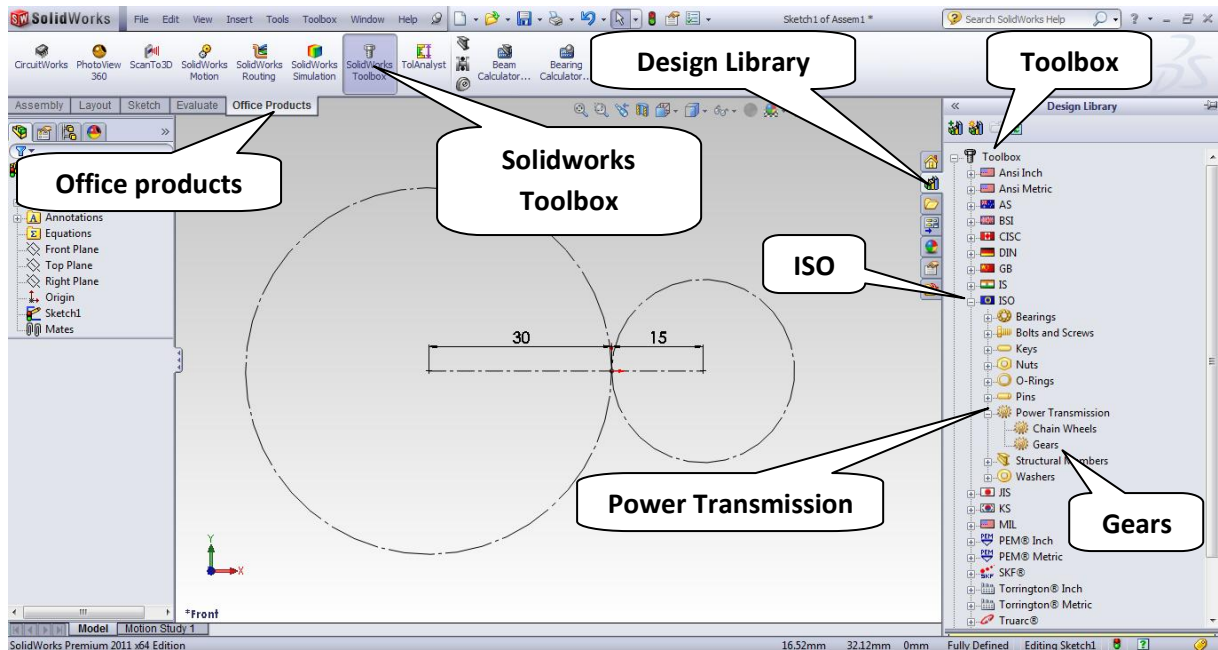
Επιλέγουμε από την καρτέλα **Sketch** την εντολή **Circle**, σχεδιάζουμε δύο κύκλους με αντίστοιχες ακτίνες 15 και 30mm και στην συνέχεια επιλέγουμε τους δύο κύκλους και πατάμε **For construction**.





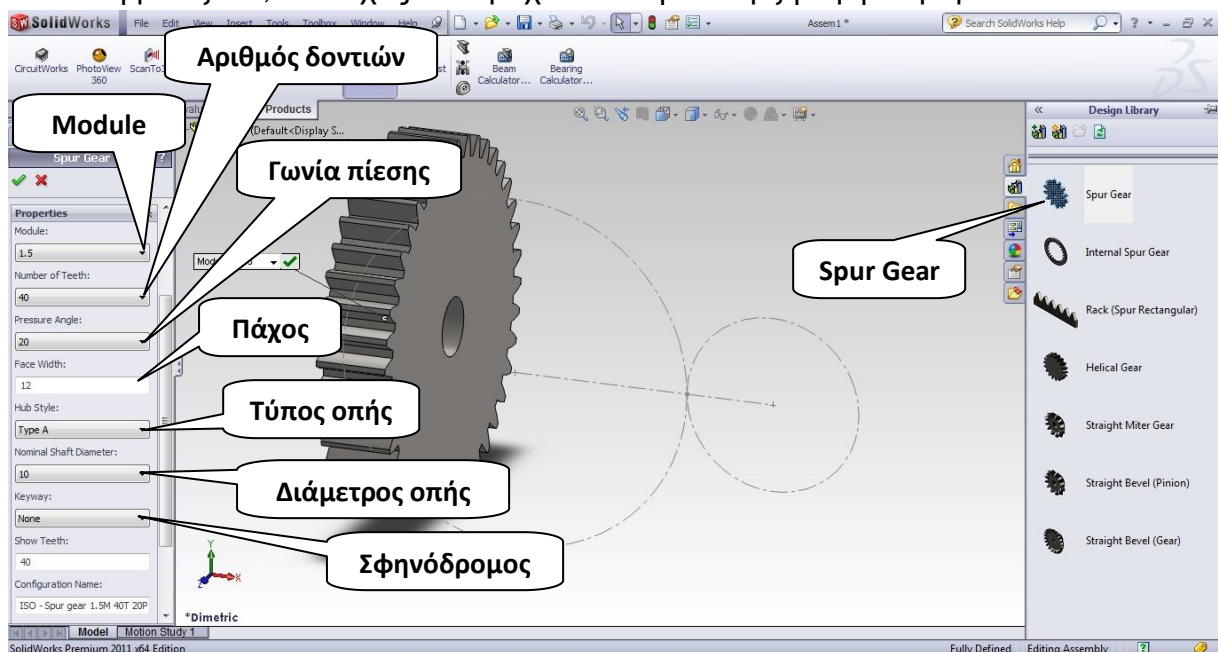
## Βήμα 5°

Επιλέγουμε την εντολή **Solidworks Toolbox** από την καρτέλα **Office Products** και στην συνέχεια από την βιβλιοθήκη σχεδίασης (**Design Library**) επιλέγουμε **Toolbox** → **ISO** → **Power Transmission** → **Gears**.



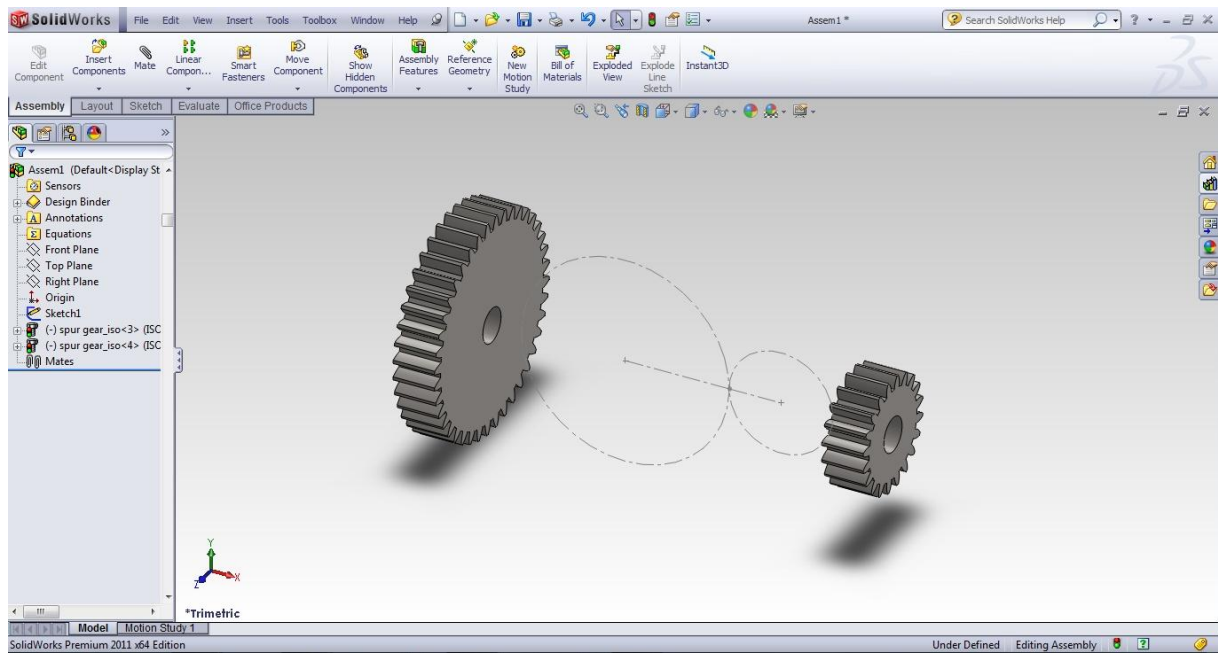
## Βήμα 6°

Αφού πραγματοποιήσουμε το 5° βήμα θα μας ανοίξει ένα παράθυρο στο οποίο μας έχει διαφόρων ειδών οδοντωτούς τροχούς, εμείς επιλέγουμε **Spur gear** και επιλέγοντάς το με το ποντίκι το οδηγούμε σε ένα οποιοδήποτε σημείο της περιοχής σχεδίασης. Στην συνέχεια μπορούμε να δώσουμε στον τροχό μας διάφορα χαρακτηριστικά όπως: το module, τον αριθμό δοντιών, την γωνία πίεσης, την οπή για σύνδεση με άξονα, το πάχος του τροχού και την ύπαρξη σφηνόδρομου.



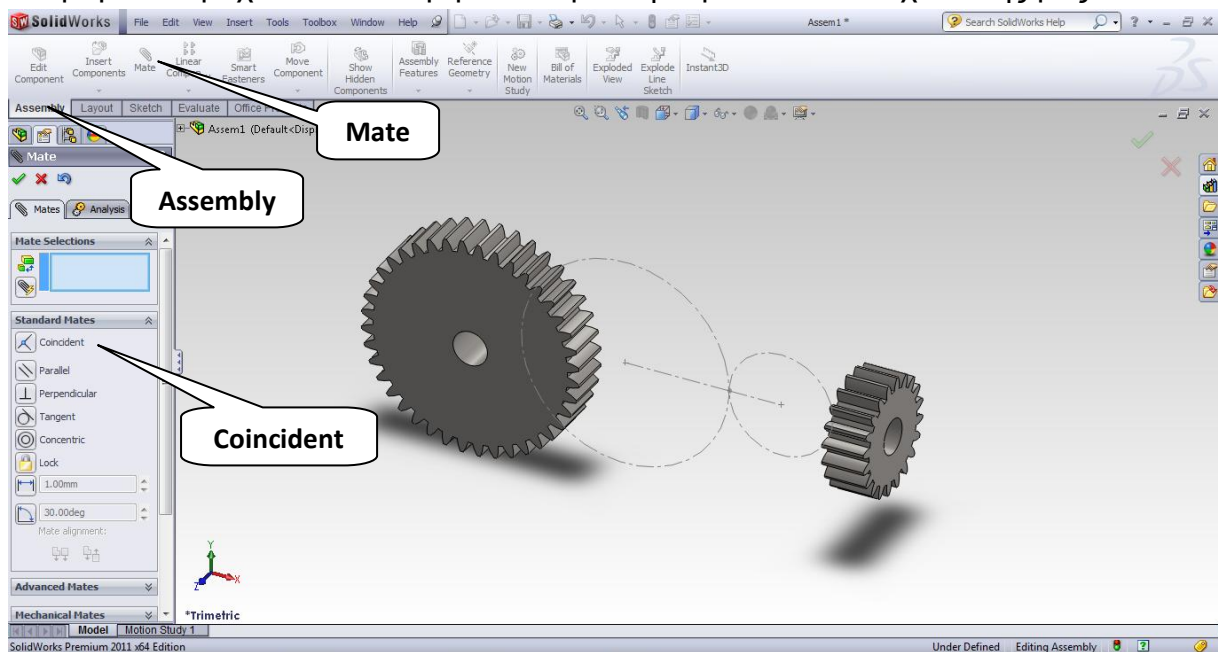
## Βήμα 7<sup>ο</sup>

Επαναλαμβάνουμε το 6<sup>ο</sup> βήμα και εισάγουμε τον δεύτερο τροχό με τα 20 δόντια.



## Βήμα 8<sup>ο</sup>

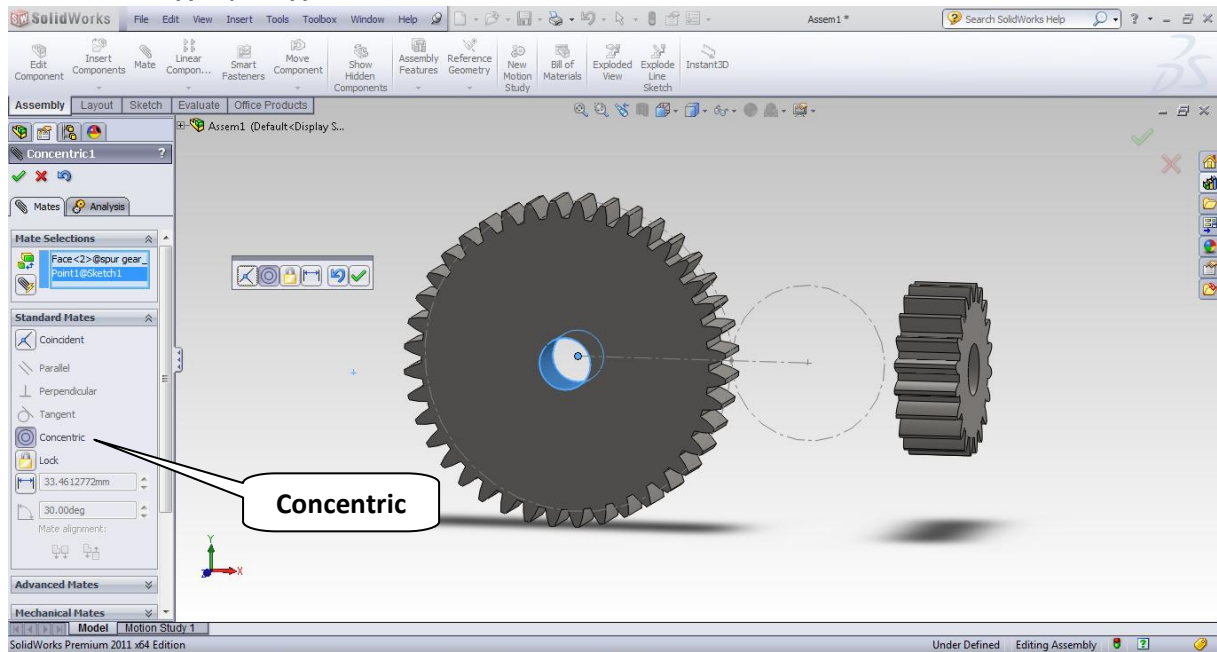
Τώρα θα πρέπει να συνδέσουμε τους δύο τροχούς έτσι ώστε να συνεργάζονται μεταξύ τους. Επιλέγουμε λοιπόν το **Front plane**, στην συνέχεια το **Mate** από την καρτέλα **Assembly**, ύστερα το **Coincident** και έπειτα την μία πλευρά του μεγάλου τροχού ώστε να γυρίσει παράλληλα με το πλάνο σχεδίασης μας.





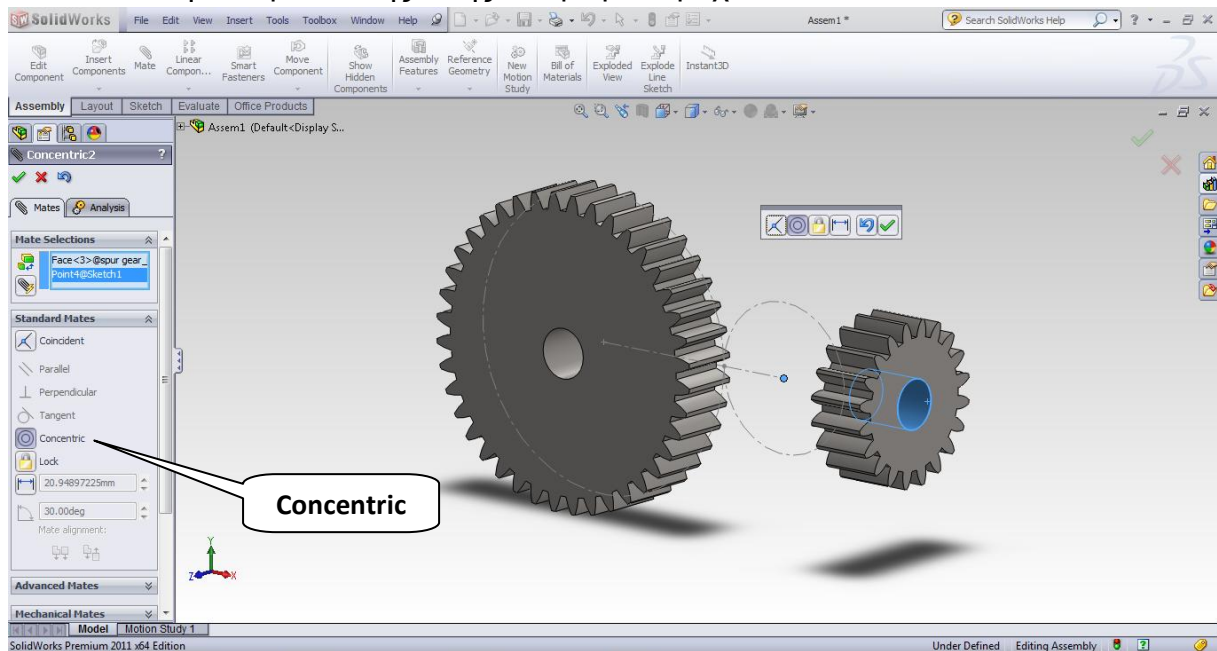
## Βήμα 9°

Επιλέγουμε το κέντρο του μεγάλου κύκλου και την επιφάνεια της οπής του μεγάλου τροχού και πατάμε **Concentric** έτσι ώστε να κεντραριστεί ο τροχός με τον κύκλο που έχουμε σχεδιάσει.



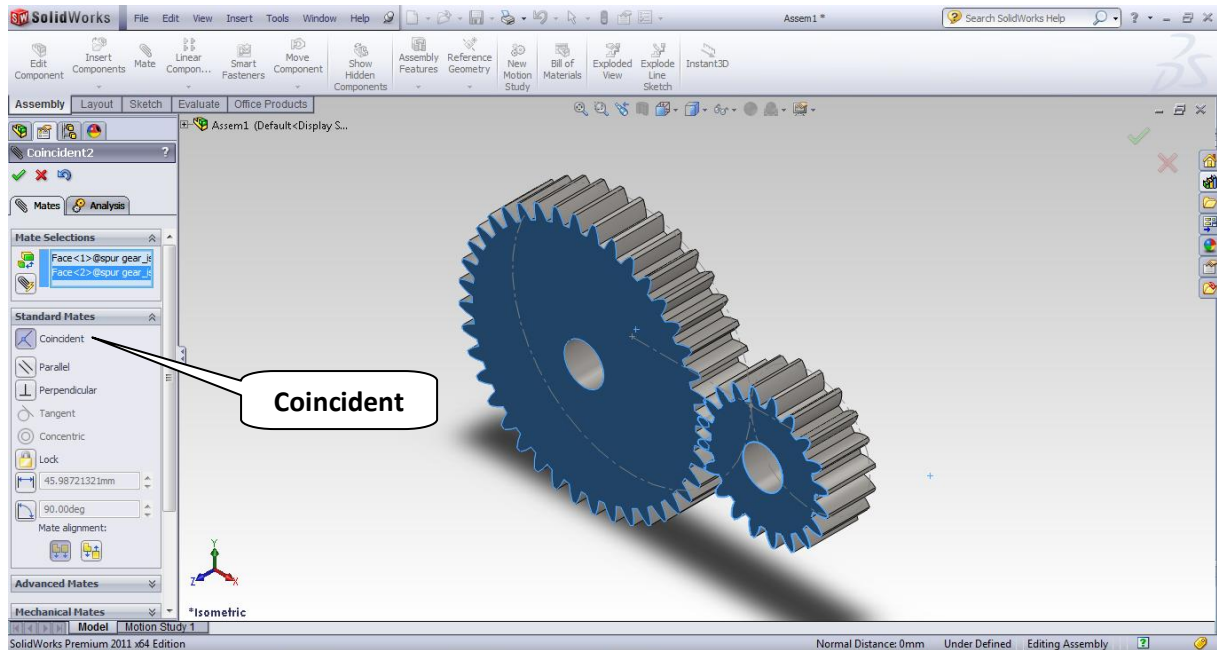
## Βήμα 10°

Επαναλαμβάνουμε το 9° βήμα επιλέγοντας αντίστοιχα το κέντρο του μικρού κύκλου και την επιφάνεια της οπής του μικρού τροχού.



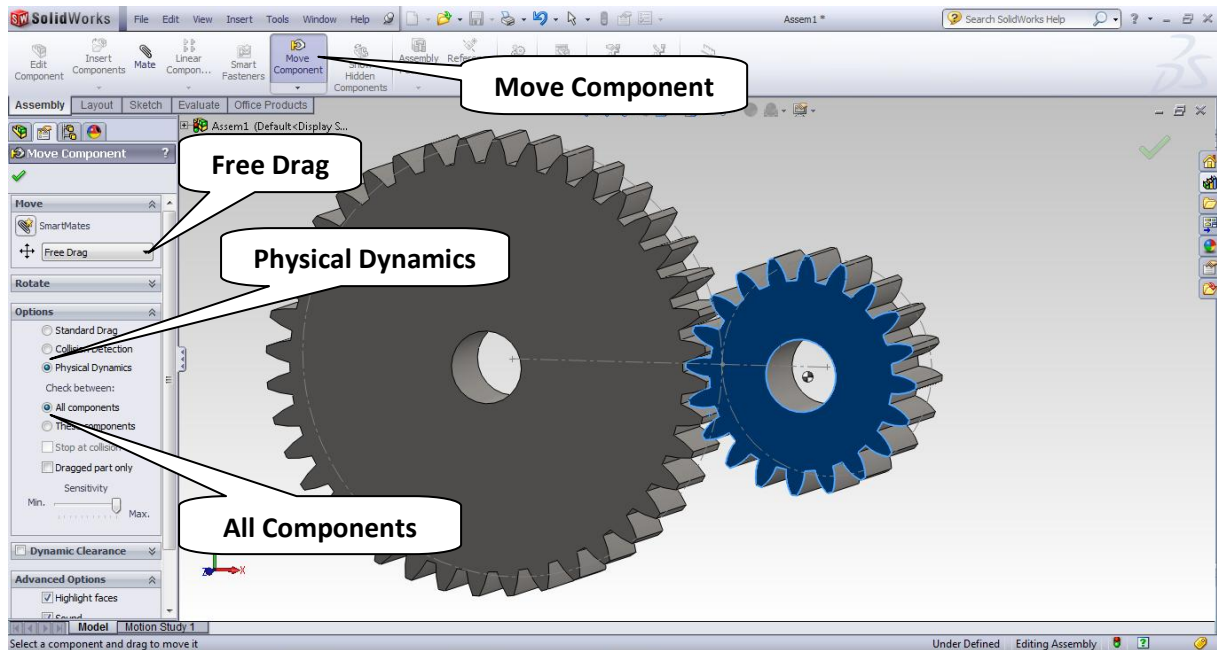
## Βήμα 11°

Επιλέγουμε μία επιφάνεια προσώπου του μικρού τροχού και μία επιφάνεια προσώπου του μεγάλου τροχού, πατάμε **Coincident** και στην συνέχεια **OK**.



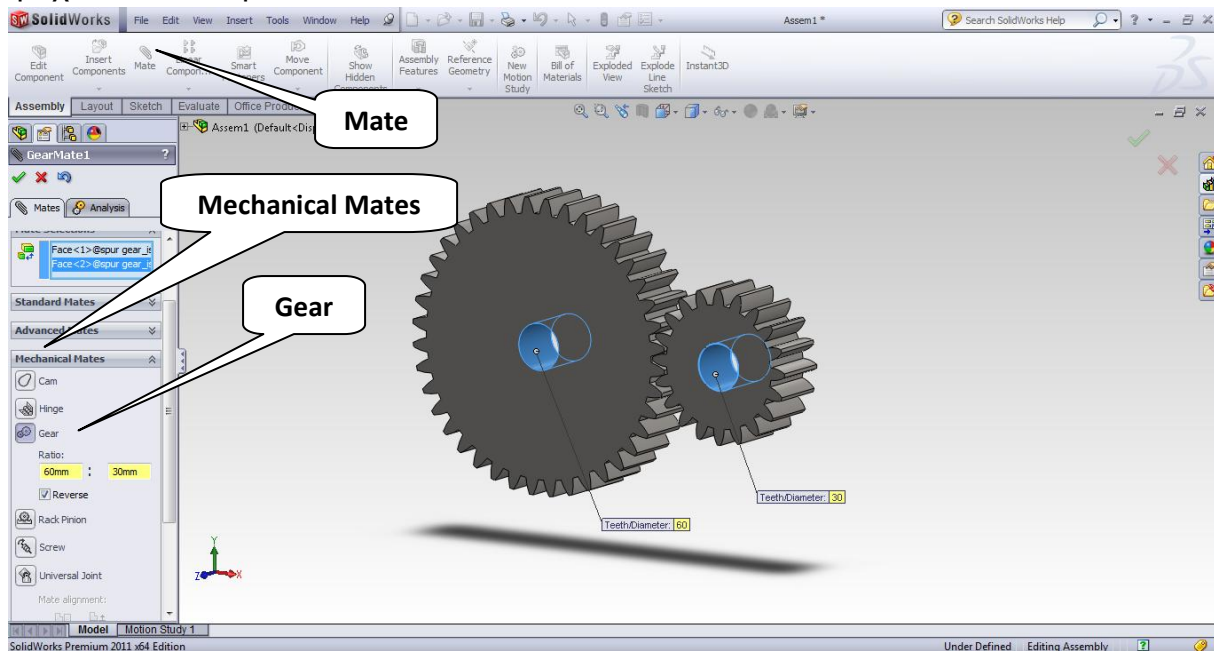
## Βήμα 12°

Γυρίζουμε λίγο το μικρό τροχό έτσι ώστε να μην ακουμπά δόντι με δόντι και από την καρτέλα **Assembly** επιλέγουμε **Move Component**. Από το παράθυρο που θα μας ανοίξει επιλέγουμε **Free Drag** → **Physical Dynamics** → **All Components**



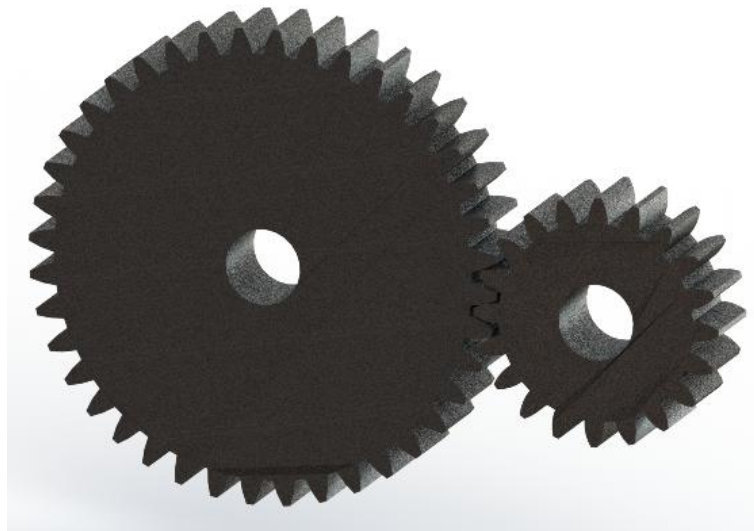
### Βήμα 13<sup>ο</sup>

Επιλέγουμε **Mate** από την καρτέλα **Assembly** και στην συνέχεια επιλέγουμε **Mechanical Mates** → **Gear** και κάνουμε κλικ στην επιφάνεια της σπής κάθε τροχού. Στα κουτιά τα οποία θα εμφανιστούν βάζουμε είτε τα δόντια του κάθε τροχού, είτε τις αρχικές διαμέτρους τους. Εμείς επιλέγουμε και βάζουμε τις αρχικές διαμέτρους των τροχών και πατάμε OK.



### Βήμα 14<sup>ο</sup>

Το τελευταίο που θα κάνουμε είναι να ορίσουμε στους τροχούς μας το υλικό, από την περιοχή **Feature Manager** λοιπόν κάνουμε δεξί κλικ στην εντολή **Material** και επιλέγουμε **Edit material**. Από το παράθυρο που θα ανοίξει επιλέγουμε το υλικό **Stainless Steel (ferritic)**. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν κατασκευαστεί πλήρως και απεικονίζονται παρακάτω (Σχήμα 7-8).

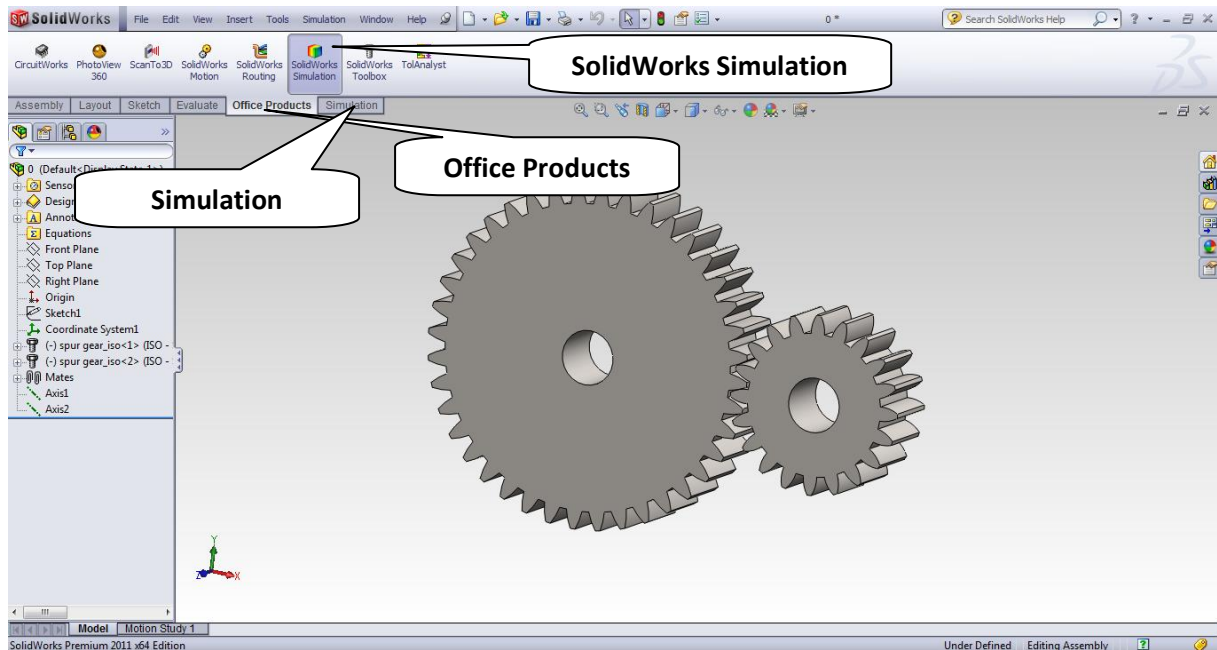


Σχήμα 7-8 : Τελική μορφή οδοντωτών τροχών

## 7.5 ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ [19]

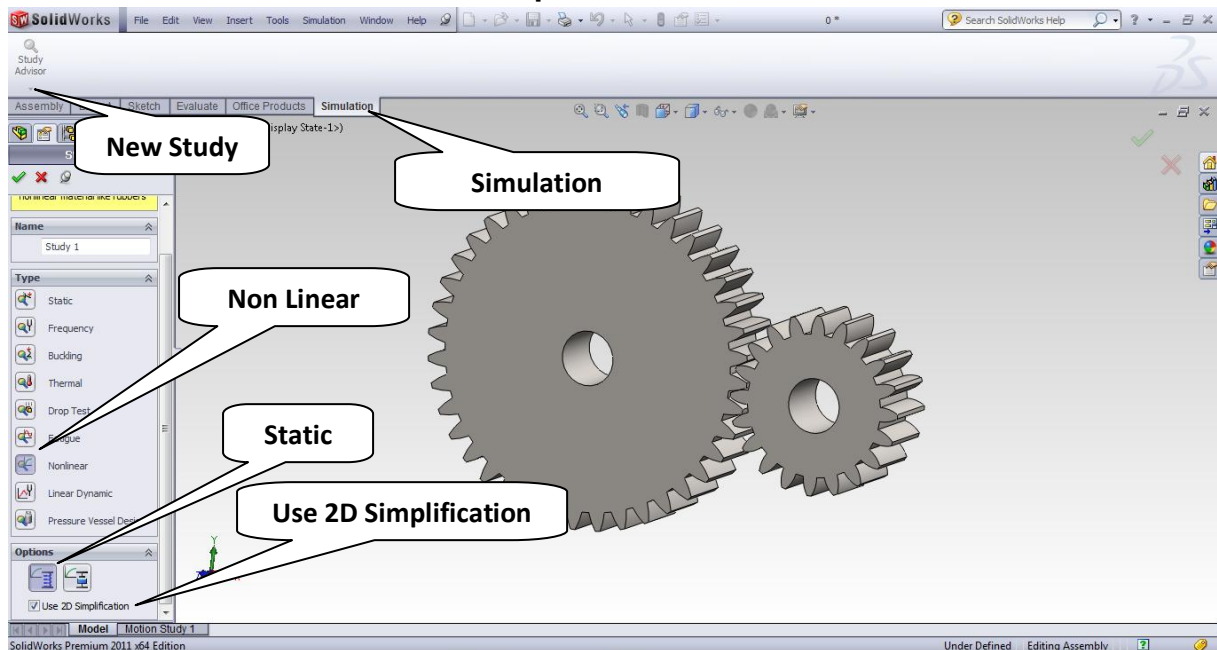
### Βήμα 1<sup>ο</sup>

Από την καρτέλα **Office Products** επιλέγουμε **SolidWorks Simulation** και μας ανοίγει μια νέα καρτέλα με όνομα **Simulation**.



### Βήμα 2<sup>ο</sup>

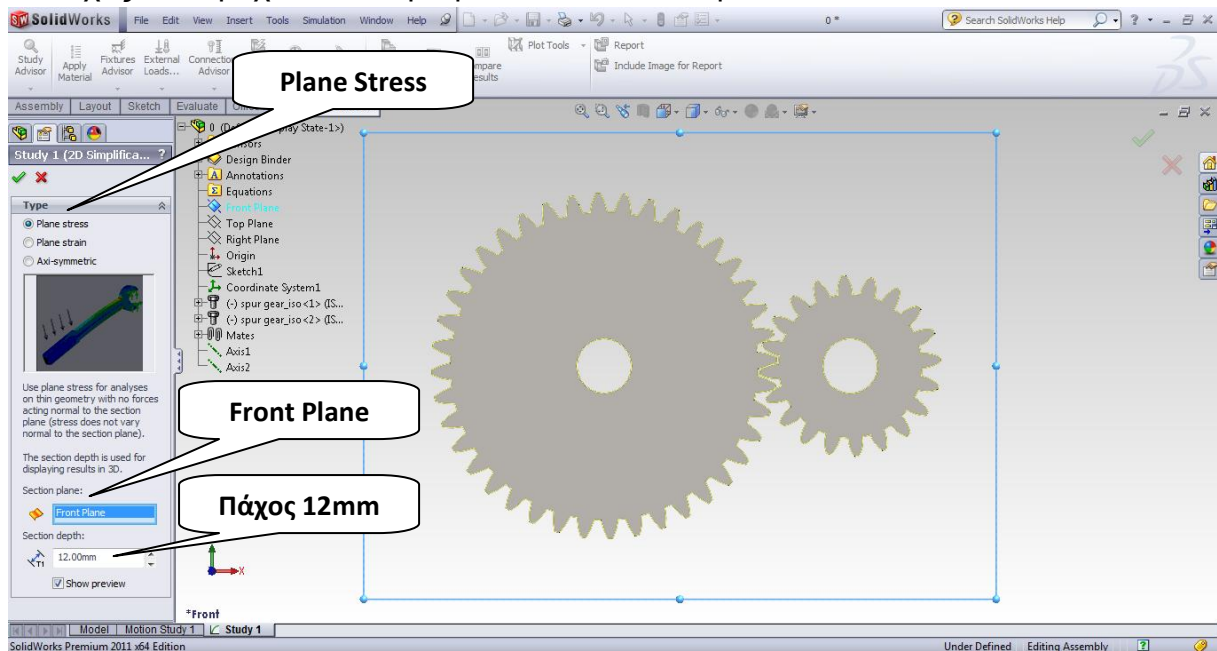
Από την καρτέλα **Simulation** επιλέγουμε **Study Advisor** → **New Study** → **Non Linear** → **Static** → **Use 2D Simplification**.





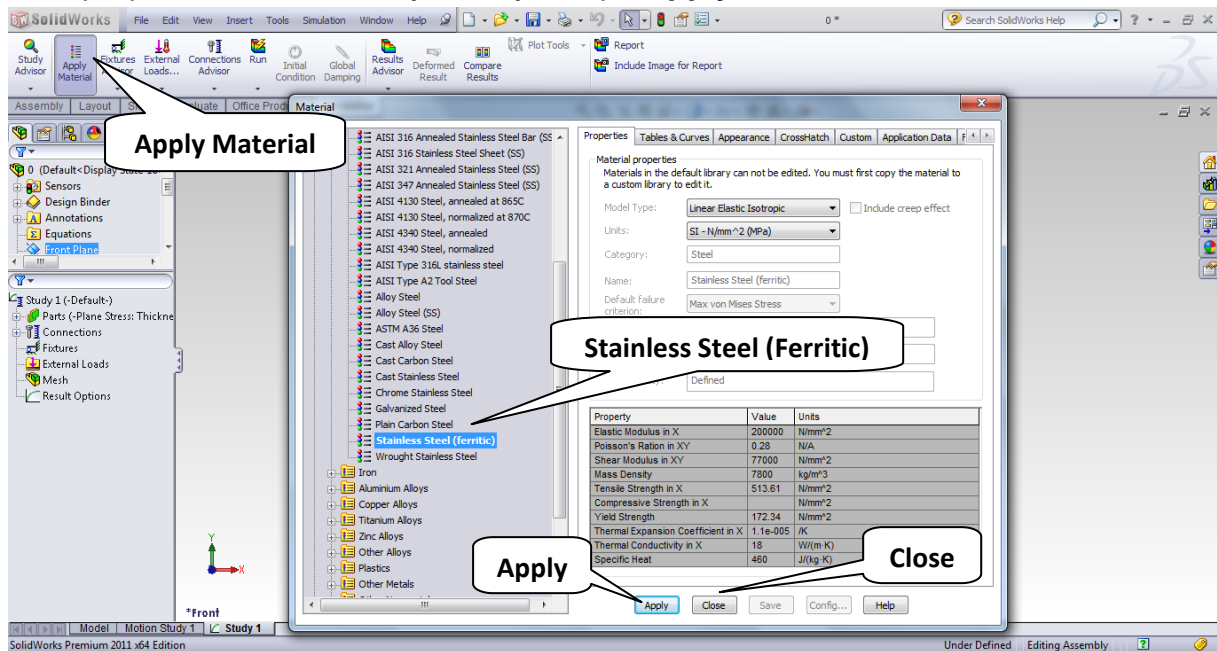
### Βήμα 3°

Επόμενο βήμα είναι να επιλέξουμε **Plane Stress** και το πλάνο στο οποίο έχουμε σχεδιάσει τους τροχούς, δηλαδή **Front plane** όπως επίσης και να ορίσουμε το πάχος των τροχών, επιλέγουμε 12mm και πατάμε **OK**.



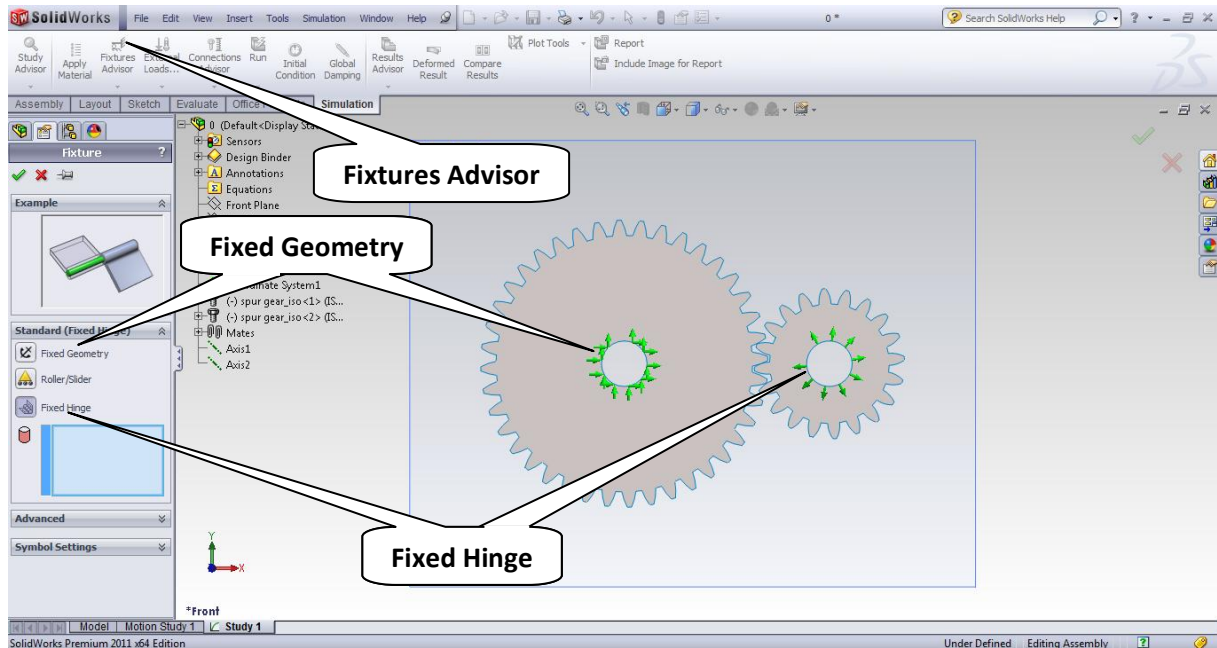
### Βήμα 4°

Επιλέγουμε το υλικό των οδοντωτών τροχών πατώντας **Apply Material** και επιλέγουμε **Stainless Steel (ferritic)** ύστερα **Apply** και **Close**.



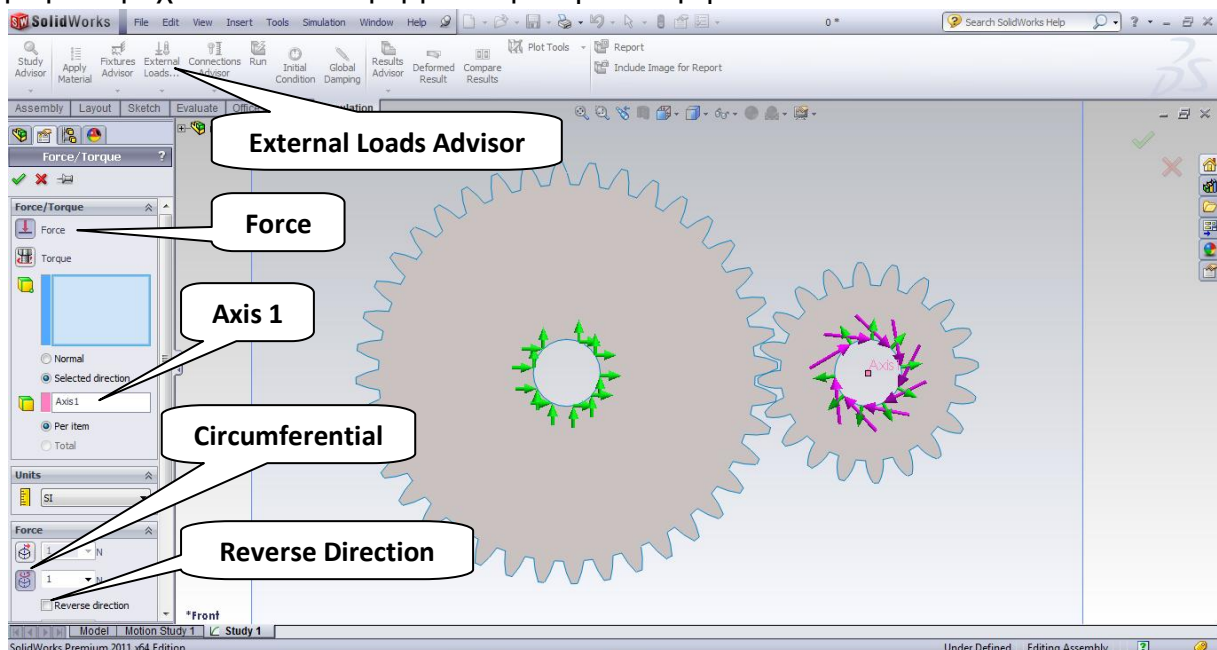
## Βήμα 5°

Με την εντολή **Fixtures Advisor** επιλέγουμε τις στηρίξεις που θα κάνουμε στους οδοντωτούς τροχούς. Στον μεγάλο τροχό λοιπόν επιλέγουμε **Fixed Geometry** (Πάκτωση) και στον μικρό τροχό επιλέγουμε **Fixed Hinge** (Αρθρωση), επιλέγοντας κάθε φορά τον εσωτερικό κύκλο του κάθε τροχού.



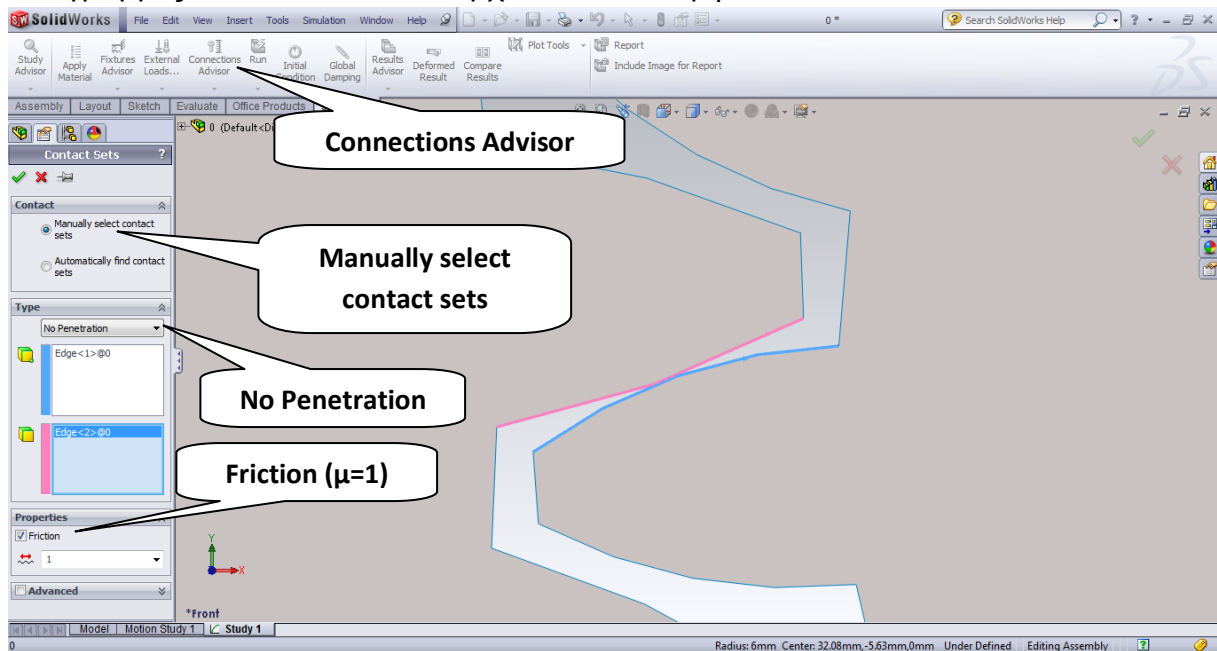
## Βήμα 6°

Από την εντολή **External Loads Advisor** επιλέγουμε **Force** → **Selected Direction** → **Axis 1** (είναι ο άξονας του μικρού τροχού) → **Circumferential** (Περιφερειακή δύναμη 1N) → **Reverse Direction** και επιλέγουμε τον κύκλο του μικρού τροχού όπου θα εφαρμόσουμε την δύναμη.



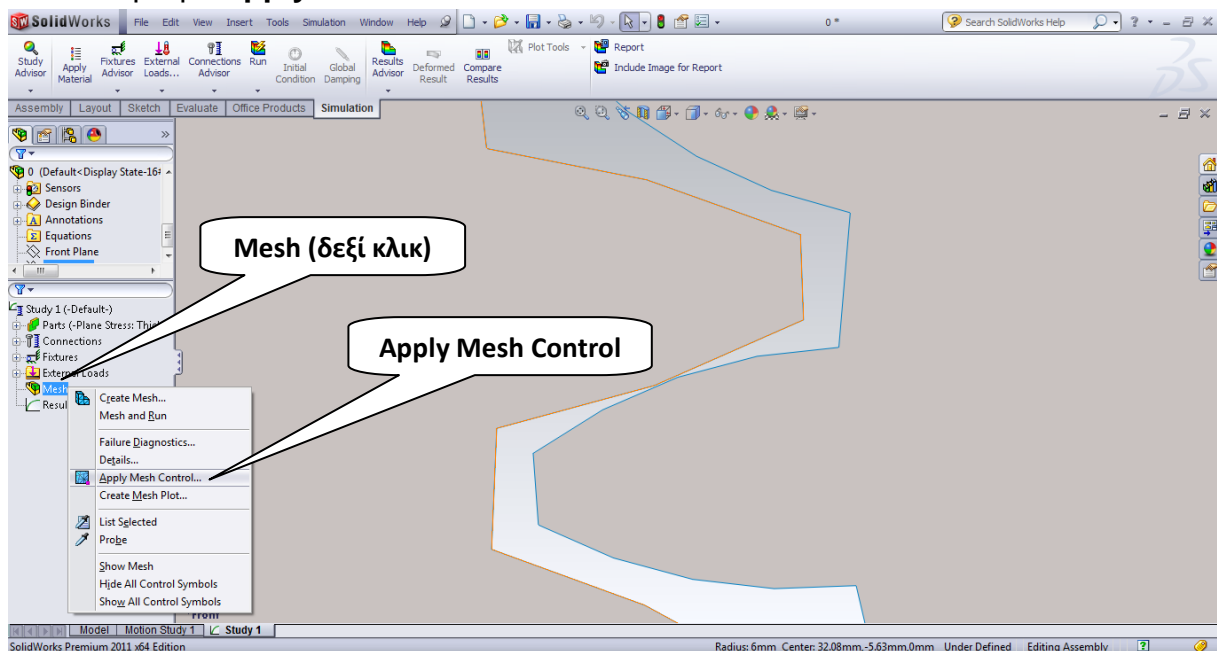
## Βήμα 7<sup>ο</sup>

Από την εντολή **Connections Advisor** επιλέγουμε **Contact Set** → **Manually select contact sets** → **No penetration** → **Friction** (Βάζουμε 1) και επιλέγουμε τις δύο γραμμές των οδόντων που έρχονται σε επαφή.



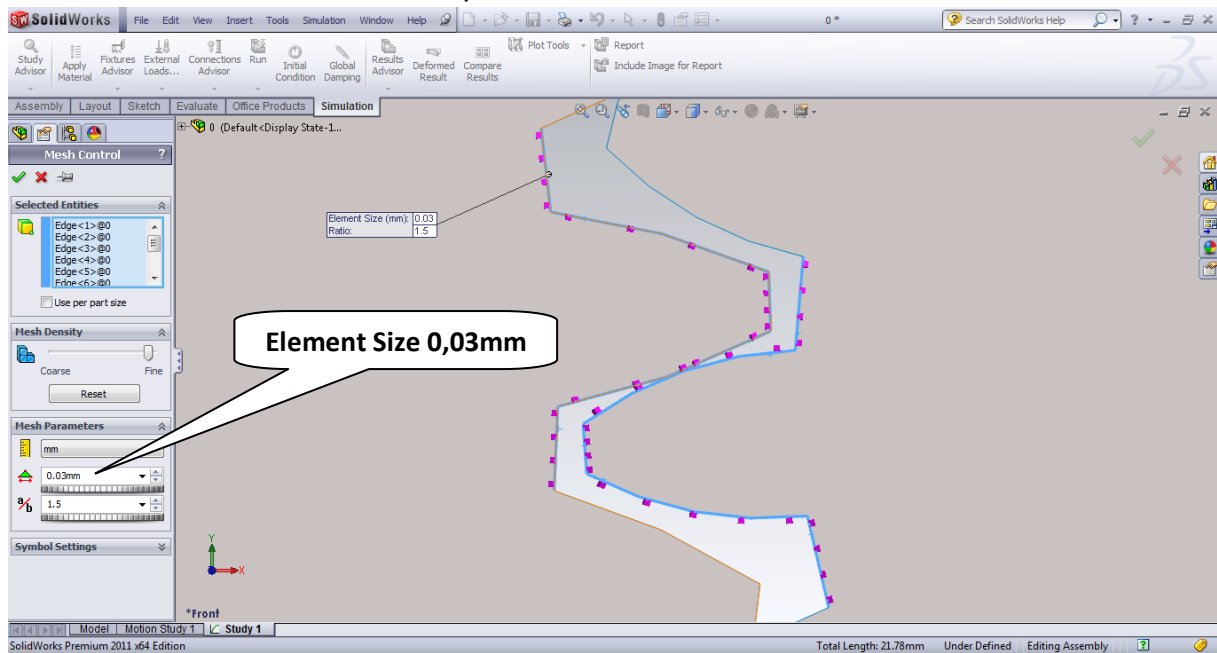
## Βήμα 8<sup>ο</sup>

Από το δέντρο πληροφοριών αριστερά κάνουμε δεξί κλικ στην εντολή **Mesh** και επιλέγουμε **Apply Mesh Control**.



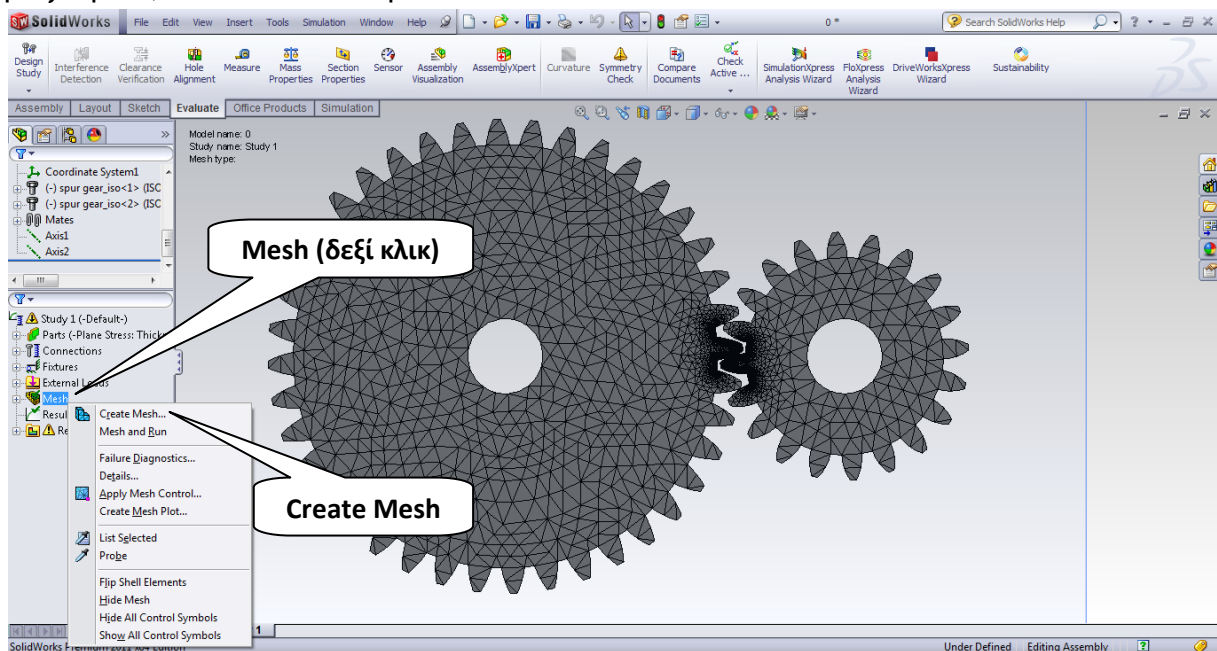
## Βήμα 9°

Από το παράθυρο του **Mesh Control** που θα μας ανοίξει επιλέγουμε όλες τις γραμμές των δύο οδόντων που έρχονται σε επαφή και στην συνέχεια επιλέγουμε **Element size 0,03 mm** και πατάμε **OK**.



## Βήμα 10°

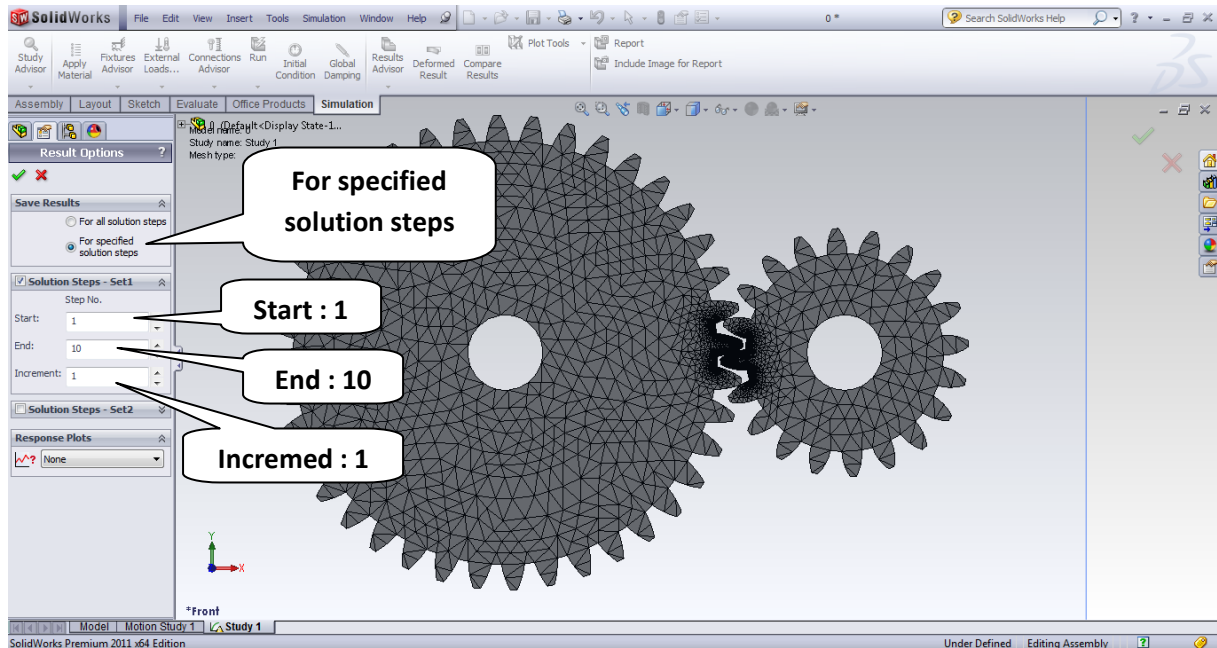
Κάνουμε δεξί κλικ στο **Mesh** και επιλέγουμε **Create Mesh**, για **Element size** βάζουμε 1,00 mm και πατάμε **OK**.





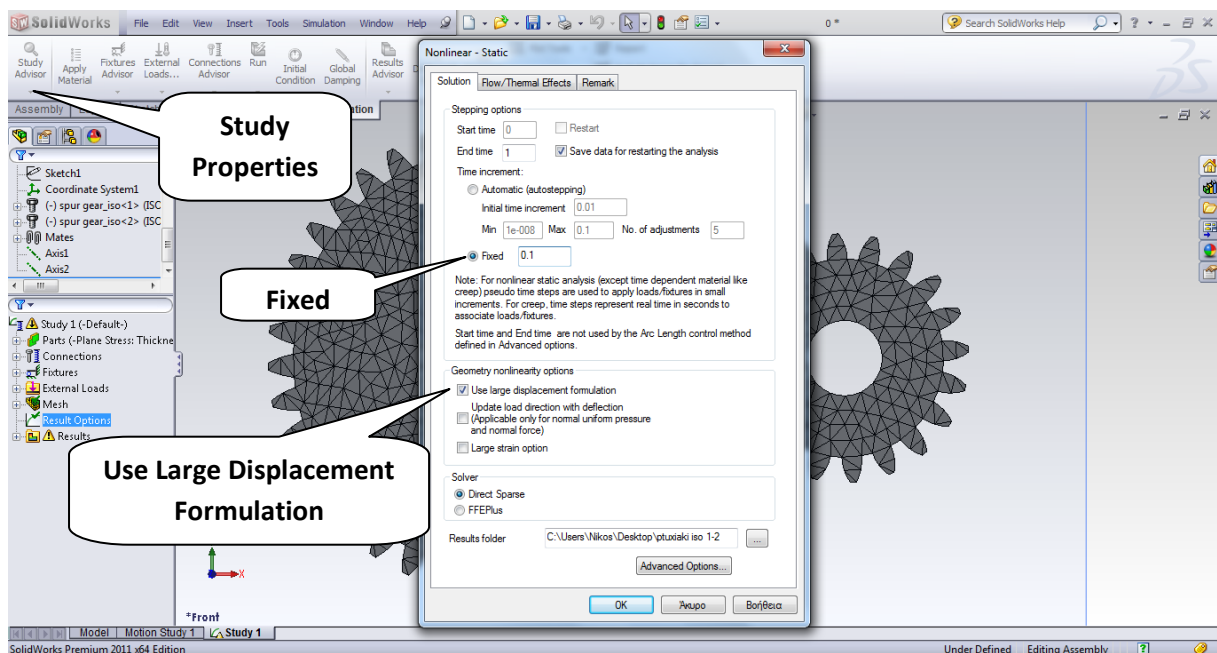
## Βήμα 11<sup>ο</sup>

Από το δέντρο πληροφοριών στα αριστερά κάνουμε δεξί κλικ στο **Result options** → **Define/Edit** → **For specified solution steps** → **Start : 1** → **End : 10** → **Incremented : 1** → **OK**.



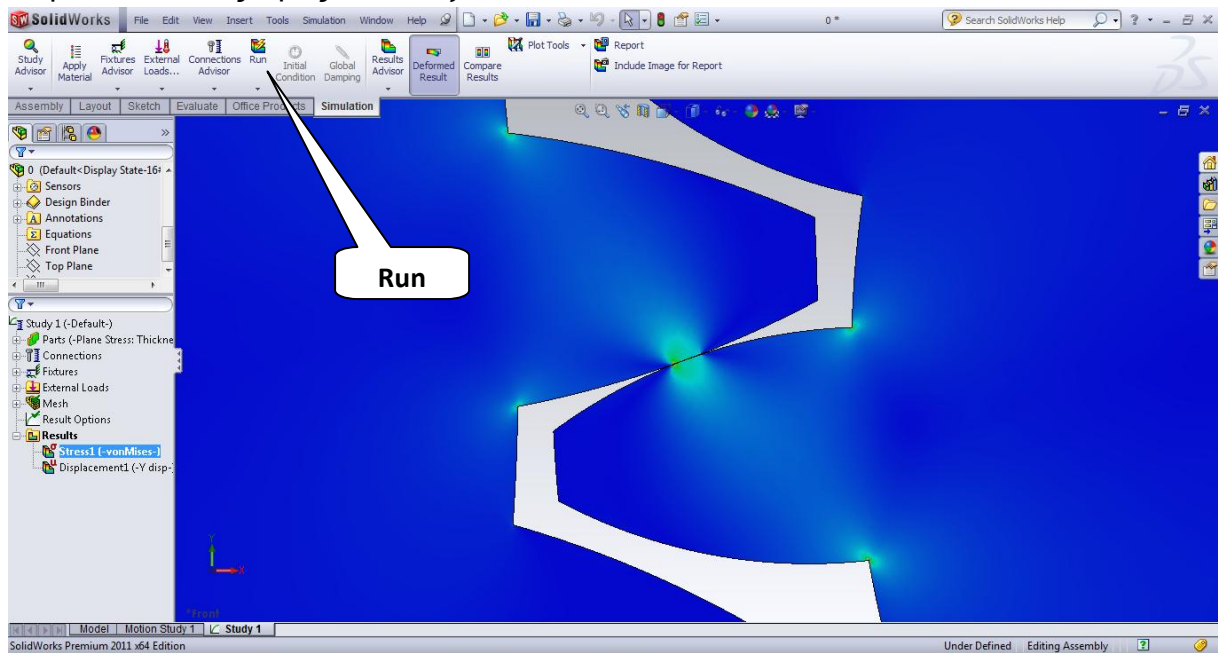
## Βήμα 12<sup>ο</sup>

Από το **Study Advisor** επιλέγουμε **Study Properties** και κάνουμε κλικ στο **Fixed** όπου βάζουμε 0,1. Επιλέγουμε ακόμη και το **Use Large Displacement Formulation**.



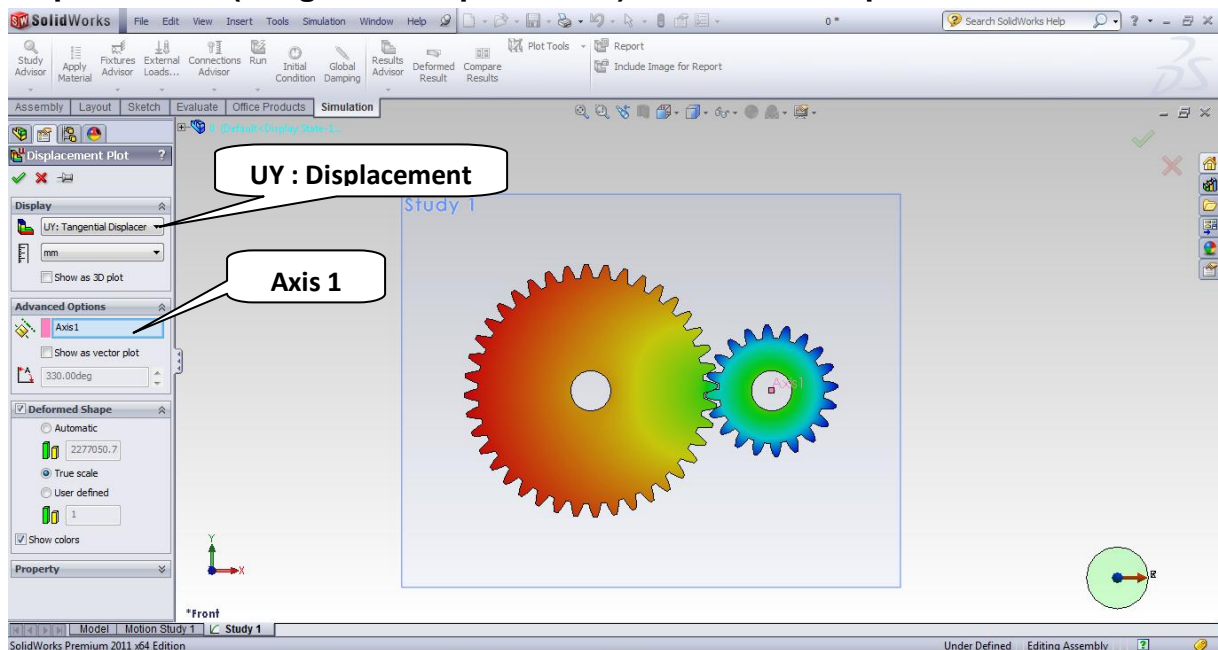
### Βήμα 13°

Επιλέγουμε Run και αφού τρέξει το πρόγραμμα μας βγάζει τρία προεπιλεγμένα αποτελέσματα, εμείς κρατάμε μόνο το Stress 1 (Von Mises) και το Displacement ως προς τον Y άξονα.



### Βήμα 14°

Για να αλλάξουμε το Displacement ως προς τον άξονα Y που θέλουμε επιλέγουμε το **Displacement** → **Δεξί κλικ** → **Edit Definition** → **UY : Y Displacement (Tangential Displacement)** → **Advanced Options** → **Axis 1** → **OK**.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας, κατανοήσαμε την λειτουργία των μετωπικών οδοντωτών τροχών, τα χαρακτηριστικά μεγέθη αυτών και τις κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται. Ακόμη μελετήσαμε τις βλάβες που προκαλούνται είτε από φορτίσεις που δέχονται οι τροχοί, είτε από κάποιους άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την σωστή λειτουργία τους, όπως η ανεπαρκής λίπανση ή οι υψηλές θερμοκρασίες.

Αναπτύξαμε περαιτέρω τις γνώσεις μας στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks και κατανοήσαμε τον παραμετρικό σχεδιασμό ζεύγους μετωπικών οδοντωτών τροχών. Ακόμη μάθαμε την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων την οποία και χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση του ζεύγους οδοντωτών τροχών επίσης με το πακέτο Solidworks και εξάγαμε τιμές τάσης και μετατόπισης. Επεξεργαστήκαμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό πακέτο Microsoft Excel, και χαράξαμε τα διαγράμματα τάσης επαφής, ρίζας οδόντα και στρεπτικής δυσκαμψίας με το πρόγραμμα OriginPro.

Μελετήσαμε ακόμη τις μεθόδους ταχείας πρωτοτυποποίησης, και πιο συγκεκριμένα την μέθοδο εναπόθεσης - σύντηξης διαδοχικών στρώσεων υλικού (F.D.M.), με την οποία και κατασκευάσαμε τρισδιάστατα ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών.

Με το πέρας αυτής της πτυχιακής εργασίας διευρύναμε τις υπάρχουσες γνώσεις μας και κατανοήσαμε πλήρως όλη την διαδικασία για την παραγωγή ενός αντικειμένου, από τον σχεδιασμό του έως την τελική του μορφή.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Καρβέλης Ιωάννης, Μπαλντούκας Αντώνιος, Ντασκαγιάννη Αικατερίνη *Στοιχεία μηχανών – Σχέδιο*, ΤΕΕ 2<sup>ος</sup> Κύκλος, Αθήνα 1999.
- [2] Στεργίου Ιωάννης, Στεργίου Κωνσταντίνος, *Στοιχεία μηχανών II*, Αθήνα 2002.
- [3] Γιαννάκης Αθανάσιος, *Παραμετρικός Σχεδιασμός Τροχιάς Κοππικών Εργαλείων Για Την Κατασκευή Οδοντωτών Τροχών Ευθείας Οδόντωσης Σε Κέντρα Κατεργασιών CNC Τεσσάρων Αξόνων*, Αθήνα Μάρτιος 2010.
- [4] Γκιθώνας Εμμανουήλ, *Μελέτη Αντοχής Μετωπικών Οδοντωτών Τροχών με τη Μέθοδο της Φωτοελαστικότητας και τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*, Αθήνα Οκτώβριος 2007.
- [5] Ζηρδέλης Ανδρέας, *Προσομοίωση σφυρηλάτησης ακρίβειας οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης*, Αθήνα Μάρτιος 2012.
- [6] Παπαδόπουλος Χρήστος, *Στοιχεία μηχανών*, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Αθήνα 2012.
- [7] Μανιάτη Μαρί – Μισέλ, *Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της μετατόπισης των οδοντώσεων στην ακρίβεια των τροχών*, Αθήνα 2007.
- [8] Kiekbusch Timo, Sappok Daniel, Sauer Bernd, Howard Ian, *Calculation of the combined torsional mesh stiffness of spur gears with two- and three-dimensional parametrical FE models*, Journal of Mechanical Engineering 57(2011)11, 810-818, August 2011.
- [9] M. Rameshkumar, G. Venkatesan, P. Sivakumar, *Finite Element Analysis of High Contact Ratio Gear*, AGMA Technical Paper, October 2010.
- [10] Vivek Karaveer, Ashish Mogrekar, T. Preman Reynold Joseph, *Modeling and Finite Element Analysis of Spur Gear*, International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.3, No.5, December 2013
- [11] Βαρύτης Εμμανουήλ, *Μορφοποίηση πιστών αντιγράφων αρχαίων αντικειμένων με εφαρμογή μεθόδων αντίστροφης μηχανολογίας και ταχείας πρωτοτυποποίησης*, Θεσσαλονίκη 2009

- [12] Μπιλάλης Νικόλαος, *Σημειώσεις εργαστηρίου CAD*, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [13] Παπαθανάσης Ηλίας, *Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης*, Περιοδικό «ΠΕΡΙΣΚΟΠΙΟ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ», Τεύχος 297, Οκτώβριος 2005.
- [14] *Σημειώσεις τμήματος Τεχνολογίας συστημάτων διαχείρισης φυσικών πόρων*, ΤΕΙ Κρήτης
- [15] Βασιλάκης Λάμπρος, Κιάφας Λουκάς, *Κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωτή ταχείας πρωτοτυποποίησης πλαστικών εξαρτημάτων*, Πάτρα 2013
- [16] Turnpike Jericho, *Handbook of METRIC drive components D805*, 2010
- [17] Τσίρκας Σωτήριος, *Σημειώσεις εργαστηρίου CAM*, ΤΕΙ Πάτρας
- [18] Training Manual, Solidworks Essentials, 2013
- [19] Training Manual, Solidworks Simulation, 2013
- [20] [www.solidworks.com](http://www.solidworks.com)
- [21] [en.wikipedia.org/wiki/Solidworks](http://en.wikipedia.org/wiki/Solidworks)
- [22] [el.wikipedia.org/wiki/Μέθοδος\\_πεπερασμένων\\_στοιχείων](http://el.wikipedia.org/wiki/Μέθοδος_πεπερασμένων_στοιχείων)
- [23] [www.custompartnet.com](http://www.custompartnet.com)
- [24] [www.tribology.co.uk](http://www.tribology.co.uk)