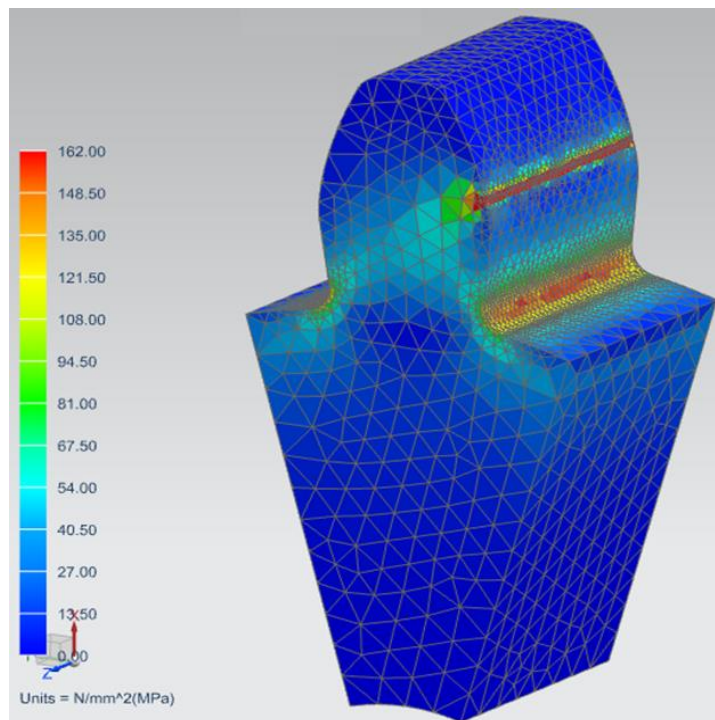


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση και μελέτη υβριδικού οδοντωτού
τροχού από χάλυβα και σύνθετο υλικό



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ : ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (Α.Μ. 5665)
ΜΠΙΤΖΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ (Α.Μ. 5737)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΕΚΠΕΔΕΥΤΙΚΟΥ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ. Η πτυχιακή εργασία αναφέρεται στο σχεδιασμό και τη μελέτη πρωτότυπου υβριδικού οδοντωτού τροχού με τη χρήση σύνθετων υλικών και σκοπός της είναι η προσπάθεια εύρεσης της καταλληλότερης διάταξης και γεωμετρίας για τη μείωση του βάρους του , τη βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του και άλλων πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών που αναλύονται στα αντίστοιχα κεφάλαια.

Αρχικά γίνεται εκτενής αναφορά στους οδοντωτούς τροχούς , τα υλικά τους , τους σχετικούς υπολογισμούς και τις συνήθεις φθορές . Στη συνέχεια υπάρχει λεπτομερής αναφορά στα σύνθετα υλικά και ειδικότερα στο ανθρακόνημα όπως και στα λογισμικά CAD και CAE τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό και την ανάλυση. Τέλος είναι η διαδικασία της σχεδίασης και της ανάλυσης με τα αποτελέσματα όπως και τα σχετικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Στέφανο Τσινόπουλο , αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε. , για τη βοήθεια και την ανάθεση της εργασίας.

*Νίκος Ευσταθίου – Κωνσταντίνος Μπίτζιος
Απρίλιος 2018*

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδικτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΜΠΙΤΖΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

.....

.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στο σχεδιασμό και τη μελέτη πρωτότυπου υβριδικού οδοντωτού τροχού από χάλυβα και ανθρακόνημα και τη σύγκρισή του με συμβατικό αμιγώς χαλύβδινο. Στη συνέχεια και έπειτα από την πρώτη εξαγωγή αποτελεσμάτων, σχεδιάστηκε και μελετήθηκε και οδοντωτός τροχός από ανθρακόνημα και κράμα αλουμινίου.

Αρχικά γίνεται εκτενής αναφορά στους οδοντωτούς τροχούς με ανάλυση των ειδών τους και τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους. Αναφέρονται και υποδεικνύονται τα βασικά μεγέθη τους, οι συνηθισμένες βλάβες και φθορές τους και οι σχέσεις από τις οποίες προκύπτουν και αναλύονται.

Στη συνέχεια υπάρχει εκτενής αναφορά στη λειτουργία των λογισμικών CAD και CAE τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό και την ανάλυση των οδοντωτών τροχών, της εργασίας, καθώς και στα πεπερασμένα στοιχεία, στα οποία κυρίως στηρίζεται η λειτουργία των λογισμικών CAE.

Μετά υπάρχει αναφορά στα σύνθετα υλικά και κυρίως σε αυτά με χρήση ινών άνθρακα. Γίνεται μία ιστορική αναδρομή, ταξινόμησή τους και ανάλυση των δομών τους.

Τέλος έχουμε τον σχεδιασμό, την ανάλυση και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τους υβριδικούς οδοντωτούς τροχούς. Εξηγείται αναλυτικά η διαδικασία παραμετρικού σχεδιασμού οδοντωτών τροχών στο λογισμικό SOLIDWORKS και η ανάλυσή τους με το λογισμικό SIEMENS NX CAE 9. Παρατίθενται τα συμπεράσματα από τη σύγκριση των αναλύσεων και αναφέρονται τα θετικά και αρνητικά των εν λόγω οδοντωτών τροχών.

Με τη χρήση του υβριδικού οδοντωτού τροχού λόγω ιδιαίτερα μειωμένου βάρους έχουμε ανάλογα μειωμένη χρήση ισχύος κυρίως κατά την αρχή της περιστροφής του αλλά και στην ακινητοποίησή του, στο συγκρότημα στο οποίο εντάσσεται. Η αντοχή του είναι σχεδόν ίδια και σε περίπτωση αστοχίας του υβριδικού γραναζιού χρειάζεται η αντικατάσταση μόνο της εξωτερικής μεταλλικής επικάλυψης αντί όλου όπως στα συμβατικά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	1
2. Οδοντωτοί τροχοί.....	3
2.1 Γενικά περί οδοντωτών τροχών.....	3
2.2 Είδη οδοντωτών τροχών.....	4
2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντωτών Τροχών.....	8
2.4 Βασικός νόμος της οδόντωσης.....	11
2.5 Οδοντωτοί τροχοί με παράλληλους οδόντες.....	13
2.6 Υλικά οδοντωτών τροχών.....	14
2.7 Βλάβες οδόντων.....	17
2.8 Φθορές οδόντων λόγω επιφανειακής καταπόνησης...	18
2.9 Δυνάμεις μετωπικών οδοντωτών τροχών.....	22
2.10 Κάμψη μετωπικών οδ. Τροχών κατά LEWIS.....	23
3. CAD-CAE & μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	28
3.1 Εισαγωγή στα CAD & CAE.....	28
3.2 Λογισμικά CAD και γενικά χαρακτηριστικά.....	29
3.3 Λογισμικά CAE και γενικά χαρακτηριστικά.....	30
3.4 Μέθοδος των Πεπερασμένων στοιχείων.....	32
3.5 Λογισμικά SOLIDWORKS(CAD) και SIEMENS NX CAE 9.....	49
4. Σύνθετα υλικά & ανθρακόνημα.....	50
4.1 Εισαγωγή και ορισμός.....	50
4.2 Ιστορική εξέλιξη σύνθετων υλικών.....	51
4.3 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών.....	53
4.4 Δομή και ιδιότητες ινών.....	55
4.5 Ίνες άνθρακα (CARBON FIBER) και σύγκριση με άλλες ίνες.....	67

4.6	Μήτρες σύνθετων υλικών.....	71
4.7	Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινωδών σύνθετων.....	74
4.8	Μέθοδοι κατασκευής και μορφοποίησης σύνθετων Ινωδών.....	77
5.	Σχεδιασμός και στατική ανάλυση οδοντωτών τροχών.....	84
5.1	Επιλογή βασικών χαρακτηριστικών οδοντωτού τροχού..	85
5.2	Παραμετρικός σχεδιασμός οδοντωτού τροχού στο SOLIDWORKS.....	88
5.3	Σχεδιασμός εσωτερικού ανθρακονήματος.....	96
5.4	Έλεγχος αντοχής οδοντωτών τροχών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	100
5.5	Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.....	104
5.6	Αναλυτική μέθοδος αντοχής κάμψης κατά LEWIS.....	112
6.	Συμπεράσματα και παρατηρήσεις.....	117
7.	Βιβλιογραφία.....	119

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ζεύγος οδοντωτών τροχών αποτελεί βασικό κατασκευαστικό στοιχείο σε πολλές μηχανολογικές εφαρμογές και ειδικά σε συστήματα μετάδοσης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, αυτό το είδος μετάδοσης ισχύος βρίσκει εφαρμογή σε κιβώτια ταχυτήτων αυτοκινήτων, σε αεροπορικές κατασκευές, στη ναυπηγική, σε ανεμογεννήτριες καθώς και σε μηχανήματα ανύψωσης και εργαλειομηχανές. Επομένως, καθίσταται αναγκαία η μελέτη τέτοιων συστημάτων με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση της μεταφοράς ισχύος, την βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής των προϊόντων και άλλων θεμάτων ανάλογα με τη χρήση των οδοντωτών τροχών.

Στην πτυχιακή εργασία μας, η αρχική ιδέα που θέλουμε να μελετήσουμε, είναι ένας οδοντωτός τροχός που θα περιέχει ανθρακόνημα ως βάση, εκμεταλλευόμενοι την υψηλή αντοχή του και το μικρό του βάρος. Οι ανθρακονηματίνοι οδοντωτοί τροχοί είναι ακόμα υπό μελέτη όσον αφορά τη μετάδοση μεγάλης ισχύος, τη συμπεριφορά του υλικού σε μεγάλες δυνάμεις τριβής, την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών και την επιφανειακή καταπόνηση λόγω ψαθυρότητας. Για τους παραπάνω λόγους καταλήξαμε σε ένα σχέδιο το οποίο θα εκμεταλεύεται τα πλεονεκτήματα του ανθρακονήματος και θα εξαλείφει τα μειονεκτήματα του. Το σχέδιο αυτό είναι ένας οδοντωτός τροχός που στο εσωτερικό του έχει ανθρακόνημα και στο εξωτερικό του, μία στρώση πάνω από το ανθρακόνημα, θα έχει χάλυβα. Με αυτό τον τρόπο δε θα είχαμε υψηλές θερμοκρασίες να αναπτύσσονται στο ανθρακονηματικό μέρος των δοντιών, δε θα είχαμε δυνάμεις τριβής να αναπτύσσονται, θα εκμεταλλευόμαστε την ελαστικότητα του χάλυβα και θα μπορούμε να αντικαταστήσουμε το εξωτερικό κομμάτι χάλυβα σε περίπτωση μεγάλης φθοράς λόγω επιφανειακής καταπόνησης ή σε περίπτωση διαρροής του υλικού. Κύριος στόχος μας είναι ο σχεδιασμός ενός οδοντωτού τροχού που θα δέχεται εξίσου μεγάλες δυνάμεις με ένα σκέτο χαλύβδινο του εμπορίου όντας πολύ πιο ελαφρύ και με δυνατότητα αντικατάστασης του αναλώσιμου μέρους του και όχι αντικατάστασης ολόκληρου του οδοντωτού τροχού.

Μέχρι στιγμής έχει σχεδιαστεί επίσημα μία φορά υβριδικό γρανάτζι που περιέχει ανθρακόνημα στην περιοχή των δοντιών [11]. Οι ερευνητές του Πανεπιστημίου Gifu στην Ιαπωνία κατασκεύασαν και μελέτησαν υβριδικό οδοντωτό τροχό από πλαστικό και ανθρακόνημα που ικάζεται ότι μπορεί να

αντικαταστήσει τους μεταλικούς οδοντωτούς τροχούς. Τα μέταλλα χρησιμοποιούνται από καιρό στα αυτοκίνητα λόγω της σκληρότητάς τους, αλλά ένας νέος πλαστικός οδοντωτός τροχός με ίνες άνθρακα χειρίζεται την πίεση εξίσου καλά. Οι ερευνητές αναγνώρισαν αρχικά ποιο μέρος των οδοντωτών τροχών είναι το πιο αδύναμο. Αποδείχτηκε ότι είναι τα δόντια που συνδέονται με τον πυρήνα του. Έτσι, ενίσχυσαν εσωτερικά τα δόντια του οδοντωτού τροχού με ίνες άνθρακα και αυτό είχε ως αποτέλεσμα, να του δίνει την ίδια αντοχή με ένα μεταλλικό οδοντωτό τροχό. Οι αρχικές δοκιμές είναι ελπιδοφόρες επειδή τα γρανάζια αυτά αντέχουν ακριβώς όπως και τα μεταλλικά. Αυτό το γρανάζι από πλαστικό και ανθρακόνημα έχει ένα βασικό πλεονέκτημα. Είναι πολύ ελαφρύτερο και αυτό μπορεί να βοηθήσει στην απόδοση καυσίμου ενός οχήματος και να αυξήσει την ταχύτητά του. Θα χρειαστούν μερικά χρόνια πριν φτάσουν στο δρόμο λόγω των εγκρίσεων των ρυθμιστικών αρχών, αν και είχε υπολογιστεί ότι θα μπορούσε να βγει στην παραγωγή το 2017. Αυτή η μελέτη είναι η μόνη που βρέθηκε και σχετίζεται με τη δική μας πρόταση και βρήκαμε στην αναζήτησή μας για πληροφορίες για ανθρακονημάτιους οδοντωτούς τροχούς καθώς είναι ακόμα σε πρώιμα στάδια η χρησιμοποίηση του ανθρακονήματος σε τέτοιες κατασκευές.

Το κύριο μέρος των οδοντωτών τροχών, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι τα δόντια. Ο σχεδιασμός του υβριδικού μας τροχού, θέλει να εστιάσει στην αντοχή των δοντιών σε κάμψη και την ενίσχυσή τους. Θα σχεδιάσουμε έναν οδοντωτό τροχό ώστε να εκμεταλλευτούμε όσα θετικά αναφέραμε από την ενίσχυση με ανθρακόνημα στο εσωτερικό των δοντιών και εξαλείφοντας τα αρνητικά με το εξωτερικό χαλύβδινο μέρος, θα κάνουμε στατική ανάλυση απομονώνοντας το δόντι του οδοντωτού τροχού και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με το αντίστοιχο δόντι, ιδίων διαστάσεων από σκέτο χάλυβα, σκέτο ανθρακόνημα και τέλος, θα κάνουμε στατική ανάλυση σε οδοντωτό τροχό με αλουμίνιο ως εξωτερικό των δοντιών και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με σκέτο αλουμινένιο. Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε μια καλύτερη εικόνα για το πώς επηρεάζεται η αντοχή του υβριδικού οδοντωτού τροχού ανάλογα με το μέτρο ελαστικότητας και το όριο διαρροής και θραύσης των υλικών που χρησιμοποιούμε για το εξωτερικό τμήμα.

Ο σχεδιασμός θα γίνει με χρήση προγράμματος CAD και πιο συγκεκριμένα SOLIDWORKS και θα είναι παραμετρικός ώστε να μπορούμε να έχουμε γρήγορα ένα σχέδιο αλλάζοντας βασικά χαρακτηριστικά όπως την αρχική διάμετρο ή τον αριθμό των δοντιών. Θα σχεδιάσουμε μέσω συναρτήσεων την εξελιγμένη καμπύλη του οδοντωτού τροχού που είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία και σύμπλεξη των τροχών. Τέλος, η στατική ανάλυση θα γίνει με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και πιο συγκεκριμένα, του προγράμματος Siemens NX9.

2. ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

2.1 Γενικά περί οδοντωτών τροχών

Οδοντωτός τροχός ή γρανάζι ονομάζεται κάθε μεταλλικός δίσκος που στην περιφέρειά του φέρει εσοχές και εξοχές, δηλαδή δόντια. Η κίνηση μεταδίδεται με την επαφή και την συνεργασία των πλευρικών επιφανειών των οδοντωτών τροχών. Δηλαδή, οι οδοντωτοί τροχοί είναι στοιχεία μηχανών που επιτυγχάνουν την μετάδοση κίνησης και τη μεταφορά ισχύος με εμπλοκή των συνεργαζόμενων οδόντων. Είναι κατασκευασμένος από μέταλλο ή οποιοδήποτε άλλο ανθεκτικό υλικό. Αυτή η εμπλοκή των οδόντων πρέπει να εξασφαλίζει ομαλή και χωρίς ολίσθηση κύλιση των αρχικών κυλίνδρων και σταθερή σχέση μετάδοσης κινήσεως, που αποτελούν τις βασικές προϋποθέσεις τις οποίες πρέπει να ικανοποιούν οι συνεργαζόμενες κατατομές των δύο οδοντωτών τροχών. Συνήθως, στους οδοντωτούς τροχούς διακρίνονται η πλήμνη, ο κορμός και η οδοντωτή στεφάνη ή οδόντωση. Σε μερικές κατασκευές η πλήμνη δεν ξεχωρίζει από τον κορμό. Οι οδοντωτοί τροχοί, τους τρεις τελευταίους αιώνες έχουν ευρεία εφαρμογή στις περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές από την βιομηχανία, στην ναυτιλία και ναυπηγική και από την αεροναυπηγική στην διαστημική τεχνολογία. Οι οδοντωτοί τροχοί (γρανάζια) είναι τα στοιχεία μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε όλες γενικά τις μηχανές.

Αυτό οφείλεται στα *πλεονεκτήματα* που παρουσιάζουν:

1. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλες περιοχές ισχύων και ταχυτήτων. (π.χ. οι παράλληλοι οδοντωτοί τροχοί μπορούν να μεταφέρουν μέχρι και 20000 kW).
2. Παρέχουν ακριβή σχέση μετάδοσης (όπως και οι αλυσίδες).
3. Έχουν μεγάλο χρόνο ζωής και καταλαμβάνουν μικρό χώρο.
4. Μεταδίδουν κίνηση με αύξηση ή με ελάττωση των στροφών.
5. Χρειάζονται μικρή συντήρηση.
6. Μπορούν να συνδέσουν ατράκτους που βρίσκονται σε οποιαδήποτε διάταξη.
7. Τα περισσότερα είδη των οδοντωτών τροχών μεταδίδουν την κίνηση χωρίς μεγάλη απώλεια ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι έχουν καλό βαθμό απόδοσης. Αυτός εξαρτάται από το είδος των τροχών, την ποιότητα της κατασκευής και την κατάλληλη λίπανση.

Ενώ κάποια από τα βασικά *μειονεκτήματα*, είναι τα παρακάτω:

1. Είναι δαπανηρή κατασκευή. Ορισμένα είδη τροχών κατασκευάζονται αρκετά δύσκολα και απαιτούν ειδικά μηχανήματα κατεργασίας.
2. Απαιτούν ακρίβεια κατασκευής και τοποθέτησης. Σε αντίθετη περίπτωση δημιουργούν θόρυβο κατά τη λειτουργία τους και φθείρονται γρήγορα. Αυτό γίνεται περισσότερο έντονο στις μεγάλες ταχύτητες.
3. Μεταδίδουν την κίνηση χωρίς ελαστικότητα. Δεν έχουν δυνατότητα παραλαβής κρουστικού φορτίου. Κάθε αιφνίδια μεταβολή του φορτίου μεταδίδεται αυτούσια στην άλλη άτρακτο.

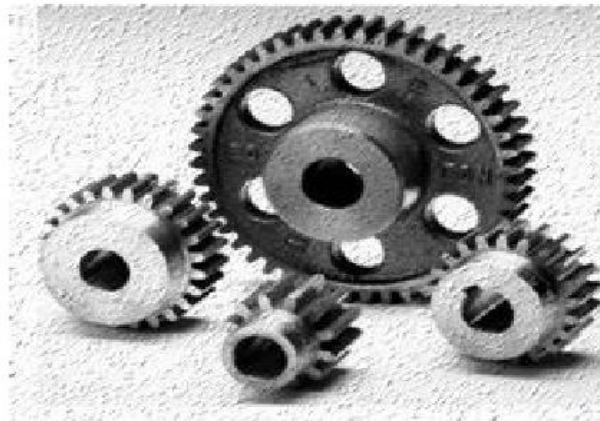
2.2 Είδη οδοντωτών τροχών

Η ταξινόμηση των οδοντωτών τροχών εξαρτάται από τα κριτήριά μας. Το βασικότερο κριτήριο κατηγοριοποίησής τους προκύπτει από τον περιορισμό της θέσης των ατράκτων. Αυτές οι κατηγορίες είναι οι εξής:

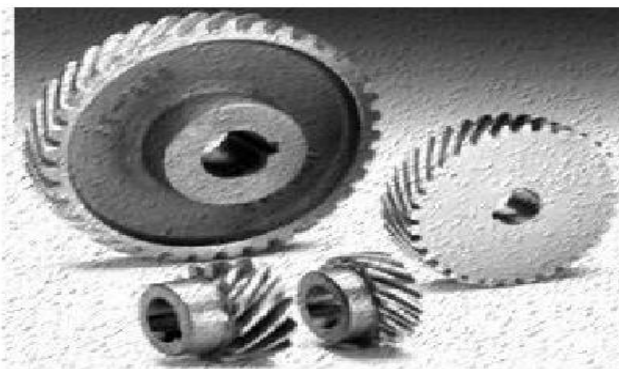
- Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί
- Κωνικοί οδοντοτοί τροχοί
- Ζευγάρι ατέρμονα κοχλία-οδοντωτού τροχού (κορώνας)
- Κοχλιωτοί οδοντωτοί τροχοί.

Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί:

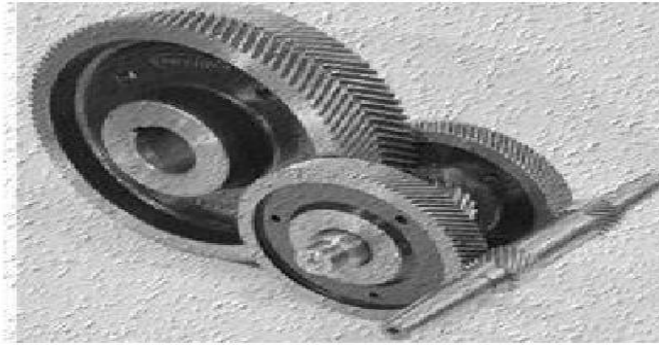
Χρησιμεύουν για μετάδοση κίνησης μεταξύ παράλληλων ατράκτων. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί ανάλογα με τη μορφή της οδόντωσης, χωρίζονται σε *μετωπικούς* (εικόνα 2.1), *ελικωειδής* (εικόνα 2.2) και *τοξοειδής* (εικόνα 2.3). Οι δεύτεροι παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή και λιγότερο θόρυβο λειτουργίας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρύτερα από τους πρώτους. Οι μετωπικοί τροχοί συνεργάζονται πολλές φορές με οδοντωτούς κανόνες για μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ευθύγραμμη και αντίθετα. Για τους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς θα πούμε περισσότερα παρακάτω καθώς είναι και το αντικείμενο της πτυχιακής.



Εικόνα 2.1: Μετωπικοί οδ. Τροχοί [10]



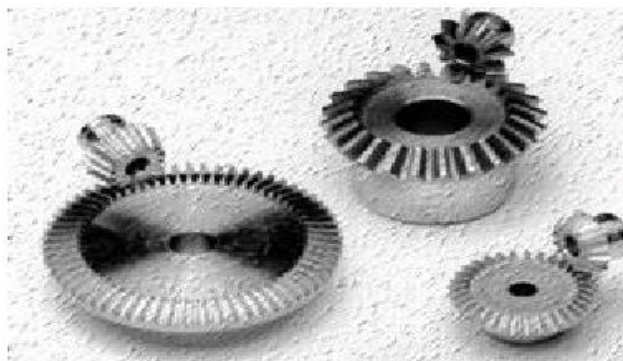
Εικόνα 2.2: Ελικωειδής οδ. Τροχοί [10]



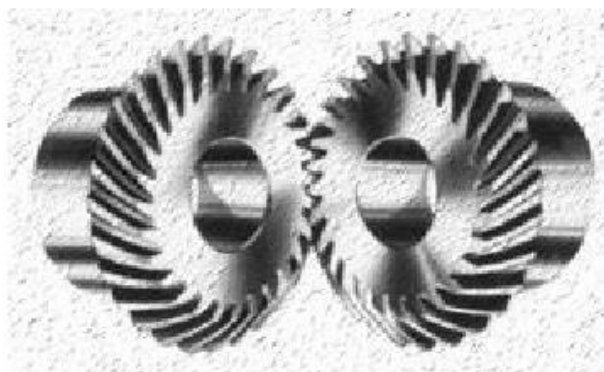
Εικόνα 2.3: Τοξοειδής οδ. Τροχοί [10]

Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί:

Χρησιμεύουν για την μετάδοση κίνηση μεταξύ τεμνόμενων ατράκτων. Οι γεωμετρικοί άξονες των ατράκτων σχηματίζουν συνήθως γωνία 90° αλλά μερικές φορές μικρότερη ή μεγαλύτερη από 90° . Μία εφαρμογή των κωνικών οδοντωτών τροχών είναι και η αρχή λειτουργίας των διαφορικών των περισσοτέρων οχημάτων. Εφαρμογή των κωνικών τροχών βρίσκεται και σε μεγάλο αριθμό άλλων μηχανολογικών κατασκευών και σε αρκετούς μειωτήρες, όπου κάποιες από τις βαθμίδες μπορεί να φέρουν τέτοιους οδοντωτούς τροχούς. Οι κωνικοί οδοντωτοί τροχοί χωρίζονται σε *ευθείς (εικόνα 2.4)*, *κεκλιμένους (εικόνα 2.5)*, *τοξωτούς*, *σπειρωειδής και εξελιγμένης*. Σε δύο κύριες κατηγορίες, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζονται σε ευθείς και ελικοειδής, όπως ουσιαστικά και οι παράλληλοι οδοντωτοί τροχοί. Βλέπουμε παρακάτω τη μορφή της κάθε οδόντωσης. Ας αναφέρουμε λίγες λεπτομέρειες για τα είδη κωνικών οδοντωτών τροχών. Οι κωνικοί με ευθεία οδόντωση χρησιμοποιούνται για μικρές ταχύτητες αρχικού κώνου (έως 4 m/sec) και σε περιπτώσεις όπου η ομοιομορφία μετάδοσης της κίνησης και φορτίων καθώς και ο χαμηλός θόρυβος δεν είναι από τα βασικά ζητούμενα στην κατασκευή. Στους τοξωτούς κωνικούς οι οδόντες είναι καμπυλωμένοι και έχουν κλίση ως προς την ακτίνα στην μέση διάμετρο. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η ομαλή συνεργασία σε όλη τη διάρκεια του τμήματος επαφών. Χρησιμοποιούνται και είναι κατάλληλοι για περιπτώσεις όπου υπάρχουν υψηλές ταχύτητες περιστροφής και όταν υπάρχει ανάγκη μείωσης θορύβου και ταλαντώσεων.



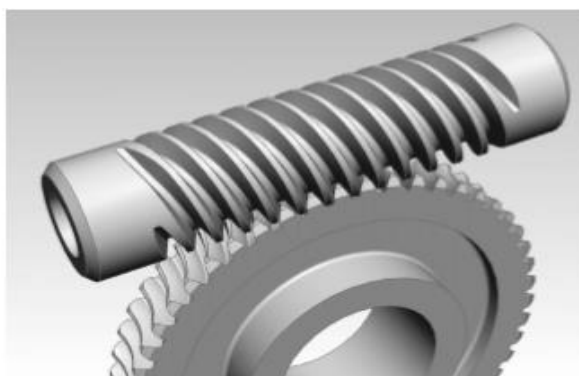
Εικόνα 2.4: Ευθείς οδ. Τροχοί [10]



Εικόνα 2.5: κεκλειμένοι οδ. Τροχοί [10]

Ζευγάρι ατέρμονα κοχλία- οδοντωτού τροχού (κορώννας)

Χρησιμεύει για την μετάδοση κίνησης μεταξύ δύο ασυμβάτων ατράκτων. Οι γεωμετρικοί άξονες των δύο ατράκτων σχηματίζουν γωνία συνήθως 90° και πολύ σπάνια διαφορετική γωνία. Χρησιμοποιείται συνήθως σαν μειωτήρας στροφών γιατί με το ζευγάρι αυτό είναι δυνατόν να μειωθούν οι στροφές αρκετές φορές και μπορεί να μεταφέρει ισχύ μέχρι 1000 PS (εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Ζευγάρι ατέρμονα κοχλία- οδοντωτού τροχού

Κοχλιωτοί οδοντωτοί τροχοί

Είναι ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί με κατάλληλη κλίση στα δόντια για να μπορούν να συνδέσουν ατράκτους που είναι διασταυρούμενες χωρίς να τέμνονται. Είναι κατάλληλοι για μεταφορά μικρότερης ισχύς από το ζεύγος ατέρμονα κοχλία-τροχού (εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Κοχλιωτοί οδοντωτοί τροχοί

Πέρα από το διαχωρισμό και την κατηγοριοποίηση των οδοντωτών τροχών σύμφωνα με τους άξονές τους και το είδος της οδόντωσης, μπορούμε να χωρίσουμε σε κατηγορίες και την οδοντοκίνηση σύμφωνα με το είδος μεταφοράς ισχύος και ταχύτητας. Έχουμε έτσι τις παρακάτω κατηγορίες:

- μετρητικές
- μεγάλων ταχυτήτων
- μεταφοράς μεγάλων φορτίων και
- γενικής χρήσεως.

Στην μετρητική οδοντοκίνηση κατατάσσονται οι τροχοί του διανομέα του καυσίμου, τροχός και κανόνας της αντλίας των υγρών καυσίμων των Μ.Ε.Κ και η μετάδοση μετρητικών οργάνων. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των μεταδόσεων είναι η μεγάλη κινηματική ακρίβεια π.χ. η ακριβής σύμπτωση των γωνιών περιστροφής του κινητήριου και κινουμένου τροχού μεταδόσεως. Αυτές οι μεταδόσεις χαρακτηρίζονται από μικρό modul.

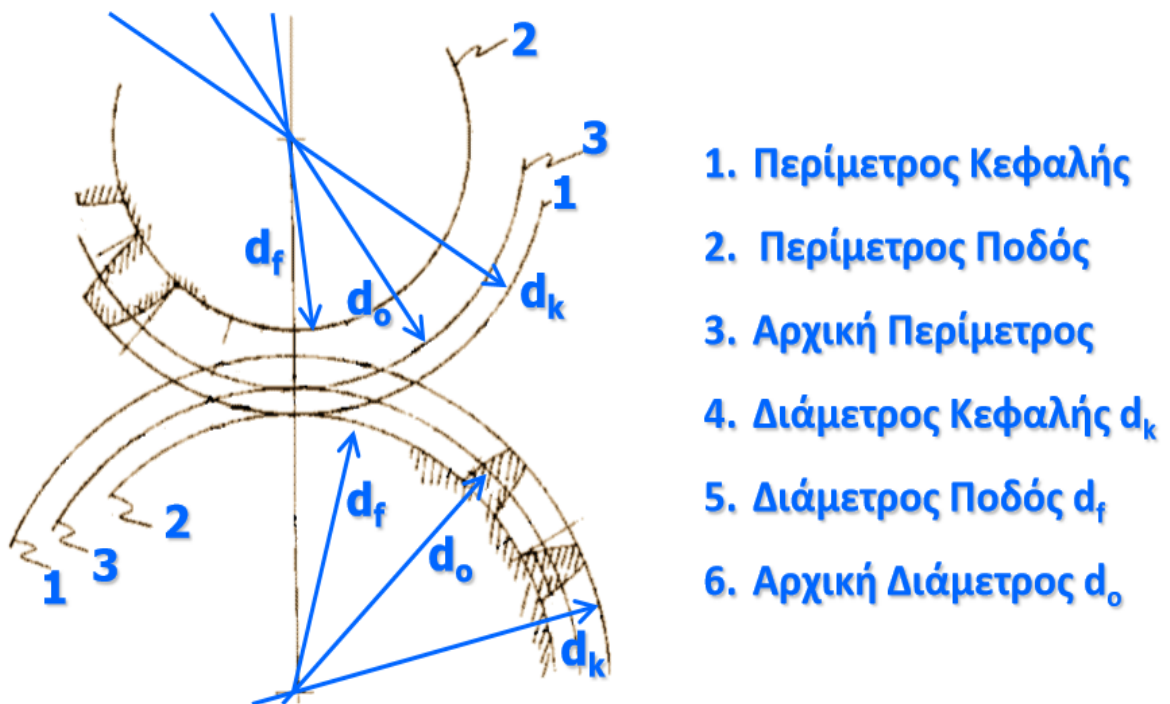
Στις μεταδόσεις μεγάλων ταχυτήτων κατατάσσονται των οχημάτων (κιβώτιο ταχυτήτων διαφορικό). Το κύριο χαρακτηριστικό είναι η ομοιόμορφη μετάδοση κινήσεως. Η μετάδοση χαρακτηρίζεται με μέσο modul και σχετικά μεγάλο μήκος του δοντιού.

Στη μεταφορά μεγάλων φορτίων κατατάσσονται η οδοντοκίνηση των μειωτήρων των ανυψωτικών μηχανών. Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι η πλήρης επαφή των δοντιών. Οι μεταδόσεις αυτές χαρακτηρίζονται από μεγάλα modul από μικρές ταχύτητες και από σχετικά μεγάλο μήκος του δοντιού.

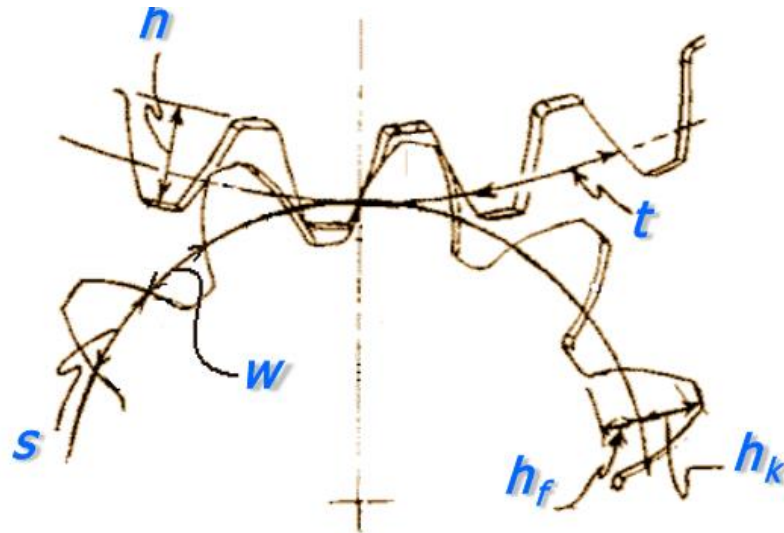
Στις μεταδόσεις γενικής χρήσεως κατατάσσονται αυτές στις οποίες δεν έχουμε μεγάλες απαιτήσεις στην κινηματική ακρίβεια.

2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντωτών τροχών

Η μετάδοση περιστροφικής κίνησης και η μεταφορά ισχύος από την κινητήρια στην κινούμενη άτρακτο, επιτυγχάνεται μέσω διαδοχικής εμπλοκής συνεργαζόμενων δοντιών. Για να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε ή να κατασκευάσουμε έναν οδοντωτό τροχό θα πρέπει να γνωρίζουμε τον αριθμό οδόντων Z , την αρχική διάμετρο D_o ή D_p και το module m . Από τα παραπάνω καθορίζονται όλα τα μεγέθη της οδοντώσεως του οδοντωτού τροχού. Ένα από τα μεγέθη αυτά είναι το βήμα t_o στον αρχικό κύκλο. Ας δούμε παρακάτω στα (σχήματα 2.1 και 2.2) τα σημαντικότερα μεγέθη.



Σχήμα 2.1: Βασικά μεγέθη οδοντωτών τροχών



- | | |
|---|---|
| 7. Βήμα t | 11. Ύψος Ποδός h_f |
| 8. Ύψος Δοντιού h | 12. Πάχος Δοντιού s |
| 9. Ύψος Κεφαλής h_k | 13. Διάκενο w |
| 10. Αριθμός δοντιών z | 14. modul m |

Σχήμα 2.2: Βασικά μεγέθη οδοντωτών τροχών

Μπορούμε να κάνουμε την υπόθεση ότι ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών προέρχεται από δύο λείους κυλίνδρους που εφάπτονται και κυλίνουν συνεχώς. Η αρχική διάμετρος d_0 είναι η διάμετρος του κύκλου κατά τον οποίο εφάπτεται ο ένας κύλινδρος πάνω στον άλλο. Το *module* είναι γεωμετρικό μέγεθος και λαμβάνει τυποποιημένες τιμές σε χιλιοστά. Επίσης το *module* έχει και το ρόλο του συντελεστή ομοιότητας (scale factor). Στις τυποποιημένες οδοντώσεις το ύψος κεφαλής ισούται με $1 \times \text{module}$ ενώ το ύψος ποδός είναι ίσο με $1,25 \times \text{module}$. Οι παρακάτω σχέσεις μας καθορίζουν την διάμετρο του κύκλου κεφαλής dk και τη διάμετρο του κύκλου ποδός df .

$$dk = (Z + 2) * m = d_0 + 2 * h_k \quad (\text{mm})$$

(2.1)

$$df = (Z - 2,5) * m = d_0 - 2 * h_f \quad (\text{mm})$$

(2.2)

Το βήμα t_0 ή p πρέπει να είναι ίδιο στα συνεργαζόμενα γρανάζια όπου:

$$t_0 = \pi * d_0 / z \quad (\text{mm}) \quad \text{και}$$

(2.3)

$$t_0 = m * \pi \quad (\text{mm}) \quad \text{εφόσον} \\ (2.4)$$

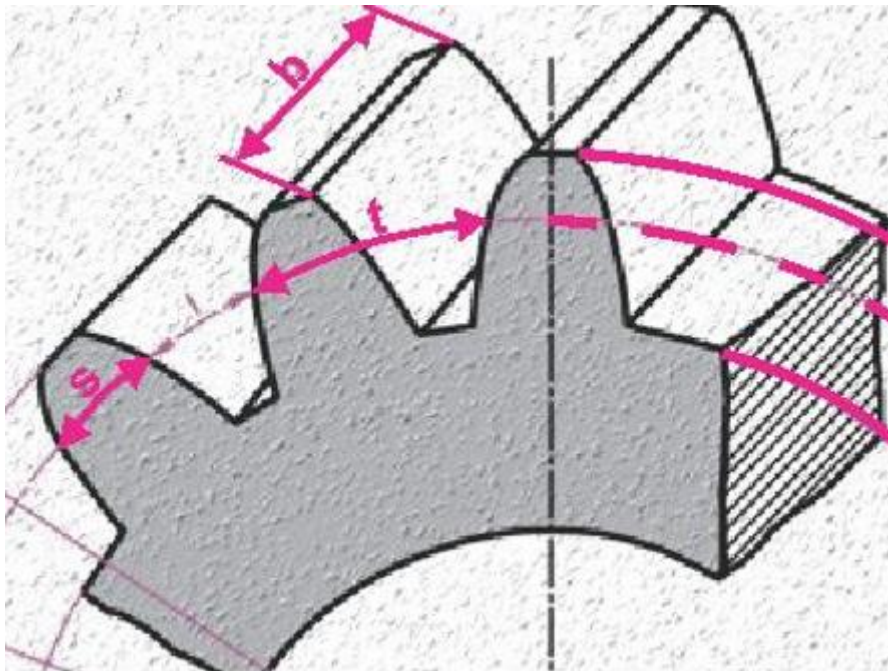
$$m = d_0 / z = t_0 / \pi \\ (2.5)$$

Το ύψος του δοντιού είναι ίσο με $h_k + h_f$.

Η απόσταση των αξόνων των συνεργαζόμενων γραναζιών a_0 ισούται με το ημιάθροισμα των διαμέτρων των αρχικών κύκλων. Δηλαδή:

$$a_0 = (d_{01} + d_{02}) / 2 \quad (\text{mm}). \\ (2.6)$$

Κάτι που ξεχάσαμε να αναφέρουμε στις παραπάνω εικόνες, είναι το μήκος του δοντιού b . Ας το δούμε στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.8 : Βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά

Τώρα που δώσαμε τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά, να πούμε ότι το module είναι το βασικότερο χαρακτηριστικό καθώς με βάση αυτό, μπορούμε να βρούμε τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά. Ας παραθέσουμε ένα πίνακα που μας δείχνει τις σχέσεις υπολογισμού των διαστάσεων μετωπικών οδοντωτών τροχών με παράλληλα ευθύγραμμα δόντια.

Πίνακας 2.1: Σχέσεις εύρεσης στοιχείων οδον. Τροχών [12]

Στοιχεία όδου τροχού	Μέ βάση το Μοντούλ κατά D.I.N 780	Μέ βάση το βήμα	Παράδειγμα Δίνονται: $Z_1=30$, $m=4\text{mm}$
t	$= \pi \cdot m$	$= t$	$= 3,14 \cdot 4 = 12,56 \text{ mm}$
d_o	$= Z \cdot m$	$= t \cdot Z / \pi$	$= \pi \cdot m \cdot Z / \pi = 4 \cdot 30 = 120 \text{ mm}$
d_k	$= d_o + 2m = (Z+2) \cdot m$	$= d_o + 0,6t$	$= 120 + 2 \cdot 4 = 128 \text{ mm}$
d_f	$= d_o - 2,33m = (Z-7/3)m$	$= d_o - 0,8t$	$= 120 - 2,33 \cdot 4 = 110,68 \text{ mm}$
h_k	$= 1,0 \cdot m$	$= 0,3 \cdot t$	$= 4 \text{ mm}$
h	$= 2,167 \cdot m$	$= 0,7 \cdot t$	$= 2,167 \cdot m = 8,788 \text{ mm}$
h_f	$= 1,167 \cdot m$	$= 0,4 \cdot t$	$= 1,167 \cdot m = 4,788 \text{ mm}$
s	$= 1,52 \cdot m$	$= 39/80 \cdot t$	$= 1,52 \cdot 4 = 6,08 \text{ mm}$
ℓ	$= 1,62 \cdot m$	$= 41/80 \cdot t$	$= 1,62 \cdot 4 = 6,48 \text{ mm}$
a	$= \frac{d_{o1} + d_{o2}}{2}$ $= \frac{Z_1 + Z_2}{2} \cdot m$		Έάν $Z_2 = 15$ $= \frac{30+15}{2} \cdot 4 = 90 \text{ mm}$
i	$= Z_2 / Z_1$		$= 15/30 = 0,5$

Από τον πρώτο τύπο του πίνακα 2.1 βλέπουμε ξανά ότι το module και το βήμα συνδέονται μέσω του π , οπότε είναι εύκολο να βρούμε τα κύρια χαρακτηριστικά και από το βήμα το όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα.

2.4 Βασικός νόμος της οδόντωσης

α) Προϋπόθεση για την ομοιόμορφη κίνηση ενός ζεύγους οδοντωτών τροχών είναι η σταθερή σχέση των γωνιακών ταχυτήτων του κινητηρίου και του κινουμένου τροχού, αυτό σημαίνει μια σταθερή σχέση μετάδοσης. Γι' αυτό σύμφωνα με τους νόμους της κινηματικής πρέπει η μορφή του δοντιού και η κίνηση να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις.

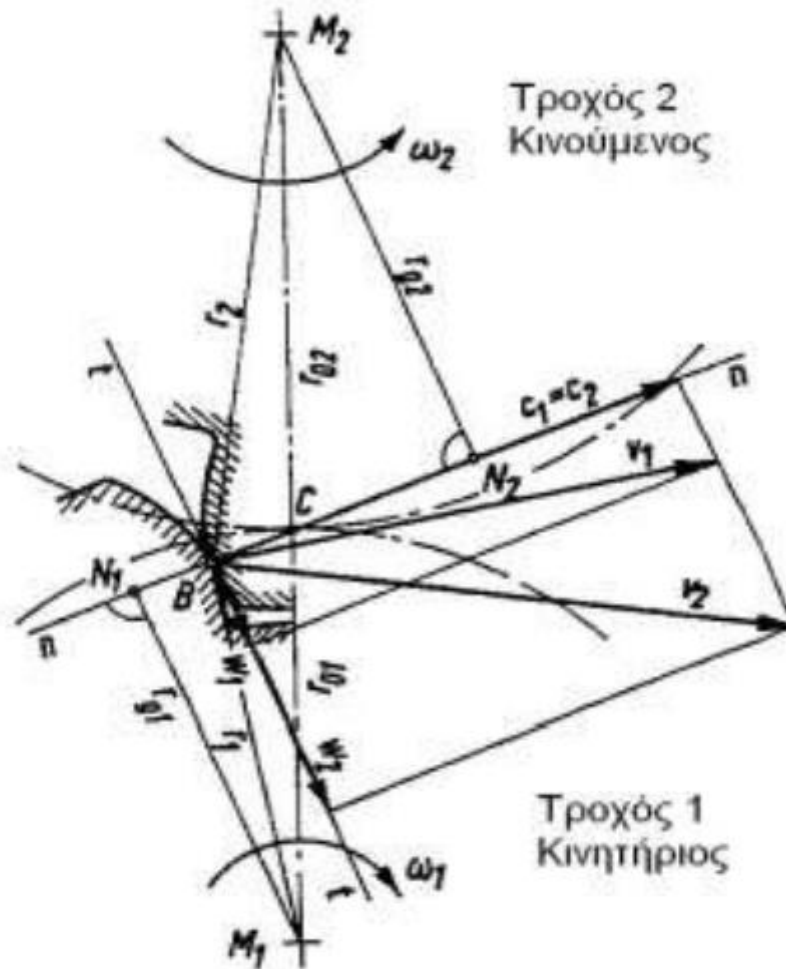
β) Σχέση ταχυτήτων.

Για να βρίσκονται οι δύο κατανομές σε επαφή (Εικόνα 11) θα πρέπει οι κατανομές στην διεύθυνση n να έχουν την ίδια ταχύτητα $c_1=c_2$ σαν συνιστώσες περιφερειακών ταχυτήτων u_1 και u_2 .

γ) Απόδειξη του νόμου της οδόντωσης.

Γενικά η σχέση μετάδοσης είναι:

$$i = n_1/n_2 = \omega_1/\omega_2 = d_{o2}/d_{o1} = r_{o2}/r_{o1} \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.3: Μεγέθη υπολογισμών [A1]

Από (σχήμα 2.3) $c_1 = \omega_1 \cdot r_{g1}$ και $c_2 = \omega_2 \cdot r_{g2}$ όπου ω_1, ω_2 γωνιακές ταχύτητες. Θα πρέπει εδώ να είναι $c_1 = c_2$.

Από την ομοιότητα των τριγώνων CM_1N_1 και CM_2N_2 προκύπτει:

$$r_{g2}/r_{g1} = r_{02}/r_{01} \quad \text{και} \quad \omega_1/\omega_2 = r_{02}/r_{01} \quad (2.8)$$

Αυτή η σχέση είναι και ο ορισμός της σχέσης μετάδοσης:

$$i = \omega_1/\omega_2 = r_{02}/r_{01} \quad (2.9)$$

Αυτή η απόδειξη μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κάθετος στο σημείο επαφής διέρχεται πάντα από το σημείο κυλίσεως c.

Εάν κάνουμε την υπόθεση ότι η κάθετος στο σημείο επαφής δεν διέρχεται από το σημείο c τότε θα άλλαζε κάθε φορά η σχέση μετάδοσης ανάλογα με τις αποστάσεις των σημείων M_1 και M_2 και των σημείων τομής των καθέτων με την γραμμή σύνδεσης $M_1 M_2$.

Ο νόμος της οδόντωσης μας λέει ότι :

Η κάθετος στο σημείο επαφής δύο κατανομών πρέπει σταθερά να διέρχεται από το σημείο c (σημείο επαφής των αρχικών κύκλων) για να είναι σωστή (χρησιμοποιήσιμη

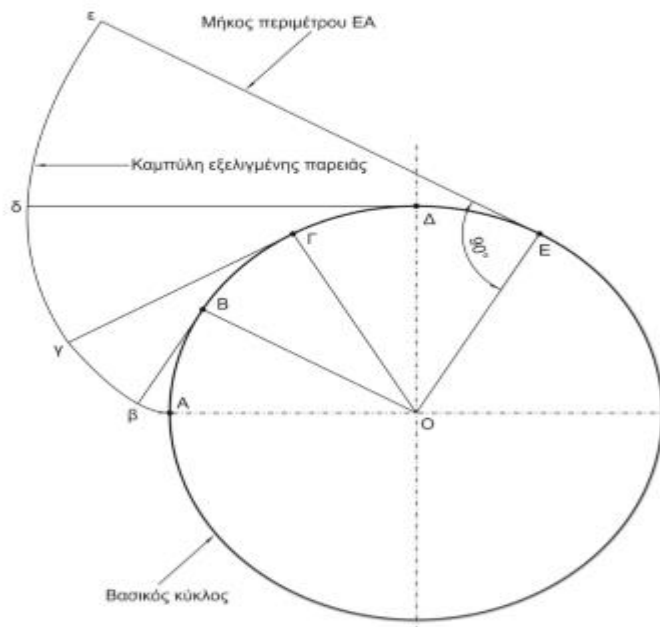
ή οδόντωση).

δ) Επακόλουθα.

Τα διαφορετικά μεγέθη των συνιστούσών των ταχυτήτων ω_1 , ω_2 μας δείχνει ότι μαζί με την κύλιση έχουμε και ολίσθηση των κατανομών μεταξύ τους.

2.5 Οδοντωτοί τροχοί με παράλληλους οδόντες

Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί είναι οι τροχοί που χρησιμοποιούνται συνήθως στις διάφορες εφαρμογές. Οι συγκεκριμένοι τροχοί έχουν ευθεία δόντια που κόβουν παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής. Η μορφή των οδόντων βασίζεται στην καμπύλη εξελιγμένης (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Η μορφή των οδόντων βασίζεται στην καμπύλη εξελιγμένης [A1]

Πρακτικά έχει αποδειχθεί ότι αυτός ο σχεδιασμός ευνοεί την κυλιόμενη επαφή αντί της συρόμενης επαφής των οδόντων. Η καμπύλη εξελιγμένης δημιουργείται κατά τη μηχανική διαμόρφωση των τροχών με τη χρήση κοφτών δοντιών με ευθείες πλευρές. Κοντά στη ρίζα του οδόντα όμως το εργαλείο ανιχνεύει ένα τροχοειδές μονοπάτι. Εξαιτίας αυτής της γεωμετρίας η επαφή μεταξύ των δοντιών δημιουργείται κατά κύριο λόγο με κύλιση. Η απόδοση των μετωπικών τροχών είναι ιδιαίτερη υψηλή δεδομένου ότι κατά την κύλιση των οδόντων παράγεται μικρότερη ποσότητα θερμότητας.

Επειδή η επαφή γίνεται ταυτόχρονα στο εσωτερικό πάχος των οδόντων δημιουργείται στους τροχούς μια συνεχής σειρά απότομων κραδασμών που προκαλούν θόρυβο και ταλαντώσεις. Επιπλέον, τα φορτία κραδασμών σε υψηλές ταχύτητες προκαλούν φθορά των οδόντων. Τόσο ο θόρυβος όσο και η φθορά στους μετωπικούς τροχούς αντιμετωπίζονται με την κατάλληλη λίπανση διότι έτσι μειώνεται η

επιφάνεια επαφής καθώς επίσης και τα αντίστοιχα φορτία κραδασμών. Οι μετωπικοί τροχοί είναι οι πιο φθινοί οδοντωτοί τροχοί στην κατασκευή και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές με παράλληλους άξονες. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες τροχών: με εξωτερικούς οδόντες, με εσωτερικούς οδόντες και με οδοντωτό πινιόν. Η πιο συνηθισμένη κατηγορία μετωπικών τροχών είναι αυτή των εξωτερικών οδόντων. Ο μεγαλύτερος τροχός ονομάζεται οδοντωτός ενώ ο μικρότερος πινιόν. Η απλούστερη διευθέτηση των μετωπικών οδοντωτών τροχών είναι ένα απλό ζεύγος τροχών που ονομάζεται απλό επίπεδο μείωσης και στο οποίο η εξωτερική περιστροφή είναι αντίθετη από την εσωτερική.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν υψηλή απόδοση στην μετάδοση ισχύος.
2. Είναι συμπαγείς και εύκολοι στην εγκατάσταση.
3. Παρουσιάζουν μεγάλη ευκολία στην παραγωγή τους.
4. Δεν παρουσιάζουν μεγάλες αξονικές ωστικές δυνάμεις.
5. Προσφέρουν σταθερή αναλογία ταχύτητας.
6. Σε αντίθεση με ιμάντες κίνησης, οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί δεν έχουν καμία ολίσθηση.
7. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί είναι ιδιαίτερα αξιόπιστοι.
8. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση υψηλών τιμών ισχύος (της τάξης των 50 000 kW)

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί είναι αρκετά θορυβώδεις όταν λειτουργούν σε μεγάλες ταχύτητες .
2. Έχουν μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τους ιμάντες.
3. Τα δόντια των μετωπικών οδοντωτών τροχών υφίστανται μεγάλη καταπόνηση από δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτά κατά την λειτουργία.
4. Οι απόσταση από τα κέντρα τους είναι περιορισμένη και αυτό διότι σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων με μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς αυτοί θα πρέπει να είναι σε εμπλοκή αλλά και σε άμεση επαφή μεταξύ τους.
5. Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.

2.6 Υλικά οδοντωτών τροχών

Όσον αφορά την παραγωγή οδοντωτών τροχών, κυρίως μεγάλης κλίμακας, ο σχεδιασμός είναι ζωτικής σημασίας. Ενώ υπάρχουν πολλά κριτήρια που πρέπει να εξετασθούν, δεν πρέπει να παραβλέπουμε την επιλογή υλικού γκραναζιών. Ας ρίξουμε μια πιο προσεκτική ματιά στους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή υλικού γκραναζιών και ορισμένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για την κατασκευή τους.

Σε ένα απλοποιημένο επίπεδο, υπάρχουν τρεις παράγοντες που είναι πιο σημαντικοί όταν επιλέγεται ένα υλικό γκραναζιών. Είναι η αντοχή, η ανθεκτικότητα και

το κόστος, το οποίο περιλαμβάνει τόσο το κόστος του υλικού όσο και το κόστος κατασκευής. Ενώ η σημασία αυτών των παραγόντων μπορεί να διαφέρει από το ένα έργο στο άλλο, το κλειδί για την επιλογή υλικού είναι η εύρεση του σωστού συνδυασμού φυσικών ιδιοτήτων που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του έργου με το χαμηλότερο κόστος.

Οι οδοντωτοί τροχοί μπορούν να κατασκευαστούν από όλα τα είδη υλικών, συμπεριλαμβανομένων πολλών τύπων χάλυβα, ορείχαλκου, χαλκού, χυτοσίδηρου, όλκιμου σιδήρου, αλουμινίου, κονιοποιημένων μετάλλων και πλαστικών. Ο χάλυβας είναι το πιο κοινό υλικό συνολικά. Ο χάλυβας είναι συχνά πιο επιθυμητός, διότι προσφέρει ένα νικηφόρο συνδυασμό υψηλού λόγου αντοχής-βάρους, υψηλής αντοχής στη φθορά, δυνατότητας βελτίωσης των φυσικών ιδιοτήτων μέσω θερμικής επεξεργασίας και ανταγωνιστική τιμή. Παρακάτω θα αναφέρουμε δύο επίσης χαρακτηριστικά υλικά που συνήθως επιλέγονται για την κατασκευή οδοντωτών τροχών. Το χυτοσίδηρο και τον ανοξειδωτο χάλυβα.

Ο χυτοσίδηρος, ο οποίος είναι κράμα σιδήρου με άνθρακα σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 2,1% κατά βάρος, είναι ένα εύκολα χυτευμένο υλικό. Είναι επίσης εξαιρετικά ανθεκτικό στη σκουριά. Ο χυτοσίδηρος, όπως αναφέραμε, δεν είναι καθαρός σίδηρος και εξαιτίας αυτού, οποιαδήποτε παρτίδα χυτοσιδήρου θα έχει διαφορετικά συστατικά. Αυτά τα διαφορετικά συστατικά συνυπάρχουν για διαφορετικούς βαθμούς αντοχής και ανθεκτικότητας. Ο χυτοσίδηρος χρησιμοποιείται στα εξαρτήματα μηχανών επειδή είναι σχετικά φθηνός, ανθεκτικός στη σκουριά και εύκολος στη μορφοποίηση, αν και μπορεί να είναι είτε απίστευτα ισχυρός ή απίστευτα αδύνατος, ανάλογα με το μείγμα.

Ο ανοξειδωτος χάλυβας είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα-χρωμίου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο 10,5% που χρησιμοποιείται συνήθως στη χύτευση οδοντωτών τροχών. Ένα μεταλλικό κράμα είναι ένα μέταλλο αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα ξεχωριστά στοιχεία που λιώνουν μαζί. Όπως και ο χυτοσίδηρος, είναι εξαιρετικά ανθεκτικός στην οξείδωση. Είναι επίσης ανθεκτικός στις εκδορές και άλλες αδυναμίες. Η αντίσταση του ανοξειδωτου χάλυβα στη σκουριά και τις ουλές οφείλεται στην έγχυση χρωμίου που αναφέραμε. Η ανθεκτικότητα, η αντοχή και η αντοχή στη διάβρωση καθιστούν το ανοξειδωτο χάλυβα δημοφιλές υλικό για γρανάζια. Παρουσιάζουν επιπλέον και υψηλότερη μηχανική αντοχή. Ωστόσο, είναι πιο σκληροί από τους κοινούς χάλυβες και γι' αυτό πιο δυσκατέργαστοι. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν επίσης χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τους κοινούς χάλυβες.

Όπως παρατηρούμε, ο χάλυβας και τα είδη χαλύβων είναι τα πιο συνηθισμένα υλικά κατασκευής οδοντωτών τροχών. Θα ήταν χρήσιμο να αναφέρουμε ότι οι χάλυβες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία τους, την κρυσταλλική τους δομή ή και την τελική τους χρήση. Ως προς την χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται ως εξής:

- Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (αγγλ. carbon steels). Περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται πολύ και συγκολλούνται εύκολα. Με βάση τον περιεχόμενο άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:
 1. χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες (αγγλ. mild steels· $C < 0,30\%$)
 2. χάλυβες μέτριου άνθρακα (αγγλ. medium carbon steels· $0,30\% < C <$

0,60%)

3. χάλυβες υψηλού άνθρακα (αγγλ. high carbon steels· $0,60\% < C < 1,00\%$)
4. χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα (αγγλ. ultra-high carbon steels· $1,00\% < C < 2,00\%$)

- Κραματωμένοι χάλυβες (αγγλ. alloy steels), δηλ. κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα. Τέτοιοι είναι οι:

1. ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες ή χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης, που περιέχουν συνήθως χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νικέλιο κ.λπ. σε συνολικό ποσοστό που δεν ξεπερνά το 10 % κ.β., όπως π.χ. οι εργαλειοχάλυβες ($0,7\% < C < 1,4\%$, $Mn < 0,3\%$)
2. ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες ή χάλυβες υψηλής κραμάτωσης, όπως οι ανοξειδωτοι χάλυβες ($Cr > 10,5\%$), οι ταχυχάλυβες ($C \sim 0,7\%$, $Cr \sim 4,0\%$, $5,0\% < Mo < 10\%$, $1,5\% < W < 18,0\%$, $0\% < Co < 8,0\%$), κ.λπ.

Ανάλογα με την περαιτέρω κατεργασία τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- χάλυβες διαμόρφωσης, που υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση, κ.λπ.)
- χυτοχάλυβες, που παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή πλινθωμάτων («χελωνών») και επαναχυτεύονται για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων

Τέλος, συχνά γίνεται λόγος για φερριτικούς, περλικούς, μαρτενσιτικούς, μπαινιτικούς κ.λ.π. χάλυβες ανάλογα με την κύρια κρυσταλλική φάση τους.

Αν υποθέσουμε ό,τι τα βασικά μας κριτήρια για την επιλογή υλικού είναι η μεταφορά ισχύος ή ο αριθμός των στροφών ή και τα δύο,θα δώσουμε κάποια παραδείγματα που συνηθίζονται στο εμπόριο. Για μικρή ισχυ και μικρό αριθμό στροφών όπως για παράδειγμα ανυψωτικά μηχανήματα,θα επιλεγουμε πλαστικό,χαλυβα(St) ή χυτοσίδηρο(GG). Το ίδιο θα κάναμε για μεσαία ισχυ και μεσαίο αριθμό στροφων για παράδειγμα σε μικρές εργαλειομηχανές ενώ σαυτή την περίπτωση θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε και χυτοχάλυβα(GS). Για μεγάλη ισχύ και μεγάλο αριθμό στροφών,για κινήσεις μηχανών γενικά, χρησιμοποιούμε συνήθως βελτιωμένους χάλυβες αλλά σε κάποιες περιπτώσεις χυτοσίδηρο και χυτοχάλυβα. Για υψηλές απαιτήσεις όπως για παράδειγμα αυτοκίνητα, αεροπλάνα και πλοία, συνήθως χρησιμοποιούμε σκληρυμένους και βελτιωμένους χάλυβες και χάλυβες επανθράκωσης.

Να αναφέρουμε ό,τι για εξοικονόμηση δαπανηρού χάλυβα υψηλής ποιότητας και με δυνατότητα θερμικής επεξεργασίας (π.χ. βαφή) της οδόντωσης, η στεφάνη των μεγάλων οδοντωτών τροχών κατασκευάζεται από διαφορετικό υλικό ποιότητας (στεφάνη επίστεψης). Όπως και ό,τι το υλικό του πινιόν, λόγω περισσότερων στροφών και μεγάλων τριβών, πρέπει να είναι πιο σκληρό από το υλικό του τροχού.

Τέλος,στη δική μας περίπτωση,οι διαστάσεις πινιόν και τροχού είναι ίδιες και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν,πέρα από το χάλυβα,είναι το ανθρακόνημα στο οποίο θα αναφερθούμε πιο ειδικά σε παρακάτω κεφάλαιο καθώς μέχρι στιγμης στο εμπόριο δεν είναι τόσο διαδεδομένο σαν κατασκευαστικό υλικό οδοντωτών τροχών πέρα από μικρούς οδοντωτούς τροχούς σε drones και κάποιες προσπάθειες και πειράματα που γίνονται όπως στο Gifu University της Ιαπωνίας όπου κατασκεύασαν πλαστικό οδοντωτό τροχό ενισχυμένο με ανθρακόνημα.

2.7 Βλάβες δοντιών

Σε έναν μηχανισμό η καταστροφή ή αστοχία ενός τροχού έχει καταστρεπτικές επιπτώσεις για τη λειτουργία του, διότι σταματάει ο μηχανισμός για να αντικατασταθεί ο τροχός που αστόχησε. Συνήθως αυτό απαιτεί αφαίρεση και πολλών άλλων εξαρτημάτων πλην του τροχου. Μερικές από τις αιτίες που προκαλούν αστοχία των τροχών είναι:

- Η υπερφόρτιση: συνήθως από κρουστικά φορτία.
- Η υπερβολική ταχύτητα
- Η ακατάλληλη λίπανση
- Τα ξένα σωματίδια
- Η ακατάλληλη θερμική κατεργασία
- Η ακατάλληλη κατασκευή
- Η ακατάλληλη συναρμολόγηση
- Η κακή σχεδιομελέτη

Μία μηχανή έχει καλή και αποδοτικότερη λειτουργία όταν λειτουργεί καλύτερα ή και ίδια με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή της. Για τους οδοντωτούς τροχούς υπάρχουν διάφορα κριτήρια που είναι ενδεικτικά της καλής και αποδοτικής λειτουργίας τους όπως είναι:

- Η απώλεια ισχύος
- Οι ταλαντώσεις

Μία ή περισσότερες από τις ανωτέρω αναφερθείσες αιτίες δημιουργούν προβλήματα στους τροχούς, οι οποίοι έτσι δεν μπορούν να αποδώσουν την αναμενόμενη λειτουργία. Τα προβλήματα αυτά αποτελούν τις βλάβες των οδοντωτών τροχών. Οι βλάβες αυτές χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, καθεμιά των οποίων διαιρείται σε διάφορους τύπους:

- Φθορά
 1. Καταστροφή της επιφανείας του οδόντος λόγω υπέρξεως, ξένων σωματιδίων στο λιπαντικό.
 2. Καταστροφή της κατατομής λόγω χημικών αντιδράσεων, εξαιτίας αποσύνθεσης του λιπαντικού ή από πρόσθετα χημικά αντιδραστήρια που προκαλούν τη φθορά αυτή.
 3. Αποτυχημένη λίπανση στη θέση επαφής των κατατομών και δημιουργία φθοράς Scoring
- Πλαστική παραμόρφωση

Υψηλά φορτία προκαλούν πλαστική παραμόρφωση στους οδόντες η οποία συνήθως συμβαίνει σε μαλακά ή μεσαίας σκληρότητας υλικά. Αρχίζει μάλλον ως Scoring αλλά εξ αιτίας της καταστροφής της κατατομής και των αναπτυσσομένων δυναμικών φορτίων εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση στους οδόντες
- Κόπωση των κατανομών (pitting) λόγω επιφανειακής καταπόνησης
 1. Οι αρχικές εκκοιλανσεις. Αυτές συνήθως εμφανίζονται σε θέσεις υψηλών συγκεντρώσεων τάσεως και οφείλονται σε τοπική-φυσιολογική φθορά των επιφανειών
 2. Οι καταστρεπτικές εκκοιλανσεις. Εδώ οι δημιουργούμενοι λάκκοι είναι πολύ

μεγαλύτεροι από τους προηγούμενους και προκαλούν πάντοτε καταστροφή της κατατομής .Είναι φανερό ότι δεν υπάρχει ελπίδα διόρθωσης ή επαναφοράς της κατατομής.

- Θραύση

Καταυτήν ολόκληρος ο οδόντας ή σημαντικό τμήμα του αποχωρίζεται από τον τροχό. Μπορεί να οφείλεται σε στιγμιαία υπερφόρτιση του οδόντος ή σε κρουστικό φορτίο ή το πιθανότερο να οφείλεται σε φαινόμενα κοπώσεως λόγω συνεχούς επαναλαμβανόμενων φορτίσεων ανω των ορίων δυναμικής ή χρονικής αντοχής του υλικού. Η θράυση οδόντος αρχίζει με ένα ελαφρύ ράγισμα στην επιφάνεια. Πρέπει να σημειωθεί ότι στα σημεία της κατατομής του οδόντος που αντιστοιχούν στις θέσεις του τμήματος επαφών που γίνονται αλλαγές φορτίσεως , εμφανίζονται ραβδώσεις εκ τις υπερφόρτησης των σημείων αυτών λόγω αναπτυσσόμενων φορτίων.

2.8 Φθορές λόγω επιφανειακής καταπόνησης

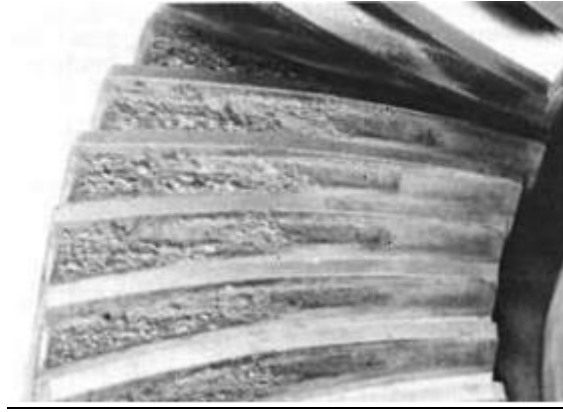
Ο όρος φθορά είναι ένας γενικός όρος που περιγράφει την απώλεια του υλικού από την επιφάνεια επαφής ενός οδοντωτού τροχού. Υπάρχουν διάφοροι βαθμοί φθοράς οι οποίοι μετρώνται σε χιλιοστά της ίντσας ανά εκατομμύριο ή δέκα εκατομμύρια κύκλους και βαθμονομείται από ελαφριά ,μέτρια μέχρι υπέρμετρη. Εμείς θα αναφέρουμε το είδος φθορας που δημιουργεί κάτι σα λακούβες στην επιφάνεια του δοντιού γ'αυτό και ονομάζεται pitting στην ξένη βιβλιογραφία.

Η φθορά αυτού του είδους είναι μια μορφή επιφανειακής καταπόνησης και μπορεί να εμφανιστεί αμέσως μετά την έναρξη της λειτουργίας του τροχού και διαχωρίζεται στις παρακάτω υποκατηγορίες.

- Initial (corrective) PITTING.
- Normal PITTING
- Destructive PITTING

INITIAL (CORRECTIVE) PITTING:

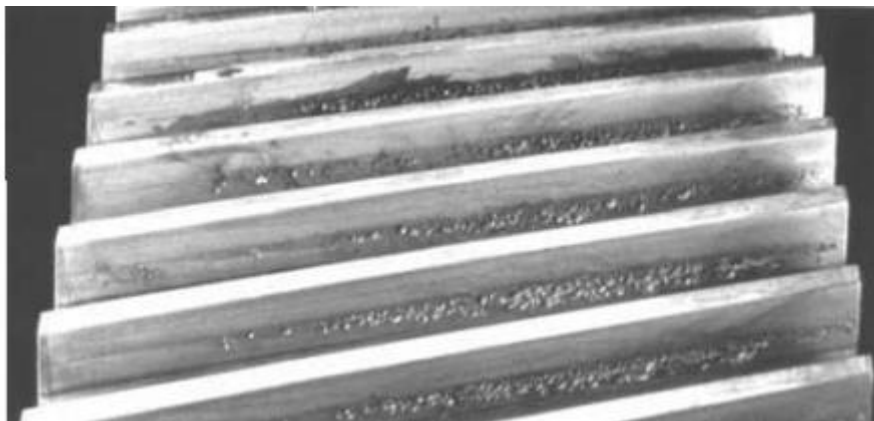
Προκαλείται όταν τοπικά εμφανίζονται υψηλές πιέσεις στην επιφάνεια του δοντιού λόγω επαφής ανόμοιων επιφανειών. Το αρχικό στάδιο αυτής της φθοράς συνήθως εμφανίζεται στο μέσω της πλευράς του δοντιού σε μια πολύ μικρή επιφάνεια σε όλο το μήκος του ή ακριβώς λίγο πιο κάτω από το κέντρο (εικόνα 2.9). Συνήθως εμφανίζεται σε οδοντωτούς τροχούς που έχουν υποστεί βαφή σε βάθος και μερικές φορές εμφανίζεται σε τροχούς που έχουν υποστεί επιφανειακή βαφή. Ο σχηματισμός αυτού του τύπου φθοράς φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η αρχή της αποκόλλησης γίνεται στην αιχμή της επιφάνειας που έχει αποκολληθεί αρχικά η ρωγμή προχωράει προς τα μέσα με μικρή γωνία όσον αφορά το βάθος. Συγχρόνως η ρωγμή διευρύνεται σχηματίζοντας το τελικό σχήμα της επιφάνειας που φαίνεται με την μορφή βέλους. Όπου είναι απαραίτητο αυτή η φθορά μπορεί να μειωθεί με ειδική κατεργασία της επιφάνειας αλλά και με σωστή επιλογή των στρωφών αλλά και των φορτίων λειτουργίας. Σε ειδικές περιπτώσεις τα δόντια μπορούν να επικαλυφτούν με χαλκό η άργυρο για να μειωθεί η έκταση αυτού του φαινομένου.



Εικόνα 2.9: Φθορά Initial Pitting [Γ3]

NORMAL DEDENDUM PITTING:

Τύπος φθοράς η οποία εμφανίζεται σε οδοντωτούς τροχούς που έχουν υποστεί βαφή σε βάθος και εργάζονται υπό πλήρες φορτίο. Τότε εμφανίζουν στην επιφάνεια του δοντιού τους μικρές έως μεσαίου μεγέθους αυλακιές οι οποίες καλύπτουν όλο το κάτω μέρος της πλευράς του δοντιού (εικόνα 2.10). Καθώς συνεχίζεται η λειτουργία κάτω από αυτές τις συνθήκες η φθορά των άκρων των αυλακώσεων συνεχίζεται μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο και έπειτα σταματά. Η φθορά στο κάτω μέρος του δοντιού συμβαίνει όταν η τιμή του φορτίου του δοντιού είναι κοντά στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή επιφανειακής φόρτισης που μπορεί να λάβει. Το κάτω μέρος του δοντιού είναι περισσότερο ευάλωτο σε αυτό το φαινόμενο εξαιτίας της προτιμητέας φύσης των προσανατολισμών των ρωγμών κατά μήκος του προφίλ του δοντιού.



Εικόνα 2.10: Φθορά NORMAL DEDENDUM PITTING [Γ3]

DESTRUCTIVE OR PROGRESSIVE PITTING:

Αυτό το στάδιο της φθοράς συνήθως κάνει την εμφάνιση του στην περιοχή κάτω από την κεντρική νοητή γραμμή της πλευρικής επιφάνειας του δοντιού στο κάτω μέρος του δοντιού και σταδιακά αυξάνει σε μέγεθος αλλά και στον αριθμό των αυλακώσεων μέχρι την ολοκληρωτική καταστροφή της επιφάνειας (εικόνα 2.11). Αυτό το στάδιο φθοράς είναι τόσο σοβαρή όσο και η μορφή του Initial (corrective) PITTING στην έναρξη της λειτουργίας ωστόσο καθώς ο χρόνος περνάει σε αυτό το στάδιο της φθοράς η

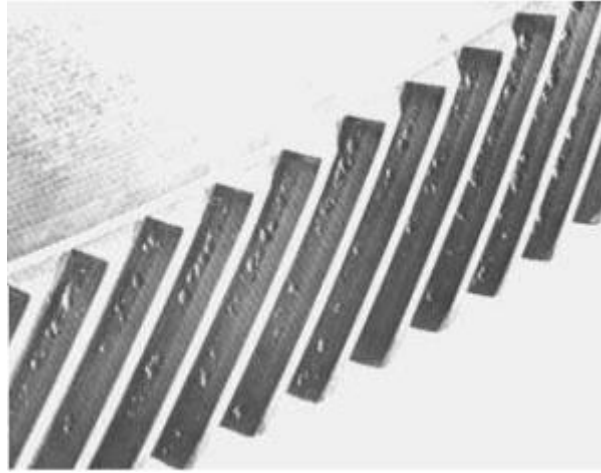
σοβαρότητα του φαινομένου εξελίσσεται και ξεπερνά κατά πολύ την δριμύτητα που είχε το στάδιο του Initial (corrective) PITTING. Η φθορά αυτού του σταδίου συνήθως οφείλεται στην εφαρμογή μεγάλου φορτίου στην επιφάνεια του δοντιού συνθήκες οι οποίες επιταχύνουν την αρχική εξέλιξη του φαινομένου. Αν η σκληρότητα του δοντιού είναι μέσα σε καθορισμένες τιμές τότε η υπερφόρτιση του οδοντωτού τροχού συνήθως προκαλεί αυτή την φθορά.



Εικόνα 2.11: ολοκληρωτική καταστροφή από DESTRUCTIVE [Γ3]

SPALLING:

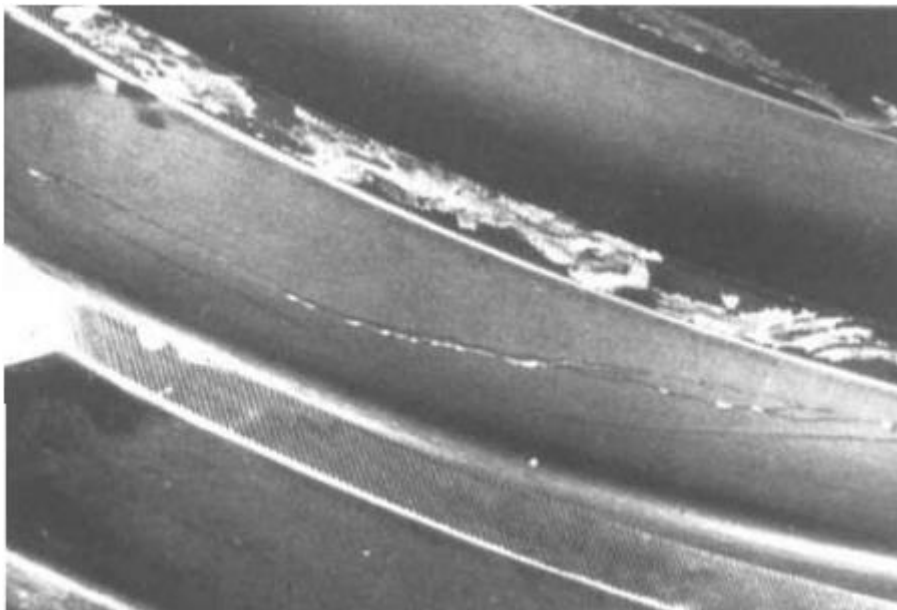
Είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αποκόλληση υλικού από μια μεγάλη περιοχή στην επιφάνεια του δοντιού (εικόνα 2.12). Σε οδοντωτούς τροχούς που έχουν υποστεί βαφή σε βάθος αλλά και σε πιο μαλακά υλικά εμφανίζεται μια περιοχή με πολλές συνδεδεμένες και αλληλοκαλυπτόμενες αυλακώσεις σε μια περιοχή. Συνήθως ο πυθμένας των θρυμμάτων διατρέχει κατά μήκος την πλευρική επιφάνεια του κάθε δοντιού. Αυτό το φαινόμενο προκαλείται από εφαρμογή υψηλών πιέσεων το οποίο σχετίζεται με προβληματικές περιοχές στην επιφάνεια του δοντιού.



Εικόνα 2.12: αποκόλληση υλικού (SPALLIN) [Γ3]

CASE CRUSHING:

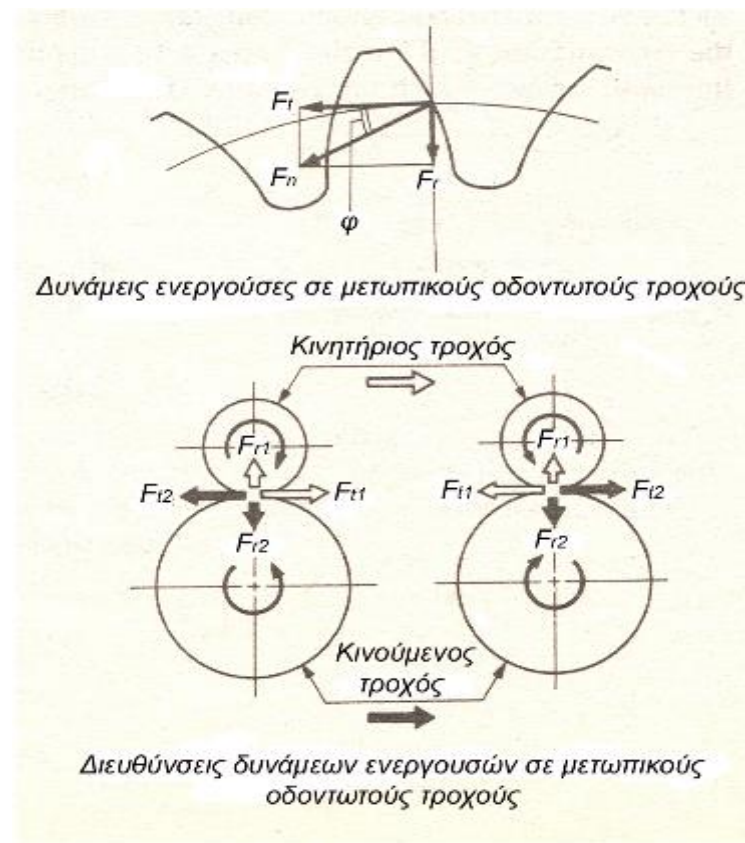
Είναι μια ακόμη μορφή θρυμματισμού η οποία σχετίζεται με την μεγάλη φόρτιση οδοντωτών τροχών που έχουν υποστεί βαφή σε βάθος (εικόνα 2.13). Εμφανίζονται σαν διαμήκεις ρωγμές στην πλευρική επιφάνεια του δοντιού οι οποίες στην συνέχεια μπορούν να εξελιχτούν σε αποκόλληση υλικού. Συνήθως συμβαίνουν τυχαία χωρίς προειδοποίηση σε ένα ή δυο δόντια του πινιόν ή του οδοντωτού τροχού. Η ρωγμές αυτές διαφέρουν από τις συνήθεις αυλακώσεις στο γεγονός ότι δεν εκτείνονται μόνο κάτω από το σκληρό περίβλημα του δοντιού αλλά εισχωρούν σε όλο το βάθος του δοντιού ακόμη και στον μαλακό πυρήνα του υλικού. Οι ρωγμές στο περίβλημα του δοντιού συνήθως είναι κάθετες στην επιφάνεια. Η αστοχία μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει επαρκές πάχος στο περίβλημα του δοντιού ή η σκληρότητα στον πυρήνα του δοντιού είναι ανεπαρκής.



Εικόνα 2.13: Θρυμματισμός (CASE CRUUSHING) [Γ3]

2.9 Δυνάμεις μετωπικών οδοντωτών τροχών

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα δείξουμε τις δυνάμεις που ενεργούν πάνω στους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς. Στη (σχέση 2.10) βλέπουμε τον τύπο της ροπής στρέψης. Στο (σχήμα 2.6) βλέπουμε τις διευθύνσεις των δυνάμεων που ενεργούν πάνω στον κινητήριο και κινούμενο τροχό, ενώ παρακάτω βλέπουμε τις μονάδες και την ανάλυση των δυνάμεων που ασκούνται. Τέλος, παρατήθεται ο (πίνακας 2) που μας δείχνει τις ενεργούσες δυνάμεις ανάλογα με τον τύπο γραναζιών και πώς αυτές αναλύονται.



Σχήμα 2.6 : διευθύνσεις των δυνάμεων στον κινούμενο τροχό [7]

$$M_t(kp*cm) = 71620 \frac{N_{(HP)}}{n_1 n_1(rpm)} \quad (2.10)$$

Πίνακας 2.2: ενεργούσες δυνάμεις ανάλογα με τον τύπο γραναζιών και πώς αυτές αναλύονται. [7]

Τύποι γραναζιών		Εφαπτομενική δύναμη, F_t	Αξονική δύναμη, F_a	Ακτινική δύναμη, F_r
Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί		$F_t = \frac{2M_t}{d_t}$	----	$F_r = F_t \tan \varphi$
Ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί		$F_t = \frac{2M_t}{d_t}$	$F_a = F_t \tan \psi$	$F_r = F_t \frac{\tan \varphi}{\cos \psi}$
Μετωπικοί κωνικοί τροχοί		$F_t = \frac{2M_t}{d_m}$	$F_a = F_t \tan \varphi \sin \psi$	$F_r = F_t \tan \varphi \cos \psi$
Spiral κωνικοί τροχοί				
Ατέρμονας - κορώνα	Ατέρμονας (κινήτηριος)	$F_t = \frac{2M_t}{d_{o1}}$	$F_a = F_t \frac{\cos \varphi_n \cos \psi - \mu \sin \psi}{\cos \varphi_n \sin \psi + \mu \cos \psi}$	$F_r = F_t \frac{\sin \varphi_n}{\cos \varphi_n \sin \psi + \mu \cos \psi}$
	Κορώνα (κινούμενο)	$F_t \frac{\cos \varphi_n \cos \psi - \mu \sin \psi}{\cos \varphi_n \sin \psi + \mu \cos \psi}$	$F_a = F_t$	
Διασταυρούμενοι τροχοί	Κινήτηριο γρανάτζι	$F_t = \frac{2M_t}{d_{o1}}$		$F_r = F_t \frac{\sin \varphi_n}{\cos \varphi_n \cos \psi + \mu \cos \psi}$
	Κινούμενο γρανάτζι	$F_t \frac{\cos \varphi_n \sin \psi - \mu \cos \psi}{\cos \varphi_n \cos \psi + \mu \sin \psi}$	$F_a = F_t$	

2.10 Κάμψη μετωπικών οδ. τροχών κατά LEWIS

Το 1893, ο Lewis θεωρώντας το δόντι ενός οδοντωτού τροχού μία καμπτόμενη δοκό με μεταβλητό ύψος, υπολόγισε τις καμπτικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη φόρτισή του. Πιο συγκεκριμένα, ο Lewis, δέχτηκε ότι το δόντι έχει σχήμα μιάς παραβολής σταθερής τάσης, η οποία είναι εγγεγραμμένη στην κατανομή της εξελιγμένης του δοντιού. Η παραβολή αυτή εφάπτεται των ακτίνων καμπυλότητας της βάσης του δοντιού στα σημεία a και b και έχει κορυφή το σημείο που τέμνεται η F_n με τη γραμμή συμμετρίας του δοντιού (σχήμα 2.7). Αν το πάχος του δοντιού είναι b, τότε η ορθή τάση λόγω κάμψης στη βάση του δοντιού φαίνεται στη (σχέση 2.11) παρακάτω:

$$\sigma_b = \frac{M_t}{I} = \frac{(F_t * L)}{b * t^3 / 12} = \frac{6 * L * F_t}{b * t^2} \quad (2.11)$$

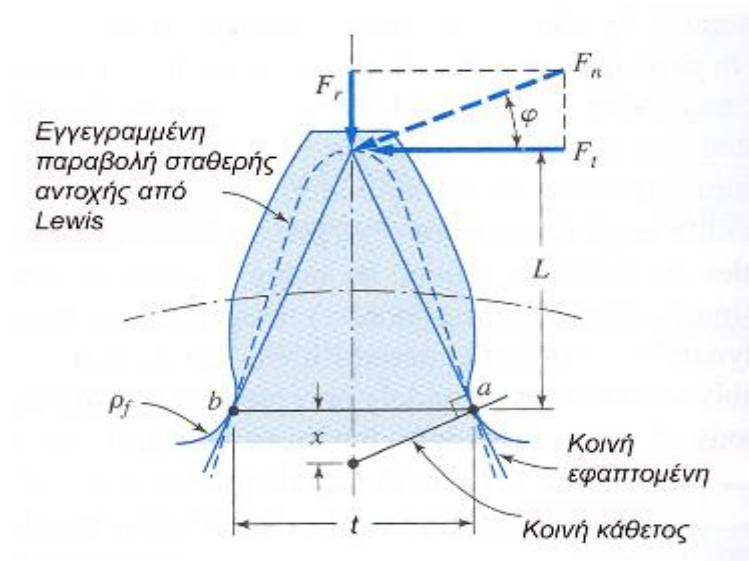
M_t = ροπή κάμψης

I = ροπή αδρανείας

b = πάχος δοντιού

t = πλάτος δοντιού

L = ύψος από το σημείο a μέχρι το σημείο που ασκείται η δύναμη (εικόνα 2.7)



Σχήμα 2.7: Παραβολή σταθερής τάσης [7]

Οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στο δόντι λόγω της δύναμης F_r αγνοούνται λόγω του μικρού μεγέθους συγκριτικά με τις καμπτικές τάσεις.

Και λύνοντας ως προς F_t , προκύπτει:

$$F_t = b * \sigma_b * \left(\frac{t^2}{6 * L} \right) \quad (2.12)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέρη με το *module*, έχουμε:

$$F_t = m * b * \sigma_b * \left(\frac{t^2}{m * 6 * L} \right) \quad (2.13)$$

Και αφού ο παράγοντας *lewis*, όπως ονομάζεται, είναι:

$$Y = \frac{t^2}{m * 6 * L} \quad (2.14)$$

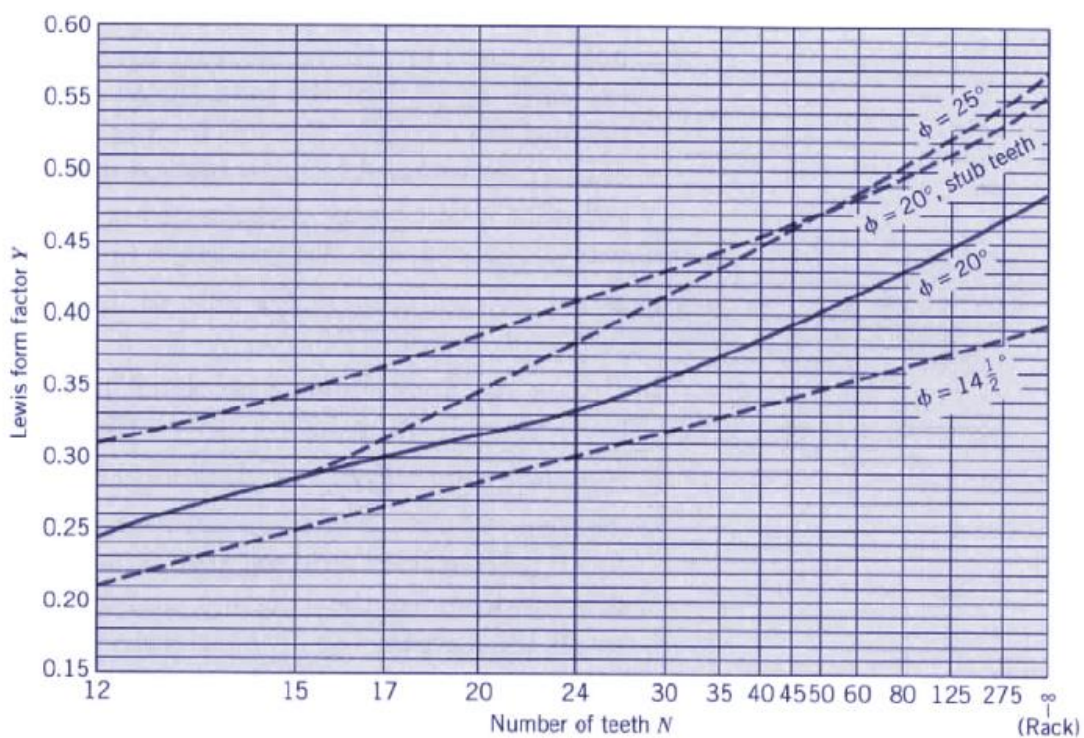
Από τις σχέσεις (2.13) και (2.14), έχουμε:

$$F_t = m * b * \sigma_b * Y \quad (2.15)$$

Και όταν η τάση φτάσει την επιτρεπόμενη τάση κάμψης, ονομάζεται τάση δοκού (beam stress) και έχουμε:

$$F_t = S_b \quad (2.16)$$

Τον παράγοντα Y μπορούμε να τον πάρουμε και από το παρακάτω γράφημα (εικόνα 2.14) . Στη δική μας περίπτωση έχουμε $\phi=20^\circ$ και $N=14$ άρα το $Y=0.28$.



Εικόνα 2.14: Παράγοντας Y [7]

Το παραπάνω αποτέλεσμα για το Y , επιβεβαιώνεται και στον (πίνακα 2.3) που βλέπουμε παρακάτω, κοιτάζοντας για $N=14$ και $\Phi=20^\circ$. Βλέπουμε και εδώ ότι $Y=0.276$.

Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα για το Υ [7]

Αριθμός δοντιών	Φορτίο στην κεφαλή								Φορτίο στη μύτη			
	14.5°		20°		20° βραθιά		25°		14.5°		20°	
	Υ=πγ	γ	Υ=πγ	γ	Υ=πγ	γ	Υ=πγ	γ	Υ=πγ	γ	Υ=πγ	γ
10	0.176	0.096	0.201	0.064	0.261	0.083	0.238	0.076				
11	0.192	0.061	0.226	0.072	0.289	0.092	0.259	0.082				
12	0.210	0.067	0.246	0.078	0.311	0.099	0.277	0.088	0.366	0.113	0.416	0.132
13	0.223	0.071	0.264	0.084	0.324	0.103	0.293	0.093	0.377	0.120	0.443	0.141
14	0.236	0.076	0.276	0.088	0.339	0.108	0.307	0.098	0.399	0.127	0.468	0.149
16	0.246	0.078	0.289	0.092	0.349	0.111	0.320	0.102	0.416	0.132	0.490	0.156
18	0.256	0.081	0.296	0.094	0.360	0.115	0.332	0.106	0.430	0.137	0.503	0.160
17	0.264	0.084	0.302	0.096	0.368	0.117	0.342	0.109	0.446	0.142	0.512	0.163
18	0.270	0.086	0.308	0.098	0.377	0.120	0.352	0.112	0.459	0.146	0.522	0.166
19	0.277	0.088	0.314	0.100	0.386	0.123	0.361	0.115	0.471	0.150	0.534	0.170
20	0.283	0.090	0.320	0.102	0.393	0.126	0.369	0.117	0.481	0.153	0.544	0.173
21	0.289	0.092	0.326	0.104	0.399	0.127	0.377	0.120	0.490	0.156	0.553	0.176
22	0.292	0.093	0.330	0.105	0.404	0.129	0.384	0.122	0.496	0.158	0.559	0.178
23	0.296	0.094	0.333	0.106	0.408	0.130	0.390	0.124	0.502	0.160	0.565	0.180
24	0.302	0.096	0.337	0.107	0.411	0.131	0.396	0.126	0.509	0.162	0.572	0.182
26	0.306	0.097	0.340	0.108	0.416	0.132	0.402	0.128	0.516	0.164	0.580	0.185
28	0.308	0.098	0.344	0.109	0.421	0.134	0.407	0.130	0.522	0.166	0.584	0.186
27	0.311	0.099	0.348	0.111	0.426	0.136	0.412	0.131	0.528	0.168	0.588	0.187
28	0.314	0.100	0.352	0.112	0.430	0.137	0.417	0.133	0.534	0.170	0.592	0.188
29	0.316	0.101	0.355	0.113	0.434	0.138	0.421	0.134	0.537	0.171	0.595	0.191
30	0.318	0.101	0.358	0.114	0.437	0.139	0.425	0.135	0.540	0.172	0.606	0.193
31	0.320	0.102	0.361	0.115	0.440	0.140	0.429	0.137	0.544	0.176	0.611	0.194
32	0.322	0.102	0.364	0.116	0.443	0.141	0.433	0.138	0.547	0.174	0.617	0.196
33	0.324	0.103	0.367	0.117	0.446	0.142	0.436	0.139	0.550	0.175	0.623	0.198
34	0.326	0.104	0.371	0.118	0.447	0.142	0.440	0.140	0.553	0.176	0.628	0.200
36	0.327	0.104	0.373	0.119	0.449	0.143	0.443	0.141	0.556	0.177	0.633	0.201
38	0.329	0.105	0.377	0.120	0.451	0.144	0.446	0.142	0.559	0.178	0.639	0.203
37	0.330	0.105	0.380	0.121	0.454	0.145	0.449	0.143	0.563	0.179	0.645	0.205
38	0.333	0.106	0.384	0.122	0.456	0.146	0.452	0.144	0.566	0.180	0.650	0.207
39	0.335	0.107	0.386	0.123	0.457	0.146	0.454	0.145	0.568	0.181	0.655	0.208
40	0.336	0.107	0.389	0.124	0.459	0.146	0.457	0.145	0.570	0.181	0.659	0.210
43	0.339	0.108	0.397	0.126	0.467	0.149	0.464	0.148	0.574	0.183	0.668	0.213
46	0.340	0.108	0.399	0.127	0.468	0.149	0.468	0.148	0.579	0.184	0.678	0.216
60	0.346	0.110	0.408	0.130	0.474	0.151	0.477	0.152	0.588	0.187	0.694	0.221
66	0.352	0.112	0.415	0.132	0.480	0.153	0.484	0.154	0.596	0.190	0.704	0.224
80	0.355	0.113	0.421	0.134	0.484	0.154	0.491	0.156	0.603	0.192	0.713	0.227
86	0.358	0.114	0.425	0.135	0.488	0.155	0.496	0.158	0.607	0.193	0.721	0.230
70	0.360	0.115	0.429	0.137	0.493	0.157	0.501	0.159	0.610	0.194	0.728	0.232
76	0.361	0.115	0.433	0.138	0.496	0.158	0.505	0.161	0.613	0.195	0.735	0.234
80	0.363	0.116	0.436	0.139	0.499	0.159	0.509	0.162	0.615	0.196	0.739	0.235
80	0.366	0.117	0.442	0.141	0.503	0.160	0.516	0.164	0.619	0.197	0.747	0.238
100	0.368	0.117	0.446	0.142	0.506	0.161	0.521	0.166	0.622	0.198	0.755	0.240
160	0.375	0.119	0.458	0.146	0.518	0.165	0.537	0.171	0.635	0.202	0.778	0.248
200	0.378	0.120	0.463	0.147	0.524	0.167	0.545	0.173	0.640	0.204	0.787	0.251
300	0.382	0.122	0.471	0.150	0.534	0.170	0.554	0.176	0.650	0.207	0.801	0.255
Κανόνας	0.390	0.124	0.484	0.154	0.550	0.175	0.566	0.180	0.660	0.210	0.823	0.262

Τέλος, παραθέτουμε τον παρακάτω (πίνακα 2.4) για να δούμε την αντοχή σε κάμψη μερικών μετάλλων και σκληρότητας κατά Brinell.

Πίνακας 2.4: Αντοχή μετάλλων σε κάμψη

Υλικό		$S_{απτοχ}$, kg/cm^2	Σκληρότητα Brinell
Χυτοσίδηρος	ASTM 25	560	174
	ASTM 35	900	212
	ASTM 50	1000	223
Χυτοχάλυβας	0.20% C χωρίς θερμική επεξεργασία	1400	180
	0.20% C με θερμική επεξεργασία	1750	250
Σφυρήλατος ανθρακοχάλυβας	SAE 1020	1250	156
	SAE 1030	1400	180
	SAE 1035	1600	190
	SAE 1040	1750	202
	SAE 1045	2100	215
	SAE 1045 (σκληρ)	2250	205
	SAE 1050 (σκληρ)	2450	223
Χαλυβοκράματα	SAE 2320	3500	225
	SAE 2345	3500	475
	SAE 3115	2600	212
	SAE 3145	3700	475
	SAE 3245	4600	475
	SAE 3430	4600	475
	SAE 4640	3800	475
SAE 6145	4750	475	
Μαγγανιούχος μπρούντζος	SAE 43 (Α STM B-147 52, 8A)	1400	100
Φωσφορούχος ορείγαλκος	SAE 65 (Α STM B-144 52, 3C)	850	100
Αλουμινούχος μπρούντζος	SAE 68 (Α STM B-148 52, 98)	1550	180
Μη μέταλλα, βακελίτης, μήκα, κλπ.		560	---

3. CAD-CAE και Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD-CAE

Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου θα μελετήσουμε λογισμικά που αφορούν τη σχεδίαση και την τεχνική μελέτη προϊόντων , βοηθώντας στην ανάλυσή και την ανάπτυξή τους.

Με την εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών στους περισσότερους τομείς της μηχανολογίας , η τελευταία , έχει γνωρίσει ραγδαία εξέλιξη τα τελευταία τριάντα περίπου χρόνια. Η εκπαίδευση αλλά και η επαγγελματική πράξη του μηχανολόγου μηχανικού έχουν αλλάξει σε μεγάλο βαθμό, όσων αφορά τα κατασκευαστικά ζητήματα καθώς η δυνατότητα “απεικόνισης” της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπως και η δυνατότητα προσομοίωσης της στατικής, δυναμικής, θερμικής ρευστοδυναμικής κλπ. συμπεριφοράς της, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και παρουσιάζουν συνεχή εξέλιξη .

➤ CAD = Computer Aided Design.

Computer Aided Design (CAD) είναι η ψηφιακή δημιουργία - σχεδίαση ενός προϊόντος, εξαρτήματος ή συναρμολογήματος , με τη βοήθεια του Η/Υ.

Ως έννοια περιλαμβάνει τον αρχικό σχεδιασμό των ιδεών που σχετίζονται με τη δημιουργία ενός αντικειμένου, το βιομηχανικό σχεδιασμό, που περιλαμβάνει το σχεδιασμό ελεύθερων επιφανειών, και μετέπειτα τον λεπτομερή σχεδιασμό που θα καθορίσει την τελική μορφή του προϊόντος, όπως την έχει συλλάβει ο σχεδιαστής

➤ CAE - Computer Aided Engineering

Computer Aided Engineering (CAE) είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την προσομοίωση, την επαλήθευση και την ανάλυση που πραγματοποιείται σε ένα ψηφιακό μοντέλο, προϊόν ή συναρμολόγημα, με τη βοήθεια του Η/Υ. Με τα προγράμματα CAE εξετάζεται και αξιολογείται η απόδοση ενός προϊόντος, πριν το στάδιο της παραγωγής, χωρίς να χρειαστεί να δημιουργηθεί ένα φυσικό πρωτότυπο.

Στον κύκλο ανάπτυξης ενός προϊόντος – εξαρτήματος ανήκουν και τα λογισμικά CAM (Computer Aided Manufacturing) τα οποία είναι εργαλεία βιομηχανικής παραγωγής. Τα λογισμικά αυτά χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό διεργασιών με κυριότερη χρήση τους , την καθοδήγηση CNC εργαλειομηχανών. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία δεν θα ασχοληθούμε με κατασκευή .

3.2 Λογισμικά CAD και γενικά χαρακτηριστικά

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (ComputerAidedDesign: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού. Με το όρο CAD εννοούμε τη δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η ψηφιακή αυτή δημιουργία μπορεί να γίνει αντικείμενο περαιτέρω ανάλυσης προτού πάρει έγκριση για να προωθηθεί στην παραγωγή. Η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, επιτρέπει γρήγορες και ακριβείς τροποποιήσεις και ελαχιστοποιεί τα λάθη που προέρχονται από τον ανθρώπινο παράγοντα.

Χρησιμοποιώντας κάποιο CAD λογισμικό, μπορούν να παραχθούν πιο καινοτόμα σχέδια σε μικρότερο χρονικό διάστημα και με μικρότερο κόστος. Προφανώς όταν γίνεται αναφορά σε συστήματα CAD δεν αναφερόμαστε μόνο στην απεικόνιση δισδιάστατων (2D) σχεδίων αλλά πολύ περισσότερο στην περίπτωση της τρισδιάστατης (3D) απεικόνισης κατασκευών ή δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών ή/και όγκων. Με ένα CAD λογισμικό για τρισδιάστατη στερεά μοντελοποίηση, έχετε καλύτερη αντίληψη του μοντέλου και μπορούμε να δημιουργήσουμε σχέδια παραγωγής, σχέδια διαδικασιών συναρμολόγησης, φωτορεαλιστικές εικόνες και κινηματική προσομοίωση. Έτσι, είναι πολύ ευκολότερη και ελέγξιμη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος μέχρις ότου ο μελετητής καταλήξει σε μια καταρχήν αποδεκτή κατασκευαστική λύση. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD διαθέτουν τις κατάλληλες μορφές αρχείων - Interfaces (dxf, iges, step) που δίνουν τη δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από ένα σύστημα - λογισμικό σε άλλο.

Τα λογισμικά CAD χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την παραγωγικότητα του σχεδιαστή, να αυξήσουν την ποιότητα του σχεδίου και να δημιουργήσουν τη βιβλιοθήκη πρότυπων σχεδίων για την κατασκευή εξαρτημάτων με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και πληρότητα σε πληροφορίες στον μικρότερο δυνατό χρόνο. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για το σχεδιασμό ηλεκτρικών συστημάτων (ElectronicDesignAutomation-EDA), για το σχεδιασμό μηχανολογικών συστημάτων (MechanicalDesignAutomation-MDA) για αρχιτεκτονικές κατασκευές καθώς και για τη δημιουργία πρόχειρων σχεδίων-ηλεκτρονικών σκαριφημάτων (ComputerAidedDraftingCAD). Ένα τεχνικό σχέδιο CAD δεν περιλαμβάνει μόνο τις πληροφορίες για το σχήμα της γεωμετρίας, αλλά και πληροφορίες για τα υλικά, τις πυκνότητες, διεργασίες, διαστάσεις, ανοχές σε σφάλματα κ.α. . Τα εργαλεία CAD μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά τα εργαλεία γεωμετρικής διαχείρισης των σχημάτων, έως και ειδικά προγράμματα εφαρμογών όπως ανάλυση και βελτιστοποίηση.

Κλασικά εργαλεία που υπάρχουν διαθέσιμα επί του παρόντος, μπορεί να υποστηρίξουν ανάλυση ανοχών, υπολογισμούς στις ιδιότητες των μαζών – mass properties (για ροπές αδράνειας, κέντρα βάρους κ.α.), ολοκληρωμένη μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FEM), οπτική απεικόνιση (visualization) των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και φωτορεαλισμό. Ο σημαντικότερος ρόλος του CAD όμως παραμένει ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό σχεδιασμό προϊόντος που είναι και η σημαντικότερη σε όλες τις επόμενες φάσεις του κύκλου ζωής του προϊόντος. Στη συνέχεια, η γεωμετρία αυτή αξιοποιείται από το CAE. Κάποια από τα πιο δημοφιλή λογισμικά CAD είναι τα SolidWorks, Siemens NX, CATIA, AutoCAD, Pro/ENGINEER, Unigraphics, ACIS και Autodesk Inventor.

3.3 Λογισμικά CAE και γενικά χαρακτηριστικά

Με την εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών στο σχεδιασμό, την ανάλυση και την παραγωγή βιομηχανικών προϊόντων, τα λογισμικά τεχνολογιών μηχανικής (ComputerAidedEngineering-CAE) έχουν αποκτήσει καίρια θέση και είναι απαραίτητα για την ποιοτική εργασία και την εξέλιξη ενός μηχανολόγου στα πλαίσια του διεθνούς ανταγωνισμού. Έχει καταστεί απαραίτητο για ένα μηχανικό να ανταγωνίζεται και να αντεπεξέρχεται σε ένα διεθνές τεχνολογικά επίπεδο. Με τη χρήση Τεχνολογιών με τη Βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή (CAx), άρα και των συστημάτων CAE και με δεδομένη της ευκολία που προσφέρουν στη μεταφορά πληροφοριών, θεωρούνται πλέον δεδομένα στα βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Παρά τη διάδοση της χρήσης τους σε κλάδους της βιομηχανίας όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική, υπάρχουν ακόμα κάποια εμπόδια που αποτρέπουν άλλους τομείς και ιδιαίτερα τις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις να έχουν πρόσβαση στις τεχνολογίες αυτές και να τις εντάξουν αποδοτικά στον κύκλο ζωής των προϊόντων τους. Ένα από τα βασικά εμπόδια είναι η έλλειψη σωστά εκπαιδευμένων μηχανικών με γνώσεις στις τεχνολογίες αυτές. Στην αρχή τα CAE χρησιμοποιήθηκαν σαν συμπληρωματικά εργαλεία τα οποία επέκτειναν την εργασία του μηχανικού από τα συμβατικά μέσα στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Με τη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη, η οποία έκανε προσιτά τα υπολογιστικά συστήματα, και την ανάπτυξη των υπολογιστικών μεθόδων, το CAE εξαπλώθηκε και αναπτύχθηκε σε ανεξάρτητο χώρο.

Σύμφωνα με τον ορισμό, ComputerAidedEngineering(CAE) είναι η χρήση συστημάτων λογισμικού για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν τον μηχανικό.

Ένα λογισμικό CAE μπορεί να περιλαμβάνει τις περισσότερες φάσεις ανάπτυξης ενός προϊόντος όπως: τη σχεδίαση, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση όταν αυτές γίνονται με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Έτσι, στην έννοια αυτή μπορεί να περιλαμβάνονται και επιμέρους έννοιες των τεχνολογιών με τη βοήθεια Η/Υ (ComputerAidedTechnologies-CAx), όπως για παράδειγμα για το σχεδιασμό, το ComputerAidedDesign – CAD κ.ά..

Η αποθήκευση και η ανταλλαγή των εικόνων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μεταξύ άλλων, μέσω του αρχείου IGES (InitialGraphicsExchangeSpecification) ή STL(Stereolithography).

Το αρχείο IGES είναι ένα ουδέτερο πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ συστημάτων CAD, CAE.

Στο περιβάλλον CAE πραγματοποιείται η ανάλυση του μοντέλου με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Εάν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση, δεν ικανοποιούν τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί αρχικά, επαναλαμβάνεται ο κύκλος σχεδιασμού μέχρι να προκύψει η βέλτιστη λύση. Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (ComputerAidedEngineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Τα εργαλεία CAE διατίθενται σε ευρεία κλίμακα αναλύσεων. Κινηματικά προγράμματα, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση λειτουργίας μηχανών. Προγράμματα δυναμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σύνθετων συναρμολογημένων δομών όπως λ.χ. τα οχήματα ή εξαρτημάτων σε πτώση επί του εδάφους.

Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων ανάλυσης των λογισμικών πακέτων CAE είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM) που επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων, τη θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική και αεροδυναμική ανάλυση, ακουστική ανάλυση, κατανομή μαγνητικού πεδίου ή και άλλων πεδίων. Η εφαρμογή της FEM απαιτεί τη χρήση ενός απλουστευμένου αφαιρετικού μοντέλου που πρέπει να γεννηθεί είτε με αλληλεπίδραση του χρήστη ή και αυτόματα.

Οι τεχνολογίες CAE χωρίζονται σε 3 στάδια:

- Αρχικά, το λογισμικό που καθιστά δυνατή την κατασκευή του αφαιρετικού μοντέλου, τη γένεση των πεπερασμένων στοιχείων και την εισαγωγή των περιβαλλοντικών παραγόντων αποτελεί το κομμάτι της προ-επεξεργασίας του μοντέλου (pre-processing).
- Στη συνέχεια οι πληροφορίες της προ-επεξεργασίας μετατρέπονται σε κώδικα ώστε να λυθούν από τον επιλεγμένο επιλυτή (solver).
- Με το πέρας της εκτέλεση της ανάλυσης σε κάθε στοιχείο, τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται και απεικονίζονται σε πρόγραμμα για την μετα-επεξεργασία τους, ώστε να εξαχθούν τα επιθυμητά συμπεράσματα περί αντοχής και βελτιστοποίησης της κατασκευής. Περιοχές υψηλών τάσεων παριστάνονται, συνήθως, με κόκκινο χρώμα. Το λογισμικό τέτοιων απεικονίσεων αποτελεί τους λεγόμενους μετα-επεξεργαστές (post-processors).

Τα εργαλεία βελτιστοποίησης μπορούν να θεωρηθούν σαν εργαλεία CAE, μερικές φορές ταξινομούνται ως FEA (Finite Element Analysis) για τις αναλύσεις τάσεων και φορτίσεων, σε CFD (Computational Fluid Dynamics) για θερμικές και ρευστομηχανικές αναλύσεις, αναλύσεις κινηματικής και δυναμικής συμπεριφοράς MBD (Multibody Dynamics And Kinematics).

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

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

Μερικά από τα πιο δημοφιλή λογισμικά πακέτα CAE είναι τα Siemens NX, ANSA, ANSYS, NX Nastran, CATIA, Abaqus και Pro/ENGINEER.

3.4 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Ένα από τα πρώτα μελήματα του μηχανικού, όταν αυτός αναλάβει την ανάπτυξη ενός μοντέλου, είναι η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη και σε δισδιάστατες κατασκευές η χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων και τετραπλευρικών στοιχείων τεσσάρων κόμβων δεν είναι η μόνη επιλογή του, ανάλογα με τις δυνατότητες του διαθέσιμου λογισμικού. Πράγματι, μια από τις κρίσιμότερες αποφάσεις είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από τη διαθέσιμη βιβλιοθήκη στοιχείων. Επιπρόσθετα, το πλήθος των στοιχείων (με άλλα λόγια το μέσο μέγεθος των στοιχείων) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού.

Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων (στην *h* version) ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (στην *p* version), τόσο ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή είναι η επίλυση. Οι διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων εισάγονται παρακάτω. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατοώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (*solid modeling*).

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

Σημειώσεις:

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

3.4.1 Μοντελοποίηση – Τύποι πεπερασμένων στοιχείων

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

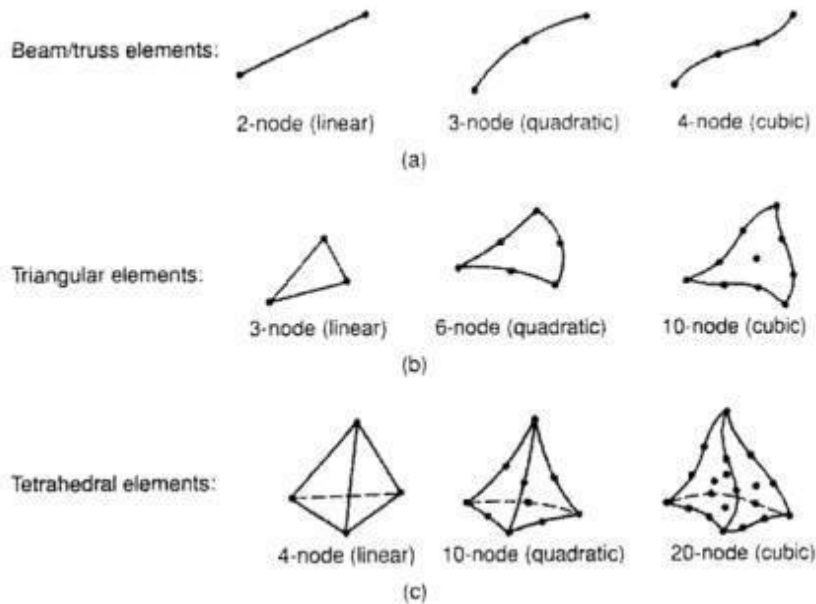
Ο προ-επεξεργαστής (pre-processor) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικείμενου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FEA (Finite Element Analysis) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος, διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης (με ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όγκου, επιφάνειας και wireframe, και παραμετρικών μεθόδων που στηρίζονται σε features) μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για ανάλυση.

Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων όπως το IGES ή απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD. Ωστόσο, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμη. Το μοντέλο μπορεί να φαίνεται στο μάτι ότι είναι τέλειο αλλά μπορεί στην πραγματικότητα να έχει σφάλματα που αποκαλύπτονται στο σύστημα FEA, κυρίως κατά την διαδικασία γένεσης πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία. Επιπλέον, ακόμη και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές του, οπότε μερικές από αυτές (π.χ. ένα fillet) θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων.

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

Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element

library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Το Σχήμα 3.1 δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, οι ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων (όπως συγκέντρωση τάσεων γύρω από οπές) πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή.



Σχήμα 3.1: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) δισδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα [Γ2]

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

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ., στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Επίσης, οι άγνωστοι ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οριακές συνθήκες, όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων

στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτήν την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

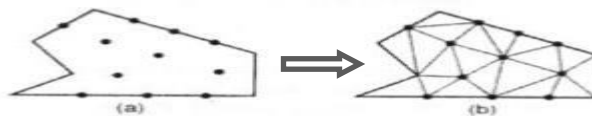
Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, και ο λόγος του Poisson (για ελαστικές κατασκευές). Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών αντιμετωπίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική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

Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (post-processor).

Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών «ισοτασικών» επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας. Στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης όλα τα πακέτα διαθέτουν animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιόμορφων ταλάντωσης όσο και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων. Επίσης, πολλά συστήματα διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, σαν κείμενα, παρουσιάσεις, videos, e-mail, ή αποστολή στο διαδίκτυο.

3.4.2 Αυτόματη γένεση πλέγματος

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



Σχήμα 3.2: Μέθοδος σύνδεσης των κόμβων

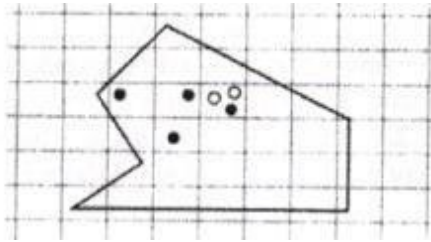
- **Μέθοδος Σύνδεσης Κόμβων (N.C.A.)**

Η μέθοδος σύνδεσης κόμβων (node connection approach) προκειμένου να παράγουν πλέγμα είναι πολύ δημοφιλής, διότι είναι πολύ απλή στη σύλληψη της. Οι δύο κύριες φάσεις αυτής της προσέγγισης είναι (i) η γένεση κόμβων που δείχνονται στο σχήμα 3.2.

Γένεση κόμβων: Δημοσιευμένα έργα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα.

- **Μέθοδος του Cavendish** (1974). Σε αυτή τη μέθοδο, εισάγονται αρχικά κόμβοι στο σύνορο του αντικειμένου με το χέρι του χρήστη (manually). Κατόπιν οι εσωτερικοί κόμβοι γεννώνται αυτόματα, έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος. Το αντικείμενο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος ζωνών διαφορετικών επιθυμητών μεγεθών στοιχείων. Στη ζώνη i , υπερτίθεται ένα τετραγωνικό grid βήματος $r(i)$. Το Σχήμα 3.3 δείχνει ένα υπερτιθέμενο μονό grid, που βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος. Για κάθε τετράγωνο του grid, γεννιέται με τρόπο τυχαίο ένας εσωτερικός κόμβος. Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1 δύο φορές, μια για την κατεύθυνση x και μια για την κατεύθυνση y , και υπολογίζοντας την ισοδύναμη θέση των τιμών x και y . Εάν ο παραγόμενος κόμβος πέφτει μέσα στο αντικείμενο και έχει απόσταση από το σύνορο μεγαλύτερη από το $r(i)$, αλλά και από τους προηγούμενα παραγόμενους κόμβους, τότε γίνεται αποδεκτός. Εάν όχι, ένας άλλος κόμβος παράγεται τυχαία και ελέγχεται. Εάν δεν καταστεί δυνατόν να βρεθεί ένας αποδεκτός κόμβος μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών (ας πούμε, πέντε), τότε το εν λόγω τετράγωνο παραλείπεται και θεωρείται το επόμενο. Η μέθοδος αυτή είναι επεκτάσιμη και στις 3 διαστάσεις, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται τρισδιάστατο grid.
- **Μέθοδος του Shimada** (1992). Αυτή η μέθοδος γεμίζει το εσωτερικό του προς διακριτοποίηση αντικειμένου με «φυσάλιδες» όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, και λαμβάνει τα κέντρα τους σαν κόμβους. Το μέγεθος κάθε φυσάλιδας προσδιορίζεται από

την κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν οι θέσεις των φυσαλίδων προσδιορίζονται από την ικανοποίηση της ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ αυτών.



Σχήμα 3.3: Μέθοδος γένεσης κόμβων κατά Cavendish [A3]

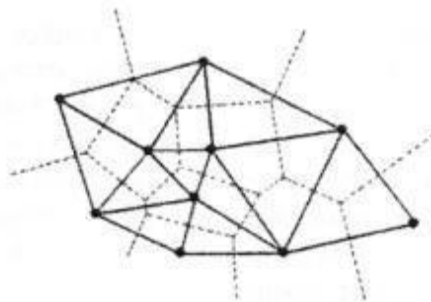
Γένεση στοιχείων: Σε αυτή τη δεύτερη φάση, κόμβοι που γεννήθηκαν στην προηγούμενη φάση συνδέονται, για να αποτελέσουν στοιχεία, έτσι ώστε να μην επικαλύπτονται και να καλύπτεται ολόκληρο το χωρίο. Αναφερόμαστε στη μέθοδο του Lee διότι αυτή μπορεί να οδηγήσει σε τετραπλευρικά στοιχεία. Ωστόσο, η μέθοδος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

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

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

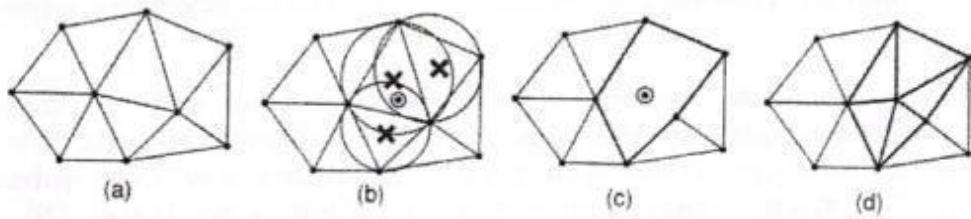
$$V_i = \{ x: |x - P_i| < |x - P_j| \text{ για όλα τα } j \neq i \}$$

όπου $|...|$ συμβολίζει το μέτρο του διανύσματος εντός του και κάθε V_i , είναι ένα κυρτό πολύγωνο (πολύεδρο) που περιβάλλεται από γραμμές (επίπεδα) τέμνοντα κάθετα τις γραμμές μεταξύ P_i , και των γειτονικών του κόμβων. Αυτή η διαίρεση του (δισδιάστατου ή τρισδιάστατου) χώρου από ένα σύνολο V_i καλείται Dirichlet tessellation. Κάθε πολύγωνο (πολύεδρο) Voronoi έχει έναν κόμβο που συνδέεται με αυτό. Μετά τη γένεση του διαγράμματος Voronoi, μπορούμε να δημιουργήσουμε τριγωνικά (τετραεδρικά, στις 3 διαστάσεις) στοιχεία συνδέοντας τα σημεία που σχετίζονται με γειτονικά πολύγωνα (πολύεδρα) Voronoi. Το Σχήμα 3.4 δείχνει το διάγραμμα Voronoi και την αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay για 10 κόμβους στη δισδιάστατη περίπτωση.



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay [A3]

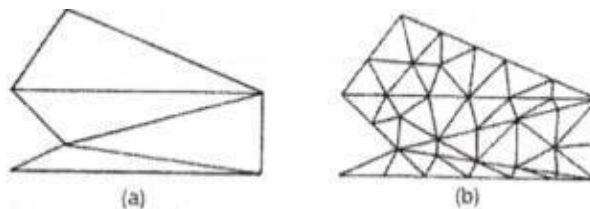
Η τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το δεδομένο σύνολο σημείων (κόμβων) χωρίς να είναι απαραίτητο πρώτα να έχει γίνει το διάγραμμα Voronoi, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία, όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, ο οποίος ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει καθόλου άλλα σημεία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται ως ακολούθως. Στην αρχή διαμορφώνεται ένα τρίγωνο T_0 , που περιέχει όλους τους κόμβους· μπορεί να πρέπει να εισαχθούν επιπλέον σημεία στις κορυφές του T_0 . Τότε εισάγουμε κόμβους από ένα δεδομένο σύνολο, έναν προς ένα, και βρίσκουμε εκείνα τα τρίγωνα, στο καθένα από τα οποία ο περιγεγραμμένος κύκλος περικλείει τον κόμβο. Αυτά τα πολύγωνα, που ονομάζονται τεμνόμενα πολύγωνα (intersection polygons) απαλείφονται. Στο Σχήμα 3.5 (b), τα τεμνόμενα πολυώνυμα συμβολίζονται με \times , όταν ένας νέος κόμβος \odot εισάγεται στα υπάρχοντα τρίγωνα, όπως στο Σχήμα 3.5 (a), που γεννώνται από τους ήδη εισαχθέντες κόμβους. Το Σχήμα 3.5 (c) δείχνει το αποτέλεσμα μετά την απαλοιφή των τεμνόμενων αυτών πολυγώνων. Κατόπιν, νέα τρίγωνα διαμορφώνονται συνδέοντας το νέο κόμβο με τις κορυφές των τεμνόμενων επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 (d). Τελικά, τα τρίγωνα που είναι συνδεδεμένα με τα επιπλέον σημεία που διαμορφώνουν το T_0 , απαλείφονται. Αυτή η διαδικασία μπορεί εύκολα να επεκταθεί για τρισδιάστατη γένεση πλεγμάτων στοιχείων χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένες σφαίρες από 4 κόμβους αντί περιγεγραμμένους κύκλους από 3 κόμβους. Ωστόσο, η τρισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να περιέχει πολύ λεπτά τετράεδρα, ενώ η δισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay είναι, με κάποια έννοια, η βέλτιστη τριγωνοποίηση για ένα δεδομένο σύνολο σημείων.



Σχήμα 3.5: Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson [Γ2]

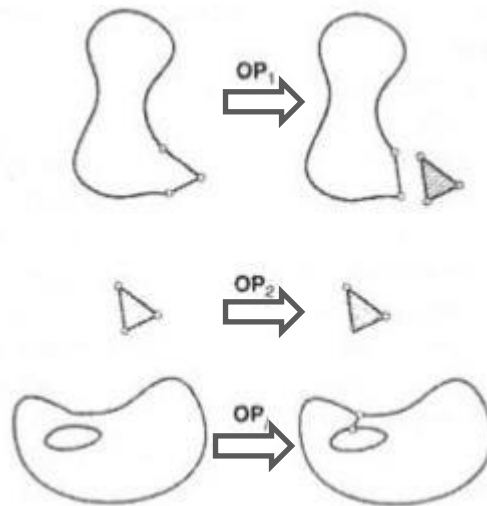
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας (T.D.A.)**

Η δισδιάστατη μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας (topology decomposition approach) αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύγωνο και το τελευταίο κατακερματίζεται σε ένα σύνολο μεγάλων στοιχείων συνδέοντας τις κορυφές προς διαμόρφωση τριγώνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 (a). Κατόπιν, αυτά τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτύνονται, ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 (b). Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά, διότι τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνο τους από την αρχική τοπολογία του αντικειμένου, ιδιαίτερα από την κατανομή των κορυφών. Οι κορυφές που ανήκουν στο ίδιο μεγάλο στοιχείο μπορούν να προσδιορισθούν από τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay που περιγράφηκε σε παραπάνω ενότητα.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης [A2]

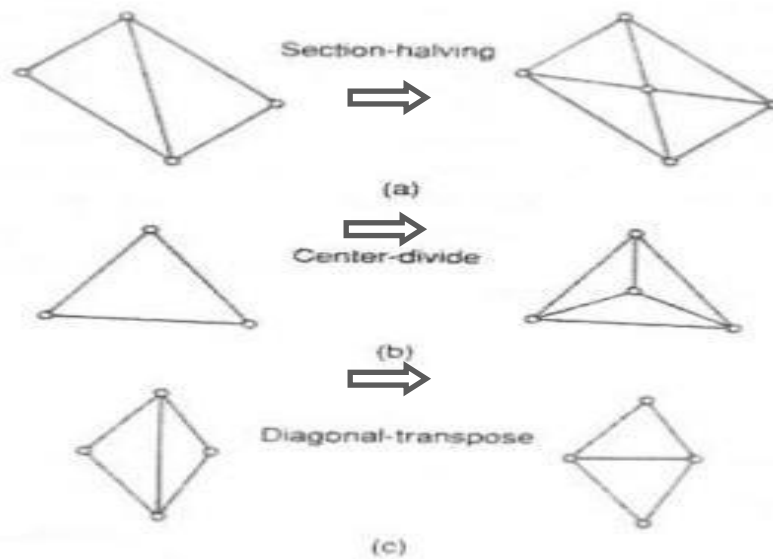
Κατά τη διαδικασία γένεσης ενός συνόλου τριγώνων από τις κορυφές, ο Wordenweber εισήγαγε και εφάρμοσε επίσης τους λεγόμενους τελεστές Euler με τον τρόπο που αυτοί χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση όγκων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7, πρώτος εφαρμόζεται ο τελεστής Wordenweber (1984) OP_j, για να απαλείψει τις τρύπες στο αντικείμενο. Κατόπιν διαμορφώνονται τα τρίγωνα από τις κορυφές και αποχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας επαναληπτικά τον τελεστή OP₁, μέχρις ότου απομείνουν μόνον 3 κορυφές. Τελικά, εφαρμόζεται ο τελεστής OP₂, για να διαμορφώσει το τελευταίο τρίγωνο.



Σχήμα 3.7: Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα [A2]

Μόλις το αντικείμενο μετατραπεί σε ένα σύνολο μεγάλων τριγώνων, κάθε τρίγωνο εκλεπτύνεται, έτσι ώστε να υπακούει στην απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος. Για την εκλέπτυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τρεις μέθοδοι που δείχνονται στο Σχήμα 3.8. Το Σχήμα 3.8 (a) δείχνει μια μέθοδο που εφαρμόζεται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους. Δηλαδή, προστίθεται ένας κόμβος στην κοινή ακμή και τα γειτονικά στοιχεία υποδιαιρούνται συνδέοντας τους κόμβους τους με το νέο κόμβο. Στο Σχήμα 3.8 (b), ένα μεγάλο τριγωνικό στοιχείο υποδιαιρείται προσθέτοντας ένα νέο κόμβο στο κέντρο βάρους του. Όταν υποδιαιρεθεί με τους τρόπους που περιγράφηκαν παραπάνω, μπορεί να δημιουργηθούν λεπτά τρίγωνα, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.8 (c). Αυτά τα τρίγωνα είναι ήδη αρκετά μικρά για τη δοθείσα πυκνότητα πλέγματος.

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

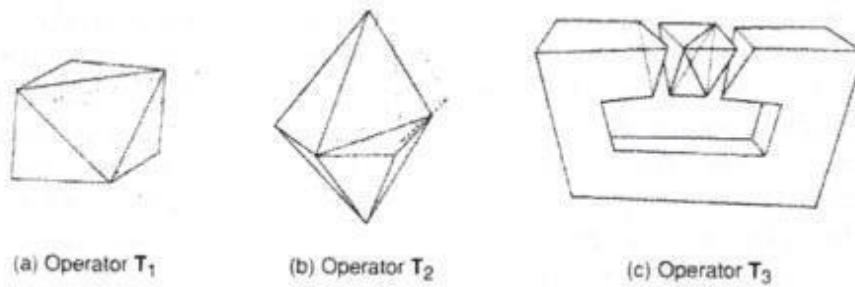


Σχήμα 3.8: Μέθοδοι εκλέπτυνσης [Γ1]

Η μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης μπορεί να επεκταθεί στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο και το πολύεδρο κατατέμνεται σε τετραεδρικά στοιχεία συνδέοντας τις κορυφές τους. Κατόπιν, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση. Οι Woo και Thomas (1984) πρότειναν τελεστές παραπλήσιους με αυτούς που πρότεινε ο Wordenweber για να διευκολύνει τον σχηματισμό των τετραεδρικών στοιχείων. Αυτοί οι τελεστές, που δείχνονται στο Σχήμα 3.9, χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό τετραέδρων ως εξής:

- Πρώτα, εφαρμόζεται ο τελεστής T3, για να απαλείψει τις οπές του αντικειμένου αποτέμνοντας το κατάλληλο τμήμα του, έτσι ώστε η οπή να αποκαλυφθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9 (c). Σημειώνεται ότι σε αυτό το στάδιο τρία τετράεδρα διαμορφώνονται σαν αποτέλεσμα παράπλευρης διαδικασίας.
- Κατόπιν, οι κυρτές κορυφές στις οποίες συναντώνται τρεις ακμές, που καλούνται convex trivalent vertices (κορυφές), διαχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας τον τελεστή T1, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 3.9 (a). Αυτός ο τελεστής εφαρμόζεται επαναληπτικά, μέχρις ότου δεν υπάρξει καμία κυρτή trivalent κορυφή. Εάν όλες οι κορυφές που απομένουν δεν είναι convex trivalent, τότε ο τελεστής T2 εφαρμόζεται για να σκάψει ένα τετράεδρο, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 3.9 (b). Αυτός ο τελεστής παρέχει τις νέες convex trivalent κορυφές και έτσι ο T1 εφαρμόζεται ξανά.

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

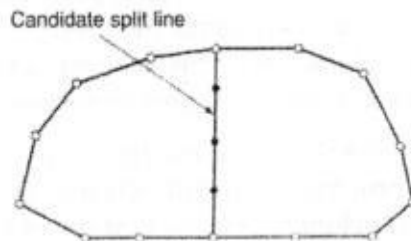


Σχήμα 3.9: Τελεστές αποσύζευξης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις [A2]

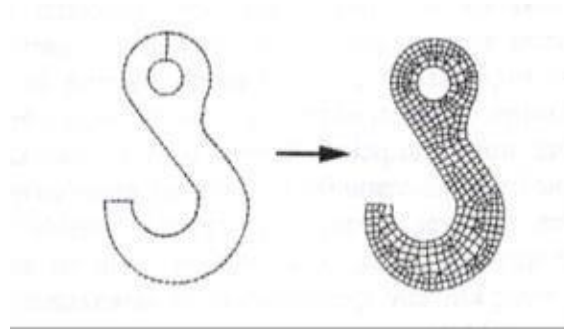
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Γεωμετρίας (G.D.A.)**

Οι μέθοδοι αποσύζευξης γεωμετρίας (geometry decomposition approaches) εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που βασίζονται σε αναδρομές και αυτές που βασίζονται σε επαναλήψεις. Στη συνέχεια επεξηγείται μόνο η μέθοδος αναδρομής, καθώς αυτή είναι επεκτάσιμη στις τρεις διαστάσεις.

Η μέθοδος αναδρομικής αποσύζευξης (recursive geometry decomposition method) γεννά τριγωνικά και τετρακομβικά στοιχεία στις 2 διαστάσεις με τον ακόλουθο τρόπο. Πρώτα, το αρχικό αντικείμενο διαιρείται σε κυρτά μέρη είτε με το χέρι ή αυτόματα. Αυτόματη αποσύζευξη αντικειμένου σε κυρτά τμήματα περιγράφεται από τον Bykat (1976). Για κάθε κυρτό τμήμα, εισάγονται κόμβοι στο σύνορο του, έτσι ώστε να ικανοποιήσει την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν, κάθε κυρτό τμήμα υποδιαιρείται προσεγγιστικά στο μέσον του «μακρύτερου άξονα», όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Στη συνέχεια, εισάγονται περισσότεροι κόμβοι κατά μήκος της διαχωριστικής γραμμής σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πυκνότητας πλέγματος και τα δύο ημίσημα υποδιαιρούνται επαναληπτικά, μέχρις ότου γίνουν τρίγωνα ή τετράπλευρα. Μερικές μέθοδοι επαναλαμβάνουν την υποδιαίρεση, μέχρις ότου καταλήξει σε εξαγωνα ή οκτάγωνα και παράγουν τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία από αυτά σύμφωνα με προ-αποθηκευμένα πρότυπα. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να ληφθούν περισσότερα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Το Σχήμα 3.11 δείχνει ένα παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.



Σχήμα 3.10: Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line) [Γ1]



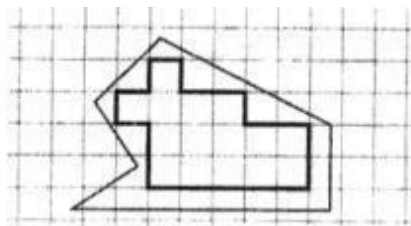
Σχήμα 3.11: Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου

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

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

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

Η μέθοδος των Thacker, Gonzalez και Putland (1980) είναι ίσως η πρώτη σχετική δημοσίευση που έκανε χρήση της μεθόδου βάσει grid. Σε αυτή τη μέθοδο ένα αντικείμενο αρχικά επικαλύπτεται από ένα τριγωνικό grid και τα σημεία του grid που πέφτουν εκτός αντικειμένου εξαλείφονται, αφήνοντας ένα σύνορο μορφής zigzag. Το σημεία του grid που βρίσκονται πάνω στο zigzag σύνορο μετακινούνται προς το σύνορο του αντικειμένου, ώστε να αποτελέσουν το τελικό πλέγμα. Οι διαφοροποιήσεις αυτής έγκειται στον τρόπο διαχείρισης του συνόρου. Ο Kikuchi (1986) επέκτεινε τη μέθοδο, έτσι ώστε εκτός από κυρίως τετράπλευρα να περιλαμβάνει ακόμη και μερικά τρίγωνα, χρησιμοποιώντας ορθογωνικό grid, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Ένα πρόβλημα και των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με πολύ μικρές ακμές σε σχέση με το βήμα του grid, χάνονται. Σε άλλες μεθόδους τα σημεία του zigzag συνόρου δε μετακινούνται στο σύνορο του αντικειμένου. Αντ' αυτού, δημιουργούνται τριγωνικά στοιχεία στην περιοχή μεταξύ zigzag και συνόρου αντικειμένου μέσω ενός αλγορίθμου τριγωνοποίησης.



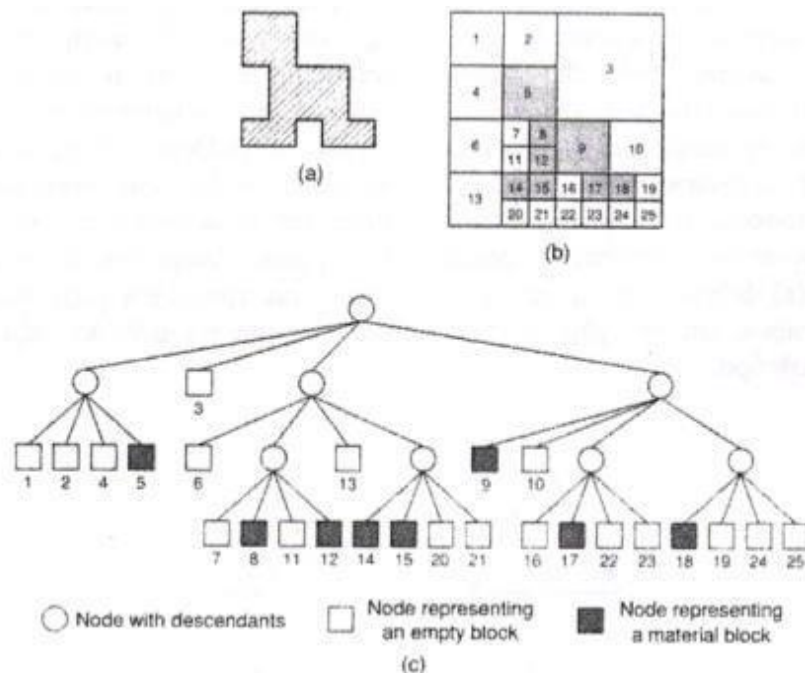
Σχήμα 3.12: Χρήση ορθογωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based” [A3]

Οι Yerry και Shephard (1983) χρησιμοποίησαν μια δενδριτική (quadree) αναπαράσταση του αντικειμένου για τη γένεση πλεγμάτων. Ένα quadree είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Παριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο, σαν αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 3.13 (a), σαν ένα σύνολο τετραγώνων, το καθένα διαφορετικού μεγέθους με επαναληπτική υποδιαίρεση της root square που περικλείει το αντικείμενο. Το Σχήμα 3.13 (b) δείχνει τη διαδικασία υποδιαίρεσης του αντικειμένου, και το Σχήμα 3.13 (c) δείχνει την αναπαράσταση quadree αυτής της υποδιαίρεσης.

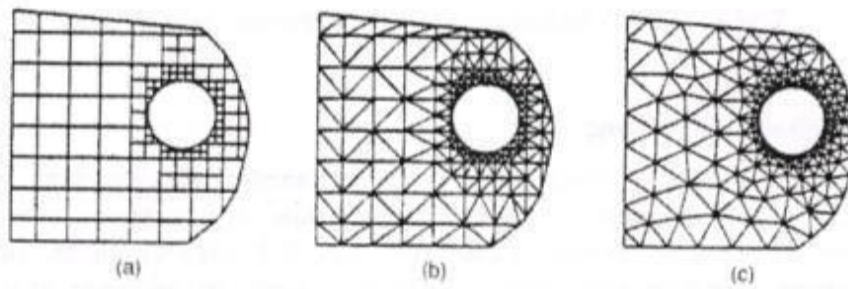
Τα πλέγματα γεννώνται με τα εξής βήματα:

1: Δημιουργείται ένα root square που περικλείει το αντικείμενο και υποδιαιρείται σε τέσσερα τέταρτα (quadrants) υποδιπλασιάζοντας τις πλευρές του. Κατόπιν κάθε τέταρτο ταξινομείται ανάλογα με τη σχετική θέση του ως προς το αντικείμενο. Εάν το τέταρτο δεν είναι ούτε πλήρως εντός αλλά ούτε και πλήρως εκτός του αντικειμένου, τότε αυτό διαιρείται ξανά. Αυτή η διαδικασία υποδιαίρεσης επαναλαμβάνεται, μέχρις ότου ικανοποιηθεί η κατανομή πυκνότητας πλέγματος και τα τέταρτα βρεθούν είτε πλήρως εντός ("completely inside") αντικειμένου ή επικαλύπτονται ("overlapping"). Έτσι, το αντικείμενο που θα παριστάνεται από τη συλλογή των πλήρως εντός και των τροποποιημένων επικαλυπτόμενων τετάρτων θα φαίνεται όπως στο Σχήμα 3.14 (a).

2: Κάθε τροποποιημένο επικαλυπτόμενο τέταρτο διαιρείται μέσα στα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο πρότυπο (prestored template) που βασίζεται στο σχήμα του τετάρτου. Κατόπιν, το «εντελώς εντός» τέταρτο επίσης υποδιαιρείται, ώστε να ικανοποιήσει την προσαρμογή του πλέγματος με τα γειτονικά πλέγματα. Δυο γειτονικά στοιχεία ονομάζονται συμβατά (conforming), εάν μοιράζονται μια πλήρη ακμή (μια ολόκληρη έδρα σε 3-D στοιχεία). Το Σχήμα 3.14 (b) δείχνει το αποτέλεσμα της γένεσης πλέγματος.



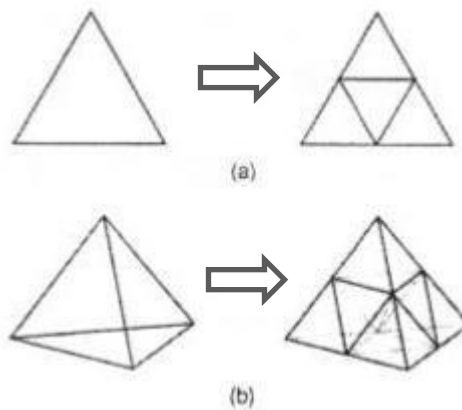
Σχήμα 3.13: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων [A3]



Σχήμα 3.14: Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree [A3]

3: Οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς (adjustment), έτσι ώστε να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων. Το Σχήμα 3.14 (c) δείχνει το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης του πλέγματος. Η μέθοδος εξομάλυνσης αναφέρεται αργότερα. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα «επικαλυπτόμενα» όγδοα (octants) τροποποιούνται, έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μόνο τον εσωτερικό χώρο του αντικειμένου και κατόπιν διασπάζεται σε τετράεδρα, όπως τα τροποποιημένα επικαλυπτόμενα τέταρτα διασπώνται σε τρίγωνα στις δύο διαστάσεις. Το τροποποιημένο επικαλυπτόμενο όγδοο πρέπει να διασπασθεί σε τετράεδρα που ικανοποιούν τη συμβιβαστικότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό απαιτεί ένα περίπλοκο αλγόριθμο. Πράγματι, ούτε και η διάσπαση του τροποποιημένου τετάρτου στις δύο διαστάσεις είναι εύκολο πρόβλημα.

Οι Jung και Lee (1993) πρότειναν μια νέα μέθοδο, αρχίζοντας από τη τριγωνική ρίζα (τετράεδρη ρίζα στις 3 διαστάσεις) αντί της τετραγωνικής ρίζας (κυβική ρίζα) για να αποφύγουν τη δυσκολία που μόλις αναφέραμε. Σε αυτή τη μέθοδο, η παράσταση quadree ενός δισδιάστατου αντικειμένου είναι η προσέγγιση του αντικειμένου σαν σύνολο τριγώνων. Παρόμοια, η αναπαράσταση octree ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ήταν ένα σύνολο τετραέδρων. Έτσι μπορούμε να λάβουμε τα πλέγματα συλλέγοντας τα «εντελώς εντός» και «επικαλυπτόμενα» τρίγωνα (τετράεδρα στις τρεις διαστάσεις) μετά από μετακίνηση των κορυφών των «επικαλυπτόμενων» τριγώνων (τετράεδρα) στο αρχικό σύνορο του αντικειμένου. Το Σχήμα 3.15 (a) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μια τριγωνική ρίζα διασπάζεται σε τέσσερα τρίγωνα, και το Σχήμα 3.15 (b) δείχνει πως μια τετραεδρική ρίζα διασπάζεται σε οκτώ τετράεδρα.



Σχήμα 3.15: Υποδιαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου [Γ2]

- **ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ**

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

Τα παραπάνω μπορεί να επιβληθούν με επέμβαση του χρήστη ή αλγοριθμικά την ώρα που παράγονται τα πλέγματα γειτονικών περιοχών. Πολλές μέθοδοι απεικόνισης μπορούν να εφαρμοσθούν.

ΜΕΘΟΔΟΙ:

Μερικές μέθοδοι γένεσης λειτουργούν με προσέγγιση κατακερματισμού της τοπολογίας, δεν παράγουν αρχικό πλέγμα επαρκές για την περαιτέρω ανάλυση. Έτσι, πρέπει να ακολουθήσουμε μια πορεία τριών βημάτων ώστε να το βελτιώσουμε:

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

3.4.3 Είδη ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

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

- **Καθορισμός του Είδους Ανάλυσης**

Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιηθεί ο τρόπος ανάλυσης, στη συνέχεια θα δοθούν κάποιες γενικές κατευθύνσεις.

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

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

Στατικό πρόβλημα (static analysis), δηλαδή μη-εξαρτημένο από το χρόνο, ή *Δυναμικό πρόβλημα* (dynamic analysis), δηλαδή χρονικά εξαρτώμενο. Παραδείγματα είναι η ταλάντωση μιας μηχανής, ο ερπυσμός και η χαλάρωση, η διάδοση ήχου στον αέρα ή σε άλλο μέσον, κλπ.

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

Γραμμικό είναι ένα πρόβλημα το οποίο, εάν διπλασιασθεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων), τότε διπλασιάζεται το μέγεθος του αποτελέσματος (π.χ. μετατοπίσεων). Τα περισσότερα προβλήματα της πράξης είναι (ή μάλλον θεωρούνται) γραμμικά.

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

Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων

Στη μοντελοποίηση μιας κατασκευής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων έχουμε τα ακόλουθα στάδια:

1ο : Κατασκευή της γεωμετρίας.

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

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

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

5ο : Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους.

ΕΙΔΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

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

Έτσι ανάλογα με το είδος του προβλήματος, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο διαφέρει.

3.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ SOLIDWORKS (CAD) ΚΑΙ SIEMENS NX CAE 9

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκαν : το λογισμικό SOLIDWORKS για τη σχεδίαση του κομματιού και το SIEMENS NX CAE 9 για την προσομοίωση .

Το SolidWorks είναι λογισμικό σχεδίασης για 2d , 3d και συγκροτήματα κομματιών με δυνατότητες εξελιγμένης παραμετρικής σχεδίασης και πολλά σχεδιαστικά εργαλεία για την εύκολη μοντελοποίηση περίπλοκων κομματιών. Τέλος επιτρέπει την εξαγωγή του ψηφιακού σχεδίου σε τύπους αρχείων με ουδέτερο πρωτόκολλο επικοινωνίας , διευκολύνοντας έτσι την περαιτέρω επεξεργασία του από διαφορετικά CAM και CAE λογισμικά .

➤ **Πλεονεκτήματα Παραμετρικής Μοντελοποίησης του SOLIDWORKS**

- Ευκολία κατά τη σχεδίαση στερεών που προκύπτουν από πολύπλοκα δισδιάστατα σχέδια.
- Αλλαγή διαστάσεων κατά την πορεία της σχεδίασης.
- Διαγραφή οποιουδήποτε Feature σε οποία θέση και αν βρίσκεται στην ιεραρχία.
- Μετακίνηση οποιουδήποτε Feature στην επιθυμητή θέση (Δεν είναι πάντα εφικτό)
- Υπολογισμός κέντρου βάρους, υλικού και καταπονήσεων σε οποιοσδήποτε γεωμετρικό μοντέλο.
- Μετατροπή σχεδίων από part σε 2d και assembly με πολύ απλό τρόπο.
- Δημιουργία αρχείων σε μορφή φωτογραφίας , pdf .

➤ **Μειονεκτήματα Παραμετρικής Μοντελοποίησης του SOLIDWORKS**

- Η δημιουργία κάποιων Features θα μπορούσε να γίνεται με εισαγωγή λιγότερων παραμέτρων για γρηγορότερο σχεδιασμό και αποφυγή λαθών.
- Απουσία κάποιων εικονιδίων για συντόμευση επιλογών που προκαλούν καθυστέρηση στο σχεδιασμό.

Το πακέτο λογισμικού SIEMENS NX CAE 9 αποτελεί ένα ισχυρό σύστημα προσομοίωσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα μεγάλο εύρος μοντέλων πολύπλοκης γεωμετρίας και για ένα μεγάλο σύνολο προσομοιώσεων .

Με την αυτόματη γεννήτρια πλέγματος το NX CAE 9 μπορεί να παράγει ένα υψηλού επιπέδου και αναλυτικό σύστημα πλέγματος στις περιοχές του μοντέλου όπου απαιτείται για τη διαδικασία ανάλυσης. Έτσι έχουμε ανάλυση του τεμαχίου, χωρίς να αυξάνει σημαντικά το μέγεθος του προβλήματος και των υπολογιστικών απαιτήσεων , ακόμα προσφέρει ευκολία στη διεπαφή του χρήστη με το σύστημα, χάρη στη χρήση διαγραμματικής ροής διαδικασιών. Αποτελεί ένα πλήρες εργαλείο εκτέλεσης προσομοιώσεων.

➤ **Πλεονεκτήματα του SIEMENS NX CAE 9**

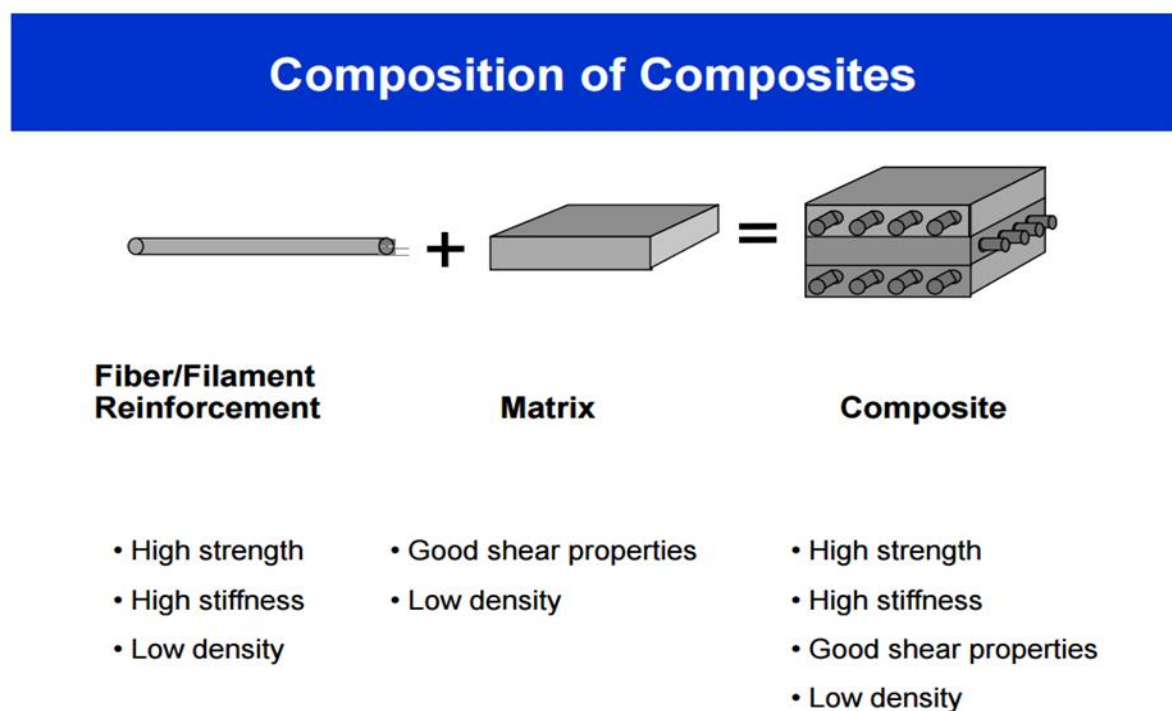
- Μείωση του χρόνου κατασκευής και ανάπτυξης, άρα και μείωση του κόστους.
- Αύξηση της δημιουργικότητας του χρήστη καθώς σε μειωμένο χρόνο μπορεί να επεξεργαστεί περισσότερα και πολυπλοκότερα σχέδια προϊόντων.
- Βελτιστοποίηση του προϊόντος, ώστε να ανταποκρίνεται σε μεγάλο βαθμό στις πραγματικές συνθήκες , χωρίς την κατασκευή πρωτοτύπου .

4. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑ

4.1 Εισαγωγή και ορισμός σύνθετων υλικών

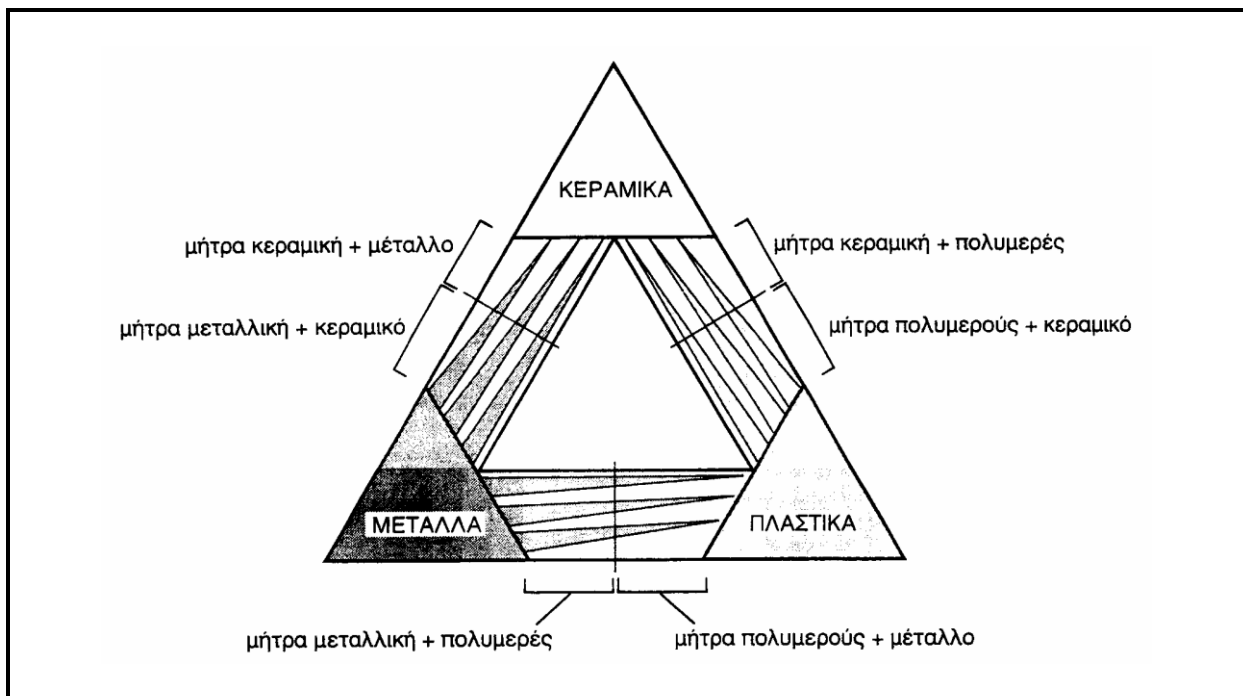
Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από το συνδυασμό δύο ή περισσότερων από των βασικών οικογενειών υλικών (μέταλλα , κεραμικά , πλαστικά κ.τ.λ.). Η βιομηχανική σπουδαιότητά τους βρίσκεται στον συνδυασμό των ελκυστικών ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών. Ο συνδυασμός των αρχικών υλικών παράγει ένα σύνθετο προϊόν με ανώτερες ιδιότητες από αυτές των δύο επιμέρους συστατικών. Μπορούν να παραχθούν σύνθετα υλικά που χαρακτηρίζονται από ασυνήθεις συνδυασμούς συνεκτικότητας , αντοχής , πλαστιμότητας , βάρους , αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες , αντοχής σε διάβρωση , σκληρότητας και αγωγιμότητας .

Υπάρχει μια δυσκολία στον ορισμό του σύνθετου υλικού , που σχετίζεται με τους περιορισμούς στο μέγεθος των συστατικών που το απαρτίζουν. Ο γνωστότερος έχει δοθεί από τον Bagwan D. Agarwal το 1990 : *Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.*



Σχήμα 4.1: φαίνεται με απλό τρόπο η κατανομή μήτρας – συστατικού ενίσχυσης σε ένα ινώδες σύνθετο. [Δ1]

Το ένα συστατικό καλείται **μήτρα** και είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Το άλλο συστατικό μέρος, χαρακτηρίζεται ως **συστατικό ενίσχυσης** και είναι αυτό που προσδίδει στο σύνθετο τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Στο Σχήμα 4.1 (πάνω) φαίνεται με απλό τρόπο η κατανομή μήτρας – συστατικού ενίσχυσης σε ένα ινώδες σύνθετο ενώ στο Σχήμα 4.2 φαίνονται κάποιοι συνδυασμοί βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.



Σχέδιο 4.2 : φαίνονται κάποιοι συνδυασμοί βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν. [A4]

4.2 Ιστορική εξέλιξη σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από τον άνθρωπο με πρώτα δείγματα περίπου στο 5000 π.χ. . Φυσικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούσε για τις ανάγκες του, γρήγορα ενισχύθηκαν με πρόσθετα συστατικά για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους.

Έτσι έχουμε τα πρώτα δείγματα χρήσης τους στην Αίγυπτο από το 5000 π.Χ. όπου χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγματα άχυρων, για τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση στις κατασκευές πηλού. Ακόμα, είχαν βελτιώσει τις ξύλινες κατασκευές τους, ως

προς τις στρευλώσεις λόγω υγρασίας , με αντικατάσταση μεγάλων ενιαίων κομματιών ξύλου από πλάκες μικρότερων.

Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμικών.

Η χρήση της σιδερόβεργας στο σκυρόδεμα , που χρησιμοποιείται στις δομικές κατασκευές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μία πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Σαν απαρχή των σύνθετων υλικών βασισμένα σε μήτρα πλαστικού έχουμε το μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη το 1920 , το γνωστό αργότερα ως βακελίτη.

Κατά το 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο υπήρξε έντονη εξέλιξη με αφορμή τις ανάγκες της αεροπορίας , λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων και του χαμηλού βάρους.

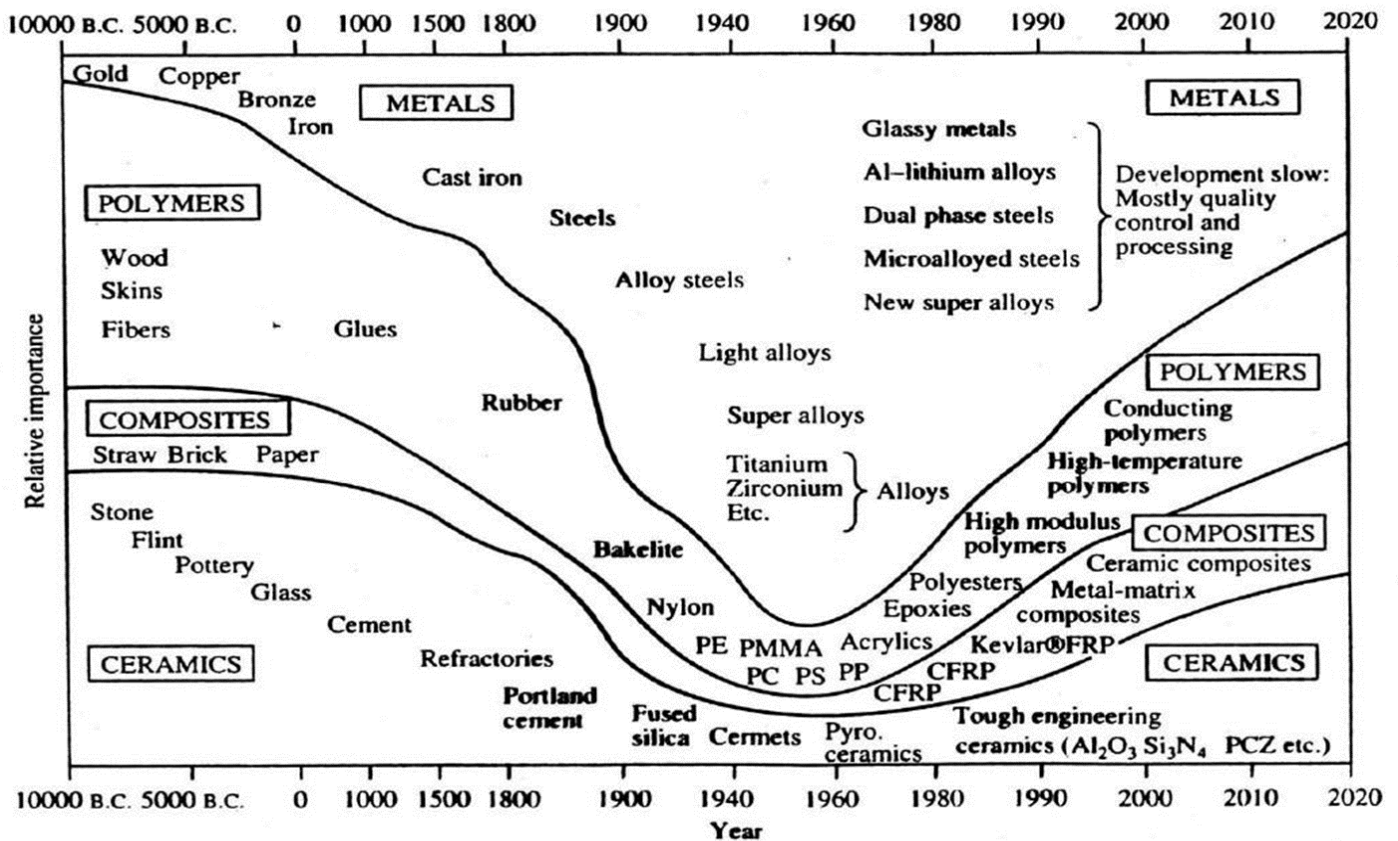
Το 1971 εμφανίστηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

Οι ίνες άνθρακα (carbon fibers) με τις οποίες ασχολούμαστε κυρίως στην παρούσα πτυχιακή εργασία εμφανίστηκαν στην αγορά το 1964 έχουν ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή, πολύ καλή πρόσφυση με μήτρες πολυμερικών συγκολλητικών, όπως εποξικές ρητίνες, είναι αδρανής χημικά και έχουν καλή θερμική αντίσταση. Η χρήση τους αρχικά ήταν περιορισμένη και τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές , την αυτοκίνηση και σε πλήθος μηχανολογικών εφαρμογών καθώς μπορούν να είναι 25 φορές πιο δύσκαμπτες από το ατσάλι και πολύ ελαφρύτερες (λεπτομερής αναφορά στο υποκεφάλαιο 4.5).

Πρώτα με την ανάπτυξη των μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων με ίνες γυαλιού και ίνες βορίου (1960) και στη συνέχεια με την ανάγκη της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για υψηλότερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων ,φτάσαμε τα τελευταία 50 χρόνια τα σύνθετα υλικά να καλύπτουν όλο και μεγαλύτερο μέρος στη χρήση κατασκευαστικών μηχανολογικών υλικών σε εφαρμογές νέων τεχνολογιών αιχμής στις μηχανολογικές κατασκευές λόγω της μείωσης του κόστους τους και της εύκολης διάθεσής τους στους κατασκευαστές. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι οι διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής και ελέγχου νέων προϊόντων να έχουν μεταβληθεί σημαντικά σε αυτό το κομμάτι.

Κάποια από τα βασικότερα προβλήματα των σύνθετων υλικών όπως το σχετικά υψηλό κόστος τους , η συμπεριφορά τους σε περιβαλλοντικές συνθήκες και οι μηχανικές φθορές βελτιώνονται συνεχώς μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλλίτερων ινών, ρητινών και της εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής.

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται διαγραμματικά η χρήση υλικών ανά χρονολογία από το 10000π.χ.



Σχήμα 4.3: η χρήση υλικών ανά χρονολογία από το 10000π.χ. διαγραμματικά [B1]

4.3 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με το συστατικό ενίσχυσης.

- (α) Σύνθετα υλικά εμποτισμένα με ίνες.
- (β) Σύνθετα υλικά εμποτισμένα με σωματίδια
- (γ) Στρωματικά σύνθετα υλικά

Σύνθετα υλικά εμποτισμένα με ίνες.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά λόγω της σύνθετης δομής τους ταξινομούνται σύμφωνα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

Διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες :

- (α) Συνήθη σύνθετα υλικά για την παραγωγή των οποίων χρησιμοποιούνται ίνες γυαλιού με μετρίως υψηλές τιμές μέτρου ελαστικότητας
- (β) Προηγμένα σύνθετα υλικά με ίνες υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας.

Ακόμα ταξινομούνται ανάλογα με τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- (α)Μονοδιευθυντικά σύνθετα, όπου οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- (β)Πολυδιευθυντικά σύνθετα, όπου οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

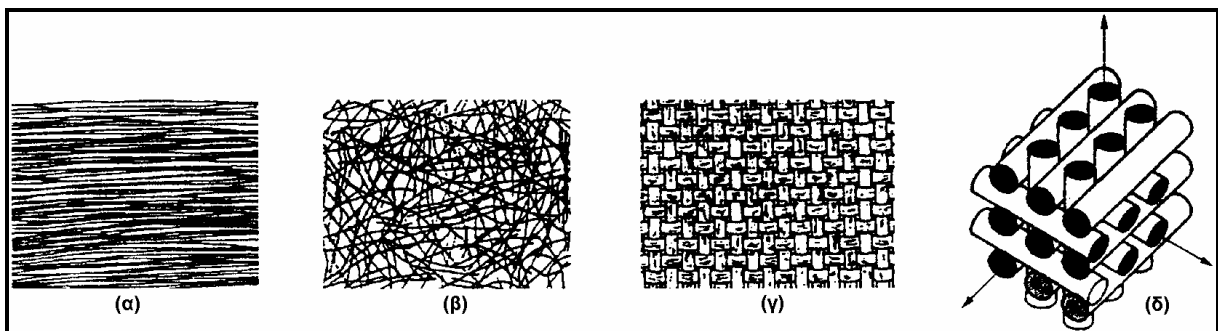
Σύμφωνα με την παραπάνω ιδιότητα τα πολυδιευθυντικά σύνθετα ταξινομούνται στις ακόλουθες υπο-ομάδες, βλ. Σχήμα. 4.4:

- α. Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- β. Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- γ. Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (l/d) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

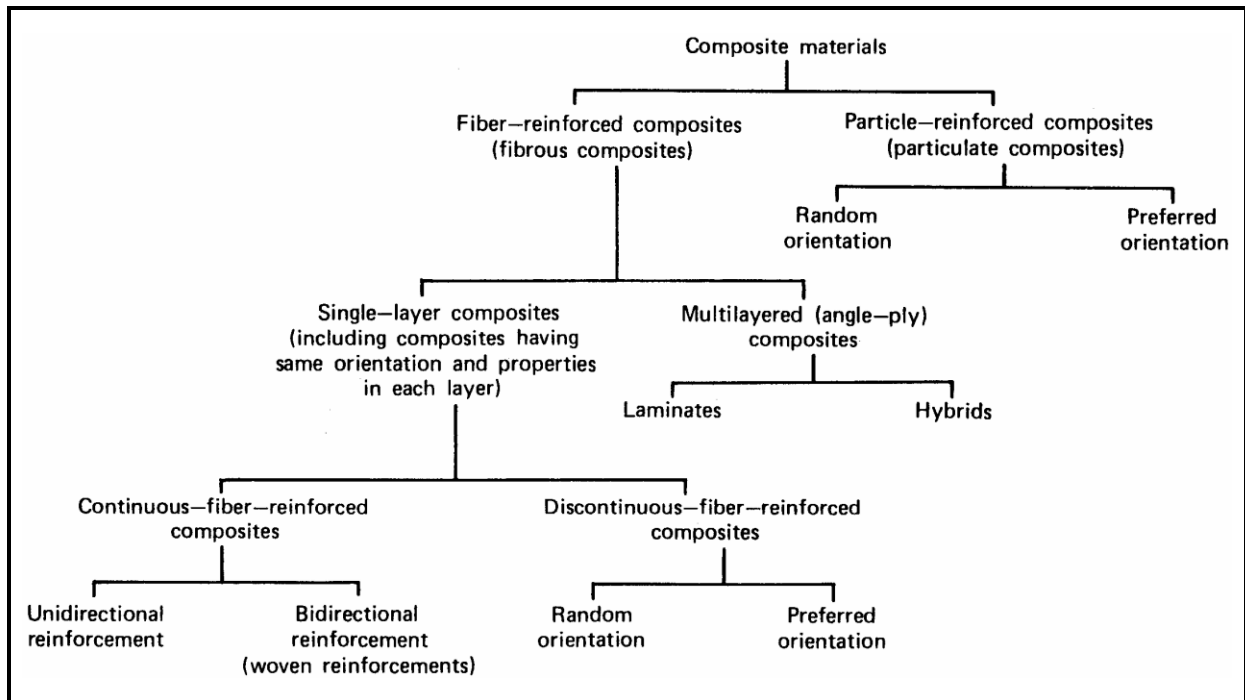
- α. *Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες* (continuous fibers), όταν είναι $l/d \geq 100$.
- β. *Ασυνεχείς ή κοντές ίνες* (discontinuous fibers), όταν είναι $l/d < 100$.
- γ. *Νηματήδια ή τριχίτες* (whiskers): Με $d < 1 \mu\text{m}$ και $l \cong 100\mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Οι κοντές ίνες, λόγω του μικρού μήκους τους, δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.



Σχήμα 4.4: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη. [B1]

Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση τους, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.5

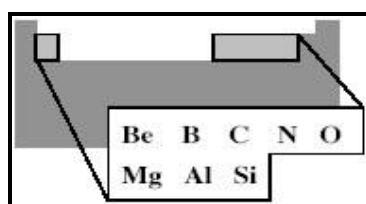


Σχήμα 4.5: Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών [A2]

4.4 Δομή και ιδιότητες ινών

Για την κατασκευή του κατάλληλου σύνθετου υλικού βρίσκονται οι ζητούμενες μηχανικές ιδιότητες, μέτρο ελαστικότητας (E), τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), ακαμψία (stiffness), δυσθραυστότητα (toughness), πυκνότητα (ρ) έτσι ώστε οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας για το υλικό κατασκευής που έχουμε επιλέξει.

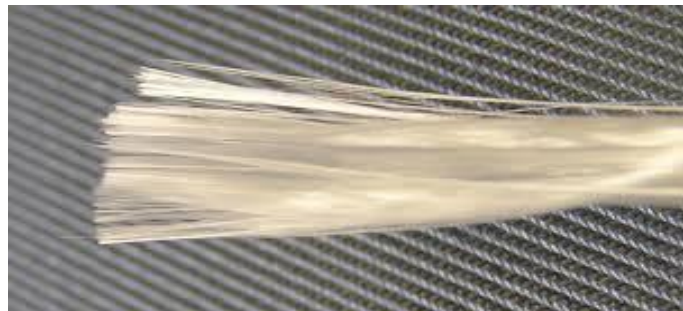
Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2^η και 3^η περίοδο του Περιοδικού Συστήματος (Σχ. 4.6).



Σχήμα 2.6: Στοιχεία 2^{ης} και 3^{ης} περιόδου

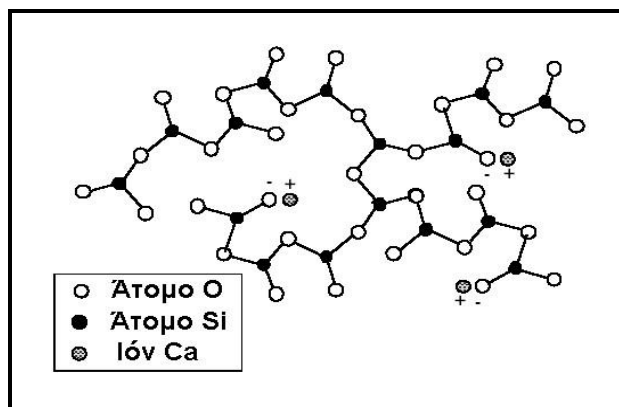
Στα προηγμένα σύνθετα υλικά, οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες είτε από ανόργανα υλικά (γυαλί, άνθρακας, μέταλλα, κεραμικά) είτε από οργανικά υλικά (πολυμερή). Βλέπε ίνες γυαλιού (σχ. 4.7)

ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (GLASS FIBERS)



Σχήμα 4.7.1: Ίνες γυαλιού

Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται κυρίως για την ενίσχυση πολυμερών και όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.3 κατηγοριοποιούνται στα συνήθη σύνθετα και είναι (πρώτης γενιάς) καθώς εμφανίστηκαν το 1940 και χρησιμοποιούνται ευρέως μέχρι σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.ά.. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7.2 .



Σχήμα 4.7.2: Δομή γυαλιού

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 .

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 : Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			SiO ₂ καθαρή
	E	C	S	
Χημική σύσταση (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

E-glass (E=electrical): Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

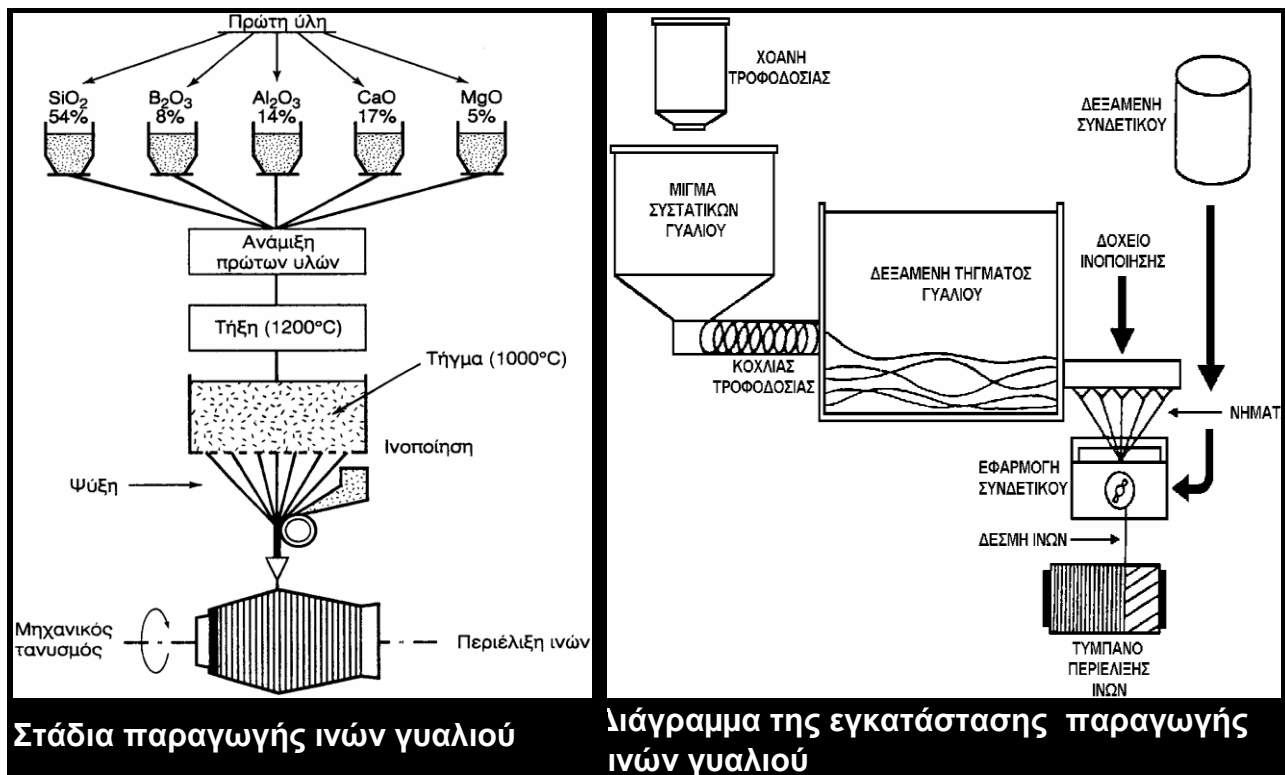
C-glass (C=corrosion): Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.

S-glass (S=stiffness): Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

Σε ειδικές εφαρμογές στις οποίες επιτρέπεται η χρήση ινών γυαλιού και απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία, καθώς όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO_2 (>99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκτριβής (λύση της συνέχειας της επιφάνειάς τους). Εγχαράξεις και εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της ικανότητας πρόσφυσης τους στην πολυμερική μήτρα.

Η συνηθέστερη μέθοδος για την παραγωγή ινών γυαλιού είναι η παρακάτω και γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πύθμενα (Σχ. 4.8) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:



Σχήμα 4.8: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού [Δ1]

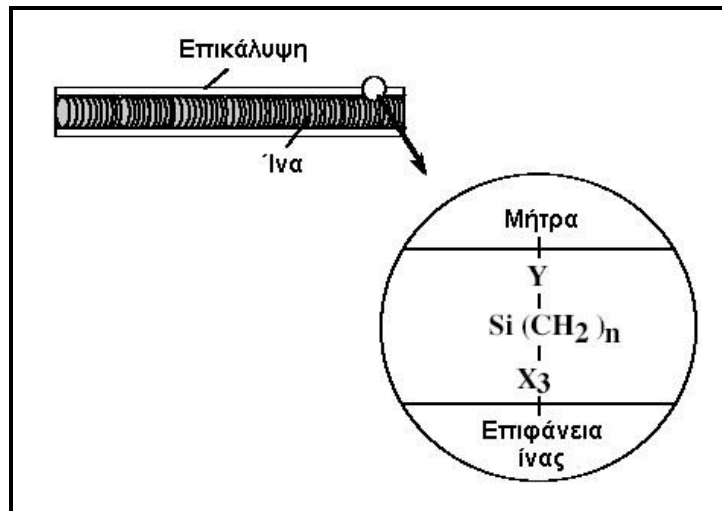
1. Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου τήκεται.
2. Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm).

3. Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.
4. Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο ($1 \pm 15 \mu\text{m}$) και ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη).
5. Ακολουθώς οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σ' αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizes) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλλίτερη πρόσφυση ινών-μήτρας.
6. Τέλος, οι ίνες περιτυλίσσονται ανά δέσμες (strand ή end) των 204 νηματίων (τυπική τιμή) γύρω από τύμπανο, που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα (της τάξης των 50 m/s).
7. Οι ρόλοι υαλονήματος υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

- Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος μέσα στη δεξαμενή, της πυκνότητας του, της διαμέτρου των οπών και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου.
- Κατά τη διάρκεια της παραγωγής των ινών, πρέπει να αποφεύγεται η επαφή ινών μεταξύ τους, καθώς και με άλλα αντικείμενα, που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακές κακώσεις στην ίνα.
- Τα χημικά πρόσθετα (sizes) διακρίνονται σε *προσωρινά* και *συμβατά*. Τα προσωρινά πρόσθετα έχουν κύριο στόχο αφενός την προστασία της ίνας έναντι μείωσης της αντοχής λόγω τριβής της με τις άλλες ίνες και αφετέρου τη σύνδεση των ινών μεταξύ τους στην περίπτωση που διαμορφωθούν σε πλέξη ύφανσης και ακόμη προσδίδουν στην ίνα αντιστατικές ιδιότητες.

Συνήθως χρησιμοποιούνται αμυλέλαια, που διευκολύνουν αποτελεσματικά την πρόσφυση της ίνας και της ρητίνης εμποτισμού. Τα προσωρινά πρόσθετα απομακρύνονται με θέρμανση των ινών σε κλιματιζόμενο περιβάλλον σε θερμοκρασία 340 C για χρονικό διάστημα 15-20 h. Τα συμβατά πρόσθετα έχουν στόχο τη βελτίωση της αρχικής πρόσφυσης ρητίνης-γυαλιού και τη μείωση των δυσάρεστων επιπτώσεων της υγρασίας ή άλλων περιβαλλοντικών επιδράσεων. Πρόκειται περί οργανοπυριτικών ενώσεων του τύπου $X_3Si(CH_2)_nY$, όπου Y ομάδα συμβατή προς την πολυμερική μήτρα, X υδρολυόμενη ομάδα στο πυρίτιο και $n=0-3$, η δράση των οποίων περιγράφεται στο Σχ. 4.9.



Σχήμα 4.9 : δράση οργανοπυριτικών ενώσεων

- Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού προσδιορίζεται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Λόγω αυτής της δομής τα υαλοήματα είναι ισότροπα υλικά και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η συμμετοχή και των μεταλλικών οξειδίων στη σύνθεση των ινών μπορεί να επιφέρει αλλαγές στις φυσικοχημικές τους ιδιότητες.

ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ (POLYMER FIBERS)

Πρόκειται για ίνες οι οποίες από μηχανικής άποψης δεν είναι υψηλής απόδοσης, καθώς η αντοχή τους δεν ξεπερνά τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa, εντούτοις το χαμηλό κόστος παραγωγής και το μεγάλο εύρος χρήσης τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

Οι πιο διαδεδομένες είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Kevlar. Τα νήματα Nylon και πολυεστέρα παράγονται με φυγοκεντρική περιδίνηση τήγματος, ενώ ακρυλικά και κυτταρινικά νήματα παρασκευάζονται με φυγοκεντρική περιδίνηση διαλύματος και συνακόλουθες τεχνικές καθίζησης ιζήματος.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar και παράγεται σε τρεις τύπους:

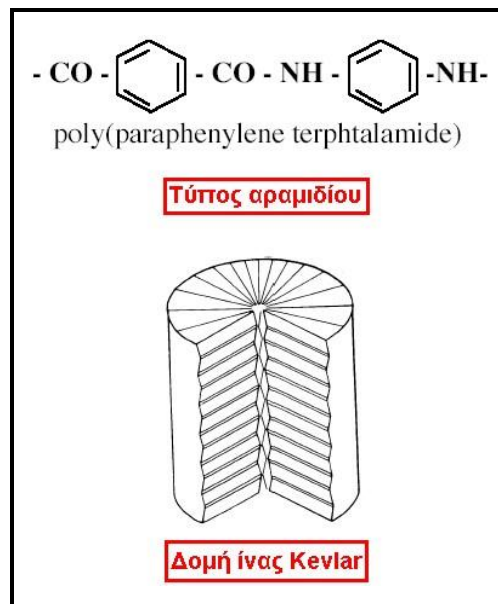
- **Kevlar-29:** Με μέτρο ελαστικότητας 60 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-49:** Με μέτρο ελαστικότητας 120 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-149:** Με μέτρο ελαστικότητας 180 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa.

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm^3), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στον Πίν.4.2 παρατίθενται οι βασικές ιδιότητες των ινών Kevlar.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar

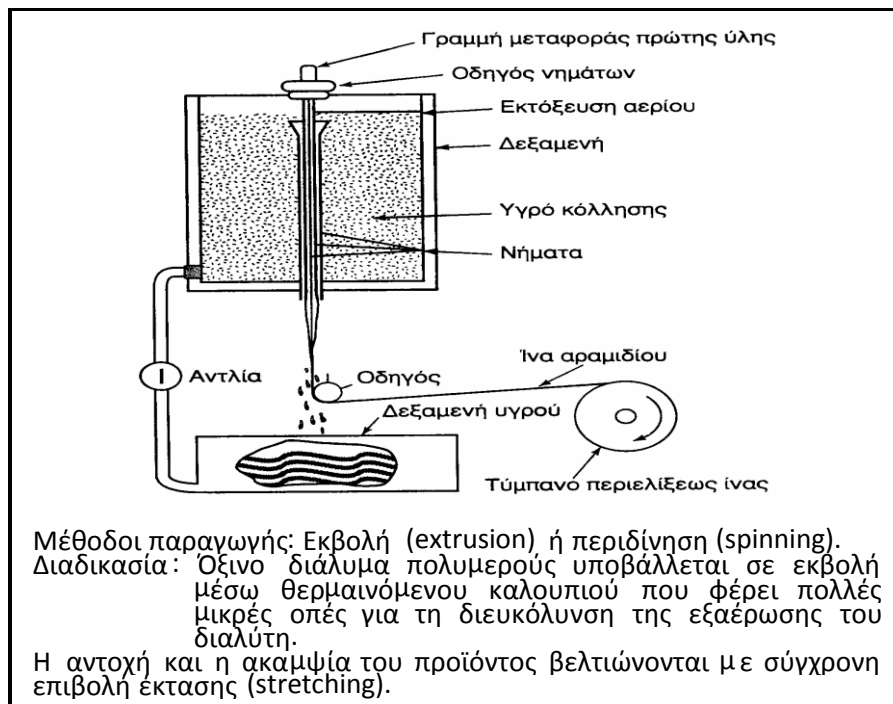
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425

Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι αυτές καθ' αυτές πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας, βλ. Σχήμα 4.10. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands).



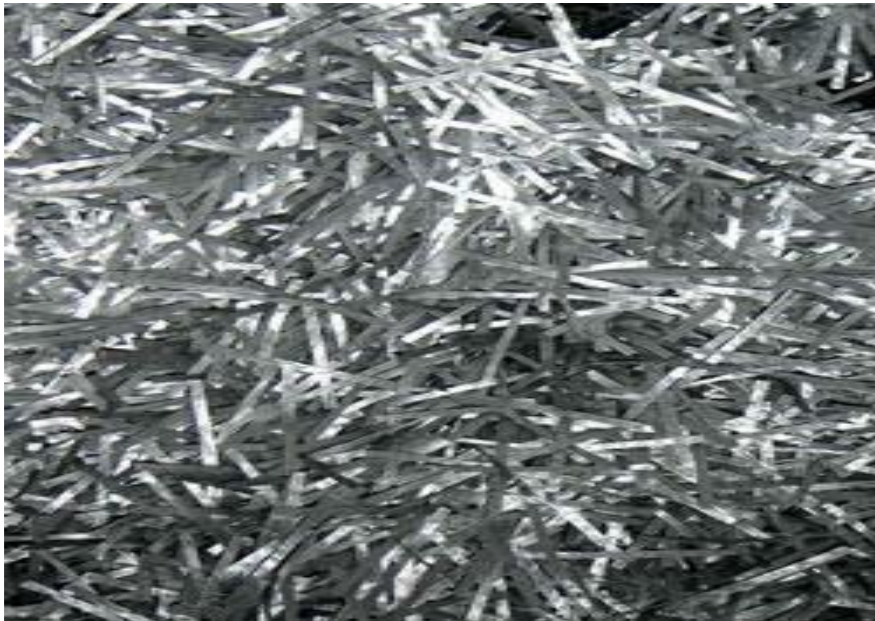
Σχήμα 4.10 κυλινδρικός φλοιός της ίνας kevlar

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής ενισχυτικών ινών πολυαμιδίου.



Σχήμα 4.11 Διάταξη παραγωγής ινών πολυαμιδίου

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ



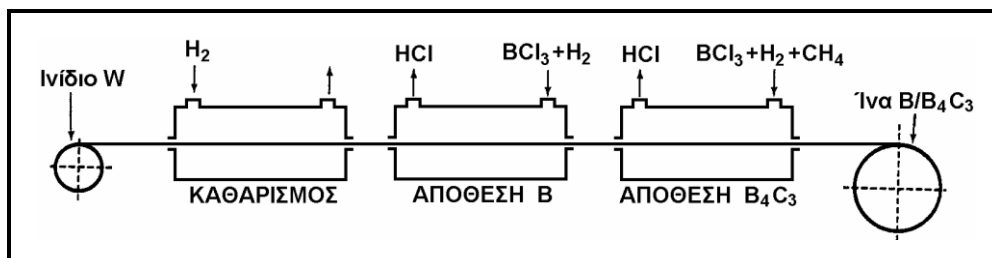
Εικόνα 4.12.1: Μεταλλικές ίνες

Πρόκειται για είδος ινών ενίσχυσης με περιορισμένη χρήση, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής. Οι μεταλλικές ίνες ενίσχυσης παρουσιάζουν ελκυστικές μηχανικές ιδιότητες για αρκετές εφαρμογές, με βασικότερο μέταλλο το βόριο (B).

Οι βασικότερες τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου είναι η αναγωγή από αλογονίδιο του βορίου και η απόθεση με τεχνική CVD που αναλύονται παρακάτω.

ΑΝΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΑΛΟΓΟΝΙΔΙΟ ΤΟΥ ΒΟΡΙΟΥ

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως BCl_3) ανάγεται από υδρογόνο σε έναν κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας ($1100\text{ }^\circ\text{C}$) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου $10\text{-}15\text{ }\mu\text{m}$, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.12.2. Η διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ $100\div 200\text{ }\mu\text{m}$, ενώ οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.



Σχήμα 4.12.2 : Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου [Δ1]

ΑΠΟΘΕΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΗ CVD

Το βόριο αποτίθεται σε νήμα άνθρακα ή βολφραμίου με την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD). Η τεχνική αυτή είναι οικονομικότερη από την προηγούμενη, αλλά το προϊόν έχει χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

Οι ίνες βορίου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή ($E = 300\div 420$ GPa, $UTS = 3000\div 3700$ MPa), ενώ οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές ως τους 500 °C. Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου (ίνες Borsic) ή νιτριδίου του βορίου. Τα επιστρώματα αυτά αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας, δεδομένου ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε σύνθετα με μεταλλική μήτρα τιτανίου ή αλουμινίου, ευνοούνται η διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του συνθέτου.

Άλλα μέταλλα που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικές ίνες είναι το Βιρύλιο (be) και το βολφράμιο (W) .

ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Πρόκειται για είδος ινών με βασικό του χαρακτηριστικό τη χρήση του σε εφαρμογές που απαιτείται αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Άλλα χαρακτηριστικά είναι η υψηλή αντοχή και η στιβαρότητα. Οι πιο χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι:

- Ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) , οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με τη μορφή φυλλιδίων. Η μορφή ίνας παρουσιάζει ανώτερες μηχανικές ιδιότητες και υψηλότερες τιμές αντοχής από τα φυλλίδια. Τέλος το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή μέχρι τους 1400 °c αλλά η χρήση του περιορίζεται μέχρι τους 900 καθώς μετά παρουσιάζει σημαντική δραστηριότητα.
- Ίνες αλούμινας (Al_2O_3). Οι μονοκρυσταλλικές ίνες έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες με τη σταθερότητά τους να διατηρείται ως τους 800 °c . Βασικό τους μειονέκτημα είναι οι εύκολες επιφανειακές φθορές .
- Σπανιότερα συναντάμε ίνες από: οξειδίο του βηρυλλίου (BeO) , οξειδία του ζirkονίου (ZrO_2) , Si_3N_4 και B_4C .

ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

(α) Με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα. Οι παραγόμενες ίνες έχουν πυρήνα διαμέτρου $10\div 25$ μm και εξωτερική διάμετρο $100\div 150$ μm .

(β) Από πολυμερικές ίνες (Nicalon)

Θέρμανση σε κενό σε θερμοκρασία 850 °C μετατρέπει την πολυμερική ίνα σε ανόργανο SiC, ενώ θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία (>1000 °C) προκαλεί κρυστάλλωση σε β-SiC. Οι παραγόμενες ίνες έχουν διάμετρο 10÷15 μm.

(γ) Τριχίτες SiC από φλοιό ρυζιού.

Ο φλοιός του ρυζιού περιέχει ~15% κ.β. SiO₂.

Θέρμανση σε θερμοκρασία 700÷900 °C οδηγεί σε υπόλειμμα SiO₂ και ελεύθερο άνθρακα.

Θέρμανση του υπολείμματος σε θερμοκρασία ~1500 °C και σε περιβάλλον αζώτου ή αμμωνίας οδηγεί στο σχηματισμό SiC.

Οι παραγόμενοι τριχίτες έχουν διάμετρο ~0.1÷1 μm και μήκος ~50 μm.

Συγκριτικός πίνακας των ιδιοτήτων των ινών που παράγονται από κάθε μέθοδο παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω (Πίν. 4.3).

Γενικά, οι μέθοδοι παρασκευής κεραμικών ινών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές)

Ιδιότητα \ Μέθοδος	CVD	Nicalon	Τριχίτες
Πυκνότητα, ρ (g/cm ³)	3.3	2.6	-
Αντοχή, UTS (MPa)	3500	2000	7000
Μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)	430	180	480
Διάμετρος ίνας, d (μm)	140	15	<1

Το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400 °C, ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του, περιορίζεται στους 900 °C, λόγω της σημαντικής δραστηριότητάς του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή.

Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας (Al₂O₃) διαμέτρου 250 μm έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800 °C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

ΤΡΙΧΙΤΕΣ (WHISKERS)

Οι τριχίτες είναι νηματικοί μονοκρύσταλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του 1μm, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλει κρυστάλλου. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρυλλία και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη. Στον Πίνακα 4.4 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών και τριχιτών από SiC και Al₂O₃.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 : Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιτών από SiC και Al₂O₃

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiCINA	SiCTΡΙΧΙΤΗΣ	Al2O3 INA	Al2O3 ΤΡΙΧΙΤΗΣ
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm ³)	3,2	3,2	4,0	4,0
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	900	1600	800	1300

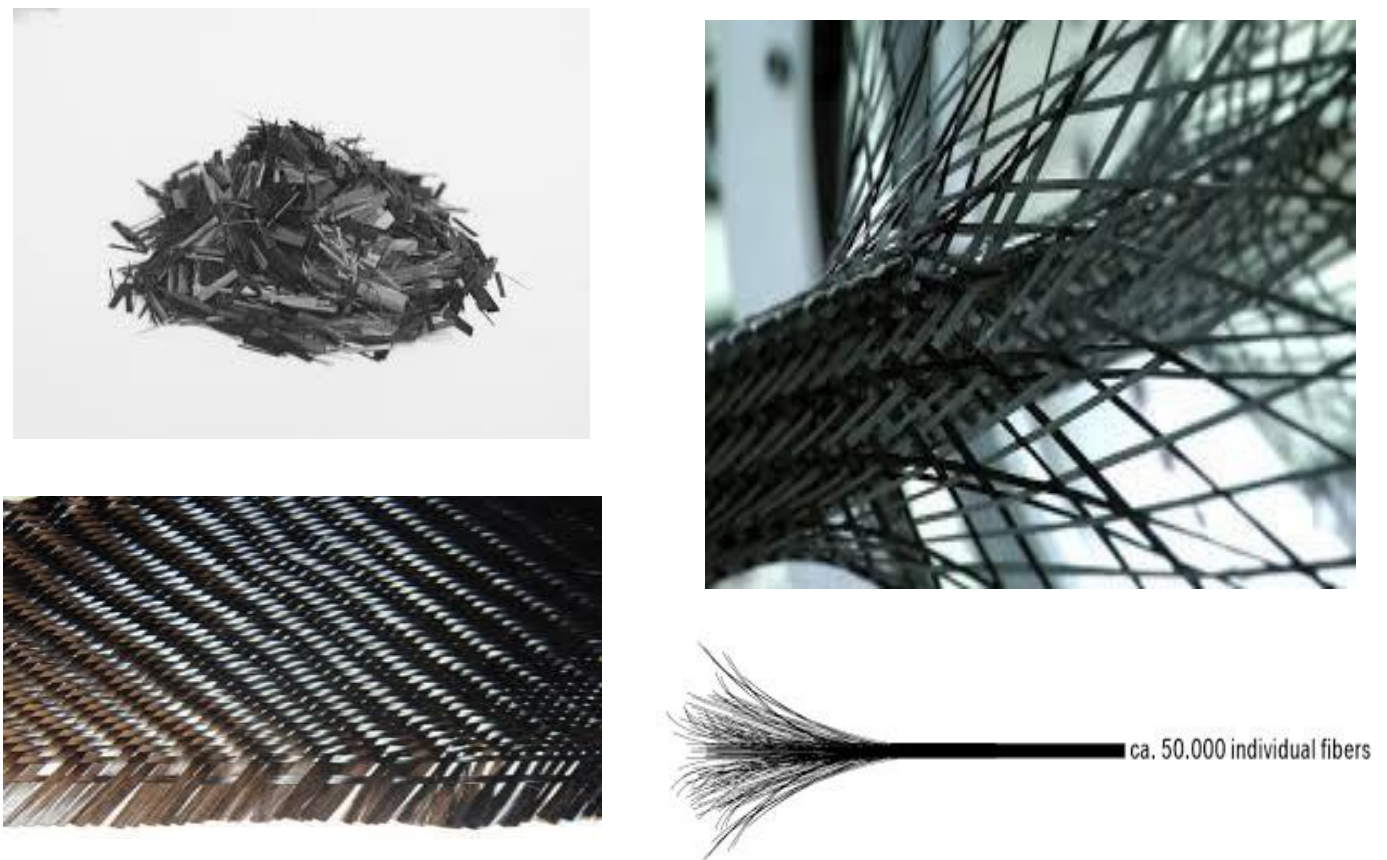
ΙΝΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθηνό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία (mica).

Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου ~20 nm, και έχουν διάμετρο ~10 μm και μήκος αρκετά cm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι θερμοκρασία 500°C, οπότε η μηχανική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά. Το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι της τάξης των 160 GPa, ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι 5500 GPa. Ο αμιάντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα.

Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700÷900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm³.

4.5 Ίνες άνθρακα (CARBON FIBERS) και σύγκριση με άλλες ίνες



Σχήμα 4.13.1: Ίνες άνθρακα

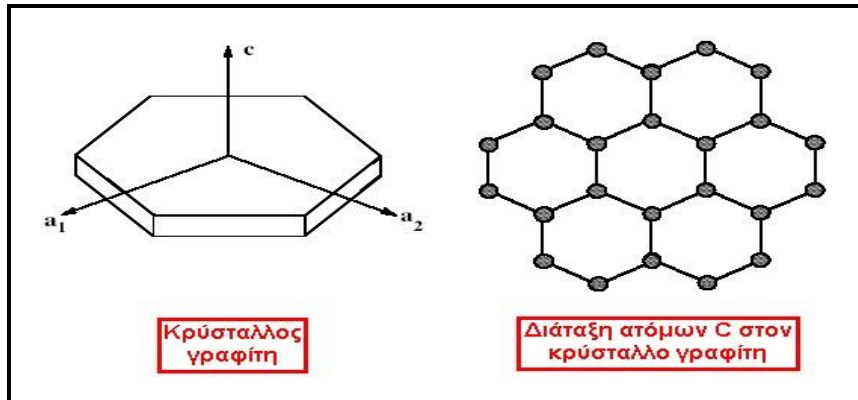
Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα.

Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών.

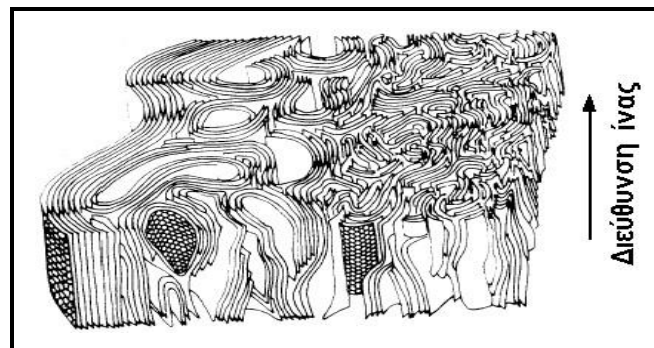
Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους.

Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφίτη δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων, βλ. Σχ. 4.13.2 Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή

τη διεύθυνση. Τυπική δομή ανθρακονήματος, όπως έχει ληφθεί από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, παρουσιάζεται στο Σχ. 4.14.

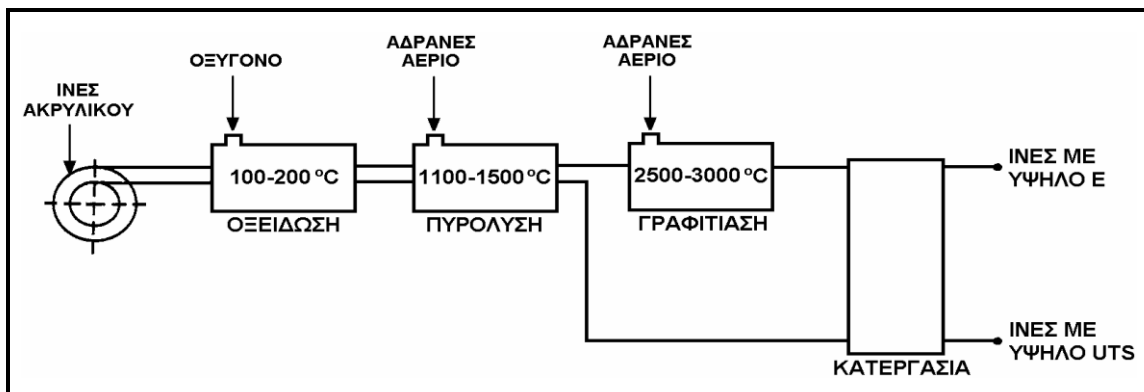


Σχήμα 4.13.2: πυκνή γραφίτική δομή



Σχήμα 4.14: Τυπική δομή ανθρακονήματος

Στην παραγωγή ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτρίλιου (PAN), ίνες τεχνητής μέταξας (rayon) και πίσσα. Η παραγωγή ινών γραφίτη από ίνες (PAN) πραγματοποιείται σε τρία στάδια (Σχ. 4.15):



Σχήμα 4.15 : Στάδια παραγωγής ινών γραφίτη [Δ1]

- *Οξειδωση* των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200 °C), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- *Πυρόλυση*, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100- 1500°C. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως *ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής* (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.
- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000°C), οπότε πραγματοποιείται *γραφιτίαση*, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως *ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας* (high module carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm.

Στον Πίν.4.5 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξειδωση και πυρόλυση) και σε τρία στάδια (οξειδωση, πυρόλυση, θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία), αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

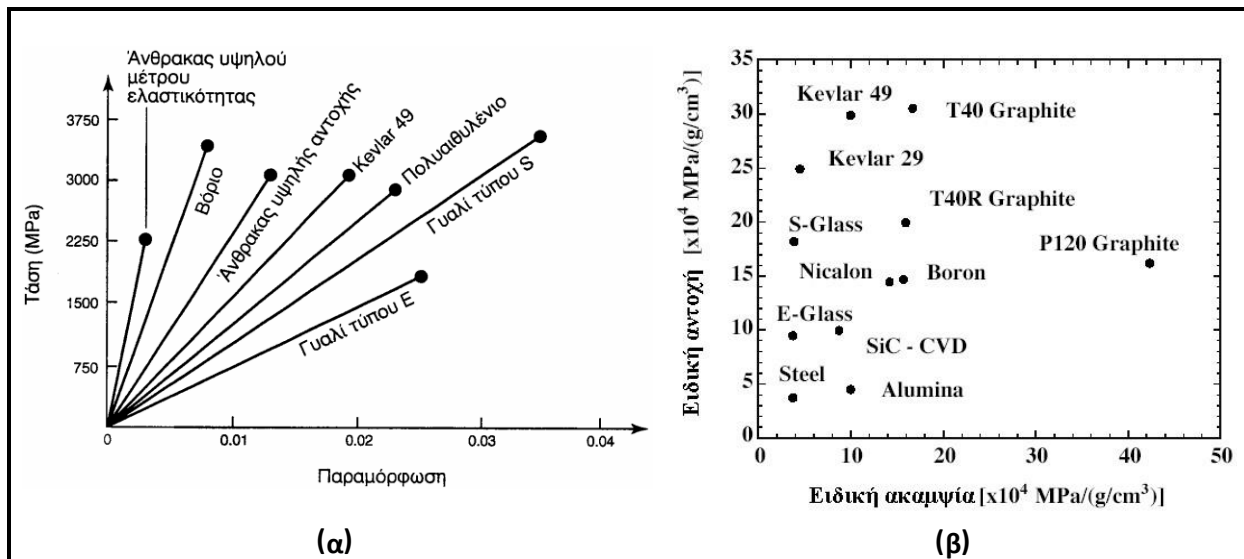
- Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500 °C και για τους δύο τύπους ινών. Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας.
- Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες, δισδιάστατο πλέγμα, τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διευθέτησης των ινών αυτών καθορίζει και το βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία.
- Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων, δίνει την ευχέρεια παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφιτίασης και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφιτίασης και το βαθμό ανισοτροπίας). Γενικά, όσο καλύτερα

προσανατολισμένες είναι οι ίνες και όσο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύουν.

- Τέλος, το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

(α) Ως προς την ειδική αντοχή και ειδική ακαμψία (Σχήμα 4.16)



Σχήμα 4.16: (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες $\sigma - \epsilon$, (β) Συσχετισμός ειδικής αντοχής και ειδικής ακαμψίας για διάφορα υλικά ενισχυτικών ινών.

(β) Ως προς τη θερμική ευστάθεια (Πίνακας 4.6)

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών

Ίνα	T _{max} (oC)
Spectra	150
Kevlar	250
Glass	800
SiC	1000
Alumina	1370
Carbon	2000*

* Παρουσία οξυγόνου: T_{max}=500 °C

(γ) Ως προς την παραμόρφωση θραύσης (Πίνακας 4.7)

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών

Ίνα	Παραμόρφωση θραύσης (%)
Kevlar	3-4
Glass	2
Carbon	1
Ceramic	<1

4.6 Μήτρες σύνθετων υλικών

Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους.
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές.
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες.
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών, που ξεκινούν από θραύση των ινών.

Για να ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού.

Οι ιδιότητες αυτές πρέπει επίσης να παρουσιάζουν «συμβατότητα» με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας.

Ανάλογα με το υλικό της μήτρας διακρίνουμε τις ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά:

- Οργανικές.
- Μεταλλικές.
- Κεραμικές.

Η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου. Μία γενική οδηγία αναφορικά με τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα υλικών παρουσιάζεται στο Σχ. 4.17.



Σχήμα 4.17: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών [Δ1]

Τα αντίστοιχα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται με τις ακόλουθες συντμήσεις:

PMC: Polymer Matrix Composite MMC: Metal Matrix Composite

CMC: Ceramic Matrix Composite

Οργανικές μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

(α) Θερμοπλαστικές: Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

(β) Θερμοσκληρυνόμενες: Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:

- **Πολυεστερικές ρητίνες** που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- **Εποξυδικές ρητίνες** με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200° C, καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική.
- **Φαινολικές ρητίνες**, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400°C.

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρας προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μητρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μητρων είναι πολύ χαμηλή (~300 °C), ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500 °C.

Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα σπουδαιότερα των οποίων φαίνονται στον Πίν. 4.8.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των οργανικών μητρών).

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες. • Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών. • Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου. • Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου. • Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές. • Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού (συγκόλληση, κόλληση). 	<ul style="list-style-type: none"> • Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών. • Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής. • Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO₂ σε μήτρα Al). • Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας. • Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.

ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή.

Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών- μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

4.7 Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινώδων σύνθετων

Κατά την επιλογή των υλικών ενίσχυσης και μήτρας, κατά το σχεδιασμό ενός σύνθετου υλικού, είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψη και άλλες παράμετροι όπως: η διάμετρος, το μήκος, η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών στο σύνθετο υλικό, η ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού της μήτρας και η συμβατότητα των υλικών ινών και μήτρας. Όλες αυτές οι ιδιότητες συντιθέμενες προσδιορίζουν και τις τελικές ιδιότητες του ινώδους σύνθετου υλικού.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΙΝΩΝ

Βασική παράμετρος είναι ο *συντελεστής σχήματος* της ίνας (s) (aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους προς την ακτίνα (r) των ινών και αποτελεί κριτήριο για το χαρακτηρισμό των ινών ως συνεχών ή ασυνεχών. Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες. Γενικά, η αντοχή των ινών αυξάνεται με αύξηση του μήκους και μείωση της διαμέτρου τους.

Στις ασυνεχείς ίνες υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος (l_c), για δεδομένη διάμετρο ίνας (d), που ορίζεται από τη σχέση $\sigma_f \cdot d$ και $l_c = 2\tau_i$ όπου: σ_f η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και τ_i η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας. Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο του κρίσιμου μήκους l_c , η ενίσχυση που προσφέρει στο σύνθετο είναι πολύ μικρή, ενώ, αν είναι μεγαλύτερο ($l > l_c$), η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής.

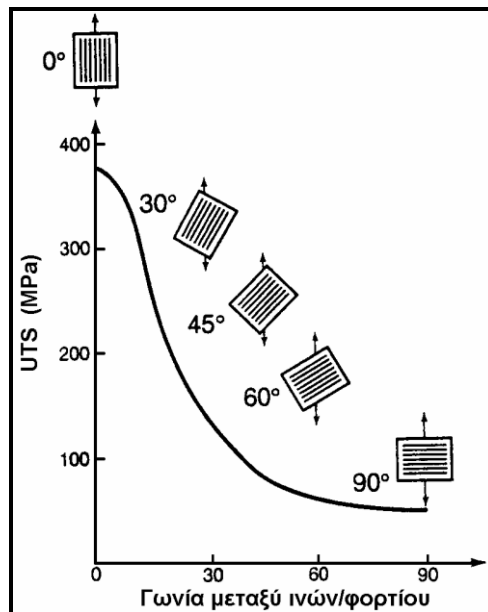
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ

Η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται, με αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των περιεχόμενων ινών. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας. Πολλές φορές, για την καλύτερη ενίσχυση της μήτρας δεν χρησιμοποιείται ένας, μόνον, τύπος ινών, αλλά μίγμα δύο ή περισσότερων τύπων. Τα παραγόμενα ονομάζονται *υβριδικά σύνθετα* (hybrid composites).

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ

Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία και η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του σύνθετου να είναι όσο το δυνατόν ισότροπη.

Από το Σχήμα 4.18 συνάγεται ότι για σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα (μέτρο της οποίας είναι το μέτρο ελαστικότητας, E) και η βέλτιστη αντοχή, UTS επιτυγχάνονται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών.



Σχήμα 4.18: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό συνθέτου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού. [Δ1]

Συνήθως, όμως, ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Όταν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το σύνθετο συμπεριφέρεται ως ανισότροπο, ενώ, όταν η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού, το σύνθετο αποκτά ισότροπη συμπεριφορά.

ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΙΝΩΝ-ΜΗΤΡΑΣ

Η καλή συνάφεια ινών-μήτρας είναι πολύ σημαντική για την καλή λειτουργία του συνθέτου. Η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, ορίζεται ως η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του συνθέτου.

Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull out) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Γι' αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό του συνθέτου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας και ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό:

- Οι ίνες γυαλιού επενδύονται με ουσίες που εξασφαλίζουν τη συνάφεια με τη μήτρα και την αντίσταση του συνθέτου στην υγρασία.
- Οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα ή με Ni, όταν χρησιμοποιούνται με μεταλλικές μήτρες (Ag, Al).
- Οι ίνες βορίου επικαλύπτονται με BN ή SiC, όταν συνδυάζονται με μήτρα αλουμινίου. Ίνες B με επικάλυψη SiC αναφέρονται ως Borsic.

ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

Στους Πίν. 4.9-11 δίνονται παραδείγματα των συνηθέστερων συνθέτων υλικών οργανικής, μεταλλικής και κεραμικής μήτρας με ενίσχυση διαφόρων τύπων ινών και οι εφαρμογές τους στην κατασκευαστική βιομηχανία.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών οργανικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέτες τένις, μπάστούνια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος)
Πολυεστερική Πολυμερική	Γραφίτη Γυαλιού	Αεροναυπηγική και αυτοκινητο - βιομηχανία. Μέρη αεροσκαφών, πλοιαρίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση.
		Αθλητικός εξοπλισμός

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Al	Borsic	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.
	Al ₂ O ₃	Έμβολα μηχανών Diesel.
	SiC	Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων.
	Γραφίτη	Ιστοί κεραίων τηλεσκοπίου Hubble.
Κραμάτων Cu	SiC	Υψηλής αντοχής προπέλες σκαφών.
Κράματα Ti και W	SiC & B ₄ N	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.11: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών κεραμικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Άνθρακα	Άνθρακα	Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (επιτρεπτή η λειτουργία ως τους 3000 °C). Δισκόφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα
Al ₂ O ₃ , SiC, ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ και κεραμικά γυαλιά	Al ₂ O ₃ & SiC	Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, συστήματα θερμομόνωσης.

4.8 Μέθοδος κατασκευής και μορφοποίησης σύνθετων υλικών

Η μορφοποίηση ινωδών συνθέτων υλικών περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα τρία στάδια:

- Παραγωγή των ινών.
- Διάταξη-διευθέτηση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα (yarn, tow, roving), όπου οι μεμονωμένες ίνες ομαδοποιούνται κατάλληλα ανά 100-100.000.
- Εισαγωγή των ινών στη μήτρα.

Με βάση το υλικό της μήτρας, οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών συνθέτων υλικών μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

A. Μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας

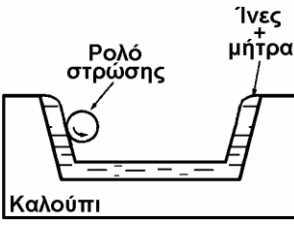
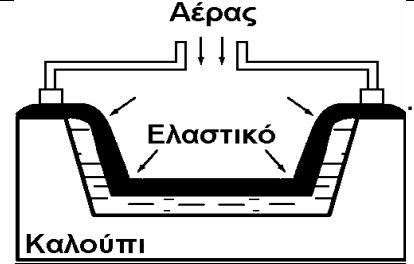
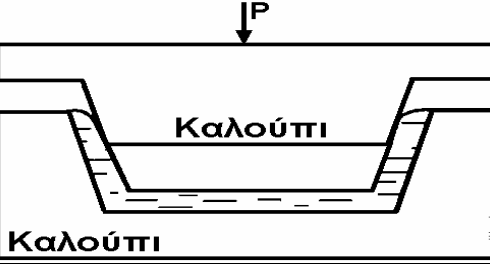
- A1. Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου (Σχήμα 4.19)
- Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)
- Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag)
- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)

- A2. Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου (Σχ. 4.20 – 4.22)
- Περιέλιξη νήματος (filament winding)
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)

B. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας (Σχ. 4.23 - 4.25)

- Συνδιέλαση (co-extrusion)
- Μορφοποίηση με χύτευση (casting process)
- Συμπύεση σε στερεή κατάσταση
- Απόθεση υλικού μήτρας

Γ. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας

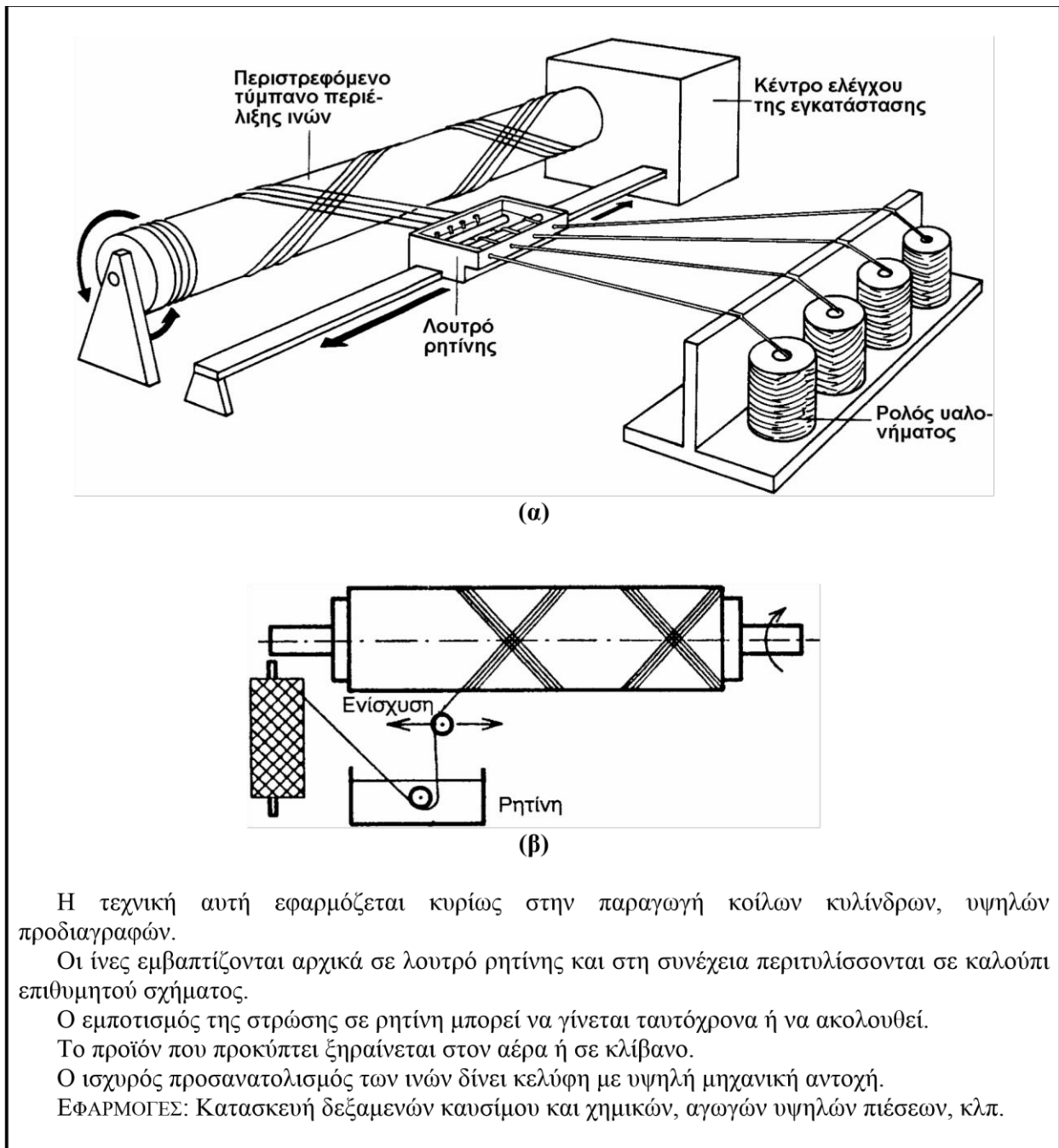
		
<p>Χειροποίητη στρώση (hand lay-up) (α)</p> <p>Απλή τεχνική, αλλά αργή και επίπονη.</p> <p>Πλέγματα ινών τοποθετούνται κατά στρώσεις σε καλούπι.</p> <p>Η ρητίνη (μαζί με τους καταλύτες και επιταχυντές) απλώνεται στις ίνες (με έγχυση ή επάλειψη ή ψεκασμό).</p> <p>Ακολουθεί συμπίεση με ρολό προς μείωση πορώδους και εξασφάλιση καλής συνάφειας ινών-μήτρας.</p> <p>Η πλάκα συνθέτου υποβάλλεται σε ξήρανση.</p>	<p>Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag) (β)</p> <p>Παραλλαγή της χειροποίητης στρώσης. Το πιεστικό μέσο της μήτρας είναι αέριο υπό πίεση</p>	<p>Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (match die-moulding) (γ)</p> <p>Η όλη διαδικασία μορφοποίησης του συνθέτου λαμβάνει χώρα μέσα σε δυμερές καλούπι με την αντίστοιχη τεχνική χύτευσης.</p>

Σχήμα 4.19: Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι.

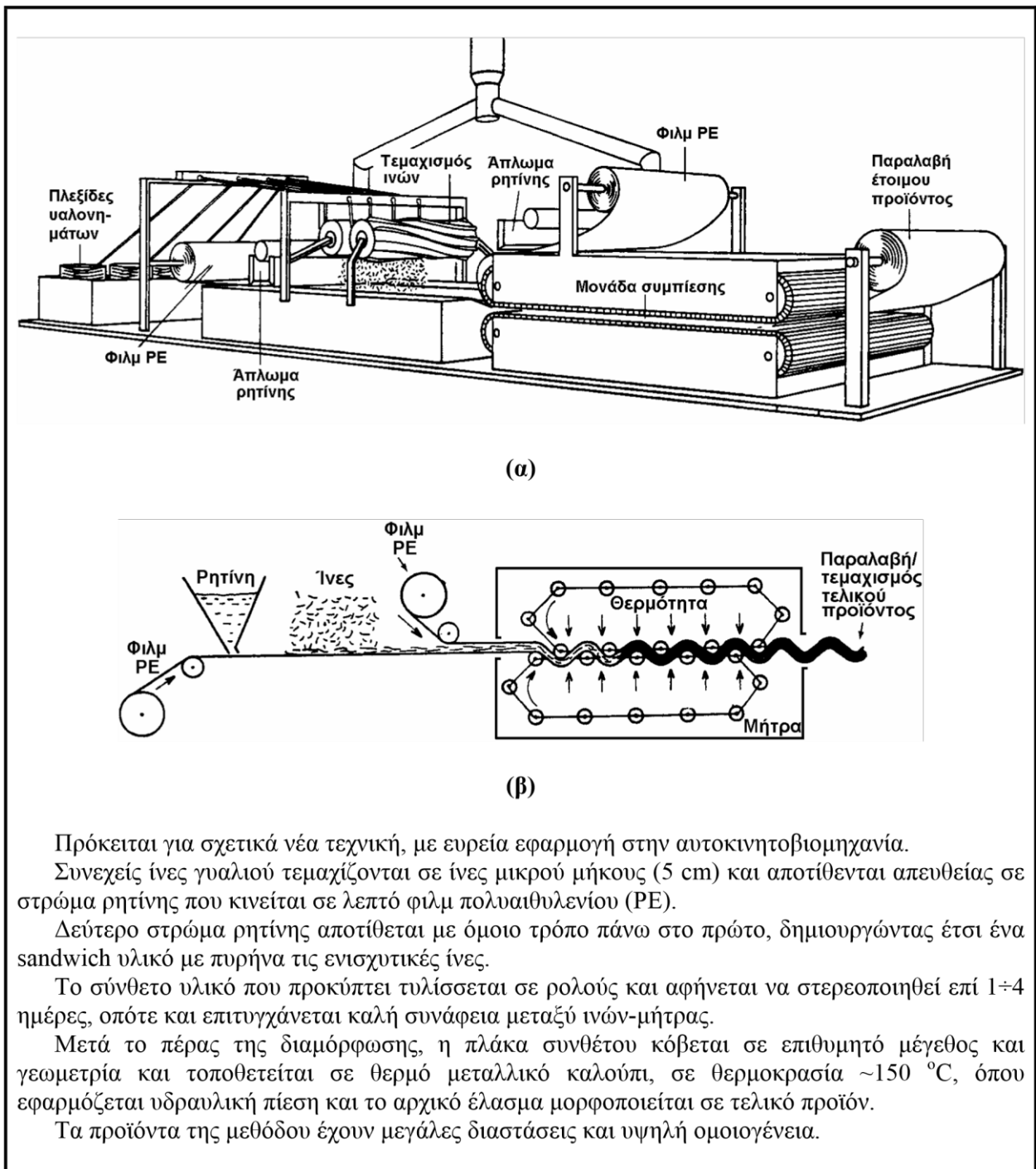
Οι ίνες διατίθενται στην αγορά σε δεσμίδες τυλιγμένες γύρω από ένα κυλινδρικό οδηγό. Μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες ή πεπλεγμένες.

Οι ασυνεχείς (μικρού μήκους) ίνες συνδυάζονται με το υλικό μήτρας είτε σε τυχαία διάταξη, είτε όσο το δυνατόν προσανατολισμένες.

Οι συνεχείς (μεγάλους μήκους) ίνες είτε ευθυγραμμίζονται σε μία διεύθυνση σε μορφή ταινίας είτε διατάσσονται σε πλεγμένα στρώματα (υαλοϋφασμα).



Σχήμα 4.20 : Περιέλιξη νήματος (filament winding) [Δ1]

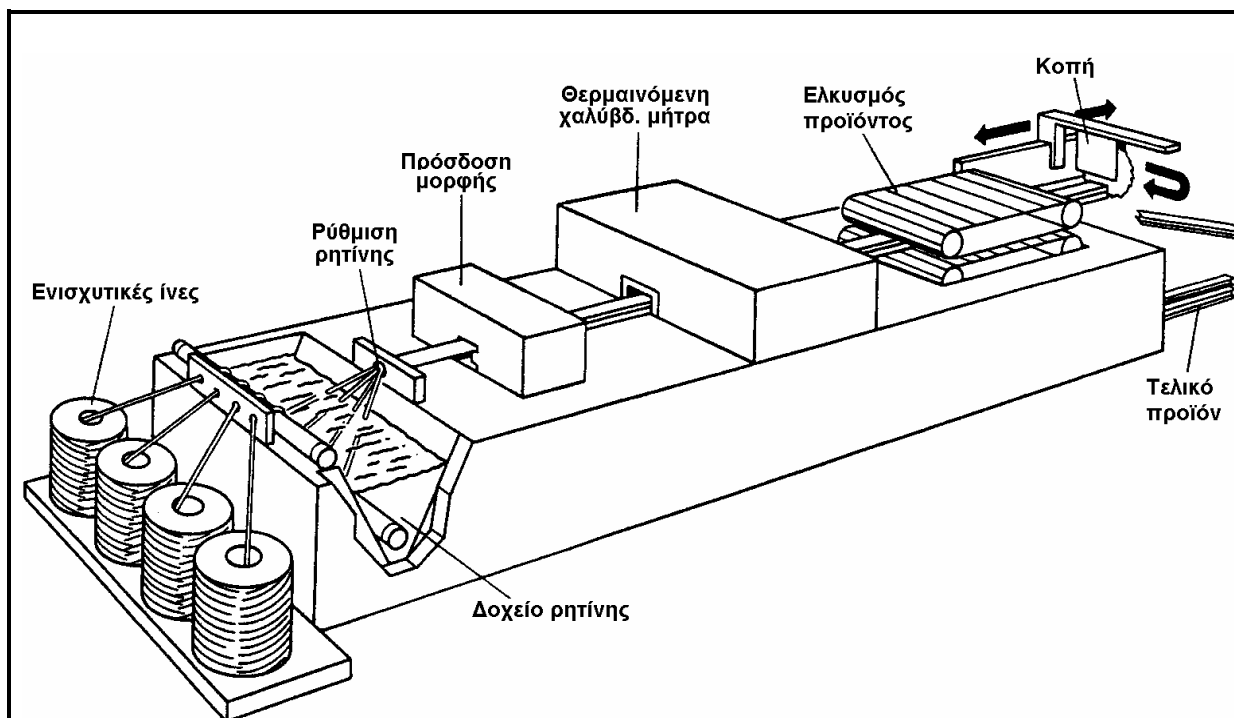


Σχήμα 4.21: Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)

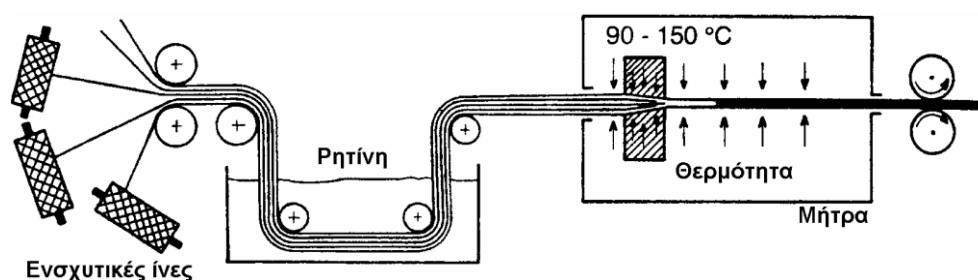
(α) Διάταξη μορφοποίησης,

(β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.

[Δ1]



(α)



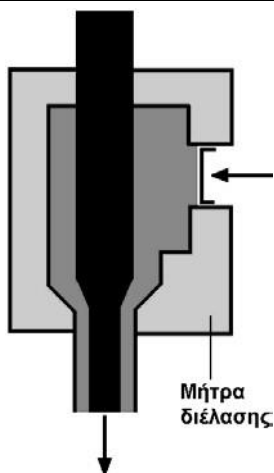
(β)

Η παρούσα τεχνική μορφοποίησης εφαρμόζεται όταν απαιτείται σταθερή διατομή προϊόντος (σωλήνες, αγωγοί, δοκοί, κλπ.).

Ίνες μεγάλου μήκους, διευθετημένες παράλληλα μεταξύ τους εμβαπτίζονται κατά τρόπο συνεχή σε λουτρό ρητίνης και οδηγούνται σε θερμαινόμενη χαλύβδινη μήτρα, όπου το προϊόν λαμβάνει την τελική του διατομή.

Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ινών και του ισχυρού προσανατολισμού τους παράλληλα προς τον επιμήκη άξονα του προϊόντος, παρατηρείται υψηλή μηχανική αντοχή κατά τη διεύθυνση αυτή.

Σχήμα 4.22: Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας. [Δ1]



Πρόκειται για ταυτόχρονη διέλαση των συστατικών υλικών του συνθέτου και ενδείκνυται η εφαρμογή της στην περίπτωση παρόμοιας ολκιμότητας ινών και μήτρας.

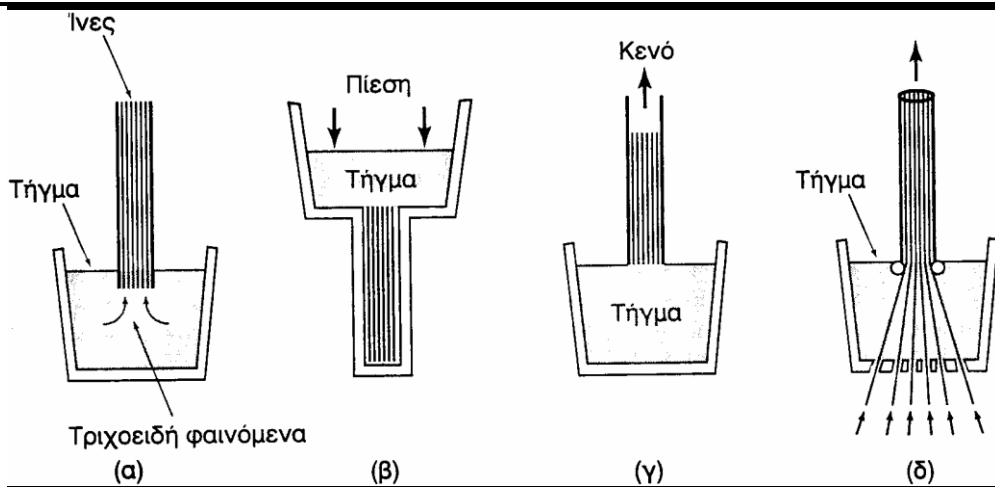
Όταν οι ίνες είναι ψαθυρές, η κατεργασία λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η ενίσχυση της μήτρας με την τεχνική της συνδιέλασης δεν είναι θεαματική, εξασφαλίζεται όμως καλλίτερη στιβαρότητα και χαμηλότερη πυκνότητα συνθέτου. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Σύνθετο με μήτρα Nb ή Ta και ενίσχυση ινών μαγνησίας (MgO), οξειδίου του θορίου (ThO) ή (ZrO₂).

Σχήμα 4.23: Συνδιέλαση (co-extrusion)

[Δ1]



ήτρα εισάγεται ως τήγμα σε κατάλληλα διευθετημένο σύστημα ενίσχυσης.

βροχή των ινών από το τήγμα επιτυγχάνεται με μηχανισμό τριχοειδών αγγείων ε πίεση λόγω βαρύτητας (pressure casting) ή με αναρρόφηση λόγω κενού ή με συνεχή χύτευση (continuous casting).

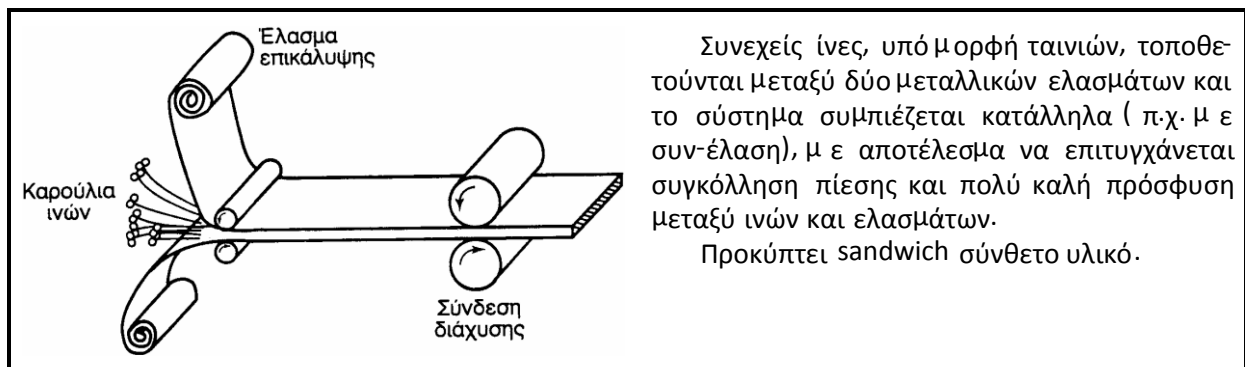
Η μ τεχνική δεν εφαρμόζεται όταν η μήτρα-τήγμα αντιδρά με τις ίνες στη θερμοκρασία

rise) ή μ ΦΑΡΜΟΓΕΣ: Ενίσχυση μήτρας Al ή Ag με τριχίτες ζαφειριού, (infiltration)ενίσχυση μήτρας Al με

Η Ε

(capillary
(v
χύτευσης.
ίνες C.

Σχήμα 4.24: Μορφοποίηση με: (α) χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων, (β) πίεση βαρύτητας, (γ) εφαρμογή κενού και (δ) συνεχή χύτευση. [Δ1]



Σχήμα 4.25: Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση. Η απόθεση υλικού μήτρας στις ενισχυτικές ίνες γίνεται με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) ή με ηλεκτραπόθεση. [Δ1]

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

- Με CVD αποτίθενται Al και Ni σε ίνες C.
- Με ηλεκτραπόθεση από διάφορα διαλύματα τους αποτίθενται Al, Cu και Ni σε ενισχυτικές ίνες κάθε τύπου.

Μετά την απόθεση υλικού οι επικαλυμμένες ίνες υποβάλλονται σε έψηση που εξασφαλίζει καλλίτερη συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας.

Οι τεχνικές μορφοποίησης συνθέτων κεραμικής μήτρας στηρίζονται στις τεχνικές μορφοποίησης των κεραμικών υλικών με διαδικασίες έψησης.

Η κεραμική μήτρα, υπό τη μορφή σκόνης, το συνδετικό υλικό (για εξασφάλιση καλής πρόσφυσης ινών-μήτρας) και οι ίνες υποβάλλονται σε έψηση σε υψηλή θερμοκρασία.

Στην περίπτωση υαλωδών κεραμικών, οι ενισχυτικές ίνες προστίθενται στη μήτρα, η οποία ευρίσκεται υπό μορφή τήγματος.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

- Σύνθετα κεραμικής μήτρας με ενισχυτικές ίνες SiC.
- Σύνθετα με μήτρα νιτρίδιο του πυριτίου και ενίσχυση ινών W, SiC ή C.

Όταν το παραγόμενο σύνθετο υλικό πρέπει να λαμβάνει μη επίπεδη μορφή, η στρωματοποίηση επιτελείται μέσα σε καλούπια με ειδικές μεθόδους μορφοποίησης, π.χ. με έγχυση (injection moulding) ή με ψεκασμό (spray moulding).

Πιο πρόσφατα, με την ανάπτυξη 3-D (τρισεδιάστατων) συνθέτων υλικών, έχουν εξελιχθεί πιο πολύπλοκες διαδικασίες, ελεγχόμενες με υπολογιστή. Αφού το τρισεδιάστατο πλέγμα ινών στηθεί, το υλικό της μήτρας διαχέεται με πίεση εντός της διάταξης, όπου τελικά υφίσταται σκλήρυνση και παραδίδεται προς χρήση.

5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ:

$D_p = \underline{142,24mm}$	(ονομ. διάμετρος)
$D_a = D_o + 2*m = 2*10,16 = \underline{162,56mm}$	(εξωτ. διάμετρος)
$D_r = D - 2*h_f = \underline{116,84mm}$	(διάμετρος βάσης)
$D_b = D_o * \cos\phi = \underline{133,66mm}$	(διάμετρος αρχής εξελιγμένης)
$N = \underline{14}$	(αριθμός δοντιών)
$m = \underline{10,16}$	(module)
$\Phi = \underline{20^\circ}$	(γωνία πίεσης)
$p = m*\pi = \underline{31,90mm}$	(βήμα)
$p_b = m*\pi*\cos\phi = \underline{29,97mm}$	(βήμα κύκλου βάσης)
$t = m*\pi/2 = \underline{15,95mm}$	(πλάτος δοντιού στην ονομ. διάμ)
$S = \underline{25,40mm}$	(πάχος δοντιού)
$h_k = m = \underline{10,16mm}$	(ύψος κεφαλής, addendum)
$h_f = 1,25*m = \underline{12,70mm}$	(ύψος ποδός, dedendum)
$h = \underline{22,86mm}$	(ύψος δοντιού)
$c = 0,25*m = \underline{2,54mm}$	(clearance δοντιού)
$L = h - c = \underline{20,32mm}$	(μήκος Lewis)
$r_f = 0,38*m = \underline{2,54mm}$	(r του fillet στη βάση του δοντιού)
$d\tau = \underline{40mm}$	(διάμ. Οπής άξονα γραναζιού)
$h_{\sigma\phi} = \underline{8mm}$	(ύψος σφηνόδρομου)
$\mu_{\sigma\phi} = \underline{14,27mm}$	(μήκος σφηνόδρομου)

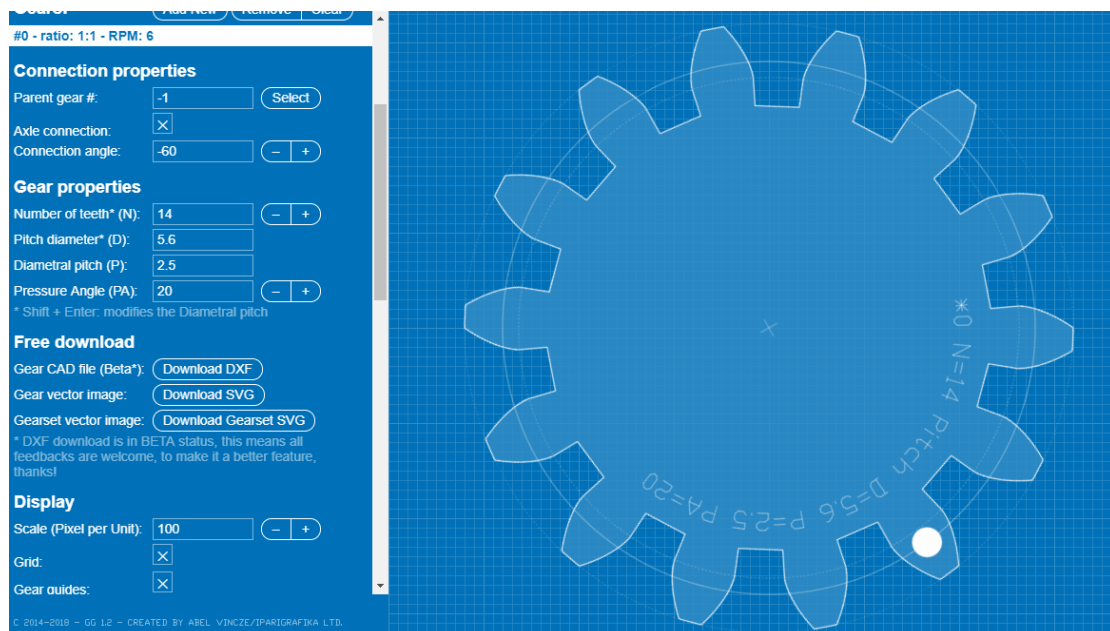
5.1 Επιλογή βασικών χαρακτηριστικών οδοντωτού τροχού

Για τη σχεδίαση του ανθρακονημάτινου οδοντωτού τροχού με επικάλυψη χάλυβα, θεωρούμε ότι υπάρχει ένας περιορισμός όσο αναφορά το μέγεθος των δοντιών καθώς δε θέλουμε να το σχεδιάσουμε πολύ μικρό για να εκμεταλευτούμε το πάχος άρα και την αντοχή του ανθρακονημάτινου μέρους, όπως επίσης, θέλουμε να υπάρχει μια ικανοποιητική στρώση χάλυβα για να μη διαρρεύσει εύκολα το υλικό μας στο εξωτερικό των δοντιών.

Από τα παραπάνω δεδομένα, καταλάγουμε να ξεκινήσουμε από την επιλογή των παρακάτω χαρακτηριστικών:

- Ονομαστική διάμετρος (D_0)
- Αριθμός δοντιών (N)
- Module (m)
- Γωνία πίεσης (Φ)

Υπάρχει ένα λογισμικό στο διαδίκτυο που μας βοηθάει να κάνουμε δοκιμές με τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθώς αλλάζοντας ένα από αυτά, μας ρυθμίζει τα υπόλοιπα σύμφωνα με τις διεθνείς τυποποιήσεις και δείχνοντας μας σε κλίμακα 1:1 πώς διαμορφώνεται το σχέδιό μας. Η τελική επιλογή μας έγινε με κριτήρια τα παραπάνω και αυτός είναι ο λόγος που έχουμε αρκετά μεγάλο module. Το τελικό σχέδιο που θα κάνουμε παρακάτω με χρήση λογισμικού SOLIDWORKS, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5.1: επιλογή βασικών διαστάσεων οδ. Τροχού [9]

Οι μονάδες μέτρησης του λογισμικού που μας βοήθησε στην επιλογή βασικών χαρακτηριστικών, έχει ως μονάδες μέτρησης τις ίντσες και αντί για *module* έχει το *diametral pitch* που χρησιμοποιούν στο αγγλοσαξονικό σύστημα λόγω μονάδων, το οποίο συνδέεται με το *module* με τον παρακάτω απλό τύπο:

$$m = 25,4/DP \quad (5.1)$$

και σχετίζεται με παραπλήσιο τρόπο με το βήμα (p) όπως θα δούμε:

$$m = p/\pi \quad \text{και} \quad (5.2)$$

$$DP = \pi/p \quad (5.3)$$

Οι τυποποιήσεις είναι αντίστοιχες και συνδέουν τα δύο αυτά *module* όπως θα δούμε και στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1: αντιστοιχεία diametral pitch με module [13]

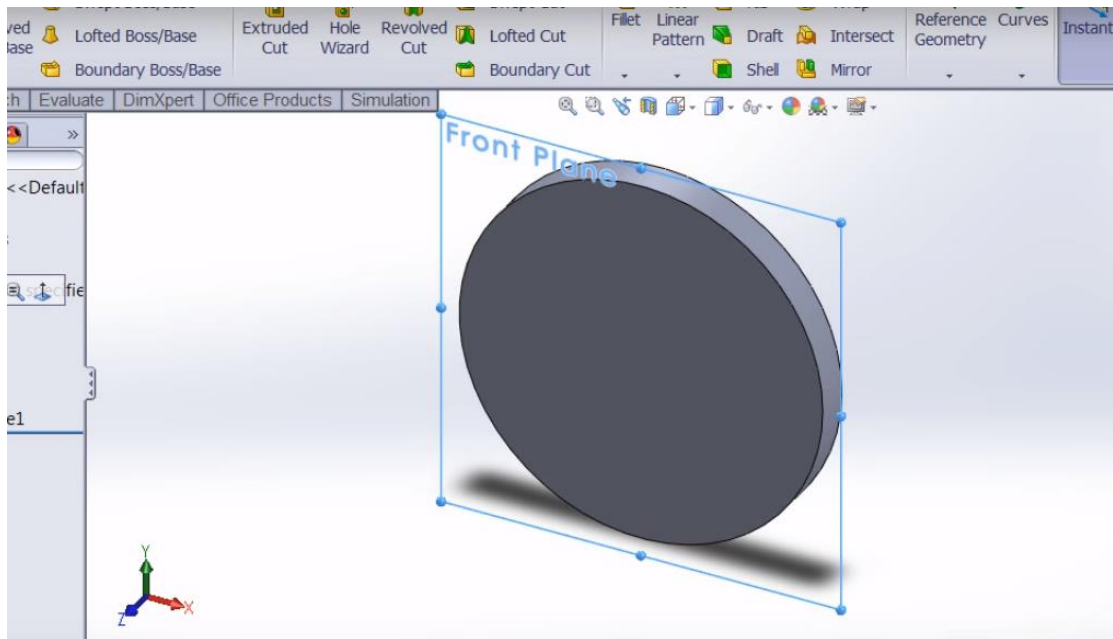
Diametral Pitch	Circular Pitch	Module	Diametral Pitch	Circular Pitch	Module	Diametral Pitch	Circular Pitch	Module
0.3387	9.2764	75	2.3091	1.3605	11	9.4342	0.333	5.08
0.3629	8.658	70	2.3936	1.3125	8.467	10	0.3142	2.54
0.3908	8.0395	65	2.5	1.2566	10.16	10.0531	0.3125	5.053
0.4233	7.4211	60	2.54	1.2369	10	10.16	0.3092	2.5
0.4618	6.8027	55	2.75	1.1424	9.236	10.9846	0.286	5
0.5	6.2832	50.8	2.7925	1.125	8.085	11	0.2856	2.309
0.508	6.1843	50	2.8222	1.1132	9	11.2889	0.2783	2.25
0.5644	5.5658	45	2.9568	1.0625	8	12	0.2618	2.117
0.6048	5.1948	42	3	1.0472	8.467	12.5664	0.25	4.548
0.6513	4.8237	39	3.1416	1	7.58	12.7	0.2474	2
0.7056	4.4527	36	3.175	0.9895	8	13	0.2417	1.954
0.75	4.1888	33.867	3.351	0.9375	7.257	14	0.2244	1.814
0.7697	4.0816	33	3.5	0.8976	7.257	14.1514	0.222	4.5
0.7854	4	12.128	3.5904	0.875	7.074	14.5143	0.2164	1.75
0.8467	3.7106	30	3.6286	0.8658	7	15	0.2094	1.693
0.8976	3.5	12	3.8666	0.8125	7	15.708	0.2	4.233
0.9407	3.3395	27	3.9077	0.804	6.5	16	0.1964	1.588
1	3.1416	25.4	4	0.7854	6.35	16.7552	0.1875	4.043
1.0472	3	11.622	4.1888	0.75	6.569	16.9333	0.1855	1.5
1.0583	2.9684	24	4.2333	0.7421	6	17	0.1848	1.494
1.1424	2.75	11.289	4.5	0.6981	5.644	18	0.1745	1.411
1.1545	2.7211	22	4.5696	0.6875	6.5	18.812	0.167	4
1.25	2.5133	20.32	4.6182	0.6803	5.5	19	0.1653	1.337
1.2566	2.5	11.117	4.71	0.667	6.35	20	0.1571	1.27
1.27	2.4737	20	5	0.6283	5.08	20.32	0.1546	1.25
1.3963	2.25	11	5.0266	0.625	6.064	22	0.1428	1.155
1.4111	2.2263	18	5.08	0.6184	5	24	0.1309	1.058
1.5	2.0944	16.933	5.5851	0.5625	6	25.4	0.1237	1
1.5708	2	10.612	5.6444	0.5566	4.5	26	0.1208	0.977
1.5875	1.979	16	6	0.5236	4.233	28	0.1122	0.907
1.6755	1.875	10.16	6.2832	0.5	5.644	28.2222	0.1113	0.9
1.6933	1.8553	15	6.35	0.4947	4	30	0.1047	0.847
1.75	1.7952	14.514	6.7733	0.4638	3.75	31.75	0.0989	0.8
1.7952	1.75	10	7	0.4488	3.629	32	0.0982	0.794
1.8143	1.7316	14	7.1808	0.4375	5.558	34	0.0924	0.747
1.9333	1.625	9.236	7.2571	0.4329	3.5	36	0.0873	0.706
1.9538	1.6079	13	7.8154	0.402	3.25	36.2857	0.0866	0.7
2	1.5708	12.7	7.854	0.4	5.5	42.3333	0.0742	0.6
2.0944	1.5	9.096	8	0.3927	3.175	50.8	0.0618	0.5
2.1167	1.4842	12	8.3776	0.375	5.393	63.5	0.0495	0.4
2.1855	1.4375	9	8.4667	0.3711	3	84.6667	0.0371	0.3
2.25	1.3963	11.289	9	0.3491	2.822	-	-	-
2.2848	1.375	8.59	9.2364	0.3401	2.75	-	-	-

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι θα μπορούσαμε να επιλέξουμε $DP = 2,6''$ το οποίο μας δίνει $m = 9,8$ και επιλέγουμε το αμέσως επόμενο τυποποιημένο module που είναι το 10 αλλά επιλέξαμε να το αφήσουμε ως έχει καθώς υπάρχει στις διεθνείς τυποποιήσεις *module 10, 16*. Αυτό φαίνεται στον παραπάνω πίνακα και διαπιστώθηκε σε πολλούς πίνακες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και στο διαδίκτυο. Παρακάτω στο σχεδιασμό του οδοντωτού τροχού στο SOLIDWORKS, θα δούμε τα πλεονεκτήματα του παραμετρικού σχεδιασμού καθώς μπορούμε να αλλάζουμε τα χαρακτηριστικά και να εφαρμόζονται οι αλλαγές απευθείας στο σχέδιο. Μπορούμε έτσι να επιλέξουμε όποιο module, αριθμό δοντιών και ονομαστική διάμετρο θέλουμε και να έχουμε το αντίστοιχο σχέδιο.

5.2 Παραμετρικός σχεδιασμός οδοντωτού τροχού στο SOLIDWORKS

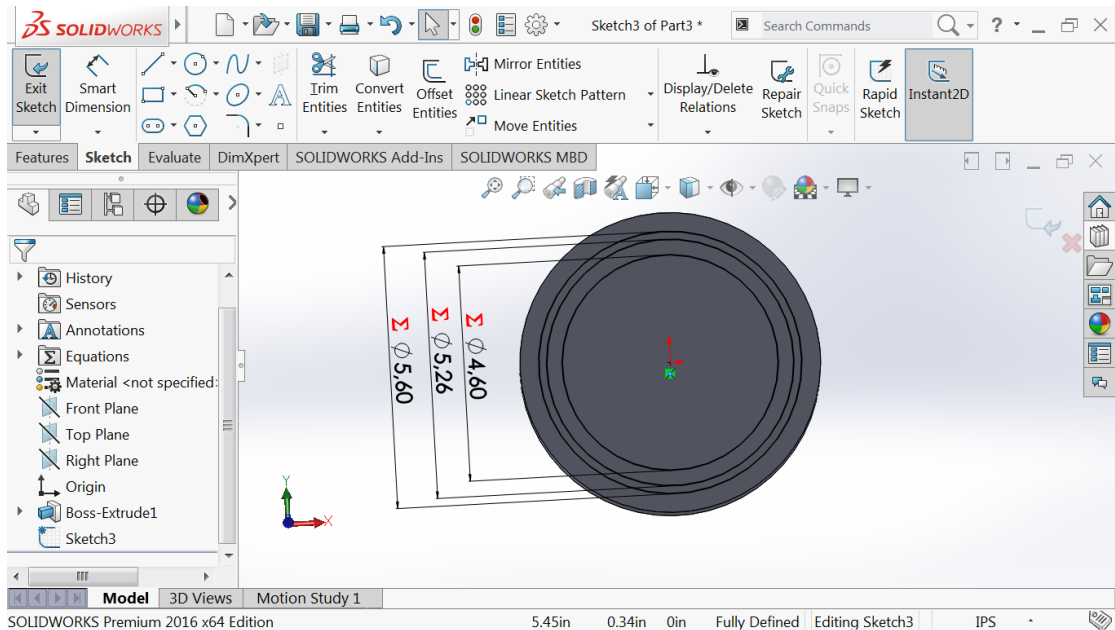
Για τον παραμετρικό σχεδιασμό του οδοντωτού τροχού, θα χρησιμοποιήσουμε την εντολή Equations που βρίσκεται στο μενού tools όπου θα ορίσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά που επιλέξαμε, όπως είδαμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, από τα οποία θα βγούν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μέσω συναρτήσεων.

Για αρχή θα κατασκευάσουμε ένα κύλινδρικό δίσκο που θα φέρει ως διάμετρο, την εξωτερική διάμετρο (D_a) του οδοντωτού τροχού και θα δώσουμε πάχος (S), όπως βλέπουμε στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: εξωτερική διάμετρος (D_a) και πάχος (S) οδ. τροχού

Στη συνέχεια πάμε στο σχέδιό μας και σχεδιάζουμε τους υπόλοιπους κύκλους που αντιστοιχούν στην ονομαστική διάμετρο (D_p), τη διάμετρο βάσης (D_r) και τη διάμετρο αρχής εξελιγμένης καμπύλης (D_b), όπως βλέπουμε και στην εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3: Ονομαστική διάμετρος(D_p), αρχής εξελιγμένης(D_b) και βάσης(D_f)

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι για τον παραμετρικό σχεδιασμό χρησιμοποιήσαμε σημειώσεις που είχαν ως μονάδες τις ίντσες και συνεχίσαμε μαυτό τον τρόπο, μετατρέποντας το σχέδιο στο τέλος σε χιλιοστά από την επιλογή των μονάδων κάτω δεξιά, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα.

Χρησιμοποιώντας τους τύπους που αναφέρθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου, δημιουργούμε τον πίνακα των εξισώσεων, όπως βλέπουμε στην εικόνα 5.4.

Name	Value / Equation	Evaluates to	Comments
Global Variables			
"P"	= 2.5	2.5	diam pitch
"N"	= 14	14	teeth
"phi"	= 20deg	20deg	pressure angle
"a"	= 1 / "P"	0.4	addendum
"b"	= 1.25 / "P"	0.5	dedendum
"c"	= "b" - "a"	0.1in	clearance
"dp"	= "N" / "P"	5.6	pitch circle dia
"db"	= "dp" * cos ("phi") * 1deg	5.26228deg	base circle diameter
"alpha"	= sqr ("dp" ^ 2 - "db" ^ 2) / "db" * 180 / 3.14 -	0.864536deg	
Add global variable			
Features			
Add feature suppression			
Equations			
"D1@Sketch2"	= "dp" + 2 * "a"	6.4in	addendum circle dia
"D3@Sketch3"	= "dp"	5.6in	pitch circle dia
"D2@Sketch3"	= "db"	5.26in	base circle dia
"D1@Sketch3"	= "dp" - 2 * "b"	4.6in	dedendum circle dia
"D4@Sketch3"	= 360 / (4 * "N") - "alpha"	5.56deg	μισι apostasi apo 2 kampyles
"D5@Sketch3"	= 360 / (4 * "N") - "alpha"	5.56deg	i alli misi

Εικόνα 5.4: πίνακας εξισώσεων και διαστάσεων

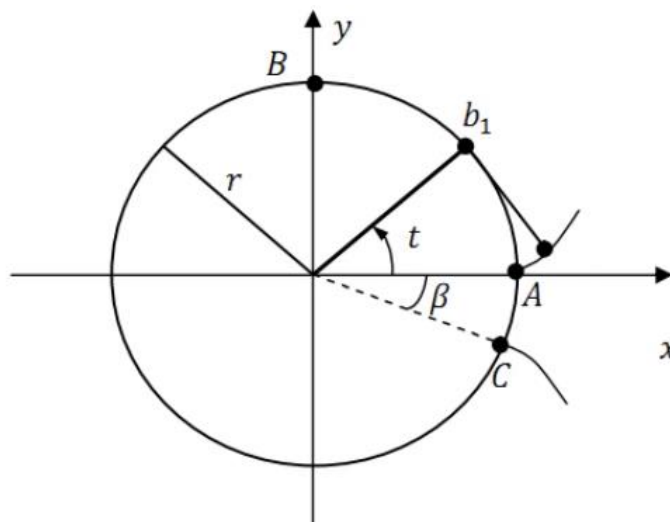
Στη συνέχεια πηγαίνουμε στη στήλη των εξισώσεων για να εισάγουμε τους κύκλους του σχεδίου και να τους αντιστοιχίσουμε με τις διαμέτρους που αναφέραμε στα προηγούμενα βήματα, μέσω εξισώσεων, όπως βλέπουμε στην εικόνα 5.4.

Το επόμενο μας βήμα είναι η σχεδίαση της εξελιγμένης καμπύλης. Οι παραμετρικές εξισώσεις για να ξεκινήσουμε την καμπύλη από το σημείο A (εικόνα 5.5), είναι οι παρακάτω:

$$X = r * \cos t + r * t * \sin t = r * (\cos t + t * \sin t) \quad (5.4)$$

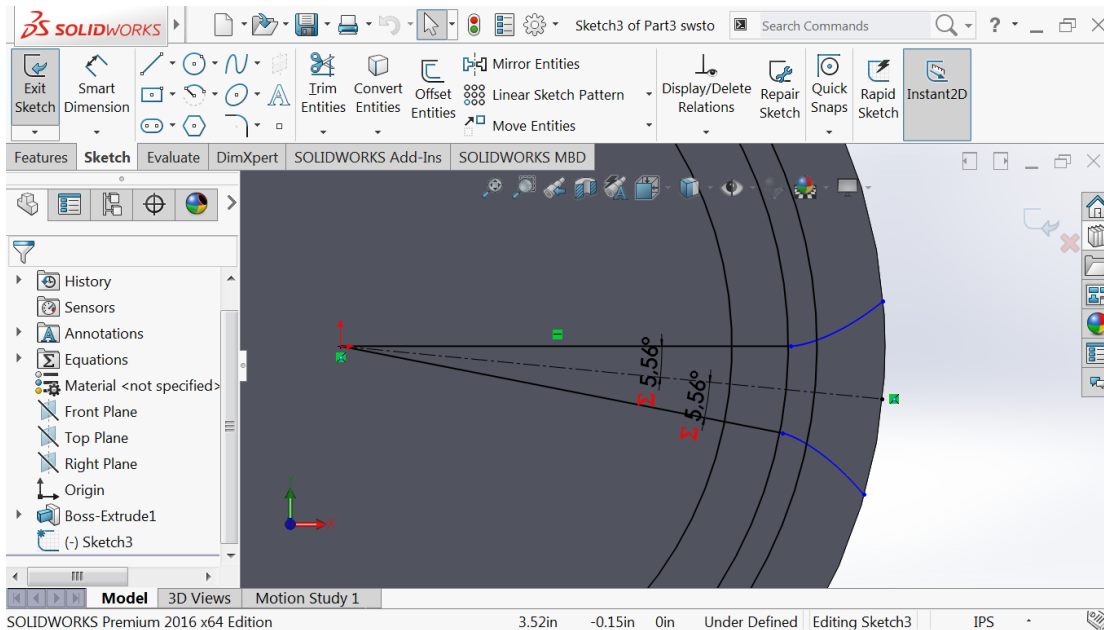
$$Y = r * \sin t - r * t * \cos t = r * (\sin t - t * \cos t) \quad (5.5)$$

Με r την ακτίνα της διαμέτρου εξελιγμένης (D_b).



Εικόνα 5.5: εξελιγμένη καμπύλη [14]

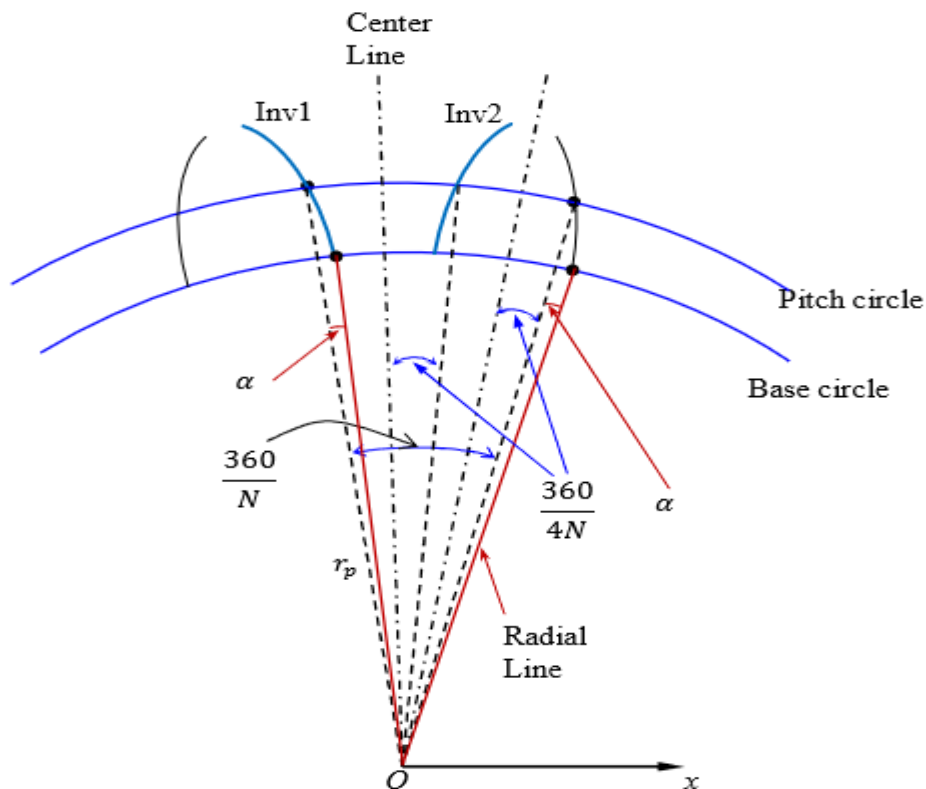
Πηγαίνουμε στην εντολή equation driven curve και στο μενού που εμφανίζεται, βάζουμε τις παραπάνω εξισώσεις για x και y και για t_1, t_2 βάζουμε 0 και 0.68 . Το πρώτο σημείο είναι το A και το $0,68$ είναι ένας τυχαίος αριθμός που είναι αρκετός για να βγει η καμπύλη εκτός των ορίων της εξωτερικής διαμέτρου (D_p) για να μπορούμε να κάνουμε extrude cut στην πορεία, όπως βλέπουμε και στην εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6: εξελιγμένη καμπύλη μέσω παραμετρικών εξισώσεων

Το επόμενο μας βήμα είναι να βρούμε την απόσταση ανάμεσα στις δύο καμπύλες για να σχεδιάσουμε και τη δεύτερη, όπως βλέπουμε στην εικόνα 5.6. Αφού ενώσουμε το κέντρο του τροχού με την αρχή της εξελιγμένης και σχεδιάσουμε μια βοηθητική γραμμή, βλέπουμε ότι είναι εύκολο να βρούμε την απόσταση ανάμεσα στις δύο καμπύλες από την παρακάτω εικόνα 5.7 και την εξίσωση για το α , η οποία είναι:

$$\alpha = \frac{\sqrt{Dp^2 - Db^2}}{Db} - \varphi \text{ rad} \quad (5.6)$$



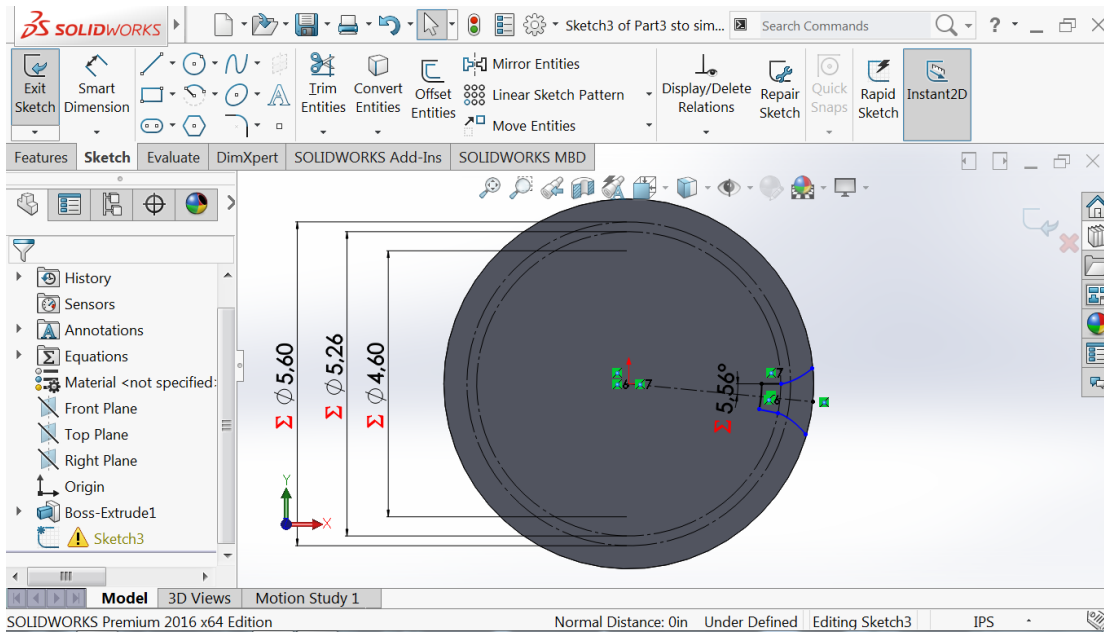
Εικόνα 5.7: βήμα και γωνία α [14]

Η απόσταση που ψάχνουμε ανάμεσα στην αρχή της εξελιγμένης και τη βοηθητική γραμμή, είναι:

$$(360/4*N) - \alpha \quad (5.7)$$

Όπως βλέπουμε στην εικόνα 5.4, έχουμε ορίσει το α στον πίνακα εξισώσεων για να πάμε πιο κάτω και να βρούμε την απόσταση που ψάχνουμε και να τη δηλώσουμε στο σχέδιο, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6. Στη συνέχεια με την εντολή *mirror* ως προς τη βοηθητική γραμμή, σχεδιάζουμε την εξελιγμένη καμπύλη από το σημείο C (εικόνα 5.5).

Στη συνέχεια με την εντολή *trim* σβήνουμε ότι δε χρειαζόμαστε για να δημιουργήσουμε τις αυλακώσεις των δοντιών (εικόνα 5.8).



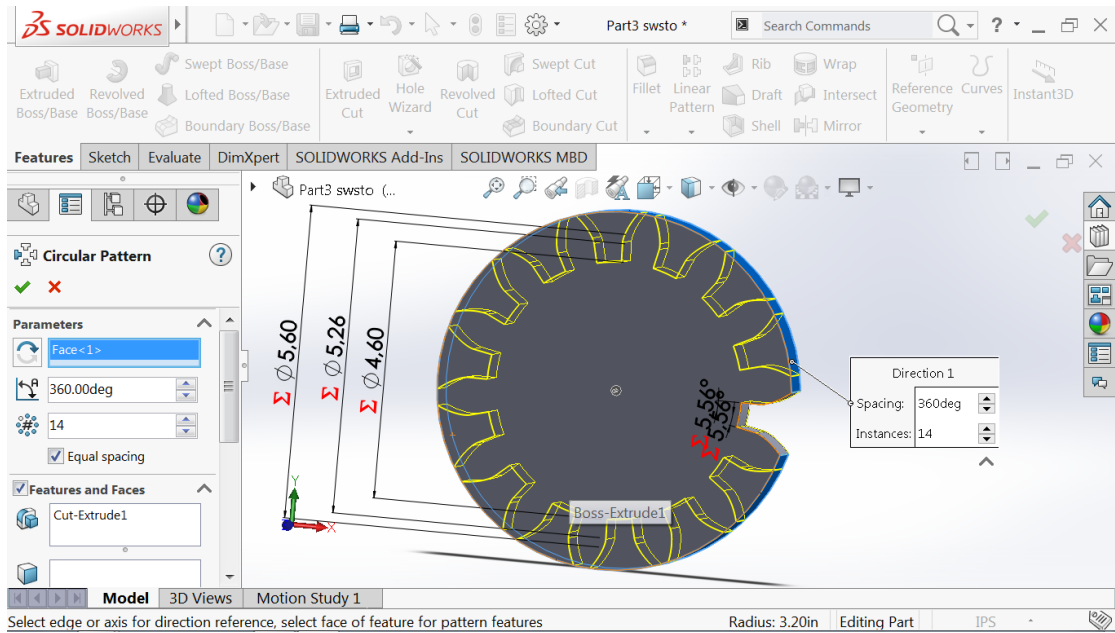
Εικόνα 5.8: ολοκλήρωση εξελεγμένης καμπύλης δοντιού

Με την εντολή extrude cut, δημιουργούμε το κενό ανάμεσα στα δόντια (εικόνα 5.9).



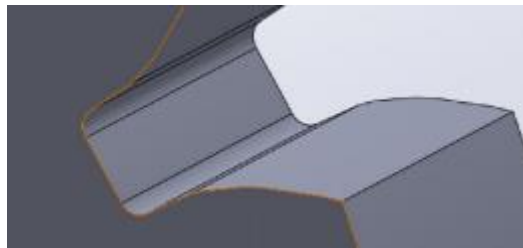
Εικόνα 5.9: εντολή extrude cut

Και στη συνέχεια με την εντολή circular pattern, σχεδιάζουμε όλες τις αυλακώσεις, άρα και τα δόντια του οδοντωτού τροχού (εικόνα 5.10).



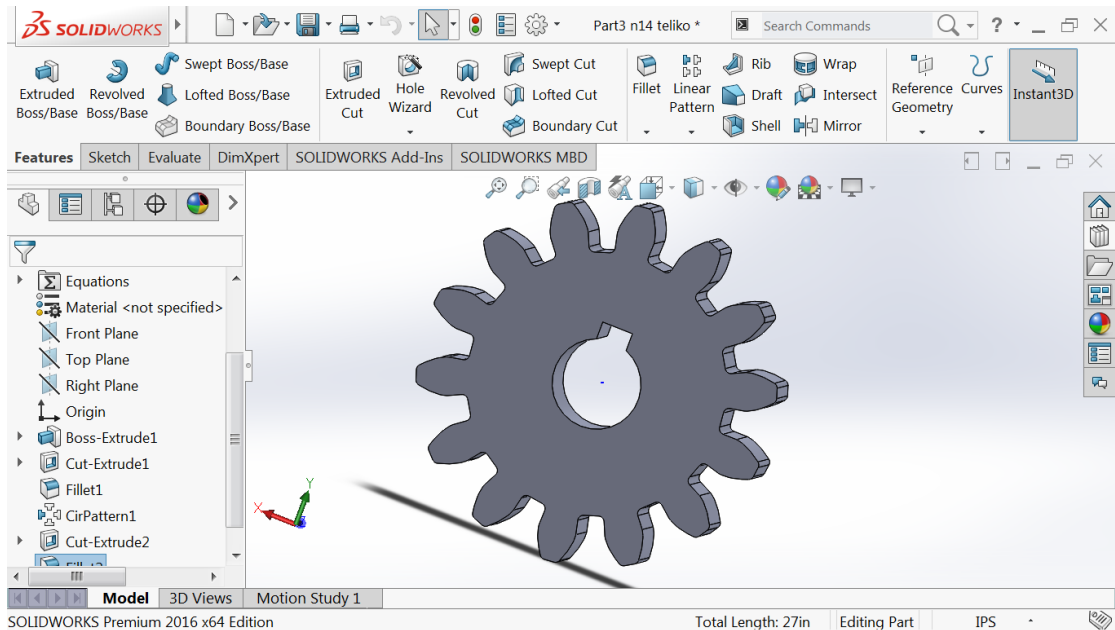
Εικόνα 5.10: σχεδιασμός δοντιών με εντολή circular pattern

Στη συνέχεια με την εντολή *fillet*, σχεδιάζουμε τις καμπύλες των γωνιών στη βάση των δοντιών (εικόνα 5.11) όσο είναι το *clearance* της εικόνας 5.4 που έχουμε υπολογίσει στην αρχή του κεφαλαίου.



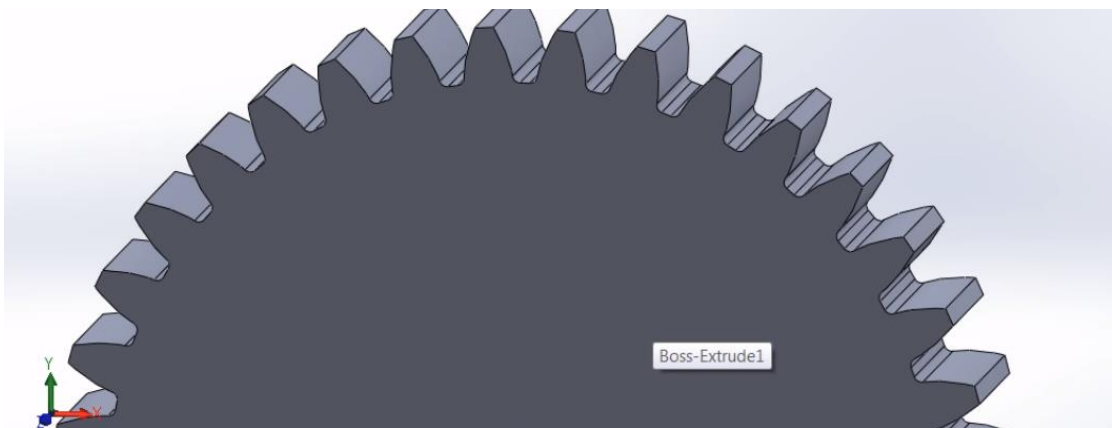
Εικόνα 5.11: clearance δοντιών με εντολή fillet

Και με την εντολή *circular pattern*, σχεδιάζουμε τις καμπύλες όλων των δοντιών. Σχεδιάζουμε και την οπή του άξονα με το σφηνόνδρομο και έχουμε το σχέδιό μας, το οποίο είναι ο αρχικός χαλύβδινος οδοντωτός τροχός (εικόνα 5.12).



Εικόνα 5.12: ολοκληρωμένος χαλύβδινος οδ. Τροχός

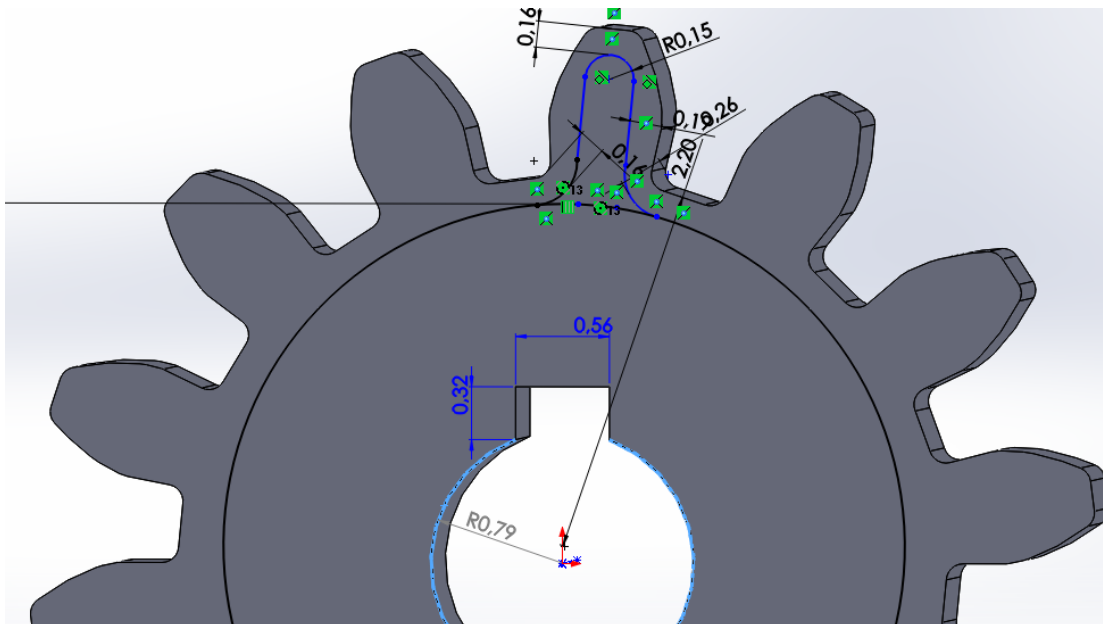
Με τον παραμετρικό σχεδιασμό που είδαμε βήμα βήμα, μπορούμε από τον πίνακα εξισώσεων να αλλάξουμε τις διαστάσεις και να εφαρμοστούν οι αλλαγές στο σχέδιό μας. Για να γίνει αυτό θα είναι πιο εύκολο να το κάνουμε πριν τα *fillet* ή να προσέξουμε να κάνουμε ένα update επιλέγοντας τις νέες διαστάσεις. Το ίδιο θα πρέπει να κάνουμε και στο *circular pattern* των αυλακώσεων καθώς θα πρέπει να αλλάξουμε τον αριθμό των δοντιών που έχουμε επιλέξει. Ας δούμε ένα παράδειγμα στην παρακάτω εικόνα 5.13 για $P = 6$ (*module 4,23*), από τις τυποποιημένες τιμές του πίνακα 5.1, και $N = 36$.



Εικόνα 5.13: παράδειγμα οδ. τροχού αλλάζοντας τα δεδομένα από τον πίνακα εξισώσεων και διαστάσεων

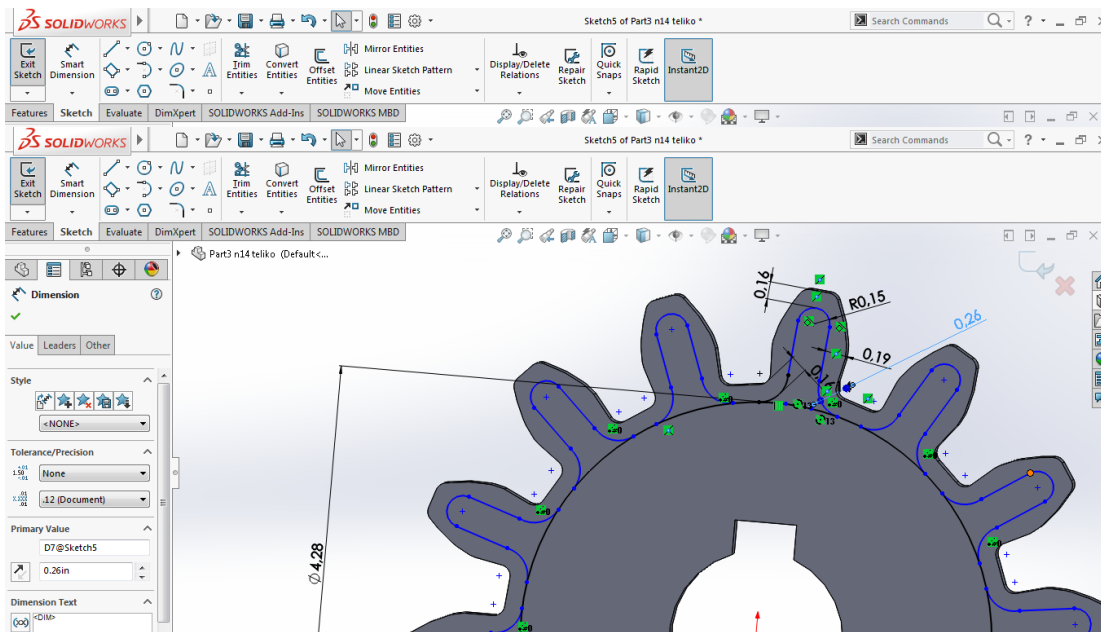
5.3 Σχεδιασμός εσωτερικού ανθρακονήματος

Πάνω στο υπάρχον οδοντωτό τροχό, θα σχεδιάσουμε το εσωτερικό ανθρακονημάτινο μέρος. Οι διαστάσεις που επιλέγονται, δεν είναι επιλεγμένες με ακρίβεια αλλά επιλέχθηκαν κατόπιν δοκιμών ώστε να υπάρχει αρκετή στρώση χάλυβα και αρκετό πάχος ανθρακονήματος για την καλύτερη δυνατή ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων στη συνέχεια. Το εσωτερικό του δοντιού που σχεδιάσαμε, φαίνεται στην εικόνα 5.14.



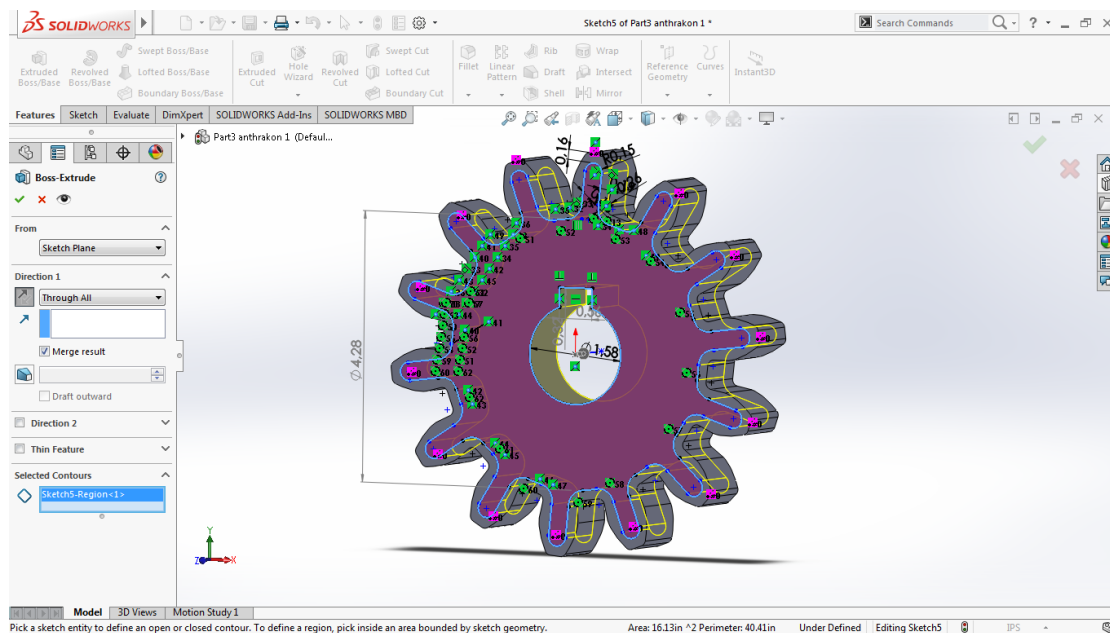
Εικόνα 5.14: σχεδιασμός ανθρακονημάτινου μέρους του δοντιού

Στη συνέχεια με την εντολή *circular pattern*, δημιουργούμε το εσωτερικό όλων των δοντιών (εικόνα 5.15).



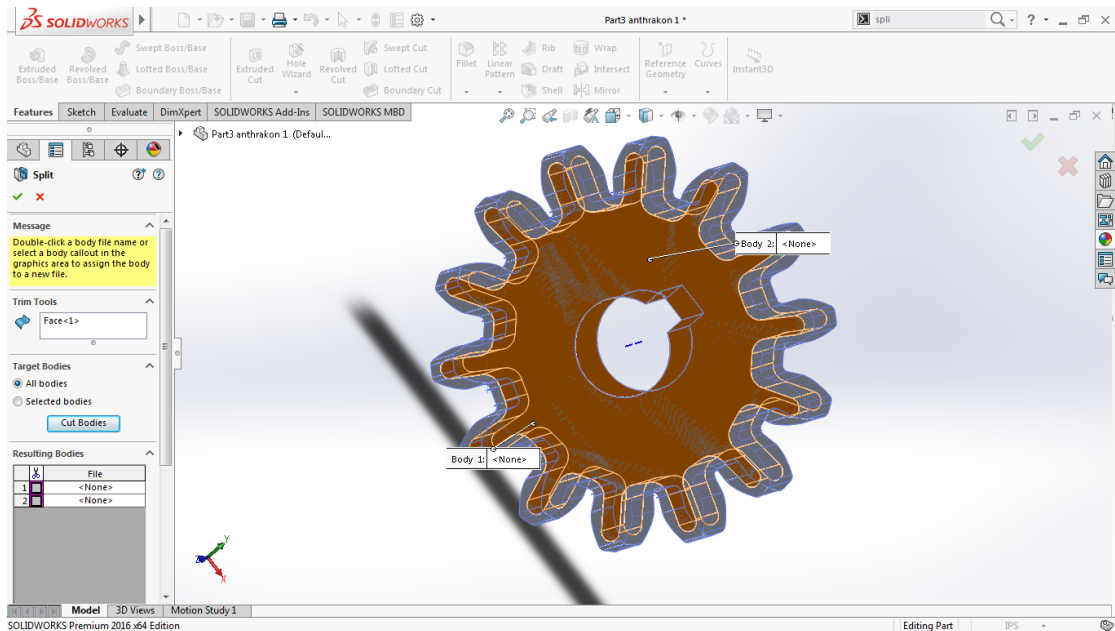
Εικόνα 5.15: εντολή circular pattern

Με την εντολή extrude boss δίνουμε πάχος ώστε να διαπεράσουμε όλο το πάχος του οδοντωτού τροχού επιλέγοντας through all (εικόνα 5.16)



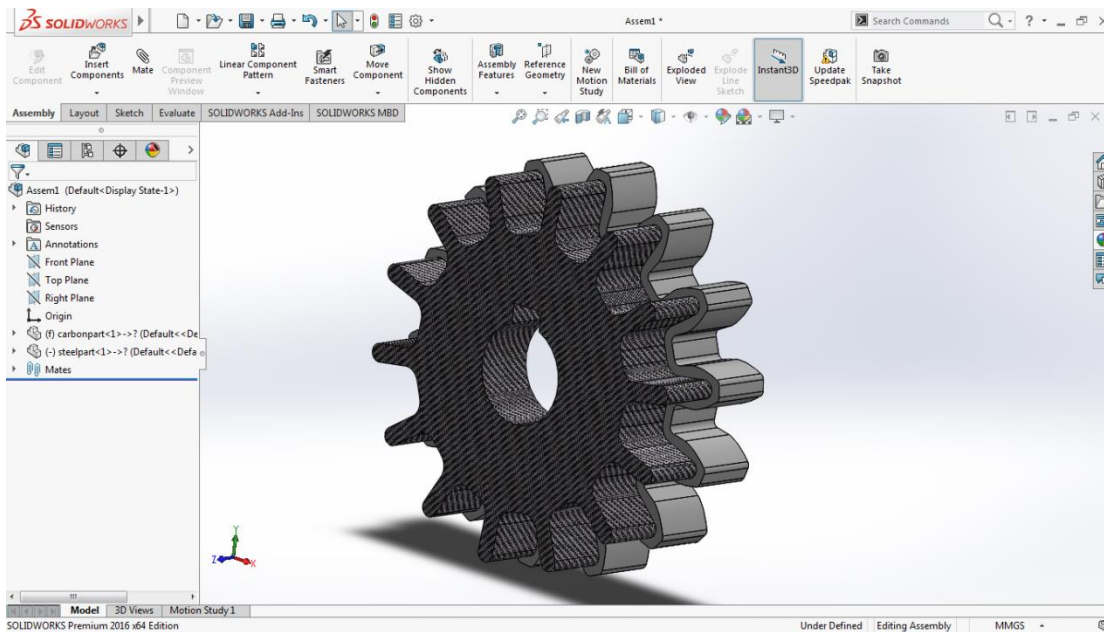
Εικόνα 5.16: εντολή extrude boss

Στη συνέχεια, από την επιλογή *split bodies*, ξεχωρίζουμε το εσωτερικό ανθρακονημάτινο μέρος από το εξωτερικό χαλύβδινο επιλέγοντας *cut bodies* (εικόνα 5.17) και αφού επιλέξουμε υλικό για το καθένα από την εργαλειοθήκη, τα αποθηκεύουμε ως ξεχωριστά κομμάτια και όλο μαζί ως αρχείο *assembly*.

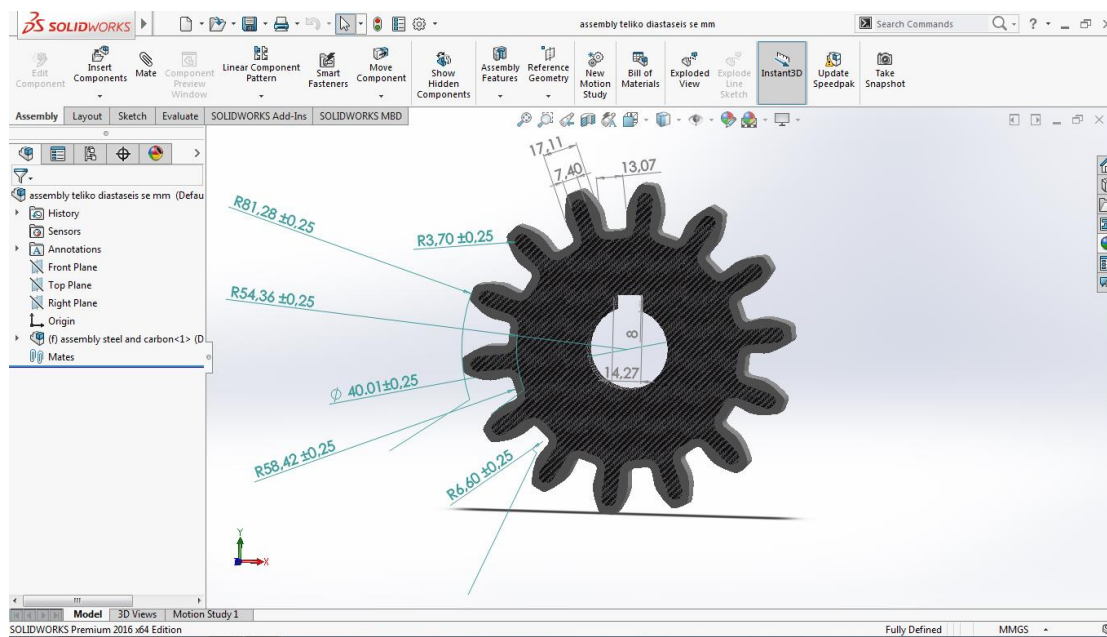


Εικόνα 5.17: εντολή split και επιλογή cut bodies

Έτσι καταλήγουμε στο τελικό σχέδιο του υβριδικού οδοντωτού τροχού, όπως θα δούμε στις παρακάτω εικόνες 5.18 και 5.19.



Εικόνα 5.18: αρχείο assembly του τελικού σχεδίου

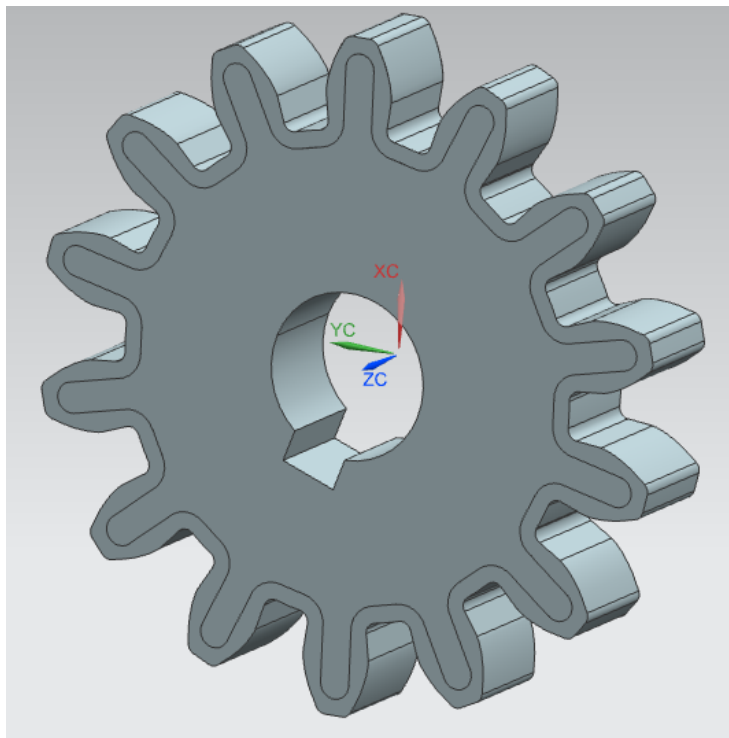


Εικόνα 5.19: πρόψη τελικού σχεδίου

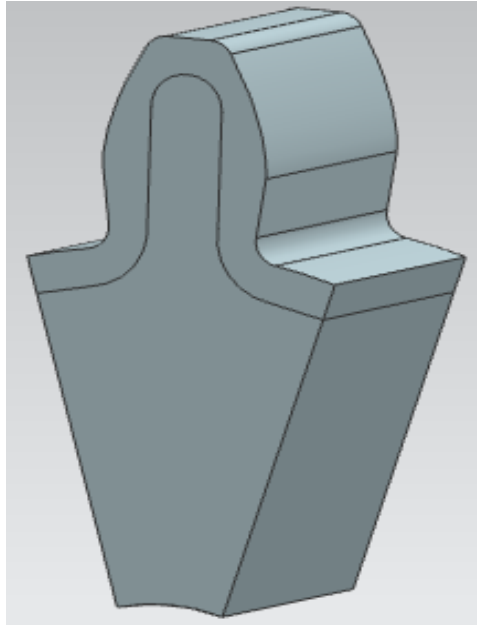
5.4 Έλεγχος αντοχής οδοντωτών τροχών με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος Siemens NX9 για πέντε περιπτώσεις ενός δοντιού γραναζιού, από διαφορετικά υλικά σε κάθε περίπτωση. Η γεωμετρία, τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες παρουσιάζονται παρακάτω. Θα δούμε τα αποτελέσματα για κάθε ανάλυση και τη σύγκριση μεταξύ τους. Η στατική ανάλυση έγινε για τα παρακάτω μοντέλα:

1. Χαλύβδινος οδοντωτός τροχός
2. Χαλύβας εξωτερικά και ανθρακόνημα εσωτερικά
3. Αλουμινένιος οδοντωτός τροχός
4. Αλουμίνιο εξωτερικά και ανθρακόνημα εσωτερικά
5. Ανθρακονημάτινος οδοντωτός τροχός

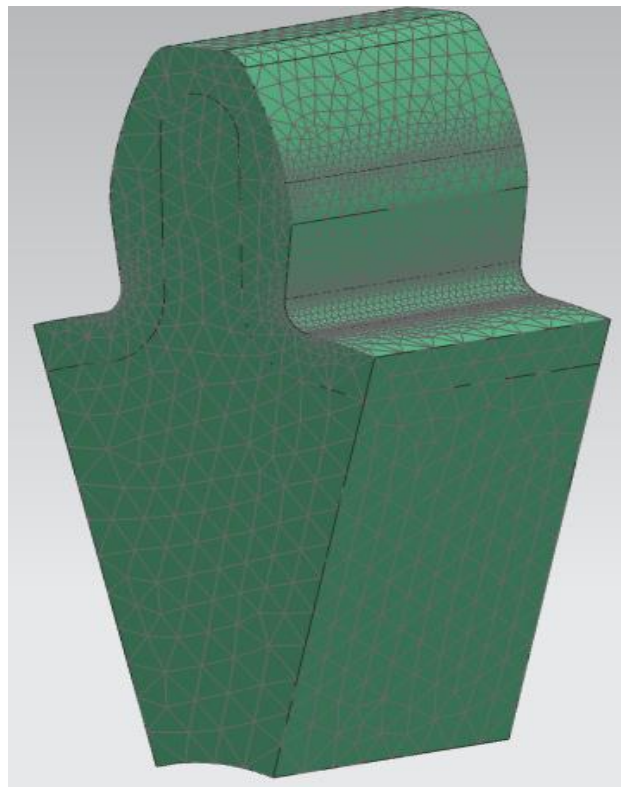


Εικόνα 5.20: υβριδικό γρανάζι στο λογισμικό Siemens NX9



Εικόνα 5.21: Δόντι που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση (Χάλυβας ή αλουμινιο και Ανθρακόνημα)

Αρχικά έγινε εισαγωγή το σχέδιο στο πρόγραμμα σε μορφή `stp` (εικόνα 5.20 και 5.21). Το κομμάτι του δοντιού που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση αποκόπηκε και χωρίστηκε σε πεπερασμένα στοιχεία (εικόνα 5.22).



Εικόνα 5.22: διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία

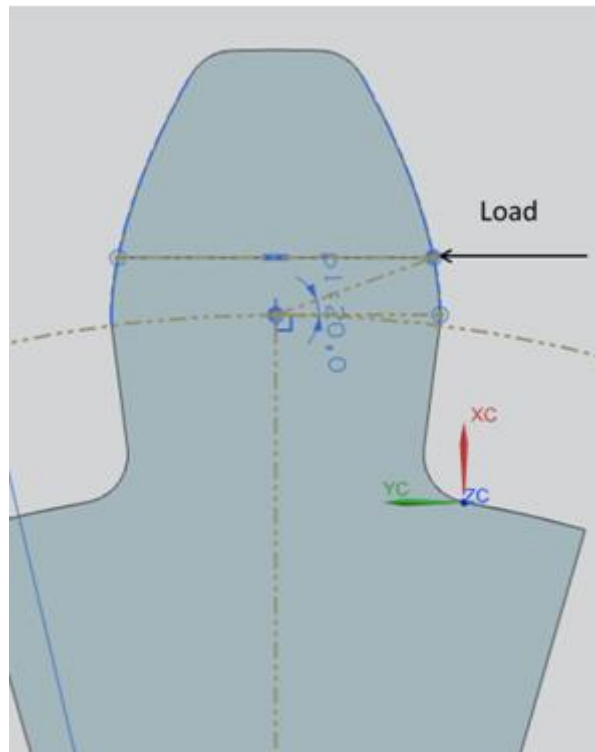
Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τρισδιάστατα τετράεδρα στοιχεία. Το μέγεθος του πλέγματος είναι 3 mm ενώ στις περιοχές όπου θα υπάρξει συγκέντρωση τάσης (fillets) το μέγεθος του πλέγματος είναι 0.5 mm.

Στη συνέχεια έγινε ορισμός των υλικών στο μοντέλο. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είναι χάλυβας ST37, ανθρακόνημα C428T2 και αλουμινιο 7075 T6. Οι ιδιότητες τους φαίνονται παρακάτω (πίνακας 5.2).

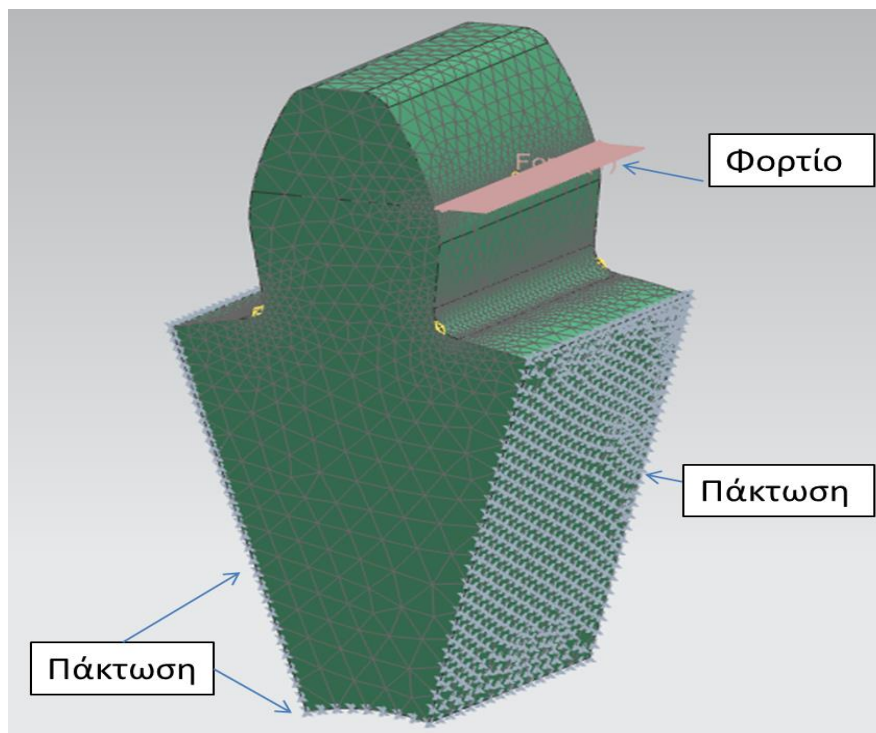
Πίνακας 5.2: Ιδιότητες των υλικών

Ιδιότητα υλικού	St37	C428T2	AA 7075 T6
E (GPa)	210	137	71.7
ρ (kg/m ³)	7870	1800	2810
ν	0.3	0.26-0.28	0.33
Όριο διαρροής (MPa)/συντελεστής ασφαλείας	235/1.5=156.6	2300/1.5=1533.3	503/1.5=335.3
Όριο θράυσης (MPa)/συντελεστής ασφαλείας	340/1.5=226.6	2550/1.5=1700	572/1.5=381.3
Συντελεστής Ασφαλείας	1.5	1.5	1.5

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι στηρίξεις και το φορτίο στο μοντέλο. Για να πραγματοποιηθεί η στατική ανάλυση το γρανάζι πρέπει να είναι πακτωμένο. Για το ένα δόντι που χρησιμοποιούμε στην ανάλυση αυτό μεταφράζεται με πάκτωση στις κομμενες πλευρές του κομματιού καθώς και στην εσωτερική διάμετρο του γραναζιού. Το φορτίο είναι η δύναμη που ασκείται απο ένα δευτερο γραναζι και εφαρμόζεται στο σημείο που παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα. Το φορτίο είναι κατανεμημένο κατά το πάχος του δοντιού και μόνο η κάθετη συνιστώσα χρησιμοποιείται αφού αυτή είναι που κάμπτε το δόντι (εικόνα 5.23 και 5.24).



Εικόνα 5.23: Σημείο εφαρμογής της δύναμης



Εικόνα 5.24: Εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών και της δύναμης

Στατική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τη γεωμετρία του δοντιού του γραναζιού με τις ιδιότητες των υλικών, τα φορτία και τις στηρίξεις που ορίστηκαν παραπάνω.

Η τιμή του φορτίου ορίστηκε απο το χρήστη καθώς δεν υπήρχε κάποια τιμή σαν προδιαγραφή. Η τιμή που χρησιμοποιήθηκε τελικά προήλθε μετα από μια σειρά αναλύσεων ώστε η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο γρανάζι να μην ξεπερνάει τα όρια διαρροής δια τον συντελεστή ασφαλείας για τον χάλυβα, το ανθρακόνημα ή το αλουμίνιο όπως τα ορίσαμε παραπάνω. Τρεις τιμές φορτίου χρησιμοποιήθηκαν ανάλογα με το υλικό που ορίζαμε:

- 7.5 kN για το γρανάζι από σκέτο χάλυβα και το υβριδικό γρανάζι από χάλυβα και ανθρακόνημα
- 75 kN για το γρανάζι απο ανθρακόνημα.
- 16 kN για το αλουμινένιο γρανάζι και το υβριδικό γρανάζι από αλουμίνιο και ανθρακόνημα

5.5 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

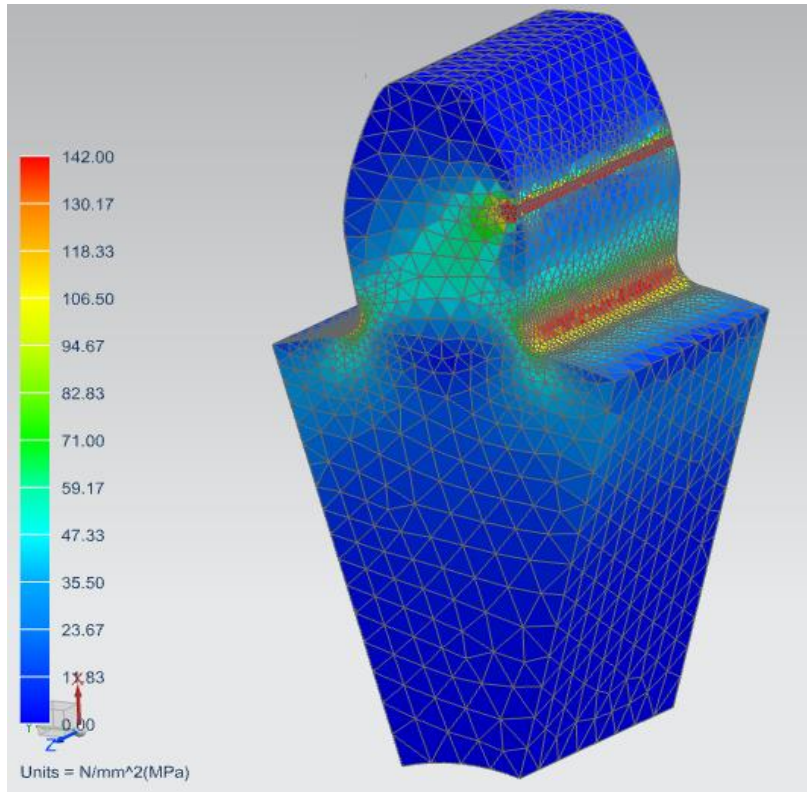
Τα αποτελέσματα για τις τάσεις και τις μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στο δόντι του γραναζιού σε κάθε περίπτωση φαίνονται στο παρακάτω πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Μέγιστες τάσεις και μετατοπίσεις που αναπτύσσονται σε κάθε περίπτωση

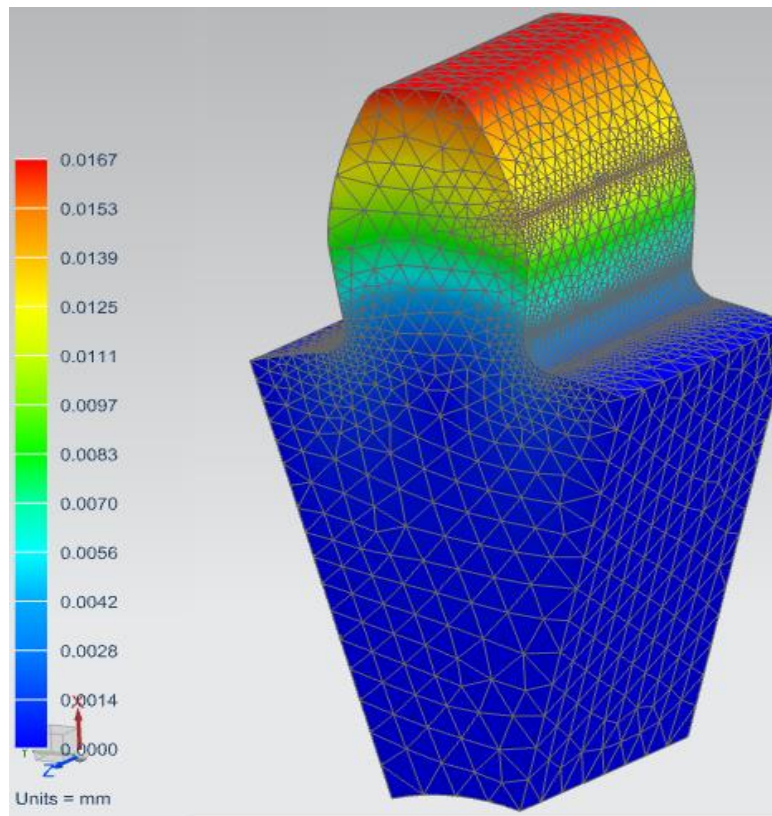
	Χαλύβδινο γρανάζι	υβριδικό γρανάζι (Χάλυβας)	Ανθρακονημάτινο Γρανάζι	Αλουμινένιο Γρανάζι	υβριδικό Γρανάζι (Αλουμίνιο)
Δύναμη (kN)	7.5	7.5	75	16	16
Μέγιστη μετατόπιση (mm)	0.0167	0.0193	0.257	0.1037	0.0832
Μέγιστη VM τάση (MPa)	142	162	1455	310	259.2

Παρακάτω φαίνονται οι τάσεις και οι μετατοπίσεις για τη κάθε περίπτωση όπως αυτές προκύπτουν απο την ανάλυση. Οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στα fillets,στη βάση του δοντιού, όπως ήταν αναμενόμενο ενώ η μέγιστη μετατόπιση βρίσκεται στο άκρο του δοντιού λόγω της καταπόνησης σε κάμψη. Στην περιοχή που εφαρμόζουμε τη δύναμη υπάρχει συγκέντρωση τάσης αλλά δεν λαμβάνεται υπόψιν στην ανάλυση γιατί το φορτίο εφαρμόζεται σε μια πολύ μικρή περιοχή,κάτι που δε συμβαίνει έτσι ακριβώς υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας και σύμπλεξης δύο οδοντωτών τροχών.

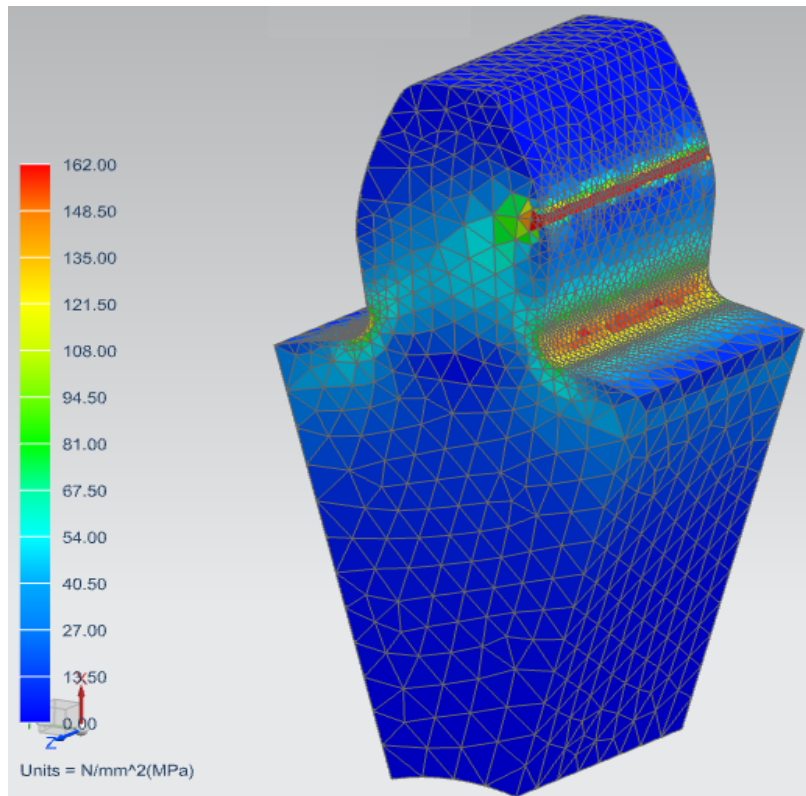
Ας δούμε τα αποτελέσματα των τάσεων και παραμορφώσεων σε εικόνες παρακάτω (εικόνα 5.25 εως εικόνα 5.34).



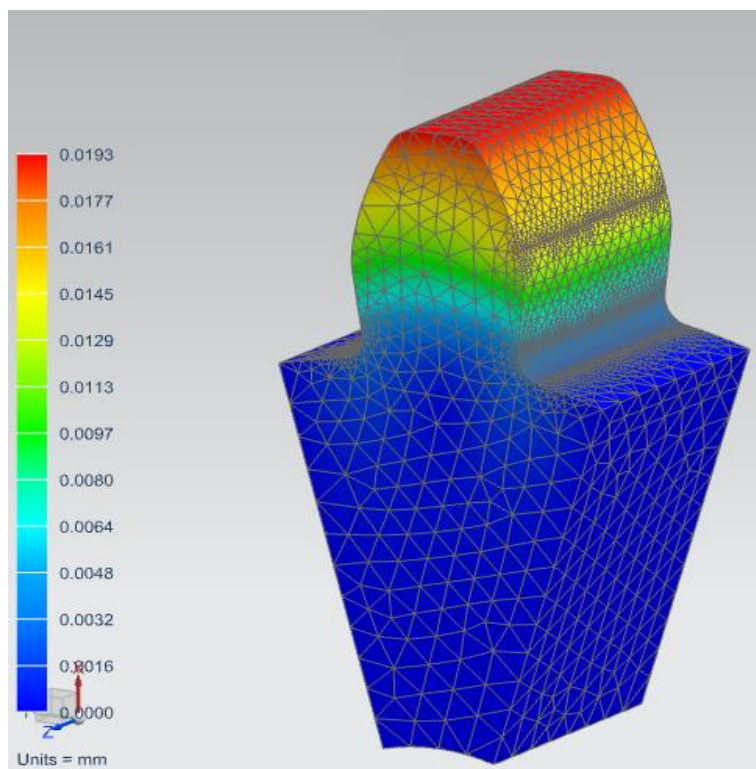
Εικόνα 5.25: Μέγιστη VM τάση στο χαλύβδινο γρανάτζι (142 MPa)



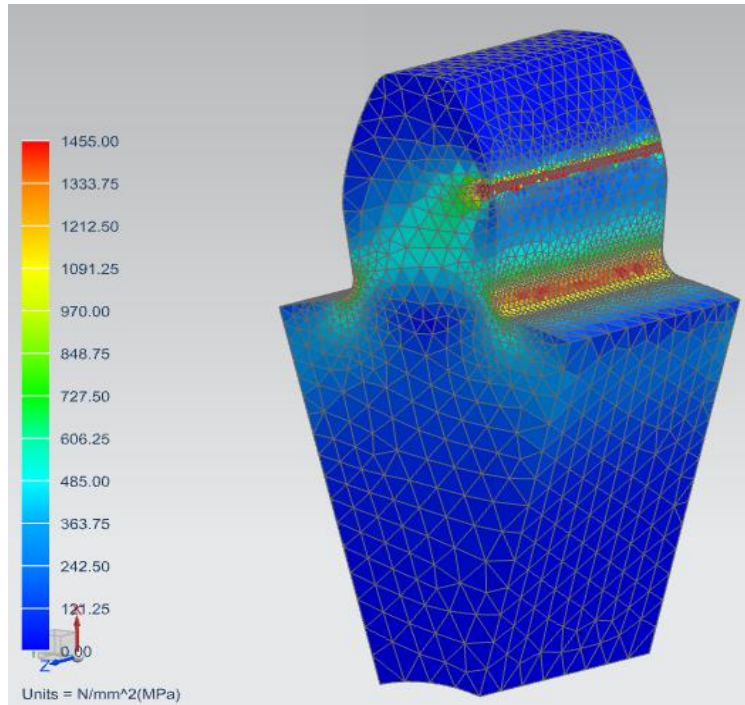
Εικόνα 5.26: Μέγιστη παραμόρφωση στο χαλύβδινο γρανάτζι (0.0167 mm)



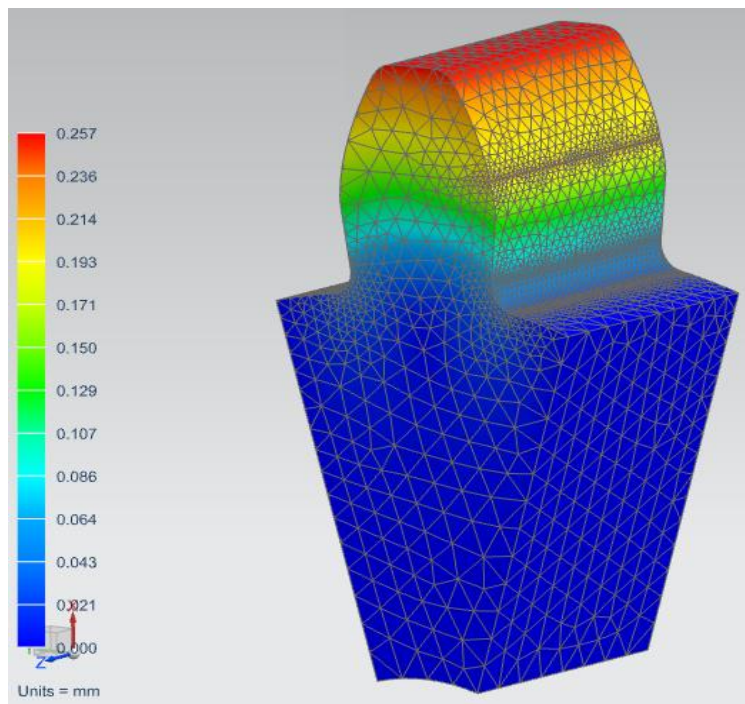
Εικόνα 5.27: Μέγιστη VM τάση στο υβριδικό γρανάζι (χάλυβας) (162 MPa)



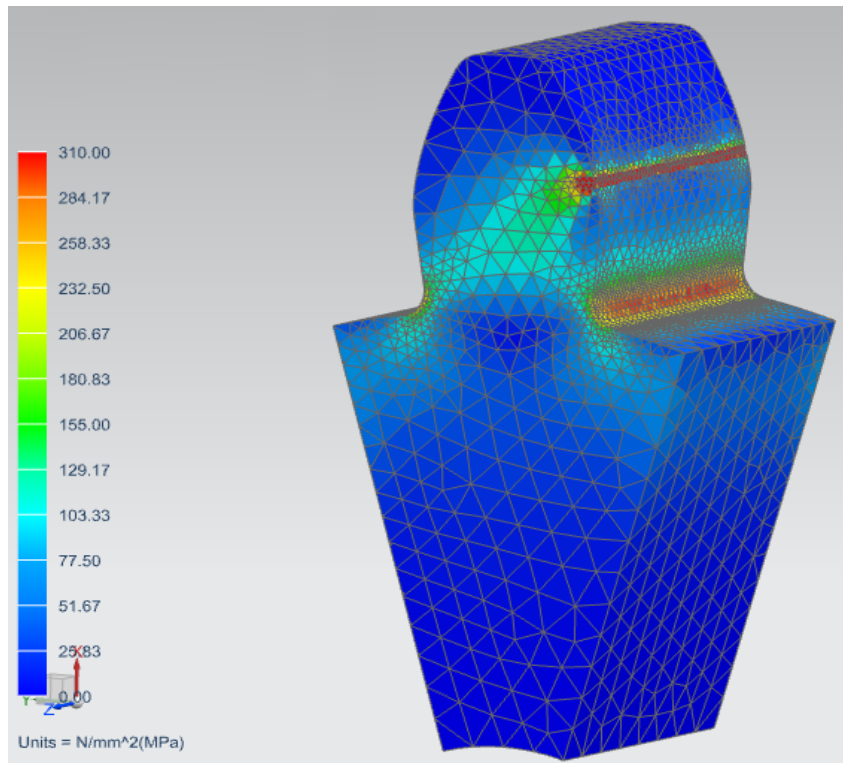
Εικόνα 5.28: Μέγιστη παραμόρφωση στο υβριδικό γρανάζι (χάλυβας) (0.0193 mm)



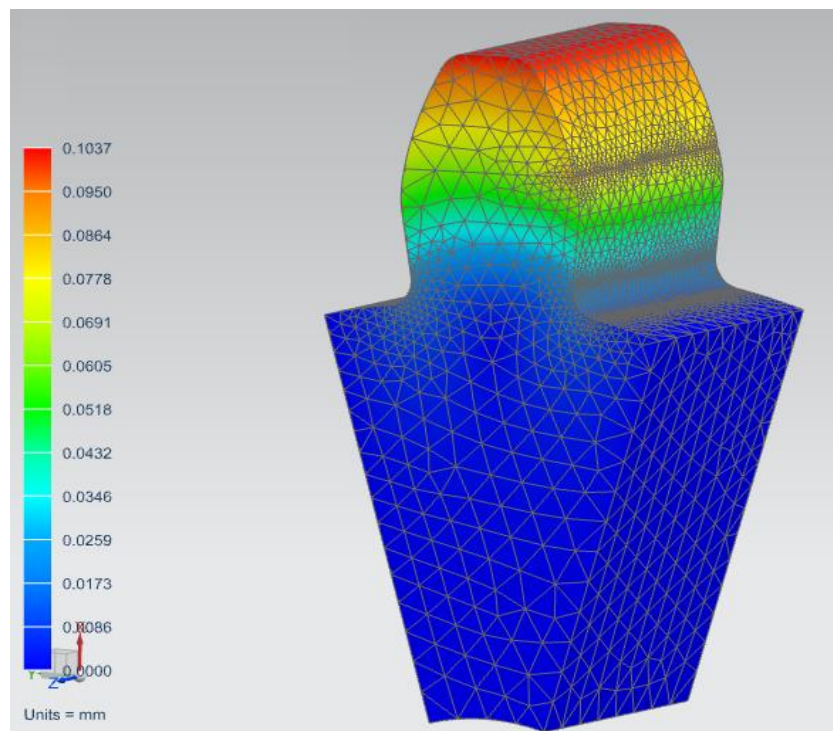
Εικόνα 5.29: Μέγιστη VM τάση στο ανθρακονημάτινο γρανάτζι (1455 MPa)



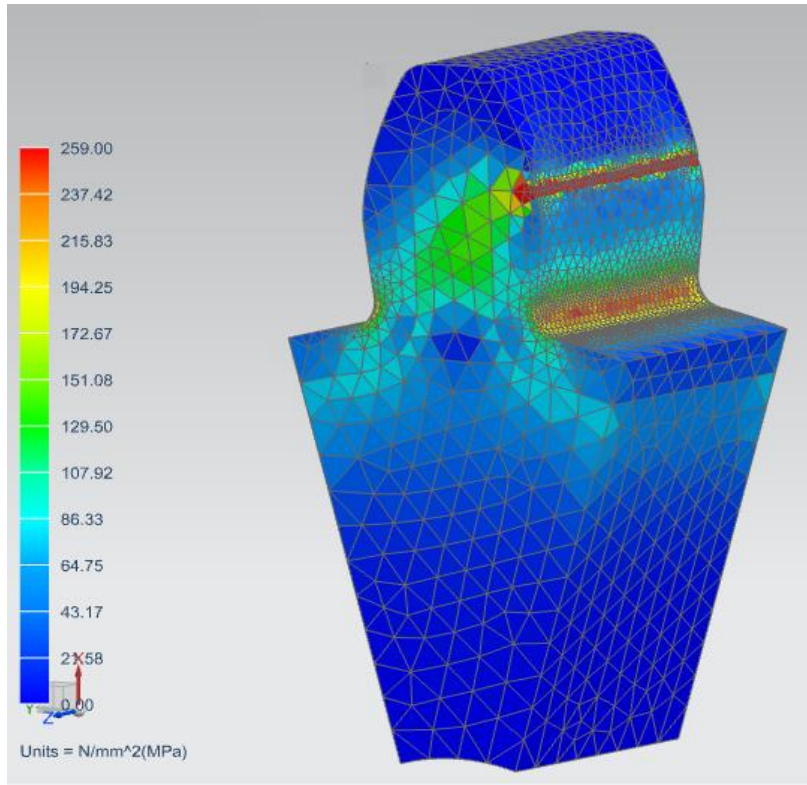
Εικόνα 5.30: Μέγιστη παραμόρφωση στο ανθρακονημάτινο γρανάτζι (0.257 mm)



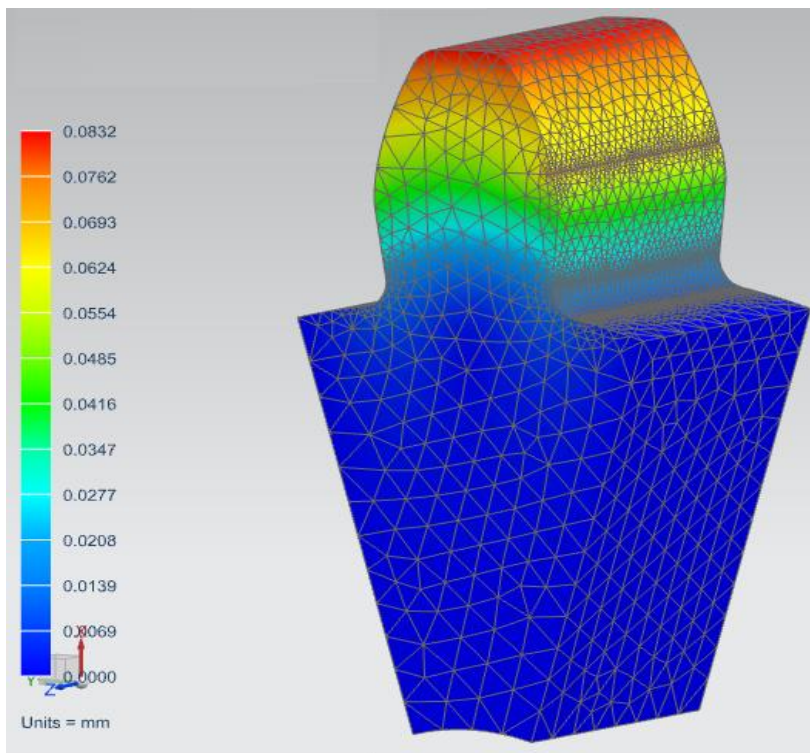
Εικόνα 5.31: Μέγιστη VM τάση στο αλουμινένιο γρανάζι (310 MPa)



Εικόνα 5.32: Μέγιστη παραμόρφωση στο αλουμινένιο γρανάζι (0.1037 mm)

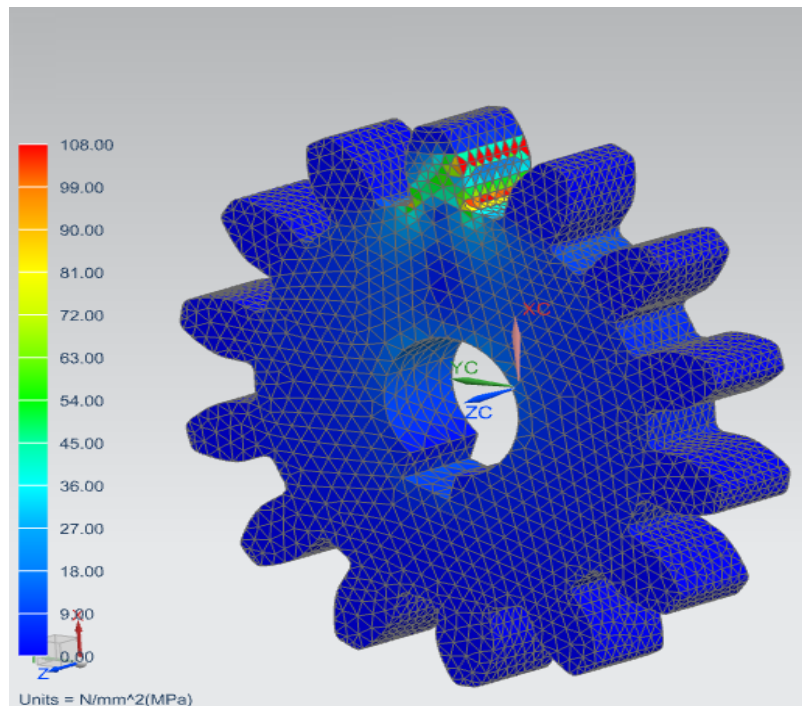


Εικόνα 5.33: Μέγιστη VM τάση στο υβριδικό γρανάζι (αλουμίνιο) (259 MPa)

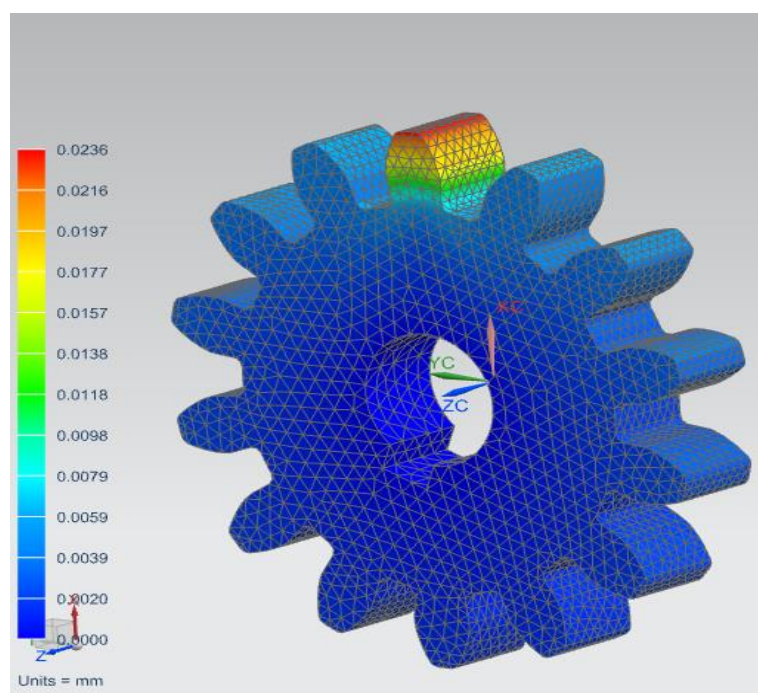


Εικόνα 5.34: Μέγιστη παραμόρφωση στο υβριδικό γρανάζι (αλουμίνιο) (0.0832 mm)

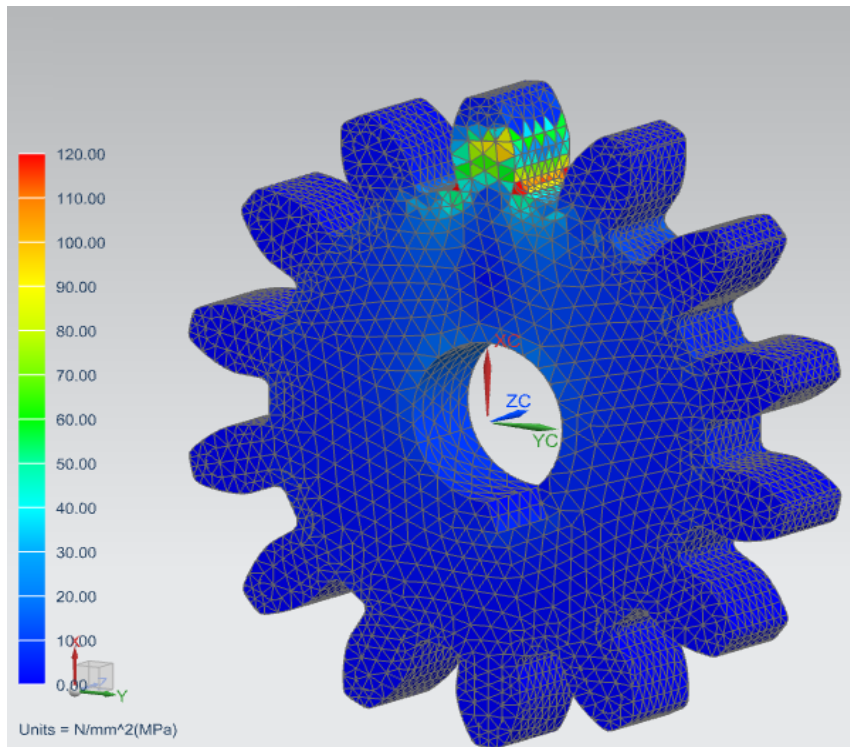
Σε αυτό το σημείο, για τα δύο βασικά μοντέλα οδοντωτών τροχών τα οποία μας ενδιαφέρει να συγκρίνουμε κυρίως, κάναμε στατική ανάλυση θέτοντας στήριξη (πάκτωση) στον άξονα του οδοντωτού τροχού για να δούμε πώς κατανέμονται οι τάσεις όχι μόνο στο δόντι και παίρνοντας τις αντίστοιχες μετατοπίσεις. Ας δούμε τα αποτελέσματα παρακάτω (εικ. 5.35 έως 5.38) για την περίπτωση του χαλύβδινου και του υβριδικού(με χάλυβα) οδοντωτού τροχού.



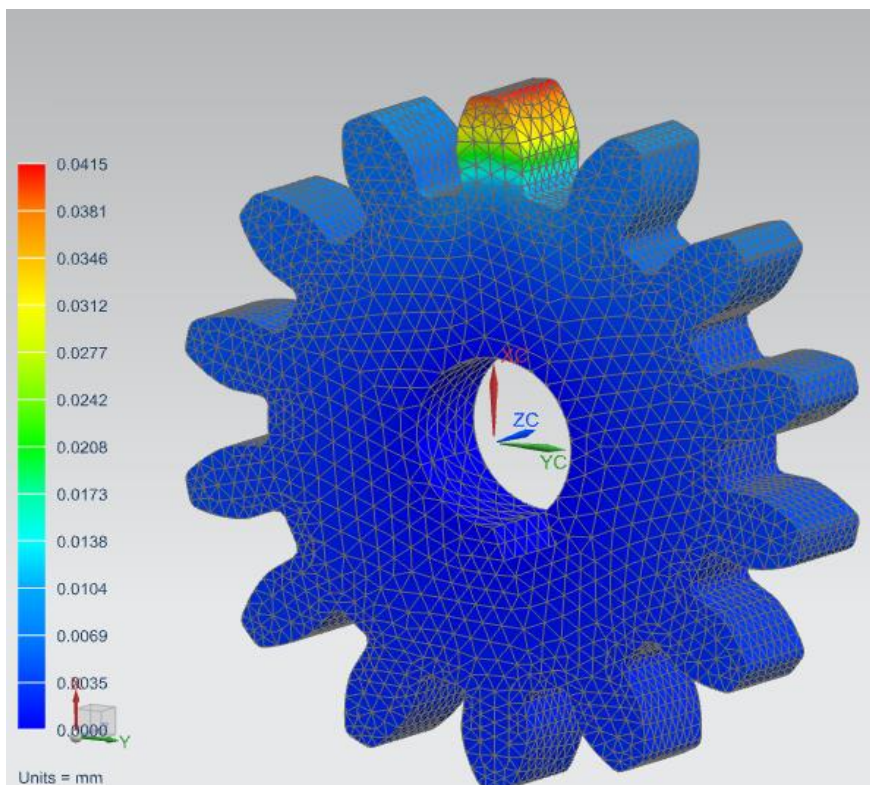
Εικόνα 5.35: Μέγιστη VM τάση στο χαλυβδινό γρανάζι (ολοκληρο) (108 MPa)



Εικόνα 5.36: Μέγιστη παραμόρφωση στο χαλυβδινό γρανάζι (ολοκληρο) (0.0236 mm)



Εικόνα 5.37: Μέγιστη VM τάση στο συνθετο γρανάζι (ολόκληρο) (120 MPa)



Εικόνα 5.38: Μέγιστη παραμόρφωση στο συνθετο γρανάζι (ολόκληρο) (0.0415 mm)

5.6 Αναλυτική μέθοδος αντοχής σε κάμψη κατά LEWIS

Τώρα που έχουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στους οδοντωτούς τροχούς ώστε να μη ξεπερνούν οι τάσεις αυτών των δυνάμεων το όριο διαρροής των υλικών, συνυπολογισμένου και του συντελεστή ασφαλείας ώστε να λειτουργούν οι οδοντωτοί τροχοί σε ασφαλή όρια καταπόνησεων, θα επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα των δυνάμεων για τις πιο απλές περιπτώσεις, οι οποίες είναι ο χαλύβδινος και ο αλουμινένιος οδοντωτός τροχός.

- Χαλύβδινος οδοντωτός τροχός:

Από την εξίσωση (2.11) που είδαμε στο υποκεφάλαιο 2.10, έχουμε:

$$\sigma_b = \frac{6 * h * F_t}{b * t^2} = \frac{6 * 20,32 \text{mm} * 7500 \text{N}}{25,4 \text{mm} * (15,95 \text{mm})^2} = \frac{914400 \text{N} * \text{mm}}{6461,8 \text{mm}^3} = 141,51 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_b = \underline{\underline{141,51 \text{MPa}}}$$

σ_b = η καμπτική τάση

h = το ύψος του δοντιού όπου έχουμε τη μέγιστη καταπόνηση

F_t = η δύναμη που ασκείται στο δόντι

b = το πάχος του δοντιού

t = το πλάτος του δοντιού

Βλέπουμε ότι το αποτέλεσμα είναι ίδιο σχεδόν με αυτό του προγράμματος το οποίο είναι **142 MPa** όπως είδαμε και παραπάνω.

Έχοντας το αποτέλεσμα της καμπτικής τάσης, θα υπολογίσουμε τη δύναμη που ασκεί αυτή την τάση από τον τύπο του Lewis συνυπολογίζοντας και τον παράγοντα Lewis (Y), τον οποίο βρήκαμε στο υποκεφάλαιο 2.10 από το διάγραμμα (εικ. 2.14) και τον Πίνακα 2.3 αλλά θα τον υπολογίσουμε και αναλυτικά μέσω της εξίσωσης 5.8 που θα δούμε παρακάτω.

$$Y = \frac{t^2}{6 \cdot h \cdot m} = \frac{(15,95\text{mm})^2}{6 \cdot 20,32\text{mm} \cdot 10,16\text{mm}} = 0,21 \quad (5.8)$$

Από το διάγραμμα και τον πίνακα που αναφέραμε, πήραμε $Y = 0,276$. Θα συνεχίσουμε με το αποτέλεσμα της αναλυτικής εξίσωσης.

Από την εξίσωση (2.15) , έχουμε:

$$F_t = m \cdot b \cdot \sigma_b \cdot Y = 10,16\text{mm} \cdot 25,4\text{mm} \cdot 142 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,21 =$$

$$F_t = 7695,5\text{N} = \underline{\underline{7,7\text{kN}}}$$

Όπου από το πρόγραμμα βρήκαμε ότι η δύναμη που καταπονεί το δόντι με τάση ίση με 142MPa , είναι ίση με $7,5\text{kN}$.

Από την εξίσωση (2.16) , είδαμε ότι όταν η δύναμη που ασκείται στο δόντι και το καταπονεί με τη μέγιστη τάση η οποία είναι η τάση διαρροής με το συντελεστή ασφαλείας και ισούται με $156,6\text{MPa}$ (Πίνακας 5.2) , έχουμε:

$$F_t = S_b$$

$$S_b = m \cdot b \cdot \sigma_b \cdot Y = 10,16\text{mm} \cdot 25,4\text{mm} \cdot 156,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,21 =$$

$$S_b = 8487\text{N} = \underline{\underline{8,49\text{kN}}}$$

Από τη μέγιστη δύναμη (S_b), έχουμε ροπή:

$$M_b = F_t * r = 8487N * 0,0711m = \quad (5.9)$$

$$M_b = \underline{\underline{603Nm}}$$

Όπου r είναι η ακτίνα της ονομαστικής διαμέτρου (Dp)

Η ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί, σχετίζεται με τις στροφές του κινητήρα όπως θα δούμε στην παρακάτω εξίσωση (5.10).

$$Power(kW) = \frac{M_b(Nm)*rpm}{9548} = \quad (5.10)$$

$$Power(kW) = \frac{603Nm*250rpm}{9548} = \underline{\underline{15,8kW \acute{\eta} 21,2HP}}$$

Όπου για rpm βάλουμε ένα παράδειγμα στροφών και για HP πολλαμε με το 134. Από την εξίσωση (5.10), βλέπουμε ότι η σχέση της δύναμης σε kW που συνδέει το χαλύβδινο γρανάζι μας με τις στροφές ανα λεπτό,είναι:

$$Power(kW) = 0,063 * rpm \quad (5.11)$$

Επειδή είδαμε από τη στατική ανάλυση ότι το υβριδικό γρανάζι αντέχει την ίδια δύναμη περίπου πριν διαρρεύσει ο εξωτερικός χάλυβας, οι σχέσεις (5.10) και (5.11) ισχύουν και για το υβριδικό οδοντωτό τροχό εφόσον έχουμε συνυπολογίσει συντελεστή ασφαλείας ικανοποιητικό.

- Αλουμινένιος οδοντωτός τροχός

Από την εξίσωση (2.16) έχουμε:

$$\sigma_b = \frac{6 * h * F_t}{b * t^2} = \frac{6 * 20,32\text{mm} * 16000\text{N}}{25,4\text{mm} * (15,95\text{mm})^2} = \frac{1950720\text{N} * \text{mm}}{6461,8\text{mm}^3}$$

$$\sigma_b = \underline{\underline{302\text{MPa}}}$$

Το πρόγραμμα μας έδωσε αποτέλεσμα τάσης που αναπτύσσεται **310MPa**. Τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά και σε αυτή την περίπτωση.

Το Y παραμένει ίδιο (εξίσωση 5.8) οπότε από τη σχέση (2.15), έχουμε:

$$F_t = m * b * \sigma_b * Y = 10,16\text{mm} * 25,4\text{mm} * 302 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 0,21 =$$

$$F_t = 16366 \text{ N} = \underline{\underline{16,37\text{kN}}}$$

Όπως ήταν λογικό εφ' όσον βρήκαμε σχεδόν ίδια τάση, βρήκαμε και παρόμοια δύναμη που την ασκεί. Από το πρόγραμμα έχουμε $F_t = \mathbf{16\text{kN}}$.

Για όριο διαρροής του αλουμινίου με συνυπολογισμένο συντελεστή ασφαλείας και από τη σχέση (2.16), έχουμε ως μέγιστη δύναμη που ασκείται:

$$S_b = m * b * \sigma_b * Y = 10,16\text{mm} * 25,4\text{mm} * 335,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 0,21 =$$

$$S_b = 18171\text{N} = \underline{\underline{18,2\text{kN}}}$$

Από τη σχέση (5.9), έχουμε ροπή:

$$M_b = F_t * r = 18171\text{N} * 0,0711\text{m} =$$

$$M_b = \underline{1292Nm} \text{ ή } \underline{1,3kNm}$$

Από τη σχέση (5.11), η μεταφερόμενη ισχύς για παράδειγμα 250rpm, είναι:

$$Power(kW) = \frac{1292Nm \cdot 250rpm}{9548} = \underline{33,8kW} \text{ ή } \underline{45HP} \quad (5.12)$$

Από την εξίσωση (5.10) και (5.12), η σχέση της δύναμης σε kW που συνδέει το αλουμινένιο γρανάζι με τις στροφές ανα λεπτό, είναι:

$$Power(kW) = 0,135 * rpm$$

Σε αυτή την περίπτωση το υβριδικό γρανάζι αντέχει να του ασκηθεί περισσότερη δύναμη οπότε έχουμε μία σχέση με συντελεστή κοντά στο 0,15.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Συγκρίνοντας τις τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης για τα γρανάζια με σκέτο χάλυβα και με χάλυβα και ανθρακόνημα παρατηρούμε ότι στο χαλύβδινο γρανάζι αναπτύσσονται χαμηλότερες τάσεις από αυτές που αναπτύσσονται στο υβριδικό γρανάζι. Επίσης αναπτύσσονται και χαμηλότερες μετατοπίσεις. Η διαφορά είναι χαμηλή, της τάξης του 14%.

Το γρανάζι από αλουμίνιο παρουσιάζει υψηλότερη τάση και μετατόπιση σε σχέση με το υβριδικό γρανάζι από αλουμίνιο και ανθρακόνημα. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας(*E*) του ανθρακονήματος. Η διαφορά είναι της τάξης του 16%.

Το γρανάζι από σκέτο ανθρακόνημα παρουσιάζει αρκετά υψηλή αντοχή αλλά τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά αφού το ανθρακόνημα έχει οριστεί σαν ισότροπο υλικό και με ιδιότητες του κατασκευαστή αλλά στην πραγματικότητα χρειάζεται εκτενέστερη μελέτη για πιο ακριβή αποτελέσματα μελετώντας το ως ανισότροπο υλικό.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι το υβριδικό γρανάζι έχει χαμηλότερη, αλλά κοντά στα επίπεδα του χαλύβδινου γραναζιού αντοχή. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα αυτά της αντοχής με τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το υβριδικό γρανάζι, ο εν λόγω σχεδιασμός υπερτερεί του χαλύβδινου γραναζιού. Το υβριδικό γρανάζι είναι πολύ πιο ελαφρύ από το χαλύβδινο και μπορεί να δεχτεί σχεδόν τις ίδιες δυνάμεις πριν διαρρεύσει ο εξωτερικός χάλυβας αν και έχει πόλυ μικρότερο πάχος υλικού. Ο χαλύβδινος οδοντωτός τροχός ζυγίζει 1740gr ενώ ο σύνθετος τροχός 440gr, σύμφωνα με τις διαστάσεις τους, σε ποσοστό, 74.7% ελαφρύτερο ενώ δέχεται σχεδόν τις ίδιες δυνάμεις. Ένα εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα πέρα από το βάρος, είναι και η δυνατότητα αντικατάστασης του εξωτερικού χαλύβδινου μέρους σε περίπτωση σημαντικών επιφανειακών φθορών, τις οποίες αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο.

Αν αντί του χάλυβα χρησιμοποιηθεί το αλουμίνιο, το υβριδικό γρανάζι παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή και επίσης μπορεί να του ασκηθεί και μεγαλύτερη δύναμη λόγω του υψηλότερου ορίου διαρροής. Το πρόβλημα με το αλουμίνιο είναι ότι είναι αρκετά όγκιμο υλικό το οποίο είναι μειονέκτημα όσον αφορά την επιφανειακή καταπόνηση κατά τη σύμπλεξη των οδοντωτών τροχών και το πλεονέκτημα του βάρους, δεν είναι τόσο έντονο σαυτή την περίπτωση καθώς το αλουμίνιο είναι ελαφρύ υλικό.

Τέλος με τη χρήση των υβριδικών γραναζιών λόγω ιδιαίτερα μειωμένου βάρους έχουμε ανάλογα μειωμένη χρήση ισχύος κυρίως κατά την αρχή της περιστροφής τους αλλά και στην ακινητοποίησή τους, στο συγκρότημα στο οποίο εντάσσεται.

Είδαμε τις διαφορές ανάμεσα σε 2 υβριδικά γρανάζια με ανθρακόνημα στο εσωτερικό τους, με το ένα να έχει ένα χάλυβα με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας εξωτερικά από το εσωτερικό του ανθρακόνημα και ένα γρανάζι με μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από το εσωτερικό ανθρακόνημα αλλά υψηλότερο όριο διαρροής και θραύσης. Είδαμε τις τάσεις που ασκούνται στο δόντι αν το καταπονήσουμε με μια δύναμη λίγο πιο κάτω από το όριο διαρροής του εξωτερικού υλικού κατά περίπτωση, καθώς και τις μετατοπίσεις από τη δύναμη αυτή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. Βιβλία :

1. Ιωάννης Κ. Στεργίου – Κωνσταντίνος Ι. Στεργίου , ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ 2 – ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ , Σύγχρονη Εκδοτική Ε.Π.Ε , Αθήνα 2002
2. Προβατίδης Χ. – Αντωνιάδης Ι. , ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ , Εκδόσεις Ε.Μ.Π. , Αθήνα 2004
3. Α. Κανάραχος – Χρ. Προβατίδης , ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ , Εκδόσεις Παπασωτηρίου , Αθήνα 2000
4. Αργύρης Σ. ΒΑΤΑΛΗΣ , ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ , ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ , 2^η Έκδοση , 2009 Θεσσαλονίκη

B. Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία:

1. Bhagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman, K. Chandrashekhara , Analysis and Performance of Fiber Composites , WILEY , 4th Edition , 2016

Γ. Επιστημονικές εργασίες:

1. Δημητρίου Β. , ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΦΗ ΠΛΕΓΜΑΤΑ , Διδακτορική Διατριβή , Ε.Μ.Π. , Αθήνα , Αύγουστος 2004
2. Μακρής Παναγιώτης – Ψυλάκης Γεώργιος , ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ , Διπλωματική Εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης , Σεπτέμβριος 2015
3. ΠΛΗΡΗΣ ΣΧΕΔΙΟΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΙΩΤΗΡΑ ΜΕ ΑΤΕΡΜΟΝΑ ΚΟΧΛΙΑ ΚΑΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ , ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ , ΤΕΙ ΚΑΒΑΛΑΣ

Δ. Διευθύνσεις Διαδικτύου:

1. courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf
(Σημειώσεις Ε.Μ.Π. Σύνθετα Υλικά)
2. <http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/MECH104/%CE%A3%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%20%CE%A0%CE%B5%CE%B9%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82%20%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%BF%CF%87%CE%AE%CF%82%20%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD.pdf>
(Σημειώσεις Τ.Ε.Ι Πειραιά εργαστήριο μηχανικής)

3. https://khkgears.net/new/gear_knowledge/abcs_of_gears-b/basic_gear_terminology_calculation.html
4. <https://sciencing.com/materials-used-spur-gears-7194660.html>
5. <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/THEORIA/ONOMATOLOGIA%20XALYBWN.html>
6. <http://www.machinedesign.com/materials/plastic-gears-are-future>
7. <https://docplayer.gr/8827986-Metopikoi-odontotroi-trohi.html>
8. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%AC%CE%BB%CF%85%CE%B2%CE%B1%CF%82>
9. <https://geargenerator.com/#200,200,100,6,1,0,0,4,1,8,2,4,27,-90,0,0,16,4,4,27,-60,1,1,12,1,12,20,-60,2,0,60,5,12,20,0,0,0,2,-563>
10. <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/Drawing/THEORIA/EIDH%20TROWN.html>
11. <https://www.popularmechanics.com/cars/news/a15246/plastic-carbon-fiber-gears-alternative-to-metal/>
12. <https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BSMM104/1.%CE%91%CE%BD%CE%BF%CF%87%CE%AD%CF%82.pdf>
13. https://www.engineersedge.com/gear_pitch_chart.htm
14. <https://www.scribd.com/document/280994801/Tutorial-06-Week8>

- Οι αναφορές στη σχετική βιβλιογραφία, μέσα στο κείμενο, έχουν σημειωθεί με [] και το σχετικό κεφαλαίο γράμμα και νούμερο .