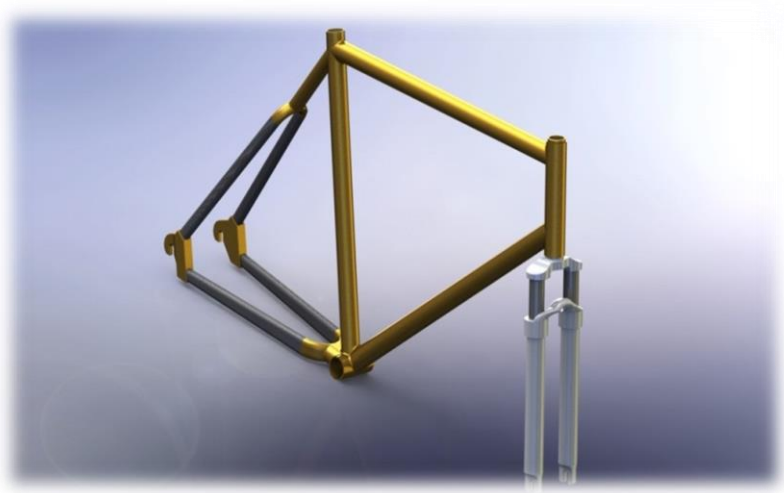




ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ ΜΕ ΣΚΕΛΕΤΟ ΑΠΟ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ



ΛΙΑΚΟΥΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Α.Μ.: 3694

Επιβλέπων

Δρ. Πετούσης Μάρκος

Ηράκλειο, 2013

Πρόλογος

Ο σχεδιασμός ποδηλάτου αποτελεί μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών αποτελεί μια πρόκληση ως προς τη συμπεριφορά του σκελετού του ποδηλάτου. Οι σύγχρονες τεχνολογικές μέθοδοι σχεδιαστικών προγραμμάτων έχουν ανοίξει το δρόμο σε μια νέα γενιά επιλογών. Η δυνατότητα “απεικόνισης” της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και η δυνατότητα “προσομοίωσης” της στατικής, δυναμικής, θερμικής, ρευστοδυναμικής, κλπ. συμπεριφοράς της κατασκευής αυτής, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και αλλάζουν σημαντικά τόσο την εκπαίδευση όσο και την επαγγελματική πράξη του μηχανολόγου μηχανικού.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, τόσο στον προϊστάμενο του τμήματος μηχανολογίας Βαίρη Αχιλέα και στον καθηγητή Πετούση Μάρκο για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξαν στην ανάληψη και εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας, όσο και στην οικογένεια μου για την κατανόηση και την αμέριστη συμπαράσταση που μου πρόσφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Λιάκουρης Κωνσταντίνος

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Ποδήλατο

1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Ιστορική αναδρομή	8
1.3 Στοιχεία σκελετού ποδήλατου	10
1.3.1 Σωλήνες σκελετού.....	11
1.3.2 Κούτελο.....	12
1.3.3 Άνω σωλήνες.....	13
1.3.4 Κάτω σωλήνες.....	13
1.3.5 Κάθετος σωλήνας.....	13
1.3.6 Κάτω ψαλίδια.....	14
1.3.7 Άνω ψαλίδια.....	14
1.3.8 Μεσαία τριβή.....	15
1.4 Γεωμετρία ποδήλατου.....	16
1.4.1 Μεγέθος σκελετών ποδηλάτου.....	17
1.5 Σύγχρονοι τύποι ποδήλατου.....	17
1.5.1 Ποδήλατα δρόμου και τρίαθλου.....	17
1.5.2 Ποδήλατα Roadster.....	18
1.5.3 Ποδήλατα βουνού.....	19
1.5.4 Ποδήλατο BMX.....	20
1.5.5 Σπαστό ποδήλατο.....	20

Κεφαλαίο 2 : Σύνθετα υλικά και διαδικασίες επιλογής τους

2.1 Εισαγωγή.....	21
2.1.1 Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών.....	22
2.1.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών.....	24
2.2 Ίνες.....	25
2.2.1 Ίνες γυαλιού.....	26
2.2.2 Ίνες άνθρακα.....	29
2.2.3 Ίνες πολυμερούς.....	32
2.2.4 Μεταλλικές ίνες.....	35
2.2.5 Κεραμικές ίνες.....	36

2.2.6	Τριχιτές.....	37
2.2.7	Ίνες φυσικών ορυκτών.....	38
2.2.8	Σύγκριση ενισχυτικών ινών.....	39
2.3	Μήτρα.....	40
2.3.1	Οργανικές μήτρες.....	41
2.3.2	Μεταλλικές μήτρες.....	42
2.3.3	Κεραμικές μήτρες.....	42
2.4	Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινωδών σύνθετων.....	43
2.4.1	Γεωμετρία ινών.....	43
2.4.2	Ποσοστό ινών.....	44
2.4.3	Προσανατολισμός των ινών.....	44
2.4.4	Συνάφεια ινών – μήτρας.....	45
2.4.5	Τελική επιλογή υλικών.....	45
2.5	Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών.....	47
2.6	Μηχανικές ιδιότητες υλικών.....	53
2.6.1	Πυκνότητα.....	53
2.6.2	Μέτρο ελαστικότητας.....	54
2.6.3	Μέτρο ελαστικότητας young.....	55
2.6.4	Μέτρο διάτμησης.....	55
2.6.5	Μέτρο ελαστικότητας όγκου.....	55
2.6.6	Όριο ελαστικότητας.....	56
2.6.7	Λόγος Poisson.....	56
2.6.8	Επιμήκυνση.....	57
2.6.9	Όριο αντοχής.....	57
2.7	Διαδικασία επιλογής υλικού.....	57
2.7.1	Σκληρότητα.....	62
2.7.2	Επίδραση της θερμοκρασίας.....	64
2.7.3	Ιδιότητες κρούσης.....	65
2.7.4	Διαδικασίες επιλογής υλικών.....	67
2.8	Υλικά σκελετών ποδηλάτου.....	72
2.8.1	Χάλυβας.....	72
2.8.2	Κράματα αλουμινίου.....	77
2.8.3	Τιτάνιο.....	79

2.8.4	Ανθρακονήματα.....	80
2.8.5	Μαγνήσιο.....	82
2.8.6	Θερμοπλαστικά.....	83
2.8.7	Συνδυασμοί υλικών.....	83

Κεφάλαιο 3 : Στατική ανάλυση κατασκευών

3.1	Εισαγωγή.....	84
3.2	Δικτυώματα.....	84
3.2.1	Απλό δικτύωμα	86
3.2.2	Μέθοδος των αρθρώσεων.....	87
3.2.3	Μέθοδος των τμημάτων.....	88
3.3	Πλαίσιο.....	89
3.4	Μηχανισμοί.....	91
3.5	Αρχή διατήρησης ενέργειας	92

Κεφάλαιο 4 : Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

4.1	Εισαγωγή.....	96
4.2	Ορισμός CAD.....	96
4.3	Ορισμός CAE.....	97
4.4	Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	99
4.4.1	Μοντελοποίηση – τύποι πεπερασμένων στοιχείων.....	100
4.4.2	Αυτόματη γένεση πλέγματος.....	104
4.4.3	Ειδή ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.....	118

Κεφάλαιο 5 : Δυναμική και γραμμική ανάλυση πλαισίου ποδηλάτου

5.1	Εισαγωγή.....	121
5.2	Σχεδιασμός πλαισίου ποδηλάτου.....	121
5.3	Σενάρια φόρτισης	127
5.3.1	Scenario static start-up.....	128
5.3.2	Scenario Horizontal Impact.....	129
5.3.3	Scenario Riding.....	130

5.4 Στατική ανάλυση.....	132
5.5 Γραμμική ανάλυση.....	134
5.6 Σχεδιασμός πιρουνιού με στοιχειά απόσβεσης.....	137

Κεφάλαιο 6 : Αποτελέσματα και συμπεράσματα

6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	141
6.2 Συμπεράσματα.....	160

Παράρτημα Α-Κατασκευαστικά σχέδια ποδηλάτου.....

162

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία τονίζεται ο σχεδιασμό ενός πλαισίου ποδηλάτου με σκοπό την δυναμική και γραμμική ανάλυση. Πρόκειται για μια προσομοίωση του σκελετού ποδηλάτου στο δρόμο, επίσης θα προταθούν διάφοροι τρόποι για τη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς με χρήση νέων προηγμένων υλικών, στοιχείων απόσβεσης και εξετάζοντας διάφορα σχήματα και διαστάσεις των δομικών στοιχείων του πλαισίου. Παρακάτω γίνεται εκτενής παρουσίαση, αναφορικά με την σύσταση του ποδηλάτου. Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναδρομή στη ιστορία του ποδηλάτου, στα μέρη από τα οποία αυτό απαρτίζεται, καθώς και στους τύπους ποδηλάτου που επικρατούν στην σύγχρονη βιομηχανία. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σύνθετα και μη υλικά, που θα χρησιμοποιηθούν ώστε να σχεδιαστεί το πλαίσιο ποδηλάτου, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών καθώς οι παράμετροι επιλογής τους για τη σύνθεση ενός σκελετού.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναδεικνύονται βασικά ζητήματα στατικής ανάλυσης δικτυωμάτων, η μέθοδος των τμημάτων και των αρθρώσεων, η στατική ανάλυση των μηχανισμών, όπως και η πιο αποτελεσματική στην επίλυση τύπων προβλημάτων ισορροπίας, αρχή διατήρησης ενέργειας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, οι γενικοί ορισμοί CAD και CAE, μέθοδοι και τύποι πεπερασμένων στοιχείων αυτόματης γένεσης πλέγματος και τα είδη ανάλυσής τους που μπορούν να εφαρμοστούν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για το σχεδιασμό πλαισίου ποδηλάτου, περιγραφή των σεναρίων στατικής φόρτισης και σχεδιασμός του προυιού ενός ποδηλάτου με στοιχεία απόσβεσης.

Στο έκτο και τελευταίο εξάγονται τα αποτελεσμάτα, της στατικής και γραμμικής ανάλυσης, που εφαρμόστηκαν σε συγκεκριμένο πλαίσιο ποδηλάτου με σενάριο φόρτισης. Η έρευνα ολοκληρώνεται με την πρόταση για κατασκευή ενός σύγχρονου και ανταγωνιστικού προϊόντος, το οποίο θα πληροί όλες τις προϋποθέσεις για την αγορά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ποδήλατο

1.1 Εισαγωγή

Ποδήλατο ονομάζεται το δίτροχο (μερικές φορές τρίτροχο) όχημα, που κινείται με τη χρήση της μυϊκής δύναμης των ποδιών του αναβάτη. Το ποδήλατο αποτελεί ένα ιδιαίτερα διαδεδομένο μεταφορικό μέσο. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ποδηλάτου αποτελεί η δυνατότητα του να ανταποκρίνεται σε αρκετά διαφορετικές απαιτήσεις, όπως είναι η μετακίνηση, η άθληση και η ψυχαγωγία. Το γεγονός αυτό, οδήγησε στην αύξηση του αριθμού των ποδηλάτων. Ο αριθμός των ποδηλάτων του πλανήτη στις μέρες μας υπολογίζεται ότι ξεπερνά το ένα δισεκατομμύριο.

Στην κλασική του μορφή, το ποδήλατο αποτελείται από δύο τροχούς, οι οποίοι βρίσκονται ο ένας πίσω από τον άλλο και συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικό σκελετό. Βασικά, επίσης, μέρη ενός τυπικού ποδηλάτου αποτελούν, το τιμόνι, η σέλα, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης και τα φρένα. Ως συμπληρωματικός εξοπλισμός, όχι δηλαδή απαραίτητος για τη λειτουργικότητα του ποδηλάτου, χρησιμοποιείται ένα πλήθος εξαρτημάτων.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Δεν υπάρχει συγκεκριμένη χρονολογία στην οποία να αποδίδεται η εφεύρεση του ποδηλάτου, επομένως ούτε συγκεκριμένος «εφευρέτης» αυτού. Πολύ πριν την εμφάνιση κάποιας κατασκευής παρόμοιας με ένα τυπικό σύγχρονο ποδήλατο, έχει καταγραφεί ένα ποικίλο φάσμα οχημάτων που εκμεταλλεύονταν μόνο τη μυϊκή δύναμη του αναβάτη τους. Μία από τις κατασκευές αυτές, που από πολλούς θεωρείται ο πρόγονος του ποδηλάτου, ήταν η «draisienne». Η draisienne κατασκευάστηκε από το Γερμανό βαρόνο Καρλ Φον Ντράις, το 1817 (η ονομασία 'draisienne' αποτελεί γαλλική απόδοση του ονόματος του κατασκευαστή της). Η draisienne ήταν σχεδόν εξολοκλήρου κατασκευασμένη από ξύλο. Μη διαθέτοντας πετάλια, ο αναβάτης την έθετε σε κίνηση σπρώχνοντας με τα πόδια του προς τα πίσω. Η κατασκευή του Φον Ντράις έγινε γνωστή και ως hobby-horse, αντανακλώντας την πεποίθηση των οπαδών της ότι θα αντικαθιστούσε το βασικό μεταφορικό μέσο του 19ου αιώνα, το άλογο.



Εικόνα 1.0 : Ξύλινη draisienne

Το 1839, ο Σκωτσέζος σιδηρουργός Κιρκπάτρικ Μακμίλαν σχεδιάζει την «velocipede». Ο Μακμίλαν βελτίωσε την κατασκευή του Φον Ντράις, εισάγοντας τη χρήση των πεταλιών, συνδεδεμένων με ράβδους με τον οπίσθιο τροχό. Με αυτό τον τρόπο, ο αναβάτης δεν ήταν πλέον αναγκασμένος να φέρνει τα πόδια του σε επαφή με το έδαφος, κάτι που περιοριζε σημαντικά την ταχύτητα του οχήματος. Είκοσι χρόνια αργότερα, το 1860, ο Γάλλος Πιέρ Μισώ αλλάζει το σχέδιο της velocipede, συνδέοντας τα πετάλια απευθείας με τον μπροστινό τροχό. Αργότερα, ο Μισώ θα εισάγει τη χρήση συμπαγούς καουτσούκ στους τροχούς,

δείχνοντας ουσιαστικά το δρόμο προς τα γνωστά στις μέρες μας λάστιχα. Το 1870 οι Βρετανοί Τζέιμς Στάρλεϋ και Γουίλλιαμ Χίλμαν σχεδιάζουν ένα ποδήλατο με αρκετά μεγαλύτερο μπροστινό τροχό. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουν την εκπληκτική, για την εποχή, ταχύτητα των 24 χλμ/ώρα. Το μοντέλο που κατασκεύασαν ονομάστηκε 'agiel' και ήταν το πρώτο ποδήλατο εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένο από μέταλλο. Βασικό μειονέκτημα του μεγέθους του μπροστινού τροχού του agiel αποτελούσε η ιδιαίτερα υψηλή θέση της σέλας που, λόγω της φτωχής κατανομής βάρους, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της ασφάλειας του αναβάτη.

Στην Αγγλία, στα χαρακτηριστικά ποδήλατα με μεγάλο μπροστινό τροχό, αποδόθηκε η χαϊδευτική ονομασία «penny-farthings». Η αιτία βρίσκεται στην παρομοίωση του μεγέθους των τροχών ενός τέτοιου ποδηλάτου με τα νομίσματα της εποχής: Ο μεγάλος μπροστινός τροχός δίπλα στον μικρό οπίσθιο, θύμιζε το μεγάλο νόμισμα του ενός penny δίπλα σε αυτό του ενός farthing. Τα επόμενα χρόνια, μια σειρά από ενδιαφέρουσες ιδέες και εφευρέσεις εφαρμόζονται στο ποδήλατο, βελτιώνοντας το συνεχώς: η μετάδοση κίνησης μέσω αλυσίδας, η χρήση ταχυτήτων, τα φρένα, ο «κούφιος» σκελετός, το «δυναμό» και η σαμπρέλα αποτελούν τις πλέον χαρακτηριστικές αυτών των εφευρέσεων. Για παράδειγμα, μετά την εισαγωγή της αλυσίδας και των ταχυτήτων, δεν υπήρχε η ανάγκη ένα ποδήλατο να διαθέτει μεγάλου μεγέθους μπροστινό τροχό προκειμένου να κατορθώνει μεγάλες ταχύτητες. Έτσι, το 1885 είναι η χρονιά που κατασκευάζεται το μοντέλο «gover», που συχνά χαρακτηρίζεται ως το πρώτο σύγχρονο ποδήλατο. Κατασκευαστής του ήταν ο Τζον Κεμπ Στάρλεϋ, ανιψιός του Τζέιμς Στάρλεϋ.

Η επιστροφή σε μικρότερου μεγέθους τροχούς βελτίωσε σημαντικά την άνεση με την οποία κανείς θα μπορούσε πλέον να κάνει ποδήλατο. Ως φυσικό επακόλουθο, τα τελευταία χρόνια του 19ου αιώνα το ενδιαφέρον του αγοραστικού κοινού για το ποδήλατο έχει αυξηθεί κατακόρυφα. Με το πέρασμα στον 20ο αιώνα ένας μεγάλος αριθμός ποδηλατικών λεσχών κατακλύζει και τις δύο πλευρές του ατλαντικού ωκεανού, αντικατοπτρίζοντας την καινούργια μόδα. Παράλληλα, εμφανίζονται οι πρώτες βιομηχανίες κατασκευής ποδηλάτων. Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η βιομηχανία Raleigh, η οποία λίγα χρόνια μετά την ίδρυσή της έφτασε να παράγει περίπου 30.000 ποδήλατα το χρόνο. Ιδρυτής

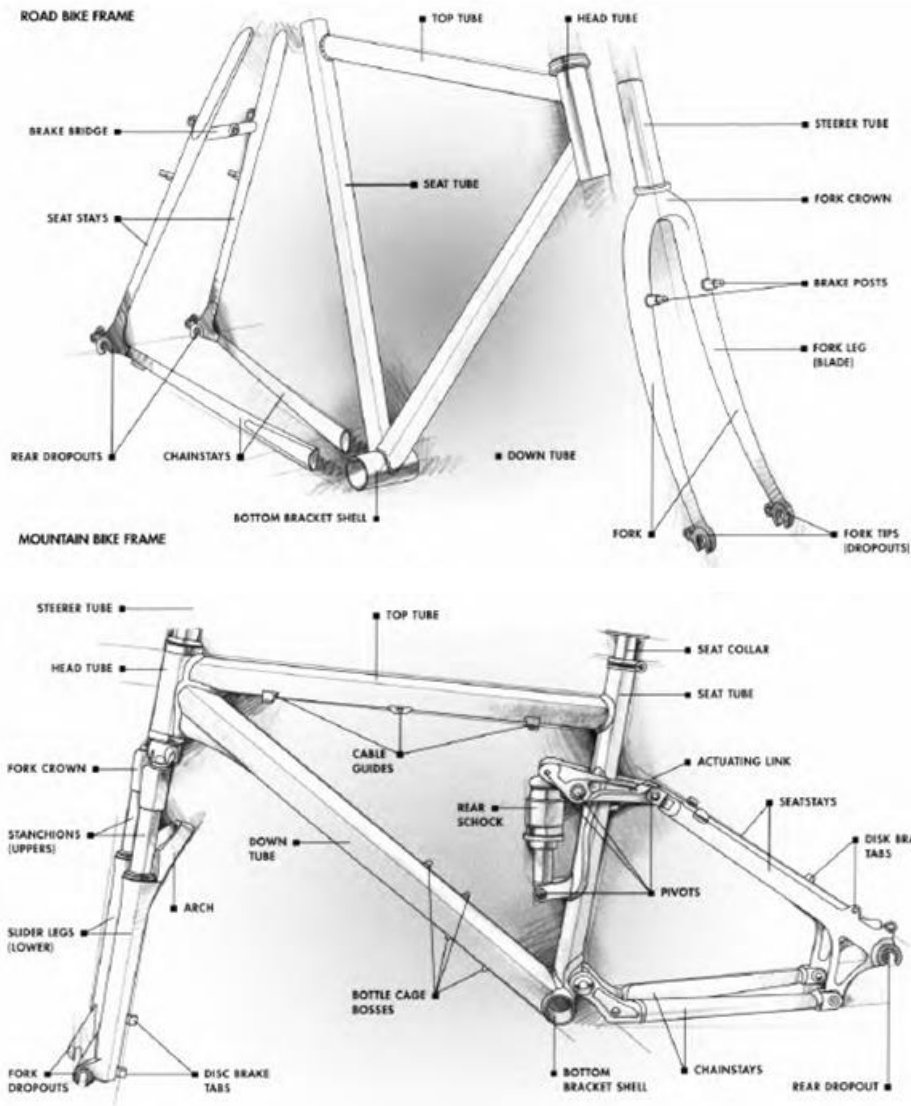
της ήταν ο Άγγλος Φρανκ Μπάουντεν. Μέσα στο πρώτο μισό τα μέσα του 20ου αιώνα, το ποδήλατο έχει γίνει το βασικό μέσο μετακίνησης για εκατομμύρια κατοίκους του πλανήτη. Ιδιαίτερα βοηθητική προς αυτή την κατεύθυνση ήταν η επαφή πολλών υπανάπτυκτων χωρών με τις ευρωπαϊκές χώρες, λόγω της αποικιοκρατίας. Από την άλλη πλευρά βέβαια, η ανάπτυξη των μηχανοκίνητων μέσων μεταφοράς είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί αρκετά το ενδιαφέρον για το ποδήλατο σε αρκετές ανεπτυγμένες χώρες. Εξαίρεση αποτελούν ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Γερμανία, η Δανία και η Ολλανδία, στις οποίες η χρήση του ποδηλάτου διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα.

Στην Ελλάδα το πρώτο ποδήλατο ήρθε το 1885, ενώ το 1890, τη χρονιά ίδρυσης της Διεθνούς Ποδηλατικής Ομοσπονδίας, έγιναν οι πρώτοι ποδηλατικοί αγώνες.

1.3 Στοιχεία Σκελετού Ποδήλατου

Το κύριο στοιχείο ενός ποδήλατου είναι ο σκελετός του και πάνω σε αυτόν τοποθετούνται οι δυο τροχοί και τα αλλά μέρη του. Το ποιο σύγχρονο και κοινό σχέδιο ποδήλατου είναι ο σκελετός διαμάντι, το οποίο αποτελείται από δυο τρίγωνα.

Εκτός από τον σκελετό διαμάντι, στις μέρες μας υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι πλαισίων ποδήλατου που έχουν αναπτυχθεί, μερικοί από τους οποίους κατασκευάζονται ακόμα και σήμερα. Τα δυο τρίγωνα στον σκελετό διαμάντι αποτελούνται από: το κούτελο (head tube), τον πάνω σωλήνα (top tube), τον κάτω σωλήνα (down tube) και τον σωλήνα της σέλας (seat tube). Στο πίσω τρίγωνο έχουμε τον σωλήνα της σέλας και τα ζευγαρωτά seat stays και chain stays. Το κούτελο ενσωματώνεται με το εμπρόσθιο πιρούνι (Fork). Ο πάνω σωλήνας (top tube) συνδέει το κούτελο (head tube) με τον σωλήνα της σέλας (seat tube), ενώ ο κάτω σωλήνας συνδέει την μεσαία τριβή με το κούτελο (head tube). Το πίσω τρίγωνο ενώνεται στα οπίσθια άκρα των πιρουνιών, όπου και τοποθετείται ο πίσω τροχός. Αποτελείται από τα ζευγαρωτά seat stays και chain stays. Τα chain stays τρέχουν παράλληλα με την αλυσίδα και συνδέουν τα πίσω άκρα του πιρουνιού με την μεσαία τριβή. Τα seat stays συνδέονται με το επάνω μέρος του σωλήνα της σέλας και τα πίσω άκρα των πιρουνιών του ποδηλάτου.



Εικόνα 1.2 : Τα μηχανικά μέρη ενός σκελετού-διαμάντι

1.3.1 Σωλήνες σκελετού

Ο σκελετός διαμάντι αποτελείται από ένα κεντρικό τρίγωνο και ένα ζευγαρωτό οπίσθιο τρίγωνο.

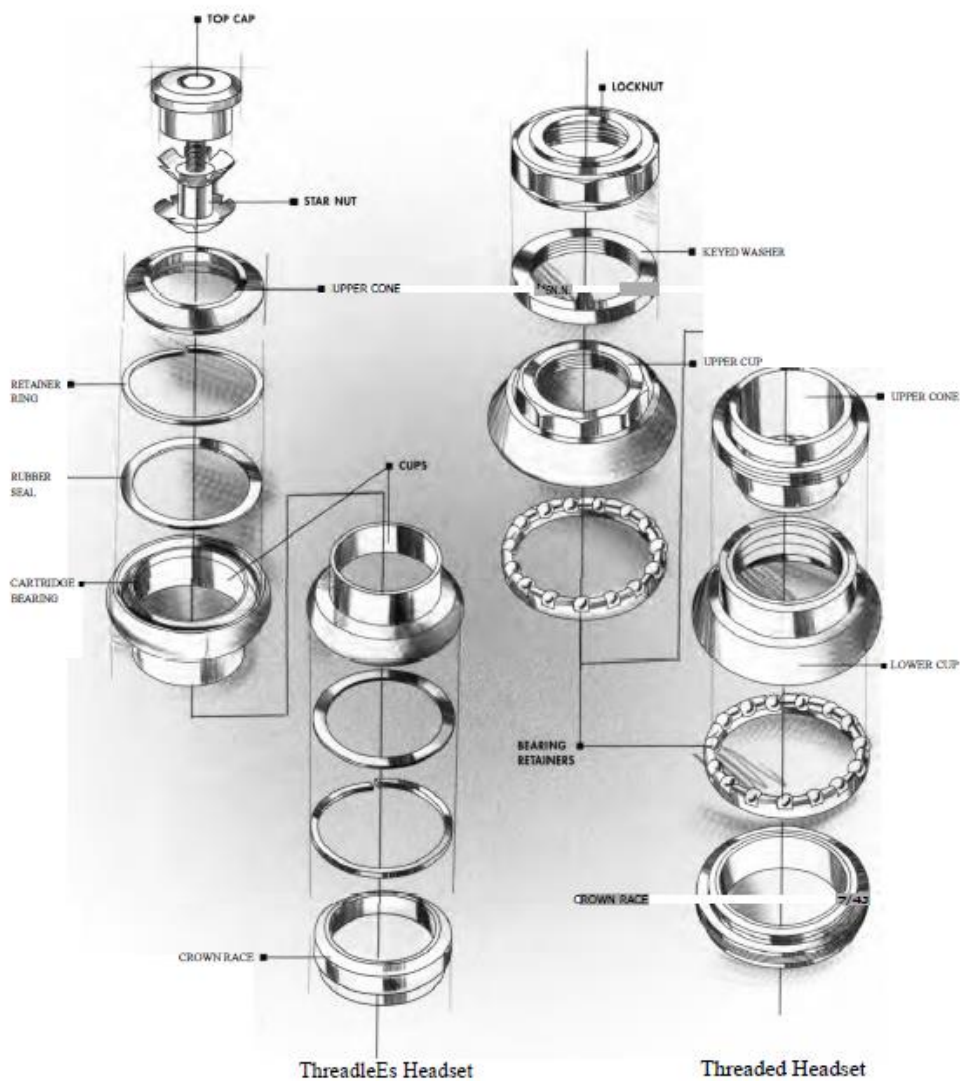
Το κεντρικό τρίγωνο αποτελείται από το κούτελο, τον πάνω σωλήνα, τον κάτω σωλήνα και τον σωλήνα της σέλας.

Το οπίσθιο τρίγωνο αποτελείται από τον σωλήνα της σέλας και τα ζευγαρωτά chain stays και seat stays.

1.3.2 Κούτελο (Head tube)

Το κούτελο περιέχει το headset και τα ρουλεμάν για το πιρούνι μέσω του steerer tube. Στο ενσωματωμένο headset, συνδέονται τα ρουλεμάν απευθείας με την εσωτερική επιφάνεια του κούτελου, ενώ σε ένα μη ενσωματωμένο headset συνδέονται με εγκοπές που χαράσσονται στο κούτελο.

nsic e Your Headset



Εικόνα 1.3: Headset για ποδήλατο

1.3.3 Άνω σωλήνας (Top tube)

Ο άνω σωλήνας, συνδέει τον σωλήνα της σέλας με το πάνω μέρος του κούτελου. Σε έναν κλασικό σκελετό ποδηλάτου η θέση του άνω σωλήνα είναι οριζόντια. Αναφορικά με τα ποδήλατα βουνού, η θέση του άνω σωλήνα έχει κλίση προς τα κάτω, προς το σωλήνα της σέλας, ενώ για τα ποδήλατα τύπου Step-through, η θέση του άνω σωλήνα είναι παράλληλη προς τον κάτω σωλήνα.

Όσο για τα καλώδια έλεγχου, ή ενσωματώνονται μέσα στον άνω σωλήνα, ή τοποθετούνται κατά μήκος της δοκού άνω σωλήνα. Συνήθως, αυτά τα καλώδια αποτελούν ιδιαίτερο εξάρτημα των φρένων και των ταχυτήτων ενός ποδηλάτου.

Ο χώρος που περιλαμβάνει το καθίσμα του αναβατή στην σελά και τον άνω σωλήνα του σκελετού ονομάζεται clearance, ενώ το συνολικό ύψος από το έδαφος μέχρι τον άνω σωλήνα αποκαλείται Height lever.

1.3.4 Κάτω σωλήνας (Down tube)

Στον κάτω σωλήνα συνδέεται το κούτελο και το περίβλημα της μεσαίας τριβής. Στα αγωνιστικού τύπου ποδήλατα και σε ποδήλατα βουνού τα καλώδια ντεραγιέ βρίσκονται είτε κατά μήκος αυτού του σωλήνα, είτε στο εσωτερικό του.

Επίσης, στον κάτω σωλήνα υπάρχει υποδοχή για τοποθέτηση της πάγουρο-θήκης. Μάλιστα, στα παλαιότερα αγωνιστικά ποδήλατα στο προκείμενο σημείο συναντώνται και οι μοχλοί αλλαγής ταχυτήτων. Με την πάροδο του χρόνου, το μοντέλο αυτό έχει ξεπεραστεί.

1.3.5 Κάθετος Σωλήνας (Seat tube)

Ο κάθετος σωλήνας, ή σωλήνας θέσης, περιέχει τον λαιμό της σέλας (seatpost). Εκεί μπορεί να συνδεθεί η σελά και να σταθεροποιηθεί στο κατάλληλο ύψος με έναν μοχλό απελευθέρωσης.

Ο σωλήνας θέσης μπορεί να περιλαμβάνει και υποδοχή για την βάση της παγουροθήκης και για τα εμπρόσθια καλώδια ντεραγιέ.

1.3.6 Κάτω ψαλίδια (chain stays)

Τα κάτω ψαλίδια ή chainstays είναι παράλληλα με την αλυσίδα, συνδέουν τα πίσω άκρα του πιρουνιού με το περίβλημα της μεσαίας τριβής.

Σε κάποια παλαιότερα συστήματα ποδηλάτου, κυρίως της δεκαετίας του 1990, οι βάσεις για τα δισκόφρενα συνδέονται στα chainstays. Στα νέα μοντέλα της αγοράς έχει σχεδιαστεί ένα μικρό στήριγμα που συνδέει τα chainstays μπροστά από τον οπίσθιο τροχό και πίσω από την μεσαία τριβή.

1.3.5 Άνω ψαλίδια (Seat stays)

Τα άνω ψαλίδια ενώνονται στο επάνω μέρος του σωλήνα θέσης με τα πίσω άκρα του πιρουνιού. Στο συγκεκριμένο σημείο του σκελετού υπάρχουν πολλές παραλλαγές, όπως το Hellenic. Το στυλ αυτό δίνει μια παραλλαγή, σύμφωνα με την οποία τα seat stays διαπερνούν τον σωλήνα θέσης και καταλήγουν μπροστά από τις οπίσθιες απολήξεις του άνω σωλήνα. Εκεί δημιουργείται ένα μικρό τρίγωνο.

Επίσης, για την ερμηνεία των άνω ψαλιδιών χρησιμοποιούνται και οι όροι mono stay, single seat stay, wish bone, fast back shout stay, κ.α. Για παράδειγμα, τα fast back shout stays έχουν τον σωλήνα θέσης στη πίσω πλευρά ενώ μπορεί επιπλέον να υπάρχει ένας βραχίονας, που θα ενώνει τα stays στον οπίσθιο τροχό του ποδηλάτου και στο κάτω σημείο σύνδεσης με το σωλήνα θέσης. Ταυτόχρονα, εκτός από πρόσθετη αντίστήριξη, έχει σχεδιαστεί και υποδοχή για την τοποθέτηση των οπίσθιων φρένων.

Με τον όρο dual seat stays γίνεται αναφορά στα άνω ψαλίδια, τα οποία ενώνονται σε δυο ξεχωριστά σημεία. Τα seat stays παρέχουν το σημείο στήριξης για τα δισκόφρενα και τις ζάντες. Σε πολλά αγωνιστικά ποδήλατα γίνεται χρήση συνδυασμών από ανθρακονήματα και αλουμίνιο στα seat stays και στα διάφορα μέρη του σκελετού.

Ο σχεδιασμός από αλουμίνιο και ίνες άνθρακα συμβάλλουν στην καλύτερη απορρόφηση από τους κραδασμούς, σε σχέση με ένα απλό συμβατικό seat stays.

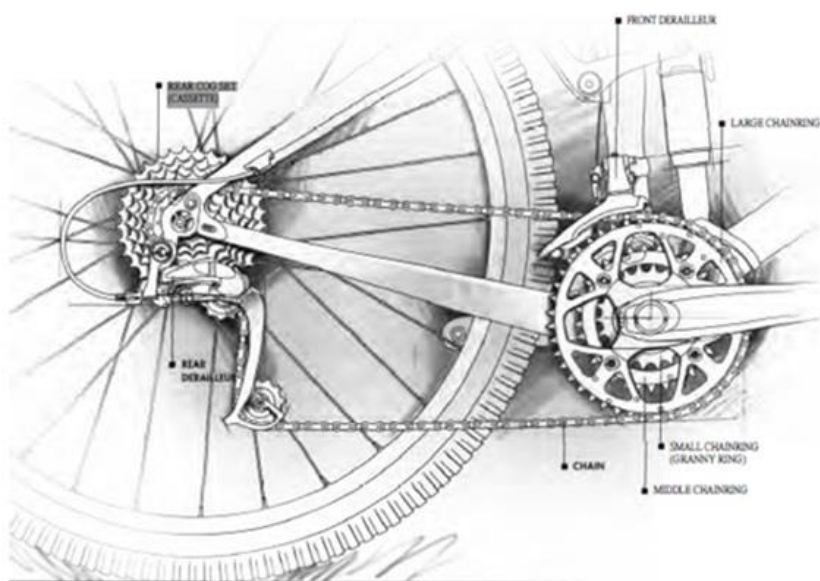


Εικόνα 1.4 : Παράδειγμα σκελετού με dual-seat stays.

1.3.6 Μεσαία Τριβή (Bottom bracket shell)

Η μεσαία τριβή είναι ένας κυλινδρικός σωλήνας, ο οποίος τοποθετείται κάθετα με τον σωλήνα θέσης, τα chainstays και τον κάτω σωλήνα. Αυτά είναι διαμορφωμένα κατάλληλα, ώστε να καταλήγουν στη μεσαία τριβή. Το πλάτος του κελύφους της μεσαίας τριβής είναι 68,70 ή 73mm και σε μερικά σύγχρονα ποδήλατα βουνού και χιονιού το πλάτος του κελύφους είναι 83 και 100mm.

Το πλάτος του κελύφους επηρεάζει το πλέγμα του ποδηλάτου και την πλειοψηφία των ασκούμενων δυνάμεων, όπως την αναρροφούμενη από το ποδήλατο ενέργειά του κατά την οδήγηση ή και στάση του ποδηλάτου.



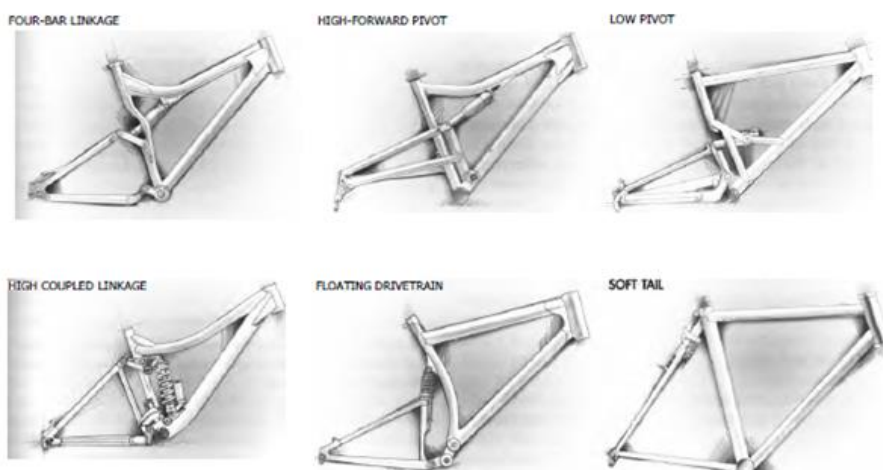
Εικόνα 1.5: Σύστημα κίνησης ποδηλάτου με ταχύτητες

1.4 Γεωμετρία ποδηλάτου (σκελετός πλαισίου)

Το μήκος των σωλήνων και οι γωνίες, με τις οποίες συνδέονται, καθορίζουν την γεωμετρία του σκελετού ποδηλάτου. Κατά την σύγκριση διαφορετικών γεωμετρικών πλαισίων, οι κατασκευαστές συγκρίνουν την γωνία του σωλήνα θέσης, του άνω σωλήνα και το μήκος του σωλήνα θέσης. Για να ολοκληρωθεί η προδιαγραφή ενός ποδηλάτου προς χρήση, ο ποδηλάτης ρυθμίζει την θέση του πεντάλ, της σέλας και του τιμονιού:

- ύψος της σέλας: η απόσταση από το κέντρο της μεσαίας τριβής μέχρι το μεσαίο σημείο της σέλας.
- reach: η απόσταση από τη μεσαία τριβή μέχρι το τιμόνι.
- drop: η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής της σέλας και του τιμονιού.
- Setback: η οριζόντια απόσταση μεταξύ του εμπρόσθιου μέρους της σέλας και του κέντρου της μεσαίας τριβής.
- ύψος standover: το μέσο ύψος που βρίσκεται ο άνω σωλήνας πάνω από το έδαφος.
- toe overlap: η απόσταση των ποδιών από την διεύθυνση του εμπρόσθιου τροχού.

Η γεωμετρία του σκελετού εξαρτάται από την προοριζόμενη χρήση και επιπλέον καθορίζει τα χαρακτηριστικά χειρισμού του ποδηλάτου.



Εικόνα 1.6 Διάφοροι ονομαστικοί τύποι σκελετού ποδηλάτου με σύστημα απορρόφησης κραδασμών.

1.4.1 Μέγεθος σκελετών ποδηλάτου

Το μέγεθος του πλαισίου μετράται από το κέντρο του άνω σωλήνα έως το κέντρο της μεσαίας τριβής. Τα μεγέθη είναι μεταξύ των 54 ή 56 εκατοστών σε ένα αγωνιστικό ποδήλατο, ή 46 cm για ένα ποδήλατο βουνού. Τα τυπικά πλαίσια τείνουν να είναι μακρύτερα σε σχέση με τα αγωνιστικά ποδήλατα, που είναι πιο συμπαγή.

1.5 Σύγχρονοι τύποι ποδηλάτου

Σήμερα συναντώνται πολλοί τύποι ποδηλάτων στο εμπόριο. Κάθε σκελετός ποδηλάτου έχει μια συγκεκριμένη γεωμετρία και τεχνολογία που τον κάνει ξεχωριστό. Παρακάτω αναλύονται κάποιοι από τους πιο διαδεδομένους τύπους ποδηλάτου, όπως τα ποδήλατα δρόμου και τριάθλου, Roadster, ποδήλατα βουνού, ή σπαστά ποδήλατα.

1.5.1 Ποδήλατα δρόμου και τριάθλου (αγωνιστικά ποδήλατα)

Τα αγωνιστικά ποδήλατα έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να υπάρχει αποτελεσματική μεταφορά ισχύος, με ελάχιστο βάρος και ελάχιστη έλξη. Αυτό επιτυγχάνεται με πλαίσιο συμπαγούς γεωμετρίας, που έχει χαμηλό κέντρο βάρους, μικρότερο οπίσθιο τρίγωνο και μικρότερο μεταξόνιο, επιτρέποντας ταχύτερο χειρισμό. Επιπλέον, η κορυφή του κούτελου είναι πάνω από την κορυφή του σωλήνα σελάς. Το ύψος Stan dover μειώνεται και αυξάνεται με αυτόν τον τρόπο το clearance του. Το Stan dover θα αποκτήσει το κέντρο βάρους του.

Στον σκελετό συμπαγούς πλαισίου, τα οδικά πλεονεκτήματα υστερούν σε σχέση με την άνεση που θα είχε ο αναβάτης απλού ποδηλάτου.

Και αυτό γιατί στον συμπαγή πλαίσιο, η απότομη γωνία στον σωλήνα σελάς, μετρούμενη σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, μπορεί να διαθέτει καλή αεροδυναμική αλλά υστερεί κατά πολύ στο θέμα της άνεσης του ποδηλάτη.

Τα οδικά και άνετα ποδήλατα τείνουν να έχουν πιο μικρή γωνία για τον σωλήνα σελάς. Με την υιοθέτηση μικρότερης γωνίας οι κατασκευαστές υποχρεώνονται να μεγαλώσουν τα chain stays, επιταχύνοντας το κέντρο βάρους

του σκελετού ποδηλάτου. Τα αγωνιστικά ποδήλατα δρόμου πρέπει να είναι σχεδιασμένα και κατασκευασμένα σχετικά με τους κανονισμούς U.C.I . Σχεδιασμοί χωρίς δυο τρίγωνα , είτε με έλλειψη άνω σωλήνα, δεν επιτρέπονται .

Με το τρόπο αυτόν κάθε αγωνιστικό ποδήλατο θα πρέπει να τηρεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές.



Εικόνα 1.7 :Ποδήλατο τρίαθλου.

Ακόμα πιο αεροδυναμική θέση έχουν τα ποδήλατα τρίαθλου, με τον αναβάτη να βρίσκεται προς τα εμπρός γύρω από τον άξονα της μεσαίας τριβής.

Στα συγκεκριμένα πλαίσια υπάρχουν απότομες γωνίες για τον σωλήνα σέλας και χαμηλό κούτελο, κοντύτερο μεταξόνιο, επιταχύνοντας την σωστή θέση από την σέλα μέχρι το τιμόνι.

1.5.2 Ποδήλατα Roadster

Τα ποδήλατα αυτά έχουν συνήθως μία αρκετά ομαλή γωνία σέλας και μία γωνία κούτελου της τάξης των 66 ή 67 μοιρών, σχεδιασμός που προσφέρει μεγάλη άνεση στον αναβάτη τοποθετώντας τον στην σωστή θέση ανάβασης. Τα επιπλέον χαρακτηριστικά τους είναι το μακρύ μεταξόνιο, που είναι συνήθως παραπάνω από 40 ίντσες (συνήθως μεταξύ 43 και 47 ιντσών), καθώς και το μεγάλο fork rake (απόσταση άξονα εμπρόσθιου πιρουνιού με κέντρο τροχού-περίπου 76 χιλιοστά σε σύγκριση με τα υπόλοιπα που έχουν 40 χιλιοστά). Αυτή η παραλλαγή σκελετού απέκτησε δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια και οφείλεται στο ότι τα ποδήλατα αυτά προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση, σε σύγκριση με τα ποδήλατα βουνού ή σε σχέση με τα οδικά.

Μια παραλλαγή αυτού του ποδηλάτου είναι το "αθλητικό roadster"

(επίσης γνωστό και ως "ελαφρύ roadster»), το οποίο διαθέτει ελαφρύτερο πλαίσιο, ελαφριά κλίση του σωλήνα σέλας ενώ η γωνία του κούτελου είναι περίπου 70 με 72 μοίρες.



Εικόνα 1.8: Ποδήλατο Roadster Capriolo

1.5.3 Ποδήλατα βουνού

Στα ποδήλατα βουνού χρησιμοποιούνται συχνά αμορτισέρ για την βελτίωση της οδηγητικής άνεσης και για καλύτερο χειρισμό. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές, συμπεριλαμβανομένων των μοντέλων πλήρους ανάρτησης, τα οποία προσφέρουν απορρόφηση των κραδασμών, τόσο για τους εμπρόσθιους όσο και για τους οπίσθιους τροχούς. Επιπλέον, μοντέλα εμπρόσθιας ανάρτησης φροντίζουν για την αντικραδασμικότητα μόνο της εμπρόσθιας ρόδας.

Η ανάπτυξη εξελιγμένων συστημάτων ανάρτησης κατά την δεκαετία του 1990 γρήγορα οδήγησε σε πολλές τροποποιήσεις για το κλασικό πλαίσιο-διαμάντι. Τα σύγχρονα ποδήλατα βουνού που διαθέτουν συστήματα οπίσθιας ανάρτησης έχουν μηχανισμό για την ενεργοποίηση των οπίσθιων αμορτισέρ. Για το ζήτημα της πλήρους ανάρτησης, υπάρχουν πολλές παραλλαγές που προσφέρουν οι κατασκευαστές για διάφορους οδηγητικούς σκοπούς.



Εικόνα 1.9 : Ποδήλατο βουνού

1.5.4 Ποδήλατο BMX

Είναι ποδήλατο με μικρές διαστάσεις για να έχει πολύ καλύτερο έλεγχο ο χειριστής του. Είναι ιδιαίτερα στιβαρό, με μεγάλη αντοχή και συνήθως έχουν χαμηλά τη σέλλα, ψηλά το τιμόνι και βάσεις για τα πόδια στους άξονες των πίσω και εμπρός τροχών, ανάλογα με την χρήση.

Όταν ένα ποδήλατο προορίζεται για άλματα είναι πιο ελαφρύ, απ' ό,τι κάποιο άλλο που προορίζεται για χρήση στο δρόμο, ωστόσο το βάρος ξεκινά από 7 κιλά και μπορεί να φτάσει μέχρι τα 13. Προτιμάται από ποδηλάτες μικρότερων ηλικιών αφού είναι ένα ποδήλατο που ελέγχεται πολύ πιο εύκολα σε σχέση με τα υπόλοιπα και αρκετά πιο ευέλικτο.



Εικόνα 1.10 : ποδήλατο Mongoose Subject BMX

1.5.5 Σπαστό ποδήλατο (folding-bikes)

Σπαστά - αναδιπλούμενα ποδήλατα με τροχό 16, 20 ή 26 ιντσών για χρήση στην πόλη ή στο βουνό. Τα σπαστά ποδήλατα είναι ιδανικά για μεταφορά στην πόλη μέσα στο τρένο ή το λεωφορείο, αλλά και για εκδρομές, στο τροχόσπιτο, το σκάφος ή το αυτοκίνητο.



Εικόνα 1.11 : Σπαστο ποδηλατο Bromton

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σύνθετα υλικά και διαδικασίες επιλογής τους

2.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

Για ένα σύστημα ο όρος “σύνθετο” σημαίνει ότι αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material). Σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (> 10 %).

Σύμφωνα με τον Agarwal (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.

Το ένα από τα συστατικά μέρη χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.



Σχήμα 2.1 Τρίπολο εξελίξεις υλικών

2.1.1 Ιστορική εξέλιξη σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από την αρχαιότητα. Υλικά που εύκολα συναντώνται στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μείγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland.

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγούμενη ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων.

Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές.

Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα

χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια. Για παράδειγμα, η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο).

Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές και έχουν μεταβάλει σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης.

Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Μερικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, είναι : τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλύτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής.

2.1.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα υλικά κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- **Ινώδη σύνθετα (fibrous composites):** Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- **Στρωματικά σύνθετα (laminated composites):** Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- **Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites):** Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

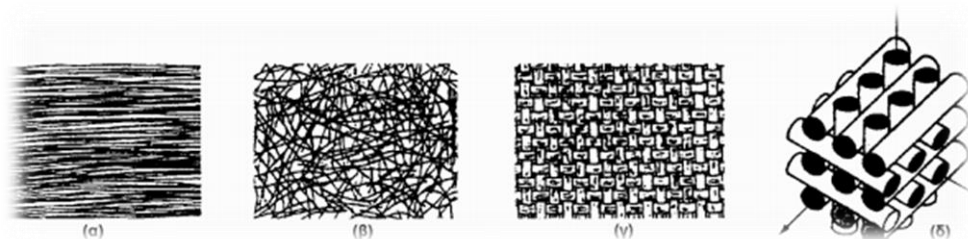
- **Μονοδιευθυντικά** σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- **Πολυδιευθυντικά** σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπο-ομάδες, σχήμα 2.2 :

- **Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.**
- **Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.**
- **Σύνθετα με ίνες σε τρισορθογώνια ύφανση.**

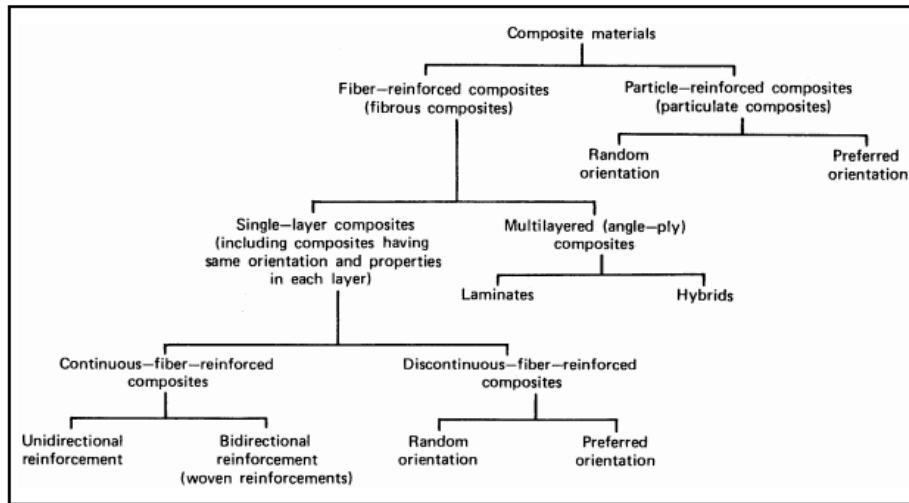
Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (A/d) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

- **Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers)**, όταν είναι $A/d \geq 100$.
- **Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers)**, όταν είναι $A/d < 100$.
- **Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers):** Με $d < 1$ μμ και $A \cong 100$ μμ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).



Σχήμα 2.2 : Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισορθογώνια πλέξη.

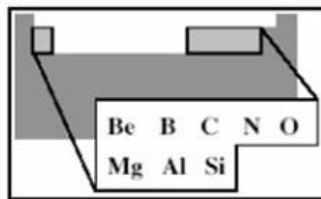
Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3



Σχήμα 2.3: Γενική ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

2.2 Ίνες

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία (*stiffness*), χαμηλή δυσθραυστότητα (*toughness*) και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα (ρ). Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2 η και 3 η περίοδο του περιοδικού συστήματος (Σχ. 2.4)

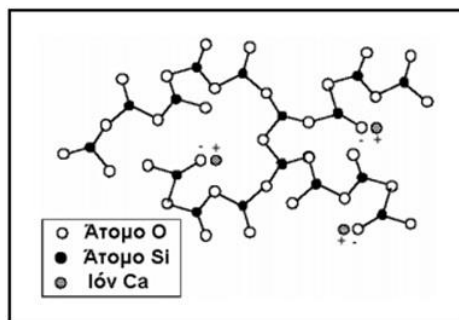


Σχ. 2.4

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

2.2.1 Ίνες γυαλιού

Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα πρώτης γενιάς (1940) και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς 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 Σχ. 2.5.



Σχήμα 2.5: 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 1.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO ₂ καθαρή
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

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.

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

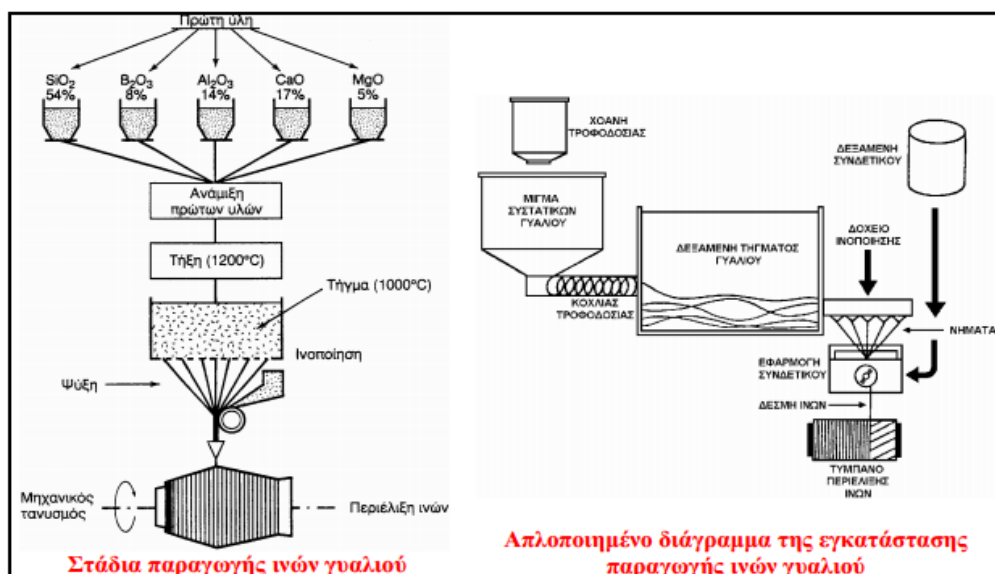
αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

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. Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO₂ (>99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία.

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 παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας μεδιάτρητο πυθμένα (Σχ.2. 6) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:



Σχήμα 2.6: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού

- Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου τήκεται.
- Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm).
- Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.
- Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο ($1 \div 15 \mu\text{m}$) και ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη).
- Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από μάντα 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.
- 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).
- Οι ρόλοι υαλονήματος υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.

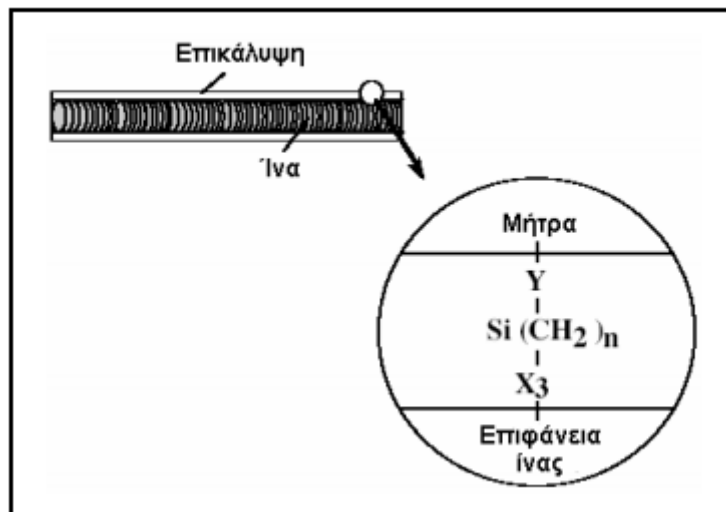
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

- 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 ίνας και ρητίνης εμποτισμού. Τα προσωρινά πρόσθετα απομακρύνονται εύκολα με θέρμανση των ινών σε κλιματιζόμενο περιβάλλον σε θερμοκρασία $\geq 340^\circ\text{C}$ 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 $n=0\div 3$, η δράση των οποίων περιγράφεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7

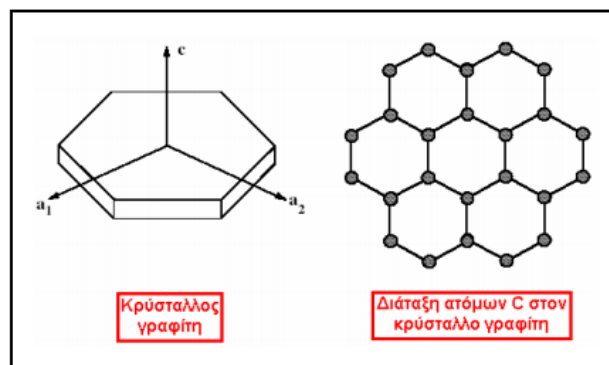
- Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού προσδιορίζεται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Λόγω αυτής της δομής τα υαλοήματα είναι ισότροπα υλικά και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η συμμετοχή και των μεταλλικών οξειδίων στη σύνθεση των ινών μπορεί να επιφέρει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

2.2.2 Ίνες άνθρακα

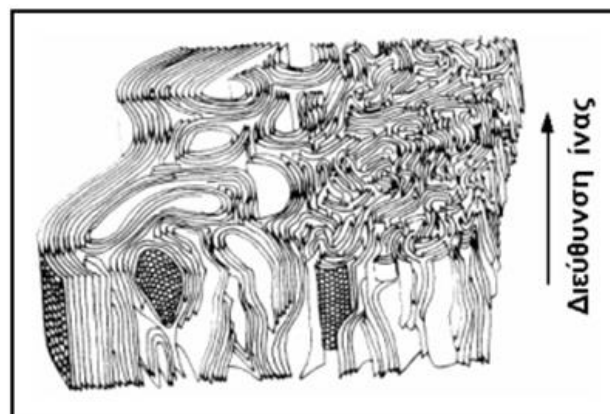
Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες 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 γραφιτική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων, σχήμα 2.8. 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 σχήμα 2.9



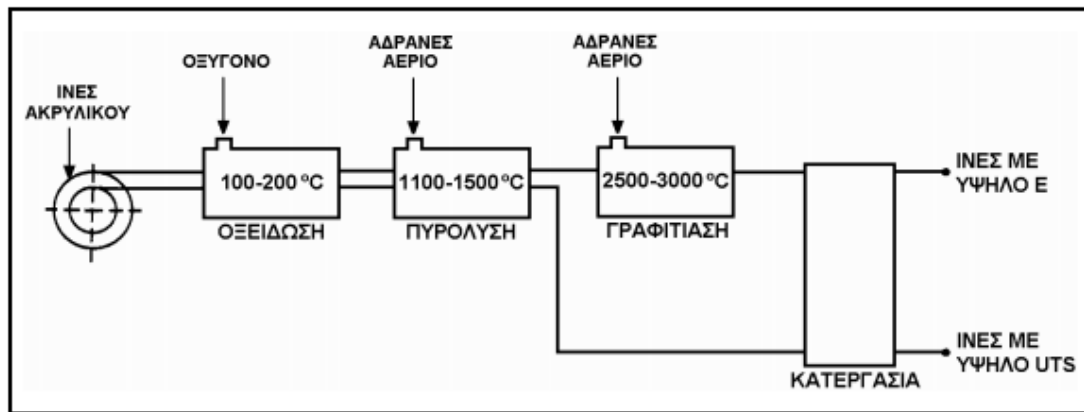
Σχήμα 2.8



Σχήμα 2.9

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. 2.10) :



Σχήμα 2.10: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα

- Οξείδωση 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 γραφίτιωση, 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 πίνακα 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξείδωση και πυρόλυση) και σε τρία στάδια (οξείδωση, πυρόλυση, θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία), αντίστοιχα.

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

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα

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 διεύθυνσης 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.

2.2.3 Ινες πολυμερους

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς 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 αντοχή τους δεν ξεπερνά τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa. Παρόλο που από μηχανικής άποψης δεν κατατάσσονται στις ίνες υψηλής απόδοσης, εντούτοις το χαμηλό κόστος παραγωγής τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

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

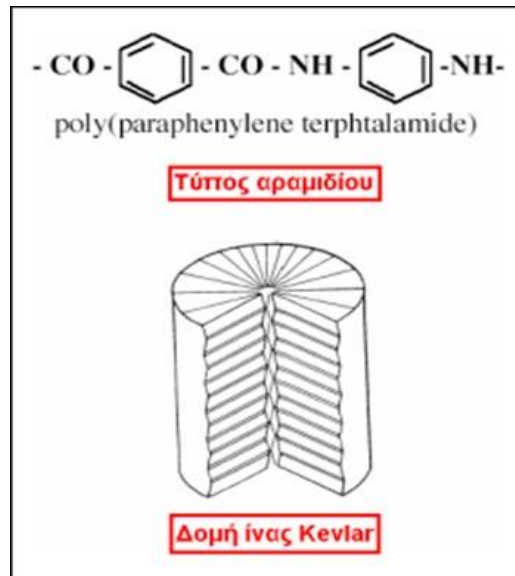
Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm³), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στον Πίν. 3 παρατίθενται οι βασικές ιδιότητες των ινών Kevlar.

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

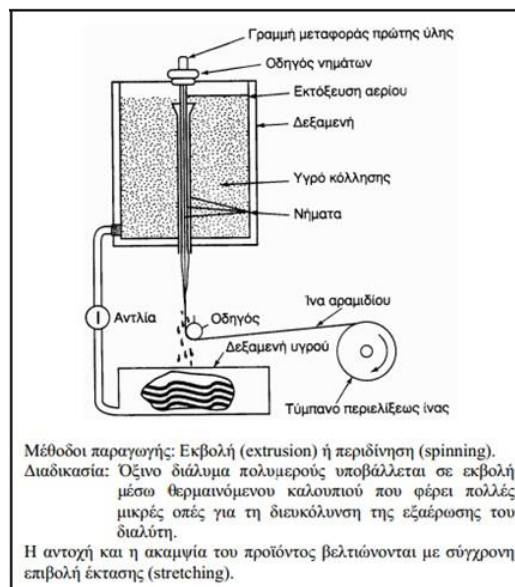
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar

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. Σχ. 2.11. 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 2.11



Σχήμα 12: Διάταξη παραγωγής ινών πολυαμιδίου

Στο σχήμα 2.12 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής ενισχυτικών ινών πολυαμιδίου

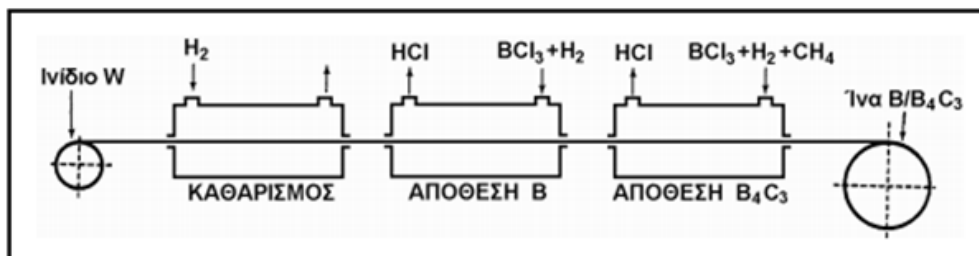
2.2.4 Μεταλλικές ίνες

Διάφορα μέταλλα όπως το βόριο (B), το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W) θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Το βόριο είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό για την κατασκευή ινών ενίσχυσης, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές.

Σήμερα χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου:

Αναγωγή από αλογονίδιο του βορίου.

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως BCl_3) ανάγεται από υδρογόνο σε έναν κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας (1100°C) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου 10-15 μm , όπως φαίνεται στο Σχ. 2.13. Η διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ 100÷200 μm , ενώ οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.



Σχήμα 2.13: Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου

Απόθεση με τεχνική 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 ($E = 300\div 420\text{ GPa}$, $\text{UTS} = 3000\div 3700\text{ MPa}$), 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.

2.2.5 Κεραμικές ίνες

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας (Al₂O₃), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si₃N₄, BeO, B₄C και ZrO₂.

Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή φυλλιδίων. Οι ίνες SiC παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα φυλλίδια.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

(α) Με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα.

Οι παραγόμενες ίνες έχουν πυρήνα διαμέτρου 10÷25 μm και εξωτερική διάμετρο 100÷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 $\sim 0.1 \div 1 \mu\text{m}$ και μήκος $\sim 50 \mu\text{m}$. Συγκριτικός πίνακας των ιδιοτήτων των ινών που παράγονται από κάθε μέθοδο παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω (Πίν. 4). Γενικά, οι μέθοδοι παρασκευής κεραμικών ινών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

Μέθοδος	CVD	Nicalon	Τριχίτες
Ιδιότητα			
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

Πίνακας 4: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές)

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 (Al_2O_3) διαμέτρου $250 \mu\text{m}$ 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.

2.2.6 Τριχίτες

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 $1 \mu\text{m}$, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου 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 5 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών και τριχιτών από SiC και Al_2O_3 .

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC _{ΙΝΑ}	SiC _{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}	Al ₂ O ₃ _{ΙΝΑ}	Al ₂ O ₃ _{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

Πίνακας 5 : Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιτών από SiC και Al₂O₃

2.2.7 Ίνες φυσικών ορυκτών

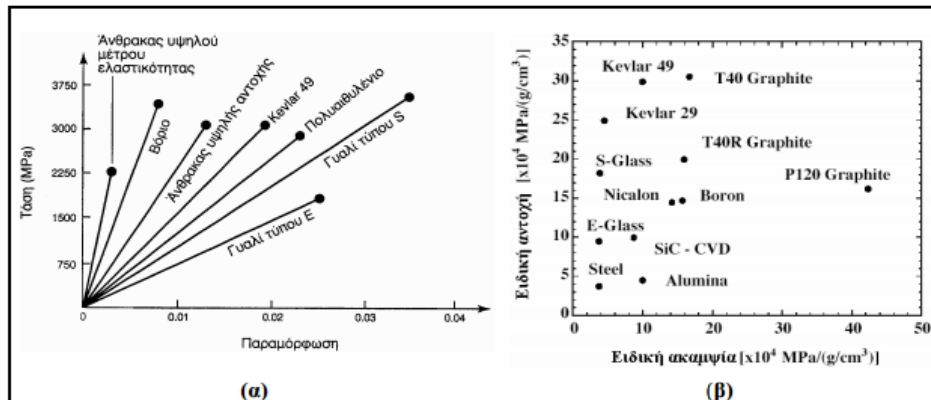
Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθηνό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμίαντος και η μαρμαρυγία (mica).

Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου ~20 nm, και έχουν διάμετρο ~10μm 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 αμίαντος 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

2.2.8 Σύγκριση ενισχυτικών ινών

(α) Ως προς την ειδική αντοχή και ειδική ακαμψία (σχ. 2.14)



Σχήμα 2.14: (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες σ - ϵ , (β) Συσχετισμός ειδική αντοχής και ειδικής ακαμψίας για διάφορα υλικά ενισχυτικών ινών.

(β) Ως προς τη θερμική ευστάθεια (πίν. 6)

Ίνα	T_{max} (°C)
Spectra	150
Kevlar	250
Glass	800
SiC	1000
Alumina	1370
Carbon	2000*

* Παρουσία οξυγόνου: $T_{max}=500$ °C

Πίνακας 6: Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών

(γ) Ως προς την παραμόρφωση θραύσης (πίν. 7)

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

Πίνακας 7: Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών

2.3 Μήτρα

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 σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών

Τα αντίστοιχα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται με τις ακόλουθες συντμήσεις:

PMC: Polymer Matrix Composite

MMC: Metal Matrix Composite

CMC: Ceramic Matrix Composite

2.3.1 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 λύονται 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 πολυστερενίου (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

2.3.2 Μεταλλικές μήτρες

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 μήτρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μήτρων 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 πίνακα 8.

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.

Πίνακας 8: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των οργανικών μητρών).

2.3.3 Κεραμικές μήτρες

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

αφέτερου 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.

2.4 Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινωδών 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.

2.4.1 Γεωμετρία ινών

Βασική παράμετρος είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας (s) (aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους (A) 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

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i}$$

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 c ($> 15 l_c$), η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής.

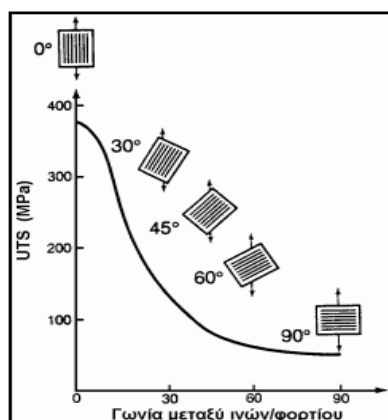
2.4.2 Ποσοστό ινών

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).

2.4.3 Προσανατολισμός των ινών

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 2.16 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 16: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό συνθέτου υλικού εποξυδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού.

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.

2.4.4 Συνάφεια ινών-μήτρας

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.

2.4.5 Τελική επιλογή υλικών

Στους πίν. 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.

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

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών οργανικής

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

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών μεταλλικής 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.

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών κεραμικής μήτρας

2.5 Μέθοδοι 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 (Σχ.2.17)

- Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)
- Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag)
- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)

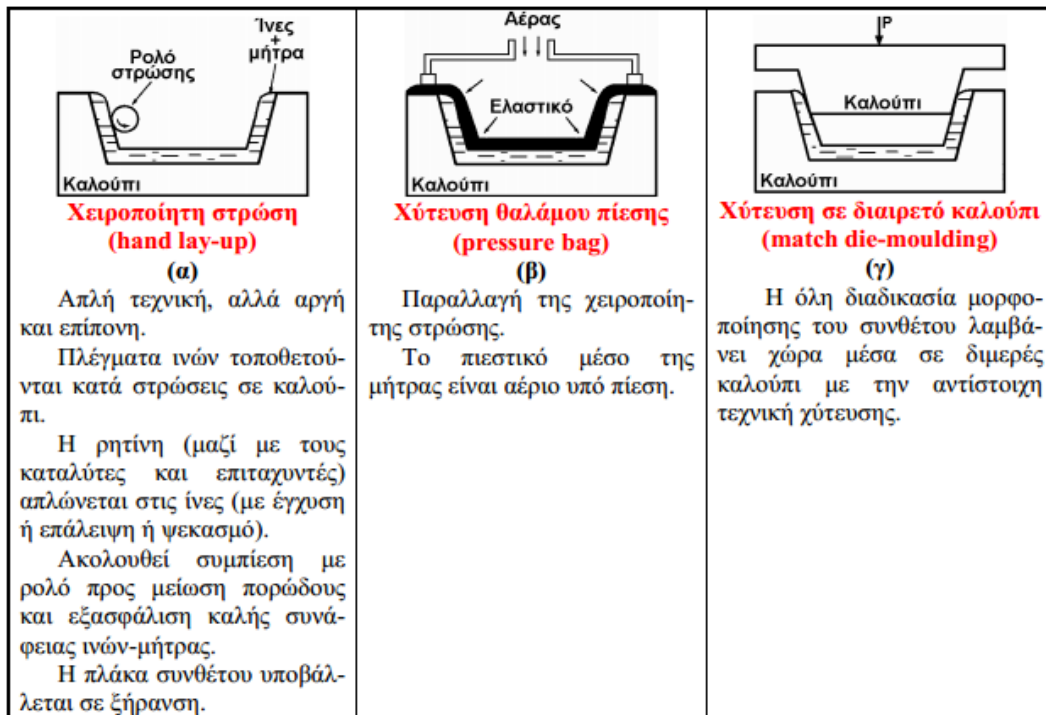
A2. Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου (Σχ. 2.18-2.20)

- Περιέλιξη νήματος (filament winding)
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)

B. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας (Σχ. 2.21-2.23)

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

Γ. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας

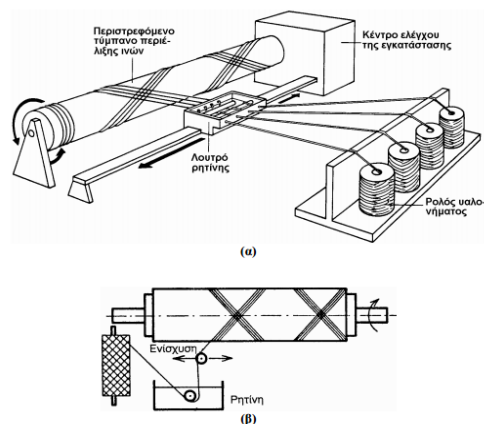


Σχήμα 2.17: Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι.

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.

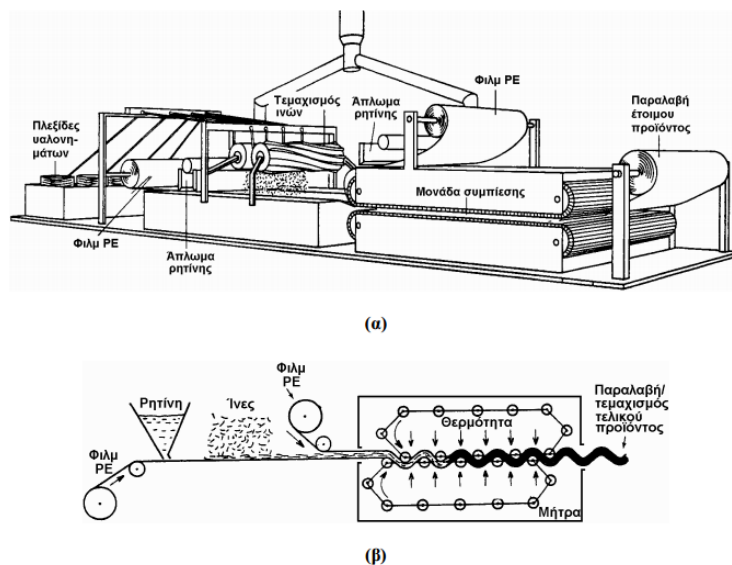
Οι συνεχείς (μεγάλους μήκους) ίνες είτε ευθυγραμμίζονται σε μία διεύθυνση σε μορφή ταινίας είτε διατάσσονται σε πλεγμένα στρώματα (υαλοϋφασμα).



Σχήμα 2.18: Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου με περιέλιξη νήματος (filament winding) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως στην παραγωγή κοίλων κυλίνδρων, υψηλών προδιαγραφών. Οι ίνες εμβαπτίζονται αρχικά σε λουτρό ρητίνης και στη συνέχεια περιτυλίσσονται σε καλούπι επιθυμητού σχήματος. Ο εμποτισμός της στρώσης σε ρητίνη μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα ή να ακολουθεί. Το προϊόν που προκύπτει ξηραίνεται στον αέρα ή σε κλίβανο. Ο ισχυρός προσανατολισμός των ινών δίνει κελύφη με υψηλή μηχανική αντοχή.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ: Κατασκευή δεξαμενών καυσίμου και χημικών, αγωγών υψηλών πιέσεων, κλπ

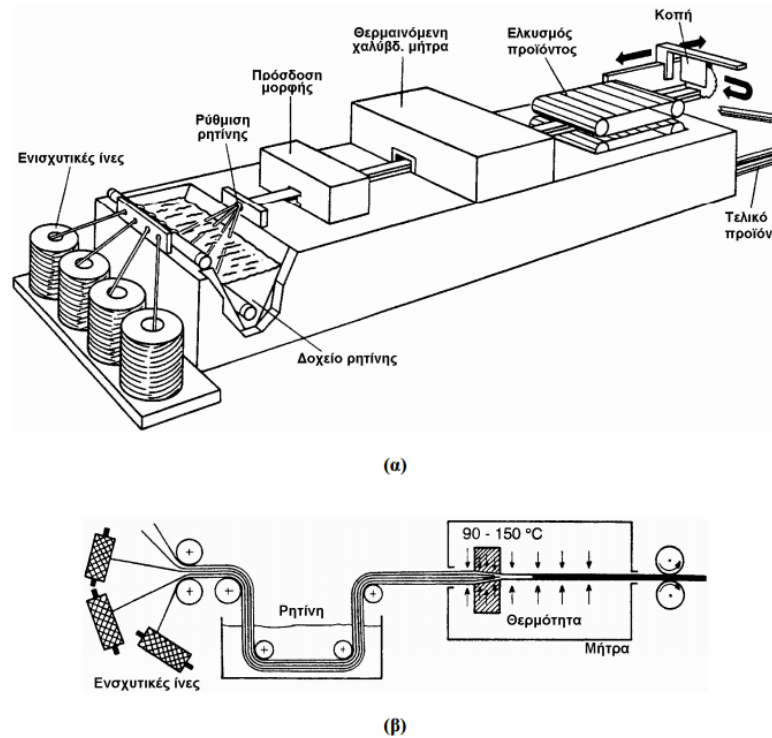


Σχήμα 2.19: Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)

(α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.

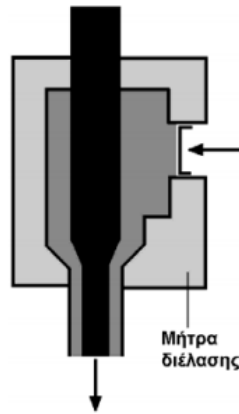
Πρόκειται για σχετικά νέα τεχνική, με ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Συνεχείς ίνες γυαλιού τεμαχίζονται σε ίνες μικρού μήκους (5 cm) και αποτίθενται απευθείας σε στρώμα ρητίνης που κινείται σε λεπτό φιλμ πολυαιθυλενίου (PE). Δεύτερο στρώμα ρητίνης αποτίθεται με όμοιο τρόπο πάνω στο πρώτο, δημιουργώντας έτσι ένα sandwich υλικό με πυρήνα τις ενισχυτικές ίνες. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει τυλίσσεται σε ρολούς και αφήνεται να στερεοποιηθεί επί 1÷4 ημέρες, οπότε και επιτυγχάνεται καλή συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας. Μετά το πέρας της διαμόρφωσης, η πλάκα συνθέτου κόβεται σε επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό μεταλλικό καλούπι, σε θερμοκρασία ~150° C, όπου εφαρμόζεται υδραυλική πίεση και το αρχικό έλασμα μορφοποιείται σε τελικό προϊόν.

Τα προϊόντα της μεθόδου έχουν μεγάλες διαστάσεις και υψηλή ομοιογένεια.



Σχήμα 2.20: Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.

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 ιών και του ισχυρού προσανατολισμού τους παράλληλα προς τον επιμήκη άξονα του προϊόντος, παρατηρείται υψηλή μηχανική αντοχή κατά τη διεύθυνση αυτή.

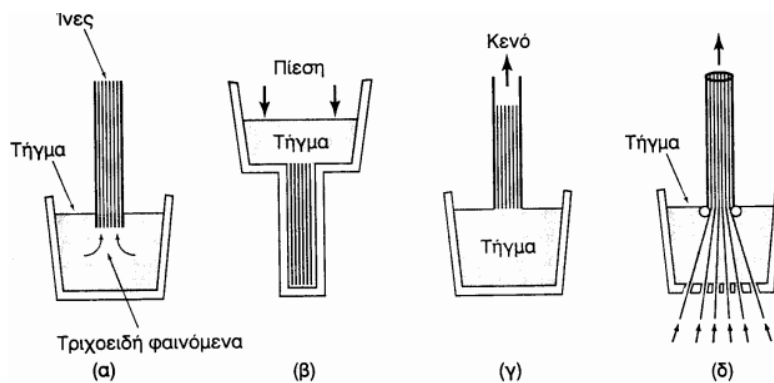


Σχήμα 2.21: Συνδιέλαση (co-extrusion)

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 καλύτερη στιβαρότητα και χαμηλότερη πυκνότητα συνθέτου.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

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

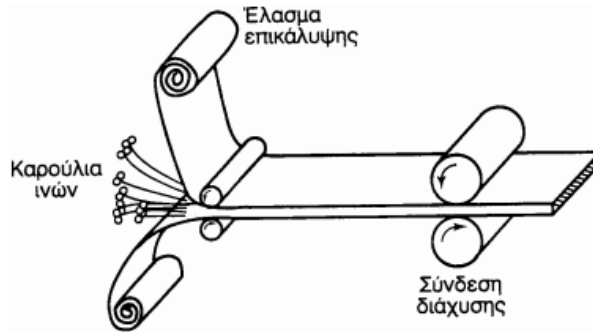


Σχήμα 2.22: Μορφοποίηση με: (α) χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων, (β)πίεση βαρύτητας, (γ) εφαρμογή κενού και (δ) συνεχή χύτευση.

Η μήτρα εισάγεται ως τήγμα σε κατάλληλα διευθετημένο σύστημα ενίσχυσης. Η διαβροχή των ινών από το τήγμα επιτυγχάνεται με μηχανισμό τριχοειδών αγγείων (capillary rise) ή με πίεση λόγω βαρύτητας (pressure

casting) ή με αναρρόφηση λόγω κενού (vacuum infiltration) ή με συνεχή χύτευση (continuous casting). Η τεχνική δεν εφαρμόζεται όταν η μήτρα-τήγμα αντιδρά με τις ίνες στη θερμοκρασία χύτευσης.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ: Ενίσχυση μήτρας Al ή Ag με τριχίτες ζαφειριού, ενίσχυση μήτρας Al με ίνες C.



Σχήμα 2.23: Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση.

Συνεχείς ίνες, υπό μορφή ταινιών, τοποθετούνται μεταξύ δύο μεταλλικών ελασμάτων και το σύστημα συμπιέζεται κατάλληλα (π.χ. με συν-έλαση), με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται συγκόλληση πίεσης και πολύ καλή πρόσφυση μεταξύ ινών και ελασμάτων. Προκύπτει sandwich σύνθετο υλικό. Η απόθεση υλικού μήτρας στις ενισχυτικές ίνες γίνεται με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) ή με ηλεκτραπόθεση.

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 (τρισδιάστατων) συνθέτων υλικών, έχουν εξελιχθεί πιο πολύπλοκες διαδικασίες, ελεγχόμενες με υπολογιστή. Αφού το τρισδιάστατο πλέγμα ινών στηθεί, το υλικό της μήτρας διαχέεται με πίεση εντός της διάταξης, όπου τελικά υφίσταται σκλήρυνση και παραδίδεται προς χρήση.

2.6 Μηχανικές ιδιότητες Υλικών

Ιστορικά, το πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των σωλήνων ενός σκελετού ποδηλάτου είναι το ατσάλι.

Τα ατσάλινα πλαίσια μπορούν να αποτελούνται από απλό φθινό ανθρακούχο χάλυβα έως εξαιρετικά εξειδικευμένα κράματα υψηλής απόδοσης.

Τα πλαίσια μπορούν επίσης να κατασκευάζονται από κράματα αλουμινίου, τιτανίου, από ανθρακονήματα, ακόμη και από μπαμπού. Μερικές μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού βοηθούν να αποφασιστεί κατά πόσον είναι κατάλληλο το υλικό για την κατασκευή ενός πλαισίου ποδηλάτου, και επιπλέον βοηθούν στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων που είναι ικανοποιητικές για τον σκελετό, δίνοντας έτσι προδιαγραφές για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο της μηχανικής των υλικών. Οι ιδιότητες αυτές αναλύονται παρακάτω διεξοδικά.

2.6.1 Πυκνότητα ή ειδική βαρύτητα

Είναι ένα μέτρο του κατά πόσο βαρύ ή ελαφρύ είναι το υλικό ανά μονάδα όγκου. Ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας (μίας περιοχής) ανά τον όγκο αυτής (της περιοχής). Μπορεί να βρεθεί και από την παρακάτω εξίσωση :

$$m = \int_V \rho(r) dV$$

2.6.2 Μέτρο ελαστικότητας

Κάθε υλικό σώμα με την άσκηση τάσης, δηλαδή δύναμης ανά μονάδα διατομής, παραμορφώνεται. Για μικρές τάσεις η παραμόρφωση είναι ανάλογη της τάσης που εφαρμόζεται. Ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση σε κάθε σώμα είναι σταθερός και ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας.

Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από το υλικό που παραμορφώνεται και την φύση της παραμόρφωσης. Η γραμμική παραμόρφωση που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας Young, η παραμόρφωση σχήματος που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας σχήματος και η παραμόρφωση όγκου που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας όγκου. Ορίζεται ως ο λόγος:

$$\lambda = \frac{\text{stress}}{\text{strain}}$$

Όπου λ είναι το μέτρο ελαστικότητας, stress (τάση) είναι η δύναμη επαναφοράς που προκαλείται εξαιτίας της παραμόρφωσης διαιρούμενη με την περιοχή στην οποία εφαρμόζεται η δύναμη, ενώ παραμόρφωση ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής που προκαλείται από την τάση σε σχέση με την αρχική κατάσταση του αντικειμένου. Το μέτρο ελαστικότητας μετράται σε μονάδες Pascal είτε σε μονάδες psi .

Στην κατασκευή σκελετών ποδηλάτων, το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να επηρεάσει την άνεση στην οδήγηση και την αποτελεσματική μετάδοση της ισχύος. Πρακτικά και επειδή ο σκελετός ποδηλάτου έχει μεγαλύτερη ακαμψία από τα λάστιχα και την σέλα, η άνεση εντέλει της οδήγησης επηρεάζεται περισσότερο από την επιλογή της σέλλας, της γεωμετρίας του σκελετού, την επιλογή των λάστιχων και άλλων παραγόντων. Η πλευρική ακαμψία είναι πολύ πιο δύσκολο να καθοριστεί λόγω του περιορισμένου προφίλ του σκελετού ποδηλάτου , ενώ η μεγάλη ευελιξία μπορεί να επηρεάσει τη μετάδοση της ισχύος, μέσω της τριβής των ελαστικών στο δρόμο που οφείλονται στην στρέβλωση του οπίσθιου τριγώνου, στην τριβή των φρένων με τις ζάντες και τέλος με την τριβή της αλυσίδας με τον δίσκο ταχυτήτων ενός ποδηλάτου .

2.6.3 Μέτρο ελαστικότητας Young

Το μέτρο ελαστικότητας Young, εκφράζει την παραμόρφωση ενός μονοδιάστατου σώματος, πρακτικά ενός σώματος με μεγάλο μήκος και μικρή διατομή, όπως μία μακριά ράβδος. Το μέτρο ελαστικότητας Young ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει κατά μήκος προς την μεταβολή του μήκους του, δηλαδή:

$$Y = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0}$$

Συνήθως το μέτρο ελαστικότητας Young συγγέεται με το μέτρο ελαστικότητας ωστόσο είναι δύο διαφορετικά μεγέθη.

2.6.4 Μέτρο διάτμησης

Το μέτρο διάτμησης χαρακτηρίζει τα τρισδιάστατα υλικά σώματα στα οποία παραμορφώνεται το σχήμα τους χωρίς να μεταβάλλεται ο όγκος του. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται και παραμορφώνει το σώμα προς την διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή την μεταβολή του μήκους της μίας του πλευράς στην οποία ασκείται η τάση προς το μήκος της πλευράς στην οποία δεν εφαρμόζεται τάση. Περιγράφεται από την μαθηματική σχέση:

$$S = \frac{F/A_0}{\Delta x/h}$$

2.6.5 Μέτρο ελαστικότητας όγκου

Το μέτρο ελαστικότητας όγκου χαρακτηρίζει τα τρισδιάστατα υλικά σώματα στα οποία κατά την παραμόρφωσή τους μεταβάλλεται ο όγκος τους. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει, προς την μεταβολή του όγκου του σώματος. Δίνεται από την σχέση:

$$B = \frac{F/A_0}{\Delta V/V_0}$$

2.6.6 Όριο ελαστικότητας ή σημείο απόδοσης

Με αυτήν την ποσότητα ορίζουμε την τάση για την οποία ένα υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Πριν από αυτό το σημείο το υλικό θα συμπεριφέρεται ελαστικά και θα επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα όταν αφαιρείται η ασκούμενη τάση. Όταν αυτό το σημείο ξεπεραστεί ένας μέρος της παραμόρφωσης θα είναι μόνιμο και μη αναστρέψιμο. Στον τρισδιάστατο χώρο μιλάμε πλέον για έναν άπειρο αριθμό σημείων yield ή αλλιώς για μία επιφάνεια yield.

Το σημείο yield εξαρτάται τόσο από το ποσοστό παραμόρφωσης (strain rate) και επιπλέον ίσως ακόμα πιο κρίσιμα από την θερμοκρασία στην οποία γίνεται η παραμόρφωση. Μία εργασία των Alder και Philips το 1954 , απέδειξε ότι η τάση yield και το ποσοστό παραμόρφωσης μπορούν να υπολογισθούν από τον παρακάτω νόμο ενέργειας:

$$\sigma_y = C(\dot{\epsilon})^m$$

όπου το C είναι μία σταθερά και το m είναι η ευαισθησία του ποσοστού παραμόρφωσης. Ο τελευταίος παράγοντας αυξάνει μαζί με την θερμοκρασία ενώ τα υλικά που αποκτούν τιμές μεγαλύτερες του 0.5 τείνουν να έχουν υπερπλαστική συμπεριφορά.

2.6.7 Λόγος Poisson

Είναι ο λόγος, κατά την έκταση ενός αντικειμένου, της συρρίκνωσης ή εγκάρσιας τάσης (κάθετη προς το φορτίο), προς την επέκταση ή την αξονική τάση (στην ίδια κατεύθυνση με το εφαρμοζόμενο φορτίο). Όταν ένα υλικό συμπιέζεται προς μια κατεύθυνση, τείνει συνήθως να επεκταθεί στις άλλες δύο κατευθύνσεις κάθετα προς την κατεύθυνση της συμπίεσης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται Poisson. Ο Λόγος Poisson (NU) είναι το μέτρο του αποτελέσματος Poisson. Ο λόγος Poisson είναι ο λόγος του ποσοστού της επέκτασης διαιρούμενος με το ποσοστό συμπίεσης.

Αντίθετα, εάν το υλικό είναι τεντωμένο και όχι συμπιεσμένο, τότε ο λόγος αυτός θα είναι ο λόγος της συμπίεσης προς τον λόγο της επέκτασης. Ένα σταθερό, γραμμικά ελαστικό υλικό δεν μπορεί να έχει τιμή λόγου Poisson

μικρότερη από -1 ή μεγαλύτερη από 0.5, εξαιτίας της απαίτησης ότι οι ποσότητες Young's modulus, shear modulus και bulk modulus πρέπει να είναι θετικές.

2.6.8 Επιμήκυνση

Καθορίζει την επιτρεπόμενη παραμόρφωση για ένα υλικό μέχρι αυτό να σπάσει.

2.6.9 Κόπωση ή όριο αντοχής

Καθορίζει την αντοχή ενός σκελετού ποδηλάτου όταν υπόκειται σε κυκλική πίεση ή τάση από την ενέργεια του πεντάλινγκ ή των οδικών προσκρούσεων και δονήσεων.

2.7 Διαδικασία επιλογής υλικού

Η επιλογή του υλικού ενός σκελετού ποδηλάτου ή μίας δομικής μονάδας είναι μία από τις πιο σημαντικές αποφάσεις που καλείται να κάνει ο σχεδιαστής. Οι διαδικασίες της επιλογής της επιθυμητής γεωμετρίας και του υλικού δεν μπορούν εύκολα να διαχωριστούν, και συνήθως υλοποιούνται παράλληλα. Όλες οι μέθοδοι υπολογισμού τάσεων και παραμορφώσεων βασίζονται κυρίως στις υποθέσεις για τις ιδιότητες των υλικών, οπότε ο λανθασμένος υπολογισμός τους οδηγεί σε λανθασμένες εκτιμήσεις. Τέτοιες ιδιότητες είναι για παράδειγμα οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού και η μηχανική του αντοχή, η ποσοτικοποίηση των οποίων γίνεται με γενικά αποδεκτά και προτυποποιημένα πειράματα.

Η επιλογή ενός υλικού κατά τον σχεδιασμό των μηχανικών μερών, δεν εξαρτάται πάντα από αυτούς τους παράγοντες. Πολλά μηχανικά μέρη δεν αντιμετωπίζουν καν φορτία και είναι ανεξάρτητα (ορισμένα τμήματα μπορεί να έχουν ως αποκλειστικό προορισμό να γεμίσουν χώρο ή να διαδραματίσουν αισθητικό ρόλο) Τα μηχανικά μέρη συχνά πρέπει να είναι σχεδιασμένα για να έχουν αντοχή στη διάβρωση. Άλλες φορές οι επιδράσεις της θερμοκρασίας είναι πιο σημαντικές για την σχεδίαση από την τάση και την πίεση. Υπάρχουν πολλοί άλλοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στον σχεδιασμό. Για αυτό και ο σχεδιαστής οφείλει να έχει ένα ολοκληρωμένο υπόβαθρο γνώσης γύρω από

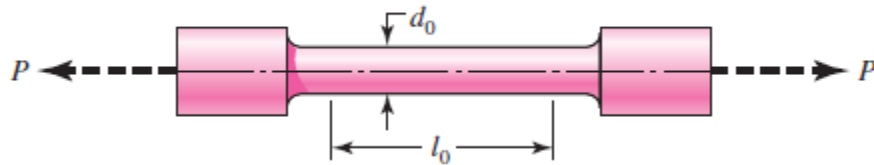
τις ιδιότητες των υλικών αλλά και τις μεθόδους τους.

Τα τυποποιημένα πειράματα εφελκυσμού υπολογίζουν μια ποικιλία χαρακτηριστικών του υλικού και της αντοχής του, τα οποία είναι χρήσιμα για τον σχεδιασμό. Στο σχήμα 3-1 απεικονίζεται ένα τυπικό δείγμα πειράματος εφελκυσμού με τις χαρακτηριστικές του διαστάσεις.

Το δείγμα τοποθετείται σε ένα μηχάνημα δοκιμών, το οποίο εφαρμόζει σταδιακά φόρτιση εφελκυσμού, και έπειτα μετράται το φορτίο που ασκείται και η παραμόρφωση. Το φορτίο μετατρέπεται σε τάση από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

Όπου $A_0 = 1/2\pi d_0^2$, όπου A_0 είναι το εμβαδό της διατομής του δείγματος

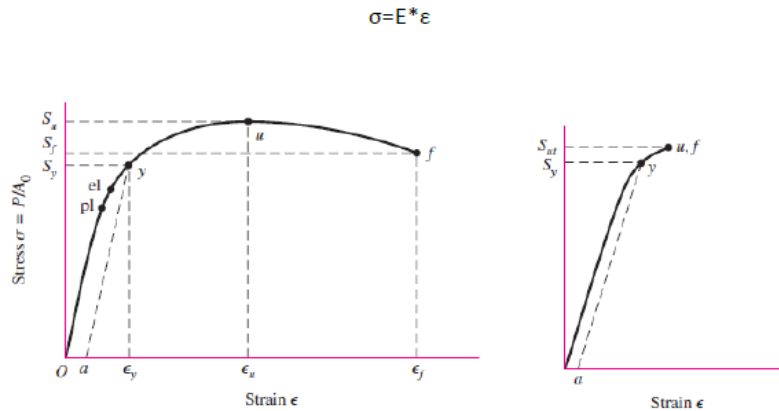


Σχήμα 2.23: Πείραμα εφελκυσμού για υπολογισμό τάσης και παραμόρφωσης.

Η παραμόρφωση, υπολογίζεται από το $l - l_0$ όπου l είναι το μήκος του δείγματος που αντιστοιχεί στο φορτίο P . Η ένταση (strain) υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Κατά την διάρκεια του πειράματος, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Το σχήμα 3-2 απεικονίζει τυπικά διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για όλκιμα και εύθραυστα υλικά. Τα όλκιμα υλικά παραμορφώνονται πολύ περισσότερο από τα εύθραυστα. Το σημείο p_1 στο σχήμα 3-2α ονομάζεται όριο αναλογικής συμπεριφοράς. Αυτό είναι το σημείο μετά το οποίο η καμπύλη ξεκινάει να αποκλίνει από την ευθεία, δηλαδή από το γραμμικό τμήμα της. Σε αυτό το σημείο αν αφαιρεθεί το φορτίο δεν θα παρατηρηθεί καμία παραμόρφωση, και ονομάζουμε την περιοχή ως ελαστική, επειδή έχει μνήμη σχήματος. Σε αυτό το γραμμικό τμήμα της καμπύλης η μόνο αξονική σχέση τάσης-παραμόρφωσης δίνεται από το νόμο του Hooke, ως εξής:



Σχήμα 2.24: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για εύθραυστα και όλκιμα υλικά.

Όπου η σταθερά αναλογικής συμπεριφοράς E , που είναι και η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, ονομάζεται μέτρο Young ή πιο συχνά μέτρο ελαστικότητας. Η σταθερά E είναι ένα μέτρο της δυσκαμψίας ενός υλικού, και δεδομένου ότι η ένταση (strain) είναι αδιάστατη, οι μονάδες του E είναι ίδιες με αυτές της τάσης. Το σημείο el στο σχήμα 2.24 καλείται όριο ελαστικότητας. Εάν το δείγμα φορτίζεται πέραν αυτού του σημείου, η παραμόρφωση λέγεται ότι είναι πλαστική και το υλικό θα υποστεί μόνιμη παραμόρφωση ακόμα και όταν αφαιρεθεί η φόρτιση. Μεταξύ των σημείων pl και el η καμπύλη δεν είναι μια τέλεια ευθεία γραμμή, ακόμα και αν το δείγμα εξακολουθεί να είναι ελαστικό.

Κατά την διάρκεια της δοκιμασίας εφελκυσμού, πολλά υλικά φθάνουν στο σημείο στο οποίο η ένταση αρχίζει να αυξάνεται απότομα με μία αναντιστοιχία αύξηση της πίεσης. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο απόδοσης (yield point). Το σημείο αυτό απόδοσης δεν είναι πάντα ευδιάκριτο σε όλα τα υλικά, ιδίως στα εύθραυστα. Για τον λόγο αυτό, το μέγεθος αντοχή διαρροής (yield strength) S_y ορίζεται συχνά από μία μέθοδο όψετ όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24, όπου η γραμμή $a-y$ γραμμή επεκτείνεται παράλληλα με την γραμμική περιοχή, δηλαδή με κλίση E . Το σημείο a αντιστοιχεί σε ένα καθορισμένο και συγκεκριμένο μέγεθος, που είναι συνήθως το 0,2 τοις εκατό του αρχικού μήκους του δείγματος ($Q = 0,002$).

Η απόλυτη, ή εφελκυστική αντοχή S_u αντιστοιχεί στο σημείο u του σχήματος 2.23 και είναι η μέγιστη τάση που επιτεύχθηκε στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.24.α, ορισμένα υλικά

εμφανίζουν πτωτική τάση μετά την μέγιστη καταπόνηση και θραύση στο σημείο f του διαγράμματος. Άλλα υλικά, όπως για παράδειγμα ο υψηλής αντοχής χάλυβας, υπόκεινται θραύση ενόσω η καμπύλη τάσης-έντασης έχει ακόμη θετική κλίση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24β, όπου τα σημεία u και f είναι ταυτόσημα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η αντοχή (strength), είναι μια ενδογενής ιδιότητα του υλικού, ή του μηχανικού στοιχείου εξαιτίας της επιλογής ενός συγκεκριμένου υλικού ή επεξεργασίας. Αντιθέτως η τάση είναι κάτι που συμβαίνει σε ένα μηχανικό μέρος, συνήθως ως αποτέλεσμα της συναρμολόγησης του σε μια μηχανή και λόγω της καταπόνησης του. Ωστόσο, μπορούν να προκληθούν επιπλέον τάσεις σε ένα υλικό λόγω κάποιας συγκεκριμένης επεξεργασίας. Για παράδειγμα, η επεξεργασία shot-peening παράγει μια συμπιεστική τάση στην εξωτερική επιφάνεια ενός μηχανικού μέρους, και βελτιώνει έτσι την αντοχή σε κόπωση (fatigue strength) του υλικού.

Τα διαγράμματα στο σχήμα 2.23 ονομάζονται μηχανικά (engineering) διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, διότι οι τάσεις και οι εντάσεις που υπολογίζονται δεν έχουν πραγματικές τιμές. Η τάση υπολογίζεται με βάση το αρχικό εμβαδό της περιοχής, πριν εφαρμοστεί το φορτίο. Στην πραγματικότητα, καθώς εφαρμόζεται το φορτίο, το εμβαδό της περιοχής μειώνεται αισθητά τόσο ώστε η πραγματική τάση να είναι μεγαλύτερη από την μηχανική τάση που υπολογίζουμε. Για να ληφθεί η πραγματική τάση, θα πρέπει να μετρώνται ταυτόχρονα το φορτίο και η διατομή της περιοχής ενδιαφέροντος. Το σχήμα 2.24α απεικονίζει ένα όλκιμο υλικό, στο οποίο η τάση φαίνεται να μειώνεται από τα σημεία u έως το f . Στην πράξη, πέρα από το σημείο u , η περιοχή του δείγματος μειώνεται δραματικά, και για τον λόγο αυτό, η πραγματική τάση είναι πολύ μεγαλύτερη από την μηχανική τάση στο τμήμα που υφίσταται "neck" δηλαδή υπερβολική συμπίεση.

Η μηχανική ένταση υπολογίζεται με βάση την καθαρή μεταβολή του μήκους του δείγματος σε σχέση με το αρχικό μήκος. Για την αποτύπωση του πραγματικού διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων, μερικές φορές χρησιμοποιείται ο όρος πραγματική ή λογαριθμική ένταση. Η πραγματική ένταση είναι το άθροισμα των στοιχειωδών επιμηκύνσεων διαιρούμενων με το μήκος του δείγματος κατά την άσκηση φόρτισης μεγέθους P , δηλαδή:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

Όπου το ε συμβολίζει την πραγματική πίεση. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός πραγματικού διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης, είναι ότι η πραγματική τάση μέχρι το σημείο θραύσεως. Για αυτό όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.24 η αληθινή τάση θραύσεως σ_f είναι μεγαλύτερη από την τάση σ_u . Και αυτό σε αντίθεση με το σχήμα. 2.24α, όπου η μηχανική αντοχή θραύσεως S_f είναι μικρότερη από την μηχανική αντοχή S_u .

Οι δοκιμές συμπίεσης είναι πιο δύσκολο να υλοποιηθούν, καθώς η γεωμετρία των δοκιμών διαφέρει από τη γεωμετρία των δειγμάτων στις δοκιμές εφελκυσμού. Ο λόγος για αυτό είναι ότι το δείγμα μπορεί να καμφθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής ή γενικά επειδή είναι δύσκολο να κατανείμει τις τάσεις ομοιόμορφα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα μπορούν να αποτυπωθούν σε διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, και επιπλέον μπορούν να οριστούν τα μεγέθη αντοχής που ορίσαμε στον εφελκυσμό. Στα περισσότερα όλκιμα υλικά η αντοχή συμπίεσης είναι περίπου ίδια με την αντοχή εφελκυσμού. Όταν όμως παρατηρούνται αισθητές διαφορές μεταξύ των εφελκυστικών και των συμπιεστικών αντοχών, όπως συμβαίνει με τον χυτοσίδηρο, αυτές θα πρέπει να αναφέρονται ξεχωριστά ως S_{ut} και S_{uc} .

Οι δυνάμεις στρέψης υπολογίζονται από την συστροφή στερεών κυλινδρικών σωμάτων, και μέσω της καταγραφής της ροπής και της γωνίας συστροφής που τους προκαλείται. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα διάγραμμα ροπής-στρέψης. Οι διατμητικές τάσεις του δείγματος είναι γραμμικές εν σχέσει με την ακτινική θέση, και επιπλέον είναι μηδενικές στο κέντρο του δείγματος μεγιστο-ποιούμενες στην εξωτερική ακτίνα r . Η μέγιστη διατμητική τάση τ_{max} είναι ανάλογη με την γωνία συστροφής και υπολογίζεται ως εξής:

$$\tau_{max} = \frac{Gr}{l_0} \theta$$

Όπου το θ μετρείται σε ακτίνια, το r είναι η ακτίνα του δείγματος, το l_0 είναι το μήκος του δείγματος, και G είναι το μέτρο ακαμψίας του υλικού, που αποκαλείται και μέτρο διάτμησης ή μέτρο ακαμψίας. Επιπλέον η μέγιστη διατμητική τάση σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη ροπή T ως παρακάτω:

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J}$$

όπου $J = \frac{\pi \rho^4}{2}$.

Το διάγραμμα ροπής-συστροφής θα είναι παρόμοιο με αυτό του σχήματος 2.24. Χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες εξισώσεις μπορούν να βρεθούν το όριο ελαστικότητας και η στρεπτική αντοχή (torsional yield strength) S_{su} . Το μέγιστο σημείο σε ένα διάγραμμα ροπής-συστροφής, που αντιστοιχεί στο σημείο u του σχήματος 2.24, είναι το αντίστοιχο T_u . Η εξίσωση

$$S_{su} = \frac{T_{u,r}}{J}$$

υπολογίζει το μέτρο θλάσης για την δοκιμή στρέψης. Σημειώνεται ότι είναι λάθος να ονομάζεται το S_{su} ως απόλυτη αντοχή στρέψης, καθώς οι εξωτερικές επιφάνειες του δείγματος βρίσκονται στην πλαστική περιοχή για ροπή T_u , και η κατανομή των τάσεων δεν είναι πλέον γραμμική. Η τάση και η αντοχή που υπολογίζονται από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του σχήματος 2.24 και από αντίστοιχα διαγράμματα, είναι γνωστά ως μηχανική τάση και αντοχή ή αλλιώς ως ονομαστική τάση και αντοχή. Αυτά είναι τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται σε κάθε τεχνική μελέτη για τους αναγκαίους υπολογισμούς. Ο χαρακτηρισμός τους ως μηχανικά μεγέθη, υποδηλώνει ότι ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται με την χρήση της αρχικής ή αλλιώς της μη παραμορφωμένης διατομής του δείγματος.

2.7.1 Σκληρότητα

Η αντίσταση ενός υλικού στην διείδυση από ένα εργαλείο ονομάζεται σκληρότητα. Αν και υπάρχουν πολλά συστήματα μέτρησης της σκληρότητας, εδώ γίνεται λόγος σε μόνο δύο που έχουν και την μεγαλύτερη χρήση.

Οι δοκιμές σκληρότητας Rockwell που περιγράφονται από τις προδιαγραφές ASTM (μέθοδος E-18) και οι μετρήσεις γίνονται εύκολα και γρήγορα και έχουν καλή επαναληψιμότητα. Οι κλίμακες σκληρότητας Rockwell ταξινομούνται ως A,B,C, . . . , κλπ. Τα εργαλεία διείδυσης είναι διαμάντι

σχήματος σφαίρας διαμέτρου 16χιλ., και η εφαρμογή φορτίου 60, 100 ή 150 kg αντίστοιχα για τις κλίμακες A, B και C. Επομένως οι αριθμοί σκληρότητας που προκύπτουν έχουν νόημα μόνο σε σχέση με έναν άλλο αριθμό σκληρότητας που χρησιμοποιεί την ίδια κλίμακα.



Εικόνα 2.1 : Συσκευή δοκιμασίας Rockwell

Η σκληρότητα Brinell είναι μια ακόμη δοκιμή που χρησιμοποιείται επίσης αρκετά. Κατά την δοκιμή, το εργαλείο διείσδυσης μέσω του οποίου εφαρμόζεται η δύναμη, είναι σφαίρα, ενώ η σκληρότητα HB υπολογίζεται ως το πηλίκο του εφαρμοζόμενου φορτίου διά την σφαιρική επιφάνεια της προκαλούμενης εσοχής. Έτσι, οι μονάδες του HB είναι οι ίδιες με αυτές της τάσης. Οι δοκιμές σκληρότητας Brinell παίρνουν περισσότερο χρόνο, δεδομένου ότι το HB θα πρέπει να υπολογίζεται από την σφαιρική επιφάνεια των δοκιμών.



Εικόνα 2.2 : Συσκευή μέτρησης σκληρότητας Brinell.

Το κύριο πλεονέκτημα και των δύο μεθόδων είναι ότι είναι μη καταστροφικές στις περισσότερες περιπτώσεις. Και οι δύο είναι εμπειρικές και συνδέονται άμεσα με την αντοχή του υλικού υπό δοκιμών. Αυτό σημαίνει ότι η

αντοχή των μηχανικών μερών θα μπορούσε, εφόσον είναι επιθυμητό, να δοκιμάζεται κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

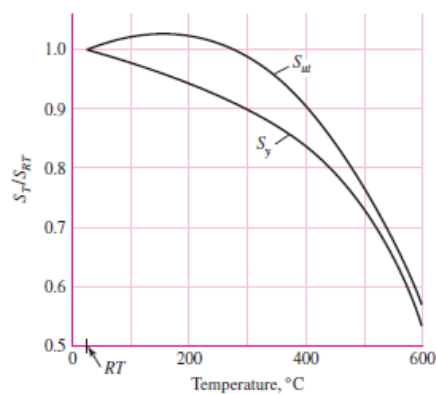
Για το ατσάλι, η σχέση μεταξύ της ελάχιστης απόλυτης αντοχής και της αντοχής Brinell για $200 \leq HB \leq 450$, έχει βρεθεί να είναι ίση με:

$$S_u = \begin{cases} 0.495 H_B & \text{kpsi} \\ 3.41 H_B & \text{MPa} \end{cases}$$

2.7.2 Επιδράσεις της θερμοκρασίας

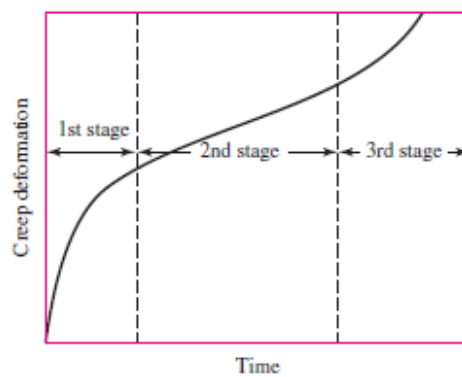
Τα μεγέθη της αντοχής, της ολκιμότητας, ή της ευθραυστότητας, είναι ιδιότητες που επηρεάζονται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος λειτουργίας. Στο σχήμα 2.25 απεικονίζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στις στατικές ιδιότητες του χάλυβα. Παρατηρείται ότι η εφελκυστική αντοχή αλλάζει μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό μέχρι μια ορισμένη θερμοκρασία. Μετά από εκείνο το σημείο, φθίνει ραγδαία. Η αποδοτική αντοχή, ωστόσο, μειώνεται συνεχώς καθώς η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξάνεται. Υπάρχει μια σημαντική αύξηση της ολκιμότητας, όπως είναι αναμενόμενο, στις υψηλότερες θερμοκρασίες.

Έχουν γίνει πολλές δοκιμές σε σιδηρούχα μέταλλα, τα οποία υποβάλλονται σε σταθερά φορτία για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Βρέθηκε ότι τα δείγματα παραμορφώνονται μόνιμα κατά τις δοκιμές, ενώ ορισμένες φορές οι πραγματικές τάσεις είναι μικρότερες από την αποδοτική αντοχή του υλικού. Αυτή η συνεχόμενη παραμόρφωση υπό φορτίο, καλείται ερπυσμός.



Σχήμα 2.25: Αντοχή συναρτήσει θερμοκρασίας

Ένα ακόμη ενδιαφέρον πείραμα είναι ο μακροχρόνιος ερπυσμός υπό σταθερό φορτίο. Το σχήμα 2.26 απεικονίζει μια καμπύλη ενός τέτοιου πειράματος. Το πείραμα γίνεται υπό σταθερή θερμοκρασία. Στην καμπύλη διακρίνονται τρεις κυρίως περιοχές. Στην πρώτη έχουμε τόσο ελαστική όσο και πλαστική παραμόρφωση. Εδώ παρατηρούνται χαμηλά ποσοστά ερπυσμού, που οφείλονται στην σκλήρυνση του υλικού. Στην δεύτερη περιοχή, παρατηρείται μία ελάχιστη αύξηση του ερπυσμού. Στο τρίτο στάδιο του διαγράμματος παρατηρείται μία σημαντική μείωση του εμβαδού του υλικού, η πραγματική τάση αυξάνεται ραγδαία, ενώ η μεγάλη αύξηση του ερπυσμού οδηγεί τελικά στην θραύση του.



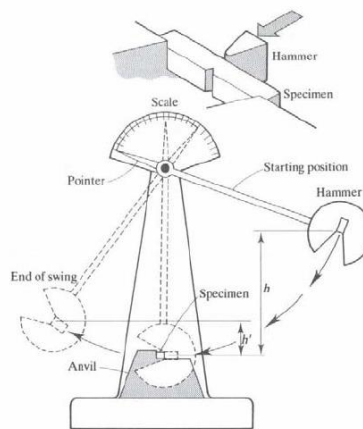
Σχήμα 2.26: Παραμόρφωση ερπυσμού

Η θερμική επεξεργασία, χρησιμοποιείται για την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Η θέρμανση, που προκαλείται από την ηλεκτρική ή μέσω φυσικού αερίου συγκόλληση αλλάζει επίσης τις μηχανικές του ιδιότητες. Οι αλλαγές αυτές οφείλονται στην σύσφιξη κατά την διάρκεια της συγκόλλησης αλλά και λόγω της θέρμανσης. Οι προκαλούμενες τάσεις από την διαδικασία, παραμένουν όταν το υλικό ψυχραίνεται και όταν αφαιρούνται οι σφικκτήρες. Χρειάζεται κάθε φορά να γίνουν δοκιμές σκληρότητας για να εξακριβωθεί αν η αντοχή έχει αλλάξει λόγω της συγκόλλησης, ωστόσο οι δοκιμές αυτές δεν αποκαλύπτουν την παρουσία των παραμενουσών τάσεων.

2.7.3 Ιδιότητες κρούσης

Η εξωτερική δύναμη που ασκείται σε μία κατασκευή ή σε ένα μηχανικό τμήμα ονομάζεται φορτίο επίδρασης, εφόσον ο χρόνος εφαρμογής της είναι λιγότερος από το ένα τρίτο της χαμηλότερης φυσικής περιόδου δόνησης του

μηχανικού μέρους ή της κατασκευής. Διαφορετικά καλείται απλά ως στατικό φορτίο. Οι δοκιμές Charpy (πιο κοινή και Izod πιο σπάνια) χρησιμοποιούν ράβδους ειδικής γεωμετρίας για τον καθορισμό της ευθραυστότητας και της αντοχής επίδρασης. Οι δοκιμές αυτές είναι χρήσιμες για την σύγκριση διαφόρων υλικών και για τον προσδιορισμό της ευθραυστότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Και στις δύο δοκιμές, το δείγμα κρούεται από ένα εκκρεμές, το οποίο απελευθερώνεται από ένα σταθερό ύψος ενώ η ενέργεια που απορροφάται από το δείγμα, που ονομάζεται μέγεθος επίδρασης, μπορεί να υπολογιστεί από το ύψος της αιώρησης μετά την θραύση.

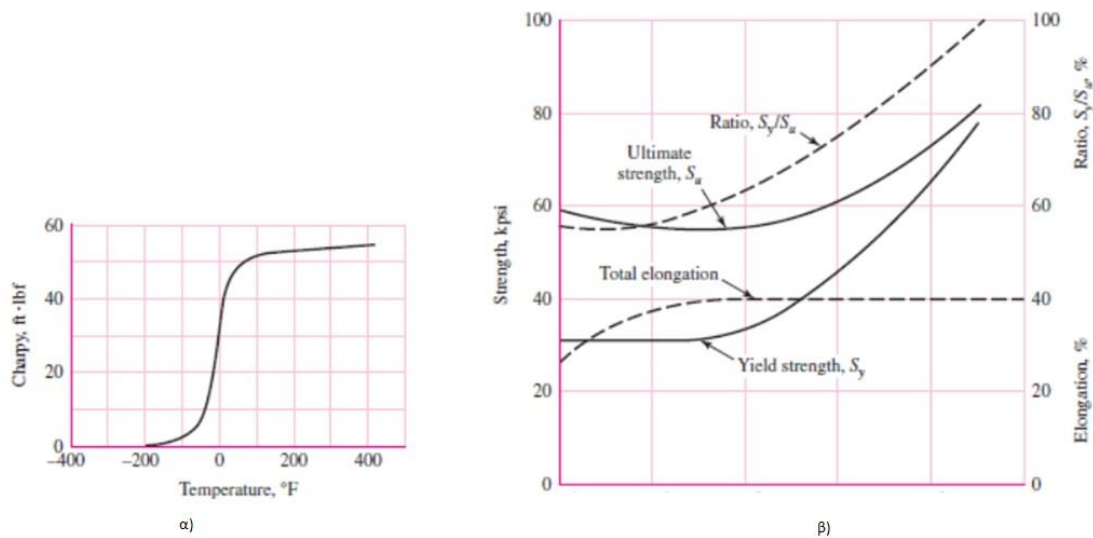


Εικόνα 2.1 : Συσκευή δοκιμασίας Charpy

Η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέγεθος επίδρασης απεικονίζεται στο σχήμα 2.27 για ένα υλικό που υφίσταται μετάβαση από όλκιμη σε εύθραυστη κατάσταση. Αυτή η μετάβαση δεν παρουσιάζεται σε όλα τα υλικά. Όπως παρατηρείται από το σχήμα υπάρχει μία κρίσιμη περιοχή θερμοκρασιών κατά την οποία το μέγεθος επίπτωσης αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς. Στην περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας η θραύση είναι θριμματισμένου τύπου, ενώ πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία της περιοχής η θραύση υλοποιείται ως αποκόλληση. Η κρίσιμη θερμοκρασία φαίνεται να εξαρτάται τόσο από το υλικό όσο και από την γεωμετρία της εγκοπής. Για το λόγο αυτό οι σχεδιαστές δεν θα πρέπει να στηρίζονται υπερβολικά στα αποτελέσματα των δοκιμών. Όταν το ποσοστό παραμόρφωσης αυξάνεται, όπως γίνεται κάτω από συνθήκες κρούσης, αυξάνεται επιπλέον και η τιμή αντοχής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.27.

Στην πραγματικότητα, για πολύ υψηλά επίπεδα ποσοστού έντασης η αντοχή απόδοσης (yield strength) φαίνεται να προσεγγίζει οριακά την απόλυτη

αντοχή. Αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι οι καμπύλες δείχνουν μικρή αλλαγή κατά την επιμήκυνση. Αυτό σημαίνει ότι η ολκιμότητα παραμένει περίπου ίδια. Επίσης, ενόσω αυξάνει η αντοχή απόδοσης, ένα υλικό όπως ο χάλυβας αναμένεται να συμπεριφέρεται ελαστικά σε όλο σχεδόν το φάσμα της αντοχής του υπό συνθήκες κρούσης. Οι δοκιμές Charpy και Izod παρέχουν δεδομένα σκληρότητα κάτω από δυναμικές και όχι στατικές συνθήκες.



Σχήμα 2.27: α) Επίδραση θερμοκρασίας στο μέγεθος κρούσης
 β) Επίδραση του ποσοστού έντασης στην αντοχή.

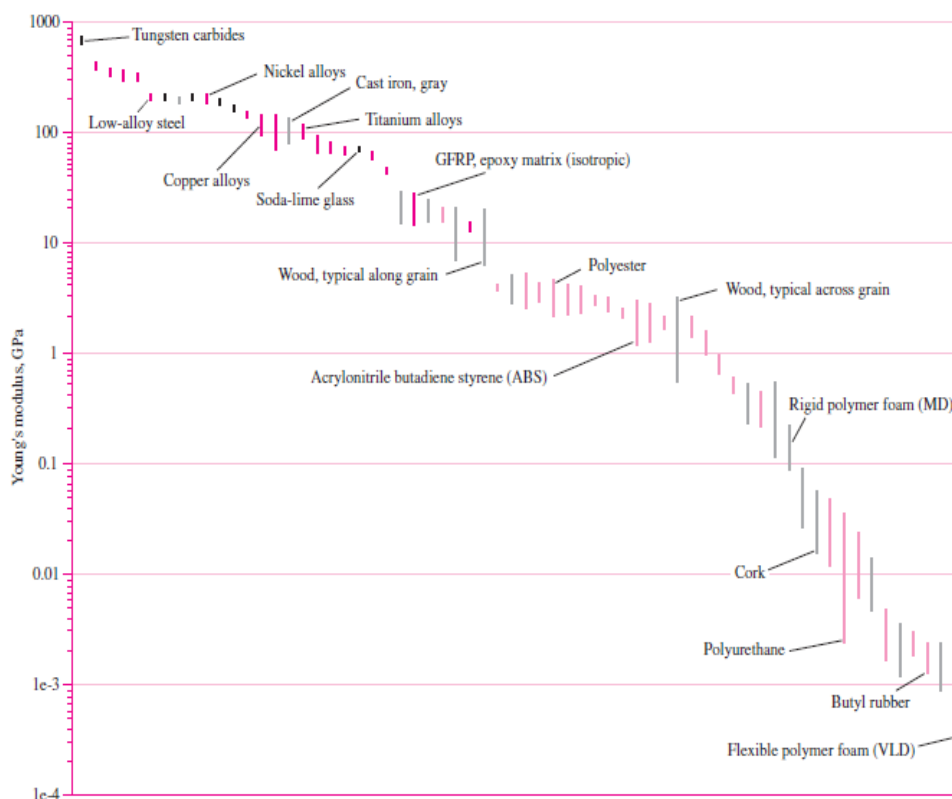
2.7.4 Διαδικασίες επιλογή υλικών

Όπως και προαναφέρθηκε η επιλογή του υλικού για ένα μηχανικό μέρος ή μία δομική κατασκευή είναι μία από τις μεγαλύτερες αποφάσεις που καλείται να λάβει ο σχεδιαστής. Στις προηγούμενες ενότητες αναλύθηκαν και εκτέθηκαν πολλές βασικές φυσικές ιδιότητες των υλικών. Η επεξεργασία των υλικών βρίσκεται έξω από τους επιστημονικούς στόχους της εργασίας, ωστόσο και αυτή επηρεάζει καθοριστικά την τελική μορφή και τις ιδιότητες του υλικού και πρέπει να λαμβάνει της δέουσας προσοχής. Η πραγματική όμως επιλογή του υλικού, μπορεί είτε να είναι μία απλή ρουτίνα αν βασιζόμαστε σε προηγούμενες επιτυχημένες εφαρμογές, μπορεί και όμως σαν διαδικασία να είναι επίσης απαιτητική, αν χρειάζεται να συνυπολογιστούν και άλλοι παράγοντες όπως οικονομικοί, λειτουργικοί, φυσικοί και επεξεργαστικοί. Σε γενικές γραμμές, χρειάζεται να υπάρχει μία συστηματική προσέγγιση βελτιστοποίησης του

επιλεγόμενου υλικού. Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί η διαδικασία αξιολόγησης των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, και πως γίνεται αντιμετώπιση τους με βάση το κριτήριο κρισιμότητας. Οι ιδιότητες αυτές θα πρέπει να μουν σε προτεραιότητα, με βάση ένα "ειδικό" βάρος που αυτές κατέχουν κάθε φορά για τον σχεδιασμό.

Μία ικανοποιητική μέθοδος επιλογής, στηρίζεται στην ταξινόμηση των υλικών με βάση κάποια χαρακτηριστικά τους. Ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει μία ομάδα από υλικά που για όλες τις λίστες βρίσκεται σε υψηλή θέση. Όταν περιορίσει τις επιλογές του σε μία μικρή ομάδα, μπορεί έπειτα μέσω περαιτέρω δοκιμών να συγκεκριμενοποιήσει την επιλογή του σε ένα τελικό υλικό.

Τα διαγράμματα παρουσιάζουν διάφορες ιδιότητες μερικών οικογενειών και κλάσεων των υλικών. Για παράδειγμα το σχήμα 2.28 απεικονίζει τις τιμές του Young modulus E, για κάθε οικογένεια υλικού. Σε μία άλλη παραλλαγή ο άξονας χ θα μπορούσε να απεικονίσει μία άλλη ιδιότητα, όπως για παράδειγμα την πυκνότητα του υλικού για να υπάρχει ακόμα πιο λεπτομερέστερη εικόνα των ιδιοτήτων.

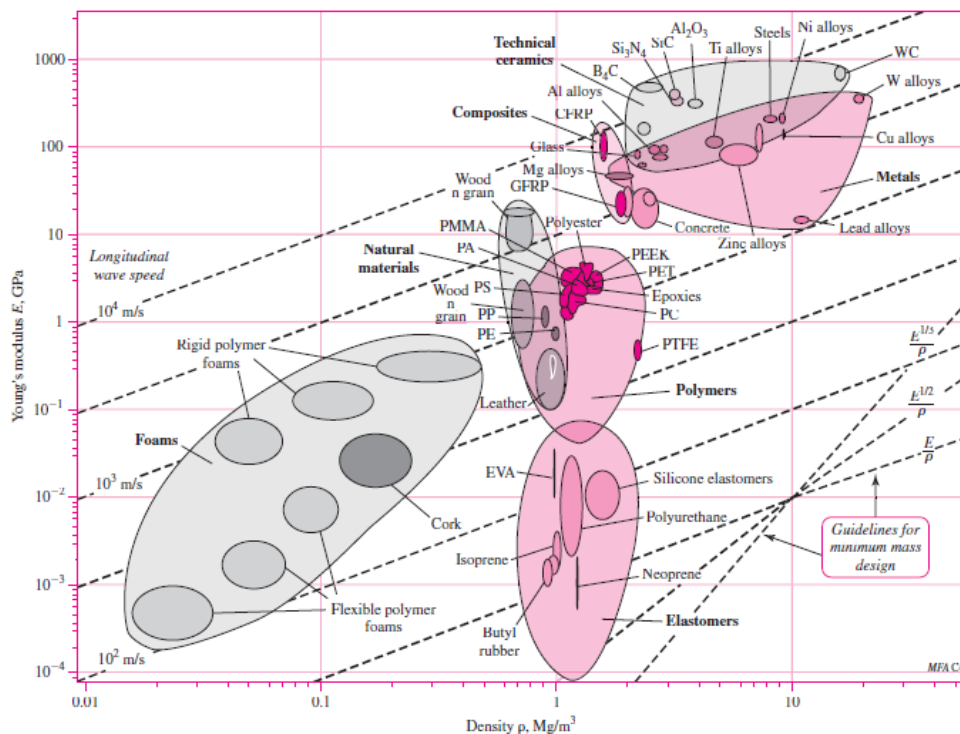


Σχήμα 2.28 : Διάγραμμα τιμών σταθεράς ελαστικότητας για διάφορα υλικά.

Το σχήμα 2.29 που ονομάζεται και διάγραμμα-"φούσκα", απεικονίζει το μέτρο ελαστικότητας E συναρτήσει της πυκνότητας ρ . Εδώ πλέον οι γραμμές δίνουν θέση σε καμπύλες οι οποίες απεικονίζουν το εύρος τιμών για κάθε μία από τις δύο μεταβλητές. Η απεικόνιση αυτή είναι πιο λειτουργική και χρήσιμη σε σχέση με αυτή του σχήματος 2.28. Επιπλέον, σε αυτό το διάγραμμα γίνεται εμφανής η σχέση μεταξύ βάρους και ελαστικότητας(ακαμψίας).

Οι διακεκομμένες γραμμές στην κάτω δεξιά γωνία του διαγράμματος δείχνουν την αναλογία E/ρ , η οποία βοηθάει στην επιλογή του υλικού κατά τον σχεδιασμό. Επομένως όλες αυτές οι παράλληλες γραμμές δείχνουν διαφορετικές τιμές αυτής της αναλογίας. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ήχου σε ένα υλικό δίνεται από το $(E/\rho)^{1/2}$, κάθε διακεκομμένη γραμμή του πηλίκου E/ρ , αντιπροσωπεύει και μια διαφορετική ταχύτητα για το υλικό. Το μετρώ απόδοσης P ενός δομικού στοιχείου εξαρτάται από (1) τις λειτουργικές απαιτήσεις,(2) την γεωμετρία, και (3) τις ιδιότητες του υλικού της δομής, δηλαδή,

$$P = \left[\left(\text{functional requirements } F \right), \left(\text{geometric parameters } G \right), \left(\text{material properties } M \right) \right]$$



Σχήμα 2.29 Διάγραμμα τιμών σταθεράς ελαστικότητας ως προς την πυκνότητα, και οικογένειες υλικών.

Η συνάρτηση γίνεται:

$$P = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$$

Για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, απαιτείται η μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση του P . Αυτό επιτυγχάνεται με την μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση του $f_3(M)$, που αφορά τις ιδιότητες του υλικού, και ονομάζεται συντελεστής αποδοτικότητας του υλικού.

Παραδείγματος χάριν, έστω ότι ζητείται να κατασκευαστεί μία ελαφριά, άκαμπτη και φορτισμένη δοκός κυκλικής διατομής. Εδώ το ζητούμενο του αποδοτικού σχεδιασμού, θα είναι η ελαχιστοποίηση της μάζας m της δοκού. Η ακαμψία μίας δοκού σχετίζεται με το υλικό και τη γεωμετρία του. Η ακαμψία της δοκού υπολογίζεται από την σχέση $k = F / \delta$, όπου F και δ είναι το φορτίο και η παραμόρφωση, αντίστοιχα. Η τελική παραμόρφωση μίας δοκού θα είναι ίση με $\delta = y_{\max} = (F l^3) / (3 E I)$, όπου E είναι το μέτρο του Young, I είναι η μάζα αδρανείας, και l είναι το μήκος της δοκού. Έτσι, η ακαμψία δίνεται από τον τύπο:

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{3 E I}{l^3}$$

ενώ η μάζα αδρανείας της διατομής:

$$I = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{A^2}{4\pi}$$

Όπου D και A είναι αντίστοιχως η διάμετρος και το εμβαδόν της διατομής. Αν λύσω ως προς A θα έχω:

$$A = \left(\frac{4\pi k l^3}{3E} \right)^{1/2}$$

Η μάζα της δοκού είναι:

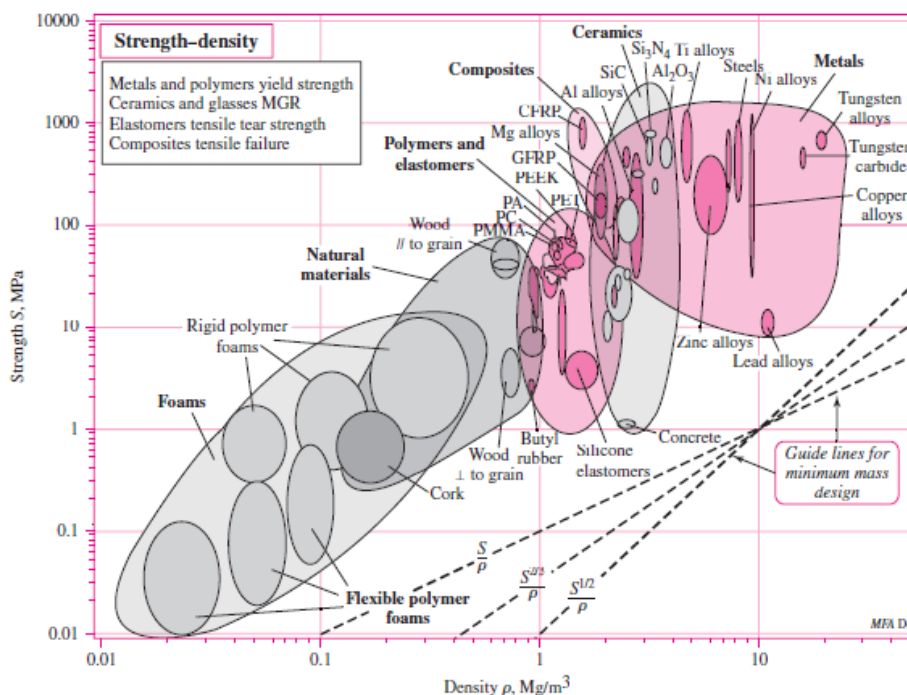
$$m = A l \rho$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εξισώσεις θα έχω:

$$m = 2 \sqrt{\frac{\pi}{3}} (\sqrt{k}) \left(l^{\frac{5}{2}} \right) \left(\frac{\rho}{E^{0.5}} \right)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ο όρος $2\sqrt{\pi}/3$ είναι μία απλή σταθερά και μπορεί να συσχετιστεί με οποιαδήποτε συνάρτηση. Επομένως η συνάρτηση $f_1(F) = 2\sqrt{k\pi}/3$ είναι η λειτουργική συνάρτηση που εκφράζει τις απαιτήσεις ακαμψίας,

$f_2(G) = (l/5/2)$ είναι η γεωμετρική συνάρτηση που εκφράζει το μήκος, και ο τελευταίος όρος είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας του υλικού που είναι ίσος με την συνάρτηση $f_3(M) = (\rho/E^{0,5})$. Για να ελαχιστοποιηθεί το M θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η $f_3(M)$, ή αλλιώς να μεγιστοποιηθεί το M^{-1} , όπου M είναι ο δείκτης υλικού και $\beta=1/2$. Αφού υπολογίστηκαν αυτοί οι παράμετροι, η επιλογή των υλικών θα γίνει βάσει του σχήματος 2.29, βάσει των διακεκομμένων γραμμών. Παρατηρείται ότι για $E^{0,5}$, οι επιλογές μας περιορίζονται σε συνθετικά και κεραμικά υλικά για το συγκεκριμένο πρόβλημα της δοκού με κυκλική διατομή. Αν ληφθούν και άλλοι περιορισμοί και συγκεκριμένα κάποιες τιμές του μέτρου ελαστικότητας, τότε καταλήγουμε στην επιλογή ενός συγκεκριμένου υλικού. Για τις ανάγκες μίας σχεδιαστικής εργασίας, φυσικά θα υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί παραμέτρων που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν, όπως η αντοχή, το κόστος κ.α. Στο σχήμα 2.30 βλέπουμε για παράδειγμα ένα διάγραμμα αντοχής σε σχέση με πυκνότητα για πολλές κατηγορίες υλικών. Υπάρχουν και άλλα διαγράμματα που μπορούν να μας βοηθήσουν στην επιλογή του υλικού. Τα λογισμικά πακέτα όπως το CES Edupack, μας δίνουν μία ολοκληρωμένη εικόνα και μπορούν σίγουρα να μας βοηθήσουν στην επιλογή τους.



Σχήμα 2.30: Διάγραμμα Αντοχής ως προς πυκνότητα για διάφορες οικογένειες υλικών.

2.8 Υλικά σκελετών ποδηλάτου

Το πλαίσιο είναι το σημαντικότερο τμήμα ενός ποδηλάτου, αφού στηρίζει όλα τα υπόλοιπα τμήματά του. Ιστορικά, οι σωλήνες ενός πλαισίου ποδηλάτου αποτελούνταν από χάλυβα. Ενώ ο χάλυβας χρησιμοποιείται ακόμα, τα νεώτερα πλαίσια κατασκευάζονται επίσης από κράματα αργιλίου, τιτάνιο, ανθρακονήματα, ακόμη και μπαμπού. Περιστασιακά, πλαίσια διαμορφώνονται και από άλλα τμήματα εκτός από τους σωλήνες. Αυτά περιλαμβάνουν τις δοκούς διατομής σχήματος - i και τα πλαίσια κελυφωτούς δομής. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα πλαίσια είναι το ξύλο, το μαγνήσιο (χυτές δοκοί), και τα θερμοπλαστικά. Συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού μας βοηθούν να αποφασίσουμε ποιό είναι το καταλληλότερο στη κατασκευή του πλαισίου του ποδηλάτου:

- Η πυκνότητα (ή συγκεκριμένη πυκνότητα) είναι ένα μέτρο για το πόσο ελαφρύ ή βαρύ είναι το υλικό ανά όγκο.

- Η ακαμψία (ή μέτρο ελαστικότητας) μπορεί θεωρητικά να έχει επιπτώσεις στην οδηγητική άνεση και στην αποδοτικότητα μετάδοσης ισχύος.

- Το όριο κόπωσης και το όριο διαρροής καθορίζουν την ανθεκτικότητα του πλαισίου όταν υποβάλλεται σε κυκλική πίεση ή πρόσκρουση.

Η εφαρμοσμένη μηχανική σωλήνων και η γεωμετρία των πλαισίων μπορούν να υπερνικήσουν ένα μεγάλο μέρος των αντιληπτών ανεπαρκειών αυτών των ιδιαίτερων υλικών.

Παρακάτω παρατίθενται ονομαστικά και αναλυτικά τα συνηθέστερα υλικά κατασκευής πλαισίων ποδηλάτων.

2.8.1 Ατσάλι (χάλυβας)

Τα ατσάλινα πλαίσια είναι συχνά φτιαγμένα με διάφορους τύπους κραμάτων χάλυβα, που συμπεριλαμβάνουν και τους τύπους chromoly.

Είναι ισχυρά, εύκολα επεξεργάσιμα, σχετικά φθηνά, ωστόσο είναι πυκνότερα (βαρύτερα) από πολλά άλλα δομικά υλικά. Οι χαλύβδινες σωληνώσεις με τυπικές και παραδοσιακές διαμέτρους είναι συχνά λιγότερο άκαμπτες σε σχέση

με άλλα υλικά σε μεγαλύτερες διαστάσεις.



Εικόνα 2.3 : ποδήλατο classic, με ατσάλινο σκελετό

Αυτή η ελαστικότητα επιτρέπει μία μερική απορρόφηση των κραδασμών δίνοντας στον αναβάτη μία ελαφριά λιγότερο ενοχλητική αίσθηση σε σύγκριση με άλλες πιο άκαμπτες σωληνώσεις όπως το υπερμέγεθες αλουμίνιο. Ένα κλασικός τύπος κατασκευής τόσο για τα ποδήλατα δρόμου όσο και για τα ποδήλατα βουνού χρησιμοποιεί τυπικούς κυλινδρικούς χαλύβδινους σωλήνες οι οποίοι συνδέονται με αποφύσεις. Οι αποφύσεις είναι εσοχές που φτιάχνονται από πιο χοντρά κομμάτια χάλυβα.

Οι σωλήνες προσαρμόζονται στις αποφύσεις οι οποίες περιβάλλουν την απόληξη του σωλήνα και έπειτα γίνεται η συγκόλληση τους. Εμπειρικά, αποδεικνύεται ότι οι συγκολλήσεις χαμηλής θερμοκρασίας έχουν λιγότερο αρνητικές επιπτώσεις στην αντοχή του σωλήνα σε σχέση με την συγκόλληση υψηλής θερμοκρασίας, επιτρέποντας την χρήση ελαφριών σωληνών χωρίς να παρατηρείται απώλεια αντοχής. Οι πρόσφατες εξελίξεις στη μεταλλουργία («air hardening»), μας παρέχουν σωληνώσεις που έχουν μεγάλη αντοχή και των οποίων οι ιδιότητες είναι ακόμη καλύτερες λόγω των υψηλών θερμοκρασιών συγκόλλησης, κάτι που επιτρέπει στις συγκολλήσεις TIG και MIG να παραγκωνίσουν τις ακριβές κατασκευές lugged σε όλα τα μοντέλα εκτός από κάποια εξειδικευμένα και περιορισμένης παραγωγής ποδήλατα. Σε αντίθεση με τα πλαίσια συγκόλλησης MIG ή TIG, ένας σκελετός διεργασίας lugged μπορεί και είναι πιο εύκολο να επισκευαστεί λόγω της απλής κατασκευής του.

Επιπλέον, δεδομένου ότι οι σωληνώσεις από χάλυβα μπορούν να σκουριάσουν (αν και στην πράξη η χρήση χρώματος και αντιδιαβρωτικών σπρέι

μπορούν να αποτρέψουν αποτελεσματικά την σκουριά), τα πλαίσια lugged επιτρέπουν την γρήγορη αντικατάσταση των σωλήνων χωρίς να υπάρχει σχεδόν καμία φυσική βλάβη στους γειτονικούς σωλήνες.

Μια πιο οικονομική μέθοδος κατασκευής σκελετών ποδηλάτων είναι αυτή που χρησιμοποιεί κυλινδρικούς σωλήνες χάλυβα με συγκόλληση TIG, η οποία δεν απαιτεί εξοχές για να συγκρατήσει τους σωλήνες.

Αντιθέτως, οι σωλήνες του πλαισίου ευθυγραμμίζονται στο ικρίωμα και σταθεροποιούνται στη θέση τους μέχρι να ολοκληρωθεί η συγκόλληση. Η συγκόλληση fillet είναι μια ακόμη μέθοδος που ενώνει τους σωλήνες χωρίς εξοχές. Απαιτεί περισσότερη εργασία και κατά συνέπεια είναι λιγότερο πιθανό να χρησιμοποιηθεί στην βιομηχανική παραγωγή σκελετών.

Όπως και με την TIG συγκόλληση, οι σωλήνες fillet του σκελετού συγκολλούνται και στη συνέχεια συγκολλείται μία επιφάνεια μπρούντζου στον κοινό σύνδεσμο, παρόμοια όπως με την διαδικασία κατασκευής lugged. Η επιχάλκωμένη αυτή επιφάνεια επιτυγχάνει περισσότερη αισθητική ομοιομορφία στον σκελετό. Στα χαλύβδινα πλαίσια, η χρήση ενισχυμένου σωλήνα μειώνει το βάρος ωστόσο αυξάνει το κόστος. Με την ενίσχυση εννοείται ότι το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα δεν είναι ομοιόμορφο, και αλλάζει από παχύτερο στα άκρα (για σκοπούς αντοχής και πίεσεων) σε λεπτότερο στη μέση των δοκών ώστε να είναι πιο ελαφρύς ο σκελετός.

Ωστόσο, τα ποδήλατα υψηλής ποιότητας και προστιθέμενης αξίας, κατασκευάζονται από κράματα χάλυβα υψηλής αντοχής (εν γένει χρωμίου-μολύβδου-χάλυβα είτε απλά κράματα χρωμίου-χάλυβα), και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ελαφριών σωλήνων με πολύ λεπτό πάχος τοιχωμάτων (ο σωλήνας δηλαδή δεν είναι συμπαγής).

Ένα από τα πιο επιτυχημένα κράματα χάλυβα είναι το Reynolds "531", ένα κράμα χάλυβα και μαγγανίου-μολύβδου.

Το πιο κοινό σήμερα κράμα είναι το κράμα χρωμίου 4130 chromoly και οι παραλλαγές του. Οι βιομηχανίες Reynolds και Columbus είναι δύο από τους πιο γνωστούς (και με μεγαλύτερο κύκλο εργασιών) κατασκευαστές σωλήνων για ποδήλατα. Ένα υψηλής ποιότητας ατσάλινο πλαίσιο είναι ελαφρύτερο από έναν τυπικό ατσάλινο σκελετό. Η ελαφρότητα κάνει πιο εύκολη την ανηφορική οδήγηση, όπως και την επιτάχυνση από επίπεδη θέση.

Επίσης, πολλοί αναβάτες αισθάνονται ότι τα ελαφριά πλαίσια χάλυβα λεπτών τοιχωμάτων έχουν μια "ζωντάνια" και "ελαστικότητα" κατά την οδήγηση. Ο υψηλής ποιότητας (με κράμα χρωμίου ή μαγγανίου) ατσάλινος σκελετός μπορεί να αναγνωριστεί από το απλό χτύπημα με την άκρη του νυχιού. Ένα υψηλής ποιότητας πλαίσιο θα παράξει ένα ήχο-"κουδούνισμα", όταν ο τυπικής ποιότητας ατσάλινος σκελετός θα παράξει έναν πιο μπάσο και βαθύ ήχο.

Μπορούν επίσης να αναγνωριστούν από το βάρος τους (περίπου στα 2,5 kg ζυγίζει το πλαίσιο μαζί με τα πιρούνια), καθώς από τον τύπο των συνδέσμων και των απολήξεων των πιρουνιών που χρησιμοποιούν. Παρακάτω παρατίθενται πίνακες των εμπορικών κραμάτων χάλυβα (steel alloys) με τους τυποποιημένους κωδικούς για την αναγνώριση τους. Επιπλέον παρατίθεται και ενδεικτικός πίνακας των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων αυτών.

Properties	Carbon Steels	Alloy Steels	Stainless Steels
Density (1000 kg/m ³)	7.85	7.85	7.75-8.1
Elastic Modulus (GPa)	190-210	190-210	190-210
Poisson's Ratio	0.27-0.3	0.27-0.3	0.27-0.3
Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /K)	11-16.6	9.0-15	9.0-20.7
Melting Point (°C)			1371-1454
Thermal Conductivity (W/m-K)	24.3-65.2	26-48.6	11.2-36.7
Specific Heat (J/kg-K)	450-2081	452-1499	420-500
Electrical Resistivity (10 ⁻⁹ Ω-m)	130-1250	210-1251	75.7-1020
Tensile Strength (MPa)	276-1882	758-1882	515-827
Yield Strength (MPa)	186-758	366-1793	207-552
Percent Elongation (%)	10-32	4-31	12-40
Hardness (Brinell 3000kg)	86-388	149-627	137-595

Πίνακας 2.2 :Μηχανικές, Θερμικές και Ηλεκτρικές Ιδιότητες διάφορων τύπων χάλυβα.

Steel Alloy Designation System	
AISI-SAE Designation Number	Type and Description
Carbon steels	
10xx	Plain Carbon (Mn. 1.00% max.)
11xx	Resulfurized
12xx	Resulfurized and rephosphorized
15xx	Plain Carbon (max. Mn. range 1.00-1.65%)
Manganese steels	
13xx	Mn 1.75
Nickel steels	
23xx	Ni 3.50
25xx	Ni 5.00
Nickel-chromium steels	
31xx	Ni 1.25; Cr 0.65, 0.80
32xx	Ni 1.75; Cr 1.07
33xx	Ni 3.50; Cr 1.50, 1.57
34xx	Ni 3.00; Cr 0.77
Molybdenum steels	
40xx	Mo 0.20, 0.25
44xx	Mo 0.40, 0.52
Chromium-molybdenum steels	
41xx	Cr 0.50, 0.80, 0.95; Mo 0.12, 0.20, 0.25, 0.30
Nickel-chromium-molybdenum steels	
43xx	Ni 1.82; Cr 0.50, 0.80; Mo 0.25
43BVxx	Ni 1.82; Cr 0.50; Mo 0.12, 0.25; V 0.03 min.
47xx	Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20, 0.35
81xx	Ni 0.30; Cr 0.40; Mo 0.12
86xx	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20
87xx	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.25
88xx	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35
93xx	Ni 3.25; Cr 1.20; Mo 0.12
94xx	Ni 0.45; Cr 0.40; Mo 0.12
97xx	Ni 1.00; Cr 0.20; Mo 0.20
98xx	Ni 1.00; Cr 0.80; Mo 0.25
Nickel-molybdenum steels	
46xx	Ni 0.85, 1.82; Mo 0.20, 0.25
48xx	Ni 3.50; Mo 0.25
Chromium steels	
50xx	Cr 0.27, 0.40, 0.50, 0.65
51xx	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00, 1.05
50xxx	Cr 0.50; C 1.00 min.
51xxx	Cr 1.02; C 1.00 min.
52xxx	Cr 1.45; C 1.00 min.
Chromium-vanadium steels	
61xx	Cr 0.60, 0.80, 0.95; V 0.10, 0.15
Tungsten-chromium steels	
72xx	W 1.75; Cr 0.75
Silicon-manganese steels	
92xx	Si 1.40, 2.00; Mn 0.65, 0.82, 0.85; Cr 0.00, 0.65
High-strength low-alloy steels	
9xx	Various SAE grades
Boron steels	
xxBxx	B denotes boron steels
Leaded steels	
xxLxx	L denotes leaded steels

Πίνακας 2.1 : Τύποι κραμάτων χάλυβα με τις αναλογίες τους

2.8.2 Κράματα Αλουμινίου

Τα κράματα αλουμινίου έχουν χαμηλότερη πυκνότητα και χαμηλότερη αντοχή σε σύγκριση με τα κράματα χάλυβα, ωστόσο, έχουν καλύτερο λόγο αντοχής προς βάρος, δίνοντάς τους αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα βάρους, σε σχέση με τον χάλυβα. Οι πρώτες κατασκευές αλουμινίου έδειχναν ότι είναι πιο ευάλωτες στην καταπόνηση, είτε λόγω αναποτελεσματικότητας των κραμάτων, είτε λόγω ατελών τεχνικών συγκόλλησης που τότε χρησιμοποιούσαν.



Εικόνα 2.4: ποδήλατο KTM αλουμίνιο κράματος 6061

Προβλήματα δεν αντιμετωπίζουν τα κράματα χάλυβα και τιτανίου, τα οποία έχουν μεγαλύτερα όρια καταπόνησης (fatigue), ενώ γενικά είναι πιο εύκολη η συγκόλληση και η επιχάλκωσή τους. Μάλιστα, με την χρήση περισσότερο εξειδικευμένης εργασίας σήμερα, δύναται να παράγονται συγκολλήσεις καλύτερης ποιότητας κραμάτων αλουμινίου, εξασφαλίζοντας έτσι αντοχή και αξιοπιστία συγκρίσιμη με αυτή των χαλύβδινων σκελετών. Η ισορροπία αντοχής-βάρους που διαθέτει το αλουμίνιο σε σχέση με το χάλυβα, και ορισμένες μηχανικές του ιδιότητες, το καθιστούν ως ένα από τα προτιμώμενα υλικά για κατασκευή σκελετών (για παράδειγμα, ένας δυνατός αναβάτης, ο οποίος κάνει συχνά αναρρίχηση με ποδήλατο, μπορεί να προτιμήσει την ακαμψία του αλουμινίου).

Τα μειονεκτήματα του αλουμινένιου σκελετού είναι ότι δεν έχει την ίδια αίσθηση όπως ο χαλύβδινος σκελετός, η τραχύτητα κατά την οδήγηση, και η δυσκολία επιδιόρθωσης.

Μερικά δημοφιλή κράματα για σκελετούς ποδηλάτων είναι το αλουμίνιο 6061 και 7005 (6061 aluminum , 7005 aluminum). Σήμερα είναι πολύ δημοφιλείς

οι κατασκευές από κράματα αλουμινίου τα οποία συνδέονται με TIG συγκόλληση. Οι σκελετοί ποδηλάτων από αλουμίνιο να εμφανίζονται στην αγορά μόνο αφού αυτό το είδος της συγκόλλησης έγινε οικονομικό κατά την δεκαετία του 1970.

Το Αλουμίνιο έχει διαφορετικό βέλτιστο πάχος για τα τοιχώματα των σωλήνων σε σχέση με αυτούς από ατσάλι.

Η βέλτιστη αναλογία είναι περίπου 200:1, ενώ για τον χάλυβα είναι μόλις ένα μικρό κλάσμα αυτής της αναλογίας. Ωστόσο, με τη σχέση αυτή, το πάχος του τοιχώματος θα είναι πολύ μικρό άρα και ευάλωτο απέναντι σε κρούσεις. Έτσι οι σωλήνες αλουμινίου σχεδιάζονται ως υπερμεγέθεις, με αεροδυναμικά αποδεκτές αναλογίες και καλή αντοχή στην κρούση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πλαίσιο να είναι πολύ πιο σκληρό από το ατσάλι.

Ενώ πολλοί αναβάτες ισχυρίζονται ότι χαλύβδινα πλαίσια προσφέρουν μια ομαλότερη οδήγηση σε σχέση με το αλουμίνιο, επειδή οι σωλήνες αλουμινίου σχεδιάζονται ώστε να είναι πιο άκαμπτοι, ο ισχυρισμός αυτός είναι αμφίβολης ισχύος: το πλαίσιο του ποδηλάτου είναι εξαιρετικά άκαμπτο στην κάθετη κατεύθυνση γιατί είναι κατασκευασμένο από τρίγωνα, των οποίων οι πλευρές δεν αλλάζουν στο μήκος κάτω από την εφαρμογή τάσης. Επιπλέον, η πλευρική και η συστροφική (στρέψη) ακαμψία βελτιώνουν την επιτάχυνση και τον χειρισμό σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι σωλήνες αλουμινίου θεωρείται γενικά ότι έχουν μικρότερο βάρος από το χάλυβα, αν και αυτό δεν ισχύει πάντα.



Εικόνα 2.5 : Downtube αλουμίνιο και αθρακόνημα

Κάτω σωλήνας ή downtube από αλουμίνιο με εσοχές στις απολήξεις, συνδέεται με διπλά κάτω ψαλίδια (chain stay) από ανθρακονήματα. Τα τμήματα

από αλουμίνιο συγκολλώνται κατά TIG, ενώ τα τμήματα από ανθρακονήματα συνδέονται πάνω στα τμήματα του αλουμινίου.

Ένα οικονομικό πλαίσιο αλουμινίου μπορεί να είναι βαρύτερο από έναν ακριβό χαλύβδινο σκελετό. Οι ενισχυμένοι σωλήνες αλουμινίου, όπου το πάχος του τοιχώματος των μεσαίων τμημάτων είναι πιο λεπτό από τα τμήματα στις άκρες, χρησιμοποιούνται από ορισμένους κατασκευαστές για την εξοικονόμηση βάρους. Υλοποιούνται διάφορες γεωμετρίες σωλήνων που σκοπεύουν στην βελτίωση της ακαμψίας, της αεροδυναμικής και άλλων χαρακτηριστικών.

2.8.3 Τιτάνιο

Το Τιτάνιο είναι πιθανόν ένα από τα πιο ακριβά μέταλλα και χρησιμοποιούνται και αυτά για σωλήνες σκελετού ποδηλάτου. Συνδυάζει πολλά επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή αναλογία αντοχής-βάρους και η εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση.

Το υλικό παρουσιάζει ικανοποιητική δυσκαμψία (περίπου το ήμισυ αυτής του χάλυβα) και επιτρέπει σε πολλά πλαίσια του τιτανίου, να κατασκευάζονται με τυπικά μεγέθη σωλήνων, αν και οι μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνες χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά για περισσότερη ακαμψία.



Εικόνα 2.6 :Moots bike frame από Τιτάνιο

Το κόστος αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τους περισσότερους ποδηλάτες, αφού τα περισσότερα πλαίσια τιτανίου είναι πολύ πιο ακριβά από τα αντίστοιχα κράματος χάλυβα. Οι σωλήνες τιτανίου για σκελετούς σχεδόν πάντα συγκολλούνται με την τεχνική GasTungsten Arc Welding (GTAW ή TIG). Είναι πιο δύσκολη η επεξεργασία του σε σχέση με τον χάλυβα ή το αλουμίνιο, κάτι που

συνήθως αποθαρρύνει την χρήση του και την περιορίζει σε ολιγάριθμες εφαρμογές.



Εικόνα 2.7 :Χαρακτηριστικές συγκολλήσεις σε ένα σκελετό από τιτάνιο.

2.8.4 Ανθρακονήματα

Τα ανθρακονήματα είναι ένα είδος σύνθετων υλικών μη-μεταλλικό, το οποίο γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλές στην χρήση για σκελετούς ποδηλάτων.

Παρά το υψηλό κόστος του, είναι ελαφρύ, ανθεκτικό στη διάβρωση και ισχυρό, και μπορεί να πάρει οποιαδήποτε επιθυμητή μορφή.

Με την χρήση τους τα ανθρακονήματα επιτυγχάνουν τη σχεδίαση και τελειοποίηση σκελετών μέσω της διαδικασίας fine-tuning, ώστε αυτοί να αντιμετωπίζουν τις τάσεις και τις δυνάμεις σε συγκεκριμένα σημεία (όπως για παράδειγμα στην μεσαία τριβή λόγω των δυνάμεων pedaling). Παράλληλα, επιτρέπουν την ευελιξία σε άλλα τμήματα του πλαισίου.



Εικόνα 2.8 : Σκελετός Felt από ανθρακόνιμα, κατασκευή monocoque.

Επιπλέον, μπορούν να σχεδιαστούν σκελετοί από ανθρακονήματα οι οποίοι σε συγκεκριμένους σωλήνες είναι ανθεκτικοί σε ορισμένες αξονικές δυνάμεις (π.χ. στις κάθετες καταπονήσεις), ενώ συμπεριφέρονται πιο ελαστικά στις άλλες αξονικές δυνάμεις.

Η ικανότητα αυτή να σχεδιάζεται ένας μεμονωμένος σύνθετος σωλήνας με ιδιότητες που διαφέρουν ανάλογα με τον προσανατολισμό, δεν μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση άλλων κοινών μετάλλων. Αποτελεί δηλαδή μία μοναδική εξαιρετικής χρηστικότητας ικανότητα των ανθρακονημάτων. Ορισμένα πλαίσια από ανθρακονήματα χρησιμοποιούν κυλινδρικούς σωλήνες που ενώνονται με συγκολλήσεις και εξοχές όπως και στην μέθοδο μεταλλικού σκελετού lugged. Ένας άλλος τύπος πλαισίων από ίνες άνθρακα συντίθεται σε ένα ενιαίο κομμάτι, που ονομάζεται κατασκευή monocoque.

Παρόλο που αυτά τα σύνθετα υλικά παρέχουν μικρό βάρος και υψηλή αντοχή, έχουν πολύ μικρότερη αντοχή επίδρασης (impact resistance) και κατά συνέπεια είναι επιρρεπή σε ζημιές, εάν συντριβούν, είτε από λάθος χειρισμό τους. Έχει επιπλέον αναφερθεί ότι τα υλικά αυτά είναι ευάλωτα στο fatigue failure, δηλαδή κατά την παρατεταμένη και για μεγάλο χρονικό διάστημα χρήση τους.

Τα περισσότερα αγωνιστικά ποδήλατα κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά. Η ερμηνεία βρίσκεται στο γεγονός ότι μόνο με αυτά τα υλικά μπορεί να διαμορφωθεί πλαίσιο με αεροδυναμικό προφίλ, σε αντίθεση με απλά υλικά που θα έκαναν υπερβολικά βαρύ τον εκαστοτε σκελετό ποδηλάτου. Εκτός από τα ανθρακονήματα, υπάρχουν και άλλα εύχρηστα υλικά, όπως το μεταλλικό βόριο, το οποίο μπορεί να προστεθεί σε σημεία του σκελετού ώστε να ενισχύσει περαιτέρω την ακαμψία του. Ορισμένα νεότερα και επιτυχημένα μοντέλα σκελετών ενσωματώνουν ίνες Kevlar στις ίνες του άνθρακα, βελτιώνοντας το σύστημα απόσβεσης των κραδασμών και την αντοχή στις επιδράσεις, ιδιαίτερα στους σωλήνες downtubes στα ψαλίδια seat/chain.

FIBER TYPE	Filaments per tow	Tensile Strength		Tensil Modulus		Elongation	Yiel g/1000m	Density g/cm ³
		ksi	Mpa	Msi	Gpa			
T300	1K	512	3,560	33.4	230	1.5%	66	1.76
	3K						198	
	6K						396	
	12K						800	
T400H	3K	640	4,410	36.3	250	1.8%	198	1.80
	6K						396	
T700S	12K	711	4,900	33.4	230	2.1%	800	1.80
	24K						1650	
T800S	24K	853	5,880	42.7	294	2.0%	1030	1.80
T1000G	12K	924	6,370	42.7	294	2.2%	485	1.80
M35J	6K	683	4,700	49.8	343	1.4%	225	1.75
	12K						450	
M40J	3K	640	4,410	54.7	377	1.2%	113	1.77
	6K						225	
	12K						450	
M46J	6K	611	4,210	63.3	436	1.0%	223	1.84
	12K						445	
M50J	3K	597	4,120	69	475	0.8%	109	1.88
	6K						218	
M55J	6K	583	4,020	78.2	540	0.8%	218	1.91
M60J	3K	569	3,920	85.3	588	0.7%	103	1.93
	6K						206	
M30S	18K	796	5,490	42.7	294	1.9%	760	1.73
M40	1K	398	2,740	56.9	392	0.7%	61	1.81
	3K						182	
	6K						364	
	12K						728	

Πίνακας 2.3 : Πίνακας τυποποιημένων ανθρακονημάτων με τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά.

2.8.5 Μαγνήσιο

Ένα μικρό ποσοστό πλαισίων για ποδήλατο κατασκευάζεται από μαγνήσιο, το οποίο έχει μόλις το 64% της πυκνότητας του αλουμινίου. Στη δεκαετία του 1980, ο μηχανικός Frank Kirk, επινόησε έναν σκελετό ποδηλάτου που απαρτίζεται από δοκούς και όχι από σωλήνες. Η εταιρεία Kirk Precision Ltd ήταν η πρώτη εταιρία που ειδικεύτηκε στην κατασκευή ποδηλάτων δρόμου και βουνού με χρήση αυτής της τεχνολογίας. Ωστόσο, εκτός από μία μικρή αρχική εμπορική επιτυχία, αντιμετώπισε προβλήματα αξιοπιστίας και η παραγωγή τους σταμάτησε το 1992. Οι σύγχρονοι σκελετοί από μαγνήσιο υιοθετούν την κλασσική μέθοδο των σωλήνων.

Πληροφοριακά, ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα πλαίσια από μαγνήσιο είναι η διάβρωση, που προκαλείται από τη χημική

αντιδραστικότητα του μαγνησίου. Αν δεν λαμβάνεται μέριμνα κατά τη συναρμολόγηση του ποδηλάτου, είναι πιθανόν να υπάρξει γαλβανική διάβρωση σε σημεία, όπου χάλυβας ή αλουμίνιο έρθουν σε επαφή με το πλαίσιο.

2.8.6 Θερμοπλαστικά

Τα Θερμοπλαστικά, αναπτύχθηκαν αρχικά από "τη Ford Motor Company Scientific Research Laboratory» και την «General Electric». Η ATP καινοτόμησε με την χρήση των ανακυκλώσιμων θερμοπλαστικών σε εξαρτήματα αυτοκινήτων. Τέτοιου είδους εξαρτήματα χρησιμοποιούνται στο μοντέλο της Ford, Martin. Μία κοινή εφαρμογή με θερμοπλαστικά πλαίσια ποδηλάτων είναι η ενσωμάτωση ανθρακονημάτων σε θερμοπλαστικά υλικά. Από τις πρώτες εταιρίες που χρησιμοποίησαν σε μοντέλα ποδηλάτου αυτά τα υλικά είναι η GT Bicycles.

Τα ανθρακονήματα περιπλέκονται μαζί με ίνες πλαστικού σε έναν σωλήνα. Ο σωλήνας τοποθετείται σε ένα καλούπι όπου εκεί με φύσημα εξαναγκάζεται το υλικό να ακολουθήσει τα εσωτερικά τοιχώματα του καλουπιού. Αφού θερμανθεί και λιώσει το πλαστικό, έπειτα ψυχραίνεται και αφαιρείται από το καλούπι στην τελική του μορφή.

2.8.7 Συνδυασμοί υλικών

Μια πρόσφατη καινοτομία συνιστά η κατασκευή πλαισίων από σωλήνες διαφορετικών υλικών. Αυτό έχει ως σκοπό να παρέχει την επιθυμητή ακαμψία και απόσβεση σε διάφορους τομείς, γεγονός που δεν επιτυγχάνεται εύκολα με ένα και μόνο υλικό. Τα συνδυασμένα υλικά αποτελούν συνήθως κράμα ανθρακονήματος και μετάλλων, όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο ή το τιτάνιο. Μια εφαρμογή της συγκεκριμένης προσέγγισης περιλαμβάνει μεταλλικούς σωλήνες down tube και chain stays με ανθρακονηματικούς σωλήνες top tube, seat tube και seat stays. Σε άλλη εφαρμογή, τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται μόνο στα seat stays και οι υπόλοιποι σωλήνες είναι μεταλλικοί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Στατική ανάλυση κατασκευών

3.1 Εισαγωγή

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο ασχολείται με προβλήματα εύρεσης ισορροπίας σε κατασκευές, οι οποίες αποτελούνται από διάφορα συνδεδεμένα μεταξύ τους μηχανικά μέρη. Τα προβλήματα αυτά αφορούν, όχι μόνο τον προσδιορισμό των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στην δομή, αλλά και των δυνάμεων που συγκρατούν τα διάφορα μέρη της δομής. Από πλευράς συνολικής δομής οι ασκούμενες δυνάμεις είναι εσωτερικές. Παρακάτω αναφέρονται τρεις κατηγορίες μηχανικών δομών όπως :

Δικτυώματα: Σχεδιάζονται για να υποστηρίξουν τα φορτία και είναι στατικές και πλήρως περιορισμένες δομές. Τα δικτυώματα αποτελούνται από απλά μέλη που συνδέονται με αρθρώσεις στα άκρα του κάθε μέλους.

Πλαίσια: Σχεδιάζονται για την υποστήριξη φορτίων. Είναι εξίσου στατικές με τα δικτυώματα, πλήρως περιορισμένες δομές. Ωστόσο, τα πλαίσια περιέχουν τουλάχιστον ένα μέλος με πολλές δυνάμεις (ένα μέλος το οποίο υφίσταται τρεις ή περισσότερες δυνάμεις, οι οποίες δεν έχουν κατεύθυνση).

Μηχανισμοί: Διαμορφώνονται έτσι ώστε να μεταδίδουν και να τροποποιούν τις δυνάμεις και συνιστούν δομές που περιέχουν κινούμενα μέρη.

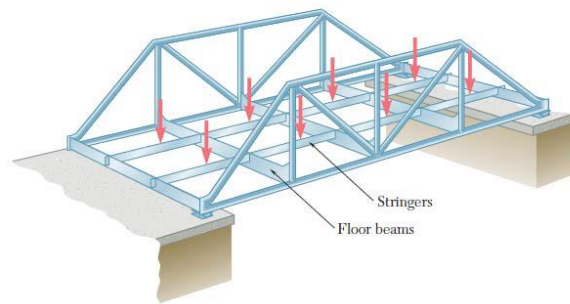
Ακόμη, στο κεφάλαιο εξετάζεται η αρχή διατήρησης ενέργειας, που αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν την ισορροπία πολυσύνθετων μηχανισμών.

3.2 Δικτυώματα

Το δικτύωμα είναι από τους σημαντικότερους τύπους μηχανικών κατασκευών. Παρέχει μια οικονομική και πρακτική λύση σε πολλά μηχανικά προβλήματα, ειδικά τον σχεδιασμό κτιρίων και γεφυρών. Αποτελείται από ευθέα μέλη που συνδέονται στις αρθρώσεις. Τα μέλη του δικτυώματος συνδέονται στα άκρα τους και μόνο, οπότε η ανάλυση των δικτυωμάτων αξιώνει ότι κάθε

άρθρωση είναι η αρχή και το τέλος ενός ή περισσότερων δοκών-μελών του δικτύωματος. Οι περισσότερες κατασκευές αποτελούνται από δικτύωματα, τα οποία ενώνονται και σχηματίζουν την μηχανική δομή. Το κάθε δικτύωμα σχεδιάζεται για να υποστηρίξει τα φορτία που ενεργούν στο επίπεδό του, επομένως πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μία διδιάστατη δομή.

Τα μέλη ενός δικτύωματος είναι λεπτά και υποστηρίζουν μικρή πλευρική φόρτιση. Όλα τα φορτία πρέπει να εφαρμόζονται στις αρθρώσεις, και όχι στα ίδια τα μέλη. Όταν ένα συγκεντρωμένο φορτίο πρέπει να εφαρμοστεί στο ενδιάμεσο μεταξύ δύο αρθρώσεων, ή όταν ένα κατανεμημένο φορτίο πρέπει να υποστηρίζεται από το δικτύωμα, όπως στην περίπτωση του δικτύωματος της γέφυρας, πρέπει να σχεδιαστεί ένα δικτύωμα δαπέδου, το οποίο μέσω των δοκών stringers και floor, θα μεταδίδει το φορτίο στις αρθρώσεις. Στο σχήμα 3.1 δίνεται απεικόνιση μίας τέτοιας κατασκευής, που χρησιμοποιεί δικτύωμα δαπέδου.

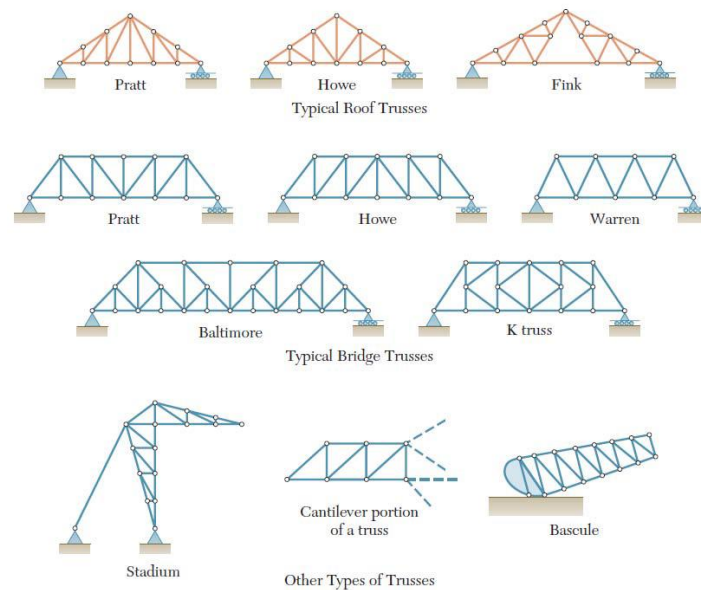


Σχήμα 3.1: Γέφυρα με χρήση δικτύωματος δαπέδου.

Το πρόβλημα ενός σκελετού ποδηλάτου σχετίζεται κατ' αναλογία με εκείνο ενός δικτύωματος, αν ληφθεί υπόψιν η αντιστοιχία των σωλήνων του ποδηλάτου με τις δοκούς του δικτύωματος. Το φορτίο που ασκείται σε ένα σκελετό ποδηλάτου είναι κατά βάση συγκεντρωμένο σε δυνάμεις που ασκούνται στο τιμόνι, στο πεντάλ και στο βάρος του αναβάτη.

Αναλογικά με το πρόβλημα ενός δικτύωματος, μπορεί να δοθεί αντίστοιχα στατική λύση και στο πρόβλημα ενός πλαισίου ποδηλάτου. Το βάρος της κάθε δοκού του δικτύωματος θεωρείται ότι πρέπει να εφαρμόζεται στις αρθρώσεις, με το ήμισυ του βάρους της κάθε δοκού να ασκείται σε καθεμία από τις δύο αρθρώσεις με τις οποίες αυτή συνδέεται. Παρόλο που οι πραγματικές δοκοί ενώνονται με συγκόλληση, με κοχλίες, ή με άλλους μηχανισμούς σύνδεσης,

συνήθως γίνεται η υπόθεση ότι οι δοκοί είναι μεταξύ τους καρφωμένες. Ως εκ τούτου, οι δυνάμεις που ενεργούν σε κάθε απόληξη της δοκού καταλήγουν σε μία και μόνο δύναμη και όχι σε περισσότερες.



Σχήμα 3.2: Τύποι δικτυωμάτων

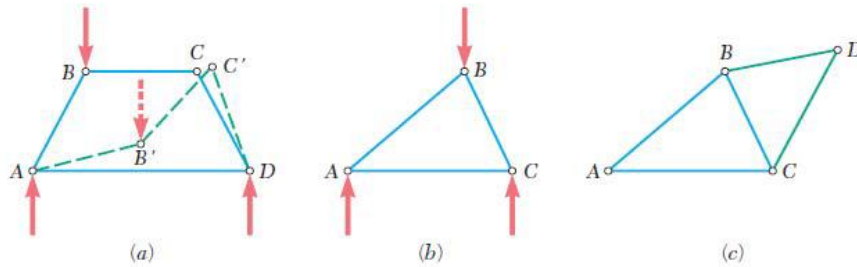
3.2.1 Απλό δικτύωμα

Παρακάτω έχει επιλεγεί να παρουσιαστεί ένα συγκεκριμένο παράδειγμα ενός απλού δικτυώματος :

Εφαρμόζεται φορτίο στο σημείο B, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3α. Το δικτύωμα θα υποστεί σημαντική παραμόρφωση και θα χάσει την αρχική του μορφή. Αντίθετα, το δικτύωμα του σχήματος 3.3b, το οποίο αποτελείται από τρεις συνδεδεμένες δοκούς στα σημεία A, B και Γ, θα παραμορφωθεί μόνο μερικώς λόγω του φορτίου που εφαρμόζεται στην άρθρωση B. Η παραμόρφωση που θα υποστεί το δικτύωμα είναι η μικρή αλλαγή του μήκους των δοκών λόγω θλίψεως. Το δικτύωμα του σχήματος 3.3b ονομάζεται σταθερό δικτύωμα, εννοώντας ότι το δικτύωμα δεν καταρρέει κάτω από την επίδραση της δύναμης.

Όπως φαίνεται στο σχήμα. 3.3c, με την προσθήκη των δύο δοκών BD και CD μπορεί να κατασκευαστεί ένα μεγαλύτερο σε σχέση με το προηγούμενο σταθερό δικτύωμα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές και το προκύπτον δικτύωμα θα είναι ομοίως σταθερό, αν κάθε φορά τα δύο νέα μέλη

που προστίθενται, συνδέονται σε δύο υπάρχουσες αρθρώσεις και σχηματίζουν μία νέα. Τα δικτυώματα που προκύπτουν με αυτήν την νέα διαδικασία ονομάζονται απλά δικτυώματα.

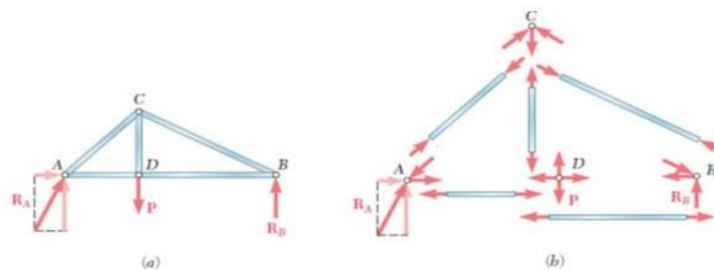


Σχήμα 3.3 : Απλό δικτύωμα

3.2.2 Μέθοδος των αρθρώσεων

Το δικτύωμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο από δοκούς που ασκούν τουλάχιστον δύο δυνάμεις και καταλήγουν σε αρθρώσεις. Στο σχήμα 3-4a έχει σχεδιαστεί το διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός δικτυώματος, του οποίου οι ασκούμενες από τις δοκούς εσωτερικές δυνάμεις αναλύονται περαιτέρω στο σχήμα 3-4b. Όπως γίνεται αντιληπτό, κάθε δοκός υφίσταται δύο δυνάμεις (μία σε κάθε άκρο), οι οποίες είναι ισόμετρες, με τον ίδιο άξονα και με αντίθετη κατεύθυνση.

Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, οι δυνάμεις δράσης και αντίδρασης σε μία δοκό και μία άρθρωση είναι ίσες και αντίθετες. Οι δυνάμεις που ασκούνται από μία δοκό στις δύο της αρθρώσεις πρέπει να είναι ομοαξονικές με την ίδια την δοκό, και να είναι ίσες και αντίθετες. Η ανάλυση του δικτυώματος περιορίζεται στον υπολογισμό των δυνάμεων στις δοκούς, και στον καθορισμό της παραμόρφωσης που υφίστανται, εάν είναι θλιπτική ή εφελκυστική η παραμόρφωση.



Σχήμα 3-4 : Διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός δικτυώματος με την μέθοδο των αρθρώσεων.

Με δεδομένο ότι το σύνολο του δικτύματος βρίσκεται σε ισορροπία, η κάθε ξεχωριστή άρθρωση θα είναι εξίσου σε ισορροπία. Επομένως, αν το δίκτυμα έχει n αρθρώσεις, δημιουργούνται, συνεπαγωγικά, $2n$ εξισώσεις για την εύρεση $2n$ αγνώστων. Στην περίπτωση του απλού δικτύματος προκύπτει $m = 2n - 3 \leftrightarrow 2n = m + 3$ αρθρώσεις, άρα και εξισώσεις. Ο αριθμός των αγνώστων που μπορούν να επιλυθούν θα είναι $m + 3$. Αυτό σημαίνει ότι οι δυνάμεις σε όλες τις δοκούς (για το παράδειγμα), οι συνιστώσες της αντίδρασης RA και η αντίδραση RB μπορούν να υπολογισθούν με τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος των αρθρώσεων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να προσδιοριστούν όλες οι άγνωστες εσωτερικές δυνάμεις, ώστε να προκύψει μία πλήρης προσέγγιση του στατικού προβλήματος του δικτύματος.

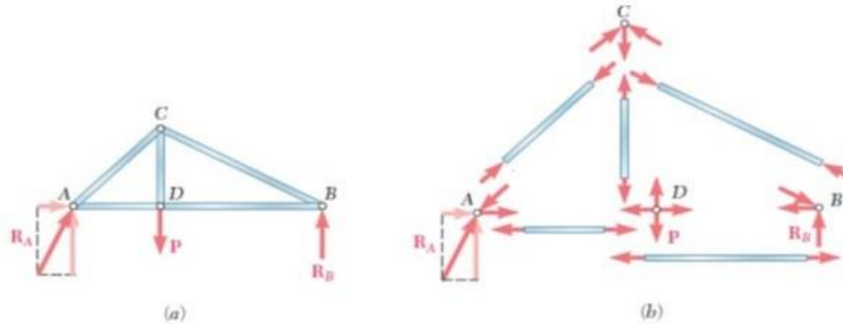
3.2.3 Μέθοδος των τμημάτων

Η μέθοδος των αρθρώσεων είναι πιο αποτελεσματική όταν υπολογίζονται όλες οι δυνάμεις στις δοκούς. Εάν, ωστόσο, υπολογιστεί μόνο ένα μέρος αυτών των δυνάμεων, είναι πιο αποτελεσματικό να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των τμημάτων. Για παράδειγμα, έστω ότι χρειάζεται να καθοριστεί η δύναμη στην δοκό BD του δικτύματος του σχήματος 3.5. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να καθοριστούν οι δυνάμεις, στις οποίες η δοκός BD ασκεί στις αρθρώσεις B και D. Αν χρησιμοποιόταν η μέθοδος των αρθρώσεων, θα επιλεγόταν η άρθρωση B ή D ως ελεύθερο σώμα.

Ωστόσο, είναι δυνατόν να επιλεγθεί ένα μεγαλύτερο τμήμα του δικτύματος, το οποίο θα αποτελείται από διάφορες αρθρώσεις και δοκούς, υπό την προϋπόθεση ότι η άγνωστη δύναμη είναι εξωτερική σε σχέση με αυτό το τμήμα που θα επιλεγθεί.

Εάν, επιπλέον, επιλεγθεί κατάλληλα το τμήμα του δικτύματος, έτσι ώστε να υπάρχουν μόνο τρεις άγνωστες δυνάμεις, η επιθυμητή δύναμη μπορεί να ευρεθεί με την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας για το συγκεκριμένο τμήμα του δικτύματος. Στην πράξη, το τμήμα του δικτύματος λαμβάνεται μέσω του διαχωρισμού των τριών δοκών του δικτύματος, έτσι ώστε να προκύψουν δύο ξεχωριστά τμήματα, τα οποία στην συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως

ελεύθερα σώματα. Η επίλυση με αυτήν την μέθοδο μειώνει τις απαραίτητες για υπολογισμό εξισώσεις και περιορίζει το πρόβλημα εύρεσης μόνο κάποιων επιθυμητών δυνάμεων.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος ενός δικτυώματος με την μέθοδο των τμημάτων.

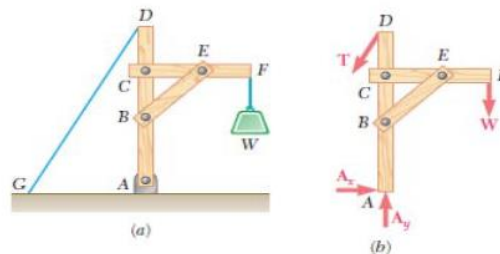
3.6 Πλαίσιο

Τα πλαίσια είναι δομές που περιέχουν δοκούς με πολλαπλές δυνάμεις. Τα πλαίσια επίσης σχεδιάζονται για να υποστηρίξουν φορτία και συνήθως είναι πλήρως περιορισμένες κατασκευές. Για την περιγραφή της ανάλυσης ενός πλαισίου στη συνέχεια παρατίθεται το παράδειγμα ενός γερανού:

Έστω ότι υπάρχει ένα διάγραμμα ελεύθερου σώματος ενός πλαισίου όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6b'. Το διάγραμμα χρησιμεύει στον καθορισμό των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο πλαίσιο. Καταρχήν υπολογίζεται η δύναμη T που ασκείται από το καλώδιο, και έπειτα υπολογίζονται οι συνιστώσες A_y και A_x (στην πάκτωση A). Για να καθοριστούν οι εσωτερικές δυνάμεις που συγκρατούν τα διάφορα μέρη του πλαισίου, στην συνέχεια πραγματοποιείται απομόνωση των μερών του πλαισίου και σχεδίαση του διαγράμματος του ελεύθερου σώματος για καθένα από τα τμήματα του πλαισίου. Η δοκός BE θα πρέπει να διαθέτει δυνάμεις ίδιου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης, επομένως κατανέμονται κατά μήκος της δοκού.

Στην συνέχεια θα επιβεβαιωθεί ότι οι δύο δυνάμεις είναι του ίδιου μέτρου. Κατόπιν οι υπόλοιποι δοκοί υφίστανται τουλάχιστον τρεις δυνάμεις. Σύμφωνα με τον 3ο νόμο του Newton, η δύναμη που ασκείται από την δοκό BE στην δοκό

AD, θα πρέπει να είναι ίδιου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης σε σχέση με την δύναμη της δοκού AD στην BE. Ομοίως για την δοκό BE στην CF. Επομένως οι δυνάμεις που ασκεί η δοκός BE στις AD και CF είναι αντιστοίχως ίσες με $-F_{BE}$ και F_{BE} .



Σχήμα 3-7 : Διάγραμμα ελεύθερου σώματος ενός πλαισίου γερανού

Στην άρθρωση C συνδέονται δύο δοκοί με πολλαπλές δυνάμεις. Εφόσον δεν είναι γνωστό ούτε το μέγεθος ούτε και η φορά της δύναμης, θα σχεδιάσουν οι δύο άγνωστες συνιστώσες X και Y όπως στο σχήμα. Ομοίως με την χρήση του 3ου νόμου του Νεύτωνα, οι δυνάμεις που ασκούνται από την δοκό CF στην AD και αντίθετως θα είναι ίσες και αντίθετες. Τα διαγράμματα ελεύθερου σώματος των δοκών με πολλαπλές δυνάμεις ολοκληρώνονται με την σχεδίαση των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο πλαίσιο.

Οι εσωτερικές δυνάμεις σε αυτό το σημείο υπολογίζονται από το διάγραμμα ελεύθερου σώματος ενός από τις δύο δοκούς με πολλαπλές δυνάμεις. Η δοκός CF για παράδειγμα μας δίνει τις εξισώσεις $\Sigma M_C = 0$, $\Sigma M_E = 0$ και $\Sigma F_X = 0$, από τις οποίες προκύπτουν τα μεγέθη F_{BE} , C_y , και C_x αντιστοίχως. Οι τιμές αυτές μπορούν να ελεγχθούν με τον έλεγχο ότι η δοκός AD βρίσκεται σε ισορροπία. Εδώ επιπλέον θεωρήθηκε ότι οι αρθρώσεις του προβλήματος ήταν εσωτερικές των δοκών, και ότι δεν χρειαζόταν η σχεδίαση του ΔΕΣ για αυτές. Η υπόθεση αυτή πολλές φορές απλοποιεί το πρόβλημα χωρίς απώλεια της γενικότητας. Ωστόσο όταν μία άρθρωση συνδέει πολλαπλούς δοκούς ή όταν σε αυτήν ασκείται δύναμη μπορεί και να χρειαστεί η σχεδίαση για αυτήν Δ,Ε,Σ.

Το πλαίσιο του προβλήματος λόγω του σχήματος μπορεί να διατηρηθεί ακόμα και αν χάσει τις στηρίξεις του οπότε και θεωρείται στέρεο ως πλαίσιο.

Πολλά ωστόσο πλαίσια δεν διατηρούν το σχήμα τους με την απώλεια των στηρίξεων τους για αυτό και ονομάζονται μη-στερεά.

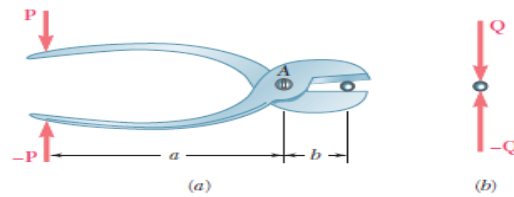
Το γενικό πρόβλημα στην ανάλυση των πλαισίων ξεκινά από την αναγνώριση των άγνωστων δυνάμεων ή συνιστωσών και την εύρεση των εξισώσεων ισορροπίας. Εάν αυτοί οι άγνωστοι μπορούν να προσδιοριστούν και οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να ικανοποιηθούν, τότε το πλαίσιο είναι στατικά προσδιορισμένη και στερεή (determinate and rigid). Ο προσδιορισμός αυτός συνήθως επιτυγχάνεται με τα διαγράμματα ελεύθερου σώματος για κάθε μηχανικό μέρος του πλαισίου, στα οποία υπολογίζονται οι αντιδράσεις και οι εσωτερικές δυνάμεις. Επιπλέον καθορίζεται ο αριθμός των ανεξάρτητων εξισώσεων ισορροπίας. Εάν υπάρχουν περισσότεροι άγνωστοι από εξισώσεις, η κατασκευή θεωρείται απροσδιόριστη στατικά. Εάν οι εξισώσεις είναι περισσότερες από τους αγνώστους η κατασκευή είναι μη στέρα. Εάν τέλος λόγω κάποιου ανακριβούς προσδιορισμού των δοκών και των αρθρώσεων, δεν μπορούν να καθοριστούν όλοι οι άγνωστοι και δεν μπορούν ακόμη να ικανοποιηθούν όλες οι εξισώσεις, τότε η κατασκευή θεωρείται απροσδιόριστη και μη στερεή.

3.6 Μηχανισμοί

Οι μηχανισμοί είναι κατασκευές που σχεδιάζονται για την μετάδοση και την μετατροπή δυνάμεων. Είτε αυτοί είναι απλά εργαλεία είτε πιο πολύπλοκοι μηχανισμοί, ο κύριος σκοπός τους είναι να μετατρέπουν τις δυνάμεις εισόδου σε δυνάμεις εξόδου. Θεωρώντας το παράδειγμα ενός κόπτη καλωδίων του σχήματος 3.8, η άσκηση δύο ίσων και αντίθετων κατά φορά δυνάμεων έστω P and $-P$ στα χερούλια, θα προκαλέσουν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις Q και $-Q$ στο καλώδιο.

Για να καθοριστεί το μέγεθος Q των δυνάμεων εξόδου, όταν το είναι γνωστό το μέγεθος P των δυνάμεων εισόδου (ή, αντίστροφα, για τον καθορισμό του P όταν το Q είναι γνωστό), σχεδιάζεται ένα διάγραμμα ελεύθερου σώματος του κόπτη καλωδίων. το οποίο δείχνει τις δυνάμεις εισόδους P και $-P$ και τις αντιδράσεις $-Q$ και Q που το καλώδιο ασκεί στην πένσα. Ωστόσο, επειδή ο κόπτης αποτελεί μία μη στερεή δομή, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα από τα

μηχανικά του μέρη, ως ελεύθερο σώμα προκειμένου να καθοριστούν οι άγνωστες δυνάμεις. Λαμβάνοντας υπόψη το παράδειγμα του σχήματος 3.8, στο σημείο Α θα προκύψει η εξίσωση $Pa = Qb$, η οποία καθορίζει το μέγεθος Q σε σχέση με το P ή το P σε σχέση με το Q . Το ίδιο διάγραμμα ελεύθερου σώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστούν οι συνιστώσες της εσωτερικής δύναμης στο σημείο Α. Βρίσκουμε ότι $A_x = 0$ και $A_y = P + Q$.



Σχήμα 3.8 : Δυνάμεις εισόδου και εξόδου σε έναν κόπτη

Στην περίπτωση των πιο πολύπλοκων μηχανισμών, θα είναι απαραίτητη η χρήση αρκετών διαγραμμάτων ελεύθερου σώματος και, ενδεχομένως, την λύση εξισώσεων που αφορούν τις εσωτερικές δυνάμεις. Θα πρέπει να συμπεριληφθούν στους ελεύθερους φορείς οι δυνάμεις εισόδου και οι αντιδράσεις στις δυνάμεις εξόδου. Επιπλέον θα πρέπει να υπολογιστεί ο συνολικός αριθμός των αγνώστων συνιστωσών δύναμης ο οποίος δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τον αριθμό των διαθέσιμων ανεξάρτητων εξισώσεων. Είναι χρήσιμο, να καθοριστεί εκ των προτέρων πριν την λύση του προβλήματος αν η εξεταζόμενη δομή είναι ορισμένη. Όσον αφορά την ακαμψία (rigidity) του μηχανισμού, αυτή είναι δεδομένη, δεδομένου ότι μια μηχανή περιλαμβάνει κινούμενα μέρη και κατά συνέπεια, πρέπει να είναι μη στερεή.

3.4 Αρχής Διατήρησης Ενέργειας

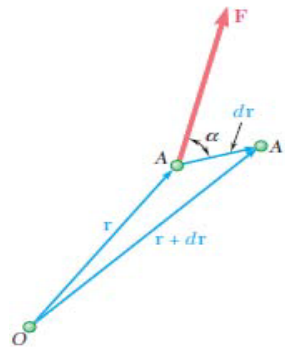
Ακολουθεί μια διαφορετική μέθοδος, η οποία είναι και πιο αποτελεσματική στην επίλυση ορισμένων τύπων προβλημάτων ισορροπίας. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην αρχή της διατήρησης της ενέργειας και εισήχθη για πρώτη φορά από τον Ελβετό μαθηματικό Jean Bernoulli.

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας, υποστηρίζει ότι δεδομένου ενός

μηχανικού τμήματος η στερεού σώματος ή γενικότερα ενός συστήματος συνδεδεμένων φορέων το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία υπό την άσκηση εξωτερικών δυνάμεων, εάν σε αυτό το σύστημα φορέων ασκηθεί μία αυθαίρετη μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας, το συνολικό έργο των εξωτερικών δυνάμεων κατά τη διάρκεια της μετατόπισης είναι μηδέν. Η αρχή αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται στην επίλυση προβλημάτων που αφορούν την ισορροπία μηχανισμών που αποτελούνται από πολλά συνδεδεμένα μέλη. Η αρχή αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και για τον υπολογισμό της δυναμικής ενέργειας.

Το έργο μία δύναμης.

Αρχικά είναι χρήσιμο να προσδιοριστούν οι όροι μετατόπιση και έργο όπως χρησιμοποιούνται στην μηχανική. Ένα σωματίδιο που κινείται από ένα σημείο A σε ένα γειτονικό σημείο A' όπως στο σχήμα 3.9. Εάν το r συμβολίζει το διάνυσμα θέσης που αντιστοιχεί στο σημείο A, το μικρό διάνυσμα που ενώνει το A και A' θα συμβολίζεται από το διαφορικό dr διαφορικό. Το διάνυσμα dr ονομάζεται μετατόπιση του σωματιδίου. Τώρα, έστω ότι μια δύναμη F επενεργεί στο σωματίδιο. Το έργο της δύναμης F που αντιστοιχεί στη μετατόπιση dr ορίζεται ως η ποσότητα:



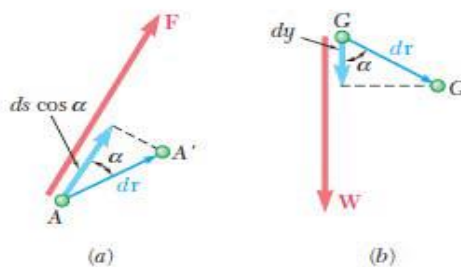
Σχήμα 3.9 : Μετατόπιση AA' λόγω δύναμης F.

$$dU = F \cdot dr$$

Είναι δηλαδή το γινόμενο της δύναμης F και της μετατόπισης dr. Δηλώνοντας ως F και ds αντίστοιχα τα μεγέθη της δύναμης και της μετατόπισης, και με α την γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα F με το dr, θα έχουμε :

$$dU = F \cdot ds \cdot \cos \alpha$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι το έργο αν εκφράζεται σε αμερικανικές τυποποιημένες μονάδες θα είναι ίσο με $ft \cdot lb$ ή αλλιώς ως $in \cdot lb$, ενώ στο σύστημα μονάδων SI θα εκφράζεται σε μονάδες $N \cdot m$. Η μονάδα αυτή ονομάζεται και joule (J). Όπως προκύπτει από την γωνιακή εξίσωση το έργο dU είναι θετικό εάν η γωνία α είναι οξεία και αρνητικό εάν η γωνία είναι αμβλεία. Τρεις ειδικές περιπτώσεις χρειάζονται προσοχής. Αν για παράδειγμα η δύναμη F έχει την ίδια κατεύθυνση με το διάνυσμα dr , το έργο dU γίνεται $ds \cdot F$. Αν το διάνυσμα F έχει κατεύθυνση αντίθετη με εκείνη του dr , το έργο θα ισούται με $dU = -F \cdot ds$. Τέλος, εάν το F είναι κάθετο ως προς το dr , το έργο dU θα είναι μηδέν. Το έργο dU μιας δύναμης F κατά τη διάρκεια μιας μετατόπισης dr μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως το γινόμενο του F και της συνιστώσας $ds \cdot \cos \alpha$ της μετατόπισης dr κατά μήκος του διανύσματος F . Αυτή η άποψη είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό του έργου που δημιουργεί ένα βάρος W ενός σώματος.



Σχήμα 3.10

Το έργο της W είναι ίσο με το γινόμενο του W και της κατακόρυφης μετατόπισης dy του κέντρου βάρους G του σώματος. Εάν η μετατόπιση είναι προς τα κάτω, το έργο είναι θετικό ενώ αν είναι προς τα πάνω, το έργο είναι αρνητικό. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις δυνάμεων στην στατική οι οποίες δεν παράγουν έργο: οι δυνάμεις που ασκούνται σε σταθερά σημεία ($ds=0$) ή που ενεργούν σε μια κατεύθυνση κάθετη προς την μετατόπιση ($\cos \alpha = 0$). Μεταξύ αυτών των δυνάμεων είναι και η αντίδραση μιας άρθρωσης χωρίς τριβές, όταν το σώμα που υποστηρίζεται, περιστρέφεται σε σχέση με την άρθρωση. Επίσης η αντίδραση σε μια επιφάνεια χωρίς τριβές όταν το σώμα κινείται επιφανειακά και κατά μήκος της επιφάνειας, το βάρος ενός σώματος όταν το κέντρο βάρους του

κινείται οριζόντια και η δύναμη τριβής που δημιουργείται σε μια κυλιόμενη αλλά μη ολισθήσα ρόδα (δεδομένου ότι ανά πάσα στιγμή το σημείο επαφής δεν κινείται).

Τα παραδείγματα δυνάμεων που κάνουν έργο είναι το βάρος ενός σώματος (εκτός των παραπάνω αναφερθέντων περιπτώσεων), η δύναμη τριβής που ενεργεί σε ένα σώμα το οποίο γλιστράει σε μια τραχιά επιφάνεια, οι δυνάμεις που ασκούνται σε έναν σκελετό ποδηλάτου όπως αυτό που εξετάζει η εργασία και γενικότερα οι περισσότερες δυνάμεις που εφαρμόζονται σε ένα κινούμενο σώμα. Τέλος σε ορισμένες περιπτώσεις, το συνολικό έργο που προκαλούν οι δυνάμεις είναι μηδέν για παράδειγμα όταν δύο δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα έχουν την ίδια κατεύθυνση εφαρμογής αντίθετη φορά και μέτρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

4.1 Εισαγωγή

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

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

Η κυρίαρχη μέθοδος CAE είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

4.2 Ορισμός CAD

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού. Με τον όρο CAD εννοούμε τη δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Προφανώς δεν περιοριζόμαστε στην γνωστή διαδικασία αντικατάστασης του drafting, δηλ. του δισδιάστατου (2-D) παραδοσιακού σχεδίου του μηχανικού, αλλά κυρίως στην περίπτωση τρισδιάστατης (3-D) απεικόνισης κατασκευών ή δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών (μέσω των παρεμβολών Coons, Bezier και Nurbs) ή/και όγκων. Έτσι, είναι πολύ ευκολότερη και ελέγξιμη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος μέχρις ότου ο μελετητής καταλήξει σε μία καταρχήν αποδεκτή κατασκευαστική λύση. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD διαθέτουν κατάλληλα φίλτρα - interfaces (DXF, IGES, STEP) που δίνουν τη δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο (εναλλαξιμότητα).

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

4.3 Ορισμος CAE

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

λ.χ. τα οχήματα ή συσκευασιών σε πτώση επί του εδάφους.

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

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

Η γοητεία των μεθόδων ανάλυσης και βελτιστοποίησης είναι ότι επιτρέπουν στον μηχανικό να δει τον τρόπο με τον οποίο το προϊόν θα συμπεριφερθεί και του επιτρέπει να επισημάνει τα όποια λάθη έχουν γίνει μέχρι

τη στιγμή εκείνη, προτού προχωρήσει σε χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου φυσικών πρωτοτύπων. Επειδή το κόστος μελέτης μεταβάλλεται εκθετικά στα τελευταία στάδια ανάπτυξης και παραγωγής του προϊόντος, η πρόωμη βελτιστοποίηση και εξευγενισμός που επιτυγχάνεται από την ανάλυση CAE τελικά αποπληρώνεται με μείωση χρόνου και κόστους.

4.4 Μέθοδος των 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 κρισιμότερες αποφάσεις είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από την διαθέσιμη βιβλιοθήκη στοιχείων. Επιπρόσθετα, το πλήθος των στοιχείων (με άλλα λόγια το μέσο μέγεθος των στοιχείων) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού. Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων (στην h version) ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (στην p version), τόσο ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή είναι η επίλυση. Οι διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων εισάγονται παρακάτω. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατοώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (solid modeling).

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

Σημειώσεις:

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

4.4.1 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.

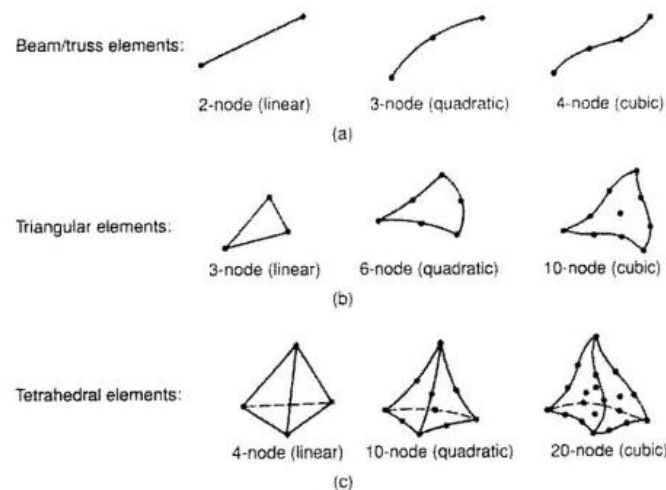
Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση).

Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να αντανακλάται αυτόματα στο πλέγμα.

Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης

πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν.

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



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

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

προσέγγισης της γεωμετρίας του μοντέλου CAD.

Χρησιμοποιώντας χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας, ο σχεδιαστής μπορεί να πάρει γρήγορα αποτελέσματα ανάλυσης στο προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού.

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ., στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Επίσης, οι άγνωστοι ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους.

Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οριακές συνθήκες όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου.

Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα.

Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, και ο λόγος του Poisson (για ελαστικές κατασκευές). Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις.

Άλλες ιδιότητες υλικών περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα, κλπ),

ιξωδοελαστικότητα, κλπ, για άλλου τύπου προβλήματα. Γίνεται μόνο μια απλή παραδοχή: σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Αυτό λ.χ. δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναλύσει ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό.

Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάλυση σύνθετων υλικών είναι η διαχείριση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων προκειμένου να υπολογισθεί η αποκόλληση (delamination).

Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (post-processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών «ισοτασικών» επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας. Στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης όλα τα πακέτα διαθέτουν animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιόμορφων ταλάντωσης όσον και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων.

Επίσης, πολλά συστήματα διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, σαν κείμενα, παρουσιάσεις, videos, e-mail, ή αποστολή στο διαδίκτυο.

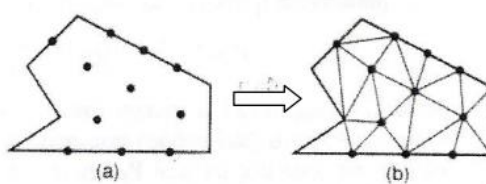
4.4.2 Αυτόματη γένεση πλέγματος

Η γένεση πλέγματος συνεπάγεται τη δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Περιλαμβάνει επίσης την αυτόματη αρίθμηση των κόμβων και στοιχείων βασισμένων στην ελάχιστη αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Έτσι, υποτίθεται ότι οι μέθοδοι αυτόματης γένεσης πλέγματος απαιτούν μόνο το γεωμετρικό μοντέλο (γεωμετρία και τοπολογία) του προς διακριτοποίηση αντικειμένου, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος όπως πυκνότητα πλέγματος και

τύπος στοιχείου, και τις οριακές συνθήκες, περιλαμβάνοντας σαν είσοδο συνθήκες φόρτισης. Άλλες μέθοδοι που απαιτούν πρόσθετη είσοδο, όπως υποδιαίρεση του αντικειμένου σε υποχωρία ή υποπεριοχές, ταξινομούνται σαν ημιαυτόματες μέθοδοι. Εν συντομία, οι μέθοδοι γένεσης πλέγματος εισάγονται με βάση την ταξινόμηση που πρότεινε ο Ho-Le (1988).

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

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



Σχήμα 4.2: μέθοδος σύνδεσης κόμβων

Γένεση κόμβων: Δημοσιευμένα έργα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα :

Μέθοδος του Cavendish (1974)

Σε αυτή τη μέθοδο, εισάγονται αρχικά κόμβοι στο σύνορο του αντικειμένου με το χέρι του χρήστη (manually). Κατόπιν οι εσωτερικοί κόμβοι γεννώνται αυτόματα έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος.

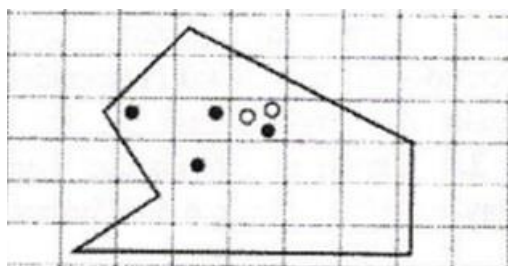
Το αντικείμενο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος ζωνών διαφορετικών επιθυμητών μεγεθών στοιχείων. Στη ζώνη i , υπερτίθεται ένα τετραγωνικό grid βήματος $r(i)$. Το Σχήμα 4.3 δείχνει ένα υπερτιθέμενο μονό grid, που βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος. Για κάθε τετράγωνο του grid, γεννιέται με τρόπο τυχαίο ένας εσωτερικός κόμβος. Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1 δύο φορές, μια για την κατεύθυνση x και μια για την κατεύθυνση y , και υπολογίζοντας την

ισοδύναμη θέση των τιμών x και y .

Εάν ο παραγόμενος κόμβος πέφτει μέσα στο αντικείμενο και έχει απόσταση από το σύνορο μεγαλύτερη από το $r(i)$, αλλά και από τους προηγούμενα παραγόμενους κόμβους, τότε γίνεται αποδεκτός. Εάν όχι, ένας άλλος κόμβος παράγεται τυχαία και ελέγχεται. Εάν δεν καταστεί δυνατόν να βρεθεί ένας αποδεκτός κόμβος μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών (ας πούμε, πέντε), τότε το εν λόγω τετράγωνο παραλείπεται και θεωρείται το επόμενο. Η μέθοδος αυτή είναι επεκτάσιμη και στις 3 διαστάσεις, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται τρισδιάστατο grid.

Μέθοδος του Shimada (1992)

Αυτή η μέθοδος γεμίζει το εσωτερικό του προς διακριτοποίηση αντικειμένου με «φυσαλίδες» όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, και λαμβάνει τα κέντρα τους σαν κόμβους. Το μέγεθος κάθε φυσαλίδας 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 4.3: Μέθοδος γένεσης κόμβων κατά Cavendish

Γένεση στοιχείων: Σε αυτή τη δεύτερη φάση, κόμβοι που γεννήθηκαν στην προηγούμενη φάση συνδέονται για να αποτελέσουν στοιχεία έτσι ώστε να μην επικαλύπτονται και να καλύπτεται ολόκληρο το χωρίο. Γίνεται αναφορά 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, παρατίθενται στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους.

- ***Μέθοδος Lee (1983)***

Σε αυτή τη μέθοδο, επί του αντικειμένου υπερτίθεται ένα τετραγωνικό

πλέγμα υποβάθρου (grid), του οποίου το βήμα είναι ίσο προς το επιθυμητό μέγεθος στοιχείων. Κατόπιν οι κόμβοι που παρήχθησαν στην προηγούμενη φάση συσχετίζονται με τα κελιά του πλέγματος υποβάθρου. Τα κελιά και οι αντίστοιχοι κόμβοι επισκέπτονται στήλη-προς-στήλη από αριστερά προς τα δεξιά και, μέσα στην ίδια στήλη, από τα κάτω προς τα πάνω. Μέσα σε ένα κελί, οι κόμβοι διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τετμημένης x . Κόμβοι με την ίδια τετμημένη x , διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τεταγμένης y . Οι κόμβοι επισκέπτονται κατά σειρά και, για κάθε κόμβο, οι γειτονικοί κόμβοι βρίσκονται έτσι ώστε να διαμορφώνουν τους κόμβους ενός καλοσχηματισμένου τετραπλεύρου. Στην περίπτωση αδυναμίας σχηματισμού καλώς ορισμένου τετραπλεύρου, δημιουργείται αντίστοιχο τριγωνικό στοιχείο.

- **Μέθοδος τριγωνοποίησης Delaunay.**

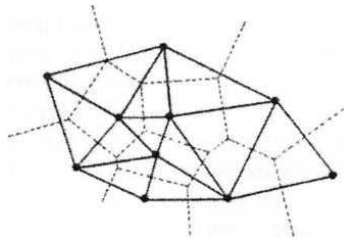
Αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος γένεσης τριγώνων που συνδέει δεδομένους κόμβους διότι μεγιστοποιεί το άθροισμα των μικρότερων γωνιών σε όλα τα τρίγωνα που δημιουργούνται. Έτσι, αποφεύγονται τα λεπτά τρίγωνα.

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

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

όπου $|\dots|$ 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 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, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας τριγωνικών (τετραεδρικά, στις 3 διαστάσεις) στοιχείων σύνδεσης με

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.



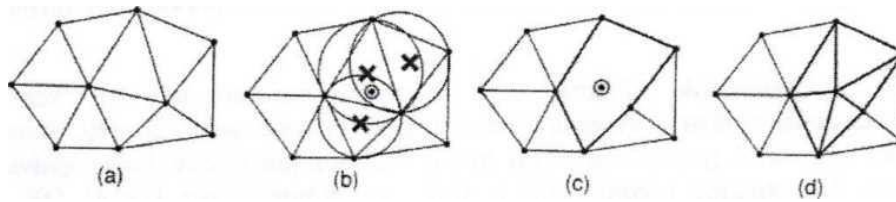
Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay

Η τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το δεδομένο σύνολο σημείων (κόμβων) χωρίς να είναι απαραίτητη πρώτα να έχει γίνει το διάγραμμα Voronoi, με χρήση του αλγόριθμου του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, και ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει καθόλου άλλα σημεία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται ως ακολούθως. Στην αρχή διαμορφώνεται ένα τρίγωνο T_0 , που περιέχει όλους τους κόμβους, ενώ μπορεί να πρέπει να εισαχθούν επιπλέον σημεία στις κορυφές του T_0 . Στην περίπτωση αυτή εισάγονται κόμβοι από ένα δεδομένο σύνολο και ο περιγεγραμμένος κύκλος των τριγώνων που προκύπτουν περικλείει τον κόμβο.

Αυτά τα πολύγωνα, που ονομάζονται τεμνόμενα πολύγωνα (intersection polygons), απαλείφονται. Στο Σχήμα 3.5 (b), τα τεμνόμενα πολυώνυμα συμβολίζονται με χ όταν ένας νέος κόμβος O 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 τον 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 4.5: Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson

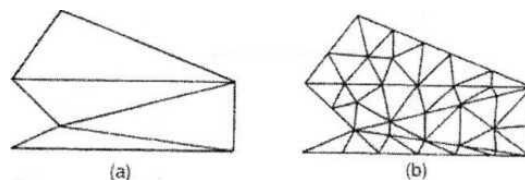
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας (T.D.A.)**

Η δισδιάστατη μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας (topology decomposition approach) αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύγωνο και το τελευταίο κατακερματίζεται σε ένα σύνολο μεγάλων στοιχείων συνδέοντας τις κορυφές προς διαμόρφωση τριγώνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 (a).

Κατόπιν, αυτά τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτύνονται ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 (b).

Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά διότι τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνα 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.

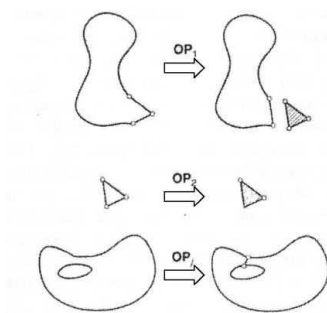


Σχημα 4.6

Κατά τη διαδικασία γένεσης ενός συνόλου τριγώνων από τις κορυφές, ο Wordenweber εισήγαγε και εφάρμοσε επίσης τους λεγόμενους τελεστές Euler με τον τρόπο που αυτοί χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση όγκων.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, πρώτος εφαρμόζεται ο τελεστής Wordenweber (1984) OP_1 για να απαλείψει τις τρύπες στο αντικείμενο. Κατόπιν διαμορφώνονται τα τρίγωνα από τις κορυφές και αποχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας επαναληπτικά τον τελεστή OP_1 μέχρις ότου απομείνουν μόνον 3 κορυφές.

Τελικά, εφαρμόζεται ο τελεστής OP_2 για να διαμορφώσει το τελευταίο τρίγωνο

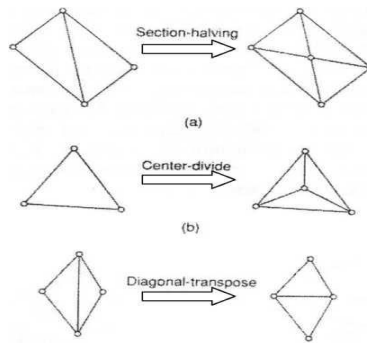


Σχήμα 4.7: Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα

Μόλις το αντικείμενο μετατραπεί σε ένα σύνολο μεγάλων τριγώνων, κάθε τρίγωνο εκλεπτύνεται έτσι ώστε να υπακούει στην απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος. Για την εκλέπτυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τρεις μέθοδοι που δείχνονται στο Σχήμα 4.8. Το Σχήμα 4.8 (a) δείχνει μια μέθοδο που εφαρμόζεται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους. Δηλαδή, προστίθεται ένας κόμβος στην κοινή ακμή, και τα γειτονικά στοιχεία υποδιαιρούνται συνδέοντας τους κόμβους τους με τον νέο κόμβο.

Στο Σχήμα 4.8 (b), ένα μεγάλο τριγωνικό στοιχείο υποδιαιρείται με πρόσθεση ενός νέου κόμβου στο κέντρο βάρους του. Όταν υποδιαιρεθεί με τους τρόπους που περιγράφηκαν παραπάνω, μπορεί να δημιουργηθούν λεπτά τρίγωνα όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.8 (c). Αυτά τα τρίγωνα είναι ήδη αρκετά μικρά για τη δοθείσα πυκνότητα πλέγματος.

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



Σχήμα 4.8 : Μέθοδοι εκλέπτυνσης τριγώνων

Η μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης μπορεί να επεκταθεί στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο, και το πολύεδρο κατατέμνεται σε τετραεδρικά στοιχεία συνδέοντας τις κορυφές τους. Κατόπιν, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση.

Οι Woo και Thomasma (1984) πρότειναν τελεστές παραπλήσιους με αυτούς που πρότεινε ο Wordenweber για να διευκολύνει τον σχηματισμό των τετραεδρικών στοιχείων. Αυτοί οι τελεστές, που δείχνονται στο Σχήμα 4.9, χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό τετραέδρων ως εξής:

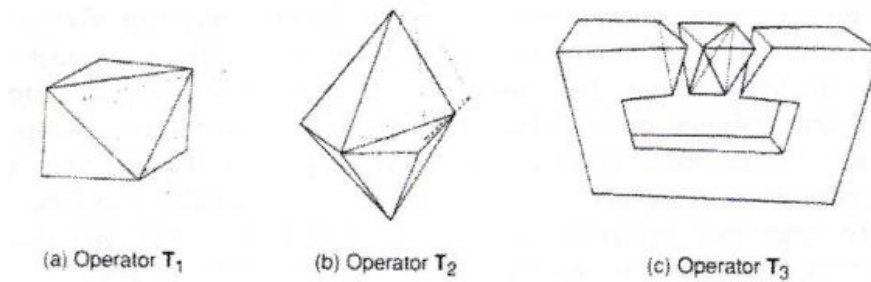
Πρώτα, εφαρμόζεται ο τελεστής T3 για να απαλείψει τις οπές του αντικειμένου αποτέμνοντας το κατάλληλο τμήμα του έτσι ώστε η οπή να αποκαλυφθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 (c). Σε αυτό το στάδιο τρία τετράεδρα διαμορφώνονται σαν αποτέλεσμα παράπλευρης διαδικασίας.

Κατόπιν, οι κυρτές κορυφές στις οποίες όπου συναντώνται τρεις ακμές, που καλούνται convex trivalent vertices (κορυφές), διαχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας τον τελεστή T[^] όπως εικονίζεται στο Σχήμα 4.9 (a). Αυτός ο τελεστής

εφαρμόζεται επαναληπτικά μέχρις ότου δεν υπάρξει καμία κυρτή trivalent κορυφή.

Εάν όλες οι κορυφές που απομένουν δεν είναι convex trivalent, τότε ο τελεστής T2 εφαρμόζεται για να σκάψει ένα τετράεδρο, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 4.9 (b). Αυτός ο τελεστής παρέχει τις νέες convex trivalent κορυφές και έτσι ο T1 εφαρμόζεται ξανά.

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



Σχήμα 4.9 : Τελεστές αποσύζευξης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις

- **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. Έπειτα, επεξηγείται η μέθοδο αναδρομής, καθώς αυτή είναι επεκτάσιμη στις τρεις διαστάσεις.

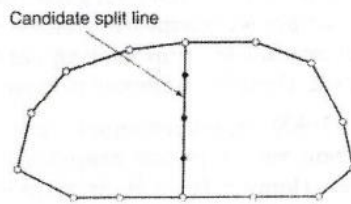
Η μέθοδος αναδρομικής αποσύζευξης (recursive geometry decomposition method) γεννά τριγωνικά και τετρακομβικά στοιχεία στις 2 διαστάσεις με τον ακόλουθο τρόπο. Πρώτα, το αρχικό αντικείμενο διαιρείται σε κυρτά μέρη είτε με το χέρι ή αυτόματα. Αυτόματη αποσύζευξη αντικειμένου σε κυρτά τμήματα περιγράφεται 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 4.10.

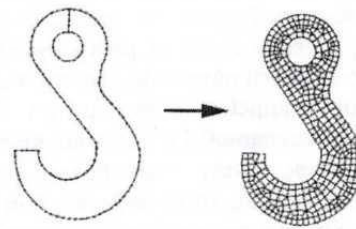
Στη συνέχεια, εισάγονται περισσότεροι κόμβοι κατά μήκος της διαχωριστικής γραμμής σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πυκνότητας πλέγματος, και τα δύο ήμισυ υποδιαιρούνται επαναληπτικά μέχρις ότου γίνουν τρίγωνα ή τετράπλευρα.

Μερικές μέθοδοι επαναλαμβάνουν την υποδιαίρεση μέχρις ότου μέχρις ότου καταλήξει σε εξάγωνα ή οκτάγωνα και παράγουν τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία από αυτά σύμφωνα με προ-αποθηκευμένα πρότυπα.

Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να προκύψουν περισσότερα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Το Σχήμα 4.11 δείχνει ένα παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.



Σχήμα 4.10: Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line)



Σχήμα 4.11: Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου

Η βασική μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να επεκταθεί και στη γένεση τρισδιάστατου πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση το αντικείμενο υποδιαιρείται σε δύο υπο- όγκους μέσω ενός διαχωριστικού επιπέδου, μέχρις ότου όλοι οι όγκοι περιορισθούν σε τετράεδρα.

Σε αντίθεση με τη δισδιάστατη περίπτωση όπου μπορούν να παραχθούν τετράπλευρα, δεν είναι δυνατόν να γεννηθούν τετράεδρα με απευθείας τρόπο. Ωστόσο, κάθε τετράεδρο μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 4 εξάεδρα, ή στοιχεία brick, εάν είναι επιθυμητό.

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

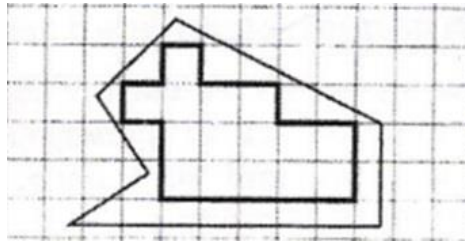
Η μέθοδος βάσει πλέγματος (grid-based approach) προκύπτει από την παρατήρηση ότι ένα grid μοιάζει με ένα πλέγμα και ότι αυτό μπορεί να μετασχηματισθεί στο τελευταίο υπό την προϋπόθεση ότι τα κελιά του grid κατά μήκος του συνόρου του αντικειμένου μπορούν να μετασχηματιστούν σε στοιχεία.

Η μέθοδος των Thacker, Gonzalez και Putland (1980) είναι ίσως η πρώτη σχετική δημοσίευση που έκανε χρήση της μεθόδου βάσει grid.

Σε αυτή τη μέθοδο ένα αντικείμενο αρχικά επικαλύπτεται από ένα τριγωνικό grid και τα σημεία του grid που πέφτουν εκτός αντικειμένου

εξαλείφονται, αφήνοντας ένα σύνορο μορφής zigzag. 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 έγκεινται στον τρόπο διαχείρισης του συνόρου. Ο Kikuchi (1986) επέκτεινε τη μέθοδο έτσι ώστε εκτός από κυρίως τετράπλευρα να περιλαμβάνει ακόμη και μερικά τρίγωνα, χρησιμοποιώντας ορθογωνικό grid, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Ένα πρόβλημα και των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με πολύ μικρές ακμές σε σχέση με το βήμα του grid, χάνονται.



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

Οι Yerry και Shephard (1983) χρησιμοποίησαν μια δενδριτική (quadree) αναπαράσταση του αντικειμένου για τη γένεση πλεγμάτων. Ένα quadree είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Παριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο, σαν αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 4.13(a), σαν ένα σύνολο τετραγώνων έκαστο διαφορετικού μεγέθους με επαναληπτική υποδιαίρεση της root square που περικλείει το αντικείμενο.

Το Σχήμα 4.13(b) δείχνει τη διαδικασία υποδιαίρεσης του αντικειμένου, και το Σχήμα 4.13(c) δείχνει την αναπαράσταση quadree αυτής της υποδιαίρεσης. Τα πλέγματα γεννώνται ως εξής:

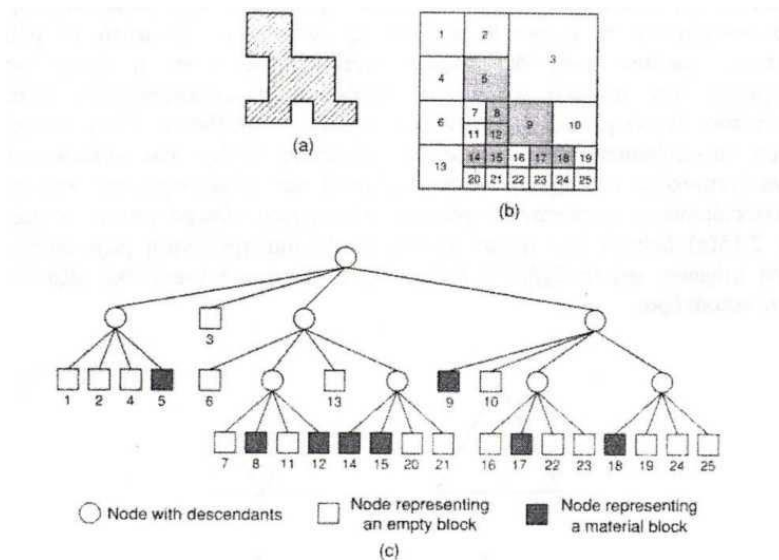
-Βήμα 1^ο : Δημιουργείται ένα root square που περικλείει το αντικείμενο και υπο-διαίρεται σε τέσσερα τέταρτα (quadrants) υποδιπλασιάζοντας τις πλευρές του. Κατόπιν κάθε τέταρτο ταξινομείται ανάλογα με τη σχετική θέση του ως προς το αντικείμενο. Εάν το τέταρτο δεν είναι ούτε πλήρως εντός αλλά ούτε και πλήρως εκτός του αντικειμένου, τότε αυτό διαιρείται ξανά. Αυτή η διαδικασία υποδιαίρεσης επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί η κατανομή πυκνότητας πλέγματος και τα τέταρτα βρεθούν είτε πλήρως εντός (“completely

inside") αντικειμένου ή επικαλύπτονται ("overlapping"). Έτσι, το αντικείμενο που θα παριστάνεται από τη συλλογή των πλήρως εντός και των τροποποιημένων επικαλυπτόμενων τετάρτων θα φαίνεται όπως στο Σχήμα 4.14 (a).

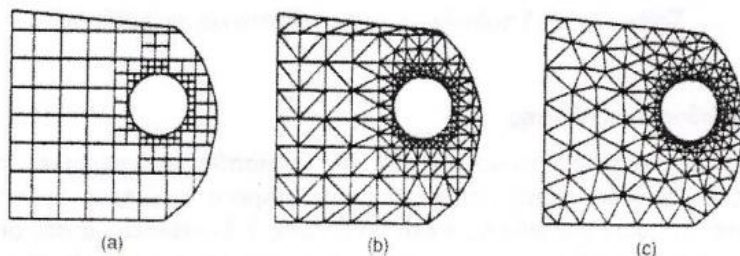
-Βήμα 2^ο : Κάθε τροποποιημένο επικαλυπτόμενο τέταρτο διαιρείται μέσα στα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο πρότυπο (prestored template) που βασίζεται στο σχήμα του τετάρτου. Κατόπιν, το «εντελώς εντός» τέταρτο επίσης υποδιαιρείται ώστε να ικανοποιήσει την προσαρμογή του πλέγματος με τα γειτονικά πλέγματα.

Δυο γειτονικά στοιχεία ονομάζονται συμβατά (conforming) εάν μοιράζονται μια πλήρη ακμή (μια ολόκληρη έδρα σε 3-D στοιχεία).

Το σχήμα 4.14 (b) δείχνει το αποτέλεσμα της γένεσης πλέγματος.



Σχήμα 4.13: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων



Σχήμα 4.14: Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadtree

-Βήμα 3^ο : Οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς (adjustment) έτσι ώστε να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων.

Το Σχήμα 4.14 (c) δείχνει το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης του πλέγματος. Η μέθοδος εξομάλυνσης αναφέρεται αργότερα. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα «επικαλυπτόμενα» όγδοα (octants) τροποποιούνται έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μόνον τον εσωτερικό χώρο του αντικειμένου και κατόπιν διασπάται σε τετράεδρα όπως τα τροποποιημένα επικαλυπτόμενα τέταρτα διασπώνται σε τρίγωνα στις δύο διαστάσεις.

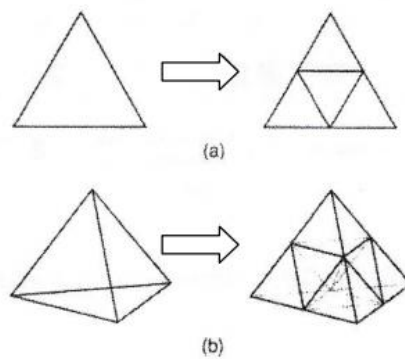
Το τροποποιημένο επικαλυπτόμενο όγδοο πρέπει να διασπασθεί σε τετράεδρα που ικανοποιούν την συμβιβαστότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό απαιτεί ένα περίπλοκο αλγόριθμο.

Πράγματι, ούτε και η διάσπαση του τροποποιημένου τετάρτου στις δύο διαστάσεις είναι εύκολο πρόβλημα.

Οι Jung και Lee (1993) πρότειναν μια νέα μέθοδο, αρχίζοντας από τη τριγωνική ρίζα (τετράεδρη ρίζα στις 3 διαστάσεις) αντί της τετραγωνικής ρίζας (κυβικής ρίζας) για να αποφύγουν τη δυσκολία που μόλις αναφέραμε. Σε αυτή τη μέθοδο, η παράσταση quadtree ενός δισδιάστατου αντικειμένου είναι η προσέγγιση του αντικειμένου σαν σύνολο τριγώνων.

Παρόμοια, η αναπαράσταση octree ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ήταν ένα σύνολο τετραέδρων. Έτσι μπορεί κανείς να λαβεί τα πλέγματα συλλέγοντας τα «εντελώς εντός» και «επικαλυπτόμενα» τρίγωνα (τετράεδρα στις τρεις διαστάσεις) μετά από μετακίνηση των κορυφών των «επικαλυπτόμενων» τριγώνων (τετράεδρα) στο αρχικό σύνορο του αντικειμένου.

Το Σχήμα 4.15 (a) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μια τριγωνική ρίζα διασπάται σε τέσσερα τρίγωνα, και το Σχήμα 4.15 (b) δείχνει πως μια τετραεδρική ρίζα διασπάται σε οκτώ τετράεδρα.



Σχήμα 4.15: Υποδιαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου

- **Μέθοδος Απεικόνισης**

Η μέθοδος απεικόνισης χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπορικές γεννήτριες πλέγματος. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την υποδιαίρεση του προς διακριτοποίηση αντικειμένου σε περιοχές ειδικής τοπολογίας. Στις 2 διαστάσεις, αυτές οι περιοχές έχουν τέσσερις πλευρές. Στις τρεις αυτές διαστάσεις οι περιοχές είναι μορφής «κουτιού» (boxlike).

Μέσα σε κάθε περιοχή, το πλέγμα παράγεται αυτόματα με απεικόνιση της περιοχής προς ένα κανονικοποιημένο χωρίο αναφοράς (ένα κανονικό τρίγωνο ή τετράπλευρο στις δύο διαστάσεις και ένα κύβο στις τρεις διαστάσεις), δημιουργώντας διακριτοποίηση στο κανονικοποιημένο χωρίο με βάση την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος, και επαναπεικόνιση του διακριτοποιημένου χωρίου προς την αρχική περιοχή του πραγματικού αντικειμένου. Κατόπιν, το τελικό πλέγμα προκύπτει από συνένωση των περιοχών που διακριτοποιήθηκαν ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Οι κοινές πλευρές που μοιράζονται σε γειτονικές περιοχές πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων έτσι ώστε να ικανοποιούν το συμβιβαστό του πλέγματος (mesh conformity). Η απαίτηση αυτή μπορεί να επιβληθεί με επέμβαση του χρήστη ή αλγοριθμικά την ώρα που παράγονται τα πλέγματα γειτονικών περιοχών. Πολλές μέθοδοι απεικόνισης μπορούν να εφαρμοσθούν.

- **Βελτίωση Ποιότητας Πλέγματος**

Μερικές μέθοδοι γένεσης πλέγματος, κυρίως εκείνες που βασίζονται στην προσέγγιση κατακερματισμού της τοπολογίας, δεν παράγουν αρχικό πλέγμα

επαρκές για την περαιτέρω ανάλυση. Έτσι, πρέπει να εφαρμοστεί μια πορεία τριών βημάτων ώστε να βελτιωθεί :

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

4.4.3 Ειδή 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: eddy-current), ηλεκτρομαγνητικά, υδροδυναμικά, ρευστομηχανικά, περιγραφής διάβρωσης υλικών, κλπ. Το σύνολο αυτό των δυνατοτήτων συνήθως αποδίδεται με τον όρο “Multi-Physics”, δηλαδή επίλυση των ποικίλων εξισώσεων της Φυσικής.

- **Καθορισμός του Είδους Ανάλυσης**

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

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

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

Στατικό πρόβλημα (static analysis), δηλαδή μη-εξαρτημένο από το χρόνο, ή **δυναμικό πρόβλημα** (dynamic analysis), δηλαδή χρονικά εξαρτώμενο. Παραδείγματα αποτελούν η ταλάντωση μιας μηχανής, ο ερπυσμός και η

χαλάρωση, η διάδοση ήχου στον αέρα ή σε άλλο μέσον, κλπ.

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

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

Μη γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέρθηκε προηγούμενα.

Σε «ελαστικά» προβλήματα η μη-γραμμικότητα μπορεί να οφείλεται στο ελαστοπλαστικό υλικό (material nonlinearity) ή στην μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων (geometrical nonlinearity).

Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το μητρώο δυσκαμψίας δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων. Μη-γραμμικότητες υπάρχουν και σε προβλήματα δυναμικού, π.χ. όταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.

- **Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων**

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

1ο Στάδιο ^ Κατασκευή της γεωμετρίας.

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

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

4ο Στάδιο ^ Επιλογή του τρόπου επίλυσης (γραμμικό - μη γραμμικό μεταβατικό - υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

5ο Στάδιο ^ Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους.

- **Είδος Πεπερασμένων Στοιχείων**

Τα βασικά πεπερασμένα στοιχεία είναι:

- Ράβδος (2 κόμβοι)

- Σύρμα - σχοινί
- Δοκός (2 κόμβοι)
- Επίπεδη εντατική καταπόνηση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Επίπεδη παραμορφωτική 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
- Ορθοσκοπικό - πολυχρωματικό υλικό
- Τετράεδρο (3 κόμβοι)
- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι)
- Εξάεδρο (8 κόμβοι)

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Στατική και γραμμική ανάλυση πλαισίου ποδηλάτου

5.1 Εισαγωγή

Με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος Solidworks θα σχεδιαστεί και θα αναλυθεί το πλαίσιο ενός ποδηλάτου της επιλογής μας .

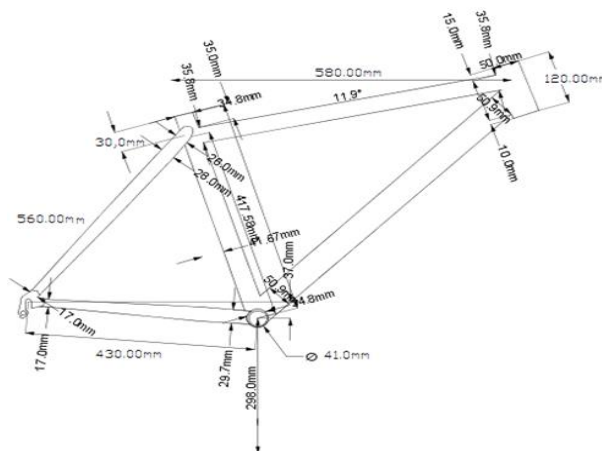
Στην συνέχεια ακολουθούν διάφορα σενάρια φόρτισης ενός πλαισίου ποδηλάτου, ανάλυση κάθε σεναρίου ξεχωριστά και επιλογή του κατάλληλου σεναρίου, ώστε να προχωρήσουν οι μετρήσεις.

Αφού εξεταστούν τα σενάρια φόρτισης, έπεται ο σχεδιασμός πιρουνιού με στοιχειά απόσβεσης.

5.2 Σχεδιασμός πλαισίου ποδηλάτου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω γίνεται χρήση του προγράμματος SolidWorks για να δημιουργηθεί το πλαίσιο του ποδηλάτου μας.

Από την κεντρική σελίδα της BikeForest.com και με την βοήθεια του ελεύθερου λογισμικού BikeCad σχεδιάζεται το σκαρίφημα ενός ποδηλάτου για έναν αναβάτη με ύψος 1,75. Στην συνέχεια απομονώνονται τα διάφορα μέρη του ποδηλάτου έτσι ώστε να υπάρχει μόνο το πλαίσιο του ποδήλατου με τις απαραίτητες γεωμετρικές του διαστάσεις



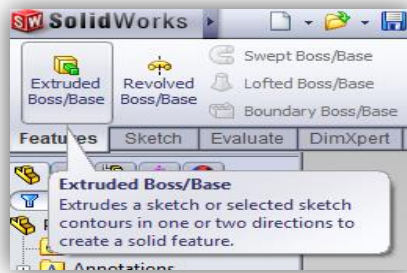
Σχημα 5.1 : Σκαρίφημα πλαισίου ποδηλάτου

Στην συνέχεια έχοντας της βασικές διαστάσεις του πλαισίου μας είναι εφικτό να σχεδιάσει το πλαίσιο σε 3 διαστάσεις (3D) .

Αρχικά για να πάρει μορφή ένα αντικείμενο (**Part**) γίνεται επιλογή του αντίστοιχου κουμπιού του προγράμματος :

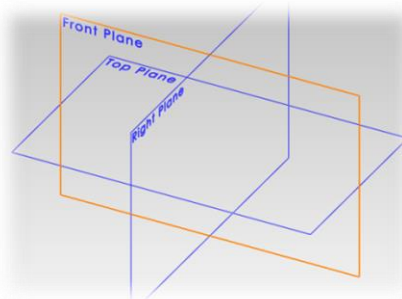


Κατόπιν επιλέγεται το **Extruded boss/base** :

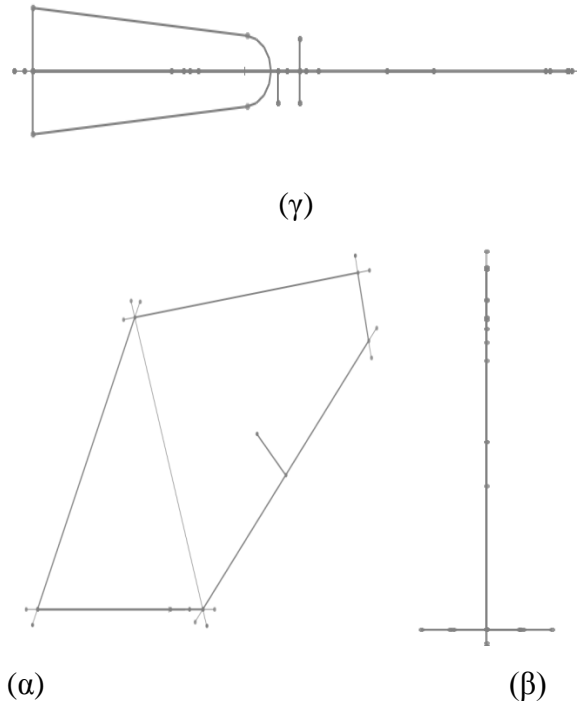


Έτσι αρχίζει ο σχεδιασμός ενός σκαριφήματος του πλαισίου το οποίο θα είναι η βάση του αρχικού σχεδιασμού.

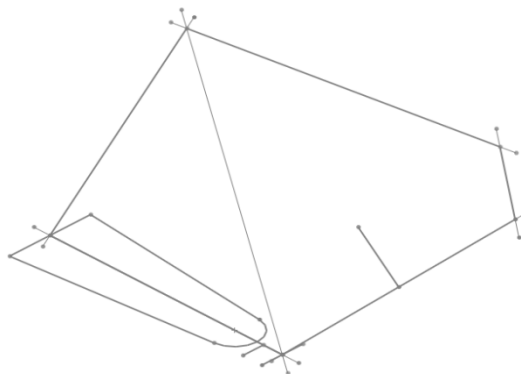
Έπειτα ακολουθεί η επιλογή **Plane** που θα γίνει ο σχεδιασμός :



Στην συγκριμένη περίπτωση το **Front Plane** ακολουθεί σχέδιο σε τρισδιάστατο επίπεδο (**3D sketch**) με κατασκευή βοηθητικών επιπέδων (**Planes**) σε κάθε γραμμή.



Σχήμα 5.2 : (α) πρόσοψη, (β) πλάγια όψη, (γ) κάτοψη του σχεδίου πλαίσιο ποδήλατου στο solidworks



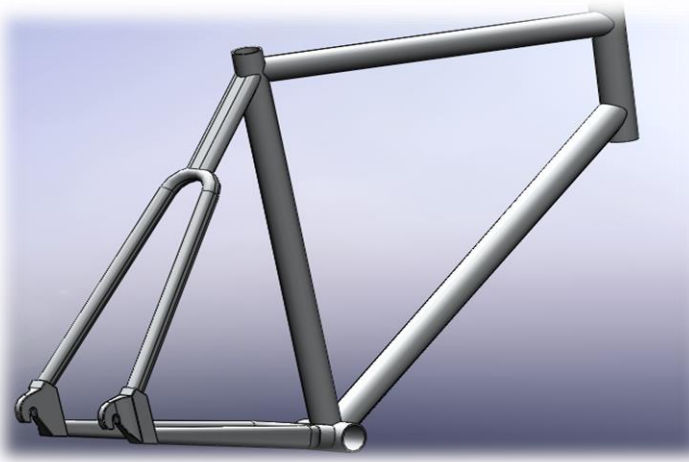
Σχήμα 5.3 : Τριμετρική όψη σχεδίου σε Solidworks

Εν συνεχεία, η χρήση της εντολής **Extruded Boss/Base** και η βοήθεια ενός **sketch** του οποίου έχει οριστεί η γεωμετρική διάσταση, θα συμβάλουν στο σχεδιασμό του βασικού τριγώνου ενός πλαισίου.



Εικόνα 5.1 : Τριμετρική απεικόνιση κυρίως τριγώνου ποδηλάτου στο Solidworks

Το πρώτο τρίγωνο ενός σκελετού-διαμάντι έχει διαμορφωθεί. Σειρά έχει ο σχεδιασμός του δεύτερου πίσω τριγώνου με τις εντολές **Lofted Boss/Base**, **Mirror**, **Sweet Boss/Base**, **Extruded Boss/Base** και **Extruded Cut** με την παράλληλη βοήθεια των **Sketch** και **Plane**.



Εικόνα 5.2 Τριμετρική απεικόνιση τριγώνου ποδηλάτου στο Solidworks

Τέλος χρησιμοποιούνται οι εντολές **Fillet** σε όποιο σημείο του πλαισίου χρειάζεται.



Εικόνα 5.3 : Τριμετρική απεικόνιση στο Solidworks (μαζί με Fillet)

Παρακάτω παρουσιάζεται ο σκελετός διαμάντι σε διάφορες όψεις.

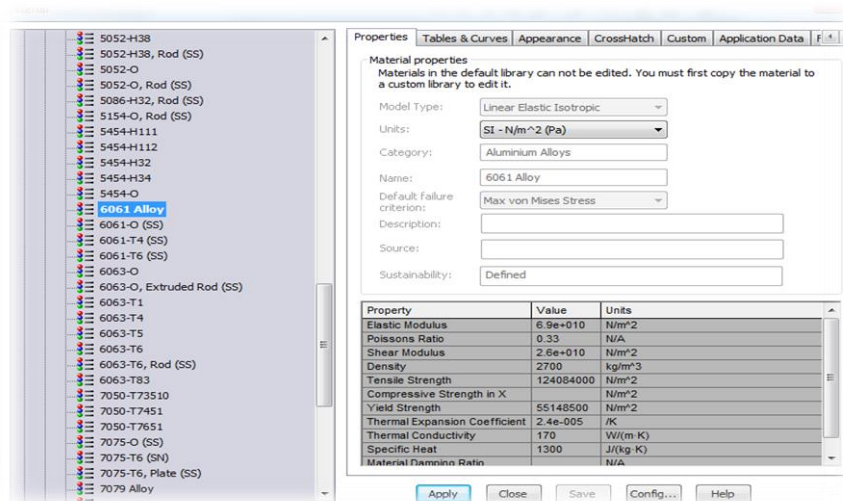


Εικόνα 5.4 Παρουσίαση πλαισίου ποδηλάτου στο Solidworks

Τα σχεδιασμό πλαίσιο του ποδηλάτου, διαδέχεται ο ορισμός του υλικού κατασκευής με την επιλογή **Edit Material** .

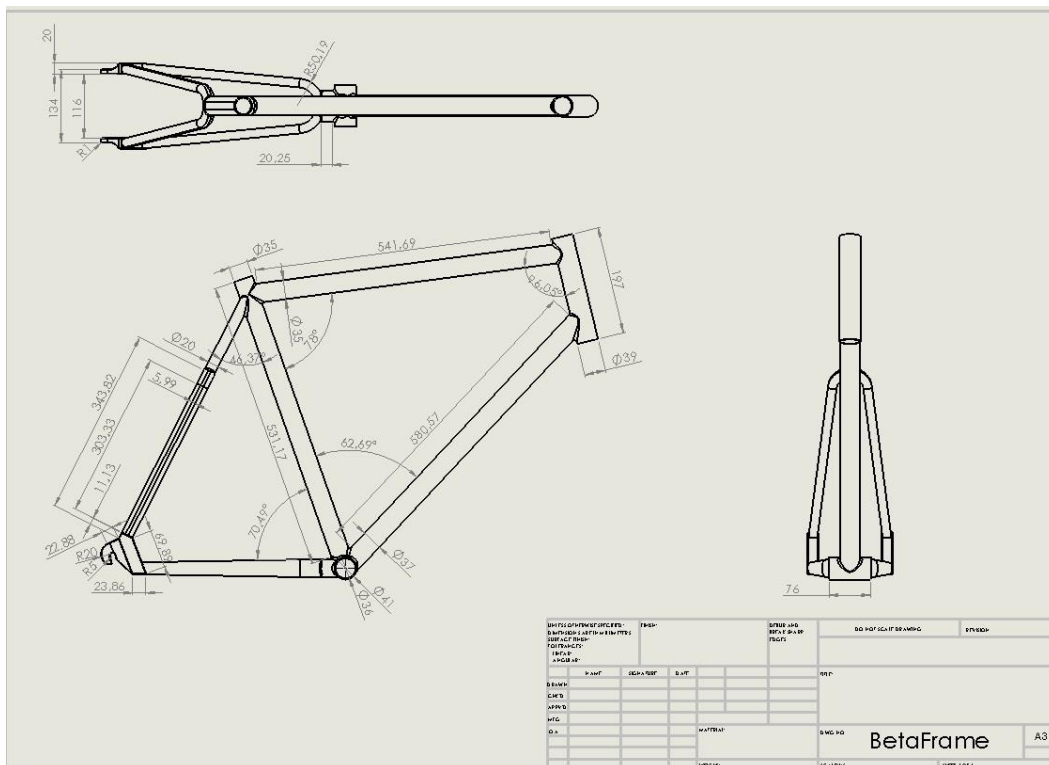
Το συγκεκριμένο υλικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα φάση είναι το αλουμίνιο (aluminum) 6061 Alloy. Παρακάτω φαίνονται λεπτομερώς οι

ιδιότητες του υλικού μέσω του προγράμματος Solidworks. Συγκεκριμένα :



Εικόνα 5.5 : αλουμίνιο 6061 alloy ιδιότητες υλικού.

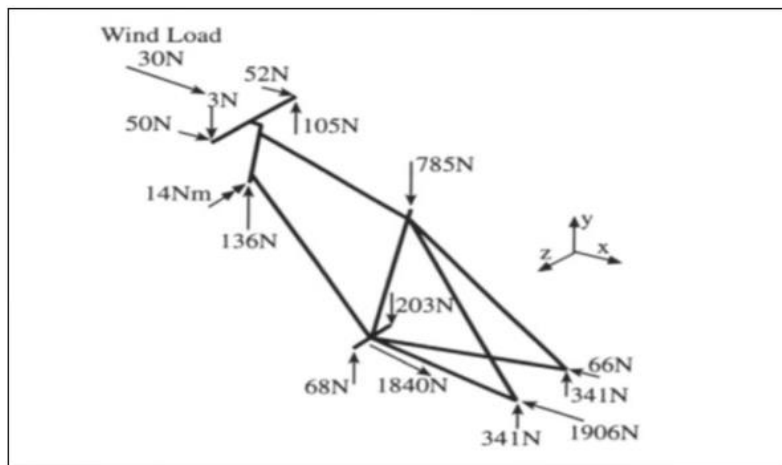
Το υλικό αυτό έχει άριστες μηχανικές ιδιότητες, χαμηλό κόστος κατασκευής, είναι εύκολο στην κατεργασία και χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία του ποδηλάτου.



Σχήμα 5.4 Πλήρες κατασκευαστικό σχέδιο πλαισίου με τις απαραίτητες διαστάσεις

5.3 Σενάρια Φόρτισης

Αφού σχεδιαστεί το πλαίσιο θα πρέπει να καθοριστούν τα σενάρια φόρτισης που θα εξετάσουν την στατική αντοχή του πλαισίου. Παρακάτω παρατίθενται οι δυνάμεις που δέχεται ένα πλαίσιο ποδηλάτου που κινείται με 50km/h το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση έντονης καταπόνησης (intense print).



Σχήμα 5.5 : Φόρτιση πλαισίου σε έντονη καταπόνηση

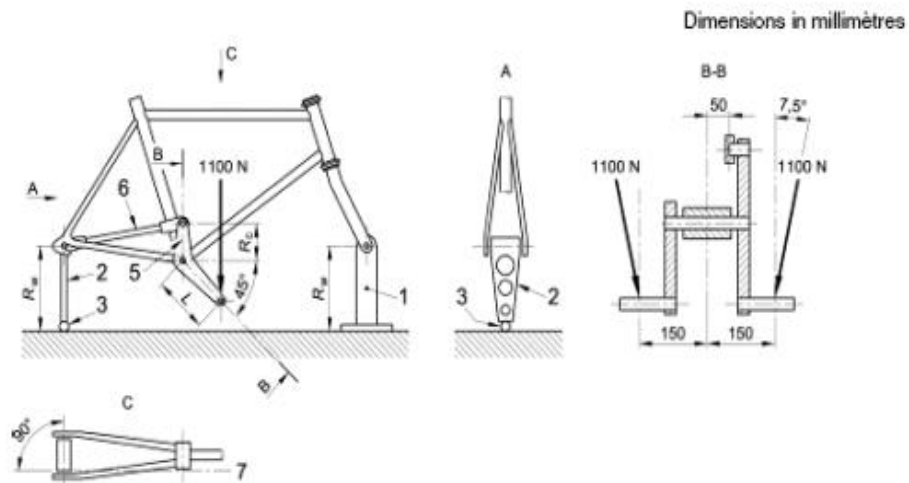
Το σχήμα επιδεικνύει δυναμικές και στατικές φορτίσεις, οι οποίες δεν εφαρμόζονται συμμετρικά του σκελετού και είναι μεγαλύτερες στην μια πλευρά σε σχέση με την άλλη. Ακόμα απεικονίζονται οι βαρυτικές, αεροδυναμικές και δυναμικές επιδράσεις που ασκεί ο αναβάτης σε τιμόνι, σέλα και πετάλι καθώς και κάποιες άλλες πρόσθετες δυνάμεις.

Για της ανάγκες της εργασίας θα αναφερθούν τρία φορτικά σενάρια, τα οποία καθορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 14781 και από της δημοσιεύσεις των Lesser, Nemes, Lizotte (utilization of FEA in the desing of composite bicycle Frames, 1994) και των Peterson, Londry (Finite Element Structural Analysis: A new tool for Bicycle Frame Desing, 1986).

5.3.1 Scenario Static Start-up

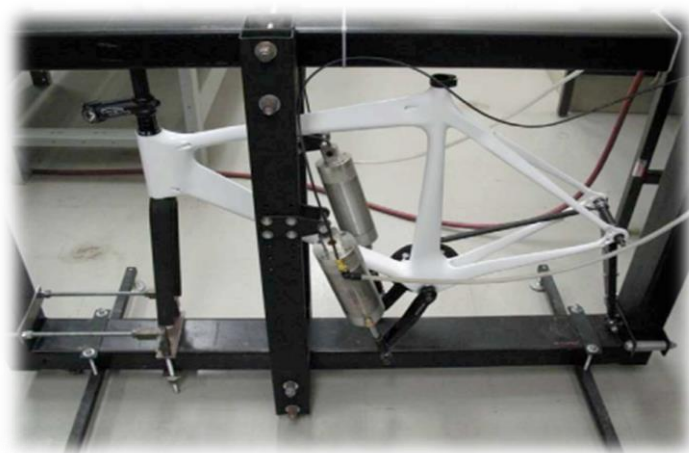
Αφορά την εξέταση της αντοχής και τις καταπόνησης της μεσαίας τριβής του πλαισίου απομονωμένα (χωρίς την ύπαρξη μηχανικών καταπονήσεων).

Το συγκεκριμένο σενάριο φόρτισης αναφέρεται στις κατάσταση όπου ο αναβάτης είναι υπερβολικού βάρους, δεν κάθεται στην σέλα και ασκεί μέγιστες δυνάμεις στο πεντάλ για να εκκινήσει το ποδήλατο το οποίο βρίσκεται σε στάση.



Σχήμα 5.6 : απεικόνιση σεναρίου static start-up

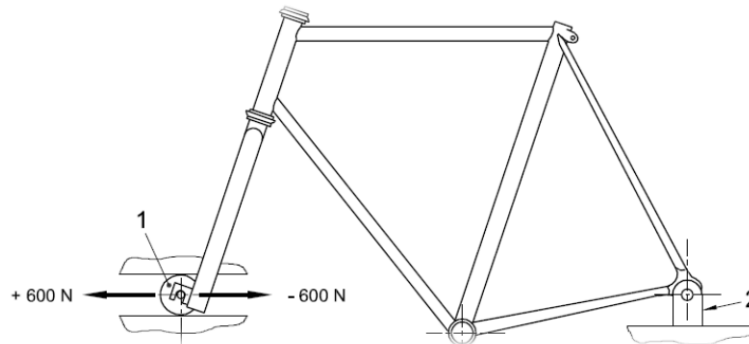
Όπως δείχνει η εικόνα, η δύναμη που ασκείται στην μεσαία τριβή είναι σημειακή ,μεγέθους 1.100 N .Ασκείται υπό γωνία και στα άκρα της μεσαίας τριβής, ενώ το πλαίσιο είναι πακτωμένο στο ψαλίδι και στο πιρούνι εκεί που τοποθετούνται η ρόδες ενός ποδηλάτου.



Εικόνα 5.6 : Τεστ κοπώσεως σε πεντάλ δυνάμεις static start-up

5.3.2 Scenario Horizontal Impact

Μέσω του συγκεκριμένου σεναρίου, επιτυγχάνεται η εξέταση των οριζόντιων επιδράσεων στο πλαίσιο ενός ποδηλάτου. Με βάση αυτό, καταπονούνται ιδιαίτερα οι εμπρόσθιοι σωλήνες (κούτελο) και επίσης οι άνω και κάτω σωλήνες. Ενδιαφέρουσα είναι η απόκριση του κάτω σωλήνα, ο οποίος απορροφάει το μεγαλύτερο ποσοστό των καταπονήσεων του πλαισίου.



Σχήμα 5.7 : Απεικόνιση σεναρίου Horizontal impact

Βάσει του προτύπου EN 14781, ο ορισμός αυτής της φόρτισης προϋποθέτει την πάκτωση των συνδέσεων των οπίσθιων σωλήνων (Stays) και την εφαρμογή στο εμπρόσθιο πιρούνι ενός guider roller και επιτρέπει στο πιρούνι την κύλιση του.

Σύμφωνα με το πρότυπο οι δυνάμεις ασκούνται οριζόντια, με αντίθετη κατεύθυνση και με 600N μέγεθος η κάθε μια και επαναληπτικά με συχνότητα 25HZ. Η φόρτιση του πλαισίου είναι κυρίως δυναμική ενώ εδώ εξετάζεται η στατική του φόρτιση.

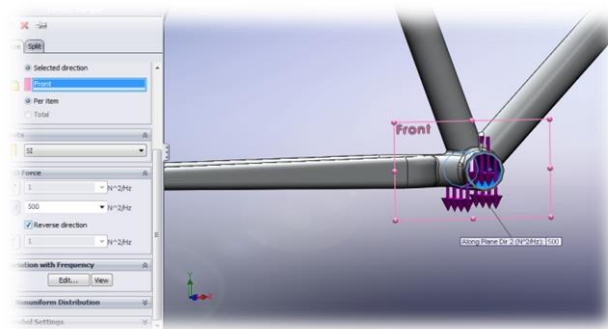


Εικόνα 5.7: Τεστ κοπώσεως με οριζόντιες δυνάμεις Horizontal impact

5.3.3 Scenario Riding

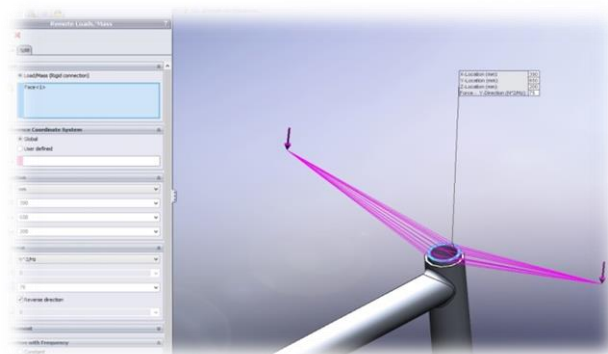
Το τρίτο σενάριο παρουσιάζει μια κατάσταση σύνθετης φόρτισης. Βάσει της βιογραφίας, προτείνονται διάφορες παραλλαγές σύνθετης φόρτισης. Εδώ ο σχεδιαστής επιλέγει ποιές από τις φορτίσεις που δύνανται να υλοποιηθούν θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν ή όχι.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να παρουσιαστεί ένα σενάριο που προτείνει το εκπαιδευτικό υλικό SolidWorks στην κεντρική σελίδα blogs.solidworks.com, σε αυτό το σενάριο θεωρούνται αμελητέες οι περιστροφικές, οι αεροδυναμικές καταπονήσεις και οι καταπονήσεις τριβής. Ο ποδηλάτης βρίσκεται σε θέση οδήγησης και ασκεί δυνάμεις στα πεντάλ για να επιταχύνει τον σκελετό, το δυναμικό και βαρυτικό φορτίο διανέμεται στα πεντάλ κατά 70% και στο τιμόνι κατά 30%. Επιλέχτηκε η εφαρμογή απομακρυσμένων δυνάμεων, όπως στα σχήματα, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι και εδώ οι συνδέσεις των Stays και το πιρούνι έχουν πακτωθεί.



Εικόνα 5.8 : Επιλογή δυνάμεων στην μεσαία τριβή

Όπως φαίνεται και από το σχήμα οι δυνάμεις στην μεσαία τριβή ασκούνται κάθετα στον άξονα $-y$ με 70% των συνολικών δυνάμεων.



Εικόνα 5.9 : επιλογή δυνάμεων στο κούτελο του σκελετού

Οι δυνάμεις στο τιμόνι ασκούνται από απόσταση 200mm στον Z άξονα, 650mm στον Y άξονα και στον X άξονα με 390 mm και με δύναμη 15% στο δεξί άκρο και 15% στο αριστερό άκρο των συνολικών δυνάμεων.

Στις εικόνες 5.10 και 5.11 απεικονίζεται η μέθοδος πάκτωσης των οπίσθιων και εμπρόσθιων συνδέσμων. Η επιλογή της σταθερής γεωμετρίας εξασφαλίζει την μη μετατόπιση των σημείων αυτών που επιβεβαιώνουν και τα αποτελέσματα. Και επιπλέον μας δίνει μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση της όχησης σε ανώμαλο δρόμο.

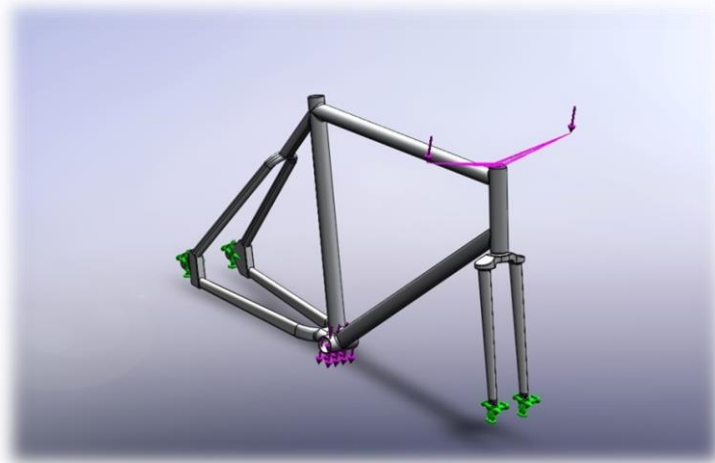


Εικόνα 5.12 : επιλογή της βαρύτητας στον σκελετό ποδηλάτου

Τέλος προστίθεται η βαρύτητα (Gravity) $9,81 \text{ m/s}^2$ όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Εικόνα 5.13 : Πλάγια όψη του σεναρίου Riding

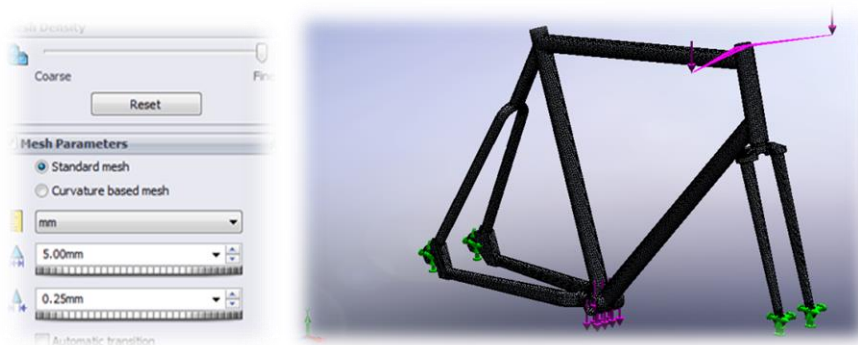


Εικόνα 5.14 : Ισομετρική άποψη του σεναρίου Riding

Το αντικείμενο της προτεινόμενης εργασίας θα ασχοληθεί με το scenario riding το οποίο είναι και το πιο κατάλληλο για να αναδείξει την στατική και γραμμική ανάλυση ενός ποδηλάτου .

5.4 Στατική ανάλυση (Static)

Στο συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται λόγος για την στατική ανάλυση του σκελετού ποδηλάτου που έχει σχεδιαστεί βάση του σεναρίου Riding, που αναλύθηκε στην παράγραφο 5.3. Ακολουθεί εισαγωγή των παραμέτρων στο λογισμικό solidworks και ορισμός του υλικού κατασκευής του πλαισίου. Το υλικό είναι το αλουμίνιο 6061 από την κεντρική βιβλιοθήκη του προγράμματος solidworks. Δημιουργία πλέγματος του οποίου τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο σχήμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι γίνεται χρήση βελτίωσης του πλέγματος στις δύσκολες γεωμετρίες για αξιόπιστα αποτελέσματα.



Εικόνα 5.15 : ιδιότητες πλέγματος του πλαισίου στο solidworks (αριστερα), πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του πλαισίου (δεξια)

Το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί είναι αποκλειστικά για το solidworks και αποτελείται από :

- 200086 κόμβους (total nodes)
- 104257 τετραδικά πεπερασμένα στοιχεία (total elements)

Mesh Details	
Study name	Study 1 (-Default<As Machined>-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	5 mm
Tolerance	0.25 mm
Mesh quality	High
Total nodes	200086
Total elements	104257
Maximum Aspect Ratio	32.067
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	95.1
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.0911
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:08:52

Εικόνα 5.17 : Αναλυτική καρτέλα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Καταλήγοντας, φτάνει κανείς σε λύση του προβήματος και εξάγει τα ζητούμενα γραφικά αποτελέσματα τα οποία τον ενδιαφέρουν. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πλαισίου για το πρώτο τεστ. Συγκεντρωτικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στην παράγραφο 6.1.

- Ισοδύναμη τάση κατά Von misses σε MPa όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.18 : Γραφική απεικόνιση ισοδύναμης τάσης (Equivalent)

- Οριακή μετατόπιση σε mm, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 5.19 : Γραφική απεικόνιση μετατόπισης (Res disp)

- Μέγιστη τάση σε MPa όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



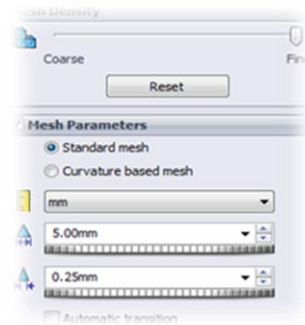
Σχήμα 5.20 : Γραφική απεικόνιση μέγιστης τάσης (Von Mises)

Το αλουμίνιο 6061 (με Yield strength 55.1 MPa) αντέχει στο τεστ που αφού η συνολική τάση που αναπτύσσεται είναι της τάξης 14.5 MPa με άσκηση δύναμης τα 600 N (70% στην μεσαία τριβή και κατά 30% στο κούτελο).

5.5 Γραμμική ανάλυση

Στο σημείο αυτό υπάρχει αναφορά στην γραμμική ανάλυση ενός σκελετού ποδηλάτου. Βάση του σεναρίου Riding και με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks επιλέγεται το Linear Dynamic σε Random Vibration (τυχαίους κραδασμούς) το υλικό από την κεντρική βιβλιοθήκη του SolidWorks, το οποίο είναι αλουμίνιο 6061 και βάση του σεναρίου Riding ακολουθεί η

επιλογή του πλέγματος. Δημιουργία πλέγματος του οποίου τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5.21 : ιδιότητες πλέγματος του πλαισίου στο solidworks

Γίνεται χρήση βελτίωσης του πλέγματος στις δύσκολες γεωμετρίες. Έτσι εξάγονται πιο αξιόπιστα αποτελέσματα .

Το πλέγμα το οποίο δημιουργήθηκε είναι:



Σχήμα 5.22: πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του πλαισίου

Όπως παρατηρείται το πλέγμα έχει δημιουργηθεί και είναι αποκλειστικά για το SolidWorks, και αποτελείται από :

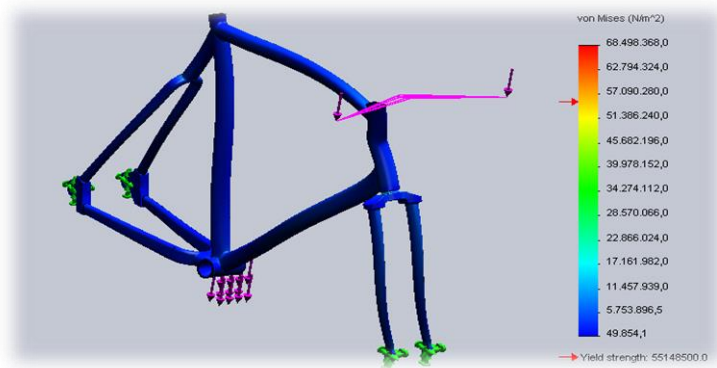
- 200358 κόμβους (total nodes)
- 104598 τετραδικά πεπερασμένα στοιχεία (total elements)

Mesh Details	
Study name	Study1name [DefaultCae: Mechanicb-]
Mesh type	Solid Mesh
Meshes Used	Curvature based mesh
Jacobian points	4 points
Max Element Size	0 mm
Min Element Size	0 mm
Mesh quality	High
Total nodes	200358
Total elements	104598
Maximum Aspect Ratio	38.774
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	95.4
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.0889
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh (hh:mm:ss)	00:06:56
Computer name	LIAKOURIS-PC

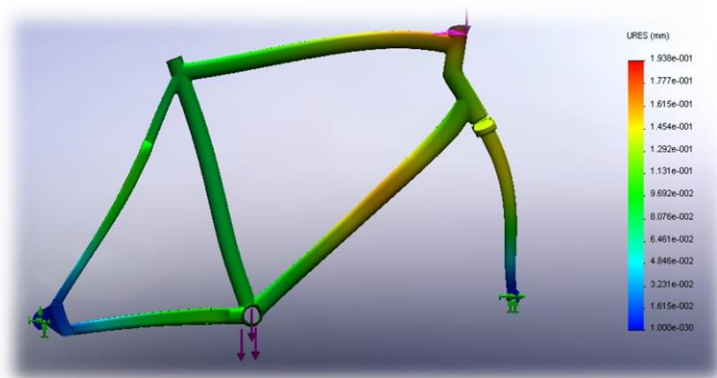
Εικόνα 5.23 : αναλυτική καρτέλα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Στην συνέχεια ορίζονται κάποιες παράμετροι που είναι αναγκαίες για να υπάρξει ένα σωστό αποτέλεσμα της μέτρησης. Όπως τον δείκτη απόσβεσης (Damping –modal damping-) με τιμή 0.2, γίνεται έλεγχος και στην επιλογή Result options στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks.

Τέλος γίνεται επίλυση των προβλημάτων και εξαγωγή των ζητούμενων γραφικών αποτελεσμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πλαισίου :



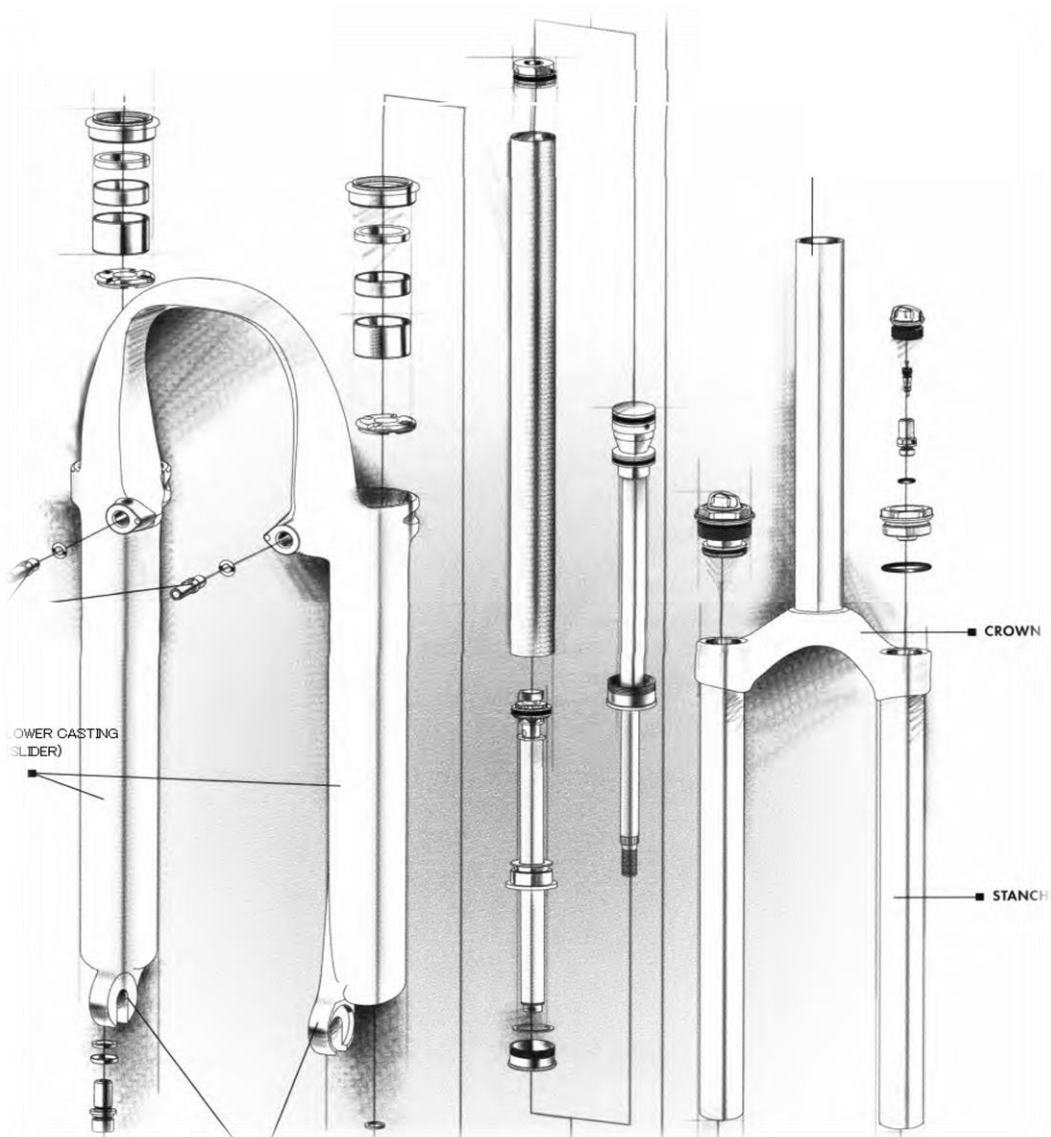
Εικόνα 5.25 : Γραφική απεικόνιση μεγίστης τάσης (Von Mises)



Εικόνα 5.26: Γραφική απεικόνιση μετατόπισης (Res disp)

5.6 Σχεδιασμός πιρουνιού με στοιχεία απόσβεσης

Στα παραπάνω κεφάλαια έγινε λόγος για τον σχεδιασμό ενός πλαισίου ποδηλάτου με την στατική και γραμμική ανάλυση. Είναι όμως εξίσου σημαντικό η προσθήκη στοιχείων απόσβεσης σε διάφορα σημεία του σκελετού ,αφού με αυτόν το σκοπό έχουμε σημαντική απορρόφηση από κραδασμούς. Εξασφαλίζεται μια άνετη και ασφαλής οδήγηση στον αναβάτη σε ανώμαλους δρόμους .Στην συγκεκριμένη εργασία θα σχεδιαστεί ένα πιρούνι με στοιχεία απόσβεσης.

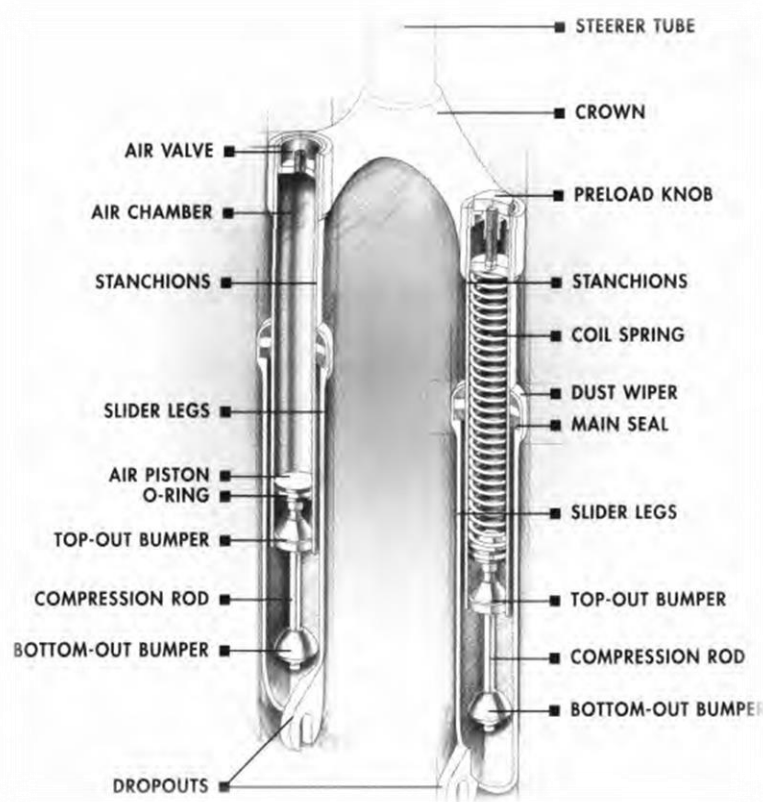


Εικόνα 5.26 : Ανατομία ενός πιρουνιού με ανάρτησης

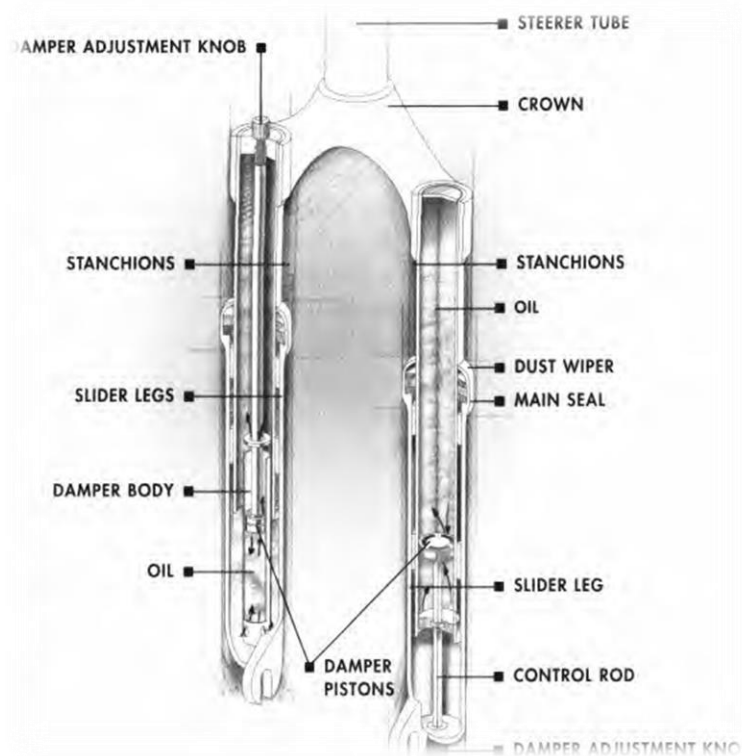


Εικόνα 5.27 : Διάφοροι τύποι πιρουνιού με ανάρτηση

Πιρούνια ανάρτησης σε Mountain bike έκαναν την εμφάνιση τους την δεκαετία του ενενήντα πολλά στοιχεία έχουν δανειστεί σε μεγάλο βαθμό από τη βιομηχανία μοτοσικλέτας. Οι περισσότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν πιρούνια είτε με : α) ελατήριο , β) πεπιεσμένου αέρα και γ) έλαιο , στα οποία παράσχει συμπίεσης και επαναφορά. Παρακάτω αναδεικνύετε η λειτουργία των τριών τύπου αμορτισέρ και από πια μηχανικά μέρη αποτελείται το κάθε ένα :

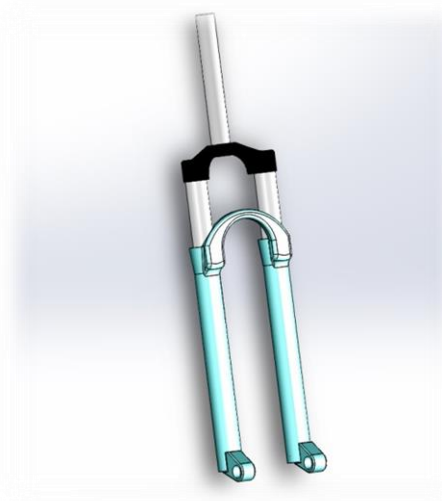


Εικόνα 5.28 : Σύστημα απορρόφησης αμορτισέρ ,α) με πεπιεσμένου αέρα (αριστερά), β) με ελατήριο (δεξιά), τομή και ανάδειξη μηχανικά μέρη λειτουργίας πιρουνιού.

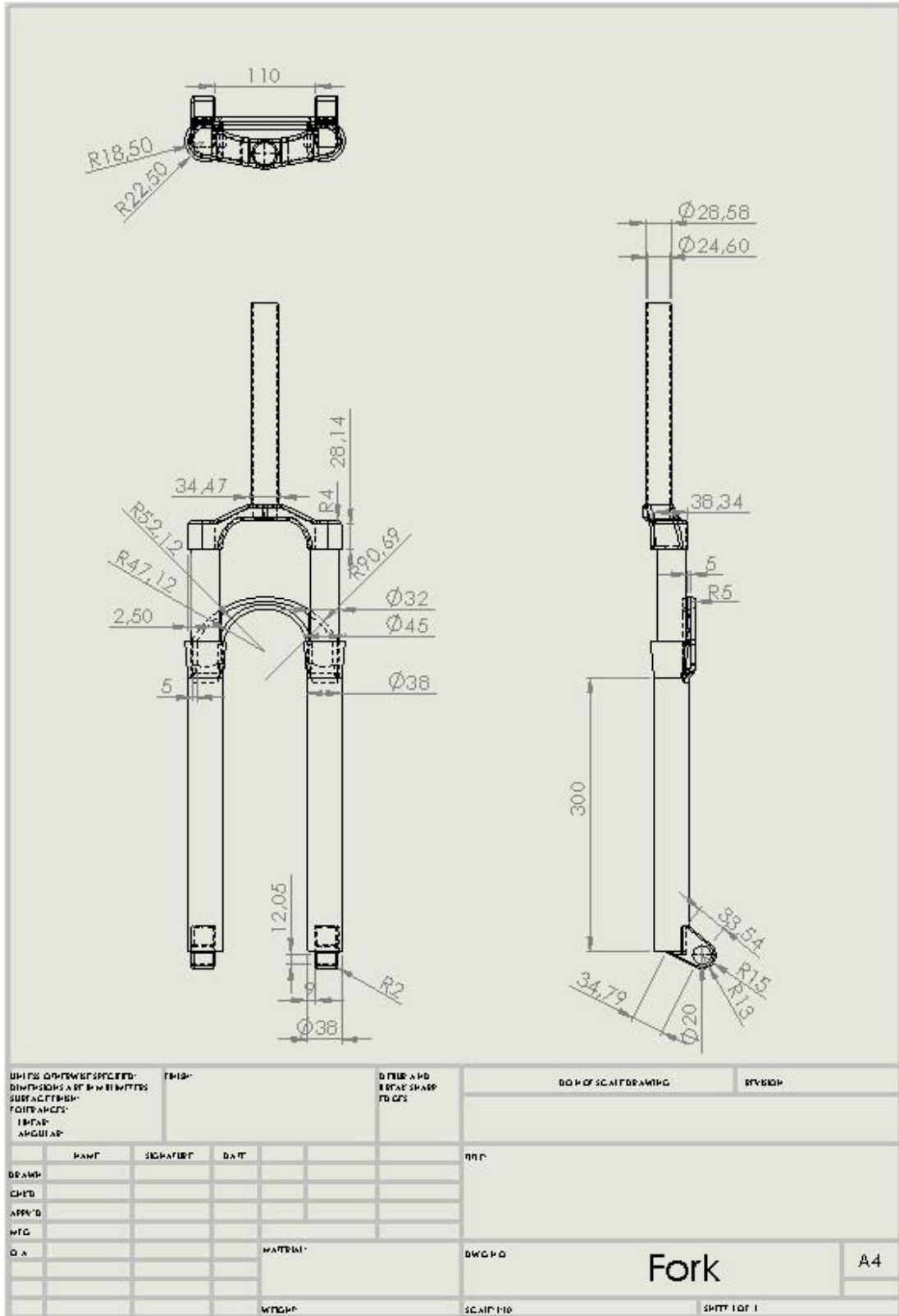


Εικόνα 5.28 : Σύστημα απορρόφησης αμορτισέρ με έλαιο α) ανοιχτού τύπου (αριστερά)
β) κλειστού τύπου (δεξιά)

Χρησιμοποιώντας της εντολές Extruded Boss/ Bacs, Cut, Fillet, Plane, Revolved Cut, Mirror και με την βοήθεια των plane και sketch στο λογισμικό Solidworks έγινε κατασκευή ενός πλήρους σχεδίου του πιρουνιού με τις απαραίτητες διαστάσεις, όπως παρουσιάζεται παρακάτω :



Εικόνα 5.29 : Ισομετρική άποψη πιρουνιού



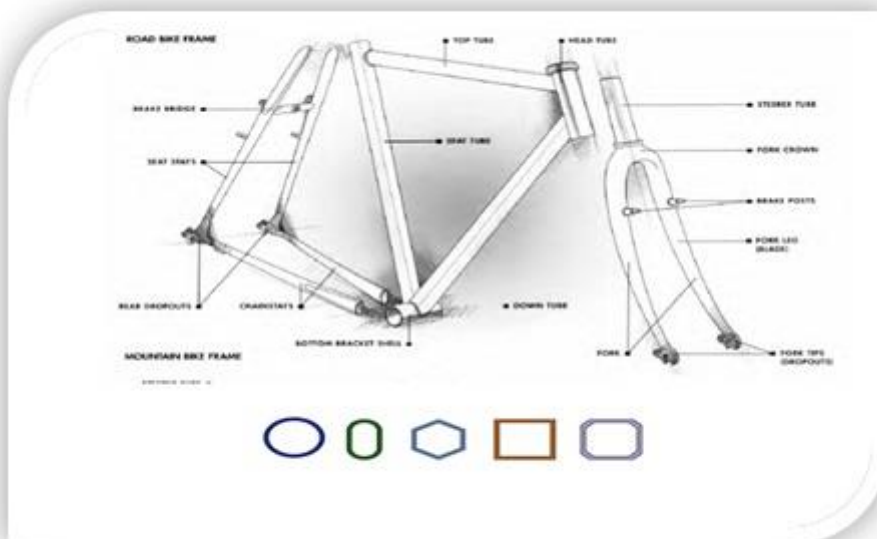
Εικόνα 5.30 : Κατασκευαστικό σχέδιο πιρουνιού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αποτελέσματα και συμπεράσματα

6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Για τις ανάγκες της παρούσας ενότητας έχουν σχεδιαστεί πέντε μοντέλα σκελετών ποδηλάτου, στα οποία έχουν γίνει κάποιες αλλαγές σε δυο κύρια σημεία του σκελετού στον **top tube** και **down tube**, εξετάζοντας διάφορα σχήματα όπως κυκλικά, πολυγωνικά, όχι απαραίτητα κανονικά, για τον εντοπισμό των σημείων συγκέντρωσης των τάσεων και την επιλογή μιας βέλτιστης σχέσης.

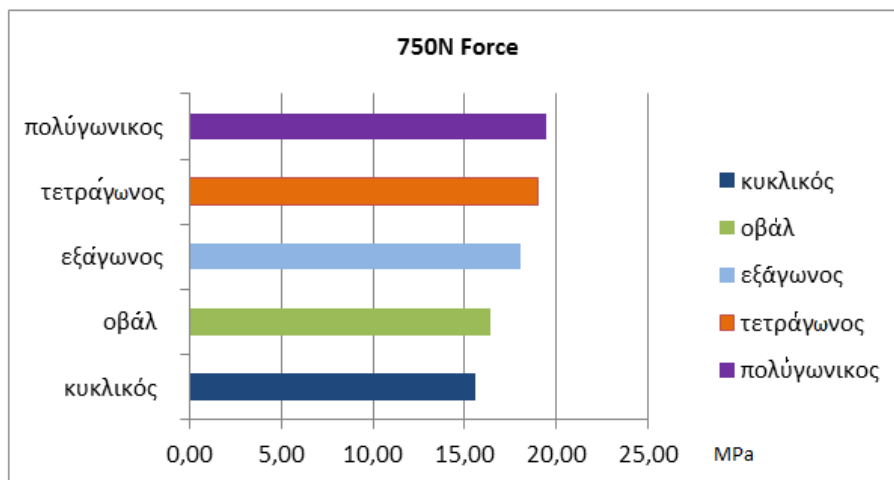


Εικόνα 6.1 : Σχήματα που χρησιμοποιήσαμε σε ένα σκελετό ποδηλάτου

Αναλυτικά τα αποτελέσματα της **στατικής ανάλυσης** (static) παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες, χρησιμοποιώντας υλικό 6061 αλουμίνιο και έχοντας σε κάθε ένα από τους σκελετούς εφαρμόσει μια δύναμη των 750N με πάχος σωλήνα 2,5mm και με βάση το σενάριο riding πήραμε από το λογισμικό solidworks τα αντίστοιχα αποτελέσματα των στατικών μετρήσεων :

υλικό Αλουμίνιο 6061	750N Force Test 1		
	Strees (Mpa)	Displacement (mm)	Strain
κυκλικός	15,6	7,131e - 002	1,822e - 004
οβάλ	16,4	7,937e - 002	1,967e - 004
εξάγωνος	18,0	8,050e - 002	2,046e - 004
τετράγωνος	19,0	8,343e - 002	2,243e - 004
πολύγωνικός	19,4	8,522e - 002	2,351e - 004

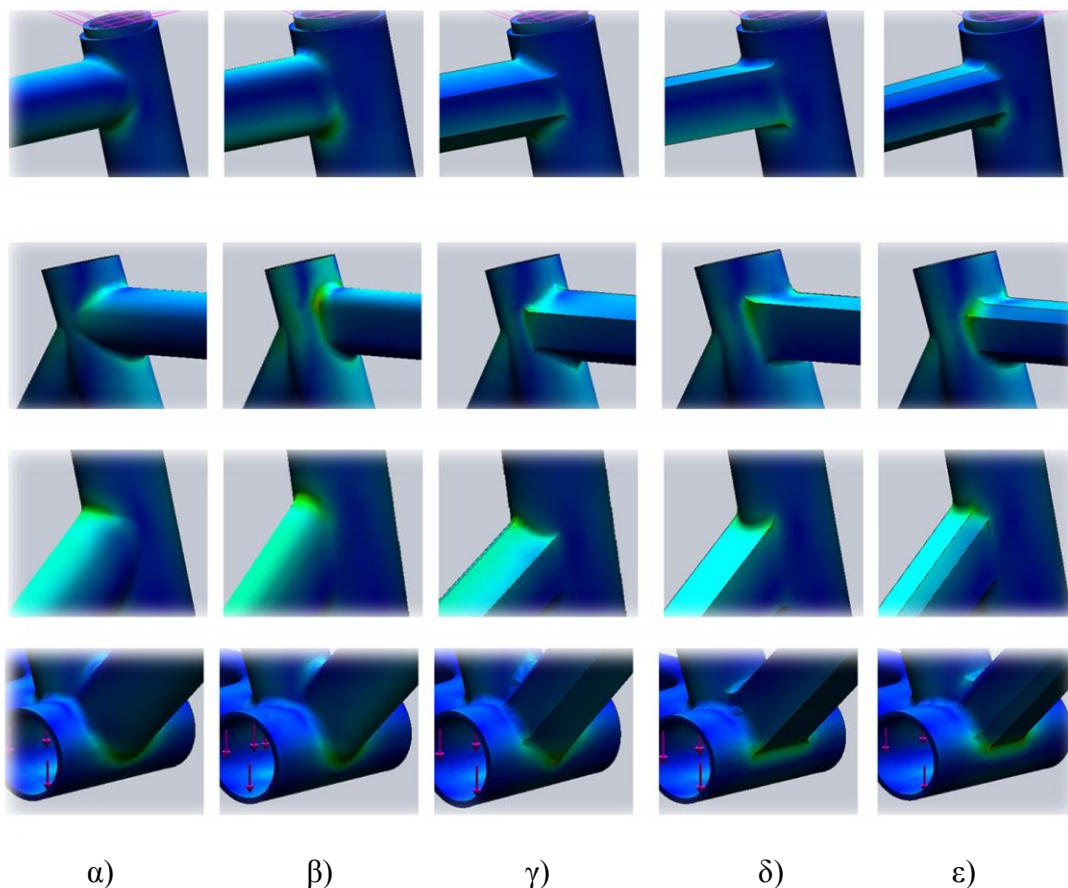
Πίνακας 6.1 : Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.



Πίνακας 6.2 : Γράφημα μέγιστων τάσεων διάφορων σχημάτων

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταλαβαίνει κανείς ότι ο κυκλικός σωλήνας κατέχει τις μικρότερες μετρήσεις, αναδεικνύοντας την μέγιστη τάση, την ολική μετατόπιση και την ισοδύναμη τάση που ασκείται σε έναν σκελετό ποδηλάτου σε στατική ανάλυση.

Στην συνέχεια θα αναδειχθούν τέσσερα αντίστοιχα σημεία συγκέντρωσης και κατανομής των τάσεων που δημιουργήθηκαν στο βασικό τρίγωνο διαμάντι με βάση το χρησιμοποιούμενο σχημα :



Εικόνα 6.3 : σημεία συγκεντρώσεως τάσεως με βάση το σχήμα α) κυκλικός, β) οβάλ, γ)εξάγωνος, δ) τετράγωνος, ε) πολυγωνικός σκελετός.

Το πρώτο σημείο συγκέντρωσης σε όλα τα σχήματα είναι στην ένωση του πάνω σωλήνα και του κούτελου. Βάσει της χρωματικής κλίμακας γίνεται αντιληπτό ότι ο οβάλ και ο κυκλικός σωλήνας απορροφάει και διανέμει ομοιόμορφα την τάση που δημιουργείται πάνω στον σκελετό. Όσον αφορά τους τετράγωνους, εξάγωνους και πολυγωνικούς σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν, η τάση αναπτύσσεται περισσότερο στο σημείο των εξοχών.

Το ίδιο συμβαίνει και στα άλλα τρία σημεία των γεωμετρικών επιλογών, έχοντας μια ξεκάθαρη εικόνα των τάσεων που δημιουργούνται στις άρθρωσης του πλαισίου (εικόνα 6.3).

Είναι λοιπόν προφανές ότι ο κυκλικός σωλήνας είναι η πλέον βέλτιστη σχέση σε έναν σκελετό ποδηλάτου. Βάσει αυτού του συμπεράσματος θα γίνουν συγκεκριμένες αλλαγές όπως ο συνδυασμός νέων προηγμένων υλικών, κυρίως

σύνθετων υλικών αλλά και κραμάτων μετάλλων που έχουν υποστεί συγκεκριμένη θερμική ή μηχανική κατεργασία.

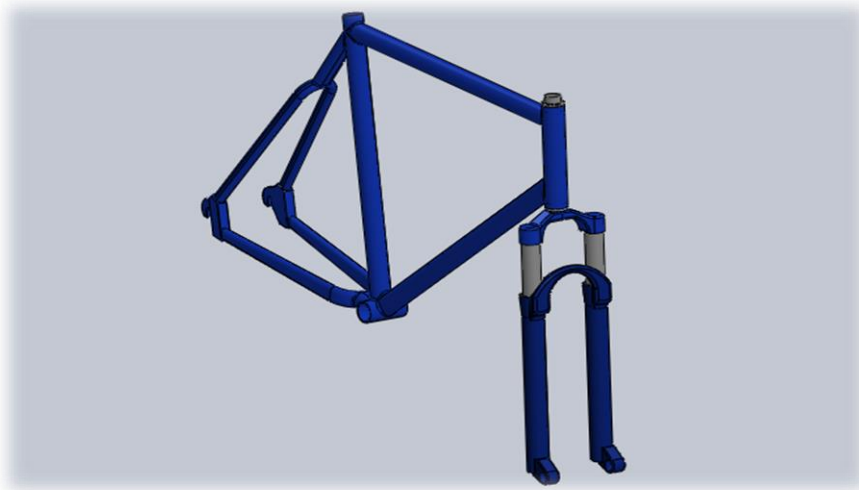
Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά οι ιδιότητες των υλικών αυτών σε ένα σκελετό διαμάντι :

Ιδιότητες Υλικών				
Υλικό σκελετού	Elastic Modulus (N/m ²)	Poisson Radio	Mass Density (kg/m ³)	Yield Strength (Mpa)
Aluminium 6061-T6	6.9 e +010	0,33	2700	227,53
Chrome Stainless Steel	2 e +011	0,28	7800	172,34
Titanium 3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	1.04 e +011	0,33	4820	1034,21
Carbon Fiber M40J	3.77 e +011	0,33	1770	4410

Πινάκας 6.4 : Ιδιότητες υλικών

Με την αλλαγή στην διατομή και στο υλικό κατασκευής, ώστε για κάθε εξεταζόμενο υλικό να προκύψει η καταλληλότερη διατομή, γίνεται εφαρμογή στην **στατική** και **γραμμική** ανάλυση .

Επίσης προστίθενται στοιχεία απόσβεσης στο μπροστινό πιρούνι για να απορροφηθούν οι κραδασμοί και να προσφερθεί μεγαλύτερη ασφάλεια και σωστή οδική συμπεριφορά στον αναβατή.

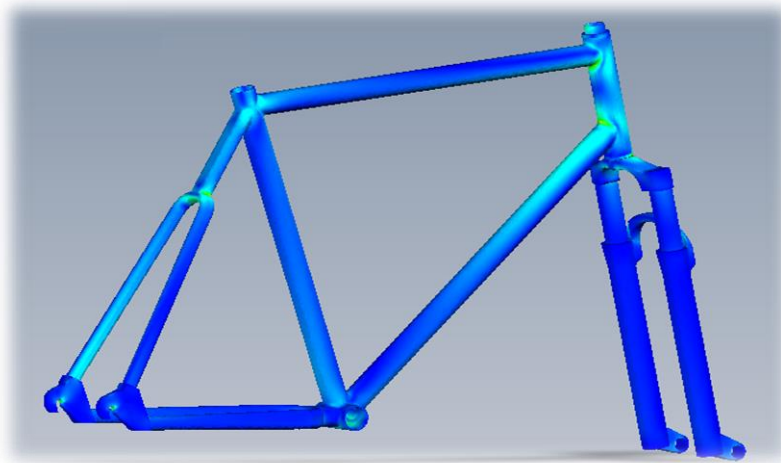


Εικόνα 6.4 : Ισομετρική άποψη σκελετού διαμάντι με προσθήκη εμπρόσθιου πιρουνιού

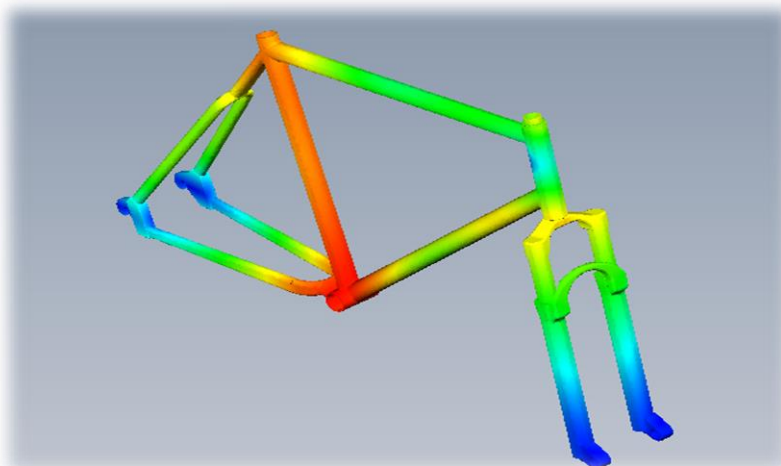
Μέσω της εφαρμογής του scenario riding σε καθεμία από τις παραμέτρους που έχουν οριστεί, εξήχθησαν και τα αντίστοιχα δεδομένα :

750N Force Test 2				
Υλικό σκελετού	Mass(grams)	Von Mises stress (Mpa)	Res disp (mm)	Equivalent
Aluminium 6061-T6	5822.84	16	7.040e - 002	1.666e - 004
Chrome Stanless Steel	10543.47	17.3	3.036e - 002	1.488e - 004
Titanium	7785.14	14.6	5.083e - 002	1.595e - 004
Carbon Fiber M40J	4962.02	16.3	1.787e - 002	1.313e - 004

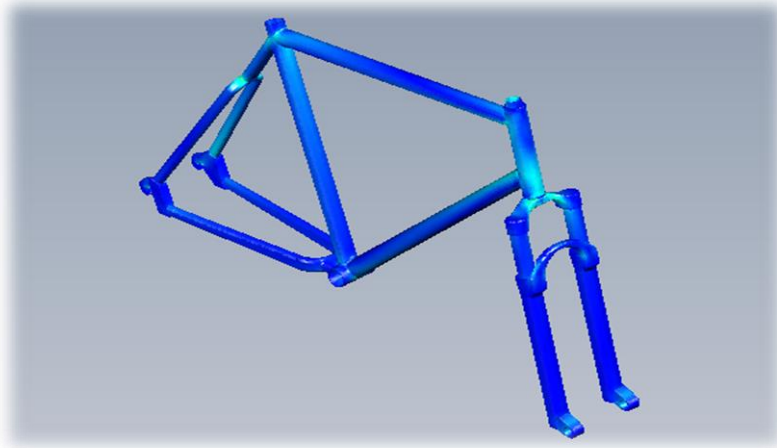
Πινάκας 6.5 : Τεστ 2 πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων σε **στατική** ανάλυση



Σχήμα 6.5 : Γραφική απεικόνιση μέγιστης τάσης (Von Mises)

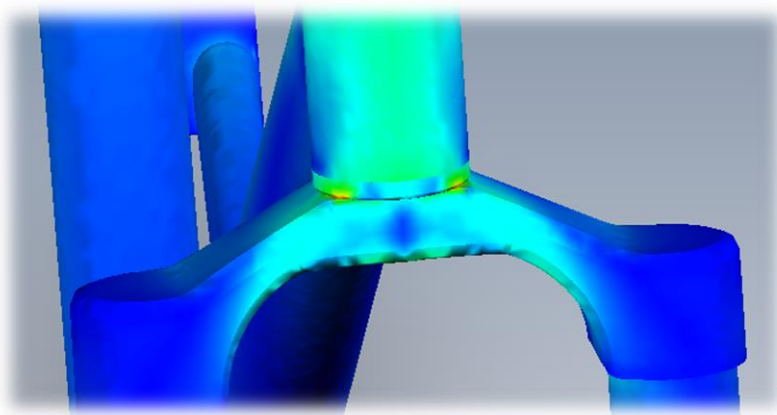


Σχήμα 6.6: Γραφική απεικόνιση ολικής μετατόπισης (Res disp)



Σχήμα 6.7 : Γραφική απεικόνιση ισοδύναμης τάσης (Equivalent)

Στην στατική ανάλυση το τιτάνιο κατέχει την μικρότερη τάση με 14.6 MPa από τα άλλα τρία μέταλλα, ενώ η μικρότερη μετατόπιση παρατηρείται στο ανθρακόνημα καθώς έχει μικρότερο βάρος από τα άλλα μέταλλα. Οι γεωμετρικοί σχεδιασμοί, καθώς και το υλικό που έχει επιλεγθεί για το σκελετό του ποδηλάτου, δείχνουν την συμπεριφορά και κατανομή των τάσεων σε διάφορα σημεία των αρθρώσεων, όπως φαίνεται και από την εικόνα 6.5. Επιπλέον, μέγιστη ολική μετατόπιση παρατηρείται στην μεσαία τριβή και στον κάθετο σωλήνα του ποδηλάτου εικόνα 6.6, ενώ η μέγιστη τάση που δημιουργείται (και στα τέσσερα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν), εντοπίζεται στο κάτω μέρος του κούτελου - πιο συγκεκριμένα πάνω στο Head set, όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6.8 : Ανάδειξη μέγιστης τάσεως (κάτω από το κούτελο στο Head set)

Αφού ολοκληρώθηκε η στατική ανάλυση, διαπιστώθηκε ότι σε κανένα τεστ δεν έγινε υπέρβαση του ορίου ελαστικότητας των υλικών (πίνακας 6.5).

Όσον αφορά στη γραμμική ανάλυση με τυχαίους κραδασμούς, με την εφαρμογή του scenario riding σε καθεμία από τις παραμέτρους που έχουν οριστεί, λαμβάνονται από το λογισμικό solidworks και τα αντίστοιχα δεδομένα :

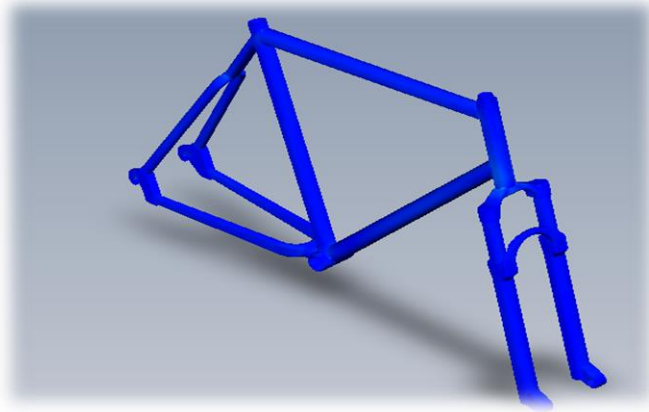
750N Force 0.4 Damping		
Υλικό σκελετού	Von Mise stress (Mpa)	Res disp (mm)
Aluminium 6061-T6	74,1	1.917e - 001
Chrome Stanless Steel	145,7	8.552e - 002
Titanium	93,4	1.352e -001
Carbon	207,1	1.138e - 001

750N Force 0.6 Damping		
Υλικό σκελετού	Von Mise stress (Mpa)	Res disp (mm)
Aluminium 6061-T6	61,6	1.632e - 001
Chrome Stanless Steel	123,3	7.377e - 002
Titanium	77,9	1.160e -001
Carbon	176,6	9.808e - 002

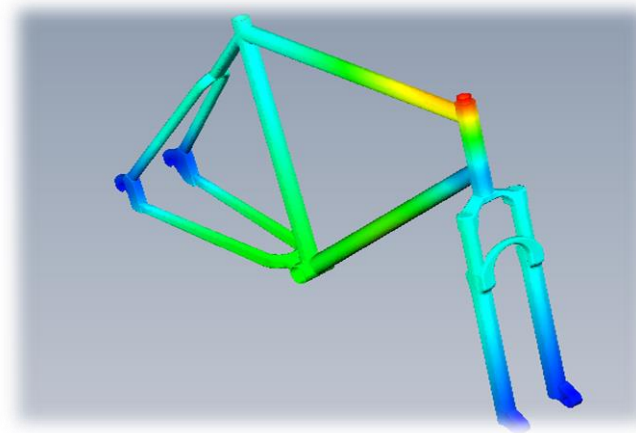
750N Force 0.8 Damping		
Υλικό σκελετού	Von Mise stress (Mpa)	Res disp (mm)
Aluminium 6061-T6	53,8	1.445e - 001
Chrome Stanless Steel	108,7	6.609e - 002
Titanium	68,2	1.032e -001
Carbon	156,9	8.750e - 002

Πινάκας 6.6 : Τεστ 3 πινάκας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων σε γραμμική ανάλυση

Στην γραμμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε δείκτης απόσβεσης 0.4 ,0.6 και 0.8 (με άσκηση δύναμης τα 750N όπως και στο δεύτερο τεστ) έχοντας απορρόφηση από τους κραδασμούς που δημιουργούνται πάνω στο σκελετό του ποδηλάτου. Βάση των αποτελεσμάτων, παρατηρείται ότι το ανθρακόνημα (Carbon) έχει την μεγαλύτερη τάση και μετατόπιση από τα άλλα μέταλλα. Δεν έγινε υπέρβαση του όριου ελαστικότητας των υλικών ενώ, όσο αυξάνεται ο δείκτης απόσβεσης (damping), μειώνεται η μέγιστη τάση και η μέγιστη μετατόπιση.

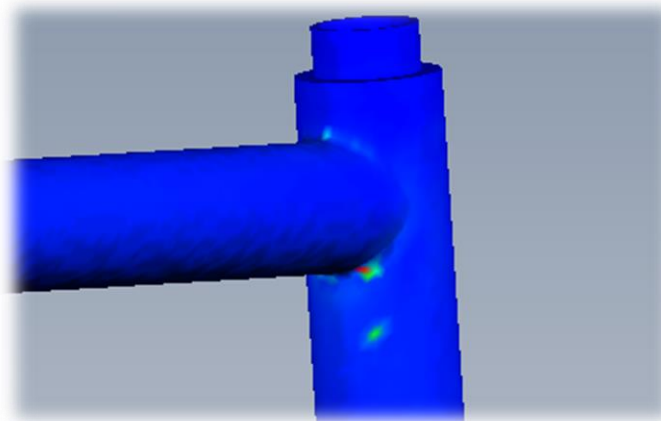


Σχήμα 6.9 : Γραφική απεικόνιση μέγιστης τάσης (Von Mises)



Σχήμα 6.10 : Γραφική απεικόνιση μέγιστης ολικής μετατόπισης (Res disp)

Η μέγιστη τάση συσσωρεύεται σε ένα σημείο του σκελετού, στην άρθρωση του πάνω σωλήνα και του κούτελου (εικόνα 6.11). Κατ' αναλογία, η μέγιστη ολική μετατόπιση (εικόνα 6.10) βρίσκεται στο πάνω άκρο του πιρουνιού, στο πάνω Head set και στο κούτελο του ποδηλάτου.



Σχήμα 6.11 : Ανάδειξη μέγιστης τάσεως

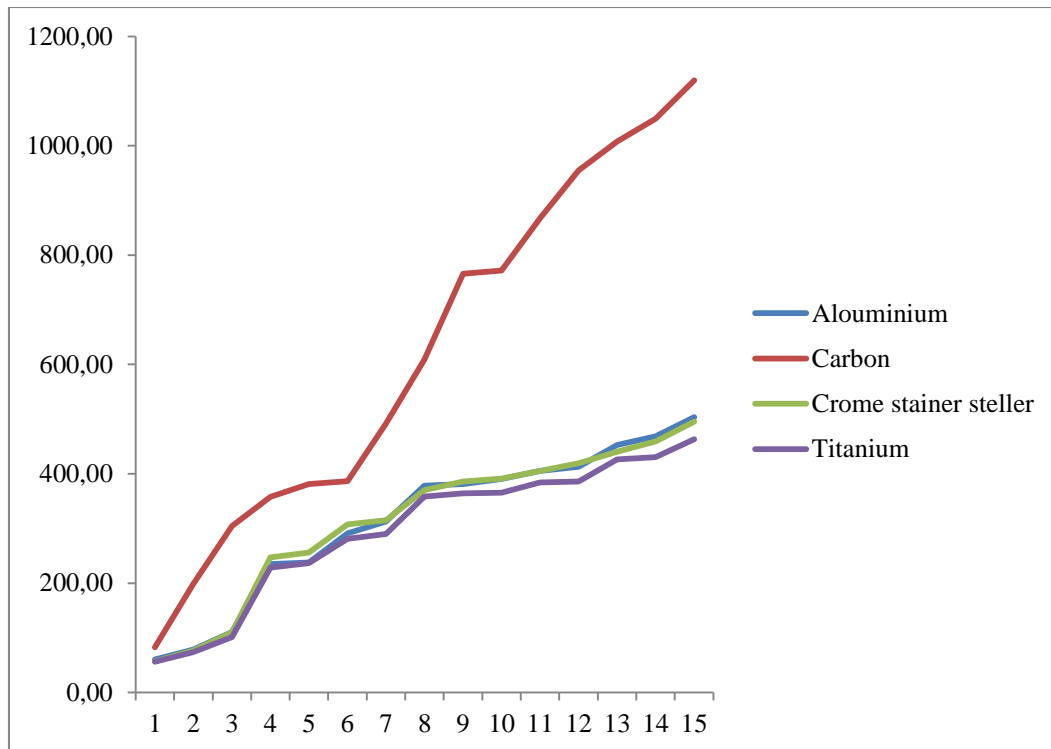
Παράλληλα, το βάρος, η αντοχή και το αεροδυναμικό σχήμα του σκελετού είναι παράγοντες καθοριστικοί στην επιλογή και στο κόστος αγοράς ενός σωστά διαμορφωμένου πλαισίου ποδηλάτου με υψηλές προδιαγραφές.

Επίσης, η προσθήκη ενός πιρουνιού με στοιχεία απόσβεσης ενέχει σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του πλαισίου, καθώς απορροφά μεγάλο μέρος στην ανάπτυξη και δημιουργία των τάσεων στα άκρα των συνδέσμων, προσφέροντας μία άνετη και ασφαλή οδήγηση.

Παρακάτω εξετάζονται οι συχνότητες δονήσεων (κραδασμών) ενός πλαισίου ποδηλάτου, που προκύπτουν από την γραμμική ανάλυση, με βάση συγκεκριμένα υλικά:

Frequency (Hertz)				
Mode No.	Alouminium	Crome stainer steller	Titanium	Carbon
1	60,56	57,08	56,21	82,41
2	78,30	76,90	73,79	198,30
3	110,74	109,99	101,44	304,64
4	235,08	247,20	228,39	358,08
5	237,95	255,97	236,42	381,43
6	291,27	307,24	281,04	386,63
7	312,76	315,09	289,62	491,88
8	378,57	370,39	358,64	608,90
9	381,45	386,18	364,40	766,12
10	390,74	391,14	365,22	771,51
11	405,29	405,31	383,91	867,29
12	412,58	419,33	385,95	955,23
13	452,87	440,30	426,09	1008,00
14	468,33	459,24	430,18	1049,20
15	503,38	495,45	463,19	1119,60

Πινάκας 6.7 : Αποτελέσματα συχνότητας δονήσεων



Γράφημα 6.1 : ένδειξη συχνοτήτων σε γράφημα.

Από την καταγραφή των μετρήσεων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το χρώμιο κυμαίνονται σχεδόν στα ίδια επίπεδα τιμών ενώ με το ανθρακόνημα προκαλείται μεγαλύτερη συχνότητα κραδασμών από τα άλλα τρία μέταλλα.

Σχετικά με τον συνδυασμό υλικών, είναι δυνατόν να παρέχεται η επιθυμητή ευλυγισία και απόσβεση σε διάφορα επίπεδα, με διαφορετικό τόνο κάθε φορά για κάθε σημείο, κάτι που δεν επιτυγχάνεται εύκολα με ένα και μόνο υλικό.

Τα συνδυασμένα υλικά είναι συνήθως ανθρακονήματα και μέταλλα (τιτάνιο, αλουμίνιο). Μια τέτοιου είδους εφαρμογή περιλαμβάνει μεταλλικούς σωλήνες **down tube** και **chain stays**, με ανθρακονηματικούς σωλήνες **top tube**, **seat tube** και **seat stays**, ώστε αυτοί να περιορίζουν τις τάσεις και τις δυνάμεις σε συγκεκριμένα σημεία του σκελετού (σχήμα 6.19).



Σχήμα 6.22 : Συνδυασμός δύο μετάλλων ,αλουμινίου με ανθρακόνημα.

Στη συνέχεια της έρευνας, εξετάζεται η εφαρμογή συνδυασμού αλουμινίου με ανθρακόνημα (carbon), καθώς και η εφαρμογή ενός δεύτερου από τιτάνιο με ανθρακόνημα. Η έρευνα πραγματοποιείται στο λογισμικό Solidworks, όπου μελετάται ξεχωριστά κάθε τμήμα του πλαισίου του ποδηλάτου (σχήμα 6.23). Έπειτα, με την εντολή mate γίνεται ένωση των τμημάτων.



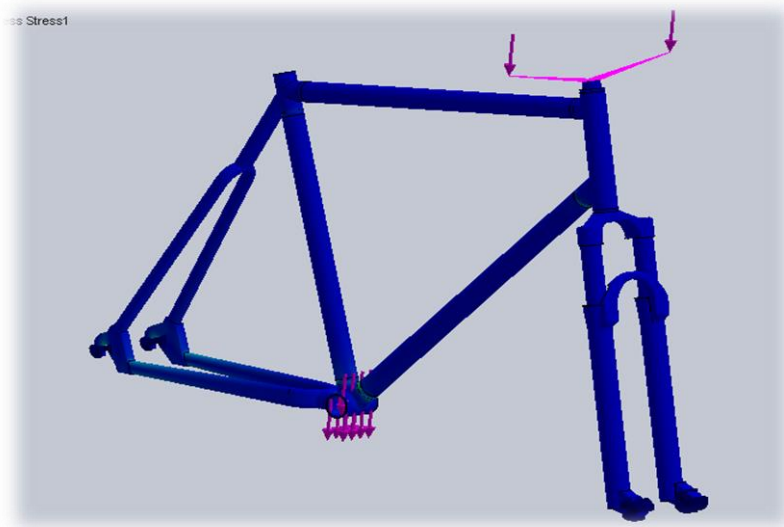
Σχήμα 6.23: Ένωση διαφορετικών τμημάτων από αλουμινίο και ανθρακόνημα.

Εφαρμόζοντας το scenario riding σε κάθε μια από της παραμέτρους που έχουν οριστεί, προκύπτουν και τα αντίστοιχα δεδομένα :

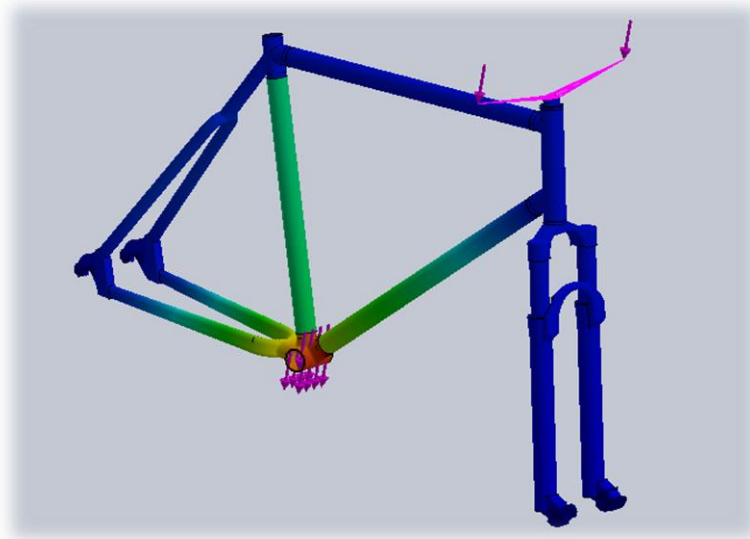
	750N Force	Test 4		
Υλικό σκελετού	mass (grams)	Von Mises stress (Mpa)	Res disp (mm)	Equivalent
Carbon Fiber M40J - Aluminium 6061-T6	5251,77	63,4	9.069e + 000	6,339e -001
Carbon Fiber M40J - Titanium 3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	5918,81	68,5	9.236e + 000	6.788e - 001

Πινάκας 6.10 : Τεστ 4 πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων με συνδυασμό υλικών σε **στατική** ανάλυση.

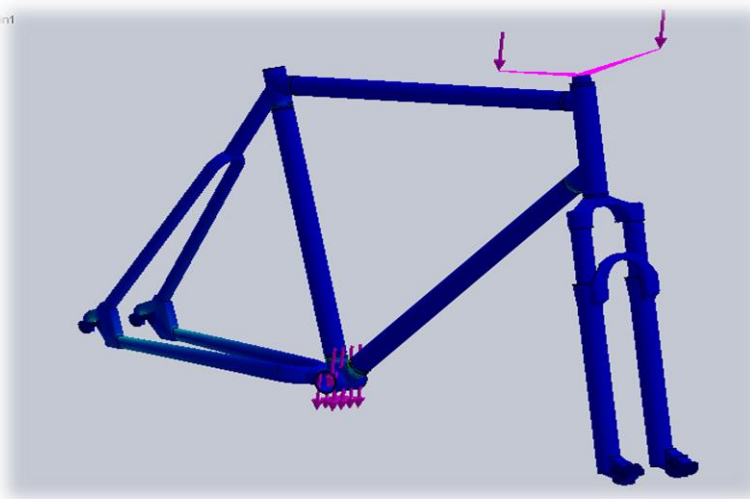
Με το συνδυασμό του αλουμινίου με το ανθρακόνημα, δίδεται μέγιστη τάση στα 63,4 και με βάρος 5,25 κιλά. Αντίστοιχα, το τιτάνιο με το ανθρακόνημα δίνει λίγο μεγαλύτερες μετρήσεις.



Σχήμα 6.24 : Μέγιστη τάση σε ένα σκελετό ποδηλάτου με συνδυασμό υλικών σε **στατική** ανάλυση

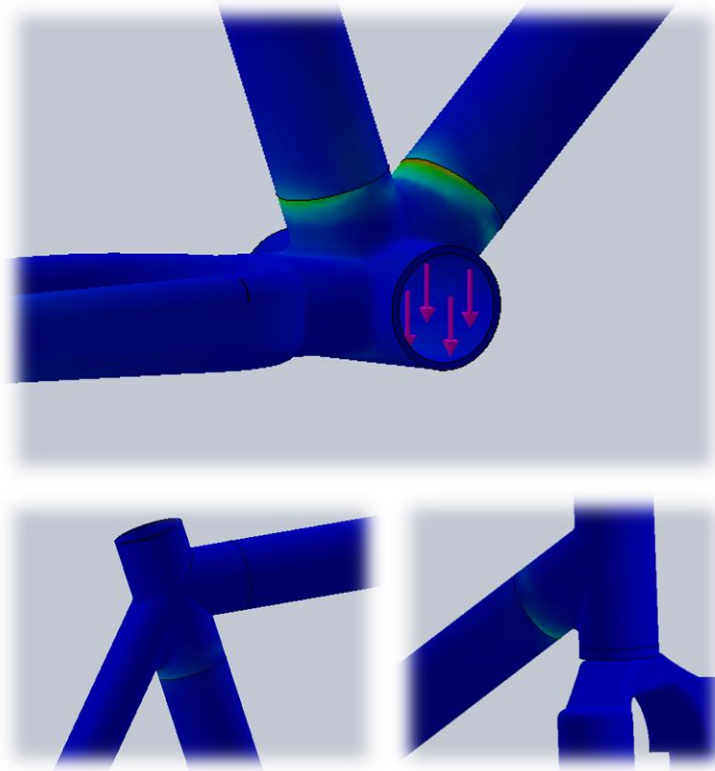


Σχήμα 6.25 : Μέγιστη ολική μετατόπιση σε ένα πλαίσιο ποδηλάτου με συνδυασμό υλικών σε **στατική** ανάλυση.



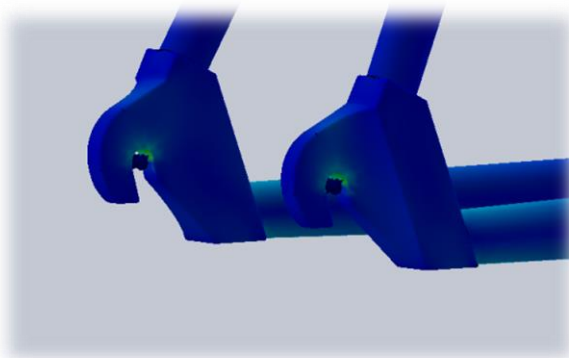
Σχήμα 6.25 : Μέγιστη ισοδύναμη τάση σε ένα πλαίσιο ποδηλάτου με συνδυασμό υλικών σε **στατική** ανάλυση. (Equivalent)

Στις εικόνες 6,24 και 6,25 παρατηρείται η μέγιστη τάση και μέγιστη μετατόπιση με το συνδυασμό υλικών. Βάσει της χρωματικής κλίμακας, διαπιστώνεται μεγάλη διαφορά από τις άλλες μετρήσεις.



Σχήμα 6.26: Ανάδειξη των μέγιστων τάσεων σε ένα σκελετό ποδηλάτου με συνδυασμό υλικών 750N.

Η μέγιστη τάση σε στατική ανάλυση εμφανίζεται στην ένωση του κάτω ανθρακονηκατικού σωλήνα με την μεσαία τριβή (εικόνα 6.26), ενώ στο βασικό τρίγωνο διαμάντι υπάρχει εμφάνιση τάσης στις ενώσεις των δυο διαφορετικών μετάλλων.



Η ανάπτυξη των τάσεων στο κάτω άκρο του σκελετού (νυχάκια) βάσει σωστών σχεδιαστικών επιλογών, είχε ως επακόλουθο την ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων και αποφυγή μεγίστης τάσης σε ένα σημαντικό σημείο του σκελετού.

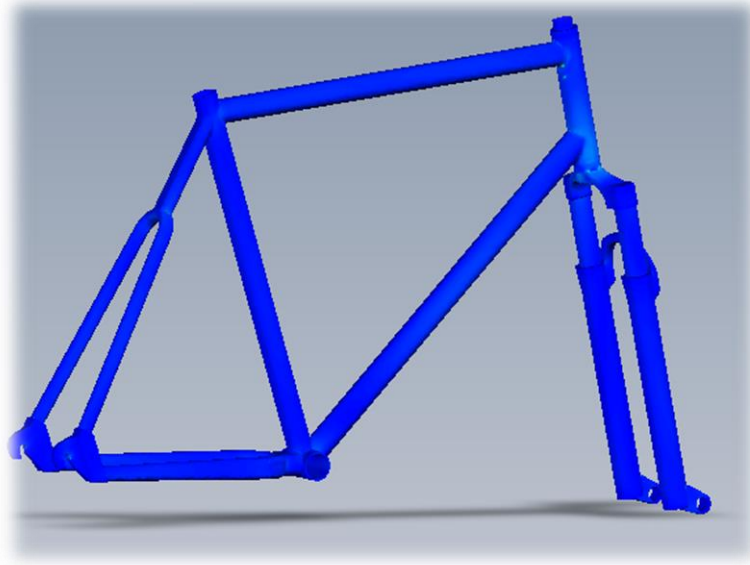
Παρακάτω ακολουθεί γραμμική ανάλυση με συνδυασμό δυο διαφορετικών υλικών, με εφαρμογή του scenario riding:

750N Force 0.4 Damping		
Υλικό σκελετού	Von Mises stress (Mpa)	Res disp (mm)
Carbon Fiber M40J – Aluminium 6061T6	76,7	2.015e - 001
Carbon Fiber M40J - Titanium 3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	80,3	1.651e - 001

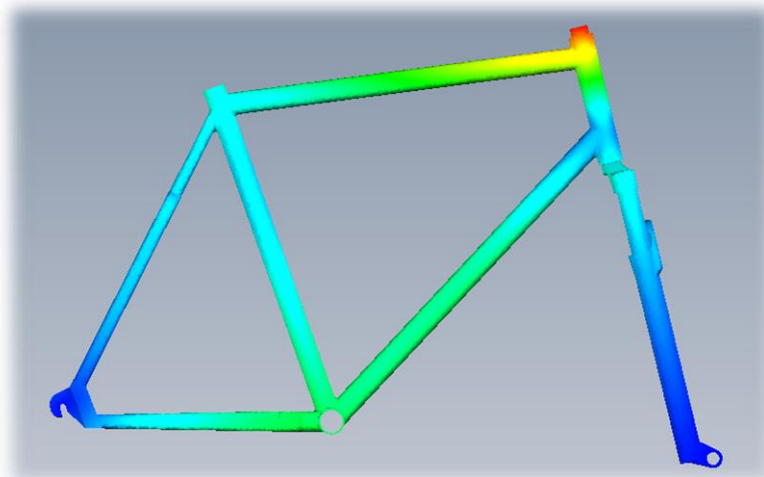
750N Force 0.6 Damping		
Υλικό σκελετού	Von Mises stress (Mpa)	Res disp (mm)
Carbon Fiber M40J – Aluminium 6061T6	64,9	1.728e - 001
Carbon Fiber M40J - Titanium 3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	67,9	1.471e - 001

750N Force 0.8 Damping		
Υλικό σκελετού	Von Mises stress (Mpa)	Res disp (mm)
Carbon Fiber M40J – Aluminium 6061T6	57,1	1.537e - 001
Carbon Fiber M40J - Titanium 3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	59,7	1.258e - 001

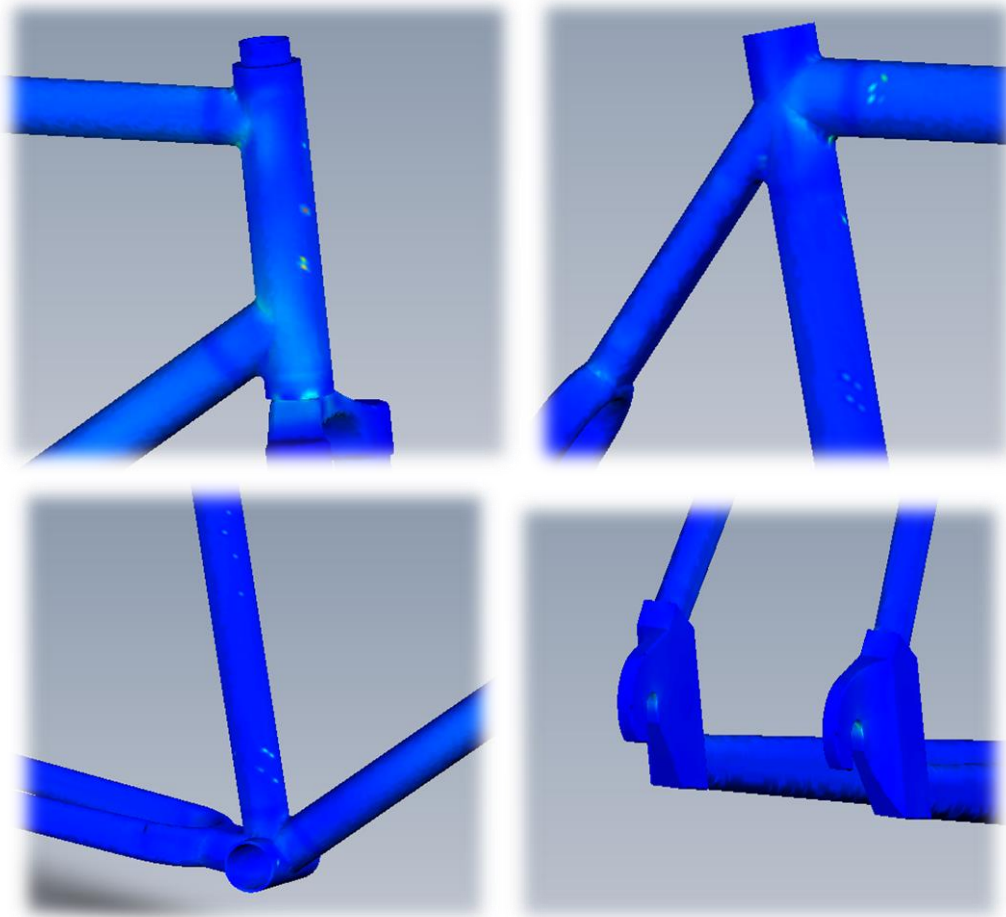
Πινάκας 6.10 : Τεστ 5 πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων με συνδυασμό υλικών σε γραμμική ανάλυση



Σχήμα 6.27: Μέγιστη τάση σε σκελετό ποδηλάτου σε συνδυασμό υλικών σε γραμμική ανάλυση



Σχήμα 6.28: Μέγιστη μετατόπιση σε σκελετό ποδηλάτου με συνδυασμό υλικών σε γραμμική ανάλυση



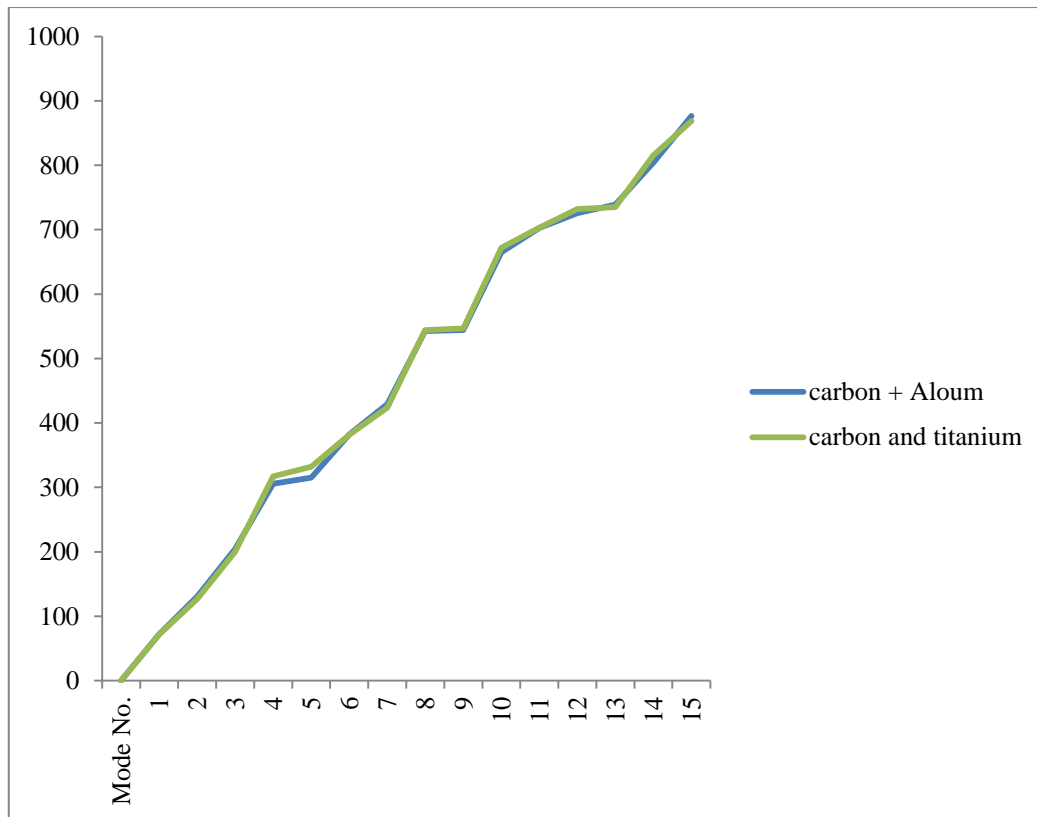
Σχήμα 6.29: Ανάδειξη των τάσεων σε ένα σκελετό ποδηλάτου σε γραμμική ανάλυση με συνδυασμό υλικών

Βάσει των αποτελεσμάτων, ο συνδυασμός των δύο υλικών μείωσε το βάρος του πλαισίου. Ωστόσο, αύξησε την τάση και την ισοδύναμη τάση, χωρίς να υπερβαίνει τα όρια διαρροής των υλικών. Συγκέντρωσε τις μέγιστες τάσεις στους κάθετους ανθρακονηματικούς σωλήνες **top tube** και **down tube**, ενώ η μέγιστη ολική μετατόπιση εμφανίστηκε στον head seat και στο κούτελο του πλαισίου, όπως παρατηρείται και από το σχήμα 6.29.

Παρακάτω εξετάζονται οι συχνότητες δονήσεων ενός πλαισίου ποδηλάτου, που προκύπτουν από την γραμμική ανάλυση, με βάση συγκεκριμένα υλικά:

Mode No.	Frequency (Hertz)	
	carbon + Aloum	carbon and titanium
1	71,99	71,64
2	130,99	126,66
3	204,1	199,77
4	305,54	317,32
5	314,92	331,92
6	382,01	381,82
7	429,63	424,08
8	542,82	543,97
9	544,26	546,49
10	664,79	671,68
11	702,8	703,34
12	725,69	732,03
13	739,03	735,14
14	804,01	815,34
15	876,45	868,73

Πινάκας 6.9 : Αποτελέσματα συχνότητας δονήσεων



Γράφημα 6.3 : Ένδειξη συχνοτήτων σε γράφημα

Οι ένδειξη των συχνοτήτων στο γράφημα 6.3 με συνδυασμό των δυο μετάλλων κυμαίνεται σχεδόν στα ίδια επίπεδα τιμών (ο δείκτης απόσβεσης δεν επηρεάζει την συχνότητα έχοντας με 0.4, 0.6 και 0.8 δείκτη απόσβεσης ακριβώς ίδιες τιμές).

6.2 Συμπεράσματα

Στο πρώτο τεστ των πέντε μοντέλων σκελετών ποδηλάτου σε στατική φόρτιση ο κυκλικός σωλήνας αποδείχθηκε ότι αποτελεί την καλύτερη επιλογή για τον σκελετό ποδηλάτου, καθώς απορροφάει και διανέμει ομοιόμορφα την τάση που δημιουργείται πάνω στο πλαίσιο του ποδηλάτου.

Στο δεύτερο τεστ έγινε προσθήκη στοιχείων απόσβεσης στο μπροστινό πιρούνι και ακολούθησε στατική ανάλυση με την χρήση διαφορετικών υλικών, όπως αλουμίνιο, ατσάλι, τιτάνιο και ανθρακόνημα. Κανένα υλικό δεν ξεπέρασε το όριο ελαστικότητας και διαρροής και με την τάση να αναπτύσσεται στο βασικό δικτύωμα του πλαισιου. Από το γεγονός αυτό απορρέει ότι οι σχεδιαστικοί περιορισμοί που έχουν επιλεγεί καθιστούν το σκελετό πιο αξιόπιστο.

Στο τρίτο τεστ σε γραμμική ανάλυση και με τυχαίους κραδασμούς, γίνεται μεταβολή του damping σε 0.4, 0.6 και 0.8 και επιλογή των αντίστοιχων υλικών, όπως και στο δεύτερο τεστ. Κανένα υλικό δεν ξεπερνά το όριο ελαστικότητας και διαρροής και η κατανομή των τάσεων είναι μικρότερη αλλά με μεγαλύτερη ένταση. Η μέγιστη τάση δημιουργείται στην ένωση του κούτελου με τον κάθετο πάνω σωλήνα του πλαισίου. Όσον αφορά της συχνότητες που προκύπτουν από την γραμμική ανάλυση, αυτές είναι όμοιες, ανεξάρτητα από το δείκτη damping, και κυμαίνονται ανάλογα με το υλικό που έχει επιλεγεί. Επίσης, οι συχνότητες σε αλουμίνιο, τιτάνιο και ατσάλι κυμαίνονται σχεδόν στα ίδια επίπεδα τιμών, με εξαίρεση το ανθρακόνημα που εμφανίζει αισθητά μεγαλύτερες συχνότητες από τα άλλα τρία μέταλλα.

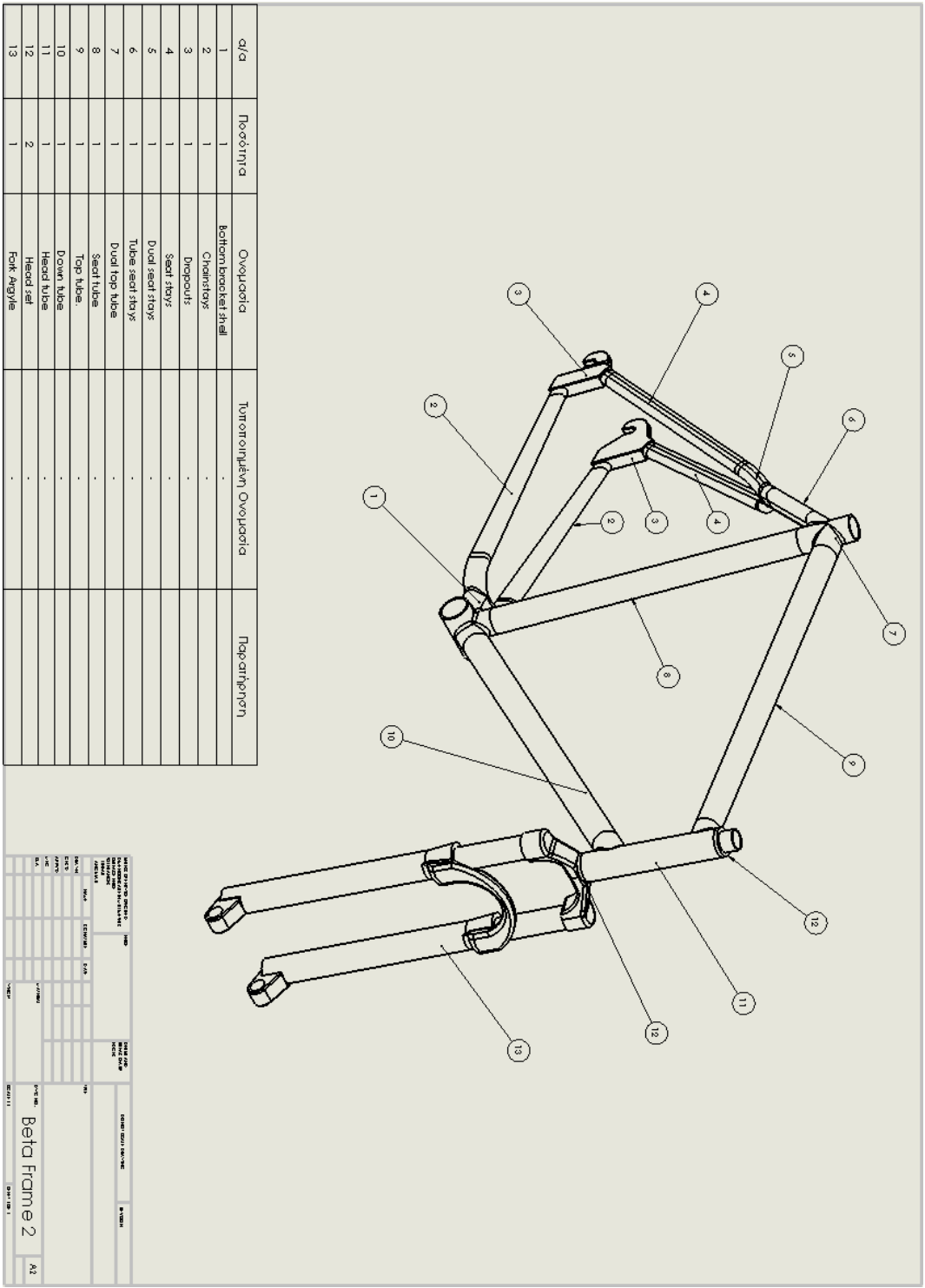
Στο τέταρτο τεστ, με βάση το scenario riding με συνδυασμό δύο υλικών, εφαρμόστηκε στατική ανάλυση, με τις μηχανικές ιδιότητες των συνδυασμένων υλικών να δίνουν ευνοϊκά αποτελέσματα για την έρευνα. Δεν έγινε υπέρβαση του ορίου ελαστικότητας και όριο διαρροής των υλικών ενώ, παράλληλα, παρατηρήθηκε απορρόφηση της ενέργειας και κατανομή των τάσεων στις αρθρώσεις του πλαισίου.

Στο πέμπτο τεστ, βάση του scenario riding σε γραμμική ανάλυση με τυχαίους κραδασμούς, με μεταβολή του damping σε 0.4, 0.6 και 0.8 και με χρήση

δυο υλικών (ανθρακονήμα-αλουμίνιο η ανθρακόνημα-τιτάνιο), η μέγιστη τάση αναπτύχθηκε στους καθέτους ανθρακονηματικούς σωλήνες top tube και down tube. Δεν ξεπεράστηκε το όριο ελαστικότητας και το όριο διαρροής του υλικού. Από την άλλη πλευρά, η μέγιστη ολική μετατόπιση εμφανίστηκε στο heat seat και στο κούτελο του πλαισίου. Οι συχνότητες που εξετάστηκαν στο τελευταίο τεστ της γραμμικής ανάλυσης κυμαίνονται σχεδόν στα ίδια επίπεδα τιμών. Ο συνδυασμός των υλικών μαζί με την σωστές γεωμετρικές παραμέτρους, έδωσαν και τα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι ενδείξεις συχνοτήτων στο γράφημα με ανθρακονηματικούς σωλήνες και ο συνδυασμός του ανθρακονήματος, είτε με αλουμίνιο, είτε με τιτάνιο, δείχνουν ότι ο σκελετός μπορεί να αντέξει σε συνθήκες έντονης καταπόνησης.

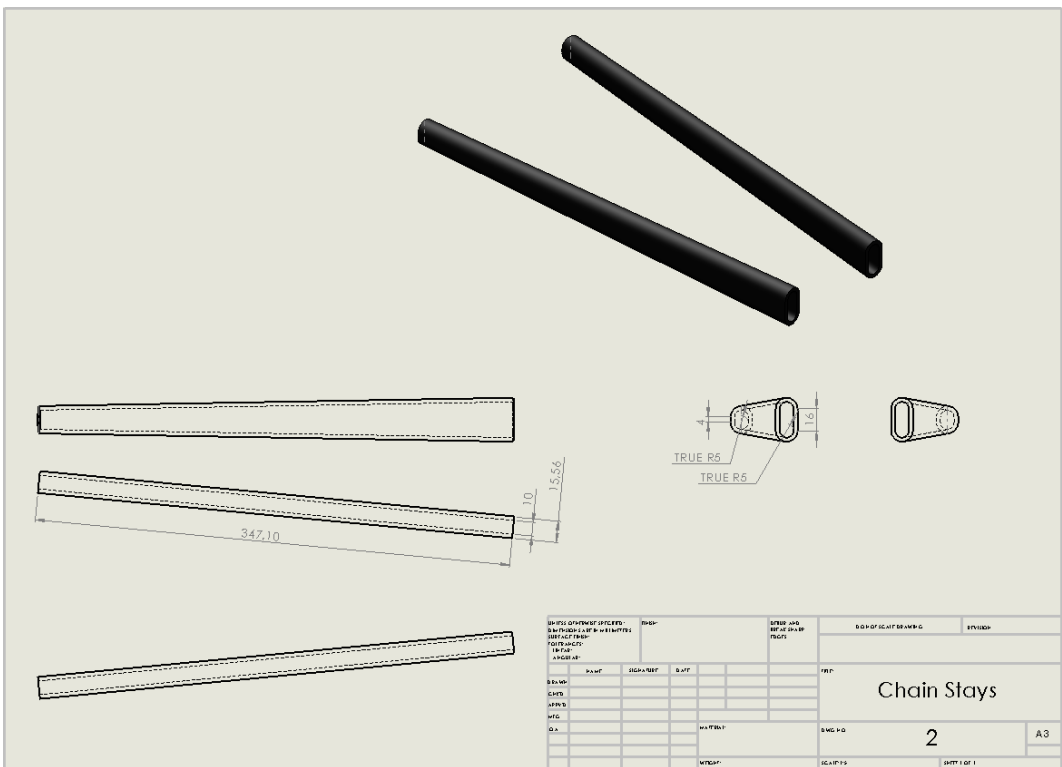
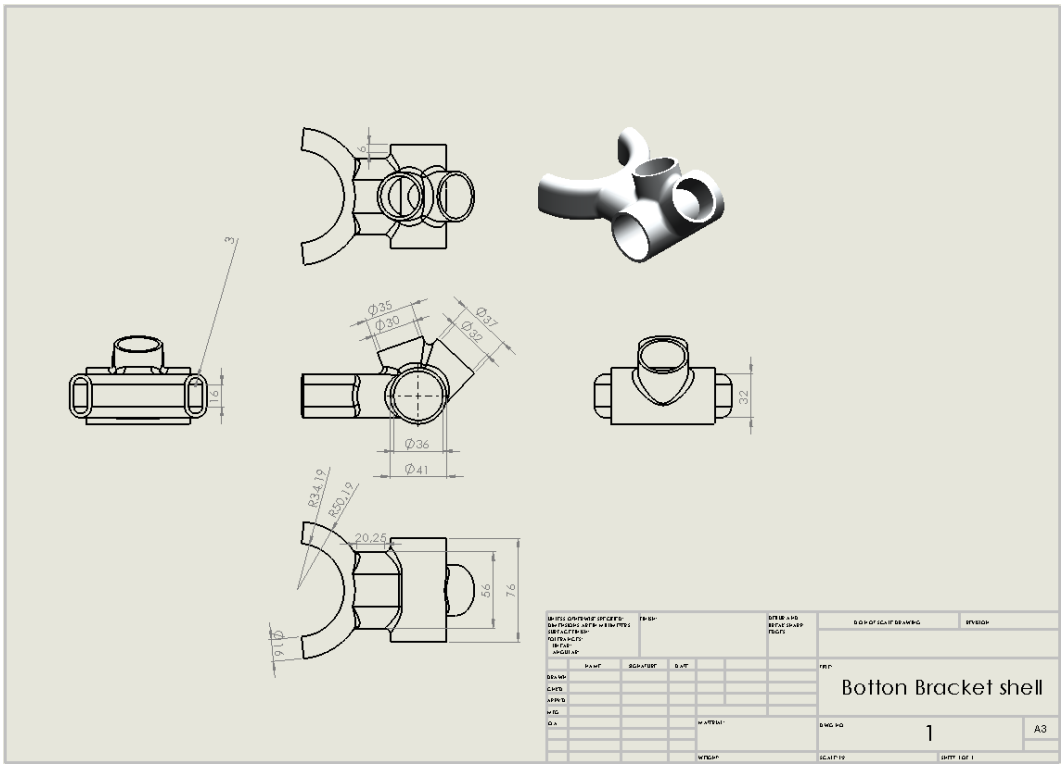
Αναφορικά με την εφαρμογή του scenario riding σε όλα τα τεστ, τα αποτελέσματα διαφέρουν και ποικίλλουν ανάλογα με την γεωμετρική υπόσταση του σκελετού. Είναι όμως θετικό το γεγονός ότι η συνολικά απορροφημένη ενέργεια για έναν σκελετό ποδηλάτου καταλήγει στους σωλήνες **main stays, seat stays** και **seat tube**, με τους οποίους η ειδική σχεδιαστική λεπτομέρεια των καμπυλών οδηγεί στα σωστά αποτελέσματα μέσα από πειραματικές μεθόδους.

Εν κατακλείδι, ανακύπτει ένα άριστα διαμορφωμένο τελικό προϊόν που εξυπηρετεί κάποιους σχεδιαστικούς στόχους είναι ο συνδυασμός κραμάτων μετάλλων από αλουμίνιο / ανθρακόνημα και στοιχείων απόσβεσης, προσφέροντας στον αναβάτη τη μέγιστη ασφαλή και άνετη οδήγηση.

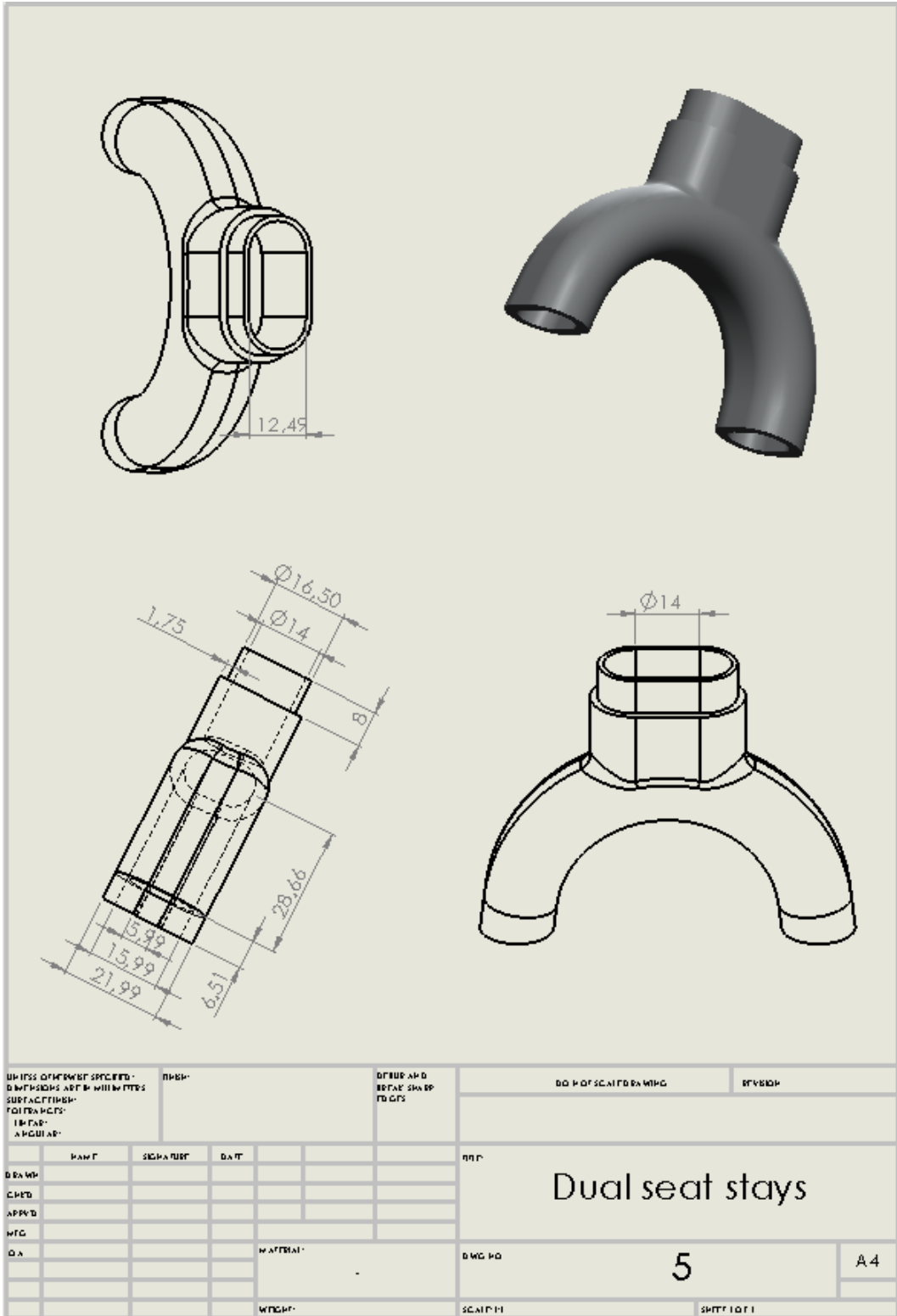


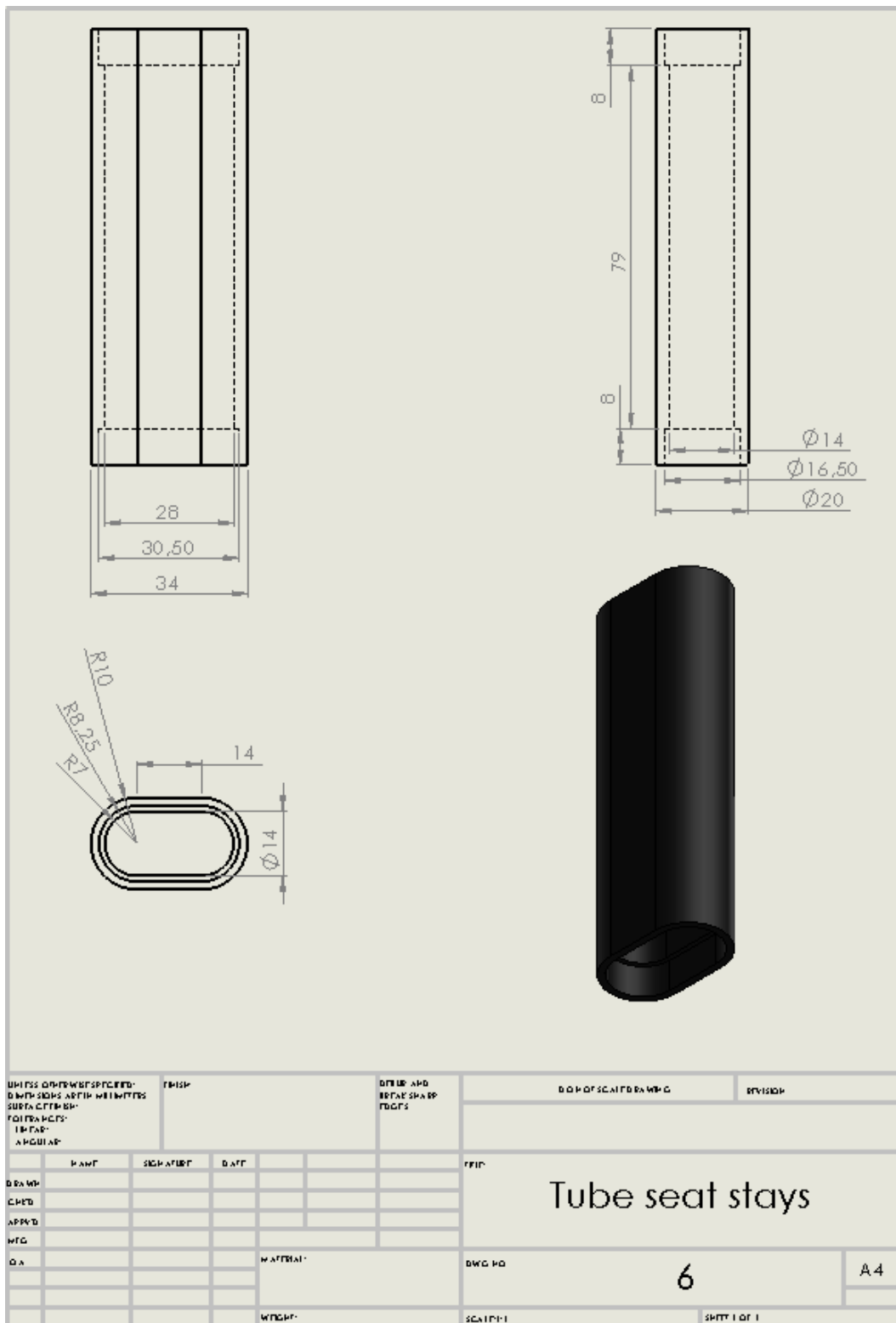
α/α	Ποσότητα	Ονομασία	Τυποποιημένη Ονομασία	Παρατήρηση
1	1	Bottom bracket shell	-	
2	1	Chainstays	-	
3	1	Droppers	-	
4	1	Seat stays	-	
5	1	Dual seat stays	-	
6	1	Tube seat stays	-	
7	1	Dual top tube	-	
8	1	Seat tube	-	
9	1	Top tube	-	
10	1	Down tubes	-	
11	1	Head tube	-	
12	2	Head set	-	
13	1	Fork Angle	-	

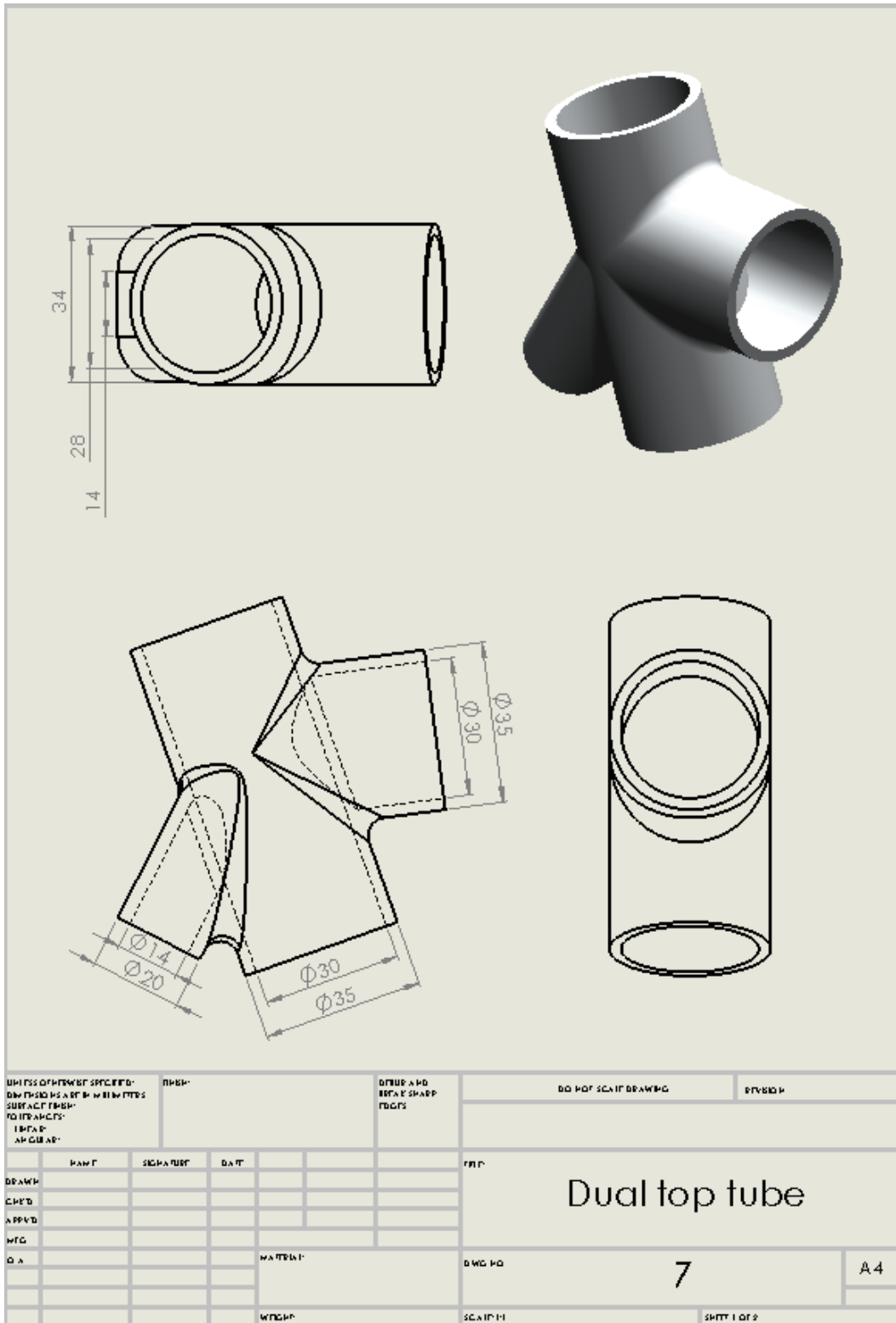
NAME: BETA FRAME 2 PROJECT: BETA FRAME 2 DATE: 10/10/2011		DRAWN BY: [Blank] CHECKED BY: [Blank]		ENGINEER: [Blank] APPROVED BY: [Blank]	
SCALE: 1:1 UNIT: MM	DIMENSIONS: 2.5D	BETA FRAME 2 10/10/2011			
A2					

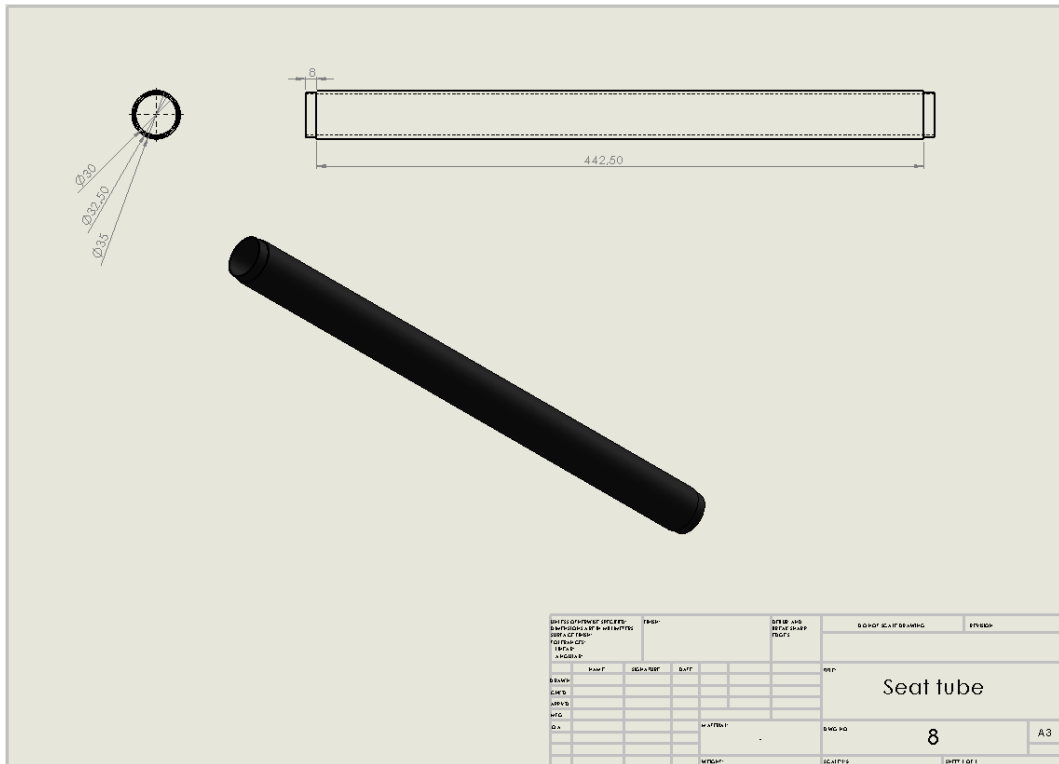


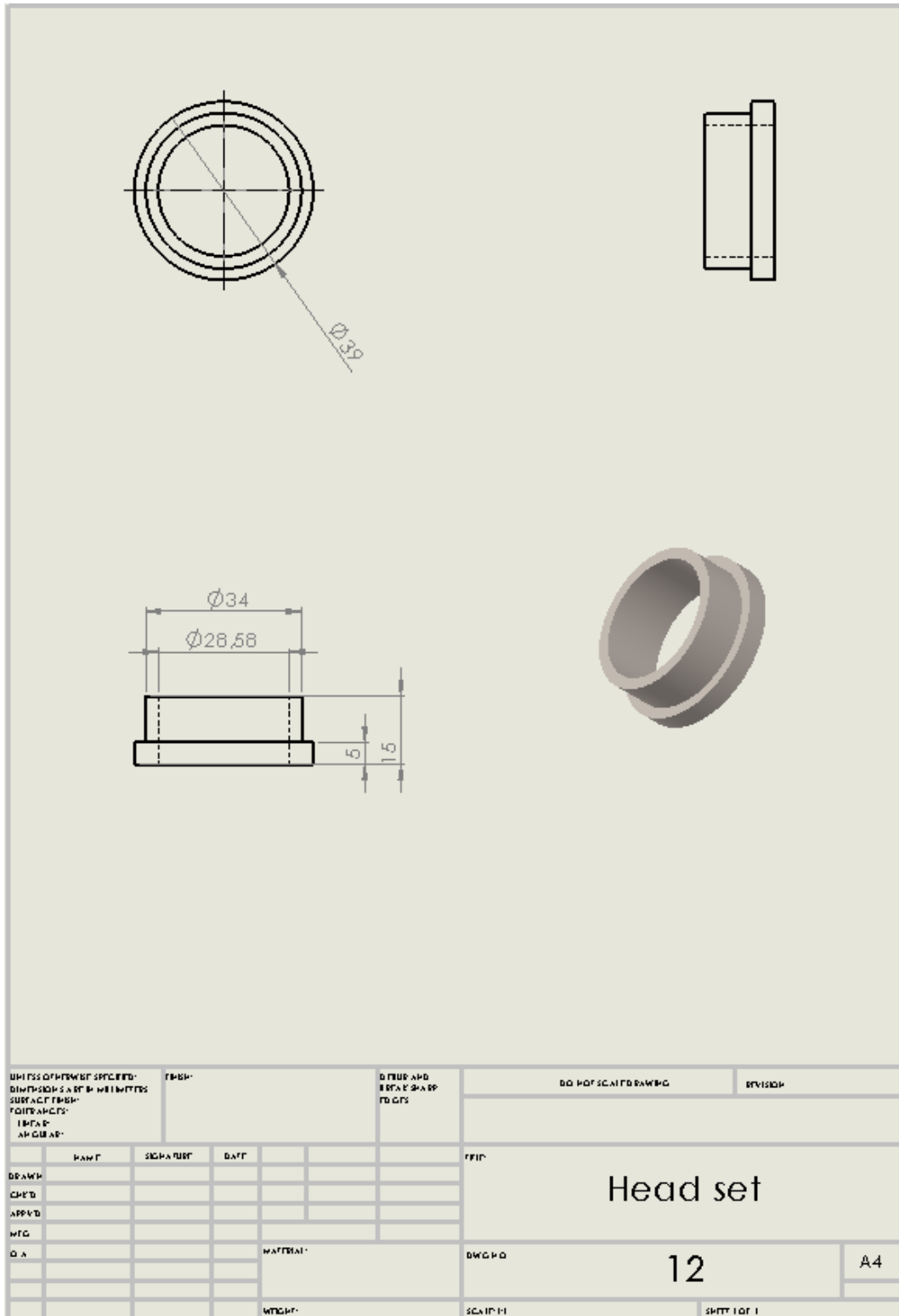


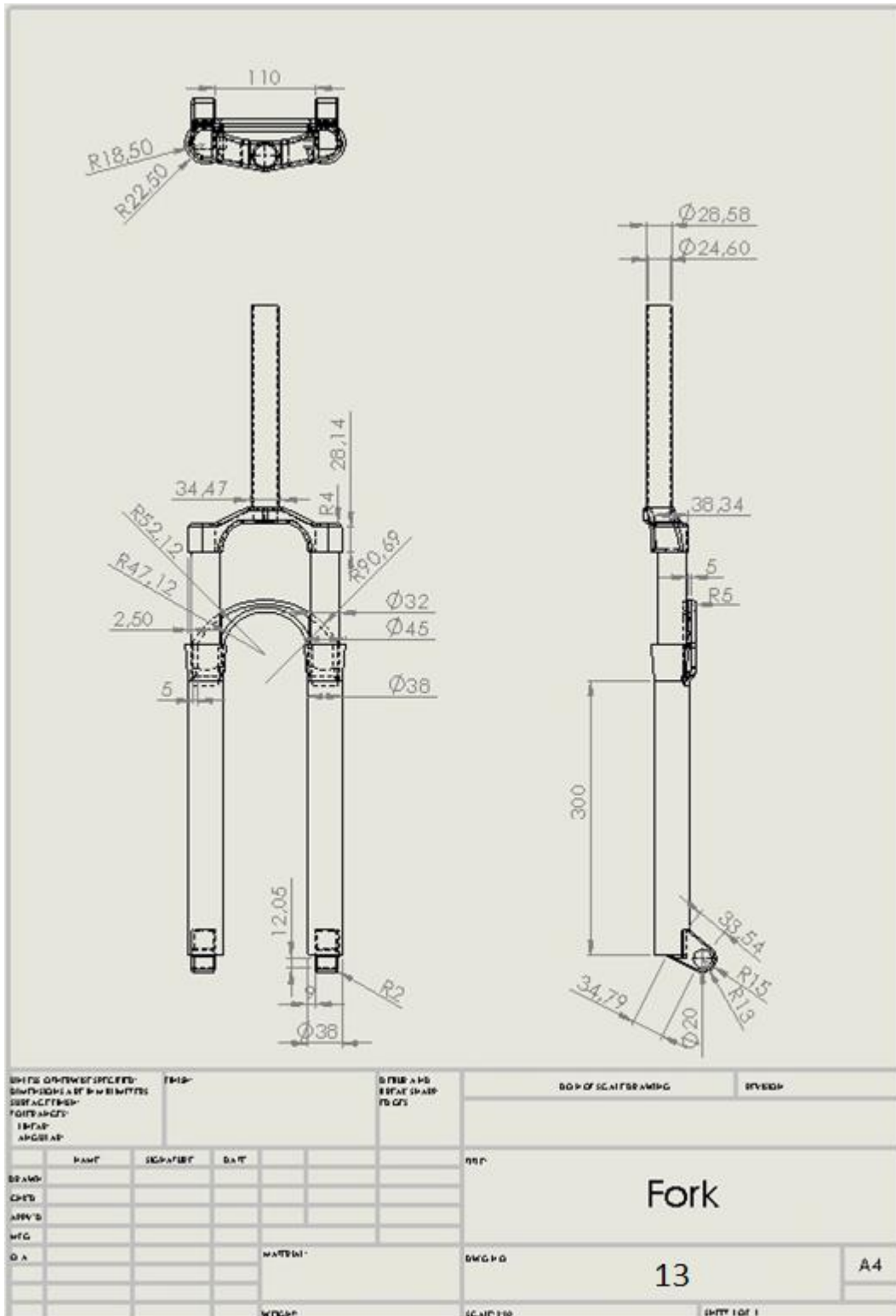












Βιβλιογραφία :

1. David V. Herli : Bicycle The History . 2004
2. Δημητριάς Ι. Παντελής : Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά .2008
3. Γιώργος Παπανικολάου, Διονύσης Μουζάκης : Σύνθετα Υλικά . 2007
4. Κ.Ε. Σαββάκης : Ποιοτικός Έλεγχος Και Τεχνολογία Υλικών . 1996
5. Ν.Ανδριανόπουλος Ε. Κυριαζή Κ. Λιακόπουλος : Πειραματική Αντοχή Των Υλικών. 1991
6. William A. Nash : Αντοχή των Υλικων .1988
7. Hugh D. Young : Φυσική Τόμος Α΄ Μηχανική – Θερμοδυναμική
8. Tool Downs : Illustrated Bicycle Maintenance For Road And Maintain Bike .2005
9. Tim Patenek : The Paterek Manual For Bicycle Frame Builders. 2000

Επιστημονικά Άρθρα :

10. Larry B. Lessard, James A. Nemes and Patrick L. Lizotte, : Utilization of FEA in the design of composite bicycle frames . Mechanical Engineering Department, McGill University, 817 Sherbrooke St. W., Montreal, Quebec, Canada H3A 2K6, August 1994
11. Jacob Hull : FEA Design of a Track Bicycle Frame. Cornell University, December 4, 2009
12. HJ Meijaard, J.P., Papadopoulos, J.M., Ruina A., and Schwab, A.L. : Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: A benchmark and review. Proceedings of the Royal Society A463, pp. 1955-1982, 2007.

Ιστότοποι :

13. <http://www.matweb.com>
14. <http://www.solidworks.com>
15. <http://www.ansys.com>
16. <http://www.bikeforest.com>
17. <http://el.wikipedia.org/wiki/>
18. <http://www.hellenic-cycling.gr>
19. <http://blogs.solidworks.com>
20. <http://grabcad.com>
21. <http://youtube.com/user/solidworks>
22. <http://www.retrobike.co.uk>
23. <http://zencomposites.com>
24. <http://www.altairhtc.com>