



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΕΔΙΟ-ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ**



ΚΑΡΜΟΓΙΑΝΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2010

.....

Παναγιώτης Καρμόγιαννης

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς τον Καθηγητή κ. Δ. Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, αλλά και για την πολύτιμη και ουσιαστική συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Γεώργιο Κούζιλο για την καθοδήγηση και την άμεση βοήθειά του, καθώς και την παροχή επιστημονικού υλικού απαραίτητου για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Παναγιώτης Καρμόγιαννης

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η μελέτη αντοχής ενός τυπικού πλαισίου ποδηλάτου χρησιμοποιώντας ως υλικά το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, το πολυπροπυλένιο και παράγωγά τους με ίνες γυαλιού, ξύλου κ.α.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα ποδήλατα γενικά, μια σύντομη ιστορική αναδρομή, τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα ποδήλατο και τα συνήθη υλικά κατασκευής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφερόμαστε στα πολυμερή βάση των οποίων επιχειρούμε να σχεδιάσουμε το πλαίσιο, γίνεται ταξινόμησή τους ανάλογα με το είδος του πολυμερισμού, τη χημική τους σύσταση, την προέλευση τους, κ.α., και τέλος αναφέρονται βασικά χαρακτηριστικά τους και ιδιότητες.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων την οποία χρησιμοποιούμε στη στατική ανάλυση αντοχής του πλαισίου. Αναφέρονται οι τύποι πεπερασμένων στοιχείων, οι μέθοδοι αυτόματης γένεσης πλέγματος και τα είδη ανάλυσης που μπορούν να εφαρμοστούν. Τέλος, γίνεται αναφορά στο λογισμικό ANSYS Workbench το οποίο χρησιμοποιούμε στην ανάλυση μας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, σχεδιάζεται ένα τυπικό πλαίσιο ποδηλάτου σε διάφορα πάχη, με το πρόγραμμα SolidWorks, ορίζονται τα υλικά εφαρμογής που είναι κατά βάση πολυμερή, καθώς και τα τεστ αντοχής που θα πραγματοποιήσουμε για τον έλεγχο της αντοχής και πραγματοποιείται στατική ανάλυση αντοχής του πλαισίου με το πρόγραμμα ANSYS Workbench.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, συγκεντρώνουμε τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων, τα αναλύουμε και εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

Τέλος, στο παράρτημα, περατίζονται τα κατασκευαστικά σχέδια των πλαισίων που σχεδιάσαμε, οι αναλυτικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήσαμε και η βιβλιογραφία πάνω στην οποία βασιστήκαμε.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΟΔΗΛΑΤΑ.....	8
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	8
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	9
1.3 ΤΥΠΟΙ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ.....	12
1.3.1 ΤΟ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΠΙΣΤΑΣ.....	12
1.3.2 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΠΟΛΗΣ.....	13
1.3.3 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΒΟΥΝΟΥ (MTB,ΔΗ, 4Χ, MARATHON, SLOPSTYLE, FREERIDE).....	13
1.3.4 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΒΜΧ.....	14
1.3.5 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΔΡΟΜΟΥ.....	14
1.3.6 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΤΟΥΡΙΣΜΟΥ.....	15
1.3.7 ΤΟ ΑΝΑΔΙΠΛΟΥΜΕΝΟ (ΣΠΑΣΤΟ) ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΠΟΛΗΣ.....	16
1.4 ΤΜΗΜΑΤΑ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ.....	17
1.5 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΟΛΥΜΕΡΗ.....	20
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	20
2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	22
2.2.1 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ.....	22
2.2.2 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ.....	25
2.2.3 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΩΝ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ.....	26
2.2.4 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ.....	27
2.2.5 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΤΟΥΣ ΣΥΣΤΑΣΗ.....	28
2.2.6 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΟΥΣ.....	28
2.2.7 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥΣ.....	29
2.2.8 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΚΑΠΟΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ.....	29
2.2.9 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥΣ.....	30
2.3 ΔΟΜΗ ΜΑΚΡΟΜΟΡΙΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ.....	33
2.3.1 ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΗ ΙΣΟΜΕΡΕΙΑ.....	33
2.3.2 ΣΤΕΡΕΟΪΣΟΜΕΡΕΙΑ.....	34
2.3.3 ΣΤΕΡΕΟΤΑΚΤΙΚΗ ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑ Ή ΤΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	35
2.4 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	38
2.4.1 ΒΑΘΜΟΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	40
2.4.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	42
2.5 ΜΟΡΙΑΚΟ ΒΑΡΟΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	46

2.6	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΥΑΛΩΔΟΥΣ ΜΕΤΑΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ	48
2.7	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΕ ΣΤΕΡΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	50
2.8	ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ.....	53
2.8.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	53
2.8.2	ΑΛΥΣΙΔΩΤΟΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ.....	54
2.8.2	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΥΣΙΔΩΤΟΥ ΚΑΤΙΟΝΤΙΚΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ	55
2.8.3	ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΛΥΣΙΔΩΤΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ - ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΑ.....	56
2.8.4	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ ΥΨΗΛΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (HDPE)	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ		60
3.1	ΓΕΝΙΚΑ	60
3.2	ΟΡΙΣΜΟΣ CAD.....	61
3.3	ΟΡΙΣΜΟΣ CAE	62
3.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	64
3.4.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	65
3.4.2	ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	69
3.4.3	ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	83
3.5	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS WORKBENCH	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ		89
4.1	ΓΕΝΙΚΑ	89
4.2	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ	90
4.3	ΥΛΙΚΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	96
4.4	ΟΡΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ	97
4.5	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		109
5.1	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	109
5.1.1	ΠΑΧΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ 2 MM	111
	ΤΕΣΤ 1.....	111
	ΤΕΣΤ 2.....	112
	ΤΕΣΤ 3.....	113
5.1.2	ΠΑΧΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ 5 MM	114
	ΤΕΣΤ 1.....	114
	ΤΕΣΤ 2.....	115
	ΤΕΣΤ 3.....	116
5.1.3	ΣΥΜΠΑΓΕΣ ΠΛΑΙΣΙΟ	117
	ΤΕΣΤ 1.....	117
	ΤΕΣΤ 2.....	118
	ΤΕΣΤ 3.....	119

5.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	120
5.2.1	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	120
5.2.2	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED).....	120
5.2.3	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	121
5.2.4	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	121
5.2.5	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED).....	122
5.2.6	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLER).....	122
5.2.7	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (CARBON FIBER 10%).....	123
5.2.8	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	123
5.2.9	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER).....	124
5.2.10	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	124
5.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....		126
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ		126
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ		129
B1	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (ΣΕΙΡΑ 6000)	129
B2	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED).....	130
B3	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	132
B4	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	133
B5	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED).....	134
B6	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLER).....	136
B7	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (CARBON FIBER 10%).....	138
B8	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	139
B9	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER).....	140
B10	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	141
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		142
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		142
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		142
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ		143
SITES		144

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΟΔΗΛΑΤΑ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ποδήλατο ονομάζεται το δίτροχο (μερικές φορές τρίτροχο) όχημα, που κινείται καθώς ο αναβάτης του χρησιμοποιεί τη μυϊκή δύναμη των ποδιών του. Το ποδήλατο αποτελεί ένα ιδιαίτερα διαδεδομένο μεταφορικό μέσο. Ο αριθμός των ποδηλάτων του πλανήτη στις μέρες μας υπολογίζεται ότι ξεπερνά το ένα δισεκατομμύριο. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ποδηλάτου αποτελεί η δυνατότητα του να ανταποκρίνεται σε αρκετά διαφορετικές απαιτήσεις, όπως είναι η μετακίνηση, η άθληση και η ψυχαγωγία.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται ένα ποδήλατο βουνού (mountain bike) τελευταίας τεχνολογίας.



Σχήμα 1.1 Ποδήλατο βουνού τελευταίας τεχνολογίας

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 πλαίσιο. 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 απο εξαρτημάτων.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

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 εξ'ολοκλήρου 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, αντανakλώντας την πεποίθηση των οπαδών της ότι θα αντικαθιστούσε το βασικό μεταφορικό μέσο του 19^{ου} αιώνα, το άλογο.



Σχήμα 1.2 Ταξινόμηση πολυμερών σύμφωνα με την πολυμερική αλυσίδα

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 περιορίζει 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 'ariel' και ήταν το πρώτο ποδήλατο εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένο από μέταλλο. Βασικό μειονέκτημα του μεγέθους του μπροστινού τροχού του ariel 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 ενδιαφέρουσων ιδεών και εφευρέσεων 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 'roner', 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 19^{ου} 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 ίδρυση 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. Εξαιρέση 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. Το πρώτο ποδηλατοδρόμιο της χώρας κατασκευάζεται στην Αθήνα για τις ανάγκες των πρώτων Ολυμπιακών Αγώνων, Πρόκειται για το μετέπειτα ποδοσφαιρικό Γήπεδο Καραϊσκάκη. Στους Αγώνες του 1896 οι ποδηλάτες Κωνσταντινίδης και Παρασκευόπουλος αναδεικνύονται Ολυμπιονίκες στα δύο αγωνίσματα ποδηλασίας (85 και 320 χιλιόμετρα αντίστοιχα). Στην Ελλάδα το πρώτο ελληνικό ποδήλατο με χειροποίητο σκελετό κατασκευάστηκε από την Rbikes (HERMES) στο Ναύπλιο. Υπάρχουν διαφορές βιομηχανίες κατασκευής ποδηλατών, εκ των οποίων η Ideal Bikes είναι η μεγαλύτερη.

1.3 ΤΥΠΟΙ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

Τα σύγχρονα ποδήλατα διακρίνονται σε επτά (7) κύριους τύπους οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω:

1.3.1 ΤΟ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΠΙΣΤΑΣ

Το ποδήλατο πίστας είναι εντελώς διαφορετικό ποδήλατο από αυτό της ποδηλασίας δρόμου, βέβαια αυτό με την πρώτη ματιά δεν γίνεται εύκολα αντιληπτό. Είναι αυστηρά ποδήλατο αγώνων και έχει σχεδιαστεί για χρήση μόνο σε ποδηλατοδρόμια. Δεν διαθέτει ταχύτητες, ούτε φρένα και ο αθλητής χρησιμοποιεί μια ελεύθερη σχέση γρاناζιών που έχει επιλέξει από πριν. Τα ελαστικά του είναι ακόμα πιο στενά, δέχονται εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις και είναι πολύ ελαφριά, αφού ο κίνδυνος για να σκάσουν είναι σχεδόν ανύπαρκτος.

Ο σχεδιασμός του σκελετού είναι ακριβής και ακολουθεί τους κανονισμούς της διεθνούς (UCI) και Ελληνικής Ομοσπονδίας Ποδηλασίας (ΕΟΠ). Αυτό το ποδήλατο είναι εξαιρετικά άκαμπτο και επίσης έχει το φινίρισμά του αρκετά αεροδυναμικό. Σε σχέση με το ποδήλατο δρόμου δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο το βάρος, όσο η ακαμψία του.

Στην κατασκευή ενός τέτοιου ποδηλάτου χρησιμοποιούνται κατά προτεραιότητα οι ίνες άνθρακα (carbon) αφού είναι εξαιρετικά άκαμπτες και μπορούν να πάρουν το σχήμα που επιθυμεί ο κατασκευαστής, με στόχο την καλύτερη αεροδυναμική. Οι τροχοί ακολουθούν την ίδια λογική και γι αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον κλειστός τροχός πίσω και τροχός με λίγες ακτίνες μπροστά.



Σχήμα 1.3 Ποδήλατο πίστας

1.3.2 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΠΟΛΗΣ

Το ποδήλατο πόλης είναι ένα ειδικά κατασκευασμένο ποδήλατο για την μετακίνηση σε μεγάλα αστικά κέντρα με την καλύτερη δυνατή απόδοση. Είναι ποδήλατα που διαθέτουν μεγάλους τροχούς με φαρδιά, αλλά λεία ελαστικά που βοηθούν στην γρηγορότερη μετακίνηση του ποδηλάτη μέσα στην πόλη που διαθέτει καλό οδόστρωμα. Είναι πιο γρήγορο ποδήλατο από αυτό της ορεινής ποδηλασίας και συνήθως προσφέρει μεγαλύτερη άνεση αφού έχει φαρδιά σέλα, ταχύτητες, υποδοχή σχάρας και μερικά από αυτά λασπωτήρες και φώτα.

Απευθύνονται σε άτομα που θέλουν να μετακινηθούν στην πόλη με το ποδήλατο, και που έχουν αποδεχθεί τα προτερήματά του, όπως το άνετο παρκάρισμα, την βελτίωση της φυσικής κατάστασης, τις οικολογικές του ιδιαιτερότητες, την ευκολία μετακίνησης, κ.α..

1.3.3 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΒΟΥΝΟΥ (MTB, DH, 4X, MARATHON, SLOPSTYLE, FREERIDE)

Το ποδήλατο ορεινής ποδηλασίας ή ποδήλατο βουνού έχει σχεδιαστεί για να μην αντιμετωπίζει προβλήματα όταν κινείται σε λασπώδης ή άγριες επιφάνειες, σε αντίθεση με το ποδήλατο δρόμου, που δεν μπορεί να αντεπεξέλθει. Έχει φαρδιά ελαστικά με τακούνια και διαθέτει αναρτήσεις. Η ανάρτηση στον μπροστινό τροχό τα πρώτα χρόνια ήταν δεδομένη ενώ τα τελευταία η χρήση ρυθμιζόμενων αναρτήσεων και στους δύο τροχούς γίνεται ακόμα πιο απαραίτητη. Πλέον τα περισσότερα ποδήλατα ορεινής ποδηλασίας διαθέτουν δισκόφρενα, αυξάνοντας κατά πολύ την απόδοσή τους, κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες.

Υπάρχουν 4 τύποι ποδηλάτων ορεινής ποδηλασίας ανάλογα με τον αγώνα και το έδαφός του:

- ✓ Ποδήλατα χωρίς ανάρτηση (Fully rigid)
- ✓ Ποδήλατα με ανάρτηση μπροστά (Hardtail)
- ✓ Ποδήλατα με ανάρτηση μπροστά και ελαστικότητα στο πίσω μέρος (Soft Tail)
- ✓ Ποδήλατα πλήρους ανάρτησης (Dual ή Full suspension)

Αυτά χρησιμοποιούνται σε αγώνες αντοχής, ελεύθερης βόλτας στο βουνό, κατάβασης και τετραπλού και το βάρος τους μπορεί να κυμαίνεται από 8 - 25 κιλά, ανάλογα με τη χρήση του.

1.3.4 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΒΜΧ

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' ότι 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.

1.3.5 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΔΡΟΜΟΥ

Το ποδήλατο δρόμου είναι ένα ποδήλατο που ως επί το πλείστον έχει σχεδιαστεί για να κινείται σε δρόμους με ασφαλτο, βατό λιθόστρωτο ή πλακόστρωτο δρόμο. Με την χρήση που έχει επικρατήσει πάντως έχει καθιερωθεί και σαν αγωνιστικό ποδήλατο. Σε γενικές γραμμές έχει μεγάλους τροχούς 28 ιντσών, λεπτά και λεία ελαστικά, γυριστό τιμόνι και τα περισσότερα διαθέτουν πολλές ταχύτητες.

Το ποδήλατο δρόμου έχει σχεδιαστεί με στόχο την καλύτερη αεροδυναμική του ποδηλάτη και το μικρό βάρος, βασιζόμενοι πάντοτε στους κανονισμούς της διεθνούς (UCI) και Ελληνικής Ομοσπονδίας Ποδηλασίας (ΕΟΠ). Συνήθως το τιμόνι τοποθετείται πιο χαμηλά από το ύψος της σέλλας και οι δύο τροχοί βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, έτσι ώστε το ποδήλατο να είναι πιο ευέλικτο. Το βάρος του όμως δεν πρέπει να είναι κάτω από 6,8 κιλά.

Για την κατασκευή ενός τέτοιου ποδηλάτου χρησιμοποιούνται κράματα σιδήρου, αλουμίνιο, ίνες άνθρακα (carbon) και τιτάνιο, υλικά που προσδίδουν αντοχή, ακαμψία και μικρό βάρος.

Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά δίνουν το τον τίτλο του πιο γρήγορου ποδηλάτου σε τεραίν με καλή ποιότητα οδοστρώματος.



Σχήμα 1.4 Ποδήλατο δρόμου

1.3.6 ΤΟ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΤΟΥΡΙΣΜΟΥ

Το ποδήλατο τουρισμού χρησιμοποιείται για περιήγηση σε αξιοθέατα, φυσικά τοπία, εκδρομές και βόλτα στη πόλη. Είναι κατάλληλο για όλες τις συνθήκες αφού διαθέτει ειδικούς λασπωτήρες. Τέλος διαθέτει πρόσθετο εξοπλισμό για μεταφορά σακιδίου και εκδρομικά είδη.



Σχήμα 1.5 Ποδήλατο τουρισμού

1.3.7 ΤΟ ΑΝΑΔΙΠΛΟΥΜΕΝΟ (ΣΠΑΣΤΟ) ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΠΟΛΗΣ

Τα σπαστά - αναδιπλούμενα ποδήλατα διαθέτουν τροχό 16, 20 ή 26 ιντσών και προορίζονται για χρήση στην πόλη. 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.



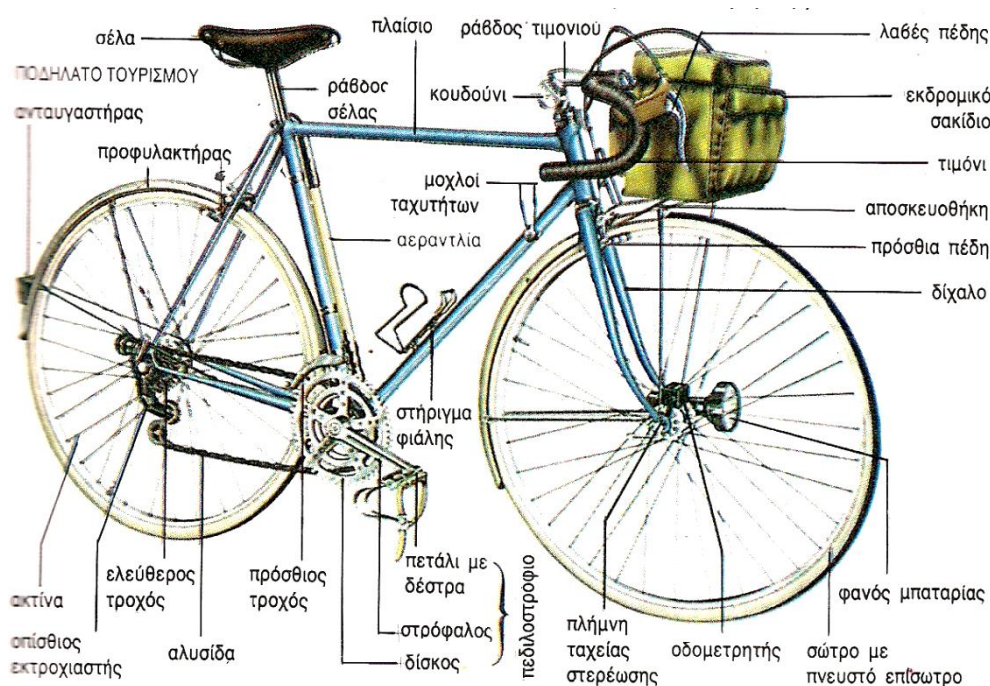
Σχήμα 1.6 Σπαστό ποδήλατο πόλης

1.4 ΤΜΗΜΑΤΑ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

Το ποδήλατο απαρτίζεται από άκαμπτο πλαίσιο που στηρίζει όλα τα υπόλοιπα όργανά του. Το πλαίσιο περιλαμβάνει:

- στο **πρόσθιο μέρος**, δίχαλο (κν. πιρούνι) που στηρίζει τον άξονα τού πρόσθιου τροχού και στρέφεται από το τιμόνι.
- στο **οπίσθιο μέρος**, οριζόντιο δίχαλο τα άκρα τού οποίου περιβάλλουν τον άξονα τού οπίσθιου τροχού
- στο **κάτω μέρος**, το πεδिलοστρόφιο και,
- στο **άνω**, ράβδο ρυθμιζόμενου ύψους επί τής οποίας στερεώνεται η σέλα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται από τυπικό ποδήλατο τουρισμού.



Σχήμα 1.7 Τμήματα ποδηλάτου τουρισμού

Το πεδिलοστρόφιο αποτελεί το κύριο όργανο μετάδοσης τής κίνησης στον οπίσθιο τροχό. Η εναλλασσόμενη πίεση στα πέδिला (κν. πετάλια) προκαλεί την περιστροφή οδοντωτής στεφάνης. Στην περιφέρεια τής στεφάνης εμπλέκεται αλυσίδα, που μεταδίδει την

κίνηση, μέσω οδοντωτού τροχού, στον οπίσθιο τροχό, ενώ ο πρόσθιος τροχός είναι κατευθυντήριο. Το ανάπτυγμα κάθε περιστροφής των πεταλιών σε διαδρομή του ποδηλάτου είναι ανάλογο προς τον λόγο μεταξύ του αριθμού οδόντων της στεφάνης και του οδοντωτού τροχού του οπίσθιου άξονα. Δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή της ασκούμενης στα πετάλια δύναμης είναι περιορισμένη, είναι απαραίτητο να διατίθενται πολλά αναπτύγματα προς υπερνίκηση των διαφόρων αντιστάσεων που οφείλονται στην κατατομή της οδού. Γι' αυτό το λόγο, το σύστημα μετάδοσης περιλαμβάνει μία ή δύο αλλαγές ταχυτήτων, συνηθέστερος τύπος τον οποίο είναι ο «εκτροχιαστής»: οπίσθιος εκτροχιαστής (για τα πινιόν) και πρόσθιος εκτροχιαστής (για τους δίσκους των πεταλιών). Η λειτουργία του πρώτου είναι δυνατή μόνο με την απελευθέρωση του τροχού που απομονώνει τη κίνηση του άξονα του οπίσθιου τροχού από τη κίνηση της μετάδοσης.

1.5 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

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 ποιο 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 όγκου.
- 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 τα συνηθέστερα υλικά κατασκευής πλαισίων ποδηλάτων:

- ✚ **Χάλυβας**
- ✚ **Αλουμίνιο** (συνήθως 6061, 7005)
- ✚ **Τιτάνιο**
- ✚ **Ανθρακονήματα**
- ✚ **Θερμοπλαστικά** (πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλάινιο κ.α.)
- ✚ **Μαγνήσιο**
- ✚ **Μπαμπού**
- ✚ **Ξύλο**
- ✚ **Συνδυασμοί** των ανωτέρω

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΟΛΥΜΕΡΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η λέξη **πολυμερές** προέρχεται από την ελληνική λέξη που σημαίνει πολλά μέρη. Σήμερα ο όρος πολυμερές κατά τον ορισμό της IUPAC, αναφέρεται σε κάθε ουσία που τα μόριά της χαρακτηρίζονται από την επανάληψη ενός ή περισσοτέρων ειδών ατόμων ή ομάδων ατόμων, που αποκαλούνται δομικές μονάδες (constitutional units), ενωμένων μεταξύ τους με ομοιοπολικό δεσμό, σε ένα ικανοποιητικό αριθμό, ώστε η ουσία να παρουσιάζει ένα σύνολο ιδιοτήτων που δεν μεταβάλλεται πρακτικά με την προσθήκη ή την αφαίρεση μιας ή περισσοτέρων τέτοιων μονάδων.

Οι απλές χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των πολυμερών καλούνται **μονομερή**. Για να χρησιμοποιηθεί μια χημική ένωση ως μονομερές θα πρέπει να διαθέτει δύο ή περισσότερες θέσεις από τις οποίες να μπορεί να αντιδράσει.

Ο αριθμός των δραστικών θέσεων ενός μονομερούς χαρακτηρίζει τη **δραστικότητά** του. Μονομερή όπως το αιθυλένιο ($CH_2=CH_2$) ή το αμινοξύ ($H_2N-R-COOH$) είναι διδραστικά ενώ αντίθετα η γλυκερίνη ($CH_2(OH)-CH(OH)-CH_2(OH)$) είναι τριδραστική και το βουταδιένιο ($CH_2=CH-CH=CH_2$) τετραδραστικό.

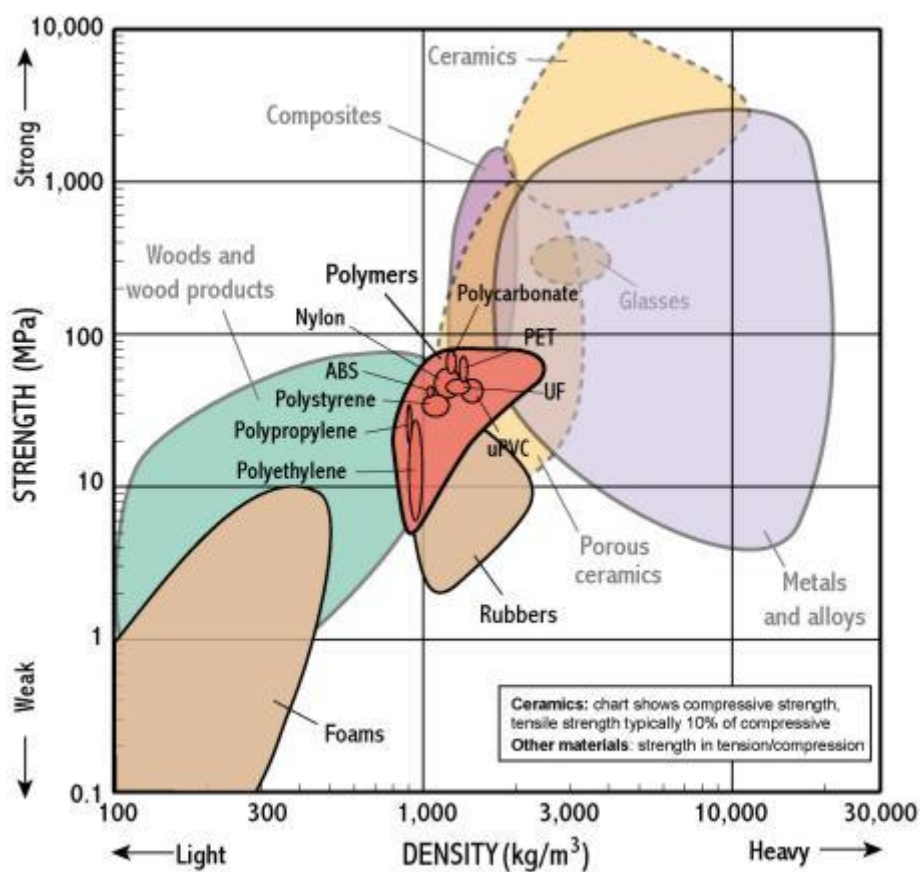
Από το κάθε μονομερές προκύπτει μια ή περισσότερες μονάδες που συμμετέχουν στη δομή των μακρομορίων του αντίστοιχου πολυμερούς. Από το αιθυλένιο για παράδειγμα προκύπτουν δύο μονάδες η μεθυλενο-ομάδα ($-CH_2-$) και η αιθυλενο-ομάδα ($-CH_2CH_2-$). Η μεγαλύτερη μονάδα που προέρχεται από ένα μονομερές καλείται **μονομερής μονάδα** (monomer unit). Στην περίπτωση του αιθυλενίου η μεγαλύτερη μονομερής μονάδα είναι η αιθυλενο-ομάδα ($-CH_2CH_2-$).

Η επαναλαμβανόμενη χημική αντίδραση με την οποία τα μόρια ενός ή περισσοτέρων μονομερών ενώνονται προς το σχηματισμό του μορίου του πολυμερούς καλείται **πολυμερισμός** (polymerization).

Ο αριθμός **n** των δομικών μονάδων που συμμετέχουν στη δομή του μορίου του πολυμερούς δηλαδή στην πολυμερική αλυσίδα καλείται **βαθμός πολυμερισμού DP** (degree of polymerization). Επειδή σε ένα δείγμα πολυμερούς τα μήκη των αλυσίδων συνήθως

ποικίλουν σε μέγεθος στην πράξη χρησιμοποιείται ο μέσος βαθμός πολυμερισμού \overline{DP} (**average degree of polymerization**). Ενώσεις με $\overline{DP} < 10$ χαρακτηρίζονται ως ολιγομερή.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται διάφορα είδη πολυμερών συναρτήσει της αντοχής και της πυκνότητάς τους.

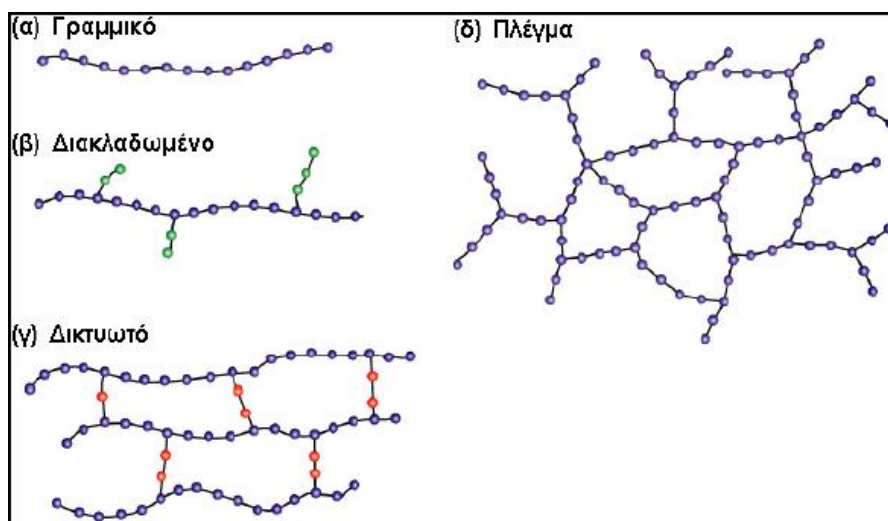


Σχήμα 2.1 Τύποι πολυμερών

2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

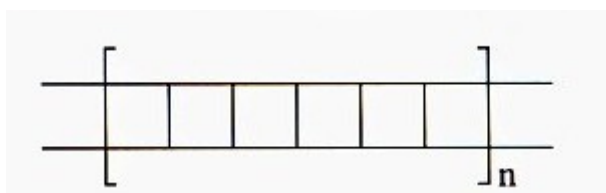
2.2.1 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ

Τα πολυμερή διακρίνονται σε **γραμμικά** (linear), **διακλαδωμένα** (branched) και **δικτυωτά ή διασταυρωμένα** (cross-linked).

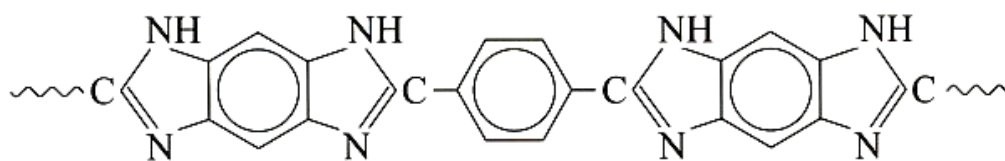


Σχήμα 2.2 Ταξινόμηση πολυμερών σύμφωνα με την πολυμερική αλυσίδα

Στα **γραμμικά πολυμερή** τα μόριά τους έχουν την μορφή απλής αλυσίδας και αναπτύσσονται σε μια διάσταση του χώρου. Το απλούστερο παράδειγμα γραμμικού πολυμερούς είναι το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας. Άλλα γραμμικά πολυμερή είναι επίσης το πολυβινυλοχλωρίδιο, το πολυστυρένιο και τα πολυαμίδια. Πολλές φορές τα γραμμικά πολυμερή έχουν στο χώρο σχήμα έλικας όπως το ισοτακτικό πολυπροπυλένιο και οι ινώδεις πρωτεΐνες. Γραμμικά πολυμερή είναι και τα σκαλωτά πολυμερή (ladder polymers) στα οποία το μακρομόριο έχει σχήμα ανεμόσκαλας. Τα πλήρως σκαλωτά πολυμερή είναι πλήρως αδιάλυτα και δύστηκτα και συνεπώς δύσχρηστα για συνήθεις εφαρμογές, για αυτό αναπτύχθηκαν στη συνέχεια τα ημισκαλωτά πολυμερή.

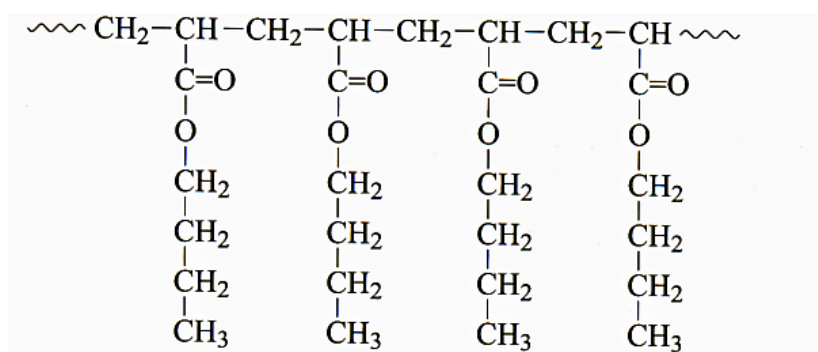


Σχήμα 2.3 Γενικό σκαρίφημα σκαλωτού πολυμερούς



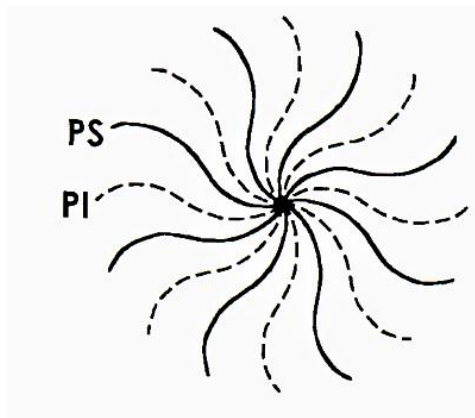
Σχήμα 2.4 Ημισκαλωτά μακρομόρια

Στα **διακλαδωμένα πολυμερή** τα μόριά τους έχουν την μορφή κλάδων δένδρου και αποτελούνται από μια βασική αλυσίδα. Από την οποία αναπτύσσονται πλευρικές διακλαδώσεις που δεν ανήκουν στη δομή του μονομερούς και αναπτύσσονται στις δύο διαστάσεις του χώρου. Ειδική κατηγορία διακλαδωμένων πολυμερών αποτελούν τα **κτενοειδή πολυμερή** (comblike polymers), στα οποία οι πλευρικές ομάδες ξεπροβάλλουν από την κύρια αλυσίδα σε μια σταθερά επαναλαμβανόμενη απόσταση. Ο πολυακρυλικός βουτυλεστέρας είναι ένα κτενοειδές πολυμερές αφού η πλευρική εστερική ομάδα εμφανίζεται στην κύρια αλυσίδα κάθε δεύτερο άτομο άνθρακα και διαθέτει ένα αλκύλιο σημαντικού μήκους, το βουτύλιο.



Σχήμα 2.5 Κτενοειδές Πολυμερές πολυ-ακρυλικός βινυλεστέρας

Μία άλλη εξίσου σημαντική κατηγορία διακλαδωμένων πολυμερών είναι τα **αστεροειδή πολυμερή** (star or radial polymers) στα οποία τρεις ή περισσότεροι κλάδοι, που είναι μακρομόρια, ξεπροβάλλουν από τον κεντρικό πυρήνα, ο οποίος μπορεί να είναι ένα απλό άτομο ή μια χημική ομάδα. Ενδεικτικά αναφέρεται το αστεροειδές πολυμερές που πήρε το όνομα Βεργίνα από το χαρακτηριστικό αστέρι με 16 ακτίνες που βρέθηκε επάνω στη χρυσή λάρνακα στον τάφο του βασιλιά Φιλίππου.



Σχήμα 2.6 Το αστεροειδές συσταδικό συμπολυμερές Βεργίνα με 16 μικτούς κλάδους (8 κλάδοι πολυστυρενίου και 8 πολυϊσοπροπενίου)

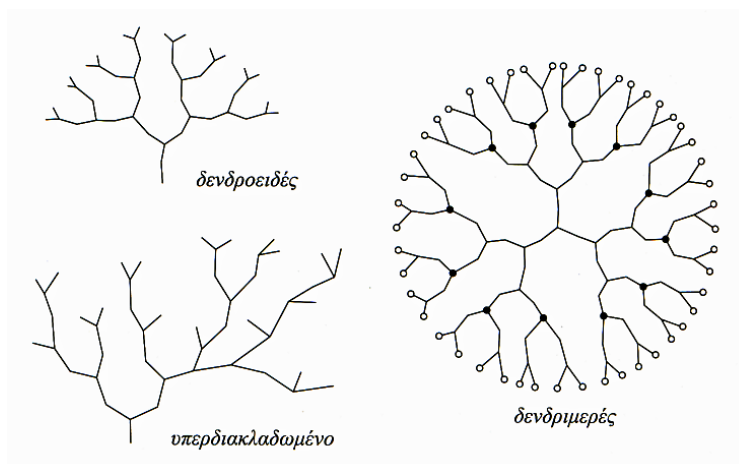
Τέλος, τα **δικτυωτά (ή διασταυρωμένα)** πολυμερή τα μόριά τους αποτελούνται από αλυσίδες που συνδέονται μεταξύ τους με διασταυρούμενες συνδέσεις σχηματίζοντας πλέγμα όπως πολύ χαρακτηριστικά συμβαίνει στις πολυαουρεθάνες, στους πολυεστέρες, στις πολυεποξειδικές ενώσεις και στη φορμοφαινόλη. Τα πολυμερή της κατηγορίας αυτής αναπτύσσονται στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Συχνά απαντώνται και με την ονομασία πλέγμα συνήθως όταν τα άτομα των συνδέσεων είναι όμοια με αυτά των αλυσίδων. Τυπικό παράδειγμα διασταυρωμένου πολυμερούς αποτελεί το βουλκανισμένο φυσικό καουτσούκ.

Το φυσικό καουτσούκ αποτελείται από μακρομόρια που οικοδομούνται από την επανάληψη ισοπροπενικών ομάδων. Κατά το βουλκανισμό παρεμβάλλονται μεταξύ των μακρομορίων αλυσίδες από άτομα θείου, οι οποίες καλούνται σταυροδεσμοί (crosslinks). Τα διασταυρούμενα πολυμερή εξαιτίας των σταυροδεσμών παρουσιάζουν σταθερότητα διαστάσεων, δεν διαλύονται και δεν τήκονται με τη θέρμανση. Αντίθετα τα γραμμικά και τα διακλαδωμένα πολυμερή δεν παρουσιάζουν πάντοτε σταθερότητα διαστάσεων, διαλύονται σε ορισμένους διαλύτες και τήκονται με τη θέρμανση.

Ειδική κατηγορία πολυμερών η οποία αναπτύχθηκε τελευταία, από τους Tomalia και Fréchet είναι τα δενδριτικά πολυμερή. Αυτά αποτελούν ένα σύνολο αρχιτεκτονικών δομών οι οποίες θα μπορούσαν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- ✿ Δενδροειδή πολυμερή (Dendrons)
- ✿ Δενδριμερή πολυμερή (Dendrimers)
- ✿ Υπερδιακλαδωμένα πολυμερή (Hyperbranched polymers)

Η λέξη Dendron προέρχεται από την ελληνική λέξη δένδρο, αφού η όλη δομή του μακρομορίου προσομοιάζει με αυτή του αναπτυσσόμενου δένδρου.



Σχήμα 2.7 Δενδριτικά Πολυμερή

Τα δενδριμερή έχουν μάλλον σφαιρική συμμετρία στο χώρο, αφού η ανάπτυξή τους γίνεται από ένα κεντρικό πυρήνα (πολυδραστικό μόριο), όπως τα αστεροειδή, με τη διαφορά ότι συνεχίζει ακτινωτά με τη συνεχή δημιουργία νέων κλάδων.

Τέλος, το μακρομόριο του δενδριμερούς καλύπτεται από μια εξωτερική σφαιρική επιφάνεια, που φέρει χαρακτηριστικές ακραίες ομάδες. Το μέγεθος ενός δενδριμερικού μακρομορίου μπορεί να ξεπεράσει τα 10 nm και το μοριακό του βάρος το 1.000.000. Τα υπερδιακλαδωμένα μακρομόρια φέρουν πολλούς κλάδους, οι οποίοι όμως δεν ξεκινούν από έναν κεντρικό πυρήνα όπως στα δενδριμερή. Έτσι θα μπορούσαν να παραλληλισθούν περισσότερο με τα κτενοειδή, όμως και πάλι οι κλάδοι δεν ξεπροβάλλουν από μια κεντρική γραμμική μακρομοριακή αλυσίδα. Τα δενδροειδή και τα δενδριμερή παράγονται με αντιδράσεις συμπύκνωσης ενός σταδίου πολυδραστικών μονομερών τύπου AB_x .

2.2.2 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ

Το 1929 ο χημικός Carothers πρότεινε την κατάταξη των πολυμερών με βάση τη σχέση μονομερούς-μονομερούς μονάδας σε **πολυμερή συμπύκνωσης και πολυμερή προσθήκης**.

Στα **πολυμερή συμπύκνωσης** (condensation polymers) οι μονομερείς μονάδες των μακρομορίων δεν περιέχουν όλα τα άτομα που υπάρχουν στα μονομερή από τα οποία προήλθαν ενώ στα **πολυμερή προσθήκης** (addition polymers) οι μονομερείς μονάδες ταυτίζονται με τα μονομερή.

Τα πολυμερή συμπύκνωσης προέρχονται από αντιδράσεις πολυσυμπύκνωσης (polycondensations), ενώ τα πολυμερή προσθήκης από αντιδράσεις προσθήκης (addition reactions).

ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ	ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ
Πολυαιθυλένιο	Πολυτερεφθαλικός αιθυλεστέρας
Πολυπροπυλένιο	Πολυεξαμεθυλενοαδιπαμίδιο
Πολυστυρένιο	Πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο
Πολυβινυλοχλωρίδιο	
Πολυμεθακρυλικός μεθυλεστέρας	

Πίνακας 2.1 Πολυμερή προσθήκης και συμπύκνωσης

2.2.3 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΩΝ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ

Τα πολυμερή των οποίων η αλυσίδα αποτελείται από ένα είδος ατόμων καλούνται **ομοαλυσωτά** και έχουν την ακόλουθη μορφή –A-A-A-A-A-A-A-A-A-

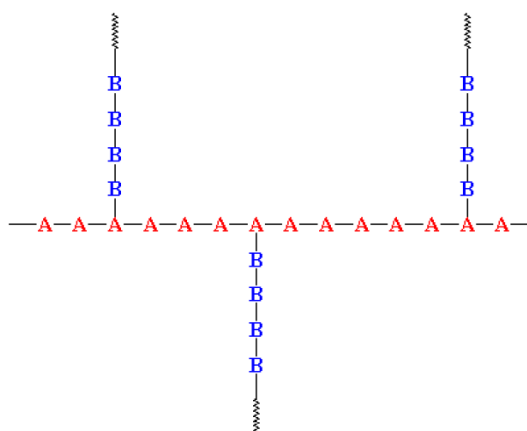
π.χ πολυολεφίνες.

Τα πολυμερή των οποίων η αλυσίδα αποτελείται από περισσότερα είδη ατόμων ονομάζονται **ετεροαλυσωτά** π.χ πολυαιθέρες. Τα συνηθέστερα ετεροάτομα που συναντάμε στο σχηματισμό της κύριας αλυσίδας είναι το οξυγόνο (O), το θείο (S) και το άζωτο (N) .

2.2.4 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ

Τα πολυμερή ανάλογα με τον αριθμό των ειδών των μονομερών μονάδων που περιέχουν, διακρίνονται σε **ομοπολυμερή** (homopolymers) όταν έχουν ένα είδος μονομερούς μονάδας και **συμπολυμερή** (copolymers) όταν έχουν περισσότερα είδη. Ομοιοπολυμερές είναι για παράδειγμα η πολυαιθυλενογλυκόλη, το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπένιο ενώ στα συμπολυμερή ανήκουν ο πολυστυρενιο-μεθακρυλικός μεθυλεστέρας, ο πολυτετραφθαλικός αιθυλεστέρας και γενικότερα τα πολυμερή που προέρχονται από περισσότερα από ένα μονομερή. Τα συμπολυμερή ανάλογα με την κατανομή των μονομερών μονάδων στην μακρομοριακή αλυσίδα χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Τυχαία συμπολυμερή** (random copolymers) όπου η κατανομή των μονομερών μονάδων είναι τυχαία: -A-B-A-A-A-B-B-A-B-
- **Εναλλασσόμενα συμπολυμερή** (alternating copolymers) όπου οι μονομερείς μονάδες εναλλάσσονται στην μακρομοριακή αλυσίδα: -A-B-A-B-A-B-A-B-
- **Συστατικά ή αδρομερή συμπολυμερή** (block copolymers) στα οποία οι μακρομοριακές αλυσίδες αποτελούνται από διάφορα ομοιοπολυμερή τμήματα που το καθένα δημιουργείται από την επανάληψη μιας μονομερούς μονάδας :
-A-A-A-A-B-B-B-B-A-A-A-A
- **Εμβολιασμένα ή εναρμονισμένα συμπολυμερή** (graft copolymers) στα οποία οι αλυσίδες αποτελούνται από ένα βασικό κορμό που δημιουργείται από την επανάληψη μιας μονομερούς μονάδας και στα οποία αναπτύσσονται διακλαδώσεις που δημιουργούνται από την επανάληψη μιας άλλης μονομερούς μονάδας. Οι διακλαδώσεις επομένως είναι επίσης μακρομοριακές αλυσίδες αλλά με μήκος μικρότερο από το μήκος του βασικού κορμού.



Σχήμα 2.8 Εναρμονισμένο συμπολυμερές

2.2.5 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΤΟΥΣ ΣΥΣΤΑΣΗ

Διακρίνονται αρχικά όπως οι απλές χημικές ενώσεις σε **οργανικά** και **ανόργανα**.

Οργανικά πολυμερή είναι εκείνα των οποίων η κύρια αλυσίδα απαρτίζεται από άτομα άνθρακα, μπορεί όμως να περιλάβει και άτομα οξυγόνου, αζώτου ή θείου. Στη δομή τους μπορεί να συμμετέχουν και άτομα άλλων στοιχείων με την προϋπόθεση όμως να μην περιέχονται στην κύρια αλυσίδα.

Ανόργανα πολυμερή είναι εκείνα των οποίων η κύρια αλυσίδα δεν περιέχει άτομα άνθρακα αλλά άτομα ενός ή περισσότερων δισθενών ή πολυσθενών στοιχείων.

Στην κατηγορία αυτή προφανώς υπάγονται και τα πολυμερή που προέρχονται από οργανομεταλλικές ενώσεις, συχνά όμως παρουσιάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία και ως ξεχωριστή τάξη. Υπάρχουν βέβαια και τα **οργανομεταλλικά πολυμερή**. Είναι πολυμερή που περιέχουν μέταλλο είτε στην κύρια αλυσίδα (πολυμερή συμπύκνωσης, πολυάλατα), είτε στην πλευρική αλυσίδα (πολυμερή προσθήκης). Ειδική κατηγορία αποτελούν τα **χημικά πολυμερή** ή πολυμερή συναρμογής στα οποία το μέταλλο βρίσκεται στην κύρια αλυσίδα και αποτελεί τμήμα ενώσεως συναρμογής (μονομερές).

2.2.6 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΟΥΣ

Μια άλλη αρκετά συνηθισμένη διάκριση των πολυμερών είναι αυτή που γίνεται με βάση την εφαρμογή ή την χρήση τους σε **πλαστικά, ελαστομερή, ίνες, κόλλες και επιχρίσματα** π.χ PVC, πολυστυρένιο, πολυαιθυλέμιο κ.α. Προφανώς σε μια τέτοια διάκριση κανείς περιμένει την παρουσία ενός πολυμερούς σε περισσότερες από μια εφαρμογές. Όταν τα πλαστικά χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες χρήσεις ως εξαρτήματα μηχανών π.χ οδοντωτοί τροχοί κ.α τότε χαρακτηρίζονται ως **μηχανολογικά πλαστικά** (engineering plastics). Στην κατηγορία αυτή υπάγονται ορισμένα πολυαμίδια, κάποιοι πολυεστέρες, οι πολυακετάλες κ.α. Για ειδικές εφαρμογές τέλος προορίζονται τα **προηγμένα** πολυμερή (high performance polymers) που εμφανίζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και μεγάλη σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες χαρακτηριστικά πολυμερή αυτής της κατηγορίας είναι η πολυαιθεροκετόνη, το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA) κ.α .

2.2.7 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥΣ

Διακρίνονται σε **φυσικά, τροποποιημένα και συνθετικά πολυμερή**.

- **Φυσικά πολυμερή**: Τα πολυμερή αυτά λαμβάνονται κατευθείαν από τη φύση π.χ μαλλί, μετάξι.
- **Τροποποιημένα φυσικά πολυμερή-ημισυνθετικά**: Προκύπτουν από χημικό μετασχηματισμό φυσικών προϊόντων π.χ κυτταρίνη, άμυλο, φυσικό ελαστικό, ύαλοι, κολοφώνιο, εβονίτης, cello fan κ.α
- **Συνθετικά πολυμερή** είναι όλα τα πολυμερή που επινοήθηκαν και παρασκευάστηκαν και συνεχίζουν να παρασκευάζονται από τον άνθρωπο με στόχο να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατα υλικά άλλων παραδοσιακών υλικών π.χ πολυαμίδια, πολυολεφίνες, πολυεστέρες, σιλικόνες κ.α

2.2.8 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΚΑΠΟΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ

Τα πολυμερή ανάλογα με την βασικότερη χαρακτηριστική ιδιότητά τους κατατάσσονται σε:

- **Υγροκρυσταλλικά πολυμερή** (liquid crystalline polymers) τα οποία έχουν την ικανότητα να παρουσιάζουν ορισμένα στοιχεία αυτοοργάνωσης (τάξης) όταν βρίσκονται σε κατάσταση τήγματος ή διαλύματος. Η ιδιότητα αυτή δημιουργεί τις προϋποθέσεις για έναν πλήθος νέων τεχνολογικών εφαρμογών.
- **Φωτονικά πολυμερή** (photonics) τα οποία είναι εκείνα τα πολυμερή που θα υπηρετήσουν τη φωτονική τεχνολογία, όπως σήμερα συμβαίνει με τους μεταλλικούς αγωγούς στην ηλεκτρονική τεχνολογία. Με άλλα λόγια, φαίνεται ότι σύντομα το φωτόνιο θα αντικαταστήσει το ηλεκτρόνιο στη θέση του φέροντος σωματιδίου. Πολλές ηλεκτρονικές εφαρμογές όπως η μετάδοση σήματος, η διακοπή, η ενίσχυση και η διαμόρφωση μπορούν να επιτευχθούν με χρήση φωτονικών πολυμερών. Προς το παρόν η εφαρμογή τους περιορίζεται στη μετάδοση σήματος με οπτικές ίνες (fiber-optic cables) .
- **Αγώγιμα και φωτοαγώγιμα πολυμερή** (conductive and photoconductive polymers) που άγουν σε κάποιο βαθμό το ηλεκτρικό ρεύμα (ημιαγωγοί) ή άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα εάν πέσει επάνω τους φως (φωτοαγωγοί) .

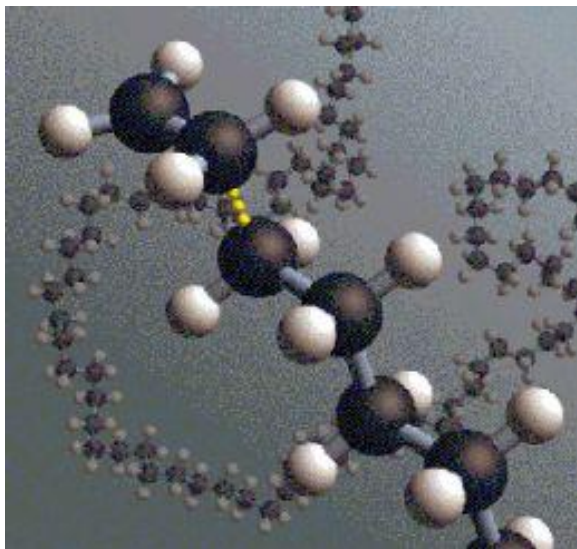
- **Θερμοσταθερά πολυμερή** (heat-resistant polymers) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες από τα υπόλοιπα (200-250 °C) .Τα πιο γνωστά θερμοσταθερά πολυμερή είναι τα πολυαμίδια.
- **Υδατοδιαλυτά πολυμερή** (water-soluble polymers) τα οποία διαλύονται εύκολα στο νερό και χρησιμοποιούνται με τη μορφή υδατικών διαλυμάτων. Τέτοια πολυμερή είναι η πολύ-βινυλική αλκοόλη κ.α .

2.2.9 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥΣ

Τα πολυμερή ανάλογα με τον τρόπο μορφοποίησής τους διακρίνονται σε **θερμοπλαστικά (thermoplastics)**, **θερμοσκληρυνόμενα (thermosettings)** και **ελαστομερή (elastomers or rubbers)**.

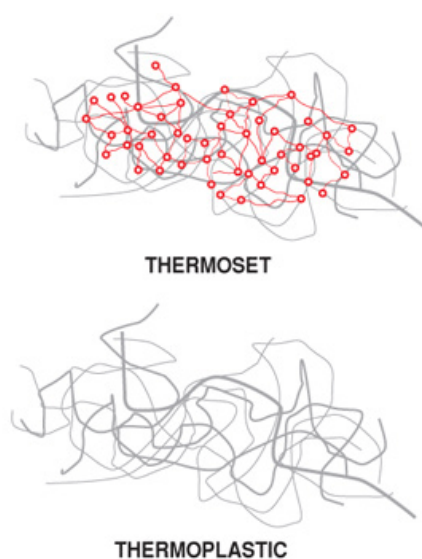
Αναλυτικότερα:

- **Θερμοπλαστικά ή πλαστομερή ή πλαστικά (thermoplastics):** Αποτελούνται συνήθως από γραμμικά μακρομόρια. Με θέρμανση μαλακώνουν και μετατρέπονται σε ρευστά (χαλάρωση των μοριακών δεσμών), διατηρούν δε την κατάσταση αυτή όσο χρόνο διαρκεί η επίδραση της θερμότητας και στη συνέχεια μπορούν εύκολα να μορφοποιηθούν με άσκηση υψηλών πιέσεων. Η ακολουθούσα απόψυξη αποδίδει στερεό υλικό. η όλη διεργασία είναι αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά διατίθενται σε υγρή ή στέρεα μορφή. Είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες και παράγονται με πολυμερισμό προσθήκης ή συμπύκνωσης. Τυπικά θερμοπλαστικά πολυμερή είναι: Το πολυαιθυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), τα πολυαμίδια (Nylon), τα φθοροπολυμερή κ.α



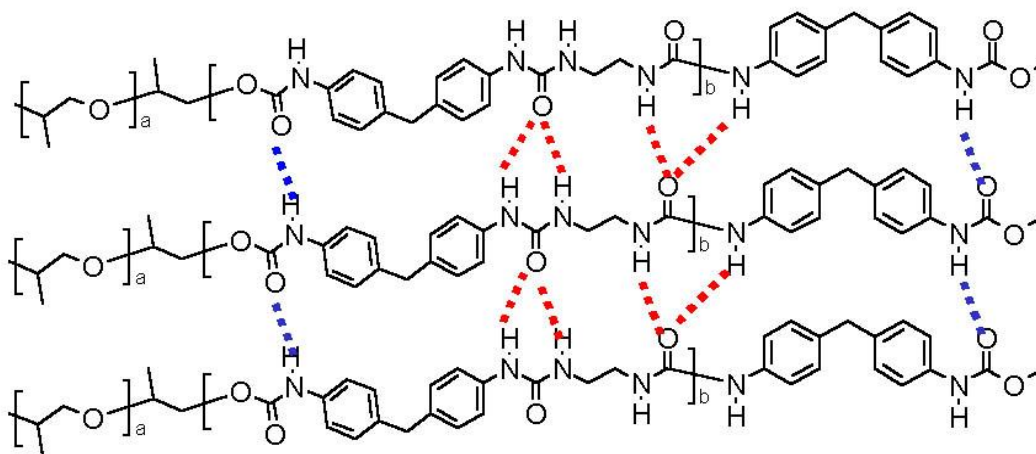
Σχήμα 2.9 Χημικός δεσμός θερμοπλαστικού πολυμερούς (πολυαιθυλένιο)

- Θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά(thermosettings):** Αποτελούνται από μη γραμμικά και σχετικά μικρά μακρομόρια. Με θέρμανση ή υπό πίεση αρχικά μαλακώνουν και μορφοποιούνται, αλλά με περαιτέρω κατεργασία αποκτούν πυκνή δικτυωτή δομή και μετατρέπονται σε σκληρά στερεά κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά είναι άμορφα σκληρά στερεά, άηκτα και δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, παράγονται δε με πολυμερισμό συμπύκνωσης. Στα εν λόγω πολυμερή συχνά παρατηρείται το φαινόμενο της διόγκωσης (swell).



Σχήμα 2.10 Θερμοπλαστικά – θερμοσκληρυνόμενα υλικά

- ✿ **Τυπικά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή:** Είναι τα φαινολικά πολυμερή (φαινοπλάστες ή βακελίτες), οι ρητίνες, οι βακελίτες κ.α .
- ✿ **Ελαστομερή ή ελαστικά (elastomers ή rubbers):** Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες. Εμφανίζουν την ιδιότητα της υπερπλαστικότητας δηλαδή κατά τον εφελκυσμό επιδέχονται πολύ μεγάλη επιμήκυνση και κατά την αποφόρτιση ταχύτατη πλήρη επαναφορά. Σε πολλά ελαστομερή η διατήρηση της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ευρεία γκάμα αλλαγών θερμοκρασίας και συνθηκών περιβάλλοντος. Τυπικά ελαστικά είναι το ελαστικό κόμμι, το συνθετικό και φυσικό κατσούκ, το συνθετικό πολυϊσοπρενίου, οι σιλικόνες κ.λ.π.

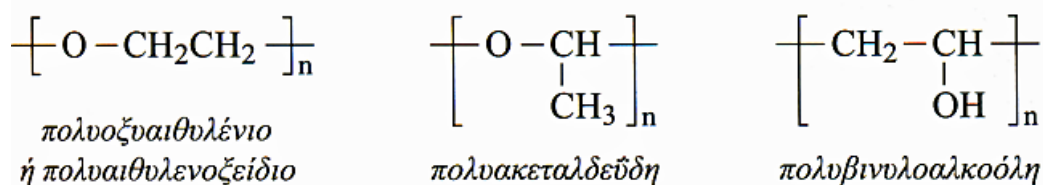


Σχήμα 2.11 Αλυσίδα ελαστομερούς υλικού

2.3 ΔΟΜΗ ΜΑΚΡΟΜΟΡΙΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ

2.3.1 ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΗ ΙΣΟΜΕΡΕΙΑ

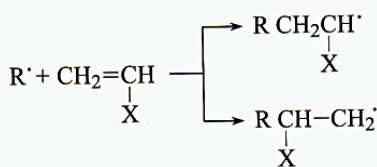
Τα πολυμερή, όπως όλες οι απλές χημικές ενώσεις, εμφανίζουν το φαινόμενο της **συντακτικής ισομέρειας** (constitutional or structural isomerism). Συντακτικώς ισομερή είναι τα πολυμερή που έχουν την ίδια χημική σύσταση, αλλά διαφορετικό τρόπο σύνδεσης των ατόμων ή των ομάδων ατόμων.



Σχήμα 2.12 Συντακτική Ισομέρεια

Συντακτικώς ισομερή επίσης θεωρούνται τα γραμμικά, διακλαδωμένα και διασταυρωμένα πολυμερή με την ίδια χημική σύσταση όπως για παράδειγμα το γραμμικό πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και το διακλαδωμένο πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας με σημαντικές διαφορές στις φυσικές τους ιδιότητες.

Ειδικότερα στα πολυμερή εμφανίζεται και ένα άλλο είδος συντακτικής ισομερείς που φέρει τον χαρακτηρισμό **ισομέρεια θέσης** (positional or regional isomerism or orienticity) και παρατηρείται στα πολυμερή που προέρχονται από τον πολυμερισμό βινυλομονομερών του τύπου $\text{CH}_2 = \text{CHX}$.

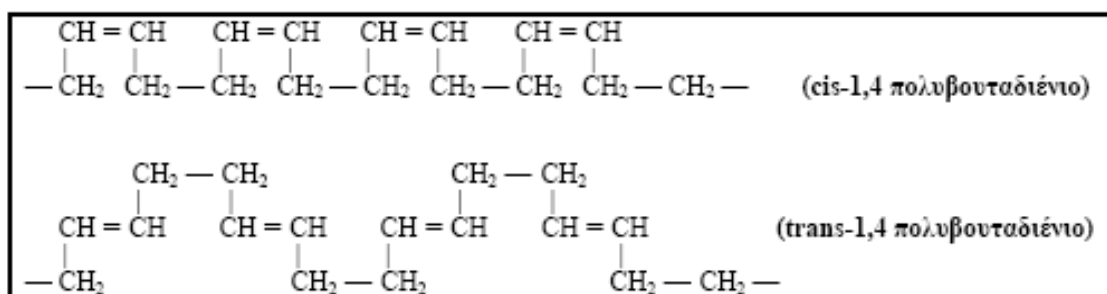


Σχήμα 2.13 Ισομέρεια θέσης

2.3.2 ΣΤΕΡΕΟΪΣΟΜΕΡΕΙΑ

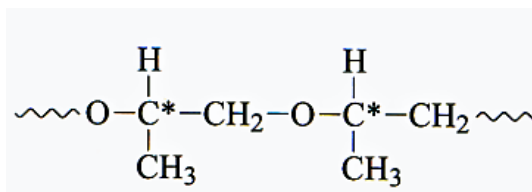
Η στερεοϊσομέρεια στα πολυμερή, όπως και στις απλές ενώσεις, οφείλεται στη διαφορετική διεύθυνση των ατόμων ή των υποκαταστατών του μακρομορίου στο χώρο. Στερεοϊσομερή είναι δύο πολυμερή με την ίδια χημική σύσταση και τον ίδιο συντακτικό τύπο αλλά διαφορετικό στερεοχημικό, ο οποίος γενικότερα είναι γνωστός ως **απεικόνιση** (configuration).

Αξίζει δε να επισημάνουμε ότι μια άλλη μορφή **στερεοϊσομέρειας** που αφορά τη διάταξη των υποκαταστατών σε ένα διπλό δεσμό είναι η ισομέρεια **cis-trans**. Στα cis-ισομερή τα άτομα άνθρακα βρίσκονται όλα στην ίδια πλευρά του επιπέδου του διπλού δεσμού, ενώ στα trans-ισομερή εναλλάσσονται εκατέρωθεν του επιπέδου του διπλού δεσμού.



Σχήμα 2.14 Η cis-trans ισομέρεια του πολυβουταδιένιου

Τέλος ξεχωριστό είδος ισομέρειας αποτελεί η **οπτική ισομέρεια** η οποία εμφανίζεται σε βινυλικές ενώσεις όταν ο υποκαταστάτης περιέχει ασύμμετρο άτομο άνθρακα. Τα αντίστοιχα πολυμερή είναι οπτικά ενεργά και οι οπτικές τους ιδιότητες είναι σημαντικά διαφορετικές από τις αντίστοιχες του μονομερούς του.



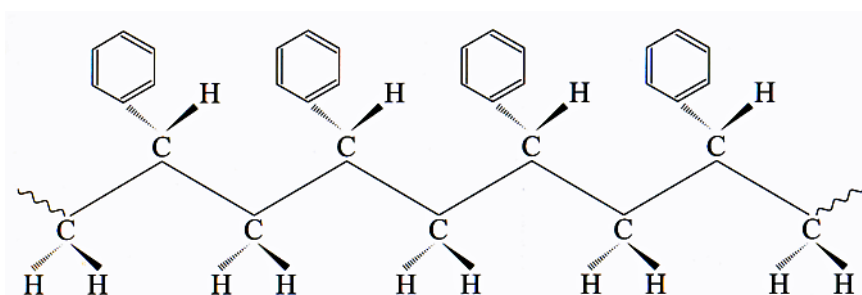
Σχήμα 2.15 Οπτική ισομέρεια πολυπροπυλενοξειδίου

2.3.3 ΣΤΕΡΕΟΤΑΚΤΙΚΗ ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑ Ή ΤΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Είναι ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται χωρικά οι προσαρτημένες ομάδες, οι **υποκαταστάτες** (pendant groups), στη βασική πολυμερική αλυσίδα. Εμφανίζεται στα ασύμμετρα άτομα άνθρακα της πολυμερικής αλυσίδας ενώ έχει ιδιαίτερη σημασία στα βινυλικά πολυμερή τα οποία αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία βιομηχανικών πολυμερών. Εάν με D- και L- χαρακτηριστούν αυθαίρετα οι δομές με τους υποκαταστάτες αντίστοιχα πάνω ή κάτω από το επίπεδο, τότε προκύπτουν οι επόμενες τρεις στερεοκανονικές δομές των πολυμερών:

➔ **Ισοτακτικό πολυμερές (isotactic polymer)**

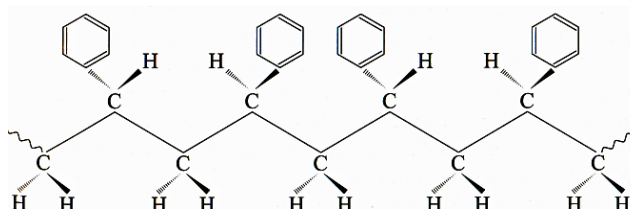
Στη δομή αυτή κάθε ψευδοασύμμετρο άτομο άνθρακα της αλυσίδας έχει τους ίδιους υποκαταστάτες προς την ίδια πλευρά του επιπέδου του βασικού κορμού της. Δηλαδή οι μονομερείς μονάδες έχουν όλες τη δομή D- ή L- .



Σχήμα 2.16 Ισοτακτικό πολυστυρένιο DDDD- ή LLLL-

➔ **Συνδυοτακτικό πολυμερές (syndiotactic polymer)**

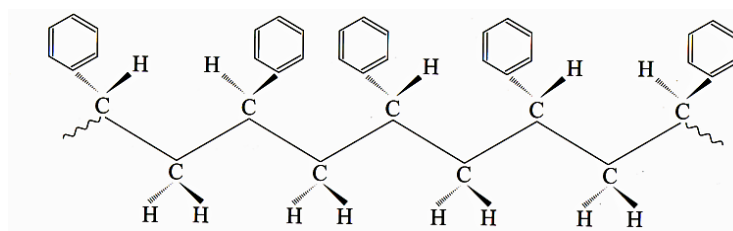
Οι όμοιοι υποκαταστάτες βρίσκονται εναλλάξ προς την ίδια πλευρά του επιπέδου



Σχήμα 2.17 Συνδυοτακτικό πολυστυρένιο LDLD

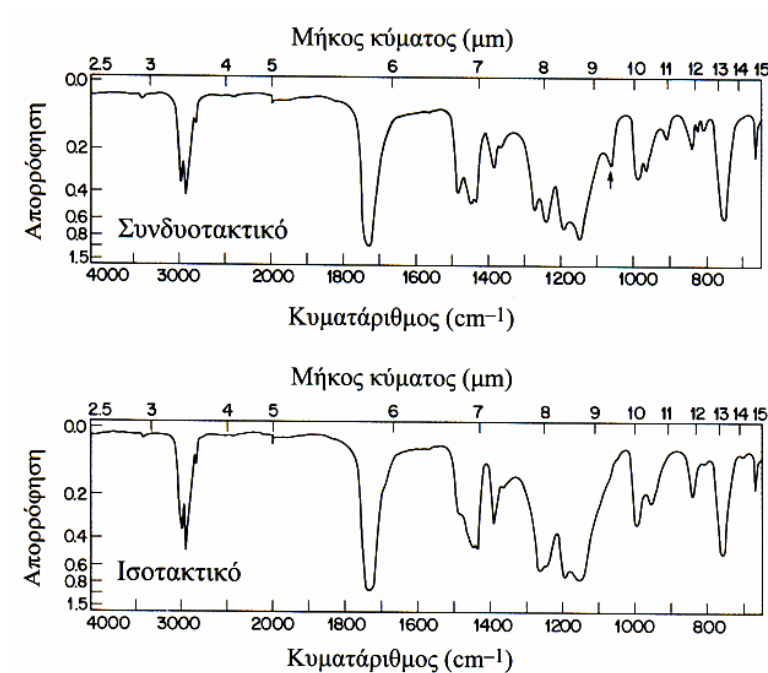
➤ **Ατακτικό πολυμερές (atactic polymer)**

Στη δομή αυτή η κατανομή των υποκαταστατών είναι τυχαία.

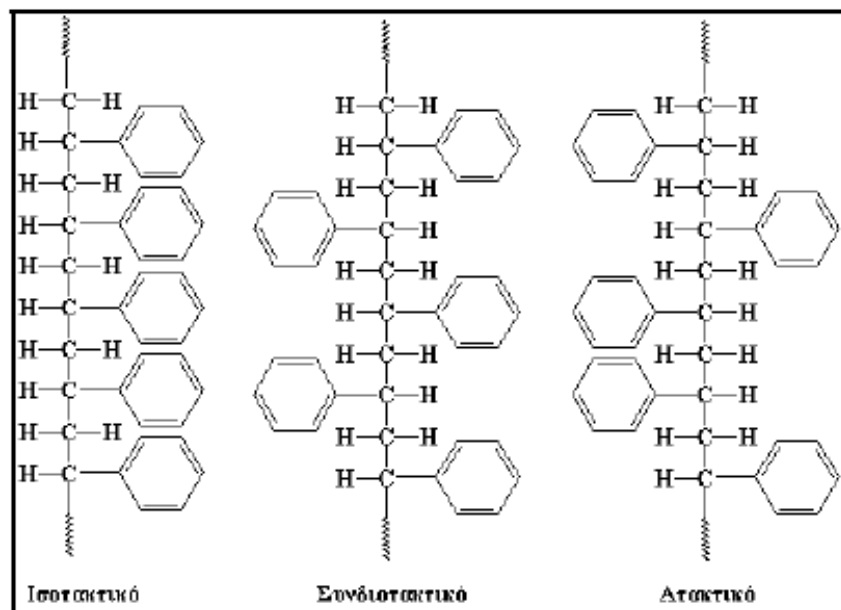


Σχήμα 2.18 Ατακτικό πολυπροπυλένιο LDLLD

Η τακτικότητα ενός πολυμερούς καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από τον καταλύτη που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού και επηρεάζεται υπό ορισμένες συνθήκες από τη θερμοκρασία. Οι διαφορετικές δομές στερεοκανονικότητας του ίδιου πολυμερούς συμπεριφέρονται σχεδόν με τον ίδιο τρόπο όταν βρίσκονται σε διάλυμα, αλλά παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στη στερεά φάση. Τα ατακτικά πολυμερή σε στερεά φάση είναι συνήθως άμορφα, ενώ αντίθετα τα ισοτακτικά και συνδυοτακτικά είναι κρυσταλλικά με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες (μεγάλη ανθεκτικότητα, ικανότητα σχηματισμού ίνας κ.α). Τέλος, η παρουσία στερεοκανονικότητας στη δομή ενός πολυμερούς μπορεί να ανιχνευθεί με φασματοσκόπια IR ή NMR όπου παρατηρούνται νέες κορυφές απορρόφησης ή μετατόπιση των συχνοτήτων απορρόφησης από δείγμα σε δείγμα.



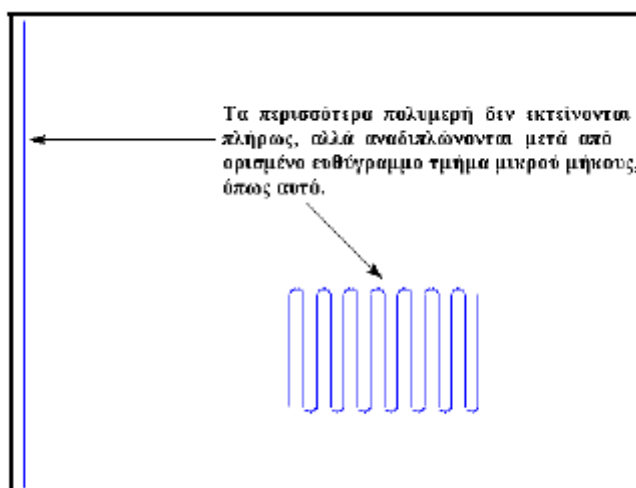
Σχήμα 2.19 Φάσματα IR ισοτακτικού και πολυμεθακρυλικού μεθυλεστέρα



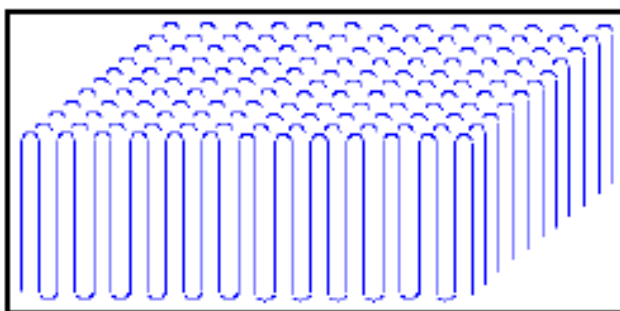
Σχήμα 2.20 Είδη τακτικότητας

2.4 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΤΗΤΑ

Τα πολυμερή σε στερεά κατάσταση είναι **άμορφα (amorphous)**, **κρυσταλλικά (crystalline)** ή **ημικρυσταλλικά (semi-crystalline)**. Ως άμορφες χαρακτηρίζονται οι περιοχές εκείνες όπου οι μακρομοριακές αλυσίδες διευθετούνται στο χώρο σε τυχαίες μεταξύ τους θέσεις, ενώ αντίθετα ως κρυσταλλικές χαρακτηρίζονται οι περιοχές με τις αλυσίδες διευθετημένες με τάξη. Οι κρυσταλλικές περιοχές ενός πολυμερούς καλούνται **κρυσταλλίτες (crystallites)**. Τα πολυμερή υλικά έχουν την τάση να εκτείνονται σε τελείως ευθεία γραμμή. Αυτό όμως δεν αποτελεί τον κανόνα. Αντίθετα ελάχιστα μόνο πολυμερή το επιτυγχάνουν όπως για παράδειγμα το λίαν υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο και ορισμένα αραμίδια (Kevlar, Nomex κ.λ.π). Τα περισσότερα πολυμερή εκτείνονται σε μικρό διάστημα και στη συνέχεια αναδιπλώνονται ενώ παράλληλα σχηματίζουν στοίβες τέτοιων αλυσίδων που καλούνται λαμέλλες (lamella) .

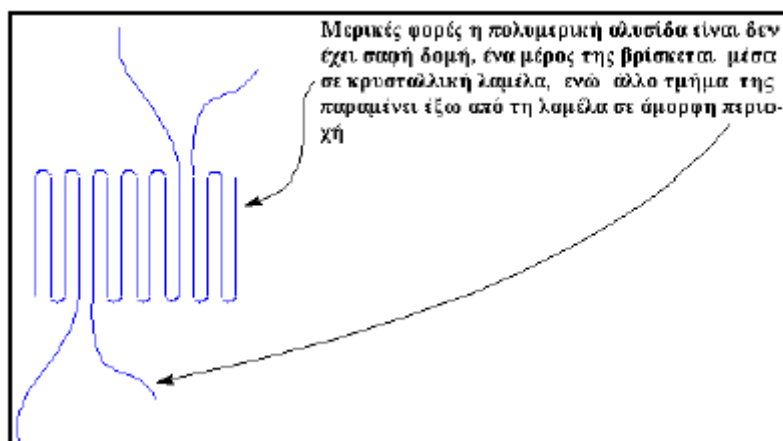


Σχήμα 2.21 Αναδίπλωση πολυμερικής αλυσίδας

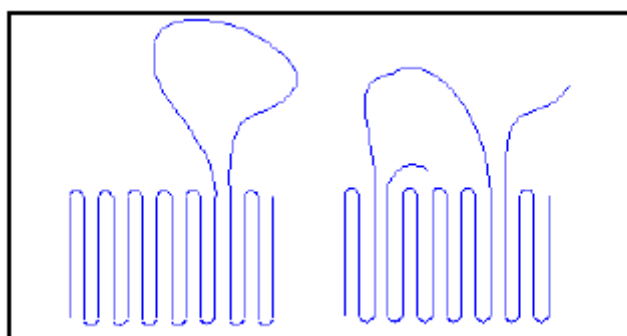


Σχήμα 2.22 Λαμέλλα πολυμερούς

Αρκετές φορές ένα τμήμα της αλυσίδας μπορεί να βρίσκεται μέσα στον κρύσταλλο και ένα άλλο τμήμα της έξω από αυτόν. Στην περίπτωση αυτή η λαμέλλα παρουσιάζει μη τακτική διάταξη με τμήματα των αλυσίδων να κρέμονται έξω από αυτή σε διάφορες κατευθύνσεις. Επίσης είναι δυνατόν τμήματα των αλυσίδων που έχουν εξέλθει από τη λαμέλλα να επαναισιέρονται σε αυτήν, αμέσως μετά την έξοδο τους ή αφού ήδη σημαντικό μήκος τους βρίσκεται εκτός λαμέλλας. Στην πρώτη περίπτωση, η διάταξη της κρυσταλλικής πολυμερικής λαμέλλας είναι γνωστή ως μοντέλο παρακείμενης επαναισόδου (adjacent re-entry model) ενώ στη δεύτερη ως μοντέλο διακόπτη (switchboard model) .



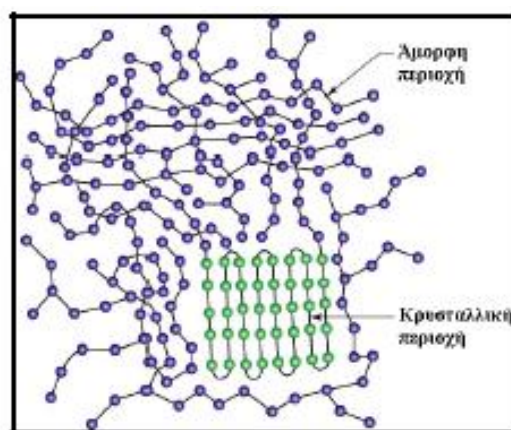
Σχήμα 2.23 Μη τακτική διάταξη λαμέλλας



Σχήμα 2.24 Adjacent re-entry model και switchboard model

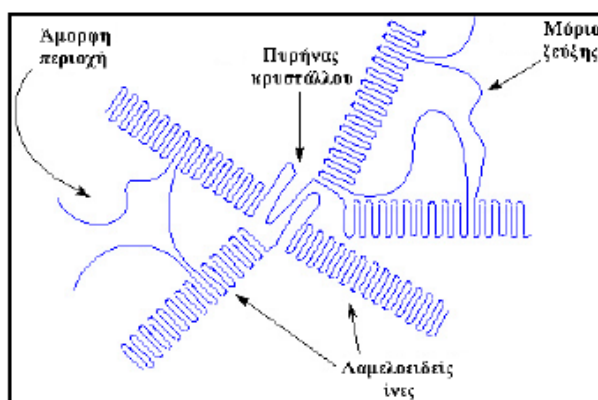
2.4.1 ΒΑΘΜΟΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΤΗΤΑΣ

Τα κρυσταλλικά πολυμερή δεν είναι ποτέ ολοκρυσταλλικά. Αποτελούνται από κρυσταλλικές και άμορφες περιοχές. Η κρυσταλλική περιοχή περικλείεται στις λαμέλλες ενώ η άμορφη περιοχή βρίσκεται έξω από αυτές. **Ο βαθμός κρυσταλλικότητας εκφράζει το ποσοστό του κρυσταλλικού υλικού επί του συνόλου και προσδιορίζεται με ειδική πειραματική δοκιμή γνωστή ως Διαφορική Γεωμετρία Σάρωσης (differential scanning calorimetry).**

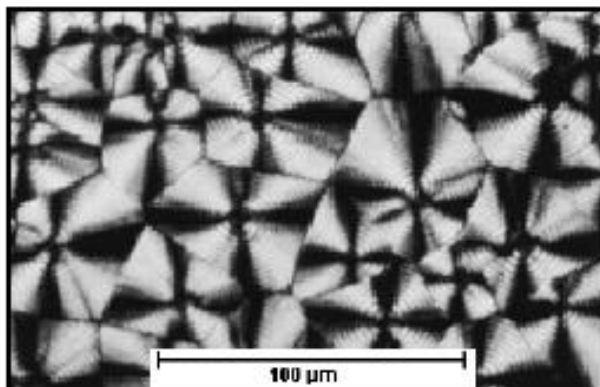


Σχήμα 2.25 Κρυστάλλωση πολυμερούς

Οι λαμέλλες αναπτύσσονται από έναν κεντρικό πυρήνα όπως οι ακτίνες του τροχού ενός ποδηλάτου. Τα νημάτιά τους αναπτύσσονται και στις τρεις διαστάσεις με αποτέλεσμα να μοιάζουν περισσότερο με σφαίρες παρά με τροχούς, γιαυτό όλη η σύνθεση ονομάζεται σφαιρουλίτης (spherulite) και αποδίδεται χαρακτηριστική μικροδομή πολυμερούς. Σε δείγμα κρυσταλλικού πολυμερούς μάζας λίγων γραμμαρίων περιέχονται δισεκατομμύρια σφαιρουλιτών.



Σχήμα 2.26 Σχηματισμός σφαιρουλίτη



Σχήμα 2.27 Μικροδομή σφαιρουλίτη πολυαιθυλενίου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μια πολυμερική αλυσίδα μπορεί να ανήκει εν μέρει σε κρυσταλλική λαμέλλα και εν μέρει σε άμορφη περιοχή, αλλά υπάρχει και η περίπτωση η αλυσίδα αυτή να διασχίζει την άμορφη περιοχή και να επανασυνδέεται με άλλη λαμέλλα. Οι αλυσίδες αυτές ονομάζονται **μόρια ζεύξης (tie molecules)**.

Η κρυσταλλική δομή εξασφαλίζει πιο ανθεκτικό πολυμερές, αλλά συγχρόνως το καθιστά ψαθυρό, με αποτέλεσμα τα πολύ κρυσταλλικά πολυμερή να μην επιδεικνύουν την κλασική συμπεριφορά πλαστικού. Οι άμορφες περιοχές συντελούν στην αύξηση της ευκαμψίας του πολυμερούς. Συνεπώς, για την παραγωγή ινών (fibers) που είναι ουσιαστικά επιμήκεις κρύσταλλοι, πρέπει να προέρχονται από πολυμερές όσο το δυνατόν πιο κρυσταλλικό. Στο πίνακα που ακολουθεί δίνονται παραδείγματα πολυμερών με εξόχως κρυσταλλική και εξόχως άμορφη δομή αντίστοιχα.

Εξόχως Κρυσταλλικά Πολυμερή	Εξόχως άμορφα πολυμερή
Πολυπροπυλένιο	Ατακτικό πολυστυρένιο
Συνδιοτακτικό πολυστυρένιο	Πολυκαρβονικά
Nylon	Πολυβουταδιένιο
Kevlar	Πολυίσοπροπένιο

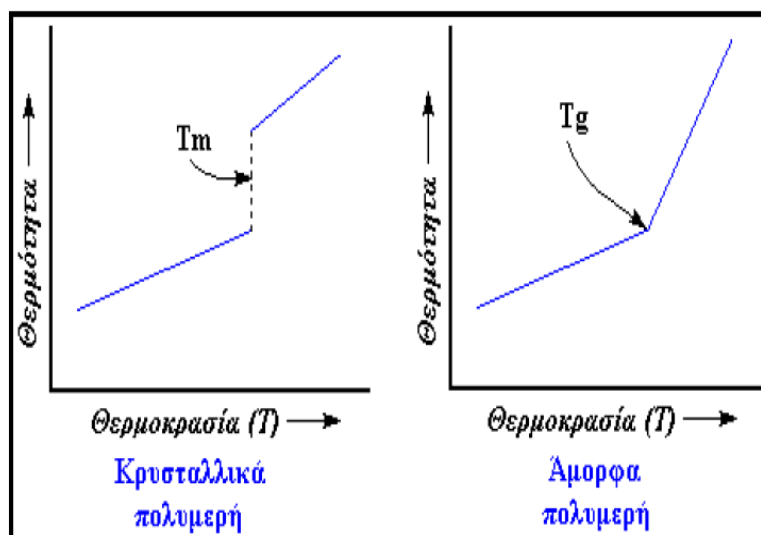
Πίνακας 2.2 Κρυσταλλικά και άμορφα πολυμερή

2.4.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΤΗΤΑ

➔ Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Κατά την απόψυξη τήγματος πολυμερούς, υφίσταται μια θερμοκρασιακή περιοχή όπου σημειώνεται στερεοποίηση του υλικού. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να εμφανισθεί είτε σχηματισμός κρυσταλλικού στερεού σκληρού και εύθραυστου ή ανθεκτικού ανάλογα με το μοριακό βάρος του πολυμερούς είτε σχηματισμός άμορφου στερεού, η συμπεριφορά του οποίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει μια θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία ή **σημείο υαλώδους μετάπτωσης T_g (glass transition temperature)** και οριοθετεί δύο διαφορετικές συμπεριφορές για το άμορφο πολυμερές.

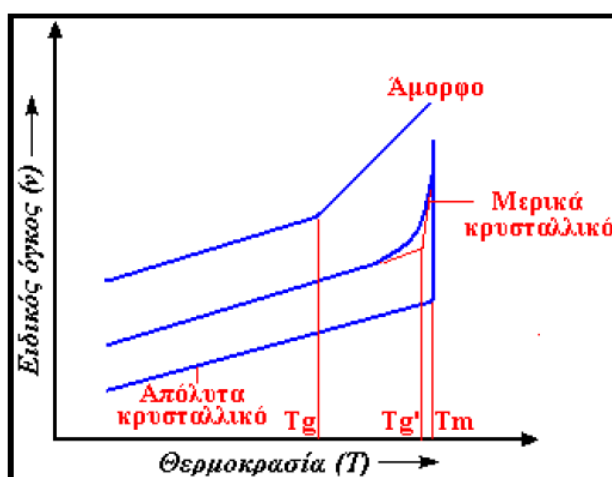
Μια περιοχή στην οποία ισχύει $T > T_g$ και το πολυμερές είναι μαλακό και εύκαμπτο και χαρακτηρίζεται. Από ιξωδοελαστική συμπεριφορά και μία άλλη στην οποία ισχύει $T < T_g$ και το πολυμερές γίνεται σκληρό και εύθραυστο (και πολλές φορές διαφανές) και η συμπεριφορά του χαρακτηρίζεται ως υαλώδης κατάσταση. Στο σημείο υαλώδους μετάπτωσης παρατηρείται αλλαγή της κλίσης της καμπύλης μεταβολής του ειδικού όγκου (ή της προσδιδόμενης θερμότητας) με τη θερμοκρασία.



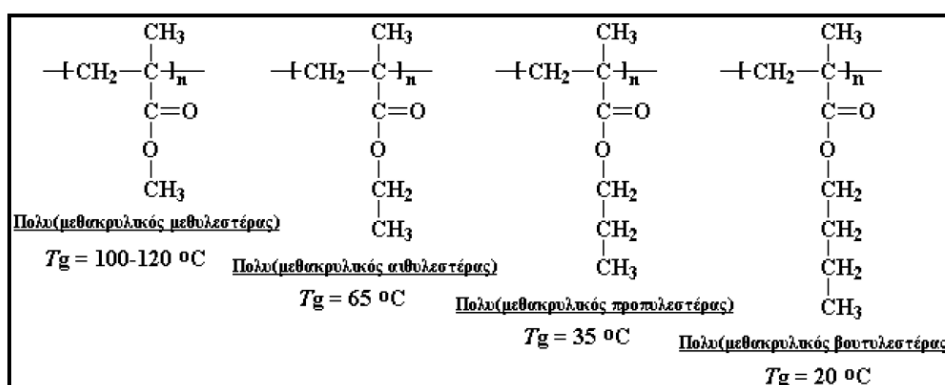
Σχήμα 2.28 Απόψυξη τήγματος πολυμερών

Δεδομένου ότι στα κρυσταλλικά πολυμερή συνυπάρχουν κρυσταλλική και άμορφη περιοχή, υφίσταται η έννοια της **θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης T_g** , η οποία επηρεάζεται Από τους παρακάτω παράγοντες:

- Από τον βαθμό κρυστάλλωσης. Αύξηση του βαθμού κρυστάλλωσης προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας.
- Από την ευκαμψία της κύριας αλυσίδας. Αύξηση της ευκαμψίας της πολυμερικής αλυσίδας οδηγεί στη μείωση της T_g .
- Από τις προστιθέμενες ομάδες στη βασική αλυσίδα (η προσθήκη έστω και μικρής ομάδας στη βασική αλυσίδα αυξάνει την T_g ενώ η αύξηση του μήκους πλευρικής διακλάδωσης οδηγεί σε μείωση της T_g).



Σχήμα 2.29 Επίδραση του βαθμού κρυσταλλικότητας στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης



Σχήμα 2.30 Επίδραση της αύξησης του μήκους πλευρικής διακλάδωσης στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης.

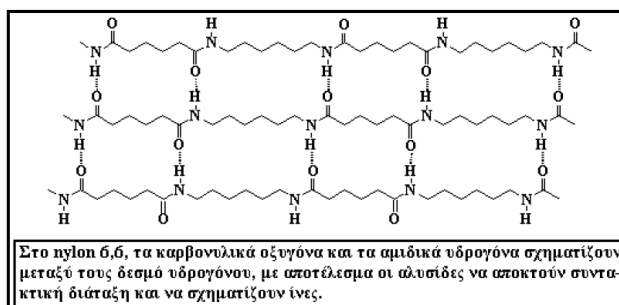
➔ Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ

Η δομή του πολυμερούς επηρεάζει σημαντικά την κρυσταλλικότητά του. Κανονική και τακτική δομή διευκολύνει την στοιβασία των αλυσίδων σε κρυστάλλους ενώ αντίθετα δυσχεραίνει την κρυστάλλωση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πολυστυρένιο και το πολυαιθυλένιο. Αναλυτικότερα, το συνδιοτακτικό **πολυστυρένιο** και το ατακτικό πολυστυρένιο έχουν διαφορετική στερεοταξική κανονικότητα. Στο συνδιοτακτικό πολυστυρένιο υφίσταται πολύ τακτική και κανονική δομή, με φαινολομάδες να εναλλάσσονται ομοιόμορφα εκατέρωθεν της βασικής αλυσίδας, διευκολύνοντας τη στοιβασία των αλυσίδων σε κρυστάλλους. Άρα, είναι λογικό να αναμένεται μεγάλη κρυσταλλικότητα για το πολυμερές αυτό. Αντίθετα, δεν συμβαίνει ανάλογη τάξη στο ατακτικό πολυστυρένιο, προκαλώντας έτσι αντίθετη συμπεριφορά του υλικού (έντονα άμορφο υλικό). Το δε **πολυαιθυλένιο** συναντάται και ως κρυσταλλικό και ως άμορφο. το γραμμικό πολυαιθυλένιο είναι σχεδόν 100% κρυσταλλικό, ενώ το αντίστοιχο διακλαδωμένο υλικό που δεν στοιβάζεται εύκολα είναι εξόχως άμορφο.

➔ ΟΙ ΕΝΔΟΜΟΡΙΑΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

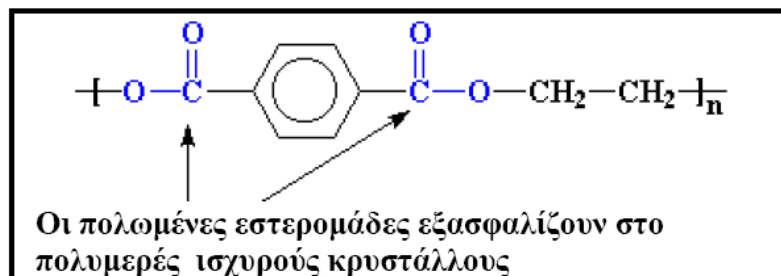
Οι ενδομοριακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα διάφορα είδη χημικών δεσμών του πολυμερούς συνεισφέρουν σε σημαντικό βαθμό στο σχηματισμό κρυστάλλων,

Χαρακτηριστικά παραδείγματα το nylon και οι πολυεστέρες. Πιο συγκεκριμένα οι πολυωμένες αμινομάδες στη βασική αλυσίδα του **nylon 6,6** έλκονται έντονα μεταξύ τους και σχηματίζουν ισχυρούς δεσμούς, οι οποίοι συντελούν στη συγκράτηση των κρυστάλλων του πολυμερούς μεταξύ τους.



Σχήμα 2.31 Κρυσταλλικότητα στο Nylon 6,6

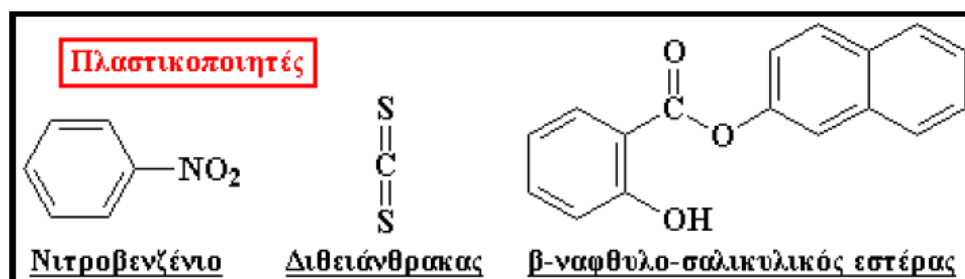
Απο την άλλη στους **πολυεστέρες** η ενίσχυση της κρυσταλλικότητας οφείλεται αφενός στους ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των πολωμένων εστερομάδων και αφετέρου στην τάση των αρωματικών δακτυλίων να στοιβάζονται μεταξύ τους με απόλυτη τάξη.



Σχήμα 2.32 Ισχυροί δεσμοί των πολωμένων εστερομάδων στους πολυεστέρες

➡ ΟΙ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΤΕΣ

Ο προορισμός του πλαστικοποιητή είναι η μείωση της T_g . Πρόκειται για μικρό μόριο που παρεμβάλλεται μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων με σκοπό να τις απομακρύνει μεταξύ τους και να εξασφαλίσει μεγαλύτερο ελεύθερο χώρο. Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι η διευκόλυνση της μετακίνησης των αλυσίδων σε μικρότερες θερμοκρασίες. Με τον τρόπο αυτό η T_g του πολυμερούς μειώνεται δραστικά και η κατεργασιμότητα αυξάνεται εντυπωσιακά. Συνήθεις πλαστικοποιητές είναι αυτοί του σχήματος που ακολουθεί.



Σχήμα 2.33 Συνήθεις πλαστικοποιητές

2.5 ΜΟΡΙΑΚΟ ΒΑΡΟΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Η έννοια του μοριακού βάρους στα πολυμερή παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερότητες. Ενώ στις καθαρές ουσίες μικρού μοριακού βάρους όλα τα μόρια είναι του ίδιου μεγέθους και του ίδιου μοριακού βάρους, στα πολυμερή είναι απίθανο να βρεθεί δείγμα με μόρια ίδιου μεγέθους και μοριακού βάρους (μη ομογενές υλικό). Τούτο έχει ως αποτέλεσμα το μοριακό βάρος πολυμερούς να αποκτά στατιστική έννοια. Δηλαδή αναμένεται να υφίσταται καμπύλη κατανομής του μοριακού βάρους. Απο αυτή την καμπύλη κατανομής μπορεί να υπολογιστεί το αντίστοιχο μέσο μοριακό βάρος πολυμερούς. Τα συνηθέστερα μέσα μοριακά βάρη είναι:

- Το μέσου αριθμού μοριακό βάρος (The number Average Molecular Weight), M_n :

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^n f_i M_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (2.1)$$

- Το μέσου βάρους μοριακό βάρος (The Weight Average Molecular Weight), M_w :

$$M_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i M_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i M_i^2}{\sum_{i=1}^n f_i M_i} \quad (2.2)$$

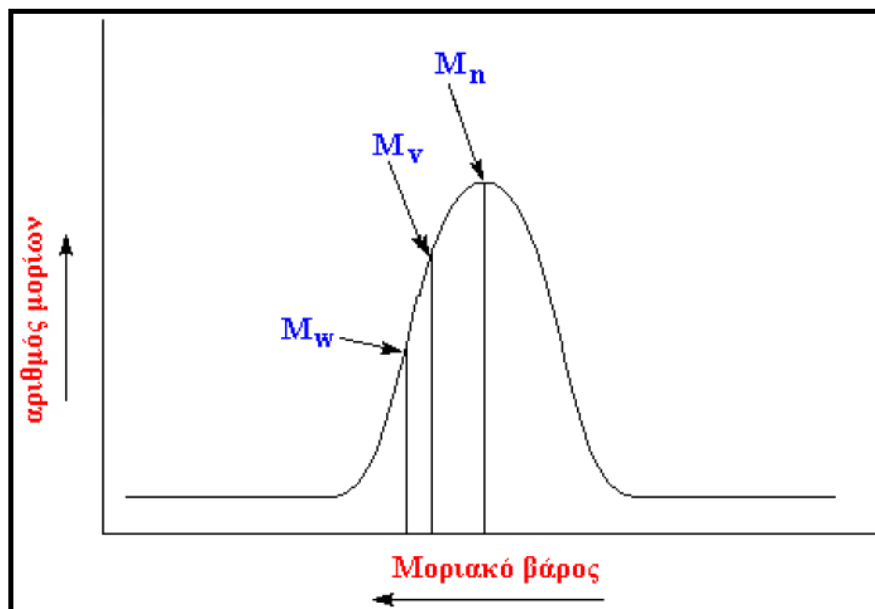
- Το μέσου ιξώδους μοριακό βάρος (The viscosity Average Molecular Weight), M_v :

$$M_v = \left(\frac{\sum_{i=1}^n f_i M_i^{1+a}}{\sum_{i=1}^n f_i M_i} \right)^{1/a} \quad (2.3)$$

Όπου:

- f_i ο αριθμός αλυσίδων με μοριακό βάρος M_i
- w_i το κατά βάρος ποσοστό με το οποίο συμμετέχει κάθε κλάση μοριακού βάρους M_i
- a σταθερά που εξαρτάται από το σύστημα πολυμερές - διαλύτης.

Η κατανομή του μοριακού βάρους είναι μια καμπύλη μεταβολής σε σύστημα αξόνων, στο οποίο ο άξονας x αντιστοιχεί στο μοριακό βάρος και ο άξονας y στη ποσότητα πολυμερούς με συγκεκριμένη τιμή μοριακού βάρους. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται συγκριτικά οι σχετικές τιμές των μέσων μοριακών βαρών.



Σχήμα 2.34 Χαρακτηριστικά Μοριακά βάρη πολυμερών

2.6 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΥΑΛΩΔΟΥΣ ΜΕΤΑΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ

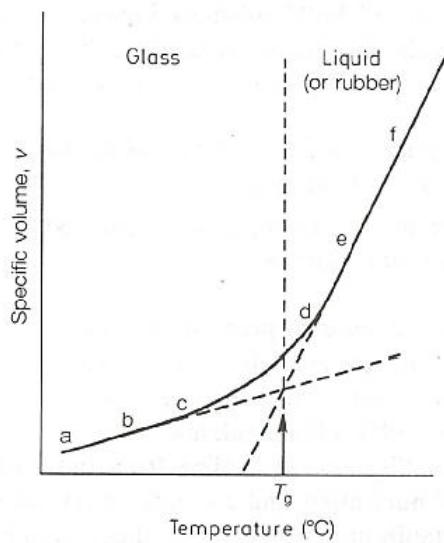
Τα πολυμερή όπως προαναφέραμε υπάρχουν σε κρυσταλλική ημικρυσταλλική ή άμορφη κατάσταση. Για τα άμορφα υπάρχει μία θερμοκρασία που λέγεται **θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης**, T_g , κάτω από την οποία το υλικό συμπεριφέρεται σαν γυαλί π.χ. είναι σκληρό και δύσκαμπτο. Τα κρυσταλλικά πολυμερή επίσης έχουν T_g , αλλά αυτή η θερμοκρασία μετάπτωσης είτε αποκρύπτεται σε κάποιο βαθμό από την παρουσία της κρυσταλλικής φάσης ή είναι κάτω από τους $0\text{ }^\circ\text{C}$ και έτσι δεν έχει πρακτική σημασία. Αντιστοιχεί σε χαμηλή κινητικότητα της αλυσίδας επειδή τα μόρια είναι καλώς στοιβαγμένα στην κρυσταλλική τους δομή. Τα κρυσταλλικά πολυμερή χαρακτηρίζονται από την ικανότητα των μορίων τους να σχηματίζουν τρισδιάστατες ιεραρχημένες δομές. Τήκονται σε μία ειδική θερμοκρασία, τη **θερμοκρασία τήξης**, T_m .

Μία εμπειρική σχέση που συνδέει τις δύο θερμοκρασίες μετάπτωσης είναι η ακόλουθη ενώ στον πίνακα που παρατίθεται στην συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο αυτές θερμοκρασίες για διάφορα πολυμερή:

$$\frac{T_g}{T_m} = 0,6 \quad (2.4)$$

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	T_g ($^\circ\text{C}$)	T_m C	ΕΥΡΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ($^\circ\text{C}$)
HDPE	-100	135	160-240
LDPE	-100	110	160-240
PVC	80	240	170-200
NYLON-66	40	2265	275-290
PS	100	-	180-240

Πίνακας 2.3 Θερμοκρασίες T_g και T_m ορισμένων πολυμερών



Σχήμα 2.35 Υπολογισμός θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης συναρτήσει του ειδικού όγκου (specific volume).

2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΕ ΣΤΕΡΕΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

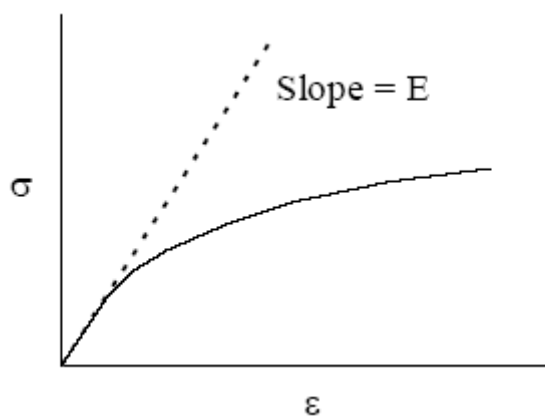
Η πιο γνωστή τεχνική για την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των πολυμερών είναι η **δοκιμή του εφελκυσμού (tensile test)**. Εάν το πολυμερές συμπεριφέρεται καθαρά ελαστικά, τότε ισχύει ο νόμος του Hooke :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.5)$$

όπου E = μέτρο ελαστικότητας του Young και ε είναι η παραμόρφωση που ορίζεται σαν:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.6)$$

Η κλίση στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης αντιπροσωπεύει **το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο εφελκυσμού (tensile modulus, E)** σε μικρές παραμορφώσεις όπου η συμπεριφορά είναι γραμμική και ισχύει ο νόμος του Hooke.

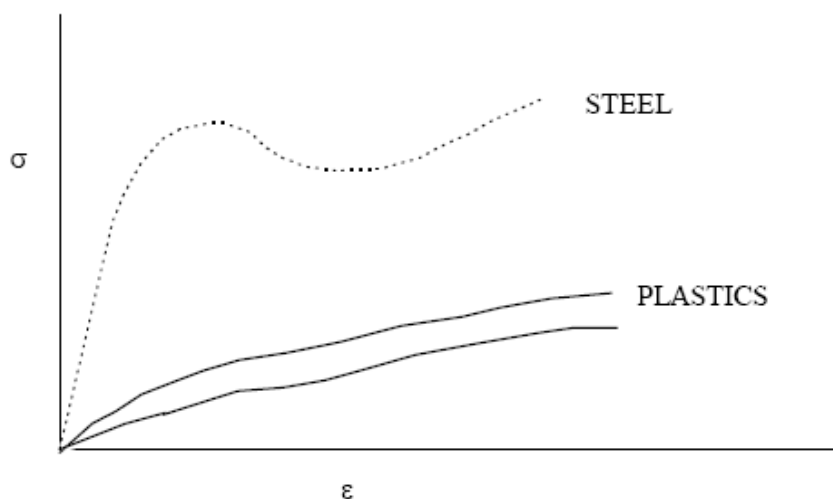


Σχήμα 2.36 Αντιστοιχία Τάσης-Παραμόρφωσης πολυμερικού δείγματος

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΜΕΤΡΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (GPa)
HDPE	1.0
LDPE	0.2
PVC	2.5
NYLON-66	2.0

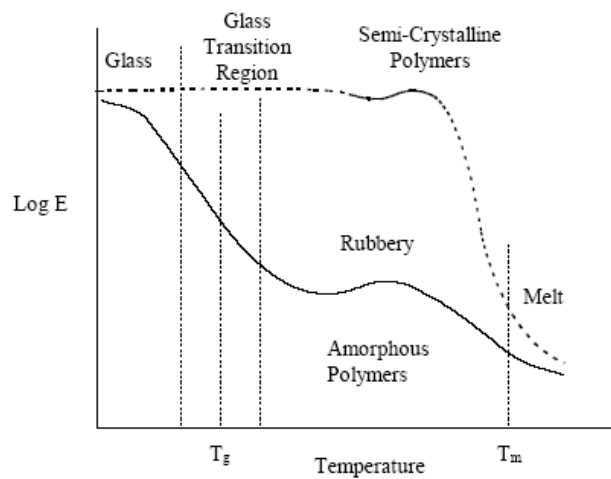
Πίνακας 2.4 Τιμές μέτρου εφελκυσμού για συγκεκριμένα πολυμερή

Η χαμηλή αντοχή των πλαστικών σε εφελκυσμό οφείλεται στις ασθενείς δυνάμεις συνάφειας (Van der Waals) μεταξύ των μεγάλων μήκους αλυσίδων. Για να πάρουμε πλαστικά με μεγάλη αντοχή πρέπει να ευθυγραμμίσουμε τις πολυμερικές αλυσίδες και τότε οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων άνθρακα θα αυξήσουν την αντοχή. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι το απλό νήμα πολυαιθυλενίου έχει μέτρο αντοχής που ξεπερνάει αυτό του σιδήρου. Ο προσανατολισμός των μοριακών αλυσίδων μπορεί να επιτευχθεί με ειδικές διεργασίες, π.χ. εκβολή και ταυτόχρονη εξέλαση των ινών σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε χαμηλές δε θερμοκρασίες οι αλυσίδες έχουν χαμηλό βαθμό ευκινησίας, και εάν επιμηκυνθούν δεν μπορούν να συρρικνωθούν εκ νέου. Ωστόσο η εκβολή σε χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες κυρίως λόγω του υψηλού ιξώδους.



Σχήμα 2.37 Διαγράμματα αντοχής σε εφελκυσμό σιδήρου-πλαστικών

Τέλος πολύ σημαντική είναι και η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας E από την θερμοκρασία όπως διακρίνει κανείς από το γράφημα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.38 Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας

2.8 ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ

2.8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διεργασία μετατροπής ενός μονομερούς ή μίγματος μονομερών σε πολυμερές καλείται **πολυμερισμός** (polymerism). Εάν από τον πολυμερισμό, εκτός από το πολυμερές παράγονται και παραπροϊόντα τότε οι μονομερείς μονάδες των μακρομορίων του πολυμερούς είναι υπόλοιπα των μονομερών που χρησιμοποιήθηκαν. Αντίθετα όταν κατά τον πολυμερισμό δεν παράγονται παραπροϊόντα όπως για παράδειγμα στον πολυμερισμό του αιθυλενίου οι μονομερείς ομάδες ταυτίζονται με τα μονομερή. Τη διαφορά αυτή παρατήρησε για πρώτη φορά ο Carothers ο οποίος το 1929 πρότεινε την κατάταξη των πολυμερών με βάση τη σχέση μονομερούς και μονομερούς ομάδας σε πολυμερή συμπύκνωσης και πολυμερή προσθήκης. Στα πολυμερή συμπύκνωσης (condensation polymers) οι μονομερείς μονάδες των μακρομορίων δεν περιέχουν όλα τα άτομα που υπήρχαν στα μονομερή από τα οποία προήλθαν, ενώ στα πολυμερή προσθήκης (addition polymers) οι μονομερείς μονάδες ταυτίζονται με τα μονομερή. Από την άλλη μεριά τα πολυμερή συμπύκνωσης προέρχονται από αντιδράσεις πολυσυμπύκνωσης (polycondensations) ενώ τα πολυμερή προσθήκης από αντιδράσεις προσθήκης (addition reactions). Επιπλέον, ο Flory μελετώντας το μηχανισμό των αντιδράσεων πολυμερισμού διαπίστωσε ότι οι πολυμερισμοί μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες:

- ➔ Στο σταδιακό πολυμερισμό (step polymerization) και
- ➔ Στον αλυσιδωτό πολυμερισμό (chain polymerization)

Προκειμένου για το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HD-PE) που αποτελεί αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας αξίζει να επισημάνουμε ότι είναι προϊόν **Αλυσιδωτού Κατιοντικού Πολυμερισμού** ο οποίος στην ουσία είναι ένας πολυμερισμός προσθήκης.

2.8.2 ΑΛΥΣΙΔΩΤΟΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ

Το 1950 ο Ελβετός Karl Ziegler (βραβείο Νόμπελ 1963) ανακάλυψε μια νέα κατηγορία καταλυτών πολυμερισμού που έφεραν επανάσταση στη χημεία των πολυμερών όχι μόνο γιατί διευκόλυναν την παραγωγή πολυμερών από βινυλομονομερή που δεν μπορούσαν να παραχθούν αλλιώς, όπως το πολυπροπυλένιο.

Η πρώτη εφαρμογή των καταλυτών αυτών ήταν η παραγωγή πολυαιθυλενίου σε χαμηλή πίεση (1-10 atm) και χαμηλή θερμοκρασία (50 - 75 °C τα οποία μέχρι τότε παράγονταν με πολυμερισμό με ελεύθερες ρίζες σε πολύ υψηλή πίεση (1500-2000 atm) και υψηλή επίσης θερμοκρασία ($\approx 200^{\circ}\text{C}$). Επίσης το πολυαιθυλένιο που κατασκεύασε ο Ziegler ήταν γραμμικό, σε μεγάλο βαθμό κρυσταλλικό με υψηλότερο σημείο τήξης και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από το πολυαιθυλένιο που μέχρι τότε παράγονταν και το οποίο παρουσίαζε μικρό ποσοστό κρυσταλλικότητας γιατί ήταν διακλαδωμένο. Τους καταλύτες που ανακάλυψε ο Ziegler βελτίωσε στη συνέχεια ο Ιταλός χημικός Giulio Natta, ο οποίος παρασκεύασε κρυσταλλικό ισοτακτικό και συνδιοτακτικό πολυπροπυλένιο, ενώ μέχρι τότε το πολυπροπυλένιο δεν μπορούσε να πολυμεριστεί σε ελεύθερες ρίζες και ιόντα. Σήμερα οι παραπάνω καταλύτες που είναι γενικά ενώσεις συναρμογής των πολυσθενών μεταβατικών μετάλλων όπως Ti, Zr, V κ.α με οργανομεταλλικές ενώσεις των μετάλλων όπως Al, Li, Na κ.α είναι γνωστοί ως καταλύτες Ziegler Natta (Z-N).

Μετά την ανακάλυψη των καταλυτών αυτών, βρέθηκαν από άλλους ερευνητές και άλλοι καταλύτες με ανάλογες ιδιότητες όπως:

- Καταλύτες οξειδίων μεταβατικών μετάλλων (οξείδιο του χρωμίου ή μολυβδαινίου) .
- Καταλύτες Alfin, οι οποίοι είναι ένα μίγμα μιας αλκοόλης και μιας ολεφίνης.
- Καταλύτες θειικού οξέος-θειϊκού άλατος .
- Μεταλλοκένια του Ζιρκονίου ή Ζιρκοκένια .

Οι πρώτες τέσσερις κατηγορίες περιλαμβάνουν καταλύτες που είναι συνήθως αδιάλυτοι κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού δηλαδή δεν βρίσκονται στην ίδια φάση με το μονομερές ή το όλο σύστημα και για το λόγο αυτό οι πολυμερισμοί γενικά στους οποίους συμμετέχουν εκτός από στερεοκανονικοί είναι γνωστοί και ως πολυμερισμοί ετερογενούς κατάλυσης, ενώ τα μεταλλοκένια είναι διαλυτά στο μέσο πολυμερισμού (ομογενής κατάλυση).

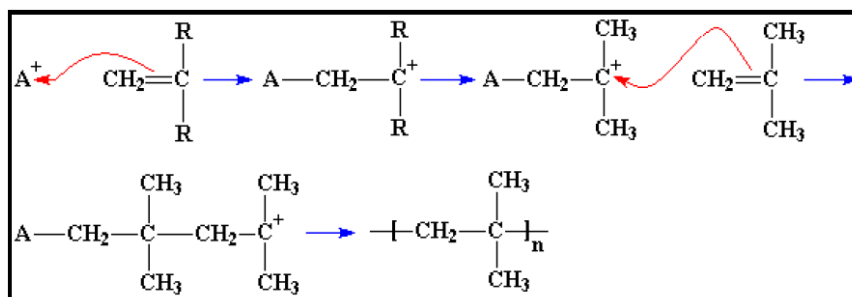
2.8.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΥΣΙΔΩΤΟΥ ΚΑΤΙΟΝΤΙΚΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ

Στον εν λόγω πολυμερισμό σημειώνεται προσβολή του μονομερούς από ηλεκτρονιόφιλες ουσίες, που προκαλούν διάσπαση του διπλού δεσμού του μονομερούς και την παραγωγή καρβοκατιόντος. Περιλαμβάνει τα τρία στάδια αντίδρασης. Την **έναρξη**, την **πρόοδο** και τον **τερματισμό** ενώ εξελίσσεται ταχύτατα.

➔ ΕΝΑΡΞΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

Για την έναρξη του πολυμερισμού χρησιμοποιούνται ως διεγέρτες οξέα όπως το θειικό (H_2SO_4) ή το φωσφορικό (H_2PO_4).

Σε βιομηχανική κλίμακα χρησιμοποιούνται οξέα κατά Lewis ($AlCl_3$, $SnCl_4$). Κατά την έναρξη της αντίδρασης ένα ζεύγος ηλεκτρονίων από το διπλό δεσμό έλκεται από το κατιόν/διεγέρτη και εγκαταλείπει το διπλό δεσμό για να σχηματίσει απλό χημικό δεσμό με το διεγέρτη. Ο μηχανισμός αυτός αφήνει ένα από τα άτομα άνθρακα του διπλού δεσμού με έλλειμμα ηλεκτρονίων, δηλαδή δημιουργείται ένα νέο κατιόν, το οποίο θα αντιδράσει με ένα δεύτερο μόριο μονομερούς με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που έκανε ο διεγέρτης με το πρώτο μόριο μονομερούς. Και ο μηχανισμός αυτός επαναλαμβάνεται μέχρις ότου σχηματιστεί το επιθυμητό πολυμερές. Στο τέλος της φάση της έναρξης παράγεται ένα **καρβοκατιόν**.

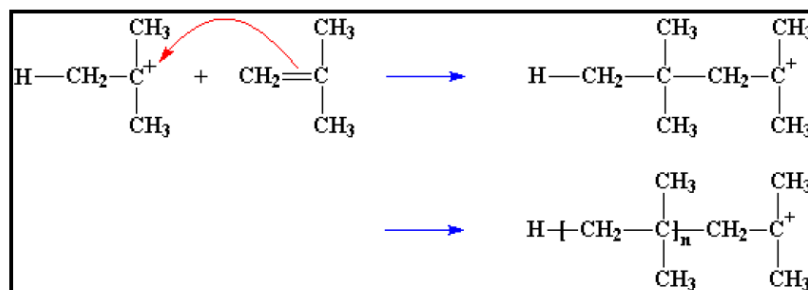


Σχήμα 2.39 Έναρξη αντίδρασης πολυμερισμού

➔ ΠΡΟΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

Τα παραγόμενα καρβοκατιόντα είναι πολύ ασταθή, διότι το άτομο άνθρακα που περιέχει διαθέτει μόνο 6 ηλεκτρόνια στην εξώτατη στιβάδα του. Συνεπώς, απαιτεί τη συμπλήρωση της εξώτατης στιβάδας με δύο ακόμη ηλεκτρόνια, τα οποία ανευρίσκονται εύκολα στα ζεύγη ηλεκτρονίων του διπλού δεσμού του μορίου του μονομερούς. Έτσι, το καρβοκατιόν δεσμεύει το ένα ζεύγος ηλεκτρονίων σχηματίζοντας απλό δεσμό με το μόριο

μονομερούς, ενώ συγχρόνως σχηματίζεται ένα νέο καρβοκατιόν, το οποίο μπορεί να αντιδράσει με άλλο μονομερές και ο κύκλος να επαναληφθεί πολλές φορές μέχρι που να παραχθεί μια μακρά πολυμερική αλυσίδα.

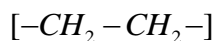


Σχήμα 2.40 Πρόοδος αντίδρασης κατιοντικού πολυμερισμού

➡ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

Μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους *μεταφοράς* τόσο προς το μονομερές, όσο και προς το πολυμερές και προς άλλα μοριακά είδη παρόντα υπό μορφή ακαθαρσιών. Ωστόσο η περαιτέρω ανάλυση του μηχανισμού της εν λόγω αντίδρασης ξεφεύγει από τα όρια της παρούσης διπλωματικής εργασία.

2.8.3 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΛΥΣΙΔΩΤΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ - ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΑ



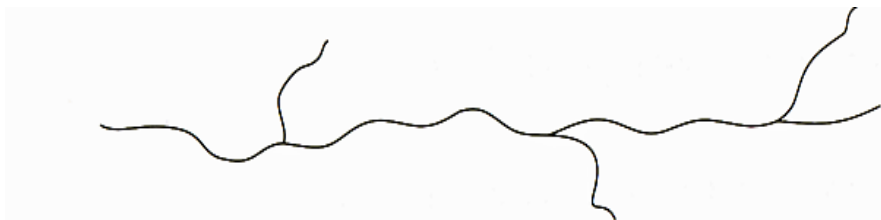
Το πολυαιθυλένιο, το θερμοπλαστικό πολυμερές με το μεγαλύτερο όγκο παραγωγής παγκοσμίως διατίθεται στην αγορά σε μια μεγάλη ποικιλία τύπων, που ο καθένας, εξαιτίας των διαφορετικών ιδιοτήτων, προορίζεται για κάποια άλλη εφαρμογή. Η διαφορετικότητα των διαφόρων πολυαιθυλενίων οφείλεται στο διαφορετικό τρόπο πολυμερισμού του μονομερούς αιθυλενίου, ή στην παρουσία μέσα στην μακρομοριακή αλυσίδα μικρής ποσότητας κάποιου άλλου συμμονομερούς. Το πρώτο πολυαιθυλένιο που παρασκευάστηκε ήταν ουσιαστικά ένα ολιγομερές εξαιτίας της δυσκολίας πολυμερισμού του μονομερούς αιθυλενίου. Έτσι για την παραγωγή PE μεγάλου μοριακού βάρους χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις.



Σχήμα 2.41 Διακλαδωμένο Πολυαιθυλένιο

Το PE που παράχθηκε με τον τρόπο αυτό είχε στις μακρομοριακές αλυσίδες μεγάλους κλάδους. Ήταν δηλαδή διακλαδωμένο. Οι μεγάλες διακλαδώσεις εμποδίζουν την κρυστάλλωσή του και το PE αυτό εμφανίζει χαμηλή πυκνότητα. Γι' αυτό και ονομάστηκε **πολυαιθυλένιο υψηλής πίεσης ή χαμηλής πυκνότητας (Low Density Polyethylene, LD-PE)**.

Αργότερα με τη χρήση των καταλυτών Ziegler Natta παρασκευάστηκε PE σε χαμηλή πίεση, γραμμικό και όχι διακλαδωμένο και συνεπώς με μεγαλύτερη πυκνότητα. Το PE αυτό ονομάστηκε πολυαιθυλένιο **χαμηλής πίεσης ή υψηλής πυκνότητας (High Density Polyethylene, HD-PE)**



Σχήμα 2.42 Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας HD-PE

Πρόσφατα ένα άλλο PE με πολλούς αλλά μικρούς κλάδους στις μακρομοριακές του αλυσίδες, συνεπώς και αυτό γραμμικό, βρήκε ευρεία εφαρμογή.

Το PE αυτό χαρακτηρίστηκε ως **γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (Linear Low Density Polyethylene, LLD-PE)**.



Σχήμα 2.43 Γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας LLD-PE

Οι τρεις παραπάνω τύποι αποτελούν τον κορμό αυτής της μεγάλης ομάδας των πολυμερών. Τέλος αξίζει να αναφερθούμε και στις τρεις κατηγορίες πολυαιθυλενίων στηριζόμενοι στη διάκρισή τους σε γραμμικά, διακλαδωμένα και δικτυωμένα:

- Τα **γραμμικά πολυαιθυλένια (Linear PE)** που διακρίνονται σε:
 1. Πολυαιθυλένια πολύ χαμηλής πυκνότητας
 2. Γραμμικά πολυαιθυλένια χαμηλής πυκνότητας
 3. Πολυαιθυλένια υψηλής πυκνότητας
 4. Υψηλού μοριακού βάρους, πολυαιθυλένια υψηλής πυκνότητας
 5. Υπερύψηλου μοριακού βάρους πολυαιθυλένια

- Τα **διακλαδωμένα πολυαιθυλένια (Branched PE)** που χωρίζονται σε:
 6. Πολυαιθυλένια χαμηλής πυκνότητας
 7. Συμπολυμερή αιθυλενίου-οξέων
 8. Συμπολυμερή αιθυλενίου-μεθακρυλικού αιθυλεστέρα
 9. Συμπολυμερή αιθυλενίου-οξικού βινυλεστέρα
 10. Συμπολυμερή αιθυλενίου-βινυλικής αλκοόλης
 11. Ιοντομερή

Και τελευταία κατηγορία αποτελούν τα:

- **Δικτυωμένα πολυαιθυλένια (Crosslinked PE)**

Ο σωλήνας που θα παραχθεί από την διεργασία της εκβολής κατά την πραγματοποίηση της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High Density PE). Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμη η εκτενέστερη αναφορά στο εδάφιο που ακολουθεί στις ιδιότητες του υλικού αυτού.

2.8.4 ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ ΥΨΗΛΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (HDPE)

Το **πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας** διατίθεται στην αγορά Από το 1956, με την ανακάλυψη των καταλυτών Ziegler-Natta. Παράγεται με τρεις διαφορετικές διεργασίες, σε αιώρημα, σε αέρια φάση ή ακόμη και σε διάλυμα.

Το αιθυλένιο εισάγεται στον αντιδραστήρα με το καταλυτικό σύστημα και η εξώθερμη αντίδραση ελέγχεται με την παρουσία κάποιου υδρογονάνθρακα και υδρογόνου με το οποίο επιτυγχάνουμε το επιθυμητό μοριακό βάρος. Δύο κατηγορίες καταλυτών χρησιμοποιούνται συνήθως. Καταλύτες τύπου Philips(οξειδία χρωμίου) ή Z-N. Με τους πρώτους επιτυγχάνεται μεσαία έως ευρεία κατανομή μοριακών βαρών, ενώ με τους Z-N στενή κατανομή. Το HDPE είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές μη πολικό, υψηλώς κρυσταλλικό, γαλακτώδες στην εμφάνιση με εξαιρετική αντοχή στα χημικά αντιδραστήρια. Η πυκνότητά του είναι πάνω από $0,940 \text{ g/cm}^3$ όμως μπορεί να ρυθμιστεί προς τα κάτω αν προστεθεί μικρή ποσότητα μέχρι 2% συμμονομερούς (α -ολεφίνης). Μορφοποιείται με μια πληθώρα διεργασιών όπως η εξώθηση, τη θερμομόρφωση, η εμφύσηση, η έγχυση, η περιστροφική μορφοποίηση και φυσικά η εκβολή. Από το HDPE παράγονται παντός είδους δοχεία για απορρυπαντικά, ορυκτέλαια και άλλα χημικά, σωλήνες και διάφορα προφίλ, μεγάλα δοχεία, περιέκτες ακόμη και βαρέλια. Συνήθως το μοριακό βάρος του HDPE κυμαίνεται από 40.000-200.000. Όταν αυτό πάρει τιμές 200.000-500.000 τότε μιλάμε για μια ομάδα μέσα στην οικογένεια των πολυαιθυλενίων γνωστών ως υψηλού μοριακού βάρους-υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (High Molecular-High Density Polyethylene, HMW-HDPE). Το PE αυτό κυρίως χρησιμοποιείται σε σωλήνες υψηλής πίεσης.

Μια άλλη κατηγορία PE, το Υπερύψηλου μοριακού βάρους PE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene) διαθέτει πολυμερικές αλυσίδες 10-20 φορές μεγαλύτερες από αυτές του HDPE. Οι πολύ μακριές σωλήνες δίνουν ιδιαίτερες ιδιότητες στο πολυμερικό αυτό υλικό όπως, μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, αντοχή στην τριβή κ.α. Το UHMW-PE θερμαινόμενο πάνω από το σημείο τήξης γίνεται διαυγές, δηλαδή τήκεται, αλλά το υλικό δεν ρέει, άρα δεν μορφοποιείται με τις συνήθεις διεργασίες μορφοποίησης όπως εξώθηση, έγχυση κ.α. Σήμερα διατίθεται στην αγορά PE με μοριακό βάρος από 3.000.000-6.000.000. Βρίσκει εφαρμογή σε διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα καθώς επίσης σε σχοινιά για σκάφη και ενισχυτικό πρόσθετο σε σύνθετα υλικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

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

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

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD

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

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

3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ CAE

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

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

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

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

3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

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

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

Σημειώσεις:

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

3.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

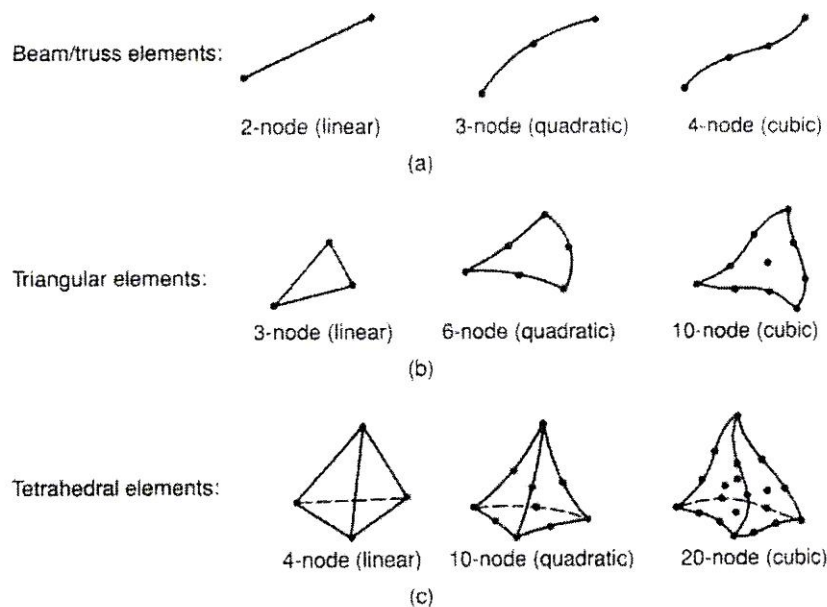
Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλ. η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση του πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (finite-element modeling), η οποία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

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

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν

αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να 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 3.1 δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, οι ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων (όπως συγκέντρωση τάσεων γύρω από οπές) πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή.



Σχήμα 3.1 Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (α) μονοδιάστατα, (β) 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).

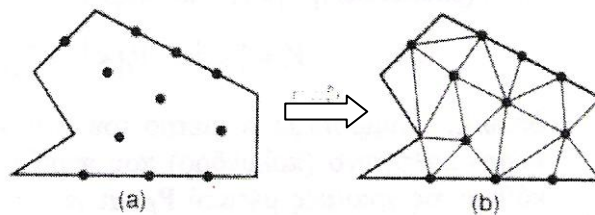
Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής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

3.4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

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

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

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



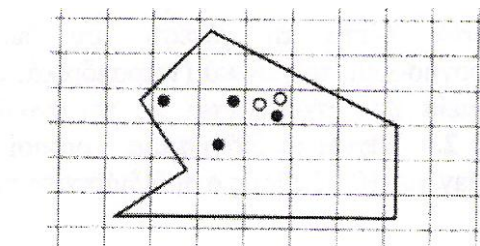
Σχήμα 3.2 Μέθοδος σύνδεσης κόμβων

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 3.3 δείχνει ένα υπερτιθέμενο μονό grid, που βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος. Για κάθε τετράγωνο του grid, γεννιέται με τρόπο τυχαίο ένας εσωτερικός κόμβος. Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1 δύο φορές, μια για την κατεύθυνση x και μια για την κατεύθυνση y , και υπολογίζοντας την ισοδύναμη θέση των τιμών x και y . Εάν ο παραγόμενος κόμβος πέφτει μέσα στο αντικείμενο και έχει απόσταση από το σύνορο μεγαλύτερη από το $r(i)$, αλλά και από τους προηγούμενα παραγόμενους κόμβους, τότε γίνεται αποδεκτός. Εάν όχι, ένας άλλος κόμβος παράγεται τυχαία και ελέγχεται. Εάν δεν καταστεί δυνατόν να βρεθεί ένας αποδεκτός κόμβος μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών (ας πούμε, πέντε), τότε το εν λόγω τετράγωνο παραλείπεται και θεωρείται το επόμενο. Η μέθοδος αυτή είναι επεκτάσιμη και στις 3 διαστάσεις, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται τρισδιάστατο grid.

- **Μέθοδος του Shimada** (1992). Αυτή η μέθοδος γεμίζει το εσωτερικό του προς διακριτοποίηση αντικειμένου με «φουσαλίδες» όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, και λαμβάνει τα κέντρα τους σαν κόμβους. Το μέγεθος κάθε φουσαλίδας προσδιορίζεται από την κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν οι θέσεις των φουσαλίδων προσδιορίζονται από την ικανοποίηση της ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ αυτών.



Σχήμα 3.3 Μέθοδος γένεσης κόμβων κατά Cavendish

Γένεση στοιχείων: Σε αυτή τη δεύτερη φάση, κόμβοι που γεννήθηκαν στην προηγούμενη φάση συνδέονται για να αποτελέσουν στοιχεία έτσι ώστε να μην επικαλύπτονται και να καλύπτεται ολόκληρο το χωρίο. Αναφερόμαστε στη μέθοδο του Lee διότι αυτή μπορεί να

οδηγήσει σε τετραπλευρικά στοιχεία. Ωστόσο, η μέθοδος τριγωνοποίησης του Delaunay είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος σύνδεσης κόμβων. Στις επεξηγήσεις που ακολουθούν, θεωρούμε στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους. Εάν επιθυμούμε στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους, τότε αυτοί προκύπτουν εύκολα από τους γωνιακούς.

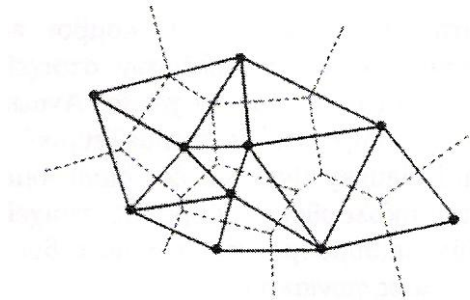
- **Μέθοδος Lee** (1983). Σε αυτή τη μέθοδο, επί του αντικειμένου υπερτίθεται ένα τετραγωνικό πλέγμα υποβάθρου (grid) του οποίου το βήμα είναι ίσο προς το επιθυμητό μέγεθος στοιχείων. Κατόπιν οι κόμβοι που παρήχθησαν στην προηγούμενη φάση συσχετίζονται με τα κελιά του πλέγματος υποβάθρου. Τα κελιά και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

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

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

όπου $|\dots|$ συμβολίζει το μέτρο του διανύσματος εντός του και κάθε V_i , είναι ένα κυρτό πολύγωνο (πολύεδρο) που περιβάλλεται από γραμμές (επίπεδα) τέμνοντα κάθετα τις

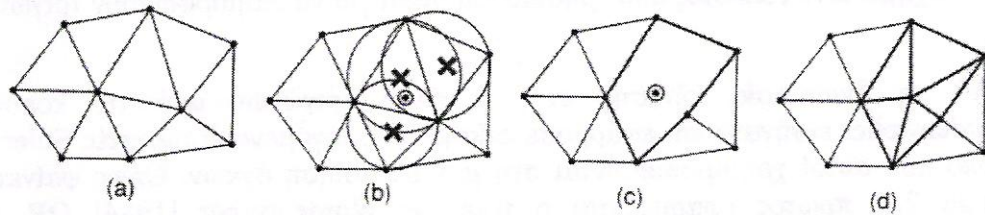
γραμμές μεταξύ P_i και των γειτονικών του κόμβων. Αυτή η διαίρεση του (δισδιάστατου ή τρισδιάστατου) χώρου από ένα σύνολο V_i καλείται Dirichlet tessellation. Κάθε πολύγωνο (πολύεδρο) Voronoi έχει έναν κόμβο που συνδέεται με αυτό. Μετά τη γένεση του διαγράμματος Voronoi, μπορούμε να δημιουργήσουμε τριγωνικά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



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay

Η τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το δεδομένο σύνολο σημείων (κόμβων) χωρίς να είναι απαραίτητη πρώτα να έχει γίνει το διάγραμμα Voronoi, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, και ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει καθόλου άλλα σημεία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται ως ακολούθως. Στην αρχή διαμορφώνεται ένα τρίγωνο T_0 , που περιέχει όλους τους κόμβους· μπορεί να πρέπει να εισαχθούν επιπλέον σημεία στις κορυφές του T_0 . Τότε εισάγουμε κόμβους από ένα δεδομένο σύνολο, έναν προς ένα, και βρίσκουμε τα τρίγωνα έκαστο των οποίων ο περιγεγραμμένος κύκλος περικλείει τον κόμβο. Αυτά τα πολύγωνα, που ονομάζονται τεμνόμενα πολύγωνα (intersection polygons), απαλείφονται. Στο Σχήμα 3.5 (b), τα τεμνόμενα πολυώνυμα συμβολίζονται με \times όταν ένας νέος κόμβος \odot εισάγεται στα υπάρχοντα τρίγωνα, όπως στο Σχήμα 3.5 (a), που γεννώνται από τους ήδη εισαχθέντες κόμβους. Το Σχήμα 3.5 (c) δείχνει το αποτέλεσμα μετά την απαλοιφή των τεμνόμενων αυτών πολυγώνων. Κατόπιν, νέα τρίγωνα διαμορφώνονται συνδέοντας τον νέο κόμβο με τις κορυφές των τεμνόμενων επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 (d). Τελικά, τα

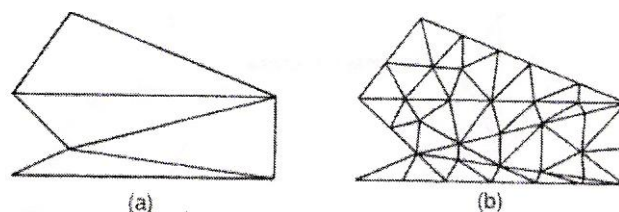
τρίγωνα που είναι συνδεδεμένα με τα επιπλέον σημεία που διαμορφώνουν το T_0 , απαλείφονται. Αυτή η διαδικασία μπορεί εύκολα να επεκταθεί για τρισδιάστατη γένεση πλεγμάτων στοιχείων χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένες σφαίρες από 4 κόμβους αντί περιγεγραμμένους κύκλους από 3 κόμβους. Ωστόσο, η τρισδιάστατη 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 3.5 Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson

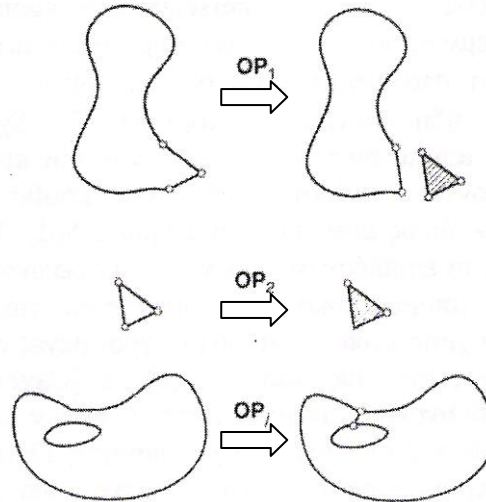
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας (T.D.A.)**

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 3.6 (a). Κατόπιν, αυτά τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτύνονται ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 (b). Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά διότι τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνο τους από την αρχική τοπολογία του αντικειμένου, ιδιαίτερα από την κατανομή των κορυφών. Οι κορυφές που ανήκουν στο ίδιο μεγάλο στοιχείο μπορούν να προσδιορισθούν από τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay που περιγράφηκε σε παραπάνω ενότητα.



Σχήμα 3.6 Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης

Κατά τη διαδικασία γένεσης ενός συνόλου τριγώνων από τις κορυφές, ο Wordenweber εισήγαγε και εφάρμοσε επίσης τους λεγόμενους τελεστές Euler με τον τρόπο που αυτοί χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση όγκων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7, πρώτος εφαρμόζεται ο τελεστής Wordenweber (1984) OP_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.

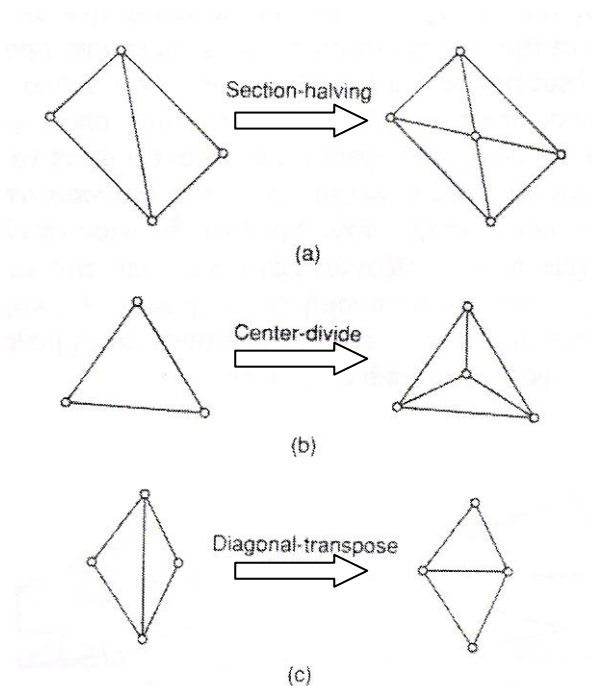


Σχήμα 3.7 Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα

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 3.8. Το Σχήμα 3.8 (a) δείχνει μια μέθοδο που εφαρμόζεται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους. Δηλαδή, προστίθεται ένας κόμβος στην κοινή ακμή, και τα γειτονικά στοιχεία υποδιαιρούνται συνδέοντας τους κόμβους τους με τον νέο κόμβο. Στο Σχήμα 3.8 (b), ένα μεγάλο τριγωνικό στοιχείο υποδιαιρείται προσθέτοντας ένα νέο κόμβο στο κέντρο βάρους του. Όταν το υποδιαιρέσουμε με τους τρόπους που περιγράψαμε παραπάνω, μπορεί να συναντήσουμε λεπτά τρίγωνα όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.8 (c). Αυτά τα τρίγωνα είναι ήδη αρκετά μικρά για τη δοθείσα πυκνότητα πλέγματος.

Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα του πλέγματος στρίβοντας τη διαγώνιο του τετραπλεύρου που διαμορφώνεται από τις κορυφές των δύο

αρχικών τριγώνων. Παρατηρείστε ότι το αποτέλεσμα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να μην είναι αρκετά ακριβές εάν υπάρχουν πάρα πολλά λεπτά στοιχεία.



Σχήμα 3.8 Μέθοδοι εκλέπτυνσης τριγώνων

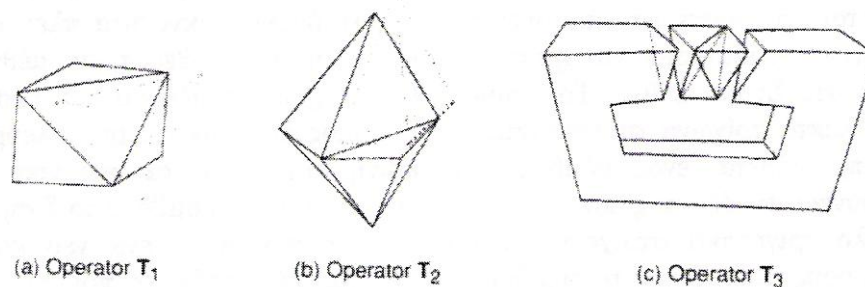
Η μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης μπορεί να επεκταθεί στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο, και το πολύεδρο κατατέμενεται σε τετραεδρικά στοιχεία συνδέοντας τις κορυφές τους. Κατόπιν, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση. Οι Woo και Thomasma (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 3.9, χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό τετραέδρων ως εξής:

Πρώτα, εφαρμόζεται ο τελεστής T_3 για να απαλείψει τις σπές του αντικειμένου αποτέμνοντας το κατάλληλο τμήμα του έτσι ώστε η σπή να αποκαλυφθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9 (c). Σημειώστε ότι σε αυτό το στάδιο τρία τετράεδρα διαμορφώνονται σαν αποτέλεσμα παράπλευρης διαδικασίας.

Κατόπιν, οι κυρτές κορυφές στις οποίες όπου συναντώνται τρεις ακμές, που καλούνται convex trivalent vertices (κορυφές), διαχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας τον τελεστή T_1 , όπως εικονίζεται στο Σχήμα 3.9 (a). Αυτός ο τελεστής

εφαρμόζεται επαναληπτικά μέχρις ότου δεν υπάρξει καμία κυρτή trivalent κορυφή. Εάν όλες οι κορυφές που απομένουν δεν είναι convex trivalent, τότε ο τελεστής T_2 εφαρμόζεται για να σκάψει ένα τετράεδρο, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 3.9 (b). Αυτός ο τελεστής παρέχει τις νέες convex trivalent κορυφές και έτσι ο T_1 εφαρμόζεται ξανά.

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



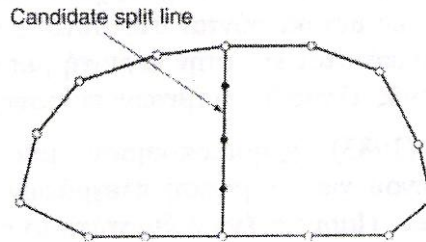
Σχήμα 3.9 Τελεστές αποσύνθεσης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις

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

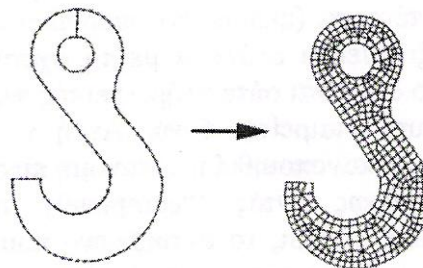
Οι μέθοδοι αποσύνθεσης γεωμετρίας (geometry decomposition approaches) εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που βασίζονται σε αναδρομές και αυτές που βασίζονται σε επαναλήψεις. Στη συνέχεια επεξηγούμε μόνο τη μέθοδο αναδρομής καθώς αυτή είναι επεκτάσιμη στις τρεις διαστάσεις.

Η μέθοδος αναδρομικής αποσύνθεσης (recursive geometry decomposition method) γεννά τριγωνικά και τετρακομβικά στοιχεία στις 2 διαστάσεις με τον ακόλουθο τρόπο. Πρώτα, το αρχικό αντικείμενο διαιρείται σε κυρτά μέρη είτε με το χέρι ή αυτόματα. Αυτόματη αποσύνθεξη αντικειμένου σε κυρτά τμήματα περιγράφεται από τον Bykat (1976). Για κάθε κυρτό τμήμα, εισάγονται κόμβοι στο σύνορο του έτσι ώστε να ικανοποιήσει την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν, κάθε κυρτό τμήμα υποδιαιρείται προσεγγιστικά στο μέσον του «μακρύτερου άξονα», όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. 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 καταλήξει σε εξάγωνα ή οκτάγωνα και παράγουν τριγωνικά και τετραπλευρικά

στοιχεία από αυτά σύμφωνα με προ-αποθηκευμένα πρότυπα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να πάρουμε περισσότερα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Το Σχήμα 3.11 δείχνει ένα παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.



Σχήμα 3.10 Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line)



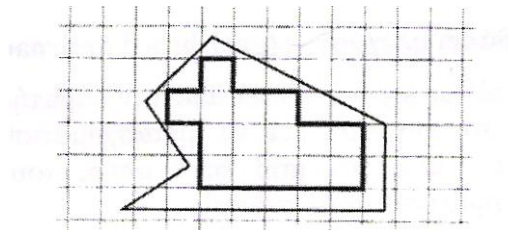
Σχήμα 3.11 Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου

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

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

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

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

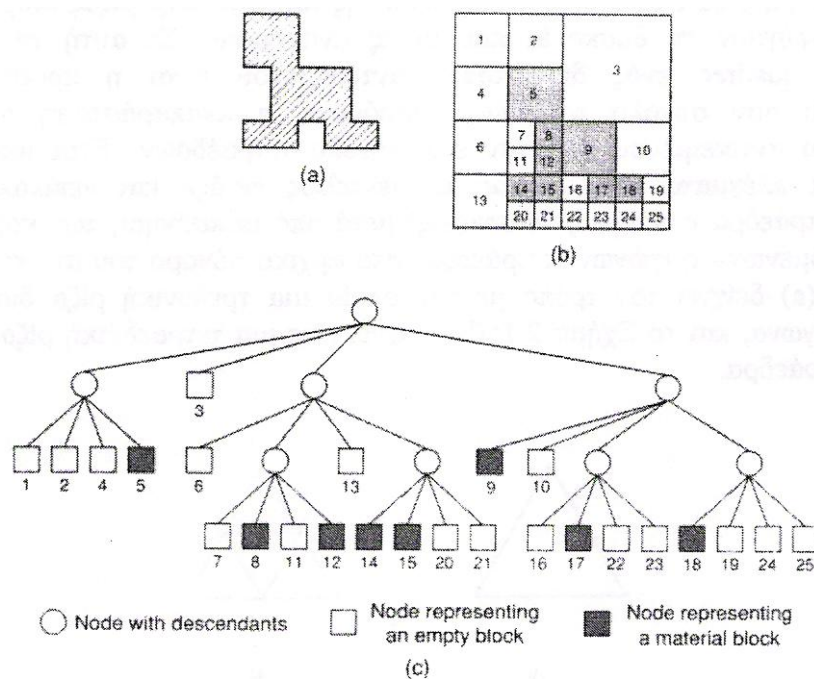


Σχήμα 3.12 Χρήση ορθογωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based”

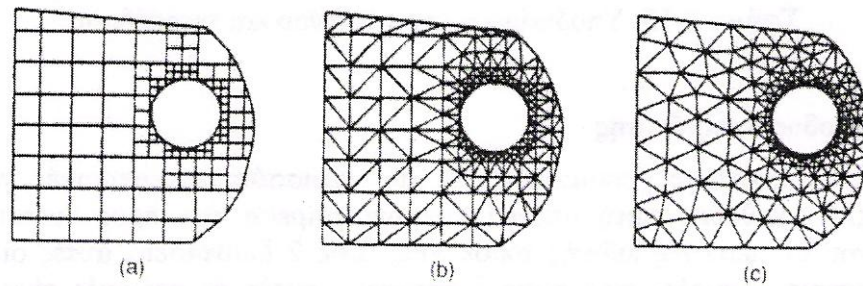
Οι Yerry και Shephard (1983) χρησιμοποίησαν μια δενδρική (quadree) αναπαράσταση του αντικειμένου για τη γένεση πλεγμάτων. Ένα quadree είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Παριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο, σαν αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 3.13(a), σαν ένα σύνολο τετραγώνων έκαστο διαφορετικού μεγέθους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

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

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



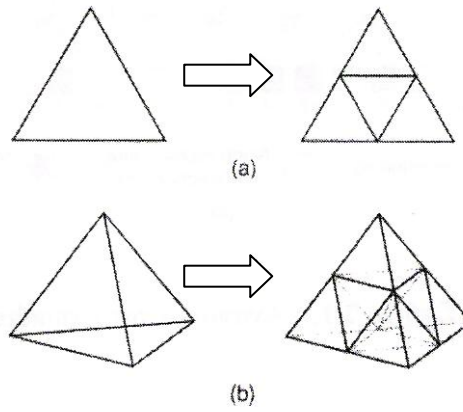
Σχήμα 3.13 Μέθοδος σύνδεσης κόμβων



Σχήμα 3.14 Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree

Βήμα 3: Οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς (adjustment) έτσι ώστε να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων. Το Σχήμα 3.14 (c) δείχνει το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης του πλέγματος. Η μέθοδος εξομάλυνσης αναφέρεται αργότερα. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα «επικαλυπτόμενα» όγδοα (octants) τροποποιούνται έτσι ώστε να καταλαμβάνουν 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 συμβιβαστικότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό απαιτεί ένα περίπλοκο αλγόριθμο. Πράγματι, ούτε και η διάσπαση του τροποποιημένου τετάρτου στις δύο διαστάσεις είναι εύκολο πρόβλημα.

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



Σχήμα 3.15 Υποδιαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου

- **Μέθοδος Απεικόνισης**

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

- **Βελτίωση Ποιότητας Πλέγματος**

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

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

3.4.3 ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

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

- **Καθορισμός του Είδους Ανάλυσης**

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

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

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

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

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

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

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

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

- **Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων**

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

1^ο Στάδιο → Κατασκευή της γεωμετρίας.

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

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

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

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

- **Είδος Πεπερασμένων Στοιχείων**

Τα βασικά πεπερασμένα στοιχεία είναι:

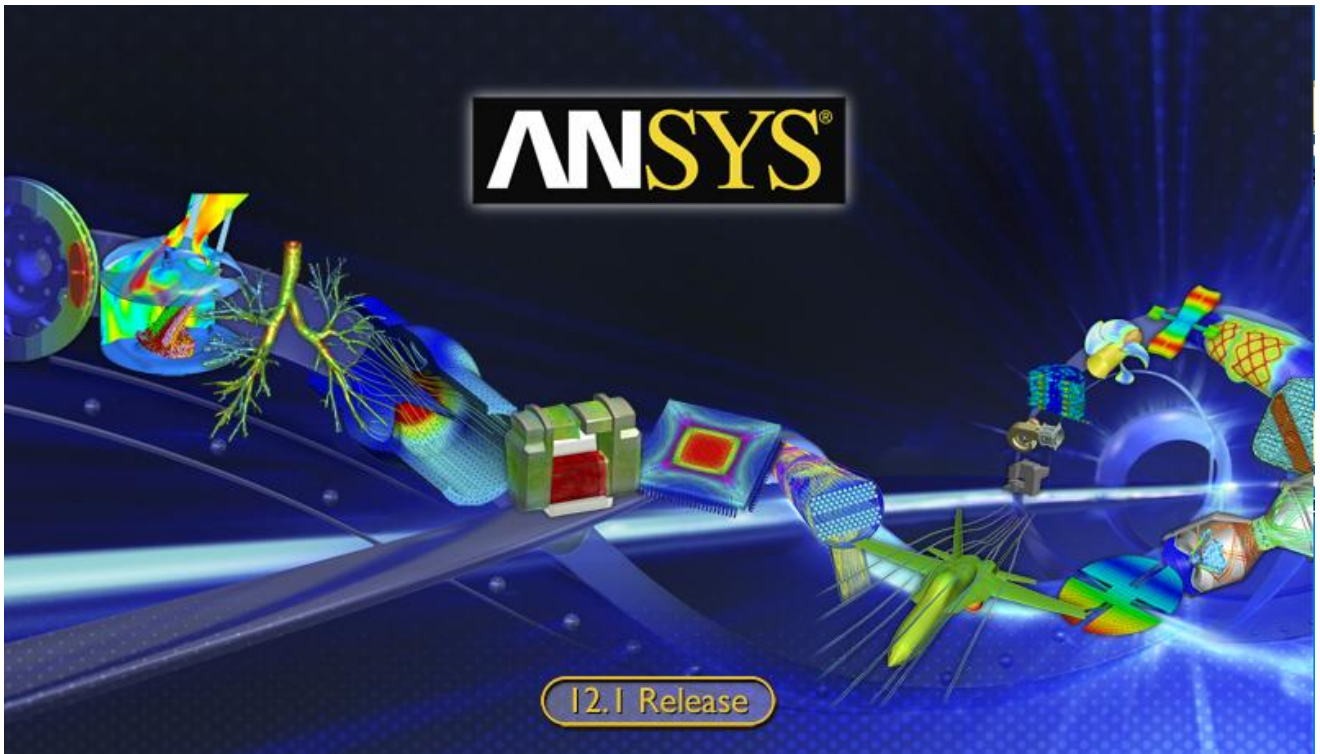
- Ράβδος (2 κόμβοι)
- Σύρμα – σχοινί
- Δοκός (2 κόμβοι)
- Επίπεδη εντατική καταπόνηση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές)
- Πλάκα (3 μέχρι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

- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι)
- Εξάεδρο (8 κόμβοι)

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

3.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS WORKBENCH

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



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

Το ANSYS Workbench μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

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

Τα είδη ανάλυσης που μπορεί να επιλύσει το ANSYS Workbench είναι:

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο, θα πραγματοποιήσουμε στατική ανάλυση στο πλαίσιο ενός τυπικού ποδηλάτου, χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά, όπως αλουμίνιο, πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο κ.α.

Ο σχεδιασμός του πλαισίου του ποδηλάτου, περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο και πραγματοποιείται με το σχεδιαστικό πακέτο SolidWorks.

Το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για τη στατική ανάλυση είναι το ANSYS Workbench, το οποίο έχουμε προαναφέρει.

Οι φορτίσεις που θα εφαρμοστούν αναλύονται σε επόμενη παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου και αναφέρονται στη μέγιστη καταπόνηση που μπορεί να δεχθεί ένα πλαίσιο ποδηλάτου σε κατάσταση με μέγιστο φορτίο.

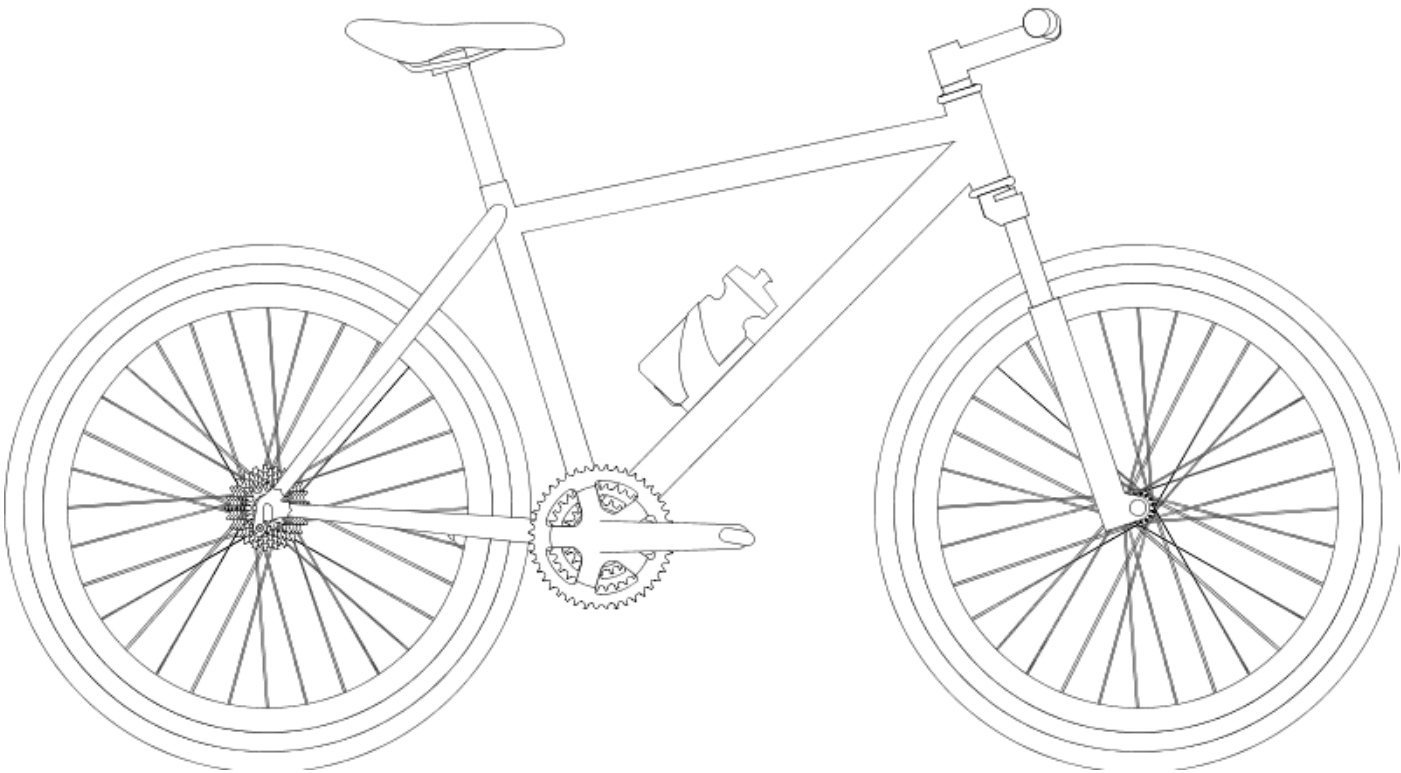
Θα πραγματοποιηθούν 10 προσομοιώσεις, όσα είναι και τα υλικά που επιλέχθηκαν για να διαπιστωθεί εάν αντέχουν στη φόρτιση που ορίσαμε.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού του πλαισίου του ποδηλάτου.

4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

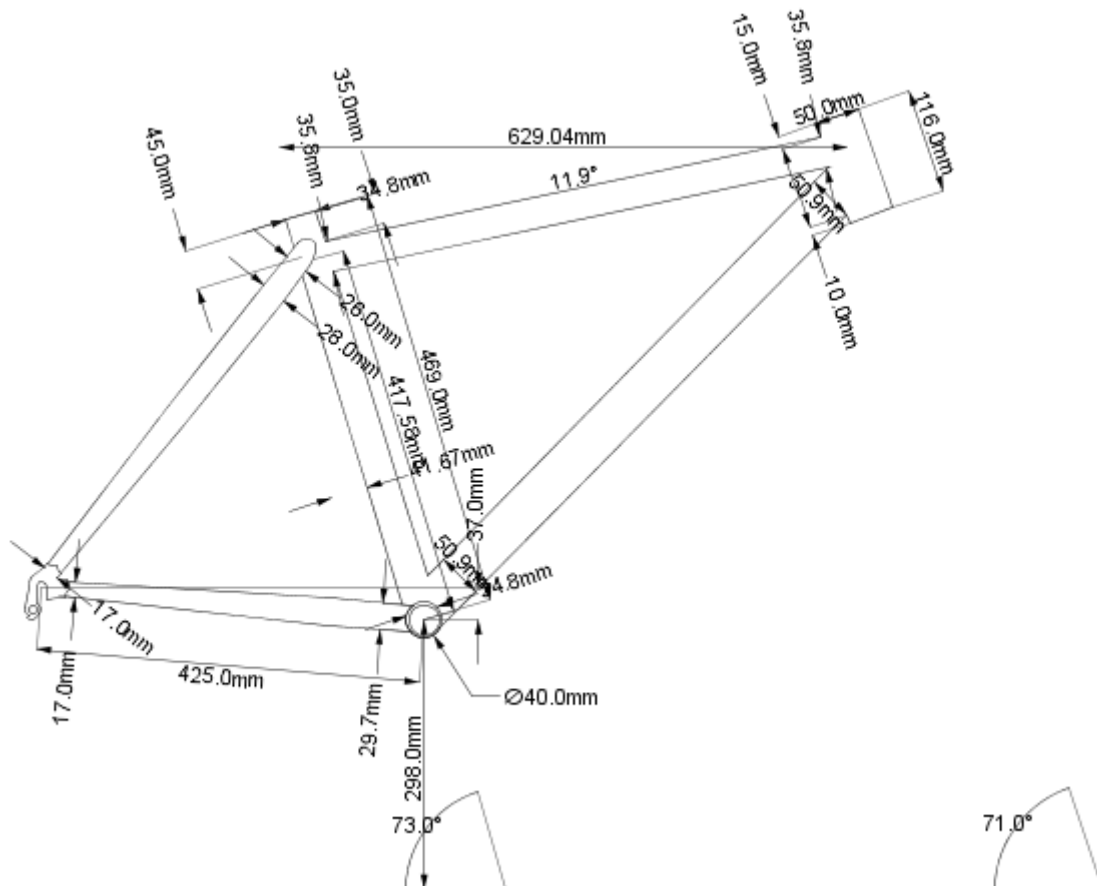
Όπως προαναφέραμε, θα χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό **SolidWorks** για να σχεδιάσουμε το πλαίσιο του ποδηλάτου. Για να βρούμε τις διαστάσεις του πλαισίου χρησιμοποιήσαμε το δωρεάν διαδικτυακό λογισμικό **BikeCAD** από την ιστοσελίδα www.bikeforest.com.

Επιλέξαμε ένα τυπικό ποδήλατο δρόμου για άνδρα ύψους 1,75 m, ένα σκαρίφημα του οποίου παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω:



Σχήμα 4.1 Σκαρίφημα ποδηλάτου αναφοράς σχεδιασμένο στο bikeCAD

Στη συνέχεια, απομονώνουμε το πλαίσιο και αμέσως παρακάτω παραθέτουμε τις βασικές διαστάσεις που μας παρέχει το πρόγραμμα.



Σχήμα 4.2 Βασικές διαστάσεις του πλαισίου στο bikeCAD

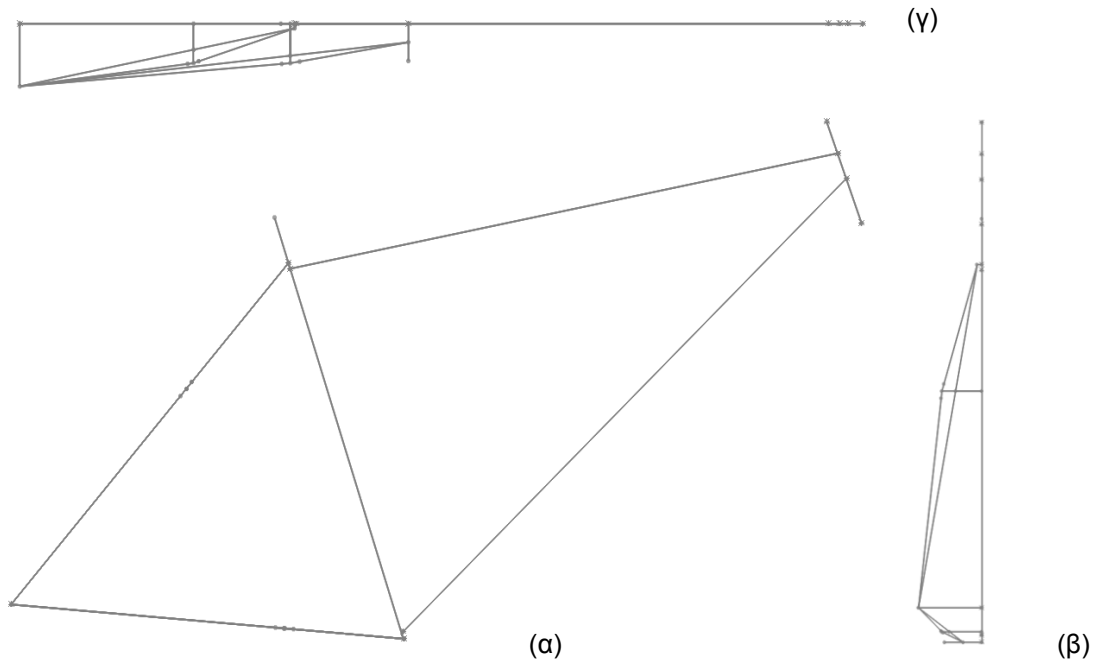
Έχοντας πλέον τις απαραίτητες διαστάσεις του πλαισίου, είμαστε σε θέση να σχεδιάσουμε το ποδήλατο στις τρεις διαστάσεις (3D). Αμέσως παρακάτω, περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού.

Κατ' αρχήν, δημιουργούμε ένα νέο αντικείμενο (**Part**) επιλέγοντας το αντίστοιχο κουμπί του προγράμματος, το οποίο δείχνεται αμέσως παρακάτω.

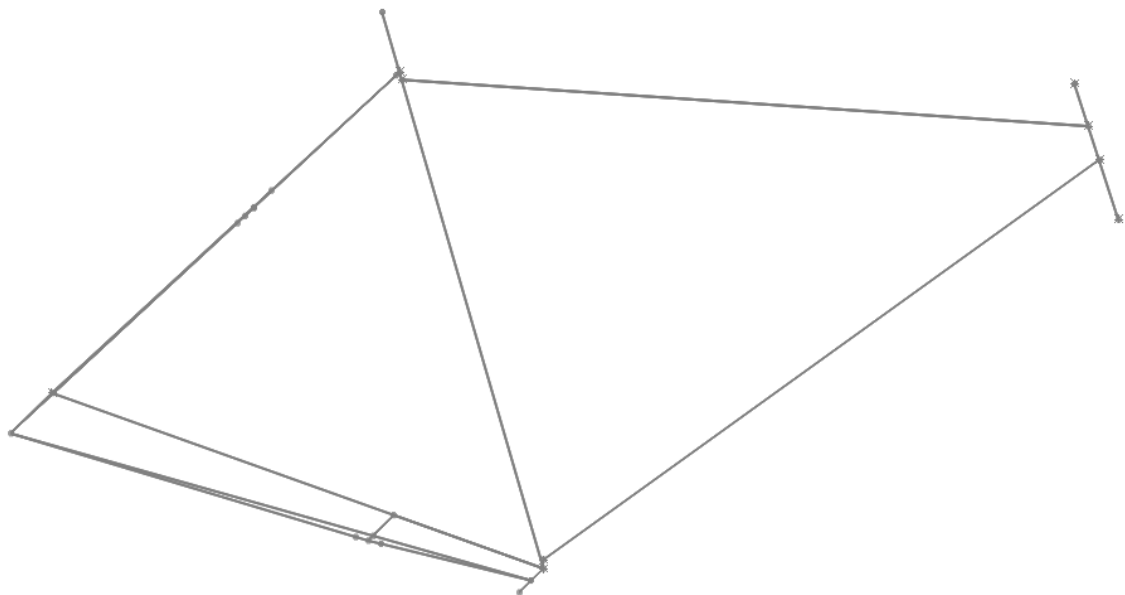


Σχήμα 4.3 Δημιουργία νέου αντικειμένου στο SolidWorks

Στη συνέχεια, δημιουργούμε τρισδιάστατο σχέδιο (**3D Sketch**), κατασκευάζοντας βοηθητικά επίπεδα (**Planes**) στην αρχή και το τέλος κάθε γραμμής. Το τελικό σχέδιο, φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

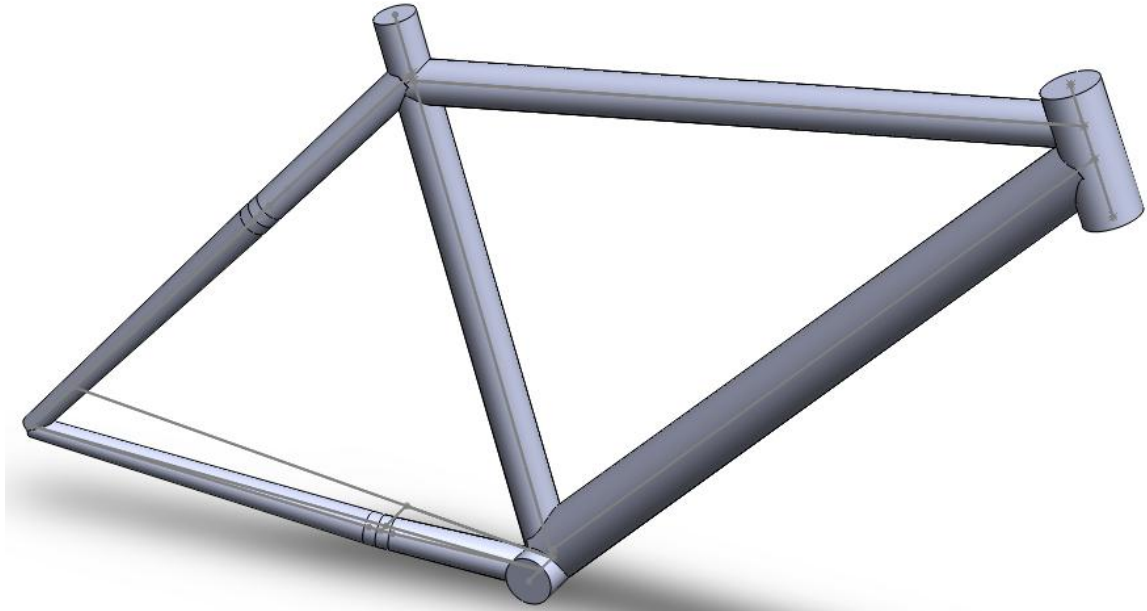


Σχήμα 4.4 (α) πρόοψη, (β) πλάγια όψη και (γ) κάτοψη του σχεδίου του πλαισίου στο SolidWorks



Σχήμα 4.5 Τριμετρική όψη του σχεδίου του πλαισίου στο SolidWorks

Αμέσως μετά, με τη βοήθεια των εντολών **Swept Boss/Base** και **Lofted Boss/Base** κατασκευάζουμε τους βασικούς σωλήνες του πλαισίου, όπου στο πίσω τμήμα, λόγω συμμετρίας δημιουργούμε μόνο τη μία πλευρά.



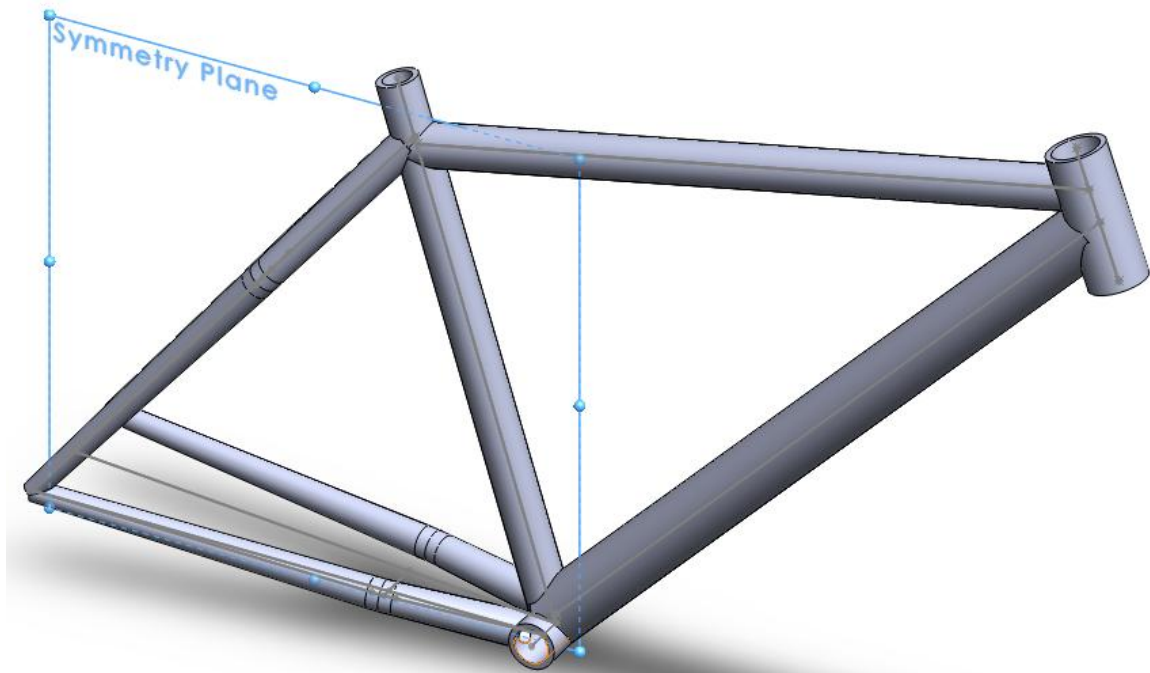
Σχήμα 4.6 Τριμετρική απεικόνιση του πλαισίου (χωρίς οπές) στο SolidWorks

Έπειτα, χρησιμοποιώντας τις εντολές **Swept Cut** και **Lofted Cut**, προχωρούμε σε διάνοιξη των οπών στους σωλήνες, πάχους 5 mm.



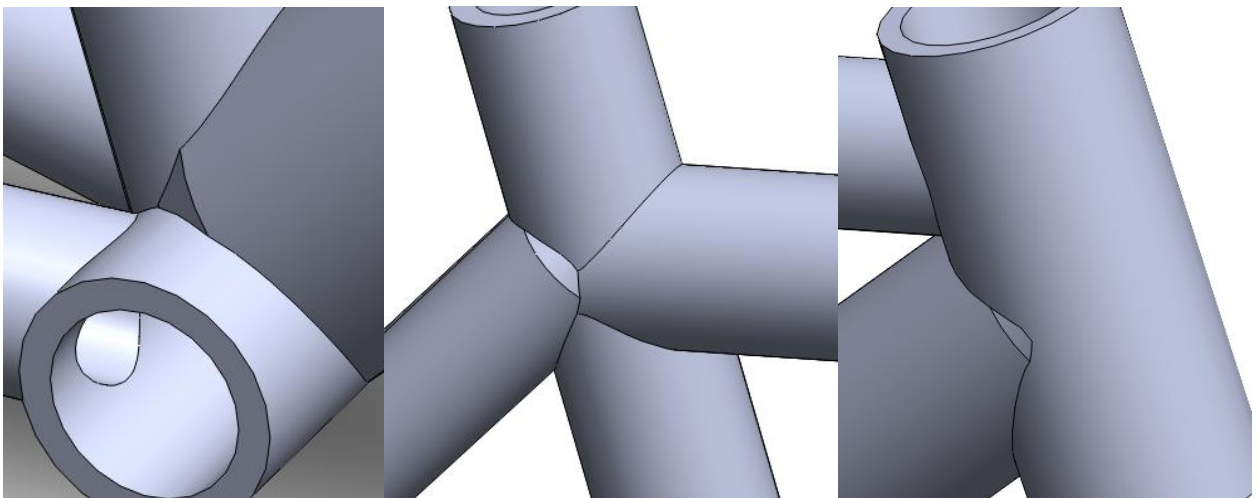
Σχήμα 4.7 Τριμετρική απεικόνιση του πλαισίου (με οπές) στο SolidWorks

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της εντολής **Mirror**, και δημιουργώντας βοηθητικό επίπεδο συμμετρίας (**Symmetry Plane**) κατασκευάζουμε και το υπόλοιπο πίσω τμήμα του πλαισίου.



Σχήμα 4.8 Τριμετρική απεικόνιση ολόκληρου του πλαισίου στο SolidWorks

Τέλος, χρησιμοποιώντας την εντολή **Camfer**, “διορθώνουμε” κάποιες ατέλειες του πλαισίου, ώστε να πάρουμε την τελική μορφή του.



Σχήμα 4.9 Χρήση της εντολής **Camfer** στο SolidWorks

Παρακάτω, παρουσιάζουμε το τελικό πλαίσιο σε διάφορες όψεις.



Σχήμα 4.10 Παρουσίαση του τελικού πλαισίου σε διάφορες όψεις στο SolidWorks

Τα πλήρη κατασκευαστικά σχέδια του πλαισίου με τις διαστάσεις, παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.

4.3 ΥΛΙΚΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Στη συνέχεια, επιλέγουμε τα υλικά με τα οποία θα πραγματοποιήσουμε τη στατική ανάλυση του πλαισίου. Από την ευρεία γκάμα υλικών της ιστοσελίδας www.matweb.com επιλέγουμε τα ακόλουθα υλικά:

A/A	ΥΛΙΚΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (Kg/m ³)	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPa)	ΑΡΙΘΜΟΣ POISSON	ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (MPa)
1	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (ΣΕΙΡΑ 6000)	2700	69	0,33	280
2	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	954	0,934	0,38	30
3	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (GLASS FIBER FILLED)	1150	4,5	0,38	43,5
4	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	1060	2,28	0,38	16,2
5	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	935	1,8	0,35	32,8
6	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	1050	4,1	0,35	58,5
7	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	997	7,27	0,35	33
8	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	1070	2,53	0,35	26,8
9	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	1030	2,2	0,35	30,2
10	ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	1040	3,95	0,35	26,6

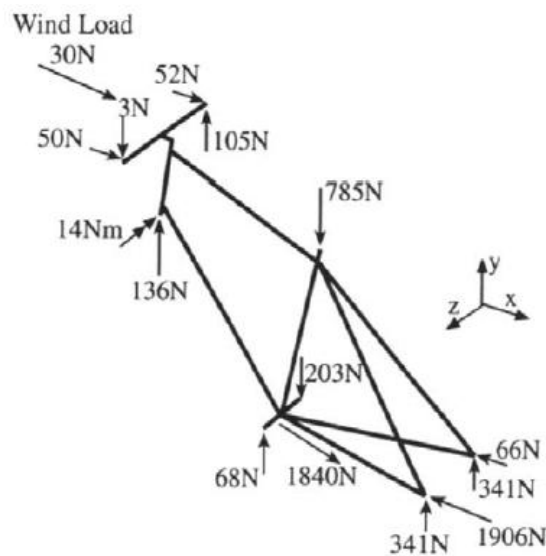
Πίνακας 4.1 Υλικά εφαρμογής

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στο παράρτημα Β (Β1 – Β10) με τα πλήρη χαρακτηριστικά τους.

4.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

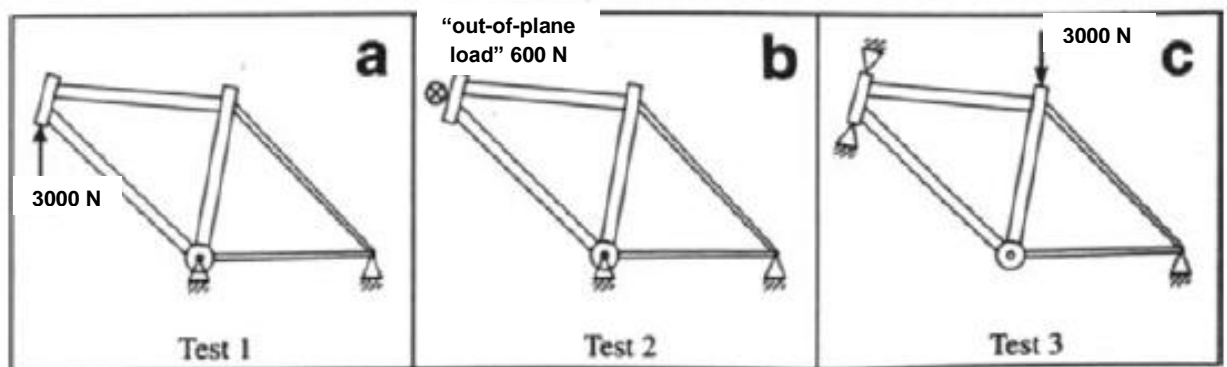
Αφού έχουμε σχεδιάσει το πλαίσιο και έχουμε επιλέξει τα υλικά, θα πρέπει να ορίσουμε τη φόρτιση που θα του ασκήσουμε ώστε να διαπιστωθεί ή όχι η αντοχή του. Είναι πολύ βασική η επιλογή των σωστών δυνάμεων με τις σωστές κατευθύνσεις, ώστε να γίνει πλήρης έλεγχος της αντοχής του πλαισίου.

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται οι δυνάμεις που δέχεται ένα πλαίσιο που κινείται με 50 km/h και βρίσκεται σε κατάσταση έντονης καταπόνησης (intense sprint).



Σχήμα 4.11 Φόρτιση ενός αγωνιστικού πλαισίου σε έντονη καταπόνηση

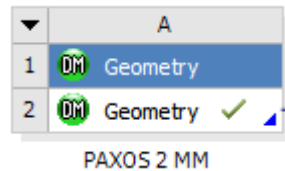
Προκειμένου να ελεγχθεί η αντοχή ενός πλαισίου τόσο για καθημερινή χρήση, όσο και αγωνιστική χρήση πρέπει να γίνει μια σειρά από τεστ, τα οποία παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.



Σχήμα 4.12 Τεστ ελέγχου της αντοχής ενός πλαισίου ποδηλάτου

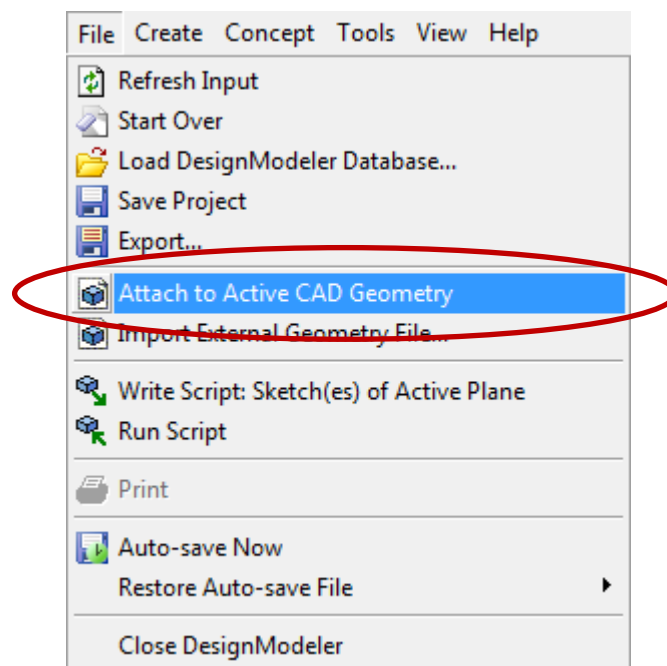
4.5 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κατ' αρχήν, ανοίγουμε το περιβάλλον του **ANSYS Workbench**, όπου εισάγουμε ένα μπλοκ γεωμετρίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



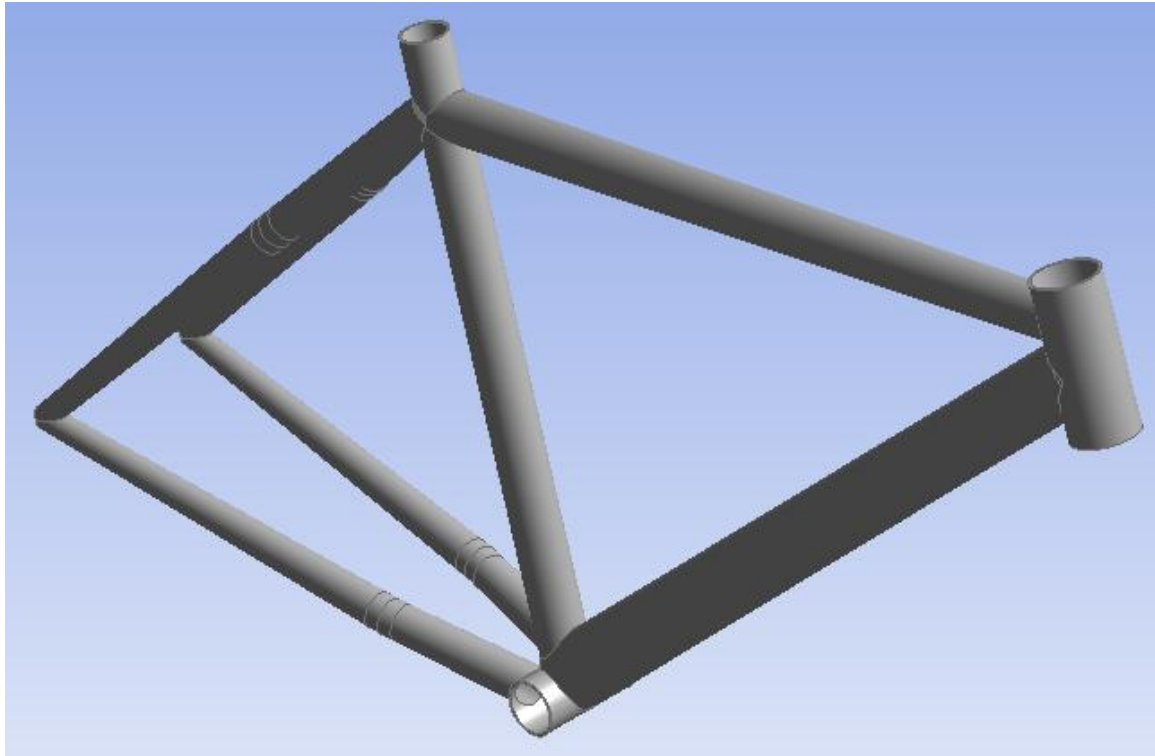
Σχήμα 4.13 Εισαγωγή μπλοκ γεωμετρίας στο ANSYS Workbench

Στη συνέχεια, εισερχόμαστε στο περιβάλλον της γεωμετρίας (**DesignModeler**) όπου εισάγουμε την γεωμετρία που έχουμε δημιουργήσει στο σχεδιαστικό πρόγραμμα **SolidWorks** χρησιμοποιώντας το menu: **Attach to Active CAD Geometry**, μιας και τα δύο προγράμματα, έχουν άμεση αλληλεπίδραση.



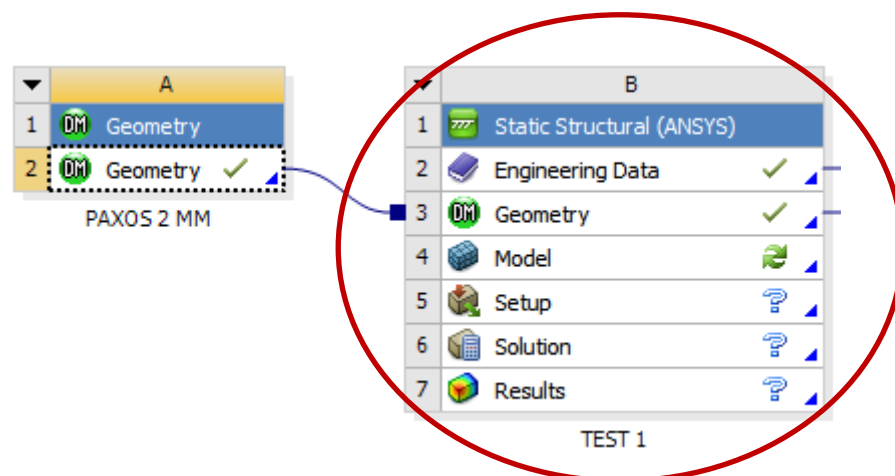
Σχήμα 4.14 Εισαγωγή γεωμετρίας από το SolidWorks

Έτσι, εισάγεται η γεωμετρία του πλαισίου, η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.15 Γεωμετρία του πλαισίου στο Ansys

Αφού ολοκληρώθηκε η εισαγωγή της γεωμετρίας και ο ορισμός του συμμετρικού μοντέλου που θα αναλυθεί, κλείνουμε το περιβάλλον του **DesignModeler**, επιστρέφουμε στο βασικό μενου του **ANSYS Workbench** και προχωρούμε στη στατική ανάλυση, εισάγοντας το μπλοκ → **Static Structural (ANSYS)** όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.16 Εισαγωγή μπλοκ στατικής ανάλυσης στο ANSYS Workbench

Στη συνέχεια, θα επιλέξουμε το **menu** → **Engineering Data** όπου θα ορίσουμε τα υλικά που έχουμε επιλέξει για να κάνουμε τις δοκιμές.

Outline of Schematic B2, C2, D2: Engineering Data			
	A	B	C
1	Contents of Engineering Data		S..
2	Material		
3	Aluminum Alloy (Series 6000)	<input type="checkbox"/>	
4	Polyethylene HDPE (Glass Fiber Filled)	<input type="checkbox"/>	
5	Polyethylene HDPE (Injection Molded)	<input type="checkbox"/>	
6	Polyethylene HDPE (Wood Filled)	<input type="checkbox"/>	
7	Polypropylene (10% Carbon Fiber)	<input type="checkbox"/>	
8	Polypropylene (20% Glass Fiber Filled)	<input type="checkbox"/>	
9	Polypropylene (20% Mica Filler)	<input type="checkbox"/>	
10	Polypropylene (30% Talc Filler)	<input type="checkbox"/>	
11	Polypropylene (Molded)	<input type="checkbox"/>	
12	Polypropylene (Wood Filled)	<input type="checkbox"/>	

Σχήμα 4.17 Υλικά δοκιμών στο ANSYS Workbench

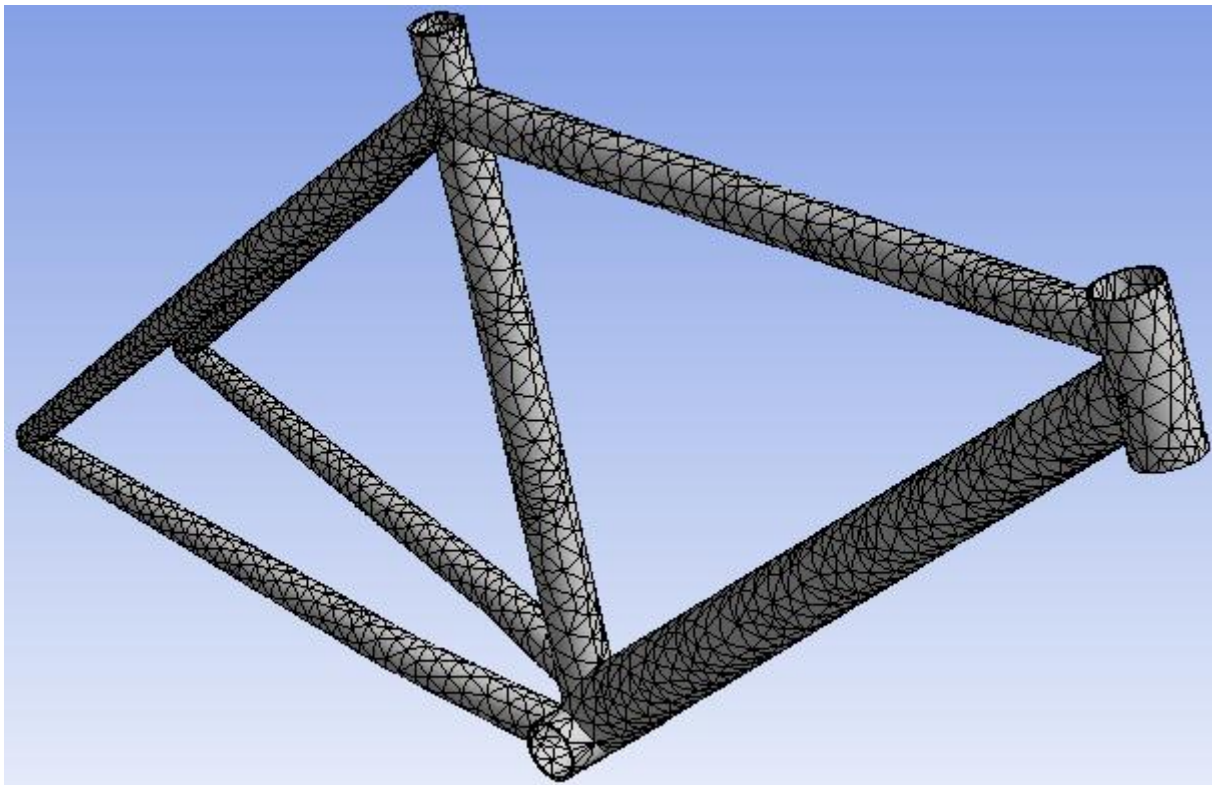
Αφού έχουμε ορίσει τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε, εισερχόμαστε στο περιβάλλον του μηχανικού μοντέλου (**Mechanical**) του **ANSYS Multiphysics** όπου στην αρχή ορίζουμε το υλικό από το οποίο θα αποτελείται το πλαίσιό μας. Ορίζουμε σαν υλικό το **Αλουμίνιο 6061** από την λίστα που εμφανίζεται.

Έτσι, δημιουργούμε πλέγμα του οποίου τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Αξίζει να αναφέρουμε ότι χρησιμοποιούμε βελτίωση πλέγματος στις δύσκολες γεωμετρίες για να έχουμε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
[-] Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Curvature Normal Angle	Default (70,3950 °)
Min Size	Default (5,6089e-004 m)
Max Face Size	Default (5,6089e-002 m)
Max Tet Size	Default (0,112180 m)
Growth Rate	Default (1,850)
Minimum Edge Length	2,e-003 m

Σχήμα 4.18 Ιδιότητες πλέγματος του πλαισίου στο ANSYS Workbench

Το πλέγμα που δημιουργήθηκε, παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω:

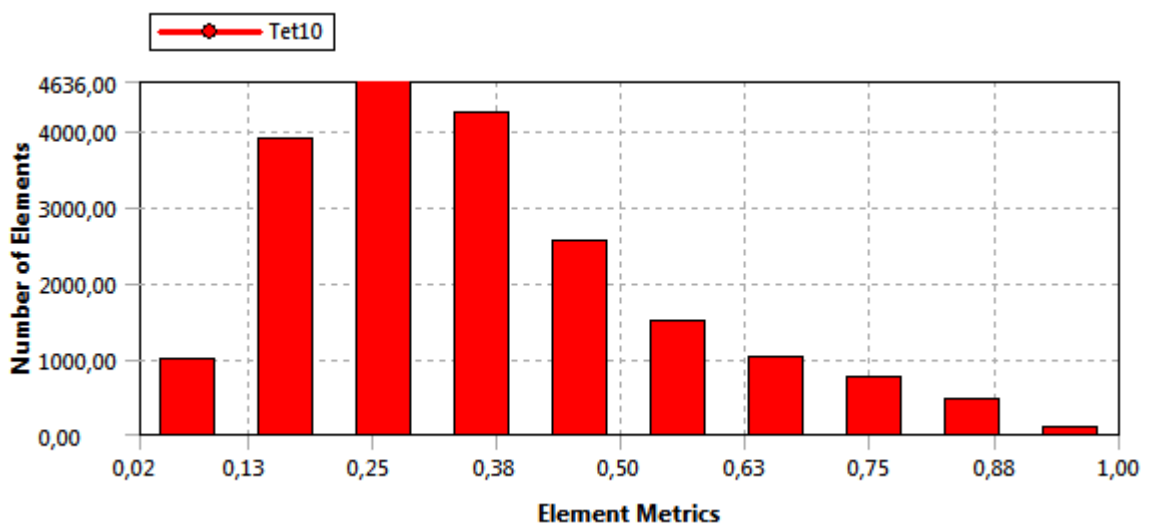


Σχήμα 4.19 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του πλαισίου

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, το πλέγμα έχει δημιουργηθεί αποκλειστικά για το ANSYS Mechanical, ενώ αποτελείται από:

- 39098 κόμβους (Nodes)
- 19904 τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία (Elements)

Στατιστικά στοιχεία σχετικά με τον αριθμό και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



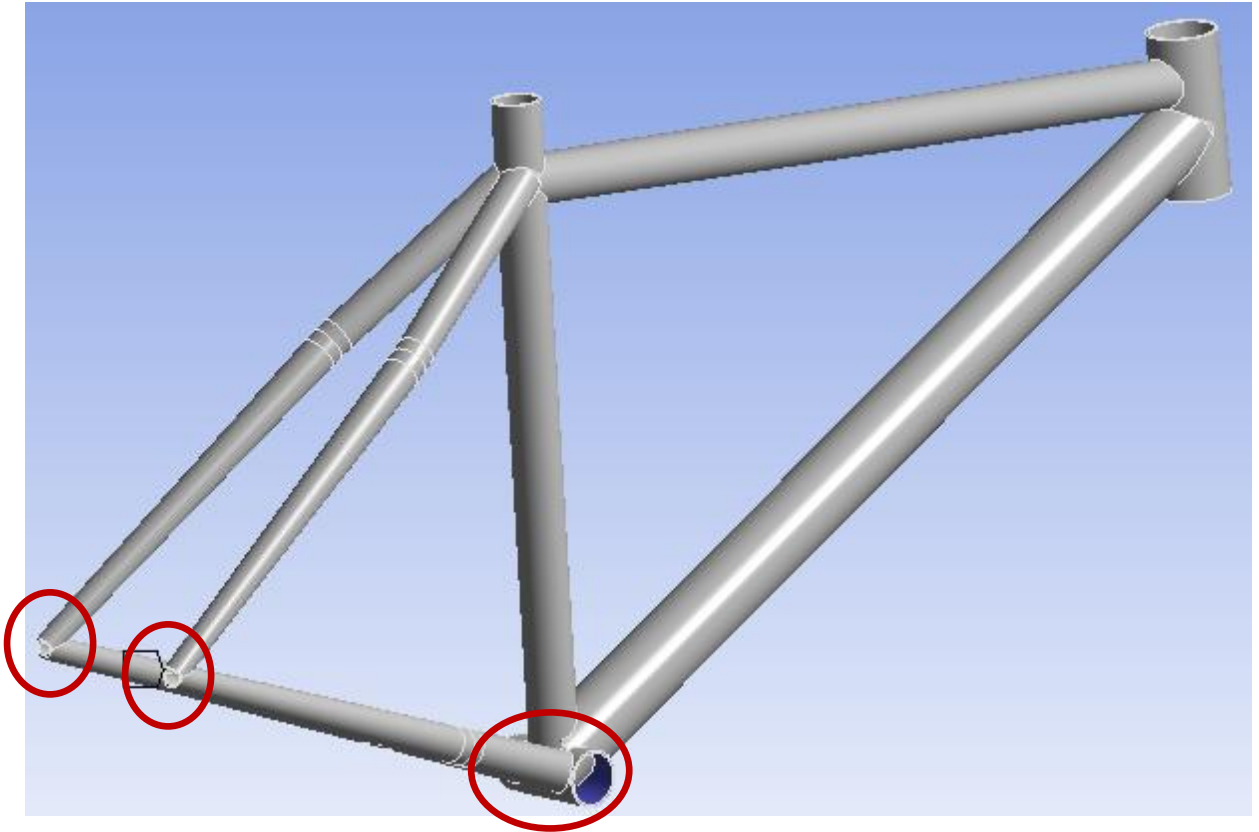
Σχήμα 4.20 Στατιστικά στοιχεία των πεπερασμένων στοιχείων του πλαισίου

Στη συνέχεια, θα ορίσουμε τις οριακές συνθήκες του στατικού προβλήματος. Κατ' αρχήν, τοποθετούμε πάκτωση (Fixed Support) στο λαιμό κεφαλής, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

Details of "Fixed Support"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	5 Faces
Definition	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

Σχήμα 4.21 Λεπτομέρειες ορισμού πάκτωσης στο πλαίσιο

Στο επόμενο σχήμα, δείχνονται οι επιφάνειες που πακτώνονται για την πραγματοποίηση του πρώτου τεστ σύμφωνα με το σχήμα 4.12:



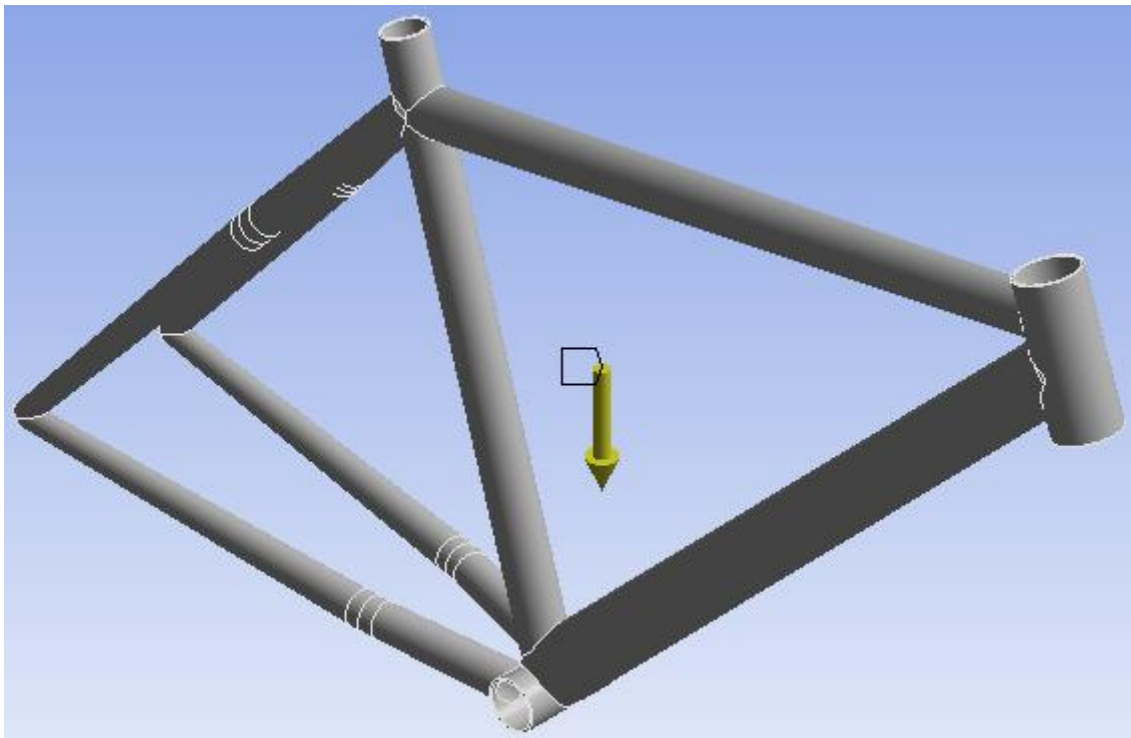
Σχήμα 4.22 Πάκτωση πλαισίου για το 1^ο τεστ

Αμέσως μετά τοποθετούμε τη βαρύτητα (Standard Earth Gravity) όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

Details of "Standard Earth Gravity" ⌵	
[-] Scope	
Geometry	All Bodies
[-] Definition	
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	-0, m/s ² (ramped)
Y Component	-9,8066 m/s ² (ramped)
Z Component	-0, m/s ² (ramped)
Suppressed	No
Direction	-Y Direction

Σχήμα 4.23 Λεπτομέρειες ορισμού βαρύτητας στο πλαίσιο

Στο επόμενο σχήμα, δείχνεται με κίτρινο βελάκι η βαρύτητα κατά τον άξονα -Y:



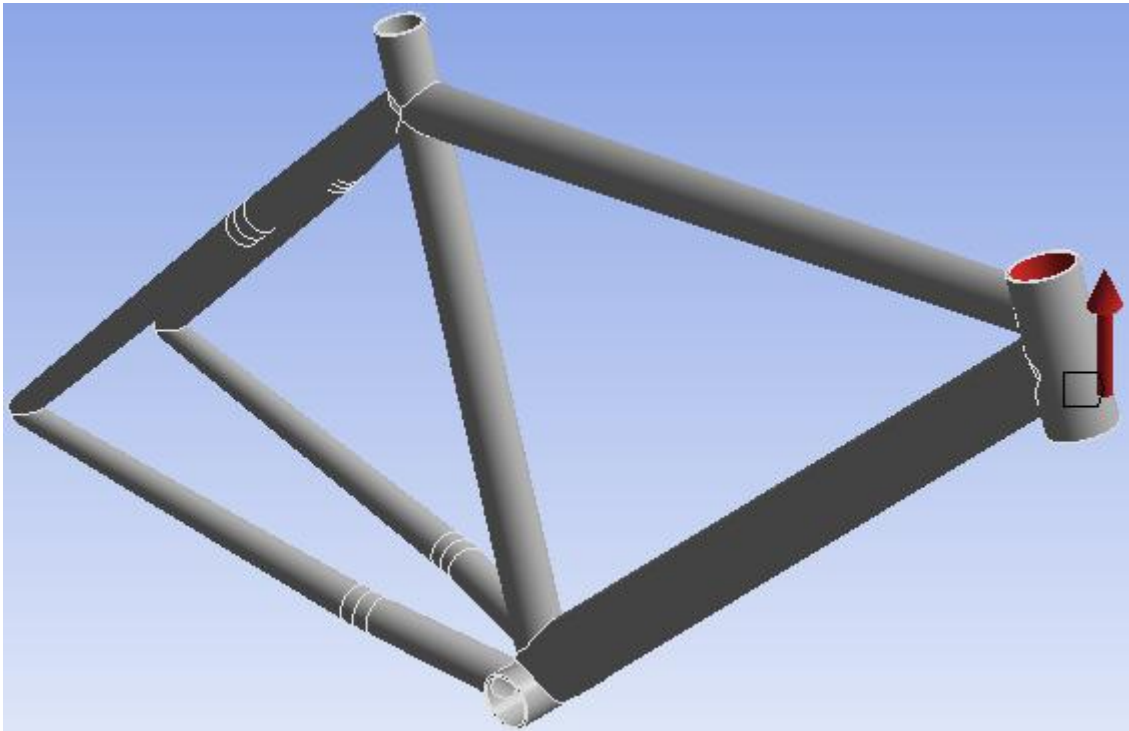
Σχήμα 4.24 Βαρύτητας στο πλαίσιο 1^{ου} τεστ

Τέλος, εισάγουμε την δύναμη που εφαρμόζουμε στο πλαίσιο, σύμφωνα με το πρώτο τεστ, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

Details of "Force" ✚	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Type	Force
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	5000, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N (ramped)
Suppressed	No

Σχήμα 4.25 Ορισμός δύναμης στο πλαίσιο 1^{ου} τεστ

Στο επόμενο σχήμα, δείχνεται η δύναμη που εφαρμόσαμε με κόκκινο βελάκι.



Σχήμα 4.26 Δύναμη στο πλαίσιο του 1^{ου} τεστ

Αφού εισάγαμε τις οριακές συνθήκες του προβλήματος, προχωρούμε στη ανάλυσή του, ορίζοντας τις ιδιότητες που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

Details of "Analysis Settings"	
[-] Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
[-] Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
[-] Nonlinear Controls	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Conve...	Program Controlled
Rotation Convergen...	Program Controlled
Line Search	Program Controlled

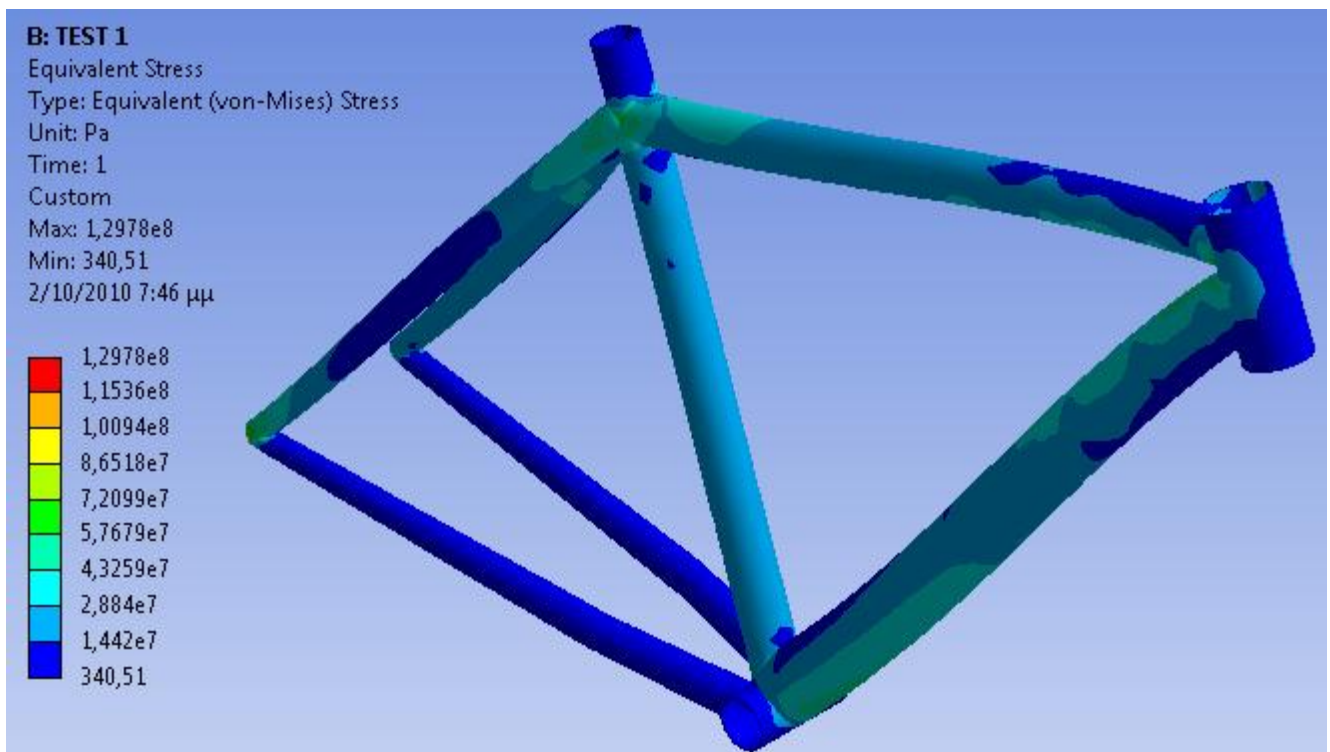
Σχήμα 4.27 Ρυθμίσεις της ανάλυσης του προβλήματος

Τέλος, επιλύουμε το πρόβλημα και παίρνουμε τα ζητούμενα γραφικά αποτελέσματα τα οποία μας ενδιαφέρουν. Παρακάτω παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα του πλαισίου πάχους 2 mm για το πρώτο τεστ, αλλά συγκεντρωτικά θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα στη παράγραφο 5.1.

- ✓ Πρώτον, η ισοδύναμη τάση της μήτρας κατά von-Mises σε MPa, όπως φαίνεται στα παρακάτω δύο σχήματα:

Details of "Equivalent (von-Mises) Stress"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
[-] Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
[-] Integration Point Results	
Display Option	Averaged

Σχήμα 4.28 Ορισμός ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises

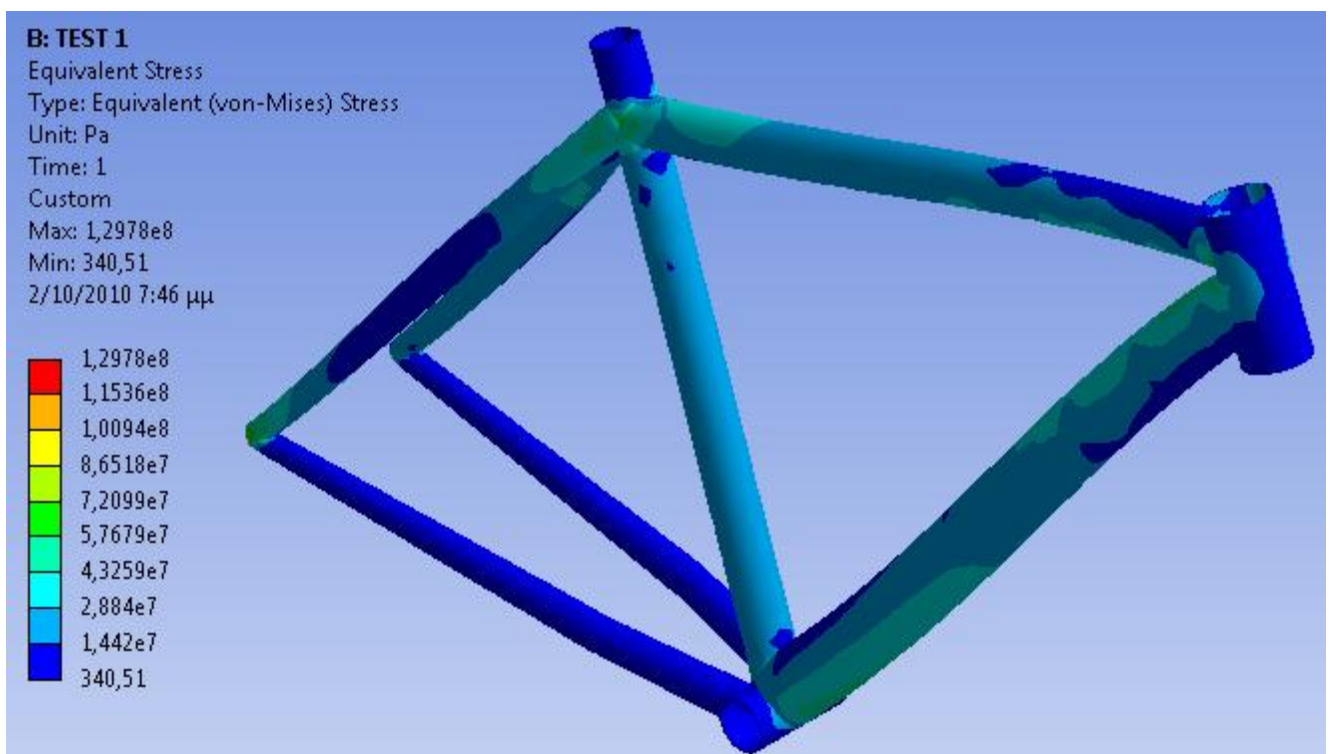


Σχήμα 4.29 Γραφική απεικόνιση ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises

- ✓ Δεύτερον, η ολική παραμόρφωση της μήτρας σε mm, όπως φαίνεται στα παρακάτω δύο σχήματα:

Details of "Total Deformation"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
[-] Definition	
Type	Total Deformation
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	

Σχήμα 4.30 Ορισμός ολικής παραμόρφωσης

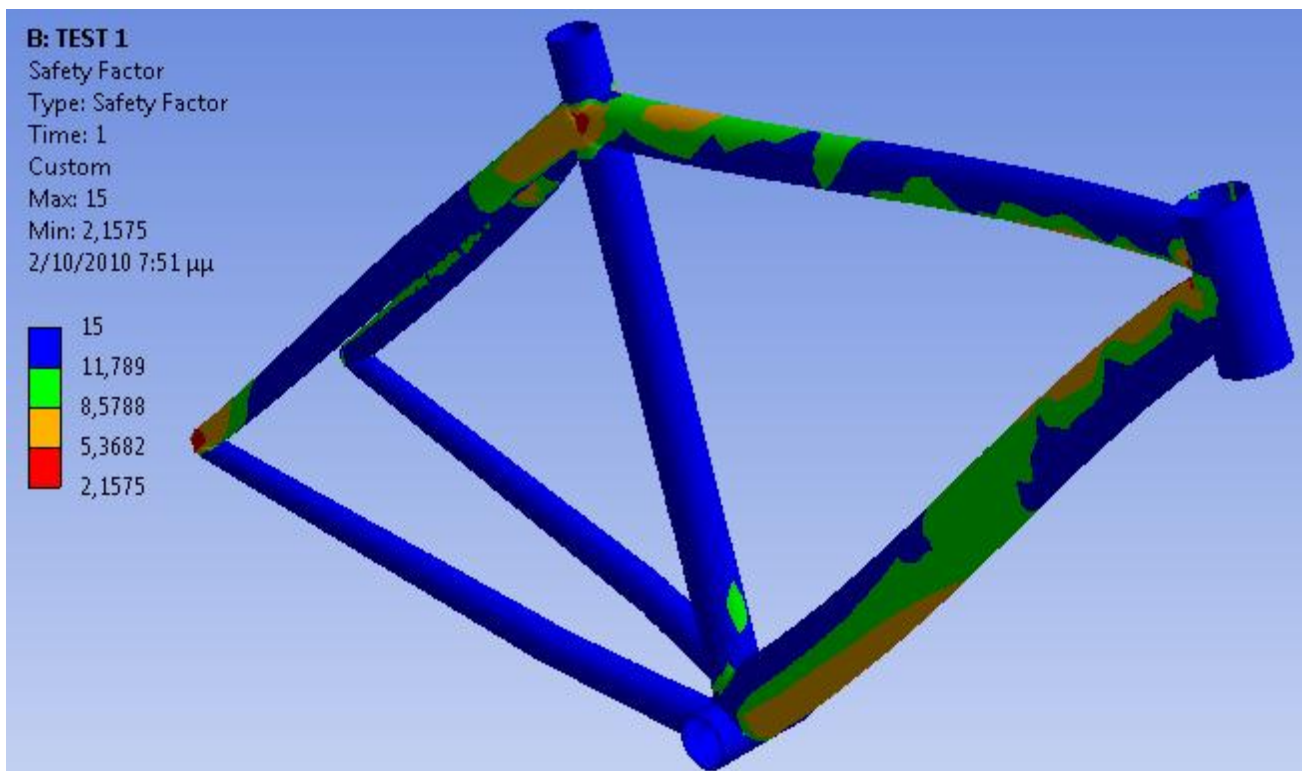


Σχήμα 4.31 Γραφική απεικόνιση ολικής παραμόρφωσης

- ✓ Τρίτον, ο συντελεστής ασφαλείας της μήτρας κατά von-Mises, όπως φαίνεται στα παρακάτω δύο σχήματα:

Details of "Safety Factor"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
[-] Definition	
Type	Safety Factor
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
[-] Integration Point Results	
Display Option	Averaged

Σχήμα 4.32 Ορισμός συντελεστή ασφαλείας κατά von-Mises



Σχήμα 4.33 Γραφική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας κατά von-Mises

Όπως παρατηρούμε το αλουμίνιο αντέχει στο τεστ που κάναμε αφού ο συντελεστής ασφαλείας είναι > 1 . Όλα τα υλικά και τα τεστ παρατίθενται στην παράγραφο 5.1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

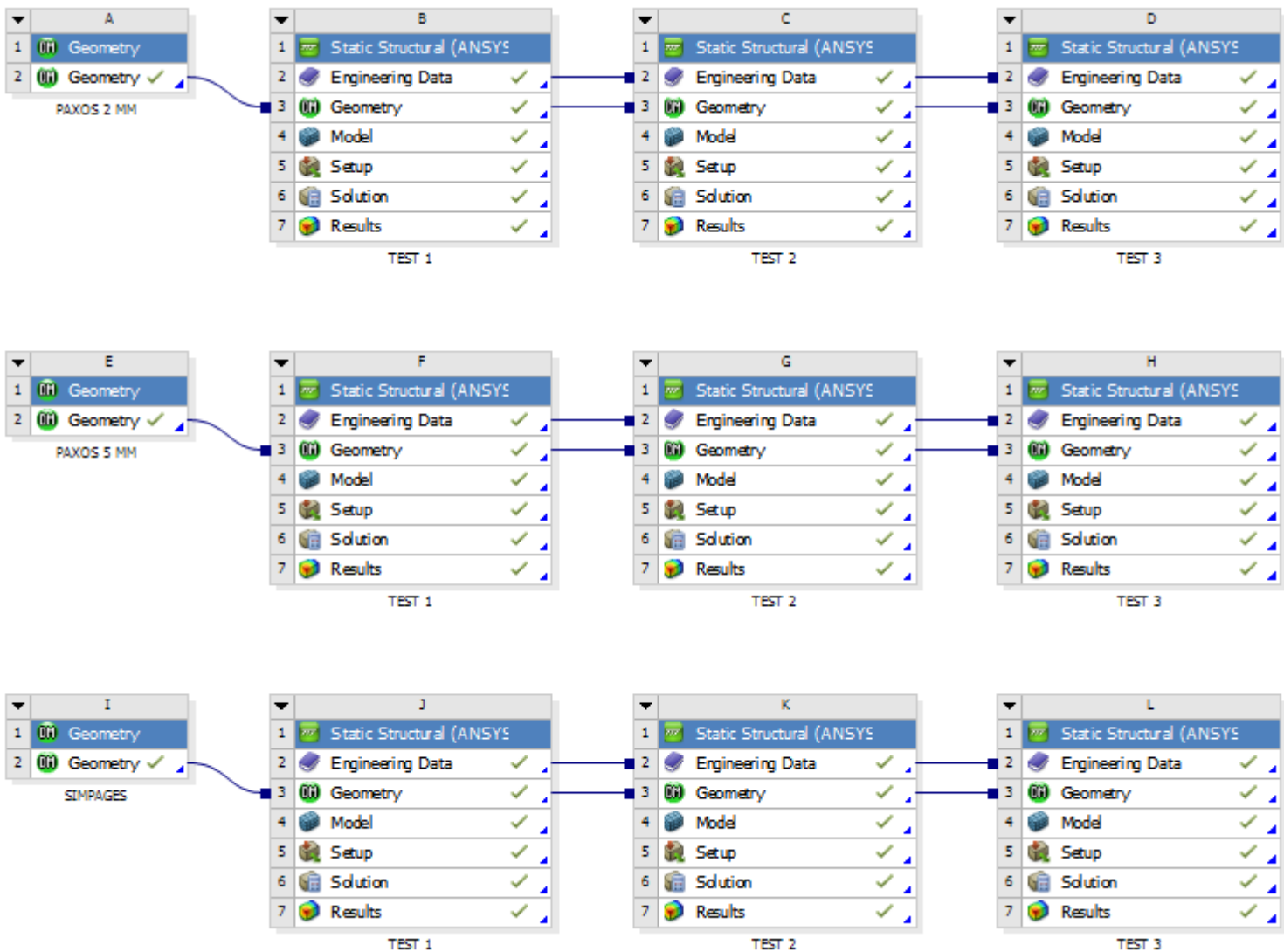
5.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αμέσως παρακάτω, συγκεντρώνουμε όλα τα μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις στατικές προσομοιώσεις στο **ANSYS Workbench** και στο παρακάτω πίνακα αναφέρουμε τις λειτουργίες του καθενός:

ΜΠΛΟΚ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
A	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΠΑΧΟΥΣ 2 MM
B	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 1 ^{ΟΥ} ΤΕΣΤ (2 MM)
C	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 2 ^{ΟΥ} ΤΕΣΤ (2 MM)
D	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 3 ^{ΟΥ} ΤΕΣΤ (2 MM)
E	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΠΑΧΟΥΣ 5 MM
F	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 1 ^{ΟΥ} ΤΕΣΤ (5 MM)
G	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 2 ^{ΟΥ} ΤΕΣΤ (5 MM)
H	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 3 ^{ΟΥ} ΤΕΣΤ (5 MM)
I	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ
J	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 1 ^{ΟΥ} ΤΕΣΤ (ΣΥΜΠΑΓΗΣ)
K	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 2 ^{ΟΥ} ΤΕΣΤ (ΣΥΜΠΑΓΗΣ)
L	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 3 ^{ΟΥ} ΤΕΣΤ (ΣΥΜΠΑΓΗΣ)

Πίνακας 5.1 Χαρακτηρισμός όλων των μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν στο ANSYS Workbench

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται όλη η ανάλυσή μας στο βασικό περιβάλλον του **ANSYS Workbench**:



Σχήμα 5.1 Συγκεντρωτική ανάλυση στο ANSYS Workbench

5.1.1 ΠΑΧΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ 2 ΜΜ

ΤΕΣΤ 1

ΥΛΙΚΟ	ΜΑΧ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΜΑΧ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (mm)	ΜΙΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	129,78	1,3528	2,1575
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	123,24	99,735	0,24343
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	123,24	20,699	0,35297
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	123,24	40,855	0,13145
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	127,36	51,845	0,25754
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	127,36	22,76	0,45932
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	127,36	12,836	0,25911
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	127,36	36,884	0,21042
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	127,36	42,417	0,23712
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	127,36	23,625	0,20886

Πίνακας 5.2 Μέγιστες τιμές τάσεων, παραμορφώσεων και συντελεστής ασφαλείας του πλαισίου πάχους 2 mm για το 1^ο τεστ

ΤΕΣΤ 2

ΥΛΙΚΟ	ΜΑΧ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΜΑΧ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (mm)	ΜΙΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	98,576	7,7802	2,8404
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	98,79	575,17	0,30368
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	98,787	119,38	0,44034
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	98,788	235,62	0,16399
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	98,658	298,36	0,33246
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	98,656	130,99	0,59297
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	98,657	73,872	0,33449
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	98,655	212,27	0,27165
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	98,656	244,11	0,30611
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	98,656	135,96	0,26962

Πίνακας 5.3 Μέγιστες τιμές τάσεων, παραμορφώσεων και συντελεστής ασφαλείας του πλαισίου πάχους 2 mm για το 2^ο τεστ

ΤΕΣΤ 3

ΥΛΙΚΟ	ΜΑΧ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΜΑΧ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (mm)	ΜΙΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	90,564	0,17589	3,0917
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	85,377	12,928	0,35138
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	85,427	2,6844	0,50921
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	85,404	5,2972	0,18969
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	88,412	6,7169	0,37099
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	88,442	2,9495	0,66145
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	88,428	1,6632	0,37318
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	88,447	4,78	0,303
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	88,437	5.4966	0,34149
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	88,44	3,0615	0,30077

Πίνακας 5.4 Μέγιστες τιμές τάσεων, παραμορφώσεων και συντελεστής ασφαλείας του πλαισίου πάχους 2 mm για το 3^ο τεστ

5.1.2 ΠΑΧΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ 5 MMΤΕΣΤ 1

ΥΛΙΚΟ	ΜΑΧ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΜΑΧ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (mm)	ΜΙΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	24,331	0,39204	11,508
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	22,908	29,015	1,3096
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	22,908	6,0206	1,8989
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	22,908	11,884	0,70718
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	23,82	15,063	1,377
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	23,82	6,612	2,4559
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	23,82	3,7292	1,3854
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	23,82	10,715	1,1251
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	23,82	12,323	1,2678
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	23,82	6,8632	1,1167

Πίνακας 5.5 Μέγιστες τιμές τάσεων, παραμορφώσεων και συντελεστής ασφαλείας του πλαισίου πάχους 5 mm για το 1^ο τεστ

ΤΕΣΤ 2

ΥΛΙΚΟ	ΜΑΧ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΜΑΧ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (mm)	ΜΙΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	43,81	3,8955	6,3912
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	42,478	287,9	0,70624
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	42,489	59,756	1,0238
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	42,484	119,94	0,38132
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	42,234	149,37	0,75867
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	43,24	65,576	1,3529
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	43,237	36,983	0,76323
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	43,241	106,27	0,61978
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	43,239	122,21	0,69844
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	43,24	68,067	0,61518

Πίνακας 5.6 Μέγιστες τιμές τάσεων, παραμορφώσεων και συντελεστής ασφαλείας του πλαισίου πάχους 5 mm για το 2^ο τεστ

ΤΕΣΤ 3

ΥΛΙΚΟ	ΜΑΧ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΜΑΧ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (mm)	ΜΙΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	17,63	0,092481	15
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	16,775	6,7871	1,7884
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	16,788	1,4096	2,5911
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	16,782	2,7813	0,96531
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	17,251	3,5233	1,9013
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	17,26	1,5474	3,3894
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	17,256	0,87253	1,9124
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	17,261	2,5078	1,5526
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	17,258	2,8836	1,7499
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	17,259	1,6061	1,5412

Πίνακας 5.7 Μέγιστες τιμές τάσεων, παραμορφώσεων και συντελεστής ασφαλείας του πλαισίου πάχους 5 mm για το 3^ο τεστ

5.1.3 ΣΥΜΠΑΓΕΣ ΠΛΑΙΣΙΟ

ΤΕΣΤ 1

ΥΛΙΚΟ	ΜΑΧ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΜΑΧ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (mm)	ΜΙΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	15,897	0,20413	15
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	21,775	15,93	1,3777
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	21,762	3,3041	1,9989
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	21,768	6,5234	0,7442
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	21,9	8,2732	1,4977
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	21,892	3,6306	2,6722
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	21,896	2,0479	1,5072
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	21,891	5,8832	1,2243
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	21,893	6,7667	1,3794
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	21,893	3,7687	1,215

Πίνακας 5.8 Μέγιστες τιμές τάσεων, παραμορφώσεων και συντελεστής ασφαλείας του συμπαγούς πλαισίου για το 1^ο τεστ

ΤΕΣΤ 2

ΥΛΙΚΟ	ΜΑΧ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΜΑΧ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (mm)	ΜΙΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	28,194	1,8432	9,9312
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	27,867	136,06	1,0766
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	27,887	28,24	1,5599
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	27,878	55,737	0,58111
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	27,974	70,645	1,1725
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	27,986	31,015	2,0903
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	27,98	17,491	1,1794
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	27,988	50,262	0,95755
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	27,984	57,801	1,0792
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	27,985	32,193	0,95051

Πίνακας 5.9 Μέγιστες τιμές τάσεων, παραμορφώσεων και συντελεστής ασφαλείας του συμπαγούς πλαισίου για το 2^ο τεστ

ΤΕΣΤ 3

ΥΛΙΚΟ	ΜΑΧ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΜΑΧ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (mm)	ΜΙΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061	10,248	0,060244	15
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)	9,6589	4,3993	3,1059
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)	9,673	0,91416	4,4971
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)	9,6665	1,8033	1,6759
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)	9,9575	2,2845	3,294
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLED)	9,966	1,0037	5,87
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (10% CARBON FIBER)	9,962	0,56584	3,3126
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)	9,9674	1,6267	2,6888
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)	9,9645	1,8702	3,0308
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)	9,9652	1,0417	2,6693

Πίνακας 5.10 Μέγιστες τιμές τάσεων, παραμορφώσεων και συντελεστής ασφαλείας του συμπαγούς πλαισίου για το 3^ο τεστ

Περαιτέρω ανάλυση των παραπάνω αποτελεσμάτων πραγματοποιείται στην επόμενη παράγραφο.

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αναλύοντας τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου, παρουσιάζουμε για κάθε υλικό που χρησιμοποιήσαμε την επιτυχία ή αποτυχία στα τεστ που πραγματοποιήθηκαν ενώ παράλληλα υπολογίζεται και το βάρος του πλαισίου, όπως φαίνεται αμέσως παρακάτω.

5.2.1 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✓	✓	✓	1,9823
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✓	✓	✓	4,2086
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✓	✓	✓	9,2043

Πίνακας 5.11 Αναλυτικά αποτελέσματα Αλουμινίου 6061

5.2.2 ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✗	✗	✗	0,70041
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✓	✗	✓	1,487
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✓	✓	✓	3,2522

Πίνακας 5.12 Αναλυτικά αποτελέσματα Πολυαιθυλενίου HDPE (Injection Molded)

5.2.3 ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✘	✘	✘	0,84431
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✔	✔	✔	1,7926
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✔	✔	✔	3,9204

Πίνακας 5.13 Αναλυτικά αποτελέσματα Πολυαιθυλενίου HDPE (20% Glass Fiber Filled)

5.2.4 ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✘	✘	✘	0,77823
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✘	✘	✘	1,6523
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✘	✘	✔	6,6136

Πίνακας 5.14 Αναλυτικά αποτελέσματα Πολυαιθυλενίου HDPE (Wood Filled)

5.2.5 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✘	✘	✘	0,68646
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✔	✘	✔	1,4574
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✔	✔	✔	3,1874

Πίνακας 5.15 Αναλυτικά αποτελέσματα Πολυπροπυλενίου (Molded)

5.2.6 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLER)

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✘	✘	✘	0,77089
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✔	✔	✔	1,6367
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✔	✔	✔	3,5795

Πίνακας 5.16 Αναλυτικά αποτελέσματα Πολυπροπυλενίου (20% Glass Fiber Filler)

5.2.7 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (CARBON FIBER 10%)

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✘	✘	✘	0,73198
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✔	✘	✔	1,5541
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✔	✔	✔	3,3988

Πίνακας 5.17 Αναλυτικά αποτελέσματα Πολυπροπυλενίου (Carbon Fiber 10%)

5.2.8 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✘	✘	✘	0,78557
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✔	✘	✔	1,6679
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✔	✘	✔	3,6476

Πίνακας 5.18 Αναλυτικά αποτελέσματα Πολυπροπυλενίου (30% Talc Filler)

5.2.9 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✘	✘	✘	0,75621
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✔	✘	✔	1,6055
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✔	✔	✔	3,5113

Πίνακας 5.19 Αναλυτικά αποτελέσματα Πολυπροπυλενίου (20% Mica Filler)

5.2.10 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)

ΠΛΑΙΣΙΟ	ΤΕΣΤ 1	ΤΕΣΤ 2	ΤΕΣΤ 3	ΒΑΡΟΣ (Kg)
ΠΑΧΟΣ 2 MM	✘	✘	✘	0,76355
ΠΑΧΟΣ 5 MM	✔	✘	✔	1,6211
ΣΥΜΠΑΓΕΣ	✔	✘	✔	3,5454

Πίνακας 5.20 Αναλυτικά αποτελέσματα Πολυπροπυλενίου (Wood Filled)

Συμπεράσματα πάνω στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο.

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμε ότι το αλουμίνιο αντέχει σε όλα τα τεστ αντοχής που πραγματοποιήσαμε, και μάλιστα με μεγάλο συντελεστή ασφαλείας. Όσων αφορά τα πολυμερή που χρησιμοποιήσαμε, κανένα από αυτά δεν πέρασε όλα τα τεστ του πλαισίου πάχους 2 mm.

Όμως, το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας με τις ίνες γυαλιού και το πολυπροπυλένιο με τις ίνες γυαλιού πέρασαν όλα τα τεστ του πλαισίου πάχους 5 mm, ενώ τα υπόλοιπα πολυμερή απέτυχαν. Βέβαια, τα δύο αυτά υλικά είναι πολύ ακριβότερα σε σχέση με τα απλά, χωρίς τις ίνες.

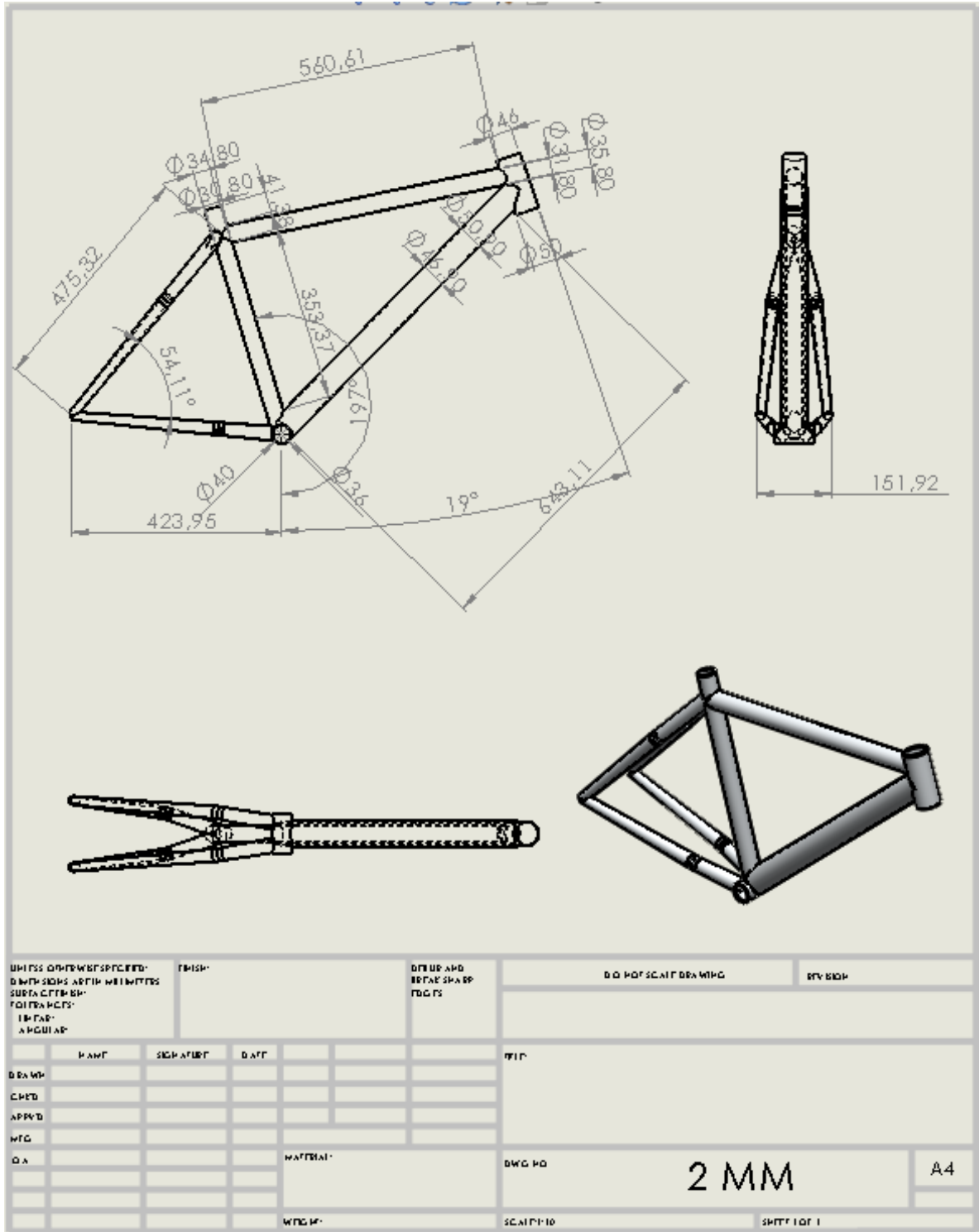
Τέλος, στο συμπαγές πλαίσιο αντέχουν όλα τα πολυμερή που χρησιμοποιήθηκαν αντέχουν, εκτός αυτών με τις ίνες ξύλου και talc.

Το βάρος του συμπαγούς πλαισίου με πολυαιθυλένιο και πολυπροπυλένιο χωρίς προσμίξεις είναν 3,25 Kg και 3,19 Kg αντίστοιχα, βάρη που δεν ξεπερνούν κατά πολύ το βάρος των 1,98 Kg του πλαισίου από αλουμίνιο πάχους 2 mm, ενώ παράλληλα έχουν πολύ μικρότερη κόστος υλικού και παραγωγής. Ο τρόπος κατασκευής τους γίνεται με χύτευση σε διαιρετό καλούπι.

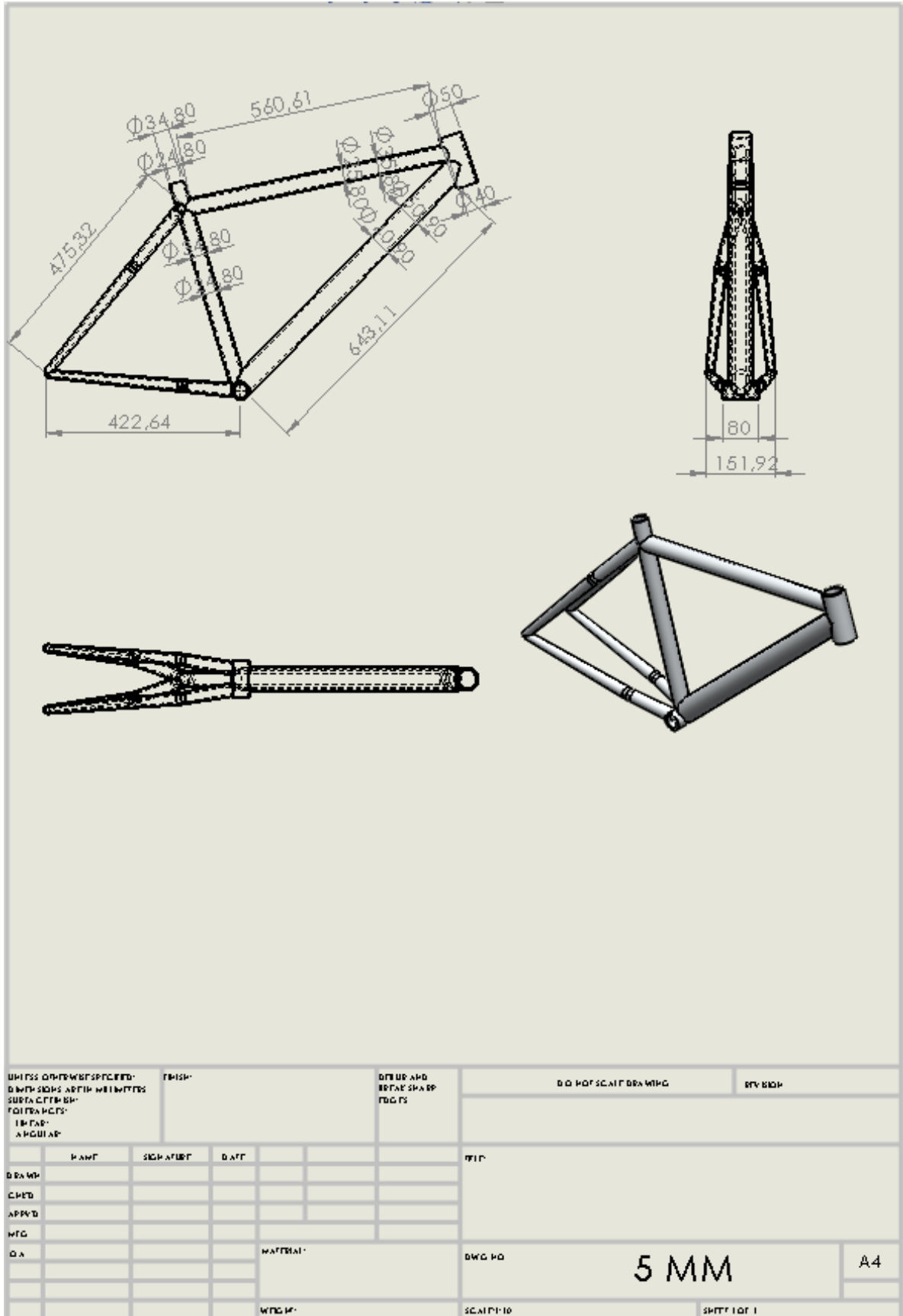
Από την άλλη, το βάρος του πλαισίου πάχους 5 mm με πολυαιθυλένιο και πολυπροπυλένιο με ίνες γυαλιού είναι 1,79 Kg και 1,65 Kg αντίστοιχα, τα οποία είναι μικρότερα του βάρους του πλαισίου των 2 mm από αλουμίνιο (1,98 Kg) και το κόστος τους είναι αισθητά μικρότερο. Υπάρχει πιθανότητα όμως να υπάρξει πρόβλημα στον τρόπο παρασκευής τους λόγω των προσμίξεων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

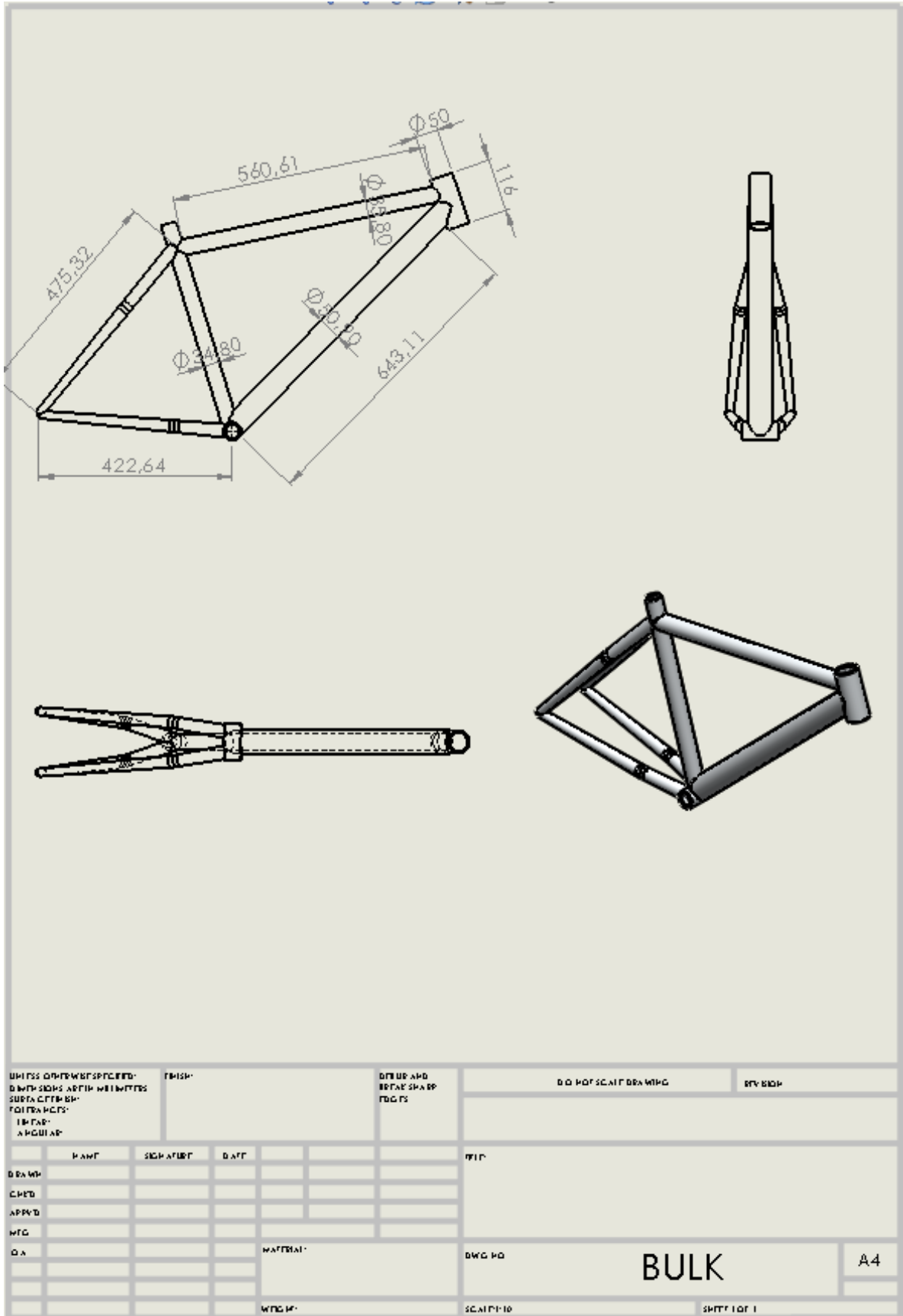
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ



Σχήμα Α.1 Κατασκευαστικό σχέδιο πλαισίου πάχους 2 mm



Σχήμα Α.2 Κατασκευαστικό σχέδιο πλαισίου πάχους 5 mm



Σχήμα A.3 Κατασκευαστικό σχέδιο συμπαγούς πλαισίου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

B1 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (ΣΕΙΡΑ 6000)**Overview of materials for 6000 Series Aluminum Alloy**Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [6000 Series Aluminum Alloy](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "6000 Series Aluminum Alloy". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

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

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

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.68 - 2.74 g/cc	0.0970 - 0.0990 lb/in ³	Average value: 2.70 g/cc Grade Count:135
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	25.0 - 130	25.0 - 130	Average value: 80.8 Grade Count:61
Hardness, Knoop	73.0 - 163	73.0 - 163	Average value: 119 Grade Count:42
Hardness, Rockwell A	35.5 - 49.5	35.5 - 49.5	Average value: 42.6 Grade Count:28
Hardness, Rockwell B	49.0 - 80.0	49.0 - 80.0	Average value: 64.9 Grade Count:30
Hardness, Vickers	65.0 - 149	65.0 - 149	Average value: 105 Grade Count:43
Tensile Strength, Ultimate	89.6 - 478 MPa	13000 - 69300 psi	Average value: 286 MPa Grade Count:76
Tensile Strength, Yield	40.0 - 455 MPa	5800 - 66000 psi	Average value: 241 MPa Grade Count:76
Elongation at Break	3.00 - 35.0 %	3.00 - 35.0 %	Average value: 14.4 % Grade Count:71
Modulus of Elasticity	67.0 - 71.0 GPa	9720 - 10300 ksi	Average value: 69.0 GPa Grade Count:58
Ultimate Bearing Strength	228 - 607 MPa	33100 - 88000 psi	Average value: 423 MPa Grade Count:3
Bearing Yield Strength	103 - 386 MPa	14900 - 56000 psi	Average value: 255 MPa Grade Count:3
Poissons Ratio	0.330	0.330	Average value: 0.330 Grade Count:49
Fatigue Strength	55.0 - 375 MPa	7980 - 54400 psi	Average value: 121 MPa Grade Count:30
Machinability	30.0 - 90.0 %	30.0 - 90.0 %	Average value: 60.5 % Grade Count:21
Shear Modulus	25.8 - 26.0 GPa	3740 - 3770 ksi	Average value: 26.0 GPa Grade Count:49
Shear Strength	60.0 - 269 MPa	8700 - 39000 psi	Average value: 168 MPa Grade Count:65
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00000280 - 0.00000500 ohm-cm	0.00000280 - 0.00000500 ohm-cm	Average value: 0.00000379 ohm-cm Grade Count:76
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	23.0 - 25.6 μm/m-°C	12.8 - 14.2 μin/in-°F	Average value: 24.5 μm/m-°C Grade Count:68
Specific Heat Capacity	0.887 - 0.900 J/g-°C	0.212 - 0.215 BTU/lb-°F	Average value: 0.893 J/g-°C Grade Count:49
Thermal Conductivity	142 - 226 W/m-K	985 - 1570 BTU-in/hr-ft ² -°F	Average value: 183 W/m-K Grade Count:70
Melting Point	554 - 655 °C	1030 - 1210 °F	Average value: 623 °C Grade Count:67
Solidus	554 - 621 °C	1030 - 1150 °F	Average value: 594 °C Grade Count:67
Liquidus	645 - 655 °C	1190 - 1210 °F	Average value: 651 °C Grade Count:67
Processing Properties	Metric	English	Comments
Annealing Temperature	349 - 546 °C	660 - 1020 °F	Average value: 411 °C Grade Count:39
Solution Temperature	504 - 566 °C	940 - 1050 °F	Average value: 525 °C Grade Count:63
Aging Temperature	149 - 204 °C	300 - 400 °F	Average value: 172 °C Grade Count:59
Hot-Working Temperature	260 - 510 °C	500 - 950 °F	Average value: 380 °C Grade Count:12

B2 ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (INJECTION MOLDED)**Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Injection Molded**




Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polyethylene](#); [HDPE](#); [High Density Polyethylene \(HDPE\)](#); [Injection Molded](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "High Density Polyethylene (HDPE), Injection Molded". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

Vendors: Bamberger Polymers sells this and a wide range of thermoplastic resins such as polyethylene, polypropylene, and polystyrene worldwide. www.BambergerPolymers.com or phone 800-888-8959.

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

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

Physical Properties	Metric	English	Comments
Bulk Density	0.529 - 0.625 g/cc	0.0191 - 0.0226 lb/in ³	Average value: 0.603 g/cc Grade Count:14
Density	0.918 - 1.05 g/cc	0.0332 - 0.0379 lb/in ³	Average value: 0.954 g/cc Grade Count:335
Apparent Bulk Density	0.526 - 0.610 g/cc	0.0190 - 0.0220 lb/in ³	Average value: 0.591 g/cc Grade Count:18
Water Absorption	0.000 - 0.0500 %	0.000 - 0.0500 %	Average value: 0.0152 % Grade Count:29
Molsture Absorption at Equilibrium	0.0100 - 0.0500 %	0.0100 - 0.0500 %	Average value: 0.0136 % Grade Count:11
Water Absorption at Saturation	0.0100 %	0.0100 %	Average value: 0.0100 % Grade Count:3
Particle Size	5.00 - 1200 µm	5.00 - 1200 µm	Average value: 614 µm Grade Count:4
Viscosity 	32000 - 200000 cP @Temperature: 190 - 190 °C	32000 - 200000 cP @Temperature: 374 - 374 °F	Average value: 89000 cP Grade Count:7
	32000 - 200000 cP @Shear Rate: 300 - 5000 1/s	32000 - 200000 cP @Shear Rate: 300 - 5000 1/s	Average value: 89000 cP Grade Count:7
Viscosity Measurement	280 - 460	280 - 460	Average value: 350 Grade Count:5
Environmental Stress Crack Resistance 	1.00 - 3000 hour 2.00 - 10.0 hour @Temperature: 50.0 - 50.0 °C	1.00 - 3000 hour 2.00 - 10.0 hour @Temperature: 122 - 122 °F	Average value: 256 hour Grade Count:85
	2.00 - 10.0 hour @Thickness: 1.90 - 2.00 mm	2.00 - 10.0 hour @Thickness: 0.0748 - 0.0787 in	Average value: 3.53 hour Grade Count:12
Oxidative Induction Time (OIT)	20.0 - 100 min	20.0 - 100 min	Average value: 47.5 min Grade Count:4
Linear Mold Shrinkage	0.0140 - 0.0260 cm/cm	0.0140 - 0.0260 in/in	Average value: 0.0188 cm/cm Grade Count:9
Melt Flow	0.0250 - 1610 g/10 min	0.0250 - 1610 g/10 min	Average value: 31.3 g/10 min Grade Count:312
Base Resin Melt Index	2.00 - 20.0 g/10 min	2.00 - 20.0 g/10 min	Average value: 7.00 g/10 min Grade Count:8
Spiral Flow	15.5 - 53.8 cm	6.10 - 21.2 in	Average value: 33.1 cm Grade Count:41
Collected Volatile Condensable Material	0.0500 - 1.00 %	0.0500 - 1.00 %	Average value: 0.472 % Grade Count:23
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell R	33.0 - 52.0	33.0 - 52.0	Average value: 46.3 Grade Count:4
Hardness, Shore D	55.0 - 76.0	55.0 - 76.0	Average value: 64.6 Grade Count:160
Ball Indentation Hardness	35.0 - 45.0 MPa	5080 - 6530 psi	Average value: 41.4 MPa Grade Count:9
Tensile Strength, Ultimate	10.0 - 43.0 MPa	1450 - 6240 psi	Average value: 22.4 MPa Grade Count:109
Film Tensile Strength at Yield, MD	21.0 - 35.0 MPa	3050 - 5080 psi	Average value: 28.9 MPa Grade Count:5
Film Tensile Strength at Yield, TD	23.0 - 37.5 MPa	3340 - 5440 psi	Average value: 31.1 MPa Grade Count:5
Film Elongation at Break, MD	595 - 900 %	595 - 900 %	Average value: 709 % Grade Count:5
Film Elongation at Break, TD	650 - 950 %	650 - 950 %	Average value: 860 % Grade Count:5
Tensile Strength, Yield	9.00 - 43.0 MPa	1310 - 6240 psi	Average value: 26.0 MPa Grade Count:275
Elongation at Break	3.20 - 2080 %	3.20 - 2080 %	Average value: 508 % Grade Count:242
Elongation at Yield	6.60 - 44.0 %	6.60 - 44.0 %	Average value: 10.3 % Grade Count:67
Modulus of Elasticity	0.180 - 1.57 GPa	26.1 - 228 ksi	Average value: 0.934 GPa Grade Count:53
Flexural Modulus	0.186 - 1.81 GPa	27.0 - 263 ksi	Average value: 1.07 GPa Grade Count:238
Flexural Yield Strength	13.8 - 40.7 MPa	2000 - 5900 psi	Average value: 26.9 MPa Grade Count:12
Compressive Yield Strength	4.00 - 31.7 MPa	580 - 4600 psi	Average value: 14.9 MPa Grade Count:11
Compressive Modulus	0.689 GPa	100 ksi	Average value: 0.689 GPa Grade Count:3
Secant Modulus	0.758 - 1.54 GPa	110 - 224 ksi	Average value: 1.10 GPa Grade Count:22
Izod Impact, Unnotched	2.45 - 5340 J/cm	4.59 - 10000 ft-lb/in	Average value: 2.45 J/cm Grade Count:3
Charpy Impact Unnotched	1.60 J/cm ² - NB	7.61 ft-lb/in ² - NB	Average value: 1.60 J/cm ² Grade Count:12
Charpy Impact, Notched 	0.200 - 11.0 J/cm ² @Temperature: -30.0 - -30.0 °C	0.952 - 52.4 ft-lb/in ² @Temperature: -22.0 - -22.0 °F	Average value: 2.79 J/cm ² Grade Count:33
	0.280 - 0.440 J/cm ²	1.33 - 2.09 ft-lb/in ²	Average value: 0.382 J/cm ² Grade Count:4
Tensile Impact Strength	34.0 - 349 kJ/m ²	16.2 - 166 ft-lb/in ²	Average value: 226 kJ/m ² Grade Count:22
Falling Dart Impact	31.2 - 176 J	23.0 - 130 ft-lb	Average value: 125 J Grade Count:3
Coefficient of Friction	0.200 - 0.300	0.200 - 0.300	Average value: 0.225 Grade Count:4
Tensile Creep Modulus, 1 hour	400 - 570 MPa	58000 - 82700 psi	Average value: 473 MPa Grade Count:3





Tensile Creep Modulus, 1000 hours	270 - 400 MPa	39200 - 58000 psi	Average value: 327 MPa Grade Count:3
Elmendorf Tear Strength, MD	0.600 - 1.60 g/micron	15.2 - 40.6 g/mil	Average value: 0.940 g/micron Grade Count:5
Elmendorf Tear Strength, TD	1.70 - 23.0 g/micron	43.2 - 584 g/mil	Average value: 10.5 g/micron Grade Count:5
Dart Drop	1.50 - 2.00 g/micron	38.1 - 50.8 g/mil	Average value: 1.67 g/micron Grade Count:4
Abrasion	85.0 - 350	85.0 - 350	Average value: 215 Grade Count:7
Film Tensile Strength at Break, MD	35.6 - 55.0 MPa	5160 - 7980 psi	Average value: 47.1 MPa Grade Count:5
Film Tensile Strength at Break, TD	26.0 - 50.0 MPa	4060 - 7250 psi	Average value: 42.2 MPa Grade Count:5
Tangent Modulus	1170 - 1280 MPa	170000 - 185000 psi	Average value: 1230 MPa Grade Count:5
Izod Impact, Notched	0.196 - 5340 J/cm	0.367 - 10000 ft-lb/in	Average value: 0.762 J/cm Grade Count:119
Izod Impact, Notched, Low Temp	2.56 - 5340 J/cm	4.80 - 10000 ft-lb/in	Average value: 3.52 J/cm Grade Count:13
Izod Impact, Notched (ISO)	11.0 - 80.1 kJ/m ²	5.23 - 38.1 ft-lb/in ²	Average value: 38.4 kJ/m ² Grade Count:11
Electrical Properties			
	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	1.00e+6 - 1.00e+17 ohm-cm	1.00e+6 - 1.00e+17 ohm-cm	Average value: 8.98e+15 ohm-cm Grade Count:25
Surface Resistance	100 - 1.00e+15 ohm	100 - 1.00e+15 ohm	Average value: 4.45e+14 ohm Grade Count:26
Dielectric Constant	1.00 - 5.00	1.00 - 5.00	Average value: 2.60 Grade Count:27
Dielectric Strength	18.7 - 150 kV/mm	475 - 3810 kV/in	Average value: 49.2 kV/mm Grade Count:26
Dissipation Factor	0.0000400 - 0.00100	0.0000400 - 0.00100	Average value: 0.000302 Grade Count:26
Comparative Tracking Index	600 V	600 V	Average value: 600 V Grade Count:19
Thermal Properties			
	Metric	English	Comments
CTE, linear	20.0 - 225 µm/m-°C	11.1 - 125 µin/in-°F	Average value: 139 µm/m-°C Grade Count:33
Thermal Conductivity	0.288 - 0.400 W/m-K	2.00 - 2.78 BTU-in/hr-ft ² -°F	Average value: 0.386 W/m-K Grade Count:8
Melting Point	110 - 136 °C	230 - 277 °F	Average value: 130 °C Grade Count:66
Crystallization Temperature	112 - 117 °C	234 - 243 °F	Average value: 115 °C Grade Count:26
Maximum Service Temperature, Air	70.0 - 120 °C	158 - 248 °F	Average value: 94.7 °C Grade Count:13
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	47.2 - 87.8 °C	117 - 190 °F	Average value: 72.0 °C Grade Count:94
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	37.6 - 80.0 °C	99.7 - 176 °F	Average value: 47.0 °C Grade Count:42
Vicat Softening Point	67.0 - 194 °C	153 - 381 °F	Average value: 121 °C Grade Count:191
Minimum Service Temperature, Air	-200 - -60.0 °C	-328 - -76.0 °F	Average value: -137 °C Grade Count:7
Brittleness Temperature	-180 - -51.1 °C	-292 - -60.0 °F	Average value: -77.5 °C Grade Count:113
Flammability, UL94	HB	HB	Grade Count:34
Oxygen Index	17.0 - 20.0 %	17.0 - 20.0 %	Average value: 18.9 % Grade Count:12
Optical Properties			
	Metric	English	Comments
Yellow Index	4.00 - 5.00 %	4.00 - 5.00 %	Average value: 4.06 % Grade Count:17
Processing Properties			
	Metric	English	Comments
Processing Temperature	82.2 - 280 °C	180 - 536 °F	Average value: 204 °C Grade Count:36
Rear Barrel Temperature	149 - 232 °C	300 - 450 °F	Average value: 223 °C Grade Count:17
Middle Barrel Temperature	154 - 243 °C	310 - 470 °F	Average value: 233 °C Grade Count:17
Front Barrel Temperature	160 - 246 °C	320 - 475 °F	Average value: 236 °C Grade Count:17
Nozzle Temperature	160 - 246 °C	320 - 475 °F	Average value: 237 °C Grade Count:17
Mold Temperature	15.6 - 65.6 °C	60.0 - 150 °F	Average value: 30.1 °C Grade Count:5
Drying Temperature	37.8 - 80.0 °C	100 - 176 °F	Average value: 53.9 °C Grade Count:3
Dry Time	1.00 - 3.00 hour	1.00 - 3.00 hour	Average value: 2.00 hour Grade Count:3
Injection Pressure	2.76 - 103 MPa	400 - 15000 psi	Average value: 33.1 MPa Grade Count:3

B3 ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (20% GLASS FIBER FILLED)**Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Glass fiber Filled**

Categories: [Polymer](#), [Thermoplastic](#), [Polyethylene](#), [HDPE](#), [High Density Polyethylene \(HDPE\)](#), [Glass fiber Filled](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "High Density Polyethylene (HDPE), Glass fiber Filled". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.00 - 1.50 g/cc	0.0361 - 0.0542 lb/in ³	Average value: 1.15 g/cc Grade Count:35
Filler Content	10.0 - 50.0 %	10.0 - 50.0 %	Average value: 25.7 % Grade Count:14
Water Absorption	0.0100 - 0.0500 %	0.0100 - 0.0500 %	Average value: 0.0200 % Grade Count:18
Linear Mold Shrinkage	0.00100 - 0.0220 cm/cm	0.00100 - 0.0220 in/in	Average value: 0.00643 cm/cm Grade Count:29
Linear Mold Shrinkage, 6.35 mm section	0.00300 - 0.0350 cm/cm	0.00300 - 0.0350 in/in	Average value: 0.0107 cm/cm Grade Count:14
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.00800 - 0.00900 cm/cm	0.00800 - 0.00900 in/in	Average value: 0.00833 cm/cm Grade Count:3
Melt Flow	0.200 - 10.0 g/10 min	0.200 - 10.0 g/10 min	Average value: 4.02 g/10 min Grade Count:9
Ash	10.0 - 40.0 %	10.0 - 40.0 %	Average value: 24.0 % Grade Count:5
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell R	50.0 - 85.0	50.0 - 85.0	Average value: 65.7 Grade Count:18
Tensile Strength, Ultimate	11.0 - 113 MPa	1600 - 16400 psi	Average value: 45.1 MPa Grade Count:29
 Tensile Strength, Ultimate	9.00 - 161.337 MPa @Temperature -40.0 - 120 °C	1310 - 23400.0 psi @Temperature -40.0 - 248 °F	Average value: 55.1 MPa Grade Count:2
Tensile Strength, Yield	30.0 - 51.0 MPa	4350 - 7400 psi	Average value: 39.8 MPa Grade Count:10
Elongation at Break	1.38 - 165 %	1.38 - 165 %	Average value: 12.0 % Grade Count:28
Elongation at Yield	2.00 - 3.00 %	2.00 - 3.00 %	Average value: 2.75 % Grade Count:4
Modulus of Elasticity	1.17 - 13.6 GPa	170 - 1970 ksi	Average value: 4.50 GPa Grade Count:27
 Modulus of Elasticity	7.17055 - 15.2374 GPa @Temperature -40.0 - 93.3 °C	1040.02 - 2210.03 ksi @Temperature -40.0 - 200 °F	Average value: 11.2 GPa Grade Count:1
Flexural Modulus	0.965 - 11.7 GPa	140 - 1700 ksi	Average value: 3.59 GPa Grade Count:35
 Flexural Modulus	1.40 - 14.0653 GPa @Temperature -40.0 - 120 °C	203 - 2040.03 ksi @Temperature -40.0 - 248 °F	Average value: 5.42 GPa Grade Count:2
Flexural Yield Strength	17.2 - 186 MPa	2500 - 27000 psi	Average value: 65.2 MPa Grade Count:29
 Flexural Yield Strength	61.3633 - 215.116 MPa @Temperature -40.0 - 93.3 °C	8900.02 - 31200.1 psi @Temperature -40.0 - 200 °F	Average value: 138 MPa Grade Count:1
Compressive Yield Strength	18.6 - 55.2 MPa	2700 - 8000 psi	Average value: 32.2 MPa Grade Count:6
Izod Impact, Unnotched	2.67 - 13.3 J/cm	5.00 - 25.0 ft-lb/in	Average value: 6.12 J/cm Grade Count:22
Charpy Impact Unnotched	1.70 - 2.00 J/cm ²	8.09 - 9.52 ft-lb/in ²	Average value: 1.83 J/cm ² Grade Count:3
Izod Impact, Notched	0.267 - 3.74 J/cm	0.500 - 7.00 ft-lb/in	Average value: 1.04 J/cm Grade Count:35
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	1000 - 1.00e+16 ohm-cm	1000 - 1.00e+16 ohm-cm	Average value: 9.33e+15 ohm-cm Grade Count:15
Dielectric Constant	2.30 - 2.80	2.30 - 2.80	Average value: 2.65 Grade Count:6
Dielectric Strength	19.7 - 23.0 kV/mm	500 - 584 kV/in	Average value: 20.6 kV/mm Grade Count:9
Dissipation Factor	0.00400 - 0.00800	0.00400 - 0.00800	Average value: 0.00667 Grade Count:6
Arc Resistance	140 - 180 sec	140 - 180 sec	Average value: 147 sec Grade Count:6
Comparative Tracking Index	600 V	600 V	Average value: 600 V Grade Count:3
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	45.0 - 119 µm/m-°C	25.0 - 66.0 µin/in-°F	Average value: 75.6 µm/m-°C Grade Count:8
Thermal Conductivity	0.288 - 0.389 W/m-K	2.00 - 2.70 BTU-in/hr-ft ² -°F	Average value: 0.325 W/m-K Grade Count:6
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	72.8 - 132 °C	163 - 270 °F	Average value: 119 °C Grade Count:24
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	51.7 - 121 °C	125 - 250 °F	Average value: 105 °C Grade Count:27
Vicat Softening Point	85.0 - 92.0 °C	185 - 198 °F	Average value: 88.3 °C Grade Count:3
Flammability, UL94	HB	HB	Grade Count:24
Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	177 - 249 °C	350 - 480 °F	Average value: 205 °C Grade Count:25
Mold Temperature	21.1 - 65.6 °C	70.0 - 150 °F	Average value: 44.1 °C Grade Count:25
Drying Temperature	80.0 °C	176 °F	Average value: 80.0 °C Grade Count:3
Dry Time	2.00 - 3.00 hour	2.00 - 3.00 hour	Average value: 2.50 hour Grade Count:3
Injection Pressure	4.96 - 124 MPa	720 - 18000 psi	Average value: 80.4 MPa Grade Count:22

B4 ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ HDPE (WOOD FILLED)**Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Wood Filled**

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polyethylene](#); [HDPE](#); [High Density Polyethylene \(HDPE\)](#); [Wood Filled](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "High Density Polyethylene (HDPE), Wood Filled". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.994 - 1.16 g/cc	0.0359 - 0.0418 lb/in ³	Average value: 1.06 g/cc Grade Count:5
Linear Mold Shrinkage	0.00560 - 0.0140 cm/cm	0.00560 - 0.0140 in/in	Average value: 0.00908 cm/cm Grade Count:5
Melt Flow	0.700 - 2.60 g/10 min	0.700 - 2.60 g/10 min	Average value: 1.82 g/10 min Grade Count:5
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	15.0 - 16.0 MPa	2180 - 2320 psi	Average value: 15.3 MPa Grade Count:3
Tensile Strength, Yield	15.0 - 18.0 MPa	2180 - 2610 psi	Average value: 16.2 MPa Grade Count:5
Elongation at Break	1.30 - 15.0 %	1.30 - 15.0 %	Average value: 7.98 % Grade Count:5
Modulus of Elasticity	1.70 - 4.40 GPa	247 - 638 ksi	Average value: 2.88 GPa Grade Count:5
Flexural Modulus	1.20 - 4.10 GPa	174 - 595 ksi	Average value: 2.24 GPa Grade Count:5
Flexural Yield Strength	30.0 - 43.0 MPa	4350 - 6240 psi	Average value: 35.4 MPa Grade Count:5
Izod Impact, Unnotched	0.270 - 2.40 J/cm	0.506 - 4.50 ft-lb/in	Average value: 1.11 J/cm Grade Count:5
Izod Impact, Notched	0.160 - 0.430 J/cm	0.300 - 0.806 ft-lb/in	Average value: 0.280 J/cm Grade Count:5
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	36.0 - 99.0 µm/m-°C	20.0 - 55.0 µm/in-°F	Average value: 64.3 µm/m-°C Grade Count:3
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	43.0 - 62.0 °C	109 - 144 °F	Average value: 50.4 °C Grade Count:5
Flammability, UL94	HB	HB	Grade Count:3
Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	200 °C	392 °F	Average value: 200 °C Grade Count:5








B5 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (MOLDED)**Overview of materials for Polypropylene, Molded**

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polypropylene](#); [Polypropylene, Molded](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Polypropylene, Molded". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

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

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

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.886 - 1.70 g/cc	0.0320 - 0.0614 lb/in ³	Average value: 0.935 g/cc Grade Count:643
Filler Content	20.0 - 70.0 %	20.0 - 70.0 %	Average value: 36.7 % Grade Count:3
Water Absorption	0.000 - 1.00 %	0.000 - 1.00 %	Average value: 0.0709 % Grade Count:122
Moisture Absorption at Equilibrium	0.100 %	0.100 %	Average value: 0.100 % Grade Count:58
Water Absorption at Saturation	0.0100 %	0.0100 %	Average value: 0.0100 % Grade Count:6
Particle Size	5.00 - 2500 µm	5.00 - 2500 µm	Average value: 741 µm Grade Count:11
Viscosity Measurement	80.0 - 500000	80.0 - 500000	Average value: 171000 Grade Count:3
	@Temperature: 180 - 180 °C	@Temperature: 356 - 356 °F	
Linear Mold Shrinkage	0.000 - 0.0250 cm/cm	0.000 - 0.0250 in/in	Average value: 0.0126 cm/cm Grade Count:178
Linear Mold Shrinkage, 6.35 mm section	0.0250 cm/cm	0.0250 in/in	Average value: 0.0250 cm/cm Grade Count:5
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.0100 - 0.0155 cm/cm	0.0100 - 0.0155 in/in	Average value: 0.0134 cm/cm Grade Count:5
Melt Flow	0.200 - 2000 g/10 min	0.200 - 2000 g/10 min	Average value: 26.8 g/10 min Grade Count:739
Base Resin Melt Index	0.500 - 50.0 g/10 min	0.500 - 50.0 g/10 min	Average value: 15.1 g/10 min Grade Count:17
Ash	0.00800 - 26.0 %	0.00800 - 26.0 %	Average value: 1.16 % Grade Count:23
Collected Volatile Condensable Material	0.0500 - 3.00 %	0.0500 - 3.00 %	Average value: 0.391 % Grade Count:29
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell R	20.0 - 117	20.0 - 117	Average value: 97.2 Grade Count:373
Hardness, Shore D	47.0 - 83.0	47.0 - 83.0	Average value: 70.6 Grade Count:61
Ball Indentation Hardness	62.0 - 106 MPa	8990 - 15400 psi	Average value: 85.5 MPa Grade Count:15
Tensile Strength, Ultimate	9.00 - 80.0 MPa	1310 - 11600 psi	Average value: 33.0 MPa Grade Count:137
	10.0 - 23.0 MPa	1450 - 3340 psi	Average value: 16.0 MPa Grade Count:1
	@Temperature: 60.0 - 120 °C	@Temperature: 140 - 248 °F	
Film Elongation at Break, MD	93.0 - 530 %	93.0 - 530 %	Average value: 258 % Grade Count:3
Tenacity	0.203 - 0.441 N/tex	2.30 - 5.00 g/denier	Average value: 0.308 N/tex Grade Count:8
Tensile Strength, Yield	12.0 - 369 MPa	1740 - 53500 psi	Average value: 32.8 MPa Grade Count:682
Elongation at Break	3.00 - 900 %	3.00 - 900 %	Average value: 149 % Grade Count:275
Elongation at Yield	3.50 - 35.0 %	3.50 - 35.0 %	Average value: 9.42 % Grade Count:485
Modulus of Elasticity	0.00800 - 8.25 GPa	1.16 - 1200 ksi	Average value: 1.80 GPa Grade Count:180
Flexural Modulus	0.0260 - 6.89 GPa	3.77 - 999 ksi	Average value: 1.46 GPa Grade Count:633
	0.350 - 0.680 GPa	50.8 - 98.6 ksi	Average value: 0.493 GPa Grade Count:1
	@Temperature: 60.0 - 120 °C	@Temperature: 140 - 248 °F	
Flexural Yield Strength	20.0 - 180 MPa	2900 - 26100 psi	Average value: 49.0 MPa Grade Count:51
Compressive Yield Strength	34.5 - 55.2 MPa	5000 - 8000 psi	Average value: 39.3 MPa Grade Count:9
Compressive Modulus	1.38 GPa	200 ksi	Average value: 1.38 GPa Grade Count:6
Shear Modulus	0.680 - 0.920 GPa	98.6 - 133 ksi	Average value: 0.757 GPa Grade Count:10
Secant Modulus	1.03 - 1.28 GPa	150 - 185 ksi	Average value: 1.20 GPa Grade Count:4
Izod Impact, Unnotched	0.196 J/cm - NB	0.367 ft-lb/in - NB	Average value: 8.34 J/cm Grade Count:56
Izod Impact, Unnotched Low Temp	2.14 - 5340 J/cm	4.00 - 10000 ft-lb/in	Average value: 10.9 J/cm Grade Count:12
Izod Impact, Notched, Low Temp (ISO)	1.10 - 5.20 kJ/m ²	0.523 - 2.47 ft-lb/in ²	Average value: 2.00 kJ/m ² Grade Count:8
Charpy Impact Unnotched	0.300 J/cm ² - NB	1.43 ft-lb/in ² - NB	Average value: 8.05 J/cm ² Grade Count:103
	0.700 J/cm ² - NB	3.33 ft-lb/in ² - NB	Average value: 4.08 J/cm ² Grade Count:90
	@Temperature: -40.0 - -20.0 °C	@Temperature: -40.0 - -4.00 °F	
Charpy Impact, Notched	0.200 - 9.50 J/cm ²	0.952 - 45.2 ft-lb/in ²	Average value: 1.26 J/cm ² Grade Count:80
	0.130 - 1.70 J/cm ²	0.619 - 8.09 ft-lb/in ²	Average value: 0.323 J/cm ² Grade Count:71
	@Temperature: -30.0 - 0.000 °C	@Temperature: -22.0 - 32.0 °F	
Gardner Impact	0.904 - 40.7 J	0.667 - 30.0 ft-lb	Average value: 10.3 J Grade Count:59
	1.99983 - 36.1552 J	1.47500 - 26.6667 ft-lb	Average value: 20.2 J Grade Count:27
	@Temperature: -30.0 - -18.0 °C	@Temperature: -22.0 - -0.400 °F	
	15.0225 - 23.9528 J	11.0800 - 17.6667 ft-lb	Average value: 20.2 J Grade Count:8
	@Temperature: -30.0 - -30.0 °C	@Temperature: -22.0 - -22.0 °F	
	15.0225 - 23.9528 J	11.0800 - 17.6667 ft-lb	Average value: 20.2 J Grade Count:8
	@Thickness: 3.17 - 3.20 mm	@Thickness: 0.125 - 0.126 in	
Falling Dart Impact	4.98 - 28.0 J	3.67 - 20.7 ft-lb	Average value: 10.8 J Grade Count:5
Coefficient of Friction	0.250	0.250	Average value: 0.250 Grade Count:6

Tensile Creep Modulus, 1 hour	550 - 700 MPa	79800 - 102000 psi	Average value: 657 MPa Grade Count:7
Tensile Creep Modulus, 1000 hours	220 - 440 MPa	31900 - 63800 psi	Average value: 349 MPa Grade Count:7
Tear Strength	20.2 - 226 kN/m	115 - 1290 pli	Average value: 115 kN/m Grade Count:8
Compression Set	16.0 - 65.0 %	16.0 - 65.0 %	Average value: 31.0 % Grade Count:5
Film Tensile Strength at Break, MD	3.10 - 152 MPa	450 - 22000 psi	Average value: 70.1 MPa Grade Count:3
Tangent Modulus	1290 - 3260 MPa	187000 - 472000 psi	Average value: 1910 MPa Grade Count:8
Izod Impact, Notched	0.0400 J/cm - NB	0.0749 ft-lb/in - NB	Average value: 0.777 J/cm Grade Count:602
	0.267 - 0.267 J/cm @Temperature -20.0 - -20.0 °C	0.500 - 0.500 ft-lb/in @Temperature -4.00 - -4.00 °F	Average value: 0.267 J/cm Grade Count:1
Izod Impact, Notched, Low Temp	0.100 - 0.908 J/cm	0.187 - 1.70 ft-lb/in	Average value: 0.445 J/cm Grade Count:27
	1.00 - 1.35 J/cm @Temperature -20.0 - -20.0 °C	1.87 - 2.53 ft-lb/in @Temperature -4.00 - -4.00 °F	Average value: 1.17 J/cm Grade Count:2
	1.00 - 1.35 J/cm @Diameter 3.17 - 3.17 mm	1.87 - 2.53 ft-lb/in @Diameter 0.125 - 0.125 in	Average value: 1.17 J/cm Grade Count:2
Izod Impact, Notched (ISO)	2.00 - 21.0 kJ/m ²	0.952 - 9.99 ft-lb/in ²	Average value: 4.73 kJ/m ² Grade Count:17
Electrical Properties			
	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	1000 - 1.00e+18 ohm-cm	1000 - 1.00e+18 ohm-cm	Average value: 1.51e+17 ohm-cm Grade Count:85
Surface Resistance	100 - 1.00e+15 ohm	100 - 1.00e+15 ohm	Average value: 1.44e+14 ohm Grade Count:73
Static Decay	0.0100 - 2.00 sec	0.0100 - 2.00 sec	Average value: 0.372 sec Grade Count:5
Dielectric Constant	2.20 - 2.38	2.20 - 2.38	Average value: 2.30 Grade Count:64
Dielectric Strength	23.6 - 140 kV/mm	600 - 3560 kV/in	Average value: 127 kV/mm Grade Count:65
Dissipation Factor	0.0000700 - 0.00300	0.0000700 - 0.00300	Average value: 0.000410 Grade Count:61
Arc Resistance	88.0 - 136 sec	88.0 - 136 sec	Average value: 104 sec Grade Count:3
Comparative Tracking Index	600 V	600 V	Average value: 600 V Grade Count:60
Thermal Properties			
	Metric	English	Comments
CTE, linear	18.0 - 185 µm/m-°C	10.0 - 103 µin/in-°F	Average value: 114 µm/m-°C Grade Count:109
Melting Point	61.0 - 180 °C	142 - 356 °F	Average value: 159 °C Grade Count:129
Crystallization Temperature	110 - 115 °C	230 - 239 °F	Average value: 111 °C Grade Count:5
Maximum Service Temperature, Air	65.0 - 125 °C	149 - 257 °F	Average value: 78.4 °C Grade Count:27
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	13.0 - 238 °C	55.4 - 460 °F	Average value: 102 °C Grade Count:592
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	37.0 - 149 °C	98.6 - 300 °F	Average value: 64.4 °C Grade Count:207
Vicat Softening Point	35.0 - 158 °C	95.0 - 316 °F	Average value: 118 °C Grade Count:212
UL RTI, Electrical	65.0 - 221 °C	149 - 430 °F	Average value: 140 °C Grade Count:6
UL RTI, Mechanical with Impact	65.0 - 221 °C	149 - 430 °F	Average value: 140 °C Grade Count:6
UL RTI, Mechanical without Impact	65.0 - 221 °C	149 - 430 °F	Average value: 140 °C Grade Count:6
Flammability, UL94	HB - V-0	HB - V-0	Grade Count:71
Oxygen Index	24.0 - 30.0 %	24.0 - 30.0 %	Average value: 26.3 % Grade Count:6
Shrinkage	1.50 - 2.00 %	1.50 - 2.00 %	Average value: 1.59 % Grade Count:7
Optical Properties			
	Metric	English	Comments
Haze	0.200 - 91.0 %	0.200 - 91.0 %	Average value: 33.9 % Grade Count:43
Gloss	51.0 - 160 %	51.0 - 160 %	Average value: 87.7 % Grade Count:10
Yellow Index	0.000300 - 2.44 %	0.000300 - 2.44 %	Average value: 0.426 % Grade Count:10
Processing Properties			
	Metric	English	Comments
Processing Temperature	67.8 - 320 °C	190 - 608 °F	Average value: 206 °C Grade Count:91
Rear Barrel Temperature	177 - 274 °C	350 - 525 °F	Average value: 211 °C Grade Count:18
Middle Barrel Temperature	191 - 274 °C	375 - 525 °F	Average value: 217 °C Grade Count:22
Front Barrel Temperature	199 - 274 °C	390 - 525 °F	Average value: 227 °C Grade Count:18
Nozzle Temperature	204 - 243 °C	400 - 470 °F	Average value: 225 °C Grade Count:17
Mold Temperature	5.00 - 80.0 °C	41.0 - 176 °F	Average value: 43.2 °C Grade Count:54
Ejection Temperature	26.7 - 54.4 °C	80.0 - 130 °F	Average value: 40.6 °C Grade Count:4
Drying Temperature	65.6 - 100 °C	150 - 212 °F	Average value: 78.6 °C Grade Count:19
Dry Time	1.00 - 4.00 hour	1.00 - 4.00 hour	Average value: 2.48 hour Grade Count:25
Molsture Content	0.0500 - 1.00 %	0.0500 - 1.00 %	Average value: 0.620 % Grade Count:15
Injection Pressure	2.76 - 103 MPa	400 - 15000 psi	Average value: 56.9 MPa Grade Count:27
Hold Pressure	2.07 - 8.27 MPa	300 - 1200 psi	Average value: 5.17 MPa Grade Count:6
Back Pressure	0.172 - 1.03 MPa	24.9 - 150 psi	Average value: 0.603 MPa Grade Count:10






B6 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% GLASS FIBER FILLER)**Overview of materials for Polypropylene with 20% Glass Fiber Filler**

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polypropylene](#); [Polypropylene with 20% Glass Fiber Filler](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Polypropylene with 20% Glass Fiber Filler". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

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

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

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.910 - 1.46 g/cc	0.0329 - 0.0527 lb/in ³	Average value: 1.05 g/cc Grade Count:162
Filler Content	15.0 - 23.0 %	15.0 - 23.0 %	Average value: 19.0 % Grade Count:84
Water Absorption	0.0100 - 0.0500 %	0.0100 - 0.0500 %	Average value: 0.0197 % Grade Count:31
Linear Mold Shrinkage	0.00100 - 0.0320 cm/cm	0.00100 - 0.0320 in/in	Average value: 0.00447 cm/cm Grade Count:142
Linear Mold Shrinkage, 6.35 mm section	0.00400 - 0.00700 cm/cm	0.00400 - 0.00700 in/in	Average value: 0.00533 cm/cm Grade Count:15
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.00510 - 0.0200 cm/cm	0.00510 - 0.0200 in/in	Average value: 0.0107 cm/cm Grade Count:7
Melt Flow	2.00 - 34.0 g/10 min	2.00 - 34.0 g/10 min	Average value: 7.66 g/10 min Grade Count:111
Ash	13.0 - 23.0 %	13.0 - 23.0 %	Average value: 19.4 % Grade Count:10
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell M	49.0 - 105	49.0 - 105	Average value: 64.2 Grade Count:6
Hardness, Rockwell R	76.0 - 115	76.0 - 115	Average value: 95.3 Grade Count:53
Hardness, Shore D	70.0 - 75.0	70.0 - 75.0	Average value: 73.6 Grade Count:25
Tensile Strength, Ultimate	24.0 - 88.3 MPa	3480 - 12800 psi	Average value: 54.2 MPa Grade Count:90
 Tensile Strength, Yield	9.00 - 21.0 MPa @Temperature 60.0 - 120 °C	1310 - 3050 psi @Temperature 140 - 248 °F	Average value: 14.7 MPa Grade Count:1
Tensile Strength, Yield	27.0 - 86.2 MPa	3920 - 12500 psi	Average value: 58.5 MPa Grade Count:76
Elongation at Break	1.00 - 75.0 %	1.00 - 75.0 %	Average value: 6.13 % Grade Count:103
Elongation at Yield	2.00 - 11.0 %	2.00 - 11.0 %	Average value: 4.15 % Grade Count:33
Modulus of Elasticity	1.03 - 6.55 GPa	149 - 950 ksi	Average value: 4.10 GPa Grade Count:60
Flexural Modulus	1.28 - 5.52 GPa	186 - 800 ksi	Average value: 3.37 GPa Grade Count:162
 Flexural Modulus	0.800 - 2.25 GPa @Temperature 60.0 - 120 °C	116 - 326 ksi @Temperature 140 - 248 °F	Average value: 1.53 GPa Grade Count:1
Flexural Yield Strength	40.0 - 130 MPa	5800 - 18900 psi	Average value: 79.4 MPa Grade Count:113
Compressive Yield Strength	48.3 - 170 MPa	7000 - 24700 psi	Average value: 68.9 MPa Grade Count:8
Izod Impact, Unnotched	0.550 - 6.94 J/cm	1.03 - 13.0 ft-lb/in	Average value: 4.25 J/cm Grade Count:67
Charpy Impact Unnotched	2.80 - 5.00 J/cm ²	13.3 - 23.8 ft-lb/in ²	Average value: 3.88 J/cm ² Grade Count:5
 Charpy Impact Unnotched	1.30 - 3.60 J/cm ² @Temperature -40.0 - -20.0 °C	6.19 - 17.1 ft-lb/in ² @Temperature -40.0 - -4.00 °F	Average value: 2.33 J/cm ² Grade Count:5
Charpy Impact, Notched	0.350 - 1.40 J/cm ²	1.67 - 6.66 ft-lb/in ²	Average value: 0.907 J/cm ² Grade Count:7
 Charpy Impact, Notched	0.100 - 0.800 J/cm ² @Temperature -20.0 - -20.0 °C	0.476 - 3.81 ft-lb/in ² @Temperature -4.00 - -4.00 °F	Average value: 0.357 J/cm ² Grade Count:7
Gardner Impact	0.282 - 2.09 J	0.208 - 1.54 ft-lb	Average value: 0.746 J Grade Count:41
 Gardner Impact	12.4 - 12.4 J @Temperature -23.0 - -23.0 °C	9.15 - 9.15 ft-lb @Temperature -9.40 - -9.40 °F	Average value: 12.4 J Grade Count:1
	12.4 - 12.4 J @Thickness 3.18 - 3.18 mm	9.15 - 9.15 ft-lb @Thickness 0.125 - 0.125 in	Average value: 12.4 J Grade Count:1
Izod Impact, Notched	0.320 - 4.50 J/cm	0.599 - 8.43 ft-lb/in	Average value: 0.915 J/cm Grade Count:153
Izod Impact, Notched, Low Temp	0.350 - 0.800 J/cm	0.656 - 1.50 ft-lb/in	Average value: 0.543 J/cm Grade Count:3
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	1000 - 1.00e+16 ohm-cm	1000 - 1.00e+16 ohm-cm	Average value: 5.32e+15 ohm-cm Grade Count:26
Surface Resistance	100000 - 1.00e+14 ohm	100000 - 1.00e+14 ohm	Average value: 1.68e+13 ohm Grade Count:4
Static Decay	2.00 sec	2.00 sec	Average value: 2.00 sec Grade Count:3
Dielectric Constant	2.60 - 3.00	2.60 - 3.00	Average value: 2.75 Grade Count:12
Dielectric Strength	17.3 - 22.0 kV/mm	440 - 559 kV/in	Average value: 20.5 kV/mm Grade Count:13
Dissipation Factor	0.00100 - 0.00200	0.00100 - 0.00200	Average value: 0.00109 Grade Count:11
Arc Resistance	80.0 - 130 sec	80.0 - 130 sec	Average value: 119 sec Grade Count:9
Comparative Tracking Index	600 V	600 V	Average value: 600 V Grade Count:4
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	4.32 - 80.0 μm/m-°C	2.40 - 44.4 μm/in-°F	Average value: 44.1 μm/m-°C Grade Count:22
Thermal Conductivity	0.288 - 1.21 W/m-K	2.00 - 8.40 BTU-in/hr-ft ² -°F	Average value: 0.424 W/m-K Grade Count:7
Melting Point	160 - 182 °C	320 - 360 °F	Average value: 167 °C Grade Count:8
Maximum Service Temperature, Air	65.0 - 180 °C	149 - 356 °F	Average value: 113 °C Grade Count:4

Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	96.1 - 162 °C	205 - 324 °F	Average value: 149 °C Grade Count:120
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	61.1 - 162 °C	142 - 324 °F	Average value: 131 °C Grade Count:134
Vicat Softening Point	105 - 165 °C	221 - 329 °F	Average value: 129 °C Grade Count:8
	>= 110 °C	>= 230 °F	Average value: 110 °C Grade Count:1
	@Temperature 120 - 120 °C	@Temperature 248 - 248 °F	
	>= 110 °C	>= 230 °F	Average value: 110 °C Grade Count:1
	@Load 5.00 - 5.00 kg	@Load 11.0 - 11.0 lb	
Flammability, UL94	HB - V-0	HB - V-0	Grade Count:67
Flammability Test	0.900 - 125	0.900 - 125	Average value: 42.3 Grade Count:3
Oxygen Index	21.0 - 22.0 %	21.0 - 22.0 %	Average value: 21.3 % Grade Count:4
Glow Wire Test	650 °C	1200 °F	Average value: 650 °C Grade Count:3

Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	180 - 260 °C	356 - 500 °F	Average value: 214 °C Grade Count:48
Rear Barrel Temperature	191 - 238 °C	375 - 460 °F	Average value: 215 °C Grade Count:32
Middle Barrel Temperature	199 - 243 °C	390 - 470 °F	Average value: 221 °C Grade Count:33
Front Barrel Temperature	199 - 260 °C	390 - 500 °F	Average value: 227 °C Grade Count:32
Nozzle Temperature	54.4 - 260 °C	130 - 500 °F	Average value: 223 °C Grade Count:32
Mold Temperature	23.9 - 90.0 °C	75.0 - 194 °F	Average value: 47.5 °C Grade Count:80
Drying Temperature	51.7 - 90.0 °C	125 - 194 °F	Average value: 77.1 °C Grade Count:55
Dry Time	1.00 - 3.00 hour	1.00 - 3.00 hour	Average value: 1.87 hour Grade Count:53
Moisture Content	0.0500 %	0.0500 %	Average value: 0.0500 % Grade Count:23
Injection Pressure	2.76 - 120 MPa	400 - 17400 psi	Average value: 58.9 MPa Grade Count:65
Hold Pressure	2.07 - 8.27 MPa	300 - 1200 psi	Average value: 5.14 MPa Grade Count:23
Back Pressure	0.345 - 3.92 MPa	50.0 - 569 psi	Average value: 0.804 MPa Grade Count:25

B7 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (CARBON FIBER 10%)**Overview of materials for Polypropylene, Carbon Fiber 10%**

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polypropylene](#); [Polypropylene, Carbon Fiber](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Polypropylene, Carbon Fiber 10%". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

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

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

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.940 - 1.11 g/cc	0.0340 - 0.0401 lb/in ³	Average value: 0.997 g/cc Grade Count:13
Filler Content	10.0 - 40.0 %	10.0 - 40.0 %	Average value: 19.4 % Grade Count:8
Water Absorption	0.0100 %	0.0100 %	Average value: 0.0100 % Grade Count:8
Linear Mold Shrinkage	0.00100 - 0.0100 cm/cm	0.00100 - 0.0100 in/in	Average value: 0.00288 cm/cm Grade Count:12
Linear Mold Shrinkage, 6.35 mm section	0.00150 - 0.00700 cm/cm	0.00150 - 0.00700 in/in	Average value: 0.00350 cm/cm Grade Count:5
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	19.3 - 48.3 MPa	2800 - 7000 psi	Average value: 33.0 MPa Grade Count:12
Elongation at Break	0.400 - 10.0 %	0.400 - 10.0 %	Average value: 6.49 % Grade Count:13
Modulus of Elasticity	1.03 - 18.6 GPa	150 - 2700 ksi	Average value: 7.27 GPa Grade Count:12
Flexural Modulus	2.76 - 13.8 GPa	400 - 2000 ksi	Average value: 5.86 GPa Grade Count:13
Flexural Yield Strength	31.0 - 552 MPa	4500 - 80000 psi	Average value: 89.7 MPa Grade Count:13
Izod Impact, Unnotched	1.07 - 11.2 J/cm	2.00 - 21.0 ft-lb/in	Average value: 3.55 J/cm Grade Count:13
Izod Impact, Notched	0.427 - 3.20 J/cm	0.800 - 6.00 ft-lb/in	Average value: 1.03 J/cm Grade Count:13
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	1.00 - 1.00e+9 ohm-cm	1.00 - 1.00e+9 ohm-cm	Average value: 4.17e+7 ohm-cm Grade Count:12
Surface Resistance	100 - 1.00e+9 ohm	100 - 1.00e+9 ohm	Average value: 5.61e+7 ohm Grade Count:8
Static Decay	0.100 - 2.00 sec	0.100 - 2.00 sec	Average value: 1.73 sec Grade Count:7
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	132 - 166 °C	270 - 330 °F	Average value: 141 °C Grade Count:6
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	104 - 149 °C	220 - 300 °F	Average value: 124 °C Grade Count:8
Flammability, UL94	HB	HB	Grade Count:8
Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	188 - 232 °C	370 - 450 °F	Average value: 210 °C Grade Count:12
Mold Temperature	32.2 - 65.6 °C	90.0 - 150 °F	Average value: 48.5 °C Grade Count:12
Drying Temperature	79.4 °C	175 °F	Average value: 79.4 °C Grade Count:3
Dry Time	2.00 hour	2.00 hour	Average value: 2.00 hour Grade Count:3
Injection Pressure	68.9 - 103 MPa	10000 - 15000 psi	Average value: 86.2 MPa Grade Count:12



















B8 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (30% TALC FILLER)**Overview of materials for Polypropylene with 30% Talc Filler**

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polypropylene](#); [Polypropylene with 30% Talc Filler](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Polypropylene with 30% Talc Filler". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

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

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

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.07 - 1.48 g/cc	0.0387 - 0.0535 lb/in ³	Average value: 1.14 g/cc Grade Count:74
Filler Content	26.0 - 32.0 %	26.0 - 32.0 %	Average value: 29.7 % Grade Count:30
Water Absorption	0.0100 - 0.0400 %	0.0100 - 0.0400 %	Average value: 0.0233 % Grade Count:12
Linear Mold Shrinkage	0.00600 - 0.0212 cm/cm	0.00600 - 0.0212 in/in	Average value: 0.0102 cm/cm Grade Count:61
Linear Mold Shrinkage, 6.35 mm section	0.0150 - 0.0160 cm/cm	0.0150 - 0.0160 in/in	Average value: 0.0157 cm/cm Grade Count:3
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.00950 - 0.0196 cm/cm	0.00950 - 0.0196 in/in	Average value: 0.0125 cm/cm Grade Count:7
Melt Flow	0.700 - 230 g/10 min	0.700 - 230 g/10 min	Average value: 15.9 g/10 min Grade Count:57
Ash	28.0 - 32.0 %	28.0 - 32.0 %	Average value: 29.9 % Grade Count:13
	28.0 - 28.0 %	28.0 - 28.0 %	Average value: 28.0 % Grade Count:1
	 Temperature 900 - 900 °C	 Temperature 1650 - 1650 °F	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell M	49.0 - 100	49.0 - 100	Average value: 64.6 Grade Count:5
Hardness, Rockwell R	45.0 - 100	45.0 - 100	Average value: 79.2 Grade Count:20
Hardness, Shore D	65.0 - 82.0	65.0 - 82.0	Average value: 72.6 Grade Count:15
Tensile Strength, Ultimate	13.0 - 33.8 MPa	1890 - 4900 psi	Average value: 26.4 MPa Grade Count:42
Tensile Strength, Yield	15.0 - 35.0 MPa	2180 - 5080 psi	Average value: 26.8 MPa Grade Count:45
Elongation at Break	3.00 - 250 %	3.00 - 250 %	Average value: 26.0 % Grade Count:43
Elongation at Yield	2.70 - 80.0 %	2.70 - 80.0 %	Average value: 11.1 % Grade Count:28
Modulus of Elasticity	1.50 - 3.79 GPa	218 - 550 ksi	Average value: 2.53 GPa Grade Count:25
Flexural Modulus	1.40 - 4.10 GPa	203 - 595 ksi	Average value: 2.62 GPa Grade Count:71
Flexural Yield Strength	20.0 - 80.0 MPa	2900 - 11600 psi	Average value: 44.4 MPa Grade Count:30
Izod Impact, Unnotched	0.470 - 13.3 J/cm	0.881 - 25.0 ft-lb/in	Average value: 4.12 J/cm Grade Count:14
Charpy Impact Unnotched	2.50 J/cm ² - NB	11.9 ft-lb/in ² - NB	Average value: 6.69 J/cm ² Grade Count:11
	0.900 - 2.10 J/cm ²	4.28 - 9.99 ft-lb/in ²	Average value: 1.64 J/cm ² Grade Count:6
	 Temperature -40.0 - -20.0 °C	 Temperature -40.0 - -4.00 °F	
Charpy Impact, Notched	0.280 - 1.30 J/cm ²	1.33 - 6.19 ft-lb/in ²	Average value: 0.697 J/cm ² Grade Count:8
	0.170 - 0.360 J/cm ²	0.809 - 1.71 ft-lb/in ²	Average value: 0.265 J/cm ² Grade Count:8
	 Temperature -30.0 - -20.0 °C	 Temperature -22.0 - -4.00 °F	
Gardner Impact	0.565 - 21.7 J	0.417 - 16.0 ft-lb	Average value: 4.47 J Grade Count:22
	5.53626 - 5.53626 J	4.08334 - 4.08334 ft-lb	Average value: 6.89 J Grade Count:1
	 Temperature -30.0 - -30.0 °C	 Temperature -22.0 - -22.0 °F	
	7.23 - 7.23 J	5.33 - 5.33 ft-lb	Average value: 6.89 J Grade Count:2
	 Temperature -23.0 - -23.0 °C	 Temperature -9.40 - -9.40 °F	
	7.23 - 7.23 J	5.33 - 5.33 ft-lb	Average value: 6.89 J Grade Count:2
	 Thickness 3.18 - 3.18 mm	 Thickness 0.125 - 0.125 in	
Izod Impact, Notched	0.149 - 2.40 J/cm	0.280 - 4.50 ft-lb/in	Average value: 0.540 J/cm Grade Count:60
Izod Impact, Notched, Low Temp	0.350 - 1.00 J/cm	0.656 - 1.87 ft-lb/in	Average value: 0.583 J/cm Grade Count:3
Izod Impact, Notched (ISO)	2.70 - 15.0 kJ/m ²	1.28 - 7.14 ft-lb/in ²	Average value: 6.43 kJ/m ² Grade Count:4
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	1.00e+16 ohm-cm	1.00e+16 ohm-cm	Average value: 1.00e+16 ohm-cm Grade Count:3
Dielectric Strength	19.7 - 24.0 kV/mm	500 - 610 kV/in	Average value: 22.6 kV/mm Grade Count:6
Comparative Tracking Index	600 V	600 V	Average value: 600 V Grade Count:4
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	48.6 - 90.0 μm/m-°C	27.0 - 50.0 μin/in-°F	Average value: 75.4 μm/m-°C Grade Count:6
Melting Point	150 - 182 °C	302 - 360 °F	Average value: 163 °C Grade Count:10
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	54.0 - 137 °C	129 - 278 °F	Average value: 119 °C Grade Count:58
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	50.0 - 137 °C	122 - 278 °F	Average value: 71.1 °C Grade Count:57
Vicat Softening Point	52.0 - 192 °C	126 - 378 °F	Average value: 93.5 °C Grade Count:18
Flammability, UL94	HB - V-0	HB - V-0	Grade Count:26
Flammability Test	1.10 - 125	1.10 - 125	Average value: 94.0 Grade Count:4
Oxygen Index	21.0 %	21.0 %	Average value: 21.0 % Grade Count:6
Glow Wire Test	650 °C	1200 °F	Average value: 650 °C Grade Count:3

B9 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (20% MICA FILLER)**Overview of materials for Polypropylene with 20% Mica Filler**

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polypropylene](#); [Polypropylene with 20% Mica Filler](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Polypropylene with 20% Mica Filler". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

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

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

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.00 - 1.06 g/cc	0.0361 - 0.0383 lb/in ³	Average value: 1.03 g/cc Grade Count:23
Filler Content	15.0 - 20.0 %	15.0 - 20.0 %	Average value: 17.8 % Grade Count:9
Linear Mold Shrinkage	0.00700 - 0.0120 cm/cm	0.00700 - 0.0120 in/in	Average value: 0.00947 cm/cm Grade Count:21
Melt Flow	3.00 - 23.0 g/10 min	3.00 - 23.0 g/10 min	Average value: 11.6 g/10 min Grade Count:21
Ash	20.0 %	20.0 %	Average value: 20.0 % Grade Count:9
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell R	40.0 - 97.0	40.0 - 97.0	Average value: 70.5 Grade Count:12
Hardness, Shore D	68.0 - 76.0	68.0 - 76.0	Average value: 74.3 Grade Count:8
Tensile Strength, Ultimate	13.0 - 35.2 MPa	1890 - 5110 psi	Average value: 27.7 MPa Grade Count:20
Tensile Strength, Yield	16.0 - 38.6 MPa	2320 - 5600 psi	Average value: 30.2 MPa Grade Count:12
Elongation at Break	6.00 - 18.0 %	6.00 - 18.0 %	Average value: 13.5 % Grade Count:12
Elongation at Yield	3.00 - 6.00 %	3.00 - 6.00 %	Average value: 4.89 % Grade Count:9
Modulus of Elasticity	1.60 - 2.50 GPa	232 - 363 ksi	Average value: 2.20 GPa Grade Count:9
Flexural Modulus	1.60 - 3.59 GPa	232 - 520 ksi	Average value: 2.47 GPa Grade Count:23
Flexural Yield Strength	21.0 - 51.0 MPa	3050 - 7400 psi	Average value: 39.1 MPa Grade Count:13
Izod Impact, Unnotched	2.70 - 5.23 J/cm	5.06 - 9.80 ft-lb/in	Average value: 3.71 J/cm Grade Count:3
Gardner Impact	0.339 - 1.81 J	0.250 - 1.33 ft-lb	Average value: 0.698 J Grade Count:12
Izod Impact, Notched	0.267 - 1.98 J/cm	0.500 - 3.70 ft-lb/in	Average value: 0.530 J/cm Grade Count:23
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	68.9 - 132 °C	192 - 270 °F	Average value: 118 °C Grade Count:22
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	50.0 - 79.0 °C	122 - 174 °F	Average value: 66.8 °C Grade Count:21
Processing Properties	Metric	English	Comments
Rear Barrel Temperature	193 - 227 °C	380 - 440 °F	Average value: 210 °C Grade Count:7
Middle Barrel Temperature	199 - 232 °C	390 - 450 °F	Average value: 216 °C Grade Count:7
Front Barrel Temperature	204 - 238 °C	400 - 460 °F	Average value: 222 °C Grade Count:7
Nozzle Temperature	210 - 227 °C	410 - 440 °F	Average value: 219 °C Grade Count:7
Mold Temperature	26.7 - 48.9 °C	80.0 - 120 °F	Average value: 37.8 °C Grade Count:7
Drying Temperature	65.6 - 82.2 °C	150 - 180 °F	Average value: 73.9 °C Grade Count:7
Dry Time	1.00 - 2.00 hour	1.00 - 2.00 hour	Average value: 1.50 hour Grade Count:7
Moisture Content	0.0500 %	0.0500 %	Average value: 0.0500 % Grade Count:7
Injection Pressure	2.76 - 10.3 MPa	400 - 1500 psi	Average value: 6.55 MPa Grade Count:7
Hold Pressure	2.07 - 8.27 MPa	300 - 1200 psi	Average value: 5.17 MPa Grade Count:7
Back Pressure	0.345 - 1.03 MPa	50.0 - 150 psi	Average value: 0.689 MPa Grade Count:7

B10 ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (WOOD FILLED)**Overview of materials for Polypropylene, Wood Filled**

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polypropylene](#); [Polypropylene, Wood Filled](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Polypropylene, Wood Filled". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

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

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

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.951 - 1.14 g/cc	0.0344 - 0.0414 lb/in ³	Average value: 1.04 g/cc Grade Count:9
Linear Mold Shrinkage	0.00180 - 0.00920 cm/cm	0.00180 - 0.00920 in/in	Average value: 0.00630 cm/cm Grade Count:6
Melt Flow	0.500 - 7.40 g/10 min	0.500 - 7.40 g/10 min	Average value: 2.18 g/10 min Grade Count:9
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	20.0 - 27.0 MPa	2900 - 3920 psi	Average value: 23.6 MPa Grade Count:5
Tensile Strength, Yield	21.0 - 32.0 MPa	3050 - 4640 psi	Average value: 26.6 MPa Grade Count:7
Elongation at Break	1.20 - 9.20 %	1.20 - 9.20 %	Average value: 4.70 % Grade Count:8
Modulus of Elasticity	2.50 - 6.20 GPa	363 - 899 ksi	Average value: 3.95 GPa Grade Count:8
Flexural Modulus	2.10 - 4.90 GPa	305 - 711 ksi	Average value: 3.22 GPa Grade Count:9
Flexural Yield Strength	38.0 - 56.0 MPa	5510 - 8120 psi	Average value: 45.9 MPa Grade Count:8
Izod Impact, Unnotched	0.400 - 2.10 J/cm	0.749 - 3.93 ft-lb/in	Average value: 1.20 J/cm Grade Count:8
Izod Impact, Notched	0.180 - 0.460 J/cm	0.337 - 0.862 ft-lb/in	Average value: 0.280 J/cm Grade Count:9
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	36.0 - 63.0 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	20.0 - 35.0 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$	Average value: 49.7 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ Grade Count:6
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	61.0 - 98.0 $^\circ\text{C}$	142 - 208 $^\circ\text{F}$	Average value: 79.1 $^\circ\text{C}$ Grade Count:8
Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	200 - 225 $^\circ\text{C}$	392 - 437 $^\circ\text{F}$	Average value: 203 $^\circ\text{C}$ Grade Count:9

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1.Ι. Σιμιτζής, «*Τεχνολογία Πολυμερών*», Ε.Μ.Π., 1999
- 2.Μ. Καμπούρης, «*Επεξεργασία Πολυμερών*», Ε.Μ.Π., 1983
3. Χρ. Προβατίδης, Α. Κανάραχος, «*Πεπερασμένα Στοιχεία στη Μηχανολογία*», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2000
4. Χρ. Προβατίδης, Ι. Αντωνιάδης, «*Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές*», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
5. Καραγιαννίδης Γ, Σιδερίδου Ειρ., «*Χημεία Πολυμερών*», Β' Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη (2006).
6. Μανωλάκος Δημ., Σημειώσεις διαλέξεων στα πλαίσια του μαθήματος «*Προηγμένα Υλικά*» 9^{ου} εξαμήνου Σχολής Μηχαν. Μηχανικών Ε.Μ.Π .
7. Εγκυκλοπαίδεια «*Πάπυρος Λαρούς Μπριτάννικα*», Τόμος 49, Εκδόσεις Πάπυρος, 1996

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

8. Whipple, F.J.W., «*The stability of the motion of a bicycle. The Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*», Vol. 30, pp. 312-348, 1899.
9. Kane T., «*Fundamental kinematical relationships for single-track vehicles. In International Journal of Mechanical Science*», Pergamon Press, UK, Volume 17, 1975.
10. C. L. Tucker III, «*Fundamentals of Computer Modelling for Polymer Processing*», Hasner, Munich, 1989
11. S. Levy and J.F. Carley, «*Plastics Extrusion Technology Handbook*», 2nd Ed., Industrial Press, 1989 (ISBN: 0-8311-1185-2)

12. Walter Michaeli, «Extrusion dies for plastics and rubber; Design and engineering computations», 2nd Ed. , Hanser Press (ISBN: 3-446-16190-2) or Oxford University Press (ISBN: 0-19-520910-9)
13. Timor Z. and COG. Gobos, «*Principles of Polymer Processing*», Wiley, New York (1979).
14. Crawford R.J., «*Plastics Engineering*», Pergamon Press, New York (1987).
15. Morton- Jones D.H, «*Polymer Processing*», Chapman and Hall, New York (1989).
16. Agassant J.-F., P. Avenas and J.Ph. Sergent, «*La Mise en Forme des Matieres Plastiques*», Tec-Doc(Lavoisier), Paris (1986).
17. Birley A.W., B. Haworth and J. Batchelor, «*Physics of Plastics*», Hanser, New York (1992).
18. Sperling L.H., «*Introduction to Physical Polymer Science*», Wiley, New York (1992).
19. Corish P.J. (Editor), «*Concise Encyclopedia of Polymer Processing and Applications*», Pergamon Press, New York (1992)

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ

20. 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
21. Jacob Hull, «*FEA Design of a Track Bicycle Frame*», Cornell University, December 4, 2009
22. Tim Paterek, «*The Paterek Manual for Bicycle Framebuilders*», Kermesse Distributors Inc., 2000
23. Brendan Connors, Mont Hubbard, «*Modelling and Stability Analysis of a Recumbent Bicycle with Oscillating Leg Masses (P131)*», University of California, USA

24. 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.

SITES

25. www.matweb.com
26. www.solidworks.com
27. www.ansys.com
28. www.bikeforest.com
29. <http://el.wikipedia.org/wiki/>
30. <http://www.hellenic-cycling.gr>
31. <http://www.otenet.gr/otenet/info/systran/>