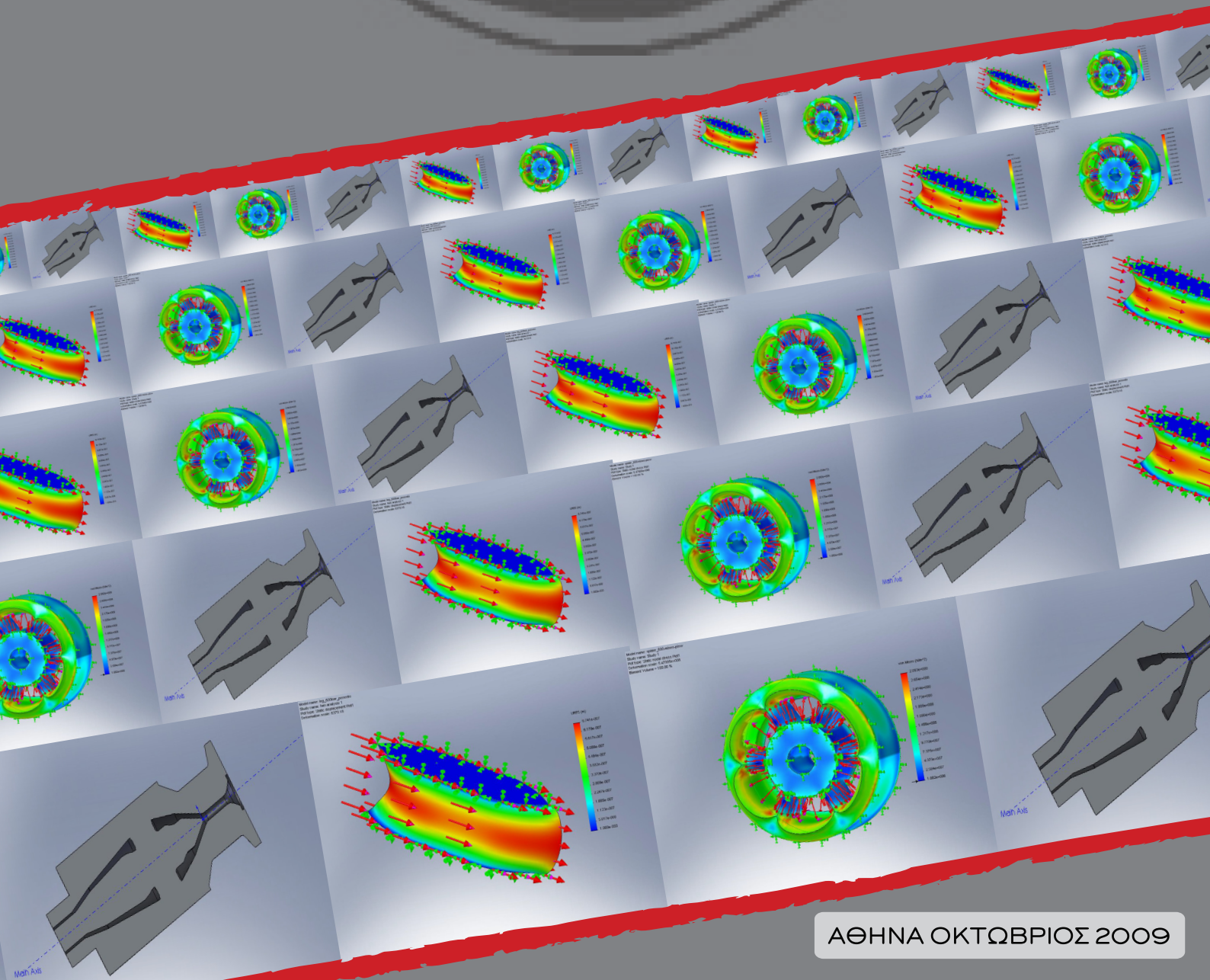


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

«ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΩΛΗΝΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ  
ΣΤΕΦΑΝΟΠΟΥΛΟΥ Ι. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ - ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.



# *Πρόλογος*

Η Διπλωματική Εργασία αυτή με τίτλο «Μελέτη αντοχής μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα» πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος Προηγμένων Υλικών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και υποστηρίχτηκε από τον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου και διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών κ. Δημήτριο Μανωλάκο, καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την πολύτιμη βοήθεια, την εμπιστοσύνη, την κατανόηση και τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσε κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Γεώργιο Κούζιλο για την συνεχή βοήθειά του, την υποστήριξή του και τις τεχνικές και επιστημονικές γνώσεις και κατευθύνσεις που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον καλό μου φίλο και συνάδελφο κ. Σταύρο Μπούκιο για την βοήθειά του σχετικά με τα πακέτα πεπερασμένων στοιχείων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου παρείχαν αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

Γεώργιος Ι. Στεφανόπουλος

# Περίληψη

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι ο έλεγχος της αντοχής της μήτρας του εκβολέα του εργαστηρίου για παραγωγή σωλήνων από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας διαστάσεων DN32 και πάχους 2,4 mm. Σύμφωνα με μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήσαμε καταλήξαμε στην επιλογή διαφορετικών ποιοτήτων χάλυβα που ενδείκνυνται για την κατασκευή κεφαλών που προορίζονται για θερμοπλαστικά πολυμερή όπως είναι το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας με επικρατέστερη επιλογή αυτή του 1.2738 ή P20. Στη συνέχεια ακολούθησε ο έλεγχος της αντοχής της κεφαλής σε δύο ξεχωριστές περιπτώσεις η μια εκ των οποίων αποτελεί πραγματικά μια εξαιρετικά ακραία περίπτωση λειτουργίας.

Δεδομένου ότι είχαμε προβλέψει ποια είναι η επικίνδυνη διατομή στην κεφαλή του εκβολέα επεκτείναμε τον έλεγχο της αντοχής στην επικίνδυνη διατομή και για τα δύο βασικά σενάρια ελέγχου. Ο έλεγχος της αντοχής βασίστηκε σε αριθμητικά μοντέλα ενώ στην επικίνδυνη διατομή του ποδός της αράχνης ο έλεγχος της αντοχής στηρίχτηκε και σε αναλυτικά μοντέλα προκειμένου να ελέγξουμε εάν τα δυο μοντέλα συμφωνούν. Ο έλεγχος της αντοχής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων του Cosmosworks 2007 ενώ η μεταβολή της πίεσης στα διαφορετικά σενάρια ελέγχου της αντοχής της μήτρας υπολογίζεται από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων του Comsol 3.5 .

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της επιστήμης των πολυμερών. Εν συνεχεία στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται στατιστικά στοιχεία για τη χρήση των πολυερικών υλικών γενικά και των πλαστικών σωλήνων ειδικότερα. Στο τρίτο κεφάλαιο που ακολουθεί πραγματοποιούμε μια αναλυτική αναφορά στην επιστήμη της ρεολογία καθώς και στις αρχές και τους νόμους που τη διέπουν δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα μοντέλα των Μη Νευτωνικών ρευστών.

Το τέταρτο κεφάλαιο συνιστά μια πλήρη επισκόπηση της διεργασία της εκβολής των πολυμερών. Παρουσιάζονται τα βασικά μέρη ενός εκβολέα, αναλύεται η διεργασία της εκβολής ενώ δίνεται ιδιαίτερη βάση στην παρουσίαση των τεχνικών

χαρακτηριστικών του εκβολέα του εργαστηρίου του τομέα αλλά και των κεφαλών με αράχνη. Παρουσιάζεται επίσης συνοπτικά η δομή, η λειτουργία τους και τα διάφορα υλικά κατασκευής τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται ο έλεγχος της αντοχής της μήτρας με τη χρήση του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων Cosmosworks 2007 σε δύο βασικές περιπτώσεις που αφορούν σε δύο διαφορετικές πιέσεις λειτουργίας του εκβολέα. Ωστόσο, σε κάθε μια από τις περιπτώσεις αυτές υπάρχουν και επιμέρους περιπτώσεις ελέγχου που αφορούν στην ποσοστιαία μεταβολή της πίεσης η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων Comsol 3.5 του ροϊκού σωλήνα. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται γραφικά τα αποτελέσματα του ελέγχου της αντοχής για κάθε περίπτωση τα οποία είναι τα διαγράμματα ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises καθώς και τα διαγράμματα παραμορφώσεων και καταπονήσεων για όλη τη μήτρα, για την περιοχή της αράχνης και για την επικίνδυνη διατομή του ποδιού της αράχνης. Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τον έλεγχο της αντοχής αναφορικά και με την επιλογή υλικού.

Τέλος στα παραρτήματα βρίσκονται οι ιδιότητες για τους χάλυβες που ενδείκνυνται για την κατασκευή κεφαλών για θερμοπλαστικά πολυμερή αλλά και οι ιδιότητες του πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> - ΠΟΛΥΜΕΡΗ .....	6
1.1	Η ιστορική εξέλιξη των πολυμερών.....	6
1.2	Η επιστήμη των πολυμερών.....	11
1.3	Ταξινόμηση των πολυμερών.....	12
1.3.1	ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ.....	12
1.3.2	ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ .....	13
1.3.3	ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΩΝ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ.....	14
1.3.4	ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ.....	14
1.3.5	ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΤΟΥΣ ΣΥΣΤΑΣΗ .....	15
1.3.6	ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΟΥΣ.....	16
1.3.7	ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥΣ.....	16
1.3.8	ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥΣ.....	17
1.4	Η δομή των μακρομορίων ενός πολυμερούς .....	18
1.4.1	ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΗ ΙΣΟΜΕΡΕΙΑ .....	18
1.4.2	ΣΤΕΡΕΟΙΣΟΜΕΡΕΙΑ .....	18
1.4.3	ΣΤΕΡΕΟΤΑΚΤΙΚΗ ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑ ή ΤΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑ (STEREO- REGULARITY or TACTICITY) .....	19
1.5	Κρυσταλλικότητα.....	20
1.5.1	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΤΗΤΑ .. .....	23
1.6	Πολυμερισμός .....	25
1.7	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High Density Polyethylene,HD-PE).26	
	Βιβλιογραφία 1 <sup>ου</sup> κεφαλαίου.....	28
2	Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> - Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	29
2.1	Εισαγωγή.....	29
2.2	Σωλήνες από θερμοπλαστικά πολυμερή.....	30
2.3	Παρουσίαση στατιστικών στοιχείων για την παραγωγή και τη χρήση πολυμερών .....	31
	Βιβλιογραφία 2 <sup>ου</sup> κεφαλαίου.....	34
3	Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> - Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ.....	35
3.1	Εισαγωγή.....	35
3.2	Βασικές αρχές της ρεολογίας.....	35
3.3	Νευτώνικά ρευστά.....	36
3.3.1	ΝΟΜΟΣ ΙΞΩΔΟΥΣ ΤΟΥ NEWTON.....	36

3.3.2	ΣΧΕΣΕΙΣ ΙΞΩΔΟΥΣ ΤΟΥ STOKES.....	38
3.3.3	ΝΟΜΟΣ ΙΞΩΔΟΥΣ NEWTON-POISSON .....	40
3.4	Μη νευτώνικά ρευστά.....	40
3.4.1	ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ .....	42
3.4.2	ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ή ΠΛΑΣΤΙΚΑ BINGHAM .....	42
3.4.3	ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ .....	50
3.5	Ιξωδοελαστικά ρευστά.....	52
3.6	Μαθηματική ανάλυση της ροής πολυμερικών τηγμάτων.....	55
3.6.1	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ .....	55
3.6.2	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	56
3.7	Ροή πολυμερικών τηγμάτων σε αγωγούς.....	59
3.7.1	ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΟΥ ΕΚΘΕΤΙΚΟΥ ΝΟΜΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΑΓΩΓΟ – ΡΟΗ POISEUILLE.....	59
3.7.2	ΡΟΗ ΣΕ ΚΟΛΟΥΡΟ ΚΩΝΟ.....	61
	Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> κεφαλαίου.....	63
4	Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> - ΕΚΒΟΛΗ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	64
4.1	Εισαγωγή.....	64
4.2	Η βασική λειτουργία του εκβολέα ενός κοχλίου .....	64
4.3	Τα βασικά μέρη του εκβολέα.....	67
	Ο κοχλίας εκτελεί: .....	71
	• Την μεταφορά ρητίνης μέσα στον εκβολέα .....	71
	• Την μετάδοση της μηχανικής ενέργειας η οποία αποτελεί τμήμα της διαδικασίας τήξης .....	71
	• Η ανάπτυξη πίεσης στον εκβολέα έτσι ώστε η ρητίνη να εξωθηθεί στη μήτρα.....	71
4.4	Ο εκβολέας του εργαστηρίου μας .....	79
4.5	Οι κεφαλές με αράχνη .....	81
4.6	Παράγοντες που λαμβάνουμε υπόψη στο σχεδιασμό μιας μήτρας.....	85
4.7	Υλικά που ενδείκνυνται για την κατασκευή κεφαλών εκβολέων.....	87
4.8	Αστάθειες στη ροή στην μήτρα.....	91
	Βιβλιογραφία 4 <sup>ου</sup> κεφαλαίου.....	95
5	Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> - ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ.....	96
5.1	Εισαγωγή.....	96
5.2	Λίγα λόγια για το λογισμικό Comsol 3.5.....	96
5.3	Βήματα για την επίλυση του CFD προβλήματος για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στην περιοχή της αράχνης και στο πόδι της.....	98
5.4	Έλεγχος αντοχής στη μήτρα.....	109
5.4.1	ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ .....	109

5.4.2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ .....	110
5.5	Παραδοχές στην αριθμητική επίλυση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	119
5.6	Έλεγχος αντοχής στη μήτρα με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων του Cosmosworks.....	120
5.6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	120
5.6.2	ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	121
5.6.3	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ, ΣΤΗΝ ΑΡΑΧΝΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΟΔΙ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ.....	121
	Βιβλιογραφία 5 <sup>ου</sup> κεφαλαίου.....	158
	Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	159
5.1	Συμπεράσματα.....	159

### **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχήμα 1.1:	Ταξινόμηση πολυμερών σύμφωνα με την πολυμερική αλυσίδα .....	12
Σχήμα 1.2:	Εναρμονισμένο συμπολυμερές.....	15
Σχήμα 1.3:	Συντακτική Ισομέρεια .....	18
Σχήμα 1.4:	Η cis-trans ισομέρεια του πολυβουταδιένιου.....	19
Σχήμα 1.5:	Είδη τακτικότητας.....	20
Σχήμα 1.6:	Αναδίπλωση πολυμερικής αλυσίδας.....	21
Σχήμα 1.7:	Λαμέλλα πολυμερούς.....	21
Σχήμα 1.8:	Μη τακτική διάταξη λαμέλλας.....	22
Σχήμα 1.9:	Adjacent re-entry model και switchboard model.....	22
Σχήμα 1.10:	Απόψυξη τήγματος πολυμερών.....	23
Σχήμα 1.11:	Επίδραση του βαθμού κρυσταλλικότητας στη θερμοκρασία ναλώδους μετάπτωσης.....	24
Σχήμα 1.12:	Ισχυροί δεσμοί των πολωμένων εστερομάδων στους πολυεστέρες.....	25
Σχήμα 1.13:	Συνήθεις πλαστικοποιητές.....	25
Σχήμα 2.1:	Διάφορα είδη πλαστικών σωλήνων από HDPE.....	31
Σχήμα 2.2:	Διαχωρισμός της παραγωγής πολυμερών σε κατηγορίες.....	32
Σχήμα 2.3:	Διαχωρισμός των πολυμερών ανάλογα με τη χρήση τους.....	33
Σχήμα 3.1:	Στρωτή και μονοδιάστατη ροή Νευτωνικού Ρευστού πάνω σε πλάκα.....	37
Σχήμα 3.2:	Καμπύλη ροής νευτωνικού ρευστού (α) σε απλό διάγραμμα και (β) σε λογαριθμικό διάγραμμα .....	38
Σχήμα 3.3:	Καμπύλη ροής (α) ιδανικού και (β) πραγματικού πλαστικού ρευστού (τ <sub>0</sub> =τάσης ροής και μ <sub>π</sub> =πλαστικό ιξώδες).....	43
Σχήμα 3.4:	(α) καμπύλη ροής και (β) εξάρτηση του φαινόμενου ιξώδους ψευδοπλαστικού ρευστού από το ρυθμό διάτμησής του .....	44
Σχήμα 3.5:	Κατανομή ταχύτητας μη νευτωνικού ρευστού για διάφορους εκθέτες του εκθετικού μοντέλου .....	45
Σχήμα 3.6:	Σύγκριση πειραματικών δεδομένων Ellis και Sisco.....	47
Σχήμα 3.7:	Καμπύλες ροής διαφόρων υλικών σωμάτων.....	50
Σχήμα 3.8:	Ρεολογική συμπεριφορά θιξοτροπικού ρευστού το οποίο διατέμνεται με σταθερό ρυθμό σε ένα περιστροφικό ιξωδόμετρο Couette .....	52
Σχήμα 3.9:	Μορφή φλέβας ρευστού μετά την έξοδο από το στόμιο αγωγού:.....	53

Σχήμα 3.10: Παραμόρφωση υλικών σωμάτων τα οποία υφίστανται την επίδραση σταθερής διατμητικής τάσης το χρονικό διάστημα $0 < t \leq t_0$ .....	54
Σχήμα 3.11: Στοιχειώδες σημείο ρευστού .....	56
Σχήμα 3.12: Στοιχειώδης όγκος ελέγχου του ρευστού .....	57
Σχήμα 3.13: Ροή δια μέσου κυλινδρικού αγωγού .....	59
Σχήμα 3.14: Το προφίλ της ταχύτητας ρευστού που υπακούει στον εκθετικό νόμο κατά την ισοθερμοκρασιακή ροή του σε κυλινδρικό αγωγό για διάφορες τιμές του δείκτη $n$ .....	61
Σχήμα 3.15: Ροή δια μέσου κόλουρου κώνου .....	61
Σχήμα 4.1: Ένας εκβολέας βιομηχανίας .....	65
Σχήμα 4.2: Τυπική διάταξη εκβολέα σε γραμμή παραγωγής .....	66
Σχήμα 4.3: Ο κοχλίας και οι ζώνες του .....	66
Σχήμα 4.4: Κόκκοι πολυμερών .....	66
Σχήμα 4.5(α)-(β): Εξοπλισμός (hardware) εκβολέα .....	67
Σχήμα 4.6: Κινητήρας εκβολέα .....	68
Σχήμα 4.7: Έδρανο αντίθλιψης .....	69
Σχήμα 4.8: Κύλινδρος εκβολέα .....	70
Σχήμα 4.9: Είδη χοανών τροφοδοσίας .....	71
Σχήμα 4.10: Η γεωμετρία του κοχλία .....	73
Σχήμα 4.11: Τμήματα δοσιμετρικού κοχλία .....	75
Σχήμα 4.12: Κοχλίες εκβολέων .....	78
Σχήμα 4.13: Ο δοσιμετρικός κοχλίας του εκβολέα του εργαστηρίου .....	80
Σχήμα 4.14: 1) κώνος αρσενικού κεφαλής, 2) αράχνη, 3) πόδι αράχνης, 4) κοχλίας κεντραρίσματος, 5) δακτύλιος συγκράτησης μήτρας, 6) ζώνη χαλάρωσης .....	83
Σχήμα 4.15: Μήτρες για την παραγωγή σωλήνων .....	83
Σχήμα 4.16: Η κεφαλή με αράχνη .....	84
Σχήμα 4.17: Ζώνες κεφαλής με αράχνη .....	84
Σχήμα 4.18 Η ζώνη της αράχνης .....	85
Σχήμα 4.19: Διόγκωση τήγματος κατά την έξοδό του από τη μήτρα .....	93
Σχήμα 4.20: Αστάθειες στη ροή του πολυμερικού τήγματος κατά την έξοδό του από τη μήτρα .....	94
Σχήμα 5.1: Επιλογή μοντέλου μη νευτωνικού ρευστού .....	99
Σχήμα 5.2: Προσδιορισμός ιδιοτήτων μη νευτωνικού ρευστού .....	100
Σχήμα 5.3: Προσδιορισμός συνιστωσών θερμικού προβλήματος .....	100
Σχήμα 5.4: (α)-(στ): Επιβολή οριακών συνθηκών .....	104
Σχήμα 5.5 : Δήλωση θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου .....	105
Σχήμα 5.6 : Δήλωση πίεσης εισόδου 100 bar και 600 bar .....	105
Σχήμα 5.7: Δήλωση σταθερών τιμών μοντέλου Carreau .....	106
Σχήμα 5.8: Καθορισμός ιδιοτήτων πλέγματος .....	106
Σχήμα 5.9: Είδη πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο πλέγμα .....	107
Σχήμα 5.10: Εκλογή solver .....	107
Σχήμα 5.11: Μεταβολή της πίεσης για πίεση εισόδου ίση με 600 bar .....	108
Σχήμα 5.12: Μεταβολή της πίεσης για πίεση εισόδου ίση με 100 bar .....	108
Σχήμα 5.13: Είδη καταπονήσεων .....	112
Σχήμα 5.14 Είδη φορτίων .....	113
Σχήμα 5.15: Ορθή τάση .....	114
Σχήμα 5.16: Διατμητική τάση .....	115
Σχήμα 5.17: Εφελκυσμός και θλίψη ράβδου .....	116
Σχήμα 5.18: Γωνιακή παραμόρφωση πρίσματος .....	116
Σχήμα 5.19 .....	122



Σχήμα 5.20:Διατομή Ζώνης I .....	122
Σχήμα 5.21:Διατομή Ζώνης V .....	123
Σχήμα 5.22(α)-(δ): Γεωμετρία της μήτρας .....	128
Σχήμα 5.23:Δημιουργία πλέγματος .....	129
Σχήμα 5.24(α)-(δ): Ισοδύναμη τάση Von Mises στα 600 bar .....	132
Σχήμα 5.25(α)-(γ): Μετατόπιση στα 600 bar .....	133
Σχήμα 5.26:Καταπόνηση στα 600 bar .....	134
Σχήμα 5.27:Γεωμετρία αράχνης .....	135
Σχήμα 5.28:Δέσμευση βαθμών ελευθερίας και επιβολή φορτίσεων στην αράχνη ...	136
<b>Σχήμα 5.29:</b> Δημιουργία πλέγματος αράχνης ποιότητας fine αποτελούμενο από 93999 κόμβους,63213 στοιχεία και 259923 βαθμούς ελευθερίας .....	136
Σχήμα 5.30:Ισοδύναμη τάση Von Mises στην αράχνη στα 600 bar .....	137
Σχήμα 5.31:Μετατόπιση στην αράχνη στα 600 bar .....	138
Σχήμα 5.32:Καταπόνηση στην αράχνη600 bar .....	139
Σχήμα 5.33:Γεωμετρία ποδιού .....	140
Σχήμα 5.34:Ισοδύναμη τάση στο πόδι στα 600 bar .....	141
Σχήμα 5.35:Μετατόπιση στο πόδι στα 600 bar .....	141
Σχήμα 5.36:Καταπόνηση στο πόδι στα 600 bar .....	142
Σχήμα 5.37:Ισοδύναμη τάση στην αράχνη στα 2503670 Pa .....	144
Σχήμα 5.38:Μετατόπιση στην αράχνη στα 2503670 Pa .....	145
Σχήμα 5.39:Καταπόνηση στην αράχνη στα 2503670 Pa .....	145
Σχήμα 5.40:Ισοδύναμη τάση στο πόδι στα 1911810 Pa .....	146
Σχήμα 5.41:Μετατόπιση στο πόδι στα 1911810 Pa .....	146
Σχήμα 5.42:Καταπόνηση στο πόδι στα 1911810 Pa .....	147
Σχήμα 5.43:Ισοδύναμη τάση Von Mises στην κεφαλή στα 100 bar .....	148
Σχήμα 5.44:Ισοδύναμη τάση Von Mises στην κεφαλή στα 100 bar .....	149
Σχήμα 5.45:Καταπόνηση κεφαλής στα 100 bar .....	150
Σχήμα 5.46:Ισοδύναμη τάση αράχνης στα 100 bar .....	150
<b>Σχήμα 5.47:</b> Μετατόπιση αράχνης στα 100 bar .....	151
Σχήμα 5.48:Καταπόνηση αράχνης στα 100 bar .....	151
Σχήμα 5.49:Ισοδύναμη τάση στο πόδι στα 100 bar .....	152
Σχήμα 5.50:Μετατόπιση ποδιού στα 100 bar .....	152
Σχήμα 5.51:Καταπόνηση ποδιού στα 100 bar .....	153
Σχήμα 5.52:Ισοδύναμη τάση στην αράχνη για 73620 Pa .....	154
Σχήμα 5.53:Μετατόπιση στην αράχνη για 73620 Pa .....	155
Σχήμα 5.54:Καταπόνηση στην αράχνη για 73620 Pa .....	155
Σχήμα 5.55:Ισοδύναμη τάση στο πόδι για 51463 Pa .....	156
Σχήμα 5.56:Μετατόπιση στο πόδι για 51463 Pa .....	156
Σχήμα 5.57:Καταπόνηση στο πόδι για 51463 Pa .....	157

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 3.1:Συντελεστές m και εκθέτες n για διάφορα θερμοπλαστικά .....	47
Πίνακας 3.2:Συντελεστές μοντέλου Carreau-Yasuda .....	48
Πίνακας 3.3:Συνοπτική παρουσίαση μοντέλων .....	55
Πίνακας 5.1:Χαρακτηριστικά εκβολέα και παροχή .....	119
Πίνακας 5.2:Ιδιότητες χάλυβα 1.2738 .....	120
Πίνακας 5.3:Διατμητικές δυνάμεις στις ζώνη II .....	124
Πίνακας 5.4:Διατμητικές δυνάμεις στη ζώνη IV .....	124
Πίνακας 5.5:Διατμητικές δυνάμεις στις ζώνες για πίεση 100bar .....	126

---

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> - ΠΟΛΥΜΕΡΗ

---

*«Αν επρόκειτο να χαρακτηριστεί ο αιώνας μας από τα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο, όπως στο παρελθόν η εποχή του Λίθου και η εποχή του Χαλκού, θα έπρεπε να ονομαστεί αιώνας των Πολυμερών» (Guilio Natta)*

### 1.1 Η ιστορική εξέλιξη των πολυμερών

Τα πολυμερή αποτελούν τη βάση της δομής όλων των ζωντανών οργανισμών. Οι πρωτεΐνες και οι πολυσακχαρίτες, βασικά δομικά συστατικά των ζωικών και φυτικών κυττάρων και σπουδαιότατη πηγή τροφής πολλών ζωντανών οργανισμών, καθώς και τα νουκλεϊνικά οξέα που ελέγχουν την αναπαραγωγή των κυττάρων είναι πολυμερή. Ωστόσο η κατανόηση της δομής τους έγινε δυνατή μόλις το 1926, όταν ο πρώτος ο Hermann Staudinger απέδειξε ότι είναι ενώσεις που αποτελούνται από μακρίες και με τάξη οργανωμένες αλυσίδες (μακρομόρια) και όχι από κολλοειδή σωματίδια ή κυκλικές ενώσεις όπως πολλοί επιστήμονες πίστευαν προηγουμένα .

Η διευκρινισμένη δομή των πολυμερών επέτρεψε στη συνέχεια της μελέτη της επίδρασης της μακρομοριακής δομής στις ιδιότητες του υλικού και οδήγησε στην παρασκευή συνθετικών πολυμερών με προκαθορισμένες ιδιότητες, ώστε να δημιουργηθούν νέα υλικά για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων ειδικών αναγκών της αγοράς. Το γεγονός αυτό προκάλεσε επανάσταση στη σύγχρονη τεχνολογία. Η αγορά κατακλύστηκε από μία πληθώρα συνθετικών πολυμερών σε διάφορες μορφές, όπως πλαστικά, ίνες , ελαστομερή, επιχρίσματα και κόλλες, τα περισσότερα από τα οποία έχουν ιδιότητες, που δεν παρουσιάζει κανένα φυσικό υλικό.

Επομένως δεν είναι καθόλου υπερβολικός ο χαρακτηρισμός που έδωσε για το εικοστό αιώνα ο Ιταλός καθηγητής Guilio Natta: «Αν επρόκειτο να χαρακτηριστεί ο αιώνας μας από τα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο, όπως στο παρελθόν η

εποχή του Λίθου και η εποχή του Χαλκού, θα έπρεπε να ονομαστεί αιώνας των Πολυμερών». Ο Guilio Natta μαζί με τον Ελβετό συνάδελφο του Carl Ziegler τιμήθηκαν με το βραβείο Nobel της Χημείας 1963 για την πρωτοποριακή τους εργασία στον πολυμερισμό των ολεφινών και την παραγωγή του γραμμικού πολυαιθυλενίου και του πολυπροπυλενίου.

Πρίν το 1950 και στο απώτερο παρελθόν τα παραδοσιακά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για να καλύψουν τις ανάγκες της καθημερινής ζωής ήταν τα μέταλλα, το γυαλί, το ξύλο, η πέτρα, το τούβλο, το τσιμέντο ως συνδετική ύλη, ενώ το βαμβάκι, το μαλλί, και τα άλλα αγροτικά και κτηνοτροφικά προϊόντα αποτελούσαν την πρώτη ύλη για την παραγωγή ινών, υφασμάτων κ.α. Σήμερα κατακλυζόμαστε από μία πληθώρα νέων υλικών όπως συνθετικές ίνες, πλαστικές τσάντες, πλαστικά χρώματα, αφροί πολυουρεθάνης, έδρανα και διάφορα γρανάζια (οδοντωτοί τροχοί) από νάilon, μαγειρικά σκεύη επικαλυμμένα με τεφλόν φιλιμ συσκευασίας, συνθετικές κόλλες, βαλβίδες καρδιάς από σιλικόνη, τεχνητά δόντια και πολλά άλλα, ο πίνακας των εφαρμογών αυτών φαίνεται να μην έχει τέλος. Σε αρκετούς τομείς, τα νέα υλικά έχουν σχεδόν αντικαταστήσει πλήρως τα παραδοσιακά υλικά εξαιτίας βασικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν όπως οι μηχανικές αντοχές, η ελαστικότητα, το χαμηλό ειδικό βάρος, η αντοχή στη διάβρωση, η χαμηλή θερμική ηλεκτρική και ηχητική αγωγιμότητα και το χαμηλό κόστος. Ανατρέχοντας στο παρελθόν, η σχέση του ανθρώπου με τα πολυμερή θα μπορούσε να χωριστεί σε τρεις περιόδους :

➤ **Πρώτη περίοδος (πριν από το 1839)**

Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από τέλεια άγνοια του ανθρώπου για την ύπαρξη μακρομοριακών ενώσεων, παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιεί στην καθημερινή ζωή του φυσικά πολυμερή, όπως το βαμβάκι, λινό μαλλί, μετάξι, δέρμα, χαρτί, γυαλί, φυσικό ελαστικό (καουτσούκ) κ.α.

➤ **Δεύτερη περίοδος : ( 1839 – 1907)**

Το 1839 οι Goodyear και Hancock ανακαλύπτουν το βουλκανισμό του φυσικού ελαστικού και εγκαινιάζει μια νέα εποχή στην οποία ο άνθρωπος τροποποιεί τη δομή τη δομή φυσικών πολυμερών με σκοπό να τα μετατρέψει σε πολύτιμα τεχνολογικά

υλικά σύμφωνα με τις ανάγκες του, αγνοώντας ωστόσο πάντα τη μακρομοριακή τους δομή. Από το βουλκανισμό του φυσικού ελαστικού με μεγαλύτερες ποσότητες θείου (30%-50%) παρασκευάζεται λίγο αργότερα ο εβονίτης. Μια σκληρή ύλη, που χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα για αρκετά χρόνια και κατεργάζεται μόνο με τη βοήθεια κοπτικών εργαλείων όπως του τόννου κ.α. Την ίδια περίπου εποχή (Schonbein 1846) η μερική νίτρωση της κυτταρίνης επιτρέπει τη διαλυτοποίησή της σε μίγμα αλκοόλης – αιθέρα και την παρασκευή του κολλοδίου, που χρησιμοποιείται για την επίδεση τραυμάτων, ως στεγανωτικό υλικό, αλλά κυρίως, για την παρασκευή της πρώτης τεχνητής ίνας γνωστή ως Rayon (τεχνητό μετάξι) από τροποποιημένη κυτταρίνη (Chardonnet 1889). Επίσης με διάλυση μερικώς νιτρωμένης κυτταρίνης σε αλκοολικό διάλυμα καμφοράς παρασκευάζεται το πρώτο θερμοπλαστικό υλικό, ο **κελουλοϊτής** (cellouloid) ή πλαστικοποιημένη νιτρική κυτταρίνη (Hyatt, 1968). Λίγο αργότερα παρασκευάζεται η βισκόζη (αλκαλικό διάλυμα των ξανθογονικών εστέρων της κυτταρίνης) και μπαίνουν οι βάσεις της βιομηχανικής παραγωγής του μεταξιού με τη μέθοδο της βισκόζης. Ταυτόχρονα το τεχνητό μετάξι παρασκευάζεται και από το διάλυμα κυτταρίνης σε αμμωνιακό διάλυμα οξειδίου του χαλκού (χαλκοαμμωνιακή μέθοδος). Επίσης από τη βισκόζη, με εξώθηση της από τη λεπτή σχισμή και μορφοποίηση της σε φιλμ, λαμβάνεται η κελοφάνη ή σελοφάν (cellophane), το πρώτο υλικό συσκευασίας που παρασκεύασε ο άνθρωπος το (1924).

Την ίδια περίοδο, παρασκευάζονται νέες υφάνσιμες ίνες πρωτεϊνικής φύσεως (λανιτάλη) για την αντικατάσταση του μαλλιού, από αναγέννηση αλκαλικού διαλύματος της καζεΐνης του γάλακτος με οξίνιση (υγρή ινοποίηση). Οι ίνες αυτές στην συνέχεια κατεργάζονται με φορμαλδεΰδη, οπότε από την αντίδραση της φορμαλδεΰδης με τις αμινομάδες διαφορετικών μακρομορίων δημιουργούνται σταυροδεσμοί (μεθυλενικές γέφυρες) που αυξάνουν την αντοχή των ινών. Με ανάλογο τρόπο παρασκευάζεται από την καζεΐνη ο γαλάλιθος, σκληρό πλαστικό προϊόν, που χρησιμοποιείται σε αντικατάσταση του ελεφαντόδοντου για την κατασκευή κουμπιών, ζαριών, διαφόρων παιγνιδιών, κοσμημάτων κ.α.

Παρά τις σημαντικές αυτές ανακαλύψεις οι επιστήμονες αγνοούσαν παντελώς την ύπαρξη μακρομοριακών ενώσεων. Το 1861 ο T. Graham μελετώντας τη συμπεριφορά ορισμένων φυσικών πολυμερών σε διάλυμα, παρατήρησε ότι η συμπεριφορά ορισμένων φυσικών πολυμερών σε διάλυμα, παρατήρησε ότι αυτά δείχνουν πολύ χαμηλή σχεδόν αμελητέα ταχύτητα διάχυσης, δεν διαπερνούν ημιπερατές μεμβράνες και δεν μπορούν να κρυσταλλωθούν. Τα διαλύματα αυτά, που

δεν παρουσιάζουν τις συνηθισμένες ιδιότητες των διαλυμάτων, τα ονόμασε «κολλοειδή διαλύματα» ή απλώς «κολλοειδή» (από την ελληνική λέξη κόλλα) ενώ τα διαλύματα από τα οποία η διαλυμένη ουσία μπορεί να ληφθεί σε κρυσταλλική μορφή «κρυσταλλοειδή». Στα κολλοειδή διαλύματα τα μόρια της ουσίας ενώνονται μεταξύ τους με διαμοριακές δυνάμεις van der Waals και σχηματίζουν κολλοειδή σωματίδια διαστάσεων 1-1000nm. Αργότερα διαπιστώθηκε ότι κολλοειδή διαλύματα σχηματίζουν και άλλα υλικά, όπως ανόργανα άλατα, σωματίδια χρυσού, σάπωνες, ταννικό οξύ κ.α. των οποίων η δομή είναι τελείως διαφορετική από αυτή των φυσικών πολυμερών.

Πολλοί επιστήμονες πίστευαν λοιπόν τότε ότι το φυσικό ελαστικό, η κυτταρίνη το άμυλο και οι πρωτεΐνες είναι κολλοειδή. Αξίζει μάλιστα να σημειωθεί ότι χαρακτήριζαν την φυσική συσσωμάτωση των μορίων κατά ομάδες ως πολυμερισμό και το κολλοειδές σωματίδιο που προκύπτει ως πολυμερές (polymer από τις ελληνικές λέξεις πολύ και μέρος) εφόσον αποτελείται από πολλά μέρη. Ήταν πολύ δύσκολο να φανταστούν την εποχή εκείνη ότι τα μόρια μπορεί να ενώνονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς και να σχηματίζουν γιγαντιαία μόρια (μακρομόρια). Αυτό ήταν απόλυτα δικαιολογημένο, γιατί πριν την δουλειά του Raoult και του Van Hoff τη δεκαετία του 1880, δεν υπήρχαν μέθοδοι για τον προσδιορισμό του μοριακού βάρους της διαλυμένης ουσίας. Όταν αναπτύχθηκαν πειραματικές μέθοδοι και εφαρμόστηκαν σε δείγματα φυσικού ελαστικού και αμύλου, προσδιορίστηκαν μοριακά βάρη από 10.000 μέχρι 40.000. οι τιμές αυτές μαρτυρούσαν την ύπαρξη των μεγάλων μορίων, οι επιστήμονες όμως δεν δέχονταν αυτή την πιθανότητα για δύο κύριους λόγους. Πρώτον, διότι είχε παρατηρηθεί ότι όταν μία ένωση με τελείως διευκρινισμένη δομή βρεθεί σε κολλοειδή κατάσταση, το μοριακό βάρος που παρουσιάζει είναι πολύ μεγαλύτερο από το πραγματικό, άρα ο νόμος του Raoult δεν ισχύει για τα κολλοειδή συστήματα. Δεύτερον, τις δεκαετίες του 1890 και 1900 ήταν πολύ δημοφιλής η θεωρία των συμπλοκών συναρμογής και της συνένωσης των μικρών μορίων σε φυσικά συσσωματώματα.

### ➤ Τρίτη περίοδος (από το 1907 μέχρι και σήμερα)

Η εποχή αυτή χαρακτηρίζεται από την παρασκευή των πρώτων συνθετικών πολυμερών και την διευκρίνιση της δομής τους. Το 1907 ο Baekeland παρασκεύασε το πρώτο συνθετικό πολυμερές, με συμπύκνωση περίσσειας φαινόλης και

φορμαλδεΐδης σε όξινο περιβάλλον. Η συμπύκνωση της φαινόλης με τη φορμαλδεΐδη ήταν γνωστή στους οργανικούς χημικούς της εποχής εκείνης, δεν ήταν όμως γνωστή ή έννοια της δραστηριότητας (functionality), δηλαδή ότι η φαινόλη είναι τριδραστική ένωση, ενώ η φορμαλδεΐδη διδραστική. Η χρησιμοποίηση από τον Baekeland ελεγχόμενων ποσοτήτων φαινόλης – φορμαλδεΐδης, οι οποίες μάλιστα χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα, αποδεικνύει ότι γνώριζε τη δραστικότητα τους. Δεν υπάρχουν όμως αποδείξεις, που να βεβαιώνουν ότι γνώριζε και τη δομή του βακελίτη (bakelite), δηλαδή του προϊόντος που παρασκεύασε. Η Τρίτη περίοδος σηματοδεύτηκε στη συνέχεια από τρία συνέδρια στα οποία μπήκαν οι βάσεις για την ανάπτυξη της επιστήμης των πολυμερών. Το πρώτο έγινε το 1926 στο Ντίσελντορφ, όπου ο H. Staudinger απέδειξε την ύπαρξη των μακρομορίων. Τόση ήταν η εντύπωση που δημιούργησε στους εκατοντάδες συνέδρους, που κάποιος τόνισε: «Εντυπωσιαζόμαστε τόσο όσο θα συνέβαινε στους ζωολόγους, αν θα άκουγαν ότι κάπου στην Αφρική βρέθηκε ελέφαντας που έχει μήκος 500 και ύψος 200 μέτρα».

Από τότε χρειάστηκε να περάσει μία δεκαετία για να γίνει συνείδηση ή έννοια του μακρομόριου, οπότε το 1936 στο συνέδριο που έγινε στο Κέιμπριτζ όχι μόνο δεν υπήρξε αμφισβήτηση γύρω από την ύπαρξη των μακρομορίων, αλλά το μεγαλύτερο μέρος των εισηγήσεων αναφερόταν πλέον στη μελέτη του μηχανισμού των αντιδράσεων πολυμερισμού, σε μεθόδους προσδιορισμού του μοριακού βάρους, στην σύνθεση και μελέτη των ιδιοτήτων νέων πολυμερών και των πεδίων εφαρμογής τους. Στο συνέδριο αυτό ξεχώρισε η φυσιογνωμία του W. Carothers ο οποίος ανέπτυξε τα αποτελέσματα της δεκάχρονης ερευνητικής του δουλειάς στο πεδίο των πολυμερών.

Τέλος μία δεκαετία αργότερα, δηλαδή το 1947 η IUPAC οργάνωσε το πρώτο συνέδριο πολυμερών στη Λιέγη. Στο συνέδριο αυτό η Χημεία των Πολυμερών (Polymer Chemistry) καθιερώθηκε ο ξεχωριστός κλάδος της Χημείας.

Ωστόσο σήμερα αναγνωρίζεται ότι η Χημεία των Πολυμερών δεν αποτελεί απλά Κλάδο της παραδοσιακής Χημείας, αλλά μια ευρύτερη περιοχή της επιστήμης, η οποία περιλαμβάνει όλη τη Χημεία και αρκετά άλλα επιστημονικά πεδία αφού τα πολυμερή εκτός από χημικές ουσίες είναι ταυτόχρονα υλικά. Η επιστήμη των πολυμερών (polymer science) στηρίζεται στις αρχές της ανόργανης, οργανικής, φυσικής και αναλυτικής χημείας, αλλά και της φυσικής, μηχανικής και της βιολογίας. Ένας επιστήμονας για να ασχοληθεί με θέματα της επιστήμης των πολυμερών πρέπει να μπορεί να συνδυάσει γνώσεις από όλα τα παραπάνω πεδία που αναφέρθηκαν. Οι μακρομοριακές ενώσεις παρουσιάζουν ιδιότητες οι οποίες εμφανίζονται να αψηφούν

τους κλασσικούς νόμους της Χημείας και της Φυσικής. Η σύνθεση των πρώτων πολυμερών, ήταν υπόθεση ορισμένων εμπνευσμένων ερευνητών, όμως τα τελευταία τριάντα χρόνια η κατευθυνόμενη έρευνα για την παραγωγή νέων υλικών πραγματοποιείται στα μεγάλα βιομηχανικά ή ερευνητικά εργαστήρια εξαιτίας της ανάγκης παρασκευής νέων ειδών πλαστικών, ελαστικών, κολλητικών ουσιών, ινών και επιχρισμάτων (χρώματα, βερνίκια), ενώ η επιστήμη των πολυμερών εδραιώνεται στην ακαδημαϊκή κοινότητα αρκετά αργότερα. Η ανάπτυξη της επιστήμης των πολυμερών υπήρξε ραγδαία και συνέβαλε σημαντικά στην αλματώδη ανάπτυξη που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια στην «επιστήμη των υλικών» (materials science) καθώς επίσης στη βιοχημεία, βιοφυσική και μοριακή βιολογία .

## 1.2 Η επιστήμη των πολυμερών

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 περισσότερων 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 περισσότερων 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. Από το κάθε μονομερές προκύπτει μια ή περισσότερες μονάδες που συμμετέχουν στη δομή των μακρομορίων του αντίστοιχου πολυμερούς. Η επαναλαμβανόμενη χημική αντίδραση με την οποία τα μόρια ενός ή περισσότερων μονομερών ενώνονται προς το σχηματισμό του μορίου του πολυμερούς καλείται πολυμερισμός (polymerization).

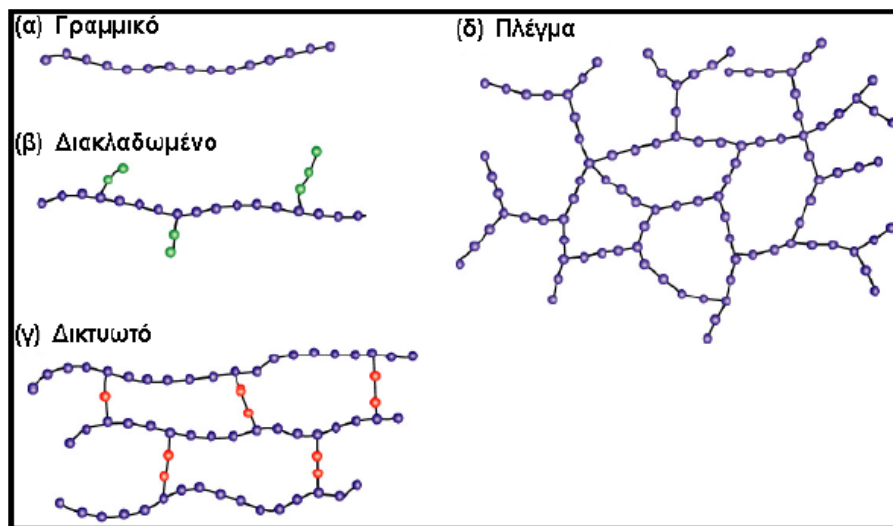
Ο αριθμός  $n$  των δομικών μονάδων που συμμετέχουν στη δομή του μορίου του πολυμερούς δηλαδή στην πολυμερική αλυσίδα καλείται βαθμός πολυμερισμού DP (degree of polymerization). Επειδή σε ένα δείγμα πολυμερούς τα μήκη των αλυσίδων συνήθως ποικίλουν σε μέγεθος στην πράξη χρησιμοποιείται ο μέσος

βαθμός πολυμερισμού  $\overline{DP}$  (average degree of polymerization). Ενώσεις με  $\overline{DP} < 10$  χαρακτηρίζονται ως ολιγομερή.

### 1.3 Ταξινόμηση των πολυμερών

#### 1.3.1 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ

Τα πολυμερή διακρίνονται σε γραμμικά (linear), διακλαδωμένα (branched) και δικτυωτά ή διασταυρωμένα (cross-linked). 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 δύσχηστα για συνήθεις εφαρμογές, για αυτό αναπτύχθηκαν στη συνέχεια τα ημισκαλωτά πολυμερή.



**Σχήμα 1.1:** Ταξινόμηση πολυμερών σύμφωνα με την πολυμερική αλυσίδα

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 (combllike 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.

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. 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 πολυεποξυδικές 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.

### 1.3.2 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 (πολυτερεφθαλικός αιθυλεστέρας). Στα

πολυμερή προσθήκης (addition polymers) οι μονομερείς μονάδες ταυτίζονται με τα μονομερή (πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο, πολυβινυλοχλωρίδιο, πολυστυρένιο) . Τα πολυμερή συμπύκνωσης προέρχονται από αντιδράσεις πολυσυμπύκνωσης (polycondensations), ενώ τα πολυμερή προσθήκης από αντιδράσεις προσθήκης (addition reactions).

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

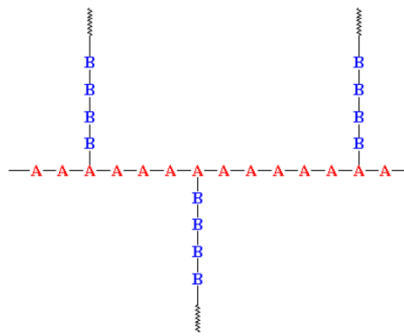
Τα πολυμερή των οποίων η αλυσίδα αποτελείται από ένα είδος ατόμων καλούνται ομοαλυσωτά και έχουν την ακόλουθη μορφή  $-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-$  π.χ πολυολεφίνες. Τα πολυμερή των οποίων η αλυσίδα αποτελείται από περισσότερα είδη ατόμων ονομάζονται ετεροαλυσωτά π.χ πολυαιθέρες. Τα συνηθέστερα ετεροάτομα που συναντάμε στο σχηματισμό της κύριας αλυσίδας είναι το οξυγόνο (O), το θείο (S) και το άζωτο (N) .

### 1.3.4 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 πολυπροπυλένιο 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-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 1.2: Εναρμονισμένο συμπολυμερές

### 1.3.5 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.

### 1.3.6 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, πολυαιθυλένιο 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 .

### 1.3.7 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 .

### 1.3.8 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:*

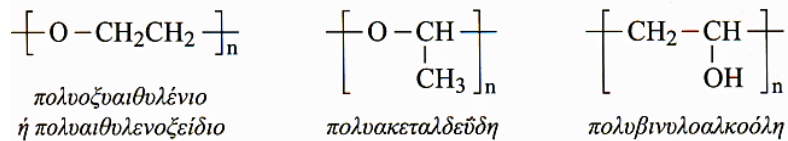
- ✦ **Θερμοπλαστικά ή πλαστομερή ή πλαστικά (thermoplastics):** Αποτελούνται συνήθως από γραμμικά μακρομόρια. Με θέρμανση μαλακώνουν και μετατρέπονται σε ρευστά (χαλάρωση των μοριακών δεσμών), διατηρούν δε την κατάσταση αυτή όσο χρόνο διαρκεί η επίδραση της θερμότητας και στη συνέχεια μπορούν εύκολα 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
- ✦ **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, άτηκτα και δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, παράγονται δε με πολυμερισμό συμπύκνωσης. Στα εν λόγω πολυμερή συχνά παρατηρείται το φαινόμενο της διόγκωσης (swell).
- ✦ **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

υπερπλαστικότητα 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 καοτσούκ, το συνθετικό πολυϊσοπροπένιο, οι σιλικόνες κ.λπ.

## 1.4 Η δομή των μακρομορίων ενός πολυμερούς

### 1.4.1 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.



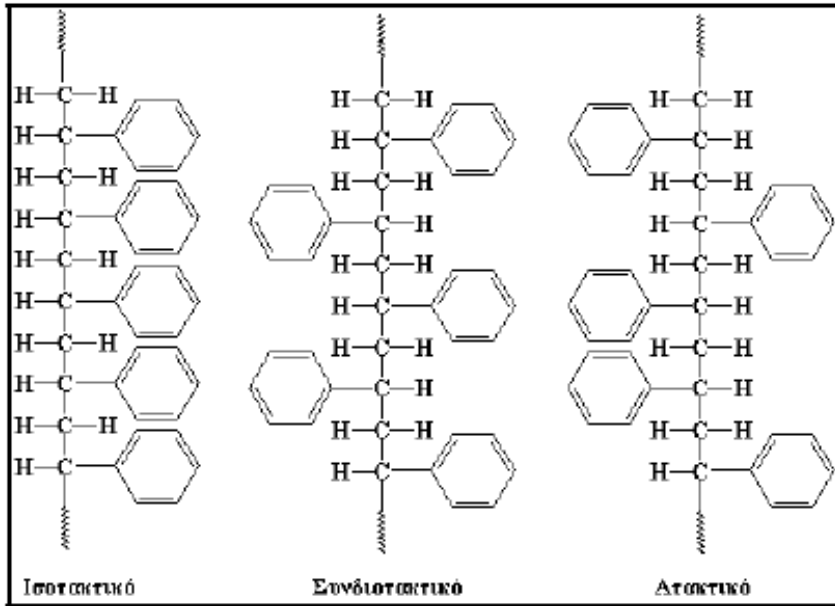
**Σχήμα 1.3:** Συντακτική Ισομέρεια

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.

### 1.4.2 ΣΤΕΡΕΟΙΣΟΜΕΡΕΙΑ

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



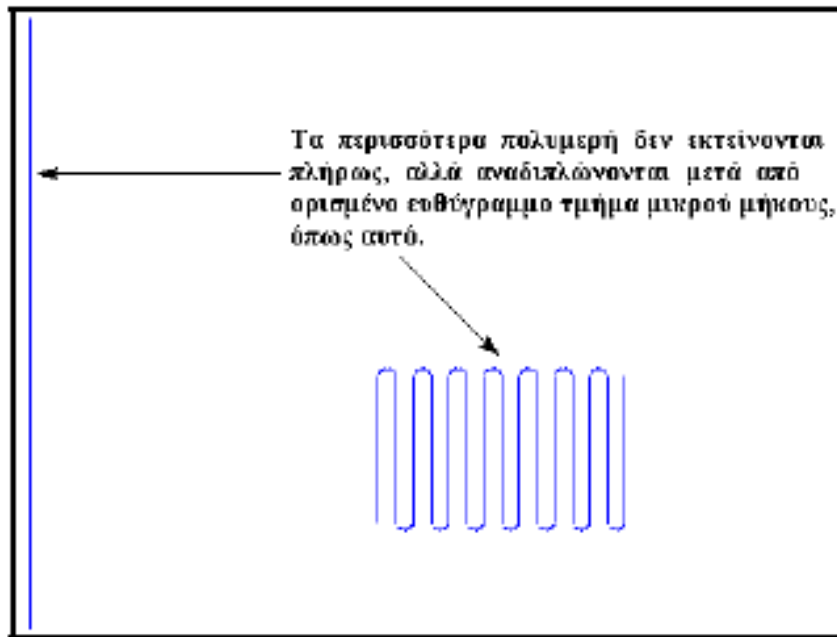


Σχήμα 1.5:Είδη τακτικότητας

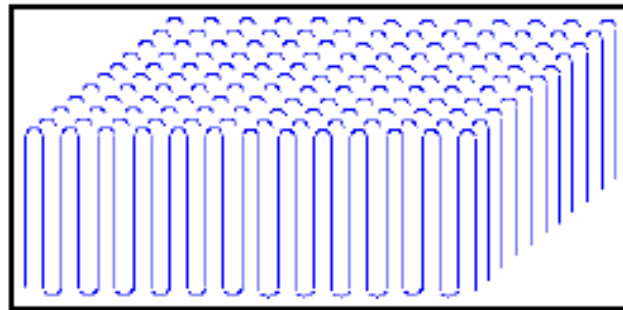
### 1.5 Κρυσταλλικότητα

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 λίκν υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο και ορισμένα αραμίδια (Kevlar, Nomex κλπ). Τα περισσότερα πολυμερή εκτείνονται σε μικρό διάστημα και στη συνέχεια αναδιπλώνονται ενώ παράλληλα σχηματίζουν στοίβες τέτοιων αλυσίδων που καλούνται λαμέλλες (lamella).





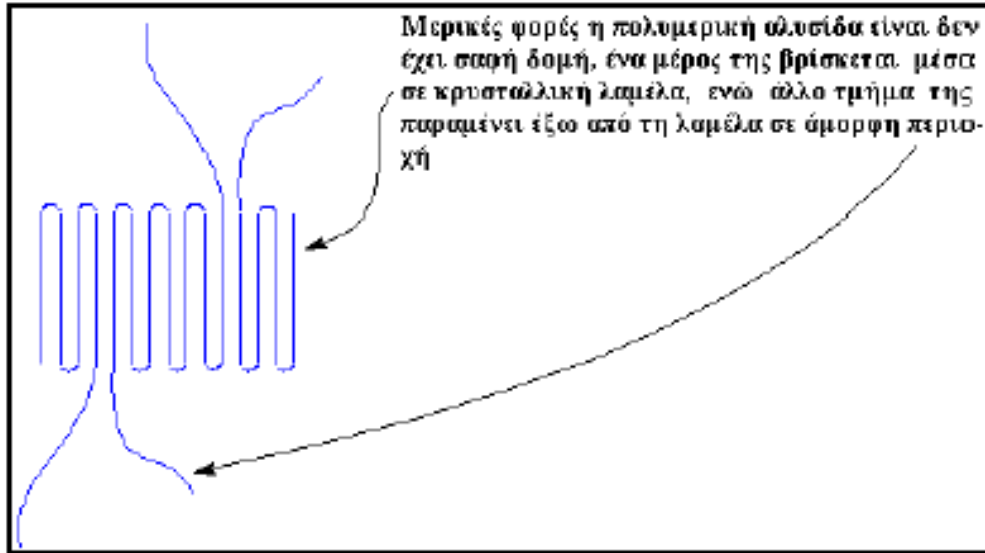
**Σχήμα 1.6:** Αναδίπλωση πολυμερικής αλυσίδας



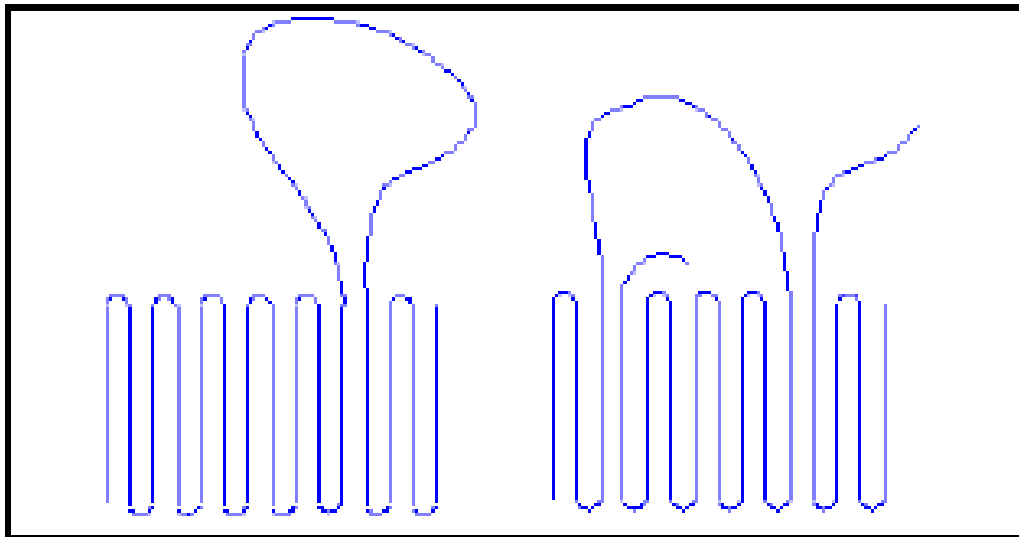
**Σχήμα 1.7:** Λαμέλλα πολυμερούς

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 επαναισέρχονται 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 επανεισόδου (adjacent re-entry model) ενώ στη δεύτερη ως μοντέλο διακόπτη (switchboard model) .



Σχήμα 1.8:Μη τακτική διάταξη λαμέλλας



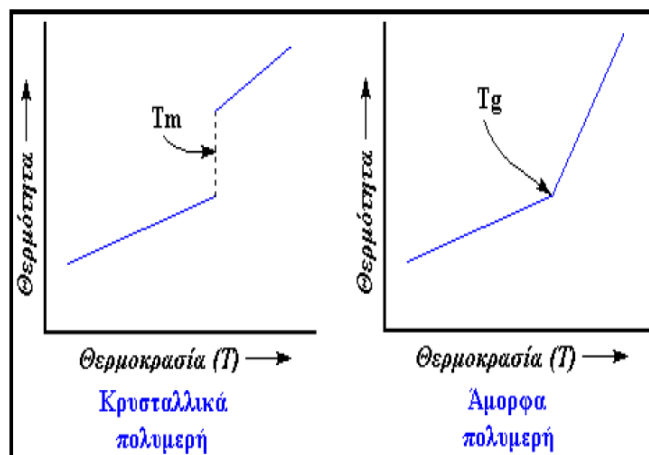
Σχήμα 1.9:Adjacent re-entry model και switchboard model

## 1.5.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΤΗΤΑ

### 1. 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 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 εξωδοελαστική 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.

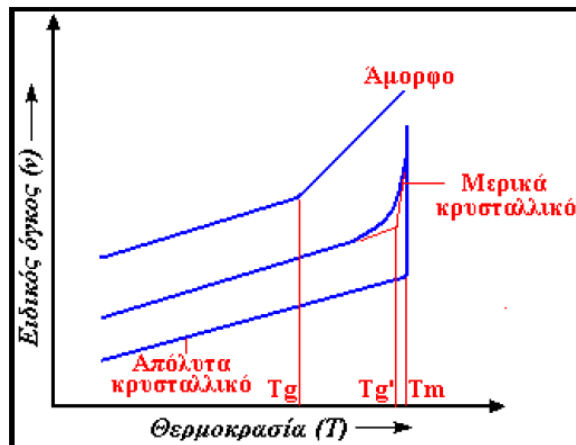


Σχήμα 1.10: Απόψυξη τήγματος πολυμερών

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 Tg.
- Απο τις προστιθέμενες ομάδες στη βασική αλυσίδα (η προσθήκη έστω και μικρής ομάδας στη βασική αλυσίδα αυξάνει την Tg ενώ η αύξηση του μήκους πλευρικής διακλάδωσης οδηγεί σε μείωση της Tg) .



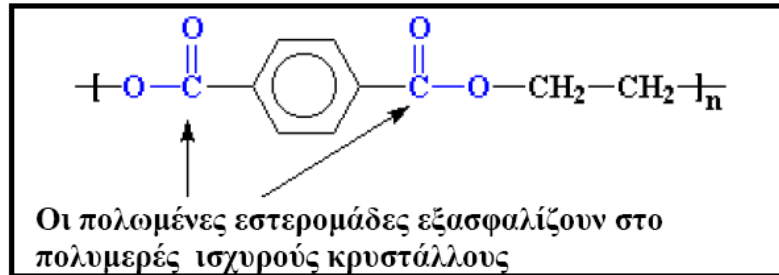
**Σχήμα 1.11:**Επίδραση του βαθμού κρυσταλλικότητας στη θερμοκρασία ναλώδους μετάπτωσης

## 2. 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.

### 3. ΟΙ ΕΝΔΟΜΟΡΙΑΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

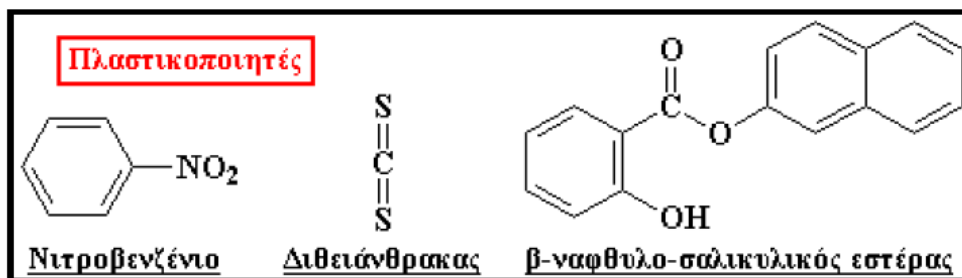
Οι ενδομοριακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα διάφορα είδη χημικών δεσμών του πολυμερούς συνεισφέρουν σε σημαντικό βαθμό στο σχηματισμό κρυστάλλων,



Σχήμα 1.12: Ισχυροί δεσμοί των πολωμένων εστερομάδων στους πολυεστέρες

### 4. ΟΙ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΤΕΣ

Ο προορισμός του πλαστικοποιητή είναι η μείωση της Tg. 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 Tg του πολυμερούς μειώνεται δραστικά και η κατεργασιμότητα αυξάνεται εντυπωσιακά. Συνήθεις πλαστικοποιητές είναι αυτοί του σχήματος που ακολουθεί.



Σχήμα 1.13: Συνήθεις πλαστικοποιητές

## 1.6 Πολυμερισμός

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 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
- Στο αλυσιδωτό πολυμερισμό (chain polymerization)

### **1.7 Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High Density Polyethylene, HD-PE)**

Δεδομένου ότι το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας αποτελεί εν μέρει αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αυτής θα προβούμε σε μια σύντομη αναφορά στις ιδιότητες αυτού. Αναλυτικότερα το HDPE 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% συμμοномерούς (α-ολεφίνη). 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.

## **Βιβλιογραφία 1<sup>ου</sup> κεφαλαίου**

---

- i. Μανωλάκος Δημήτριος, Σημειώσεις στο μάθημα «Προηγμένα Υλικά» 9<sup>ου</sup> εξαμήνου Σχολής Μηχανολόγων Ε.Μ.Π , (users.ntua.gr/manolako) (2007)
- ii. Γ.Καραγιαννίδης, Ε.Σιδερίδου, «Χημεία των Πολυμερών» Β' Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη (2006).
- iii. Μισσού Ελευθερία, «Αναλυτική και αριθμητική προσομοίωση εκβολής πλαστικών σωλήνων», Διπλωματική Εργασία (2008)
- iv. Tim.A.Osswald,George Menges, “Materials Science of Polymers for Engineers”,Hanser Publisher,New York.
- v. Timor Z. and COG. Gobos, “Principles of Polymer Processing”, Wiley, New York (1979).
- vi. O’Brien KIT. “Application of Computer Modelling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes”, Hanger Publishers, Munich (1992).
- vii. Michaeli Walter, “Extrusion Dies”, Hager, Munch (1992).
- viii. Rauwendaal C., “Polymer Extrusion”, Hanser, Munich (1986).



---

## Κεφάλαιο 2° - Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

---

### 2.1 Εισαγωγή

Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη ρευστοδυναμική μελέτη και τον έλεγχο της αντοχής κεφαλής που προορίζεται για την παραγωγή πλαστικών σωλήνων από πολυαιθυλένιο (θερμοπλαστικό πολυμερές) κρίνεται σκόπιμη στο σημείο αυτό μια σύντομη αναφορά στους πλαστικούς σωλήνες από θερμοπλαστικό πολυμερές

Η χρήση των πλαστικών σωλήνων ξεκίνησε το 1935 καθαρά για εμπορικούς σκοπούς. Ωστόσο η ανάγκη για τη δημιουργία προϊόντων από νέα υλικά κυρίως μετά το τέλος του 2<sup>ου</sup> παγκόσμιου πολέμου οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών νέων για την εποχή πολυμερικών υλικών όπως το πολύ-βινυλο-χλωρίδιο και το πολυαιθυλένιο στο οποίο αναφερθήκαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σε περίπου σαράντα χρόνια μετά το τέλος του πολέμου εκατό και πλέον πολυμερικά υλικά για την παραγωγή σωλήνων και εξαρτημάτων αυτών δημιουργήθηκαν προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες για την ανοικοδόμηση των κατεστραμμένων από τον πόλεμο οικημάτων. Στη φάση εκείνη τα πολυμερή υλικά κέρδισαν το ενδιαφέρον των μηχανικών και των επιστημόνων και αντικατέστησαν σταδιακά υλικά που χρησιμοποιούνταν επί δεκαετίες. Οι σωλήνες χαλκού αντικαταστάθηκαν από πλαστικούς σωλήνες PVC ή PE και πίσω από αυτή την αλλαγή κρύβονται πολλοί και σημαντικοί λόγοι. Πρώτον το κόστος των πλαστικών σωλήνων είναι κατά πολύ χαμηλότερο από αυτό των μεταλλικών ενώ η αντοχή τους έναντι της διάβρωσης πολύ μεγάλη. Παράλληλα η διαθεσιμότητα των πλαστικών σωλήνων στην αγορά είναι μεγάλη ενώ η βιομηχανία των πλαστικών σωλήνων μπορεί να αντιδρά άμεσα στην παραγωγή προϊόντων με

χαμηλό κόστος. Σήμερα οι σωλήνες από πλαστικό ικανοποιούν οποιαδήποτε ανάγκη υπάρχει στην φαρμακευτική και χημική βιομηχανία αλλά και στη βιομηχανία των κατασκευών γενικότερα .

Υπάρχουν πολλά θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή που δεν ενδείκνυνται για την κατασκευή σωλήνων. Ωστόσο υπάρχουν χιλιάδες άλλα πολυμερή των κατηγοριών αυτών με διαφορετικές ιδιότητες το καθένα που χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραγωγή πλαστικών σωλήνων όπως το πολυαιθυλένιο για το οποίο θα μιλήσουμε παρακάτω.

## 2.2 Σωλήνες από θερμοπλαστικά πολυμερή

Το 95% περίπου των θερμοπλαστικών πολυμερών προορίζεται για την παραγωγή σωλήνων. Την κυρίαρχη θέση κατέχει το πολυαιθυλένιο ενώ ακολουθεί το PVC. Οι σπουδαιότεροι λόγοι που συντείνουν στην εξάπλωση της χρήση σωλήνων από θερμοπλαστικά πολυμερή είναι οι ακόλουθοι :

- ✦ Η μειωμένη απώλεια θερμότητας που συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους κυρίως στις βιομηχανίες .
- ✦ Η αντοχή έναντι στην διάβρωση.
- ✦ Η αντοχή έναντι στα χημικά.
- ✦ Η μεγάλη διάρκεια ζωής .
- ✦ Η ευκολία στην συναρμολόγηση.
- ✦ Η ποικιλία των μεθόδων σύνδεσής τους.
- ✦ Η μικρή τους αντίσταση έναντι της ροής ρευστών.
- ✦ Το χαμηλό κόστος.

Ωστόσο υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα όπως η ευαισθησία τους έναντι υψηλών θερμοκρασιών και η μειωμένη αντοχή τους συγκριτικά με τα υπόλοιπα μεταλλικά υλικά.

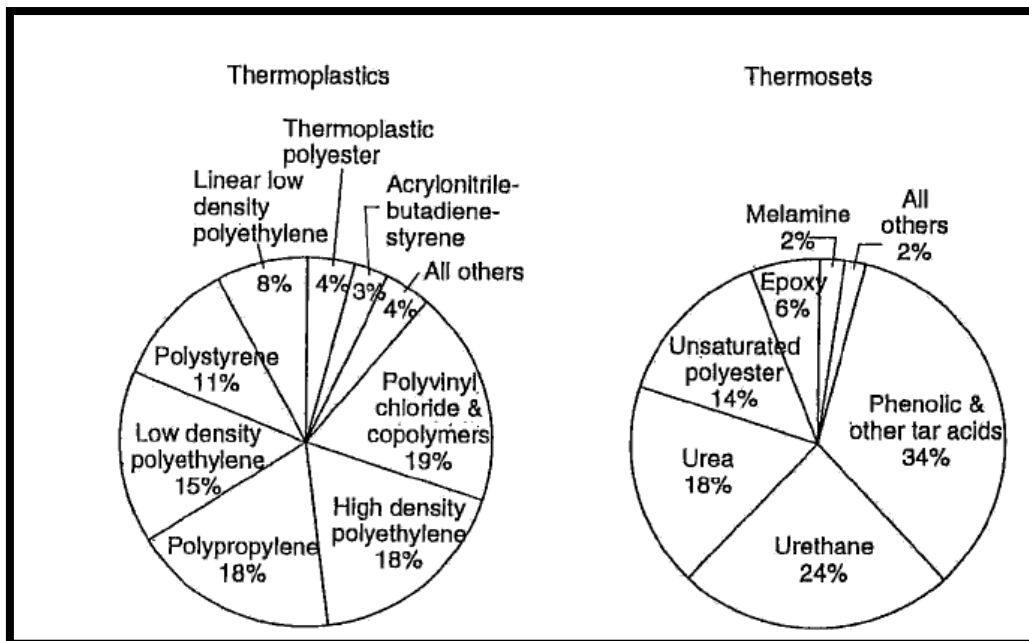


**Σχήμα 2.1:** Διάφορα είδη πλαστικών σωλήνων από HDPE

### **2.3 Παρουσίαση στατιστικών στοιχείων για την παραγωγή και τη χρήση πολυμερών**

Τα πάνω από 18.000 διαφορετικά είδη πολυμερών που υπάρχουν σήμερα μπορούμε να τα διαχωρίσουμε σε δύο μεγάλες κατηγορίες . Στα θερμοπλαστικά και στα θερμοσκληρυνόμενα. Εκτενής αναφορά στις δυο αυτές κατηγορίες γίνεται στο κεφάλαιο της επιστήμης των πολυμερών. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της τελευταίας εικοσαετίας είναι γνωστό ότι κατά το έτος 1993 η παραγωγή

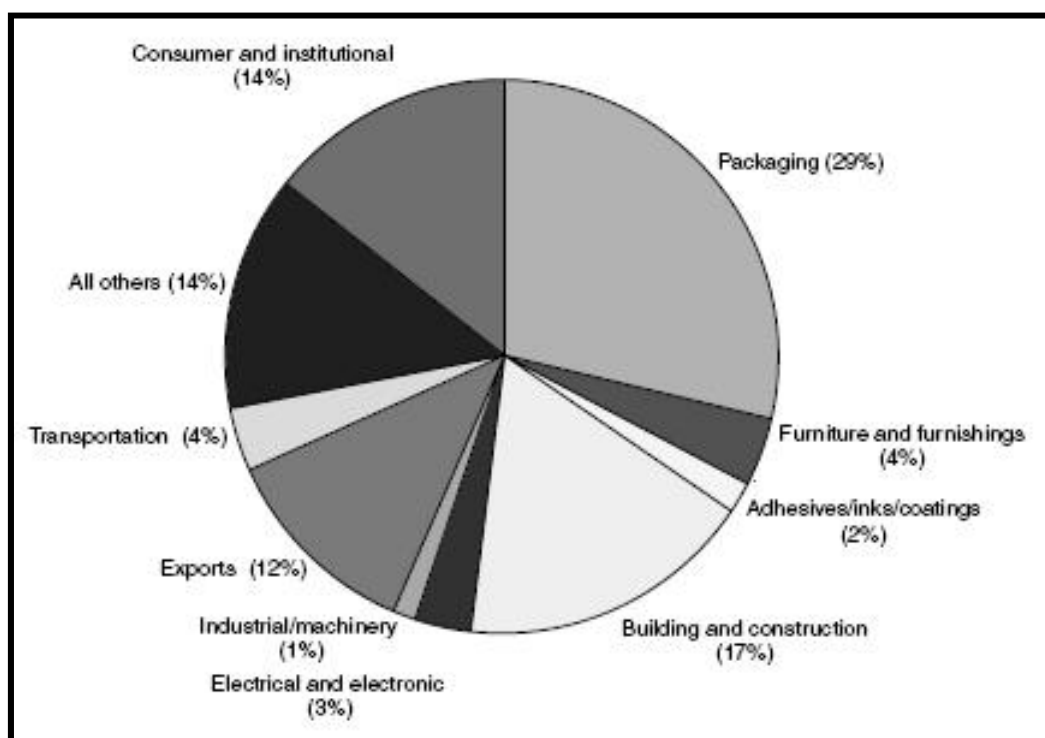
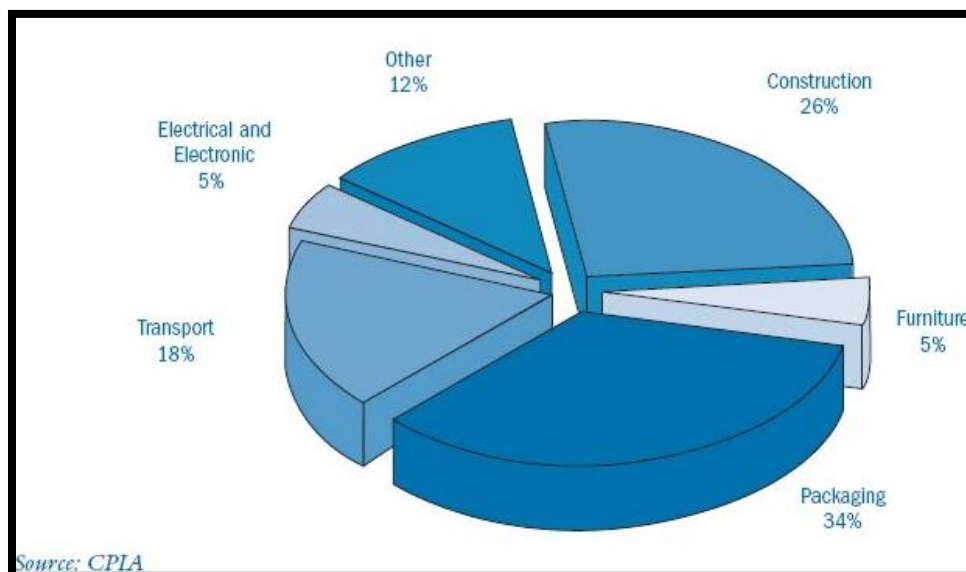
θερμοπλαστικών καλύπτει το 90% της συνολικής παραγωγής πολυμερών ενώ δύο χρόνια αργότερα το 1995 η παραγωγή αυτή μειώνεται στο 83%. Στο γράφημα 2.2 που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή της παραγωγής θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών στις Η.Π.Α. Το μεγαλύτερο κομμάτι της παραγωγής των θερμοπλαστικών περίπου το 32% χρησιμοποιείται στη βιομηχανία της συσκευασίας ενώ σχεδόν το ήμισυ του παραπάνω ποσοστού δηλαδή 14% χρησιμοποιείται στη βιομηχανία των κατασκευών και μόλις το 4% χρησιμοποιείται στο εξοπλισμό μεταφορικών μέσων. Από την άλλη μεριά το 69% της παραγωγής των θερμοσκληρυνόμενων υλικών χρησιμοποιείται στους τομείς των κατασκευών κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων και ακολουθεί το 8% της παραγωγής των το θερμοσκληρυνόμενων που καλύπτει τις ανάγκες του κλάδου των μεταφορών.



Σχήμα 2.2: Διαχωρισμός της παραγωγής πολυμερών σε κατηγορίες

Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή πολυμερών παρουσιάζει μια σταθερά ανοδική πορεία από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα μέχρι σήμερα. Το διάγραμμα του σχήματος 2.2 παρουσιάζει την αύξηση της ετήσιας παραγωγής πολυμερών σε εκατομμύρια τόνου. Στις αναπτυγμένες χώρες η παραγωγή πολυμερών έχει συναντήσει μια σχετικά μικρή μείωση παρ' όλα αυτά στις αναπτυσσόμενες χώρες τις

Ασίας και της Νοτίου Αφρικής η αύξηση της παραγωγής των πολυμερών λαμβάνει γιγαντιαίες διαστάσεις.



Σχήμα 2.3: Διαχωρισμός των πολυμερών ανάλογα με τη χρήση τους

## ***Βιβλιογραφία 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου***

---

- i. Thomas Sixsmith, Reinhard Hanselka, “Handbook of thermoplastic piping system design”, Mc Graw Hill Handbooks, U.S.A (1992)
- ii. Tim.A.Osswald,George Menges,“Materials Science of Polymers for Engineers”, Hanser Publisher, New York (1998)
- iii. The Resin Review: “The Annual Report of the U.S. Plastics Industry”, (2002)
- iv. (<http://www.americanplasticscouncil.org/benefits/economic/economic.html>)
- v. David Willoughby, “Plastic piping handbook”, Digital Engineering Library@Mc Graw-Hill, U.S.A (2004)
- vi. Mehdi Farshad, “Plastic pipe systems failure investigation and diagnosis”, Swiss Federal Laboratories for Materials, Switzerland (2006)
- vii. John Wiley & Sons “Encyclopedia of Polymer Science and Technology”, U.S.A (2000)

---

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> - Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ

---

### 3.1 Εισαγωγή

Η ρεολογία είναι το πεδίο της επιστήμης που μελετά τη συμπεριφορά του ρευστού και την επαγόμενη από τη ροή παραμόρφωση. Τα τήγματα των πολυμερών υπόκεινται σε διατμητική παραμόρφωση, είναι ελαστικά και κολλώδη και οι παράμετροι ροής τους είναι άμεσα εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία. Το ιξώδες είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη παράμετρος κατά το προσδιορισμό της συμπεριφοράς των πολυμερών σε μια διαδικασία εκβολής αφού στην πλειοψηφία των διαδικασιών εκβολής πολυμερών κυριαρχεί η εμφάνιση διατμητικών τάσεων.

### 3.2 Βασικές αρχές της ρεολογίας

Το ιξώδες αποτελεί την χαρακτηριστική ιδιότητα ενός ρευστού που αντιπροσωπεύει την αντίστασή του στη ροή. Είναι γνωστό ότι τα ρευστά παραμορφώνονται συνεχώς όταν υφίστανται την επίδραση των διατμητικών τάσεων. Οι σχέσεις που συνδέουν τις ιξώδεις τάσεις με τους αντίστοιχους ρυθμούς παραμόρφωσης των ρευστών ονομάζονται υλικές σχέσεις. Η μαθηματική έκφραση των σχέσεων αυτών σε συμβολισμό Gibbs είναι η εξής:

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \quad (3.1)$$

όπου  $\tau$  είναι ο δυαδικός ιξώδους τάσης και  $\dot{\gamma}$  ο δυαδικός ρυθμός παραμόρφωσης. Σε συμβολισμό δεικτών η σχέση (3.1) γράφεται:  $\tau_{ij} = f(\dot{\gamma}_{ij})$  (3.2) όπου  $\tau_{ij}$  και  $\dot{\gamma}_{ij}$  είναι οι συνιστώσες των δυαδικών  $\tau$  και  $\dot{\gamma}$ . Η αναλυτική μορφή της σχέσης (3.1) εξαρτάται από τη φύση του ρευστού και για δεδομένο ρευστό είναι ορισμένη. Γενικά οι υλικές σχέσεις των ρευστών είναι αρκετά πολύπλοκες αλλά για τα συνήθη ρευστά είναι

σχετικά απλές . Με βάση τη μορφή της υλικής σχέσης, τα ρευστά ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες τα Νευτωνικά και τα Μη Νευτωνικά .

### 3.3 Νευτωνικά ρευστά

Νευτωνικά ονομάζονται τα ρευστά εκείνα στα οποία η εξάρτηση της ιξώδους τάσης από το ρυθμό παραμόρφωσης του ρευστού είναι γραμμική. Η απλούστερη μορφή υλικής σχέσης στην οποία υπακούουν τα νευτωνικά ρευστά είναι ο νόμος ιξώδους του Newton από όπου προέρχεται και η ονομασία τους. Γενικά νευτωνική συμπεριφορά εμφανίζουν τα αέρια, τα περισσότερα από τα συνήθη υγρά και τα διαλύματα ουσιών μικρού μοριακού βάρους. Τα πιο κοινά νευτωνικά ρευστά είναι το νερό και ο αέρας. Το χαρακτηριστικό των νευτωνικών ρευστών είναι ότι το ιξώδες αποτελεί για αυτά πραγματική ιδιότητα, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη μοριακή φύση και την κατάσταση (πίεση, θερμοκρασία) στην οποία βρίσκεται το ρευστό.

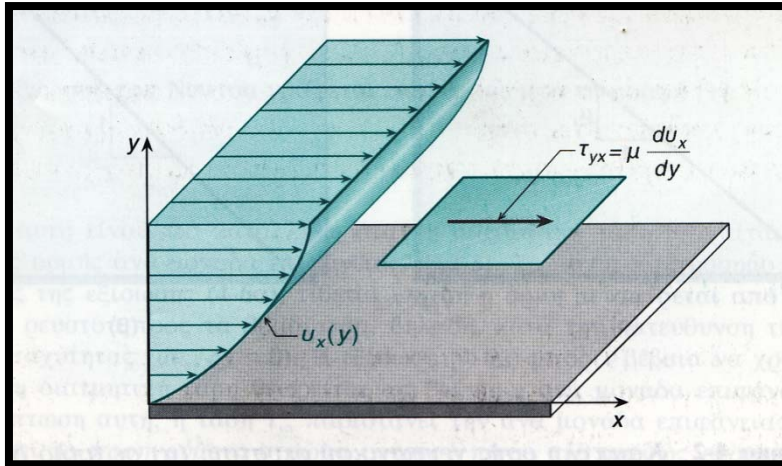
#### 3.3.1 ΝΟΜΟΣ ΙΞΩΔΟΥΣ ΤΟΥ NEWTON

Νόμος ιξώδους του Newton ονομάζεται η υλική σχέση η οποία περιγράφει τη ρεολογική συμπεριφορά των νευτωνικών ρευστών στην ειδική περίπτωση στρωτής μονοδιάστατης ροής. Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι στην περίπτωση αυτή ο λόγος της ιξώδους διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται σε ένα σημείο του πεδίου ροής προς τον αντίστοιχο ρυθμό γωνιακής παραμόρφωσης είναι ίσος με το δυναμικό ιξώδες του ρευστού:

$$\boxed{(\text{Ιξώδης διατμητική τάση}) / (\text{Ρυθμός γωνιακής παραμόρφωσης}) = \text{Ιξώδες}} \quad (3.3)$$

Ας θεωρήσουμε τη στρωτή ροή ενός νευτωνικού ρευστού το οποίο κινείται πάνω από μια ακίνητη επίπεδη πλάκα όπως στο Σχήμα 3.1 .





**Σχήμα 3.1:** Στρωτή και μονοδιάστατη ροή Νευτωνικού Ρευστού πάνω σε πλάκα

Λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της ταχύτητας  $u_x(y)$  σε κάθε σημείο του πεδίου ροής αναπτύσσεται μια διατμητική τάση  $\tau_{yx}$  η οποία σύμφωνα με τη σχέση 3.3 είναι ίση με το γινόμενο του ιξώδους  $\mu$  επί τον τοπικό ρυθμό γωνιακής παραμόρφωσης  $\dot{\gamma}_{yx}$  του ρευστού:  $\tau_{yx} = \mu \dot{\gamma}_{yx}$  (3.4). Ο ρυθμός παραμόρφωσης  $\dot{\gamma}_{yx}$

δίνεται από την εξίσωση:  $\dot{\gamma}_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$  (3.5) η οποία για τη μονοδιάστατη x-ροή

του Σχήματος 3.1 γράφεται:  $\dot{\gamma}_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y}$  (3.6). Δηλαδή ο τοπικός ρυθμός γωνιακής

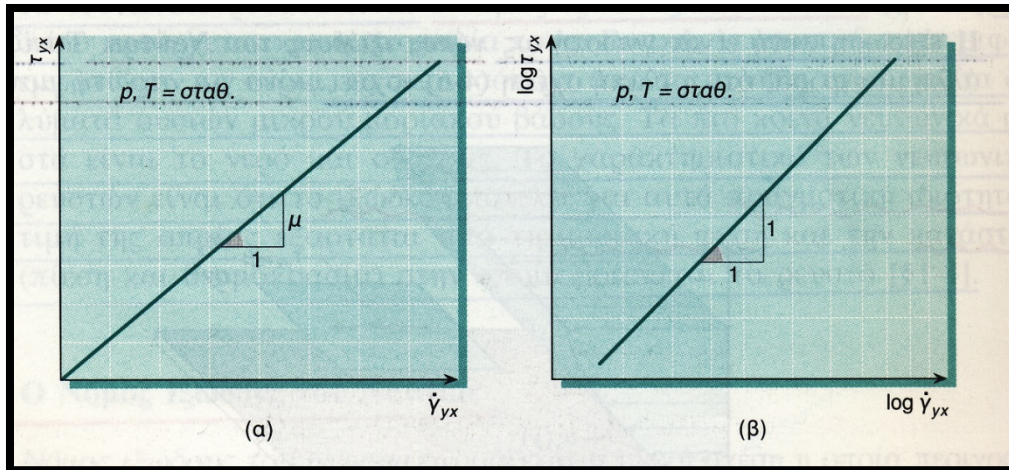
παραμόρφωσης  $\dot{\gamma}_{yx}$  του ρευστού είναι ίσος με την τοπική κλίση της καμπύλης  $u_x(y)$

της ταχύτητάς του. Λόγω της εξίσωσης (3.5) η εξίσωση (3.4) γράφεται:  $\tau_{yx} = \mu \frac{\partial u_x}{\partial y}$

(3.7). Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως νόμος ιξώδους του Newton και ισχύει μόνο για στρωτή, μονοδιάστατη ροή νευτωνικού ρευστού. Όταν η βαθμίδα ταχύτητας σε ένα σημείο του πεδίου ροής είναι μηδέν τότε και η αντίστοιχη διατμητική τάση που αναπτύσσεται σε εκείνο το σημείο είναι μηδέν, δηλαδή:  $\tau_{yx} = 0$  όταν  $\frac{\partial u_x}{\partial y} = 0$  (3.8).

Αυτό συμβαίνει όταν η καμπύλη κατανομής της ταχύτητα εμφανίζει στο θεωρούμενο σημείο ακρότατο ή σημείο καμπής. Αν η εξίσωση (3.8) ισχύει σε κάθε σημείο του πεδίου ροής τότε το ρευστό κινείται με ομοιόμορφη ταχύτητα όπως συμβαίνει στην περιοχή έξω από το οριακό στρώμα ή όταν πρόκειται για ιδανικό ρευστό. Προφανώς η εξίσωση (3.8) ισχύει σε κάθε περίπτωση ακίνητου ρευστού. Η καμπύλη γραμμή που παριστάνει την εξάρτηση της διατμητικής τάσης από το ρυθμό γωνιακής παραμόρφωσης ονομάζεται καμπύλη ροής και το διάγραμμα διατμητικής τάσης-

ρυθμού γωνιακής παραμόρφωσης βασικό ρεολογικό διάγραμμα. Η καμπύλη ροής ενός νευτωνικού ρευστού (σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση) είναι ευθεία γραμμή και όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 διέρχεται από την αρχή των αξόνων  $\tau_{yx}$  και  $\dot{\gamma}_{yx}$ . Η κλίση της γραμμής αυτής είναι ίση με το ιξώδες  $\mu$  του ρευστού (στις δεδομένες συνθήκες P και T). Σε λογαριθμικό διάγραμμα η καμπύλη ροής των νευτωνικών ρευστών είναι επίσης ευθεία γραμμή αλλά με κλίση ίση με 1.



**Σχήμα 3.2:** Καμπύλη ροής νευτωνικού ρευστού (α) σε απλό διάγραμμα και (β) σε λογαριθμικό διάγραμμα

### 3.3.2 ΣΧΕΣΕΙΣ ΙΞΩΔΟΥΣ ΤΟΥ STOKES

Ο Stokes επέκτεινε τα όρια της σχέσης (3.3) και σε τρισδιάστατη ροή. Έτσι, κάθε ιξώδης διατμητική τάση,  $\tau_{ij}$ , που αναπτύσσεται σε ένα σημείο του χώρου κατά την στρωτή τρισδιάστατη ροή νευτωνικών ρευστών είναι ίση με το γινόμενο του ιξώδους  $\mu$  επί τον αντίστοιχο τοπικό ρυθμό γωνιακής παραμόρφωσης  $\dot{\gamma}_{ij}$  του ρευστού:

$$\tau_{ij} = \mu \dot{\gamma}_{ij} \quad \forall i \neq j \quad (3.9)$$

Ο ρυθμός παραμόρφωσης  $\dot{\gamma}_{ij}$  δίνεται από την εξίσωση:  $\dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$  (3.10) οπότε η

$$\text{εξίσωση (3.9) γράφεται: } \tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \forall i \neq j \quad (3.11).$$

Αν στην τελευταία εξίσωση θέσουμε όλες τις δυνατές τιμές (x, y και z) των ελεύθερων δεικτών i, j προκύπτουν οι υλικές σχέσεις:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (3.11 \alpha)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (3.11 \beta)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \quad (3.11 \gamma)$$

Η μορφή των υλικών σχέσεων που συνδέουν τις κάθετες ιξώδεις τάσεις με τους αντίστοιχους ρυθμούς γωνιακής παραμόρφωσης είναι :

$$\tau_{xx} = 2\mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \left( \kappa - \frac{2}{3}\mu \right) \text{div}u \quad (3.11 \delta)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \left( \kappa - \frac{2}{3}\mu \right) \text{div}u \quad (3.11 \epsilon)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \left( \kappa - \frac{2}{3}\mu \right) \text{div}u \quad (3.11 \sigma\tau)$$

όπου  $\text{div}u$  είναι η απόκλιση του ανύσματος  $u$  της ταχύτητας και  $\kappa$  το διαστολικό ιξώδες του ρευστού. Η αναλυτική έκφραση της απόκλισης της ταχύτητας  $u$  σε καρτεσιανές συντεταγμένες είναι :  $\text{div}u = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$  (3.12).

Το διαστολικό ιξώδες εμφανίζεται σε ρευστά τα μόρια των οποίων , εκτός από μεταφορική, εκτελούν και περιστροφική κίνηση γύρω από τους άξονες συντεταγμένων του συστήματος αναφοράς ή/και παλμικές κινήσεις (δηλαδή τα μόρια των ρευστών αυτών έχουν εσωτερικούς βαθμούς ελευθερίας περιστροφικούς ή/και ταλάντωσης). Επομένως τα μονατομικά ρευστά έχουν μηδενικό διαστολικό ιξώδες. Όμως υπάρχουν και περιπτώσεις ροής όπου το πρώτο είναι μεγαλύτερο από το δεύτερο. Η τιμή του διαστολικού ιξώδους προσδιορίζεται πειραματικά ή υπολογίζεται με τη βοήθεια αναλυτικών σχέσεων. Οι εννέα υλικές σχέσεις (3.11 α-στ) είναι γνωστές ως σχέσεις ιξώδους του Stokes. Από τις σχέσεις αυτές (και εφόσον ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις που απαιτούνται για την εφαρμογή του) μπορούμε να υπολογίσουμε τις ιξώδεις τάσεις σε κάθε σημείο του πεδίου ροής , αν είναι γνωστή η αναλυτική έκφραση της συνάρτησης του πεδίου ταχύτητας .

### 3.3.3 ΝΟΜΟΣ ΙΞΩΔΟΥΣ NEWTON-POISSON

Οι σχέσεις ιξώδους του Stokes αποτελούν συνιστώσες της εξίσωσης:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} + \left[ \left( \kappa - \frac{3}{2} \mu \right) \operatorname{div} u \right] U \quad (3.13)$$

όπου  $\tau$  είναι ο δυαδικός ιξώδους τάσης,  $\dot{\gamma}$  ο δυαδικός ρυθμού παραμόρφωσης και  $U$  ο μοναδιαίος δυαδικός. Η δυαδική εξίσωση (3.13) είναι γνωστή ως **νόμος ιξώδους των Newton Poisson**. Στην ασυμπίεστη ροή η απόκλιση  $\operatorname{div} u$  είναι μηδέν οπότε η εξίσωση γράφεται  $\tau = \mu \dot{\gamma}$  (3.14) ή καλύτερα  $\tau = \mu \left[ \operatorname{div} u + (\operatorname{div} u)^T \right]$  (3.15) όπου  $\operatorname{div} u$  είναι ο δυαδικός ταχύτητας και  $(\operatorname{div} u)^T$  ο ανάστροφός του. Σε μορφή πινάκων η εξίσωση (3.15) γίνεται:

$$\begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} = \mu \left[ \begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_z}{\partial x} \\ \frac{\partial u_x}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{\partial u_z}{\partial y} \\ \frac{\partial u_x}{\partial z} & \frac{\partial u_y}{\partial z} & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} & \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} & \frac{\partial u_z}{\partial y} & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{pmatrix} \right] \quad (3.16)$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτουν άμεσα οι υλικές σχέσεις των ασυμπίεστων νευτωνικών ρευστών. Οι παραπάνω εξισώσεις είναι αρκετές για τον υπολογισμό των τάσεων (κάθετων και διατμητικών) κατά την τρισδιάστατη ροή νευτωνικού ρευστού σε δεδομένο σημείο του χώρου όταν είναι γνωστά το πεδίο ταχύτητας και η πίεση του ρευστού.

### 3.4 Μη νευτωνικά ρευστά

Μη νευτωνικά ρευστά ονομάζονται τα ρευστά εκείνα στα οποία η εξάρτηση της ιξώδους τάσης από το ρυθμό παραμόρφωσης του ρευστού είναι **μη γραμμική**. Συνεπώς η καμπύλη ροής των μη νευτωνικών ρευστών δεν είναι ευθεία γραμμή. Αυτό σημαίνει ότι η κλίση της (η οποία στα νευτωνικά ρευστά είναι σταθερή, ίση με το ιξώδες του ρευστού) εξαρτάται, εκτός από τη θερμοκρασία και την πίεση και από τον ρυθμό γωνιακής παραμόρφωσης (ή ρυθμό διάτμησης) του ρευστού. Σε ορισμένα

μη νευτωνικά ρευστά η κλίση της καμπύλης ροής εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως π.χ. το χρόνο διάτμησης του ρευστού ή , ακόμη και την γεωμετρία του χώρου όπου βρίσκεται το διατεμνόμενο ρευστό. Έτσι το ιξώδες ως έννοια δεν έχει νόημα στην περίπτωση των μη νευτωνικών ρευστών , έχει νόημα μόνον όταν συνδέεται με κάποιο συγκεκριμένο ρυθμό διάτμησης. Για τον λόγο αυτό εισάγεται η έννοια του *φαινόμενου ιξώδους*  $\mu_{\varphi}$  , το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της διατμητικής τάσης ,  $\tau_{yx}$  , προς τον αντίστοιχο ρυθμό διάτμησης  $\dot{\gamma}_{yx}$  του ρευστού:  $\mu_{\varphi} = \frac{\tau_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}}$  (3.20).

Για λόγους απλούστευσης στις σχέσεις που ακολουθούν θα παραλείπονται οι δείκτες x και y και η σχέση παίρνει την απλοποιημένη μορφή:  $\mu_{\varphi} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$  (3.21). Μη νευτωνικά

ρευστά συναντώνται σε πολλές τεχνικές εφαρμογές και σε μεγάλο αριθμό χημικών βιομηχανιών. Ενδεικτικά, αναφέρουμε τις βιομηχανίες τροφίμων, φαρμάκων , καλλυντικών και πλαστικών, όπου τα χρησιμοποιούμενα ρευστά είναι ως επί το πλείστον μη νευτωνικά. Η ρεολογική συμπεριφορά των μη νευτωνικών ρευστών εξετάζεται από ιδιαίτερο κλάδο της ρευστομηχανικής, ο οποίος ονομάζεται ρεολογία. Η ρεολογία ασχολείται με τη μελέτη των υλικών σχέσεων όλων των υλικών σωμάτων μεταξύ των ελαστικών ( κατά Hooke ) στερεών και των νευτωνικών ρευστών. Με βάση τη ρεολογική συμπεριφορά τους ,τα μη νευτωνικά ρευστά ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

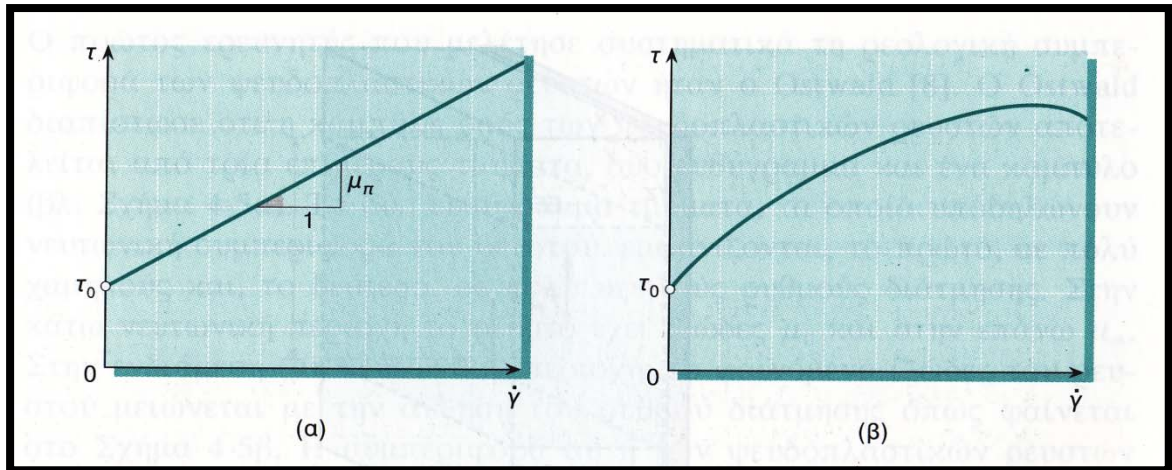
- **ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ:** Στα ρευστά της κατηγορίας αυτής ο ρυθμός διάτμησης του ρευστού εξαρτάται μόνον από το μέγεθος της διατμητικής τάσης.
- **ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ:** Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των ρευστών αυτών είναι ότι η ρεολογική συμπεριφορά τους, εκτός από τον ρυθμό διάτμησης, εξαρτάται και από την κατάστασή τους σε προηγούμενους χρόνους.
- **ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ :** Τα υλικά της κατηγορίας αυτής, εκτός από χαρακτηριστικά ρευστών, εμφανίζουν και χαρακτηριστικά στερεών.

### 3.4.1 ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Η ρεολογική συμπεριφορά των ρευστών της κατηγορίας αυτής περιγράφεται από μία συναρτησιακή σχέση της μορφής :  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  (3.22). Η σχέση αυτή δηλώνει ότι ο ρυθμός διάτμησης του ρευστού σε ένα δεδομένο σημείο του πεδίου ροής εξαρτάται μόνον από τη διατμητική τάση που ασκείται στο ρευστό στο σημείο αυτό. Ανάλογα με την αναλυτική μορφή της συνάρτησης (3.14) τα μη νευτώνικα ρευστά υποδιαιρούνται σε πλαστικά, ψευδοπλαστικά και διασταλτικά.

### 3.4.2 ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ή ΠΛΑΣΤΙΚΑ BINGHAM

Πλαστικά ρευστά (ή πλαστικά Bingham) ονομάζονται τα μη νευτώνικα ρευστά τα οποία ρέουν μόνον όταν η εφαρμοζόμενη σε αυτά διατμητική τάση υπερβεί μία ορισμένη τιμή ,  $\tau_0$  ,η οποία ονομάζεται *τάση ροής* του ρευστού. Η οριακή τιμή  $\tau_0$  εξαρτάται από τη φύση του πλαστικού ρευστού. Όταν η εφαρμοζόμενη διατμητική τάση υπερβεί την τιμή  $\tau_0$  το πλαστικό Bingham αρχίζει να ρέει, συμπεριφερόμενο σαν νευτώνικό ρευστό το οποίο υφίσταται την επίδραση της διατμητικής τάσης  $\tau - \tau_0$  , δηλαδή  $\tau - \tau_0 = \mu_p \dot{\gamma}$  όταν  $\tau > \tau_0$  (3.23) όπου ο συντελεστής  $\mu_p$  ονομάζεται πλαστικό ιξώδες ή συντελεστής ακαμψίας του πλαστικού ρευστού. Η καμπύλη ροής των πλαστικών ρευστών είναι ευθεία γραμμή και όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3(α) τέμνει τον άξονα των τάσεων στο σημείο (0,  $\tau_0$ ). Η κλίση της γραμμής αυτής είναι ίση με το πλαστικό ιξώδες του ρευστού. Όμως , πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι το ιξώδες  $\mu_p$  δεν αποτελεί πραγματική ιδιότητα του ρευστού. Πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι το πλαστικό ιξώδες των ρευστών Bingham δεν παραμένει σταθερό όταν ο ρυθμός διάτμησης του ρευστού μεταβάλλεται σημαντικά (σχήμα 3.3 (β)). Επομένως, η εξίσωση (3.24) είναι η υλική σχέση των ιδανικών πλαστικών ρευστών. Στην πράξη η εξίσωση αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τα περισσότερα ρευστά της κατηγορίας αυτής. Όταν η εφαρμοζόμενη διατμητική τάση είναι μικρότερη ή ίση με την τάση ροής , το πλαστικό ρευστό αντιδρά με στατική παραμόρφωση συμπεριφερόμενο σαν σταθερό σώμα , δηλαδή  $\dot{\gamma} = \frac{du_x}{dy} = 0$  , όταν  $\tau \leq \tau_0$  (3.24) .



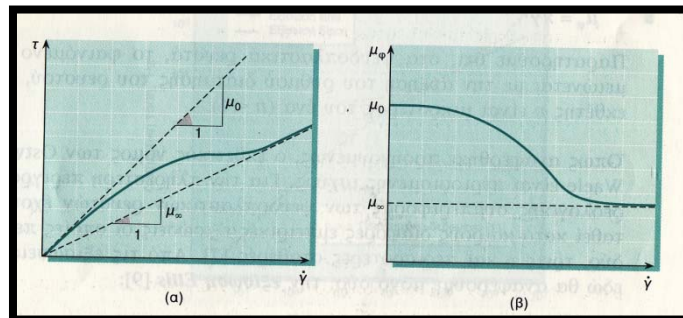
**Σχήμα 3.3:** Καμπύλη ροής (α) ιδανικού και (β) πραγματικού πλαστικού ρευστού ( $\tau_0$ =τάσης ροής και  $\mu_n$ =πλαστικό ιξώδες)

Στην κατηγορία των πλαστικών ρευστών ανήκουν οι οδοντόπαστες, το μέλι, η μαγιονέζα, οι ζελατίνες, η ιλύς γεωτρήσεων κ.ά. Μια πιθανή ερμηνεία της ρεολογικής συμπεριφοράς των πλαστικών ρευστών είναι η εξής: Σε κατάσταση ηρεμίας, τα πλαστικά ρευστά έχουν τρισδιάστατη ελαστική δομή. Η δομή αυτή αντέχει όταν το ρευστό υφίσταται την επίδραση μικρών διατμητικών τάσεων, αλλά καταρρέει όταν οι τάσεις αυτές υπερβούν μία ορισμένη τιμή (την  $\tau_0$ ). Μετά την άρση της διατμητικής τάσης που προκάλεσε την παραμόρφωση ή την πλήρη κατάρρευση της δομής του πλαστικού ρευστού, η τελευταία επανέρχεται βαθμιαία στην αρχική της μορφή.

### 3.4.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΘΕΤΙΚΟΥ ΝΟΜΟΥ-POWER LAW

Ψευδοπλαστικά ρευστά ονομάζονται τα μη νευτωνικά ρευστά το φαινόμενο ιξώδες των οποίων μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης. Η τάση ροής των ρευστών αυτών είναι μηδέν. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως ψευδοπλαστικά ρευστά προς διάκριση από τα πραγματικά πλαστικά ρευστά, η τάση διαρροής των οποίων είναι διάφορη του μηδενός. Τα ψευδοπλαστικά ρευστά αποτελούν τη μεγαλύτερη κατηγορία μη νευτωνικών ρευστών. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το αίμα, οι χυμοί φρούτων, οι φυσικές κόλλες, ο χαρτοπολτός, τα τήγματα πλαστικών, τα κολλοειδή διαλύματα, τα γαλακτώματα κ.α. Ο πρώτος ερευνητής που μελέτησε συστηματικά τη ρεολογική συμπεριφορά των ψευδοπλαστικών ρευστών

ήταν ο Osstwald. Ο Osstwald διαπίστωσε ότι η καμπύλη ροής των ψευδοπλαστικών ρευστών αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα, δύο ευθύγραμμα και ένα καμπύλο (βλ. Σχήμα 3.7(α)). Τα δύο ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία υποδηλώνουν νευτωνική συμπεριφορά του ρευστού, εμφανίζονται, το πρώτο, σε πολύ χαμηλούς και, το δεύτερο, σε πολύ υψηλούς ρυθμούς διάτμησης. Στην κάτω νευτωνική περιοχή το ρευστό έχει ιξώδες  $\mu_0$  και στην επάνω  $\mu_\infty$ . Στην ενδιάμεση μη νευτωνική περιοχή, το φαινόμενο ιξώδες του ρευστού μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7(β). Η συμπεριφορά αυτή των ψευδοπλαστικών ρευστών βρίσκει σημαντική πρακτική εφαρμογή. Για παράδειγμα, στα λιπαντικά δίνεται η ιδιότητα της ψευδοπλαστικότητας με προσθήκη οργανικών ουσιών πολύ μεγάλης μοριακής μάζας (τα μόρια αυτών των ουσιών αποτελούνται από  $10^3$  έως  $10^9$  άτομα). Με τον τρόπο αυτό το λιπαντικό στην περιοχή λίπανσης εδράνων, όπου ο ρυθμός διάτμησης είναι αρκετά υψηλός ( $du_x / dy \gg 0$ ), προβάλλει μικρή αντίσταση στην περιστροφή των αξόνων, ενώ στις φλάντζες και σε άλλες συναρμογές μηχανικών εξαρτημάτων, όπου ο ρυθμός  $du_x / dy$  έχει μικρή τιμή, το λιπαντικό γίνεται παχύρρευστο ώστε να αποφεύγεται η διαρροή του.



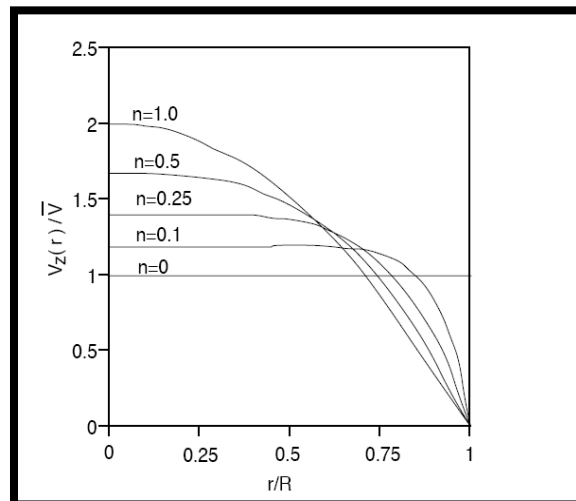
**Σχήμα 3.4:** (α) καμπύλη ροής και (β) εξάρτηση του φαινόμενου ιξώδους ψευδοπλαστικού ρευστού από το ρυθμό διάτμησης του

Η περιγραφείσα μορφή της καμπύλης ροής των ψευδοπλαστικών ρευστών δυσκολεύει σημαντικά τη μαθηματική περιγραφή της. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των ψευδοπλαστικών ρευστών ο Osstwald πρότεινε την εμπειρική σχέση  $\tau = m\dot{\gamma}^n$  (3.25), όπου τα μεγέθη  $m$  και  $n$  είναι σταθερές οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από τη φύση του ρευστού. Η εξίσωση 24 είναι γνωστή ως εκθετικός νόμος των Osstwald – de Waele. Ο νόμος αυτός δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περιοχή ρυθμών διάτμησης από 1 έως  $30s^{-1}$ . Στην πράξη ρυθμοί διάτμησης μικρότεροι από  $1s^{-1}$  σπάνια συναντώνται. Ο συντελεστής  $m$  είναι διαστατικό μέγεθος



και ονομάζεται δείκτης συνοχής (ή ρεολογική σταθερά) του ρευστού. Ο δείκτης συνοχής αποτελεί μέτρο ευστάθειας του ψευδοπλαστικού ρευστού. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη  $m$  τόσο πιο ιξώδες είναι το ρευστό. Ο δείκτης συνοχής των νευτωνικών ρευστών είναι ίσος με το ιξώδες τους ( $m=\mu$ ). Ο εκθέτης  $n$  είναι αδιάστατο μέγεθος και ονομάζεται δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς του ρευστού. Ο δείκτης  $n$  λαμβάνει θετικές τιμές μικρότερες του ένα ( $0 < n < 1$ ). Για τα νευτωνικά ρευστά ισχύει  $n=1$ . Όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση του δείκτη  $n$  από την μονάδα τόσο πιο έντονη είναι η μη νευτωνική συμπεριφορά του ρευστού. Θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας πως ο δείκτης  $n$  δεν έχει την ίδια τιμή σε όλες τις πιθανές περιοχές ρυθμού διάτμησης του ρευστού. Επομένως ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς δεν είναι πραγματική σταθερά, χαρακτηριστική του ρευστού. Αυτό δεν αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα από τεχνική άποψη, γιατί στις τεχνικές εφαρμογές ενδιαφέρει η μορφή της υλικής σχέσης που περιγράφει τη συμπεριφορά του ρευστού σε μια συγκεκριμένη περιοχή διάτμησης, η οποία αντιμετωπίζεται σε συγκεκριμένο πρόβλημα ροής. Πάνω από μια τέτοια περιοχή, ο δείκτης  $n$  μπορεί να θεωρηθεί σαν σταθερά, η οποία χαρακτηρίζει την συμπεριφορά του ρευστού στην περιοχή αυτή.

Το φαινόμενο ιξώδες των ψευδοπλαστικών ρευστών τα οποία περιγράφονται από την υλική σχέση (24) υπολογίζεται από την εξίσωση  $\mu\phi = m\dot{\gamma}^{n-1}$  (3.26).



**Σχήμα 3.5:** Κατανομή ταχύτητας μη νευτωνικού ρευστού για διάφορους εκθέτες του εκθετικού μοντέλου

Γενικά στα ψευδοπλαστικά ρευστά, το φαινόμενο ιξώδες μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης του ρευστού, αφού ο δείκτης  $n$  είναι μικρότερος της

μονάδας( $n>1$ ). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο εκθετικός νόμος των Osstwald – de Waele είναι περιορισμένης ισχύος. Για την πληρέστερη περιγραφή της ρεολογικής συμπεριφοράς των ψευδοπλαστικών ρευστών έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορες εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες περιέχουν δύο, τρεις ή και περισσότερες σταθερές. Από αυτές εδώ θα αναφέρουμε μόνο δύο:

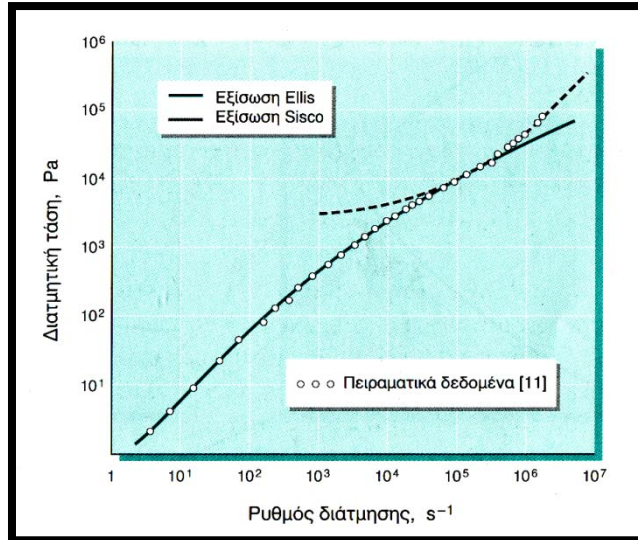
■ **Την εξίσωση Ellis:**  $\dot{\gamma} = \left( \frac{1}{\mu_0} + k_e |\tau|^{\alpha_e - 1} \right) \quad (3.26)$

■ **Την εξίσωση Sisco:**  $\tau = \left[ \mu_\infty + k_s |\tau|^{\alpha_s - 1} \right] \dot{\gamma} \quad (3.27)$

όπου  $k_e, k_s, \alpha_e, \alpha_s$  είναι σταθερές οι τιμές των οποίων προσδιορίζονται πειραματικά. Τα μεγέθη  $\mu_0, \mu_\infty$  παριστάνουν το ιξώδες του ρευστού στην κάτω και επάνω νευτωνική περιοχή αντίστοιχα.

Η εξίσωση Ellis προβλέπει ικανοποιητικά τη ρεολογική συμπεριφορά των ψευδοπλαστικών ρευστών σε σχετικά χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης. Η εξίσωση αυτή δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε υψηλούς ρυθμούς διάτμησης, επειδή δεν μπορεί να περιγράψει τη μορφή της καμπύλης ροής πέρα από το σημείο καμπής. Η εξίσωση Ellis εμπεριέχει ως οριακές μορφές, το νόμο ιξώδους του Newton και τον εκθετικό νόμο ( $\alpha_e = 1/n$ ). Για ένα ψευδοπλαστικό ρευστό ( $n < 1$  και  $\alpha_e > 1$ ) η εξίσωση Ellis πλήρως την κάτω νευτωνική περιοχή καθώς ο ρυθμός διάτμησης του ρευστού τείνει προς το μηδέν.

Η εξίσωση Sisco προβλέπει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των πλαστικών ρευστών σε υψηλούς ρυθμούς διάτμησης, ενώ σε χαμηλούς ρυθμούς οι προβλέψεις της είναι γενικά ανεπιτυχείς. Όπως η εξίσωση Ellis έτσι και η εξίσωση Sisco εμπεριέχει ως οριακές μορφές τον νόμο ιξώδους του Newton και τον εκθετικό νόμο. Η εξίσωση περιγράφει πλήρως την πάνω νευτωνική περιοχή καθώς ο ρυθμός διάτμησης του ρευστού τείνει προς το άπειρο. Επομένως αν και οι δύο αυτές εξισώσεις συνδυαστούν κατάλληλα μπορούν να περιγράψουν αποτελεσματικά την καμπύλη ροής ενός ψευδοπλαστικού ρευστού, όπως φαίνεται και στο σχήμα:



Σχήμα 3.6: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων Ellis και Sisco

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	$m (Pa \cdot sec^{-n})$	$n$	T (°C)
Polystyrene	$2,8 \cdot 10^4$	0,28	170
HDPE	$2,0 \cdot 10^4$	0,41	180
LDPE	$6,0 \cdot 10^3$	0,39	160
PP	$7,5 \cdot 10^3$	0,38	200
PVC	$1,7 \cdot 10^4$	0,26	180

Πίνακας 3.1: Συντελεστές m και εκθέτες n για διάφορα θερμοπλαστικά

### 3.4.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ CARREAU-YASUDA

Πρόκειται για ένα μοντέλο τριών παραμέτρων για την περιγραφή της ρεολογικής συμπεριφοράς των ψευδοπλαστικών ρευστών. Περιγράφεται από τη

σχέση :  $\frac{\mu - \mu_0}{\mu_0 - \mu_\infty} = \left[ 1 + |\lambda \dot{\gamma}|^a \right]^{\frac{\mu-1}{a}}$  (3.28). Όπου  $\mu_0$  το ιξώδες για μηδενικές διατμητικές

τάσεις,  $\mu_\infty$  η τιμή του ιξώδους όταν οι διατμητικές τάσεις τείνουν στο άπειρο,  $\lambda$  η σταθερά του χρόνου και  $n$  ο εκθέτης Power Law. Σε πολλές περιπτώσεις η τιμή του ιξώδους όταν οι διατμητικές τάσεις τείνουν στο άπειρο θεωρείται αμελητέα μειώνοντας τον αριθμό των παραμέτρων της εξίσωσης (3.28) σε τρεις. Προκειμένου

να ληφθεί υπόψη και η επίδραση της θερμοκρασίας στο μοντέλο οι Merges, Wortberg

και Michaeli καθιέρωσαν την σχέση:  $\mu = \frac{k_1 a_T}{(1 + k_2 \dot{\gamma} a_T)^{k_3}}$  (3.29) όπου ο συντελεστής  $a_T$

ισούται με:  $\ln a_T = \frac{8,86(k_4 - k_5)}{101,6 + k_4 - k_5} - \frac{8,86(T - k_5)}{101,6 + T - k_5}$  (3.30) . Επιπροσθέτως της

εξάρτησης του μοντέλου από τη θερμοκρασία οι Merges, Wortberg και Michaeli εισήγαγαν και την τιμή της πίεσης στη μελέτη του φαινομένου. Η σχέση που προκύπτει είναι η εξής:

$$\log \mu(T, p) = \log \mu_0 + \frac{8,86(T^* - T_s)}{101,6 + T^* - T_s} - \frac{8,86(T^* - T_s + 0,002p)}{101,6 + T^* - T_s + 0,002p} \quad (3.31).$$

Το ιξώδες των περισσοτέρων ρευστών μειώνεται με τη θερμοκρασία και αυξάνεται με την πίεση. Μια αύξηση στη θερμοκρασία συνήθως προκαλεί αναδιανομή των δεσμών του ρευστού με αποτέλεσμα την μείωση της τριβής μεταξύ των μορίων του ρευστού. Η καμπύλη του ιξώδους συναρτήσει του δυαδικού ρυθμού παραμόρφωσης δεν αλλάζει σημαντικά με την μεταβολή της θερμοκρασίας και μάλιστα οι καμπύλες πολλών θερμοκρασιών μπορούν να συνθέσουν την κύρια καμπύλη. Η εξάρτηση του ιξώδους από τον δυαδικό ρυθμό παραμόρφωσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη σε περιπτώσεις μαθηματικών υπολογισμών.

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	k1 (Pa·sec)	K2 (sec)	K3	K4 (°C)	K5(°C)	T0(°C)	E0 ( J/mol )
PP	1386	0,091	0,68	-	-	220	427198
HDPE	24198	1,38	0,60	-	-	200	22272
LDPE	317	0,015	0,61	-	-	189	43694
PVC	1786	0,054	0,68	185	88	-	-

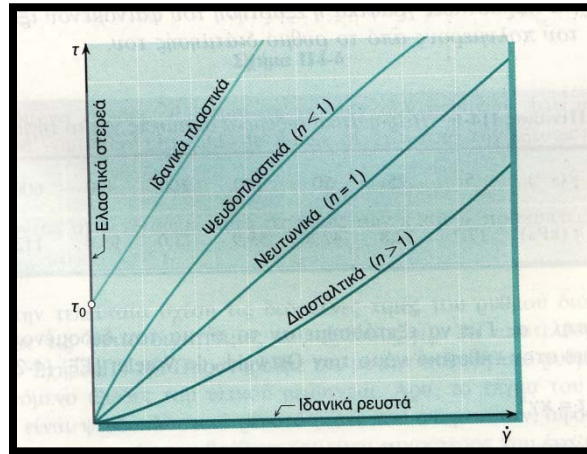
**Πίνακας 3.2:** Συντελεστές μοντέλου Carreau-Yasuda

### 3.4.2.3 ΔΙΑΣΤΑΛΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Διασταλτικά ρευστά ονομάζονται τα μη νευτωνικά ρευστά το φαινόμενο ιξώδες των οποίων αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης. Η τάση ροής των διασταλτικών ρευστών είναι μηδέν ( $\tau_0 = 0$ ). Στο σχήμα 3.7 παριστάνεται γραφικά

η εξάρτηση του της διατμητικής τάσης και του φαινόμενου ιξώδους ενός τυπικού διασταλτικού ρευστού από τον ρυθμό διάτμησης. Τα διασταλτικά ρευστά είναι συνήθως πυκνά αιωρήματα στερεών σε υγρά. Τυπικά παραδείγματα διασταλτικών ρευστών είναι οι κόλλες, το υγρό τσιμεντοσκυρόδεμα, ο χαλαζίας και η άμμος.

Η ρεολογική συμπεριφορά των διασταλτικών ρευστών περιγράφεται ικανοποιητικά από τον εκθετικό νόμο των Osstwald –de Waele:  $\tau = \mu_0 \dot{\gamma}^n$  (3.32) αλλά στην περίπτωση αυτή, ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς του ρευστού είναι μεγαλύτερος από το ένα ( $n > 1$ ). Κατά τα άλλα ισχύουν όσα αναφέραμε προηγουμένως για τα ψευδοπλαστικά ρευστά. Αυτό το είδος ρεολογικής συμπεριφοράς παρατηρήθηκε πρώτη φορά από τον Reynolds σε διμερή μείγματα στερεών – υγρών όπου η παρουσία στερεού (σε μορφή αιωρήματος) ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη του υγρού. Κατά τον Reynolds, όταν το μείγμα βρίσκεται σε ηρεμία, το υγρό μόλις που φτάνει να γεμίσει τον κενό χώρο μεταξύ των σωματιδίων του στερεού. Έτσι σε χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης, το υγρό λιπαίνει κατά κάποιο τρόπο την κίνηση του ενός σωματιδίου πάνω στο άλλο, με αποτέλεσμα οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις (άρα και το φαινόμενο ιξώδες του ρευστού) να είναι μικρές. Κάτω από τις συνθήκες αυτές, το διασταλτικό ρευστό εμφανίζει νευτωνική συμπεριφορά. Με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης, η αρχική (πυκνή) διάταξη των σωματιδίων του στερεού διαταράσσεται σημαντικά, με αποτέλεσμα τα σωματίδια αυτά να καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο. Παρατηρείται έτσι ένα είδος διαστολής του μείγματος, με αποτέλεσμα η ποσότητα υγρού να μην επαρκεί για την πλήρωση του πρόσθετου κενού που δημιουργείται μεταξύ των σωματιδίων του στερεού. Έτσι η λίπανση της κίνησης των στερεών σωματιδίων είναι ανεπαρκής γεγονός που συνεπάγεται την αύξηση του φαινόμενου ιξώδους του ρευστού. Όμως, ορισμένα ρευστά, όπως π.χ. οι αμυλούχες κόλλες, εμφανίζουν αύξηση του ιξώδους, με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης, χωρίς η αύξηση αυτή να συνοδεύεται από διόγκωση του υλικού. Παρ' όλα αυτά, ο όρος διασταλτικά ρευστά εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα. Στο ρεολογικό διάγραμμα που ακολουθεί (σχήμα 3.12) εικονίζονται οι καμπύλες ροής των νευτωνικών ρευστών και των μη νευτωνικών ρευστών τα οποία έχουν εξεταστεί έως τώρα. Επίσης, για λόγους σύγκρισης, στο ίδιο διάγραμμα έχουν σχεδιαστεί και οι καμπύλες ροής των ελαστικών στερεών και των ιδανικών ρευστών οι οποίες συμπίπτουν με τους άξονες της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διάτμησης αντίστοιχα.



Σχήμα 3.7: Καμπύλες ροής διαφόρων υλικών σωμάτων

### 3.4.3 ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

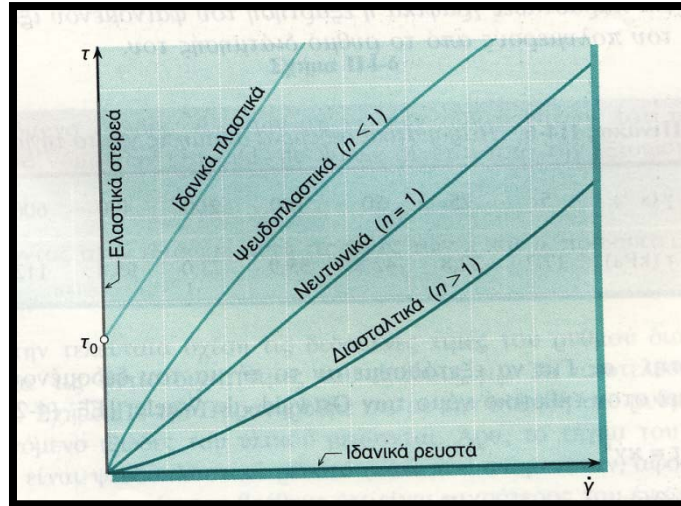
Η ρεολογική συμπεριφορά των ρευστών της κατηγορίας αυτής περιγράφεται από μία συναρτησιακή σχέση της μορφής:  $\tau = f(\dot{\gamma}, t)$  (3.33). Αυτή η σχέση δηλώνει ότι η διατμητική τάση που αναπτύσσεται σε ένα δεδομένο σημείο του πεδίου ροής εξαρτάται όχι μόνο από τον τοπικό ρυθμό διάτμησης αλλά και από την διάρκεια διάτμησης του ρευστού. Έτσι το φαινόμενο ιξώδες ενός τέτοιου ρευστού μεταβάλλεται με το χρόνο ακόμα και αν η διάτμησή του γίνεται με σταθερό ρυθμό. Ανάλογα με το είδος της μεταβολής αυτής, τα ρευστά τα οποία υπακούουν στην εξίσωση (3.23) χαρακτηρίζονται είτε ως θιξοτροπικά είτε ως ρεοθηκτικά.

#### 3.4.3.1 ΘΙΞΟΤΡΟΠΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Θιξοτροπικά ρευστά ονομάζονται τα μη νευτωνικά ρευστά το φαινόμενο ιξώδες των οποίων μειώνεται με την πάροδο του χρόνου όταν υφίστανται διάτμηση, με σταθερό ρυθμό (σε σταθερές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας). Η περίεργη αυτή συμπεριφορά των θιξοτροπικών ρευστών βρίσκει σημαντική εφαρμογή στην βιομηχανία πλαστικών, χρωμάτων και τροφίμων. Για παράδειγμα, ένα καλό χρώμα βαφής της επιφάνειας στερεών πρέπει να είναι θιξοτροπικό, ώστε όταν είναι στο κουτί του να είναι πολύ ιξώδες για να μην διαχωρίζεται η χρωστική ουσία από το διαλυτικό μέσο. Όταν ανακατεύεται να γίνεται λεπτόρρευστο για να απλώνεται εύκολα στην επιφάνεια κατά το βήσιμο και αμέσως μετά τη χρησιμοποίησή του να

ξαναγίνεται παχύρρευστο για να συγκρατείται πάνω στην βαμμένη επιφάνεια, ώστε το βάνιμό της να παραμένει ομοιόμορφο.

Μία πιθανή ερμηνεία της ρεολογικής συμπεριφοράς των θιξοτροπικών ρευστών είναι η εξής: Σε κατάσταση ηρεμίας, τα θιξοτροπικά ρευστά έχουν μία ορισμένη ελαστική δομή η οποία χαρακτηρίζεται από κάποιο βαθμό ακαμψίας. Όταν ένα θιξοτροπικό ρευστό υποβάλλεται σε συνεχή διάτμηση, με σταθερό ρυθμό, η δομή του αρχίζει να καταστρέφεται με αποτέλεσμα το ρευστό να γίνεται λιγότερο ιξώδες. Η καταστροφή αυτή οφείλεται στη μηχανική λύση των δεσμών που συνδέουν τις δομικές μονάδες του δεσμού. Ο ρυθμός καταστροφής της δομής του ρευστού εξαρτάται από τον αριθμό των παρόντων δεσμών οι οποίοι, κάθε στιγμή, προσφέρονται για μηχανική διάσπαση. Ο αριθμός αυτός μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του ιξώδους του ρευστού. Όμως, παράλληλα με την λύση, αρχίζει και ο επανασηματισμός δεσμών από τις ελεύθερες δομικές μονάδες του ρευστού. Ο ρυθμός αποκατάστασης της δομής αυξάνεται με τον χρόνο, λόγω της αύξησης των ελεύθερων δομικών μονάδων (που προέρχονται από την καταστροφή της δομής). Τελικά, σε κάποια στιγμή ο ρυθμός καταστροφής και ο ρυθμός αποκατάστασης της δομής του ρευστού γίνονται ίσοι, οπότε αποκαθίσταται μία κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Από την στιγμή εκείνη και μετά, το φαινόμενο ιξώδες του ρευστού παραμένει σταθερό. Η τιμή του ιξώδους  $\mu_\phi$  στην κατάσταση της δυναμικής ισορροπίας εξαρτάται από το μέγεθος του ρυθμού διάτμησης του ρευστού. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός διάτμησης τόσο μικρότερη είναι η τελική τιμή του φαινομένου ιξώδους. Τέλος, όταν ένα θιξοτροπικό ρευστό υποβληθεί σε συνεχή διάτμηση, πρώτα με σταθερά αυξανόμενο ρυθμό (από τη τιμή μηδέν μέχρι την τιμή  $\dot{\gamma}_{\max}$ ) και αμέσως μετά με σταθερά μειούμενο ρυθμό (από τη μέγιστη τιμή μέχρι την τιμή μηδέν) οι αντίστοιχες καμπύλες ροής στο ρεολογικό διάγραμμα σχηματίζουν ένα βρόχο υστέρησης. Η μορφή του βρόχου υστέρησης εξαρτάται από τη ρεολογική κατάσταση και το είδος του θιξοτροπικού ρευστού. Στο σχήμα 3.8 εικονίζεται ένας τυπικός βρόχος υστέρησης ψευδοπλαστικού ρευστού το οποίο εμφανίζει το φαινόμενο της θιξοτροπίας.



**Σχήμα 3.8:** Ρεολογική συμπεριφορά θιξοτροπικού ρευστού το οποίο διατέμεται με σταθερό ρυθμό σε ένα περιστροφικό ιξωδόμετρο Couette

### 3.4.3.2 ΡΕΟΠΗΚΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

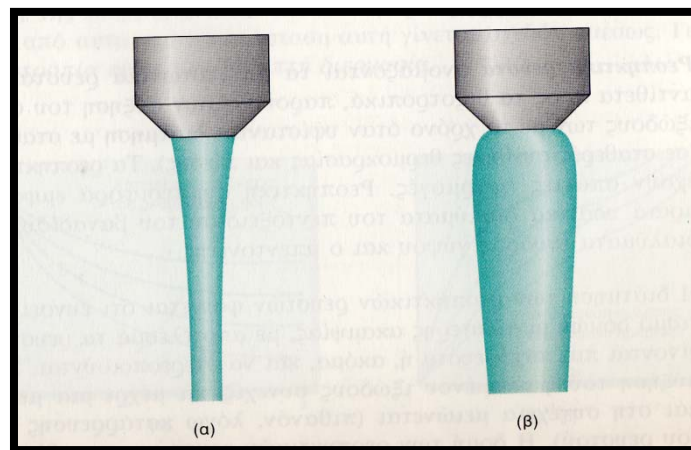
Ρεοπηκτικά ρευστά ονομάζονται τα μη νευτώνικά ρευστά τα οποία, αντίθετα προς τα θιξοτροπικά, παρουσιάζουν αύξηση του φαινομένου ιξώδους των με τον χρόνο όταν υφίστανται διάτμηση με σταθερό ρυθμό (σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης). Τα ρεοπηκτικά ρευστά έχουν σπάνιες εφαρμογές. Ρεοπηκτική συμπεριφορά εμφανίζουν τα αραιά υδατικά διαλύματα του πεντοξειδίου του βαναδίου, τα πυκνά διαλύματα ένυδρου γύψου και ο μπετονίτης. Η διάτμηση των ρεοπηκτικών ρευστών φαίνεται ότι ευνοεί το σχηματισμό δομών μεγαλύτερης ακαμψίας, με αποτέλεσμα τα ρευστά αυτά να γίνονται πιο παχύρρευστα ή ακόμα και να στερεοποιούνται. Συνήθως, η αύξηση του φαινομένου ιξώδους συνεχίζεται μέχρι μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται (πιθανόν λόγω κατάρρευσης της δομής του ρευστού). Η δομή των ρεοπηκτικών ρευστών αποκαθίσταται όταν αφεθούν σε ηρεμία για κάποιο χρονικό διάστημα. Δηλαδή η ρεοπηξία είναι αντιστρεπτό φαινόμενο.

### 3.5 Ιξωδοελαστικά ρευστά

Ιξωδοελαστικά ρευστά ονομάζονται τα υλικά σώματα τα οποία, εκτός από χαρακτηριστικά ρευστών, εμφανίζουν και χαρακτηριστικά στερεών σωμάτων.



Ιξωδοελαστική συμπεριφορά εμφανίζουν το ασπράδι των αυγών, η πίσσα, ο υγρός στόκος, τα τήγματα πλαστικών και γενικά τα διαλύματα πολυμερών μεγάλης μοριακής μάζας. Κατά την πειραματική μελέτη ιξωδοελαστικών ρευστών έχουν παρατηρηθεί ορισμένα ασυνήθιστα φαινόμενα. Για παράδειγμα αν σε ένα ιξωδοελαστικό υλικό τοποθετηθεί ένας περιστρεφόμενος άξονας, παρατηρείται αναρρίχηση του ρευστού αυτού στον άξονα. Το φαινόμενο αυτό καλείται στη ρεολογία φαινόμενο Weissenberg και δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στην ανάδευση υλικών ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς. Ένα άλλο επίσης ασυνήθιστο φαινόμενο παρατηρείται κατά την έξοδο ιξωδοελαστικών ρευστών από στόμια αγωγών. Η φλέβα ενός κοινού υγρού ( π.χ. γλυκερίνης ) συστέλλεται κατά την έξοδό της από το στόμιο του αγωγού. Αντίθετα το ιξωδοελαστικό υλικό διαστέλλεται και μάλιστα σημαντικά.



**Σχήμα 3.9:**Μορφή φλέβας ρευστού μετά την έξοδο από το στόμιο αγωγού:

(α) κοινό υγρό π.χ. γλυκερίνη και (β) ιξωδοελαστικό ρευστό

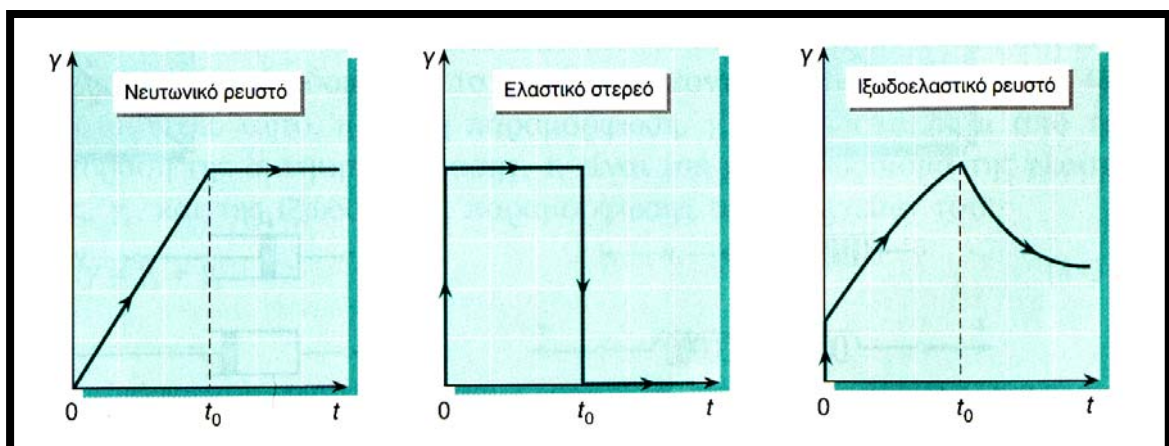
Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των ιξωδοελαστικών υλικών θα φανούν αν τα αντιπαραβάλουμε με αυτά του νευτωνικού ρευστού και του ελαστικού στερεού υπό την ίδια διατμητική τάση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.10 τα τρία υλικά υπόκεινται διατμητική τάση, η οποία αρχίζει την χρονική στιγμή  $t = 0$  και αίρεται την στιγμή  $t = t_0$ . Στα νευτωνικά ρευστά παρατηρούμε τα εξής:

- Παραμορφώνονται συνεχώς και γραμμικά υπό την επίδραση της διατμητικής τάσης
- Δεν εμφανίζουν καμία τάση για επάνοδο με το πέρας αυτής.

Στα ελαστικά στερεά αντίστοιχα:

- Αντιδρούν σχεδόν ακαριαία στην επίδραση της διατμητικής τάσης με στατική παραμόρφωση το μέγεθος της οποίας διατηρείται σταθερό όσο διαρκεί η επίδραση της τάσης αυτής.
- Επανέρχονται σχεδόν αμέσως στην αρχική τους κατάσταση με το πέρας της διατμητικής τάσης.

Τα ιξωδοελαστικά ρευστά συμπεριφέρονται δανειζόμενα ιδιότητες και από τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Με την έναρξη της επίδρασης της διατμητικής τάσης το ιξωδοελαστικό ρευστό αντιδρά με στατική παραμόρφωση ορισμένου μεγέθους, στην συνέχεια παραμορφώνεται συνεχώς όσο διαρκεί η επίδραση της τάσης αυτής και, μόλις αρθεί η δράση της, εμφανίζει τάση για επάνοδο στην αρχική του μορφή, χωρίς να επανέρχεται τελικά σε αυτήν. Παρατηρούμε ότι το ιξωδοελαστικό υλικό συμπεριφέρεται σαν στερεό τη χρονική στιγμή  $t=0$  (αφού αντιδρά με στατική παραμόρφωση) και για  $t > t_0$  (αφού εμφανίσει τάση ανάκτησης της αρχικής του μορφής). Το ίδιο υλικό συμπεριφέρεται σαν ρευστό το διάστημα  $0 < t \leq t_0$  (αφού παραμορφώνεται συνεχώς υπό την επίδραση της διατμητικής τάσης). Το πόσο έντονη θα είναι η εκδήλωση των επιμέρους χαρακτηριστικών εξαρτάται από τη φύση του ιξωδοελαστικού ρευστού.



**Σχήμα 3.10:** Παραμόρφωση υλικών σωμάτων τα οποία υφίστανται την επίδραση σταθερής διατμητικής τάσης το χρονικό διάστημα  $0 < t \leq t_0$

Επομένως, στα Νευτώνικά Ρευστά το ιξώδες αποτελεί σταθερά, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη μοριακή φύση και την κατάσταση (θερμοκρασία και πίεση) του ρευστού. Στα Μη Νευτώνικά Ρευστά η σχέση μεταξύ τάσης και ρυθμού παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική και για το λόγο αυτό εισήχθη στην παραπάνω ανάλυση η έννοια του φαινομένου ιξώδους οι τιμές του οποίου μπορεί να είναι συνάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης, της τάσης και του χρόνου. Σε πολυμερικά διαλύματα και τήγματα παρατηρείται το φαινόμενο το ιξώδες να μειώνεται με την αύξηση της του ρυθμού διάτμησης  $\frac{du}{dy}$  και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διατμητική λέπτυνση (shear thinning) .

### ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΙΞΩΔΕΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ
ELLIS	$1/\mu = (1/\mu_0)[1 + (\tau/\tau_{1/2})]^{(1/\mu)-1}$	$\mu_0 / \tau_{1/2}$
POWER LAW	$\mu = m\dot{\gamma}^{n-1}$	-
CARREAU	$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{(n-1)/2}$	$\lambda$

**Πίνακας 3.3:**Συνοπτική παρουσίαση μοντέλων

## **3.6 Μαθηματική ανάλυση της ροής πολυμερικών τηγμάτων**

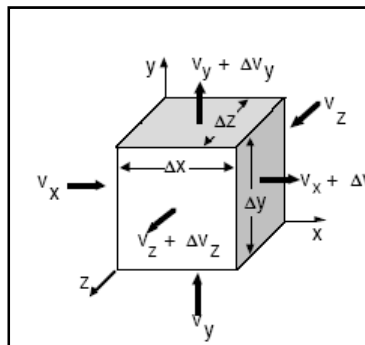
### **3.6.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ**

Σε γενικές γραμμές η επίλυση ενός προβλήματος ροής μπορεί να περιγραφεί με τις τρεις εξισώσεις των φαινομένων μεταφοράς δηλαδή την εξίσωση συνέχειας, κίνησης και ενέργειας που βασίζονται στις αρχές διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας αντίστοιχα. Τα τήγματα των πολυμερών εμφανίζουν τόσο ιξώδη όσο και ελαστική συμπεριφορά (ιξωδοελαστική). Η διεργασία της εκβολής είναι αρκετά σύνθετη και για το λόγο αυτό επιδιώκεται η μαθηματική ανάλυση και η αριθμητική επίλυση με τη χρήση απλοποιημένων προσεγγίσεων. Έτσι γίνεται κατανοητό πως οι διάφορες παράμετροι μιας παραγωγικής διαδικασίας επηρεάζουν την τελική απόδοση

της διεργασίας και επειδή τα τήγματα πολυμερών είναι Μη Νευτωνικά Ρευστά είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ακριβή σχέση που συνδέει την τάση και την παραμόρφωση ώστε να γίνει η ανάλυση της ροής.

### 3.6.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σε ένα σημείο του ρευστού πυκνότητας  $\rho$  όπως φαίνεται παρακάτω, οι  $v_x, v_y$  και  $v_z$  αποτελούν συνιστώσες της ταχύτητας του ρευστού στο σημείο αυτό.



Σχήμα 3.11:Στοιχειώδες σημείο ρευστού

Η Αρχή Διατήρησης Μάζας γράφεται σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) \quad (3.34)$$

. Από τη σχέση απόκλισης έχουμε:

$$div = \delta_x \frac{\partial}{\partial x} + \delta_y \frac{\partial}{\partial y} + \delta_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.35)$$

όπου  $\delta_x, \delta_y$  και  $\delta_z$  οι συνιστώσες του μοναδιαίου

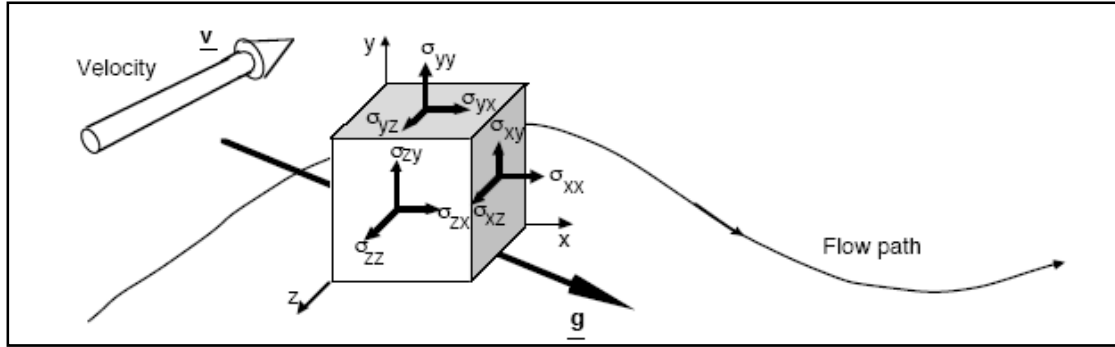
διανύσματος. Επομένως η εξίσωση 3.34 μέσω της 3.35 γράφεται ως:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -div(\rho \vec{v}) \quad (3.36)$$

και με χρήση της ουσιαστικής παραγώγου (substantial

derivative)  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot div$  προκύπτει η σχέση:  $\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \cdot div(\vec{v}) \quad (3.37)$  . Για

ασυμπίεστα ρευστά η πυκνότητα  $\rho$  είναι ανεξάρτητη από τις συντεταγμένες  $x, y, z$  και το χρόνο  $t$  και επομένως οι εξισώσεις 3.33 και 3.36 παίρνουν τη μορφή  $div(\vec{v}) = 0 \quad (3.38)$ . Θεωρούμε τώρα στοιχειώδη όγκο ελέγχου που κινείται κατά τη φορά του ρευστού:



Σχήμα 3.12: Στοιχειώδης όγκος ελέγχου του ρευστού

Η συνολική ορμή σε ολόκληρο τον όγκο του ρευστού  $V$  προκύπτει από τη δράση δύο μηχανισμών της αγωγής, της συναγωγής και της δράση βαρυτικών δυνάμεων στη μάζα του ρευστού. Επομένως η εξίσωση της κίνησης είναι:

$$\frac{d}{dt} = \int_V \rho \bar{v} dV = - \int_S [\bar{n} \rho \bar{v}] dS - \int_S [\bar{n} \bar{\pi}] dS + \int_V \rho \bar{g} dV \quad (3.39)$$

όπου  $\bar{g}$  είναι το διάνυσμα της τοπικής επιτάχυνσης της βαρύτητας. Χρησιμοποιώντας το θεώρημα Gauss η εξίσωση κίνησης που καλείται και εξίσωση Cauchy γράφεται στην εξής μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{v} = - [\nabla \rho \bar{v}] - [\nabla \bar{\pi}] + \rho \bar{g} \quad (3.40)$$

όπου  $\bar{g}$  είναι το διάνυσμα της τοπικής επιτάχυνσης της βαρύτητας και  $\bar{\pi}$  είναι ο τανυστής των συνολικών τάσεων και

ισούται με :  $\bar{\pi} = P \bar{\delta} + \bar{\tau}$  (3.41) όπου  $\bar{\tau}$  είναι ο τανυστής των διατμητικών τάσεων,  $P$

οι δυνάμεις πίεσης και  $\bar{\delta}$  ο μοναδιαίος τανυστής που είναι ίσος με  $\bar{\delta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ .

Με χρήση της ουσιαστικής παραγώγου (substantial derivative) η εξίσωση 3.40

γράφεται:  $\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = - [\nabla \bar{\pi}] + \rho \bar{g}$  (3.42). Αντικαθιστώντας την εξίσωση 3.41 στις

3.40 και 3.42 προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) = - [\nabla \rho \bar{v}] - \nabla P - [\nabla \bar{\tau}] + \rho \bar{g} \quad (3.43) \quad \rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = - \nabla P - [\nabla \bar{\tau}] + \rho \bar{g} \quad (3.44).$$

Επομένως η εξίσωση Κίνησης σε καρτεσιανές συντεταγμένες γράφεται :

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} - \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (3.45a)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} - \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (3.45\beta)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (3.45\gamma)$$

Στην περίπτωση δισδιάστατων ροών σε (σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων) η Αρχή Διατήρησης της Ορμής γράφεται:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) \quad (3.46) \quad \text{και} \quad -\frac{\partial P}{\partial y} = \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3.47). \quad \text{Τέλος για ροή μονής}$$

κατεύθυνσης ισχύει:  $-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (3.48)$ . Τονίζεται ότι οι δυνάμεις συναγωγής

καθώς και οι δυνάμεις βαρύτητας θεωρούνται αμελητέες. Επιπλέον η ροή χαρακτηρίζεται από την ισορροπία δυνάμεων πίεσης και ιξώδους (τάσεων) και η πίεση P θεωρείται βαθμωτό μέγεθος. Οι τάσεις αποτελούν ταυστή με εννέα

συνιστώσες:  $\vec{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix}$  όπου είναι κάθετος στο επίπεδο όπου δρα η τάση

ενώ ο δεύτερος αναφέρεται στην κατεύθυνση της τάσης. Σε μη ισοθερμοκρασιακά προβλήματα η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας. Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας γράφεται:

$$\dot{E}_{acc} + \dot{E}_{conv} = \dot{E}_{cond} + \dot{E}_{diss} \quad (3.49) \quad \text{όπου:}$$

✦  $\dot{E}_{acc}$  είναι ο παράγοντας συσσώρευσης και ισούται με  $\dot{E}_{acc} = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t}$

✦  $\dot{E}_{conv}$  είναι ο παράγοντας μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και ισούται με

$$\dot{E}_{conv} = \rho C_v \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \text{ όπου } C_v \text{ η ειδική γραμμομοριακή}$$

θερμότητα του ρευστού.

✦  $\dot{E}_{cond}$  είναι ο παράγοντας μετάδοσης θερμότητας με αγωγή και ισούται με

$$\dot{E}_{cond} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \text{ όπου } k \text{ ο συντελεστής θερμικής}$$

αγωγιμότητας και τέλος

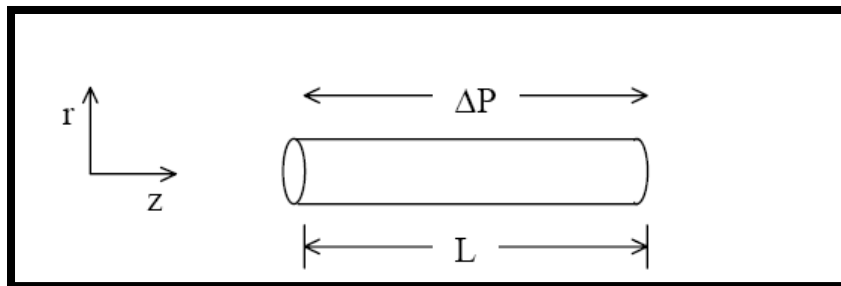
✦  $\dot{E}_{diss}$  ο παράγοντας απωλειών ενέργειας που ισούται με

$$\dot{E}_{diss} = \tau_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \tau_{xy} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \tau_{xz} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)$$

### 3.7 Ροή πολυμερικών τηγμάτων σε αγωγούς

#### 3.7.1 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΟΥ ΕΚΘΕΤΙΚΟΥ ΝΟΜΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΑΓΩΓΟ – ΡΟΗ POISEUILLE

Θεωρούμε την περίπτωση αξονικής στρωτής ροής σε αγωγό κυλινδρικής διατομής, γνωστή ως ροή Poiseuille.



Σχήμα 3.13: Ροή δια μέσου κυλινδρικού αγωγού

Η κίνηση του ρευστού γίνεται προς την κατεύθυνση z κατά μήκος του άξονα του σωλήνα. Η κλίση της ταχύτητας κατευθύνεται ακτινικά από τον άξονα προς την περιφέρεια του κυλίνδρου. Η επίδραση της εισόδου στην διαμόρφωση της ροής θεωρείται αμελητέα. Επομένως, η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται σε πλήρως αναπτυγμένη ροή από την είσοδο του αγωγού. Λόγω της γεωμετρίας του προβλήματος το καταλληλότερο σύστημα συντεταγμένων είναι το κυλινδρικό. Για λόγους συμμετρίας ο άξονας του κυλίνδρου συμπίπτει με τον άξονα του αγωγού. Οι ασκούμενες δυνάμεις σε κυλινδρικό στοιχείο κατά τη διεύθυνση z οφείλονται στην πτώση πίεσης του ρευστού κατά μήκος του κυλίνδρου και στην διατμητική τάση στην επιφάνεια του στοιχειώδους κυλίνδρου.

Από την Αρχή Διατήρησης της Ορμής έχουμε:

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \quad (3.50)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\Delta P}{L} \quad (3.51)$$

$$\tau_{rz} = -\frac{\Delta P}{L} \frac{r}{2} + C_1 \quad (3.52)$$

Χρησιμοποιώντας τον εκθετικό νόμο έχουμε:  $\tau_{rz} = m \left| \frac{\partial v_z}{\partial r} \right|^{n-1} \frac{\partial v_z}{\partial r}$  (3.53) και

ολοκληρώνοντας με οριακές συνθήκες  $\left\{ r=0, \left| \frac{\partial v_z}{\partial r} \right| = 0 \right\}$  και  $\{r=R, v_z = 0\}$

προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$v_z = v_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{n+1/n} \right] \quad (3.54)$$

$$v_{\max} = \frac{n}{n+1} \left[ \frac{R^{n+1}}{2m} \left( \frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{1/n} \quad (3.55)$$

$$v_{\max} = \frac{n}{n+1} \left[ \frac{R^{n+1}}{2m} \left( \frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{1/n} \quad (3.56)$$

$$\Delta P = 2mL \left[ \frac{3n+1}{n} \frac{Q}{\pi} R^{-\frac{(3n+1)}{n}} \right]^n \quad (3.57)$$

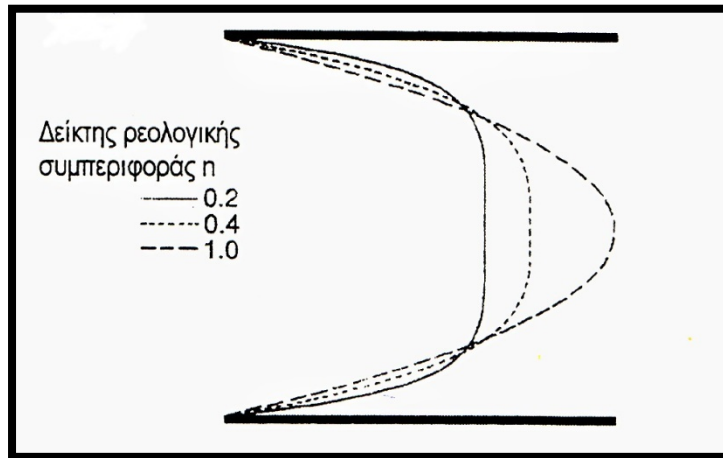
Για τη διατμητική τάση προκύπτει ότι είναι γραμμική συνάρτηση της ακτίνας:

$\tau_{rz} = -\frac{r}{2} \frac{\Delta P}{L}$  (3.58). Από την εξίσωση αυτή παρατηρείται ότι η τάση  $\tau_{rz}$  είναι 0 στον

άξονα του αγωγού ( $r=0$ ) και παίρνει τη μέγιστη τιμή στην επιφάνεια των τοιχωμάτων ( $r=R$ ). Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το προφίλ της ταχύτητας κατά τη ροή σε κυλινδρικό αγωγό ρευστού που υπακούει στον εκθετικό νόμο. Παρατηρείται ότι όσο μειώνονται οι τιμές του δείκτη ρεολογικής συμπεριφοράς  $n$  δηλαδή αύξηση της

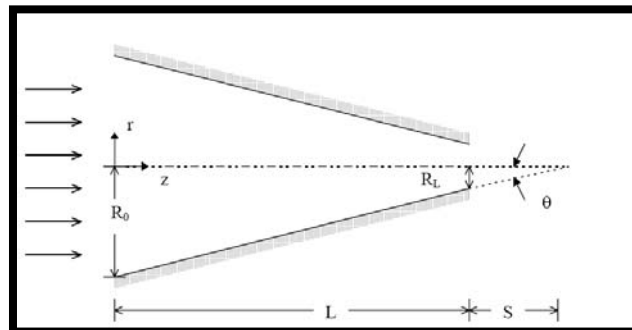


διατμητικής λέπτυνσης του ρευστού το προφίλ γίνεται πιο επίπεδο κ η ροή αποκτά περισσότερο εμβολικό χαρακτήρα.



**Σχήμα 3.14:** Το προφίλ της ταχύτητας ρευστού που υπακούει στον εκθετικό νόμο κατά την ισοθερμοκρασιακή ροή του σε κυλινδρικό αγωγό για διάφορες τιμές του δείκτη n.

### 3.7.2 ΡΟΗ ΣΕ ΚΟΛΟΥΡΟ ΚΩΝΟ



**Σχήμα 3.15:** Ροή δια μέσου κώλου κώνου

Για απειροελάχιστο τμήμα κολουροκωνικού αγωγού μήκους  $dz$  ισχύει:

$$dP = 2mR^{-(3n+1)} \left[ \frac{Q}{\pi} \left( \frac{1}{n} + 3 \right)^n \right] dz \quad (3.59)$$

σφηνοειδούς αγωγού ολοκληρώσουμε με με άνω όριο το  $z = L$  και κάτω όριο το

$$z = 0 \quad \text{και εφόσον ισχύει } R = R_0 - \frac{R_0 - R_L}{L} z \quad (3.60) \quad \text{τελικά για την πτώση πίεσης}$$

$$\lambda\alpha\mu\beta\acute{\alpha}\nu\omicron\upsilon\mu\epsilon: \Delta P = P_0 - P_L = \frac{2mL}{3n} \left[ \frac{Q}{\pi} \left( \frac{1}{n} + 3 \right) \right]^n \left( \frac{R_L^{-3n} - R_0^{-3n}}{R_0 - R_L} \right) \quad (3.61)$$

$$\Delta P = P_0 - P_L = \frac{2m \cot \theta}{3n} \left[ \frac{Q}{\pi} \left( \frac{1}{n} + 3 \right) \right]^n R_L^{-3n} \left[ 1 - \left( \frac{R_L}{R_0} \right)^{3n} \right] \quad (3.62)$$

### **Βιβλιογραφία 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου**

---

- i. Α.Θ.Παπαϊωάννου, «Μηχανική των ρευστών», Έκδοση του συγγραφέα , 2002
- ii. Π.Α.Ταραντίλη, «Τεχνική των πολυμερικών Τηγμάτων», Εκδόσεις Ε.Μ.Π,2004
- iii. Ε.Μητσούλης,«Βασικές Αρχές Μορφοποίησης Πολυμερών», Εκδόσεις Ε.Μ.Π,2006
- iv. Μισσού Ελευθερία, «Αναλυτική και αριθμητική προσομοίωση εκβολής πλαστικών σωλήνων», Διπλωματική Εργασία 2008
- v. T.A.Osswald,G.Menges, “Materials Science of Polymer for Engineers”
- vi. Chris Rauwendaal, Understanding extrusion, Hanser Publishers, Munich Vienna, New York, 1998
- vii. Chris Rauwendaal, Polymer Extrusion, Hanser Publishers, Munich, Vienna, New York, 1994
- viii. Walter Michaeli, Extrusion Dies, Hanser Publishers, Munich, Vienna, New York, 1984
- ix. Chris Rauwendaal, “How Proper Die Design Can Improve Profile Quality,” Plastics World, Vol. 49, Nov 1991, pp. 73-75
- x. T. A. Osswald and P.J. Gramann, “Polymer Processing Simulation Trends,” Society for the Advancement of Material and Process Engineers, Erlangen

---

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> - ΕΚΒΟΛΗ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

---

### 4.1 Εισαγωγή

Η εκβολή αποτελεί μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές τόσο για τη μορφοποίηση όσο και για την ανάμειξη πολυμερών. Περίπου το 60% των πλαστικών παγκοσμίως μορφοποιούνται με τη μέθοδο αυτή. Στα προϊόντα που μορφοποιούνται με εκβολή ανήκουν οι σωλήνες, ράβδοι, φιλμ, ίνες, μονωμένα καλώδια για ηλεκτρικές εφαρμογές. Η λειτουργία ενός εκβολέα συνίσταται στη μετατροπή των στερεών κόκκων του πολυμερούς τροφοδοσίας σε ομογενές τήγμα το οποίο στη συνέχεια προωθείται με ομοιόμορφο ρυθμό σε μια μήτρα. Διακρίνουμε συστήματα εκβολής ενός και δύο κοχλιών.

### 4.2 Η βασική λειτουργία του εκβολέα ενός κοχλία

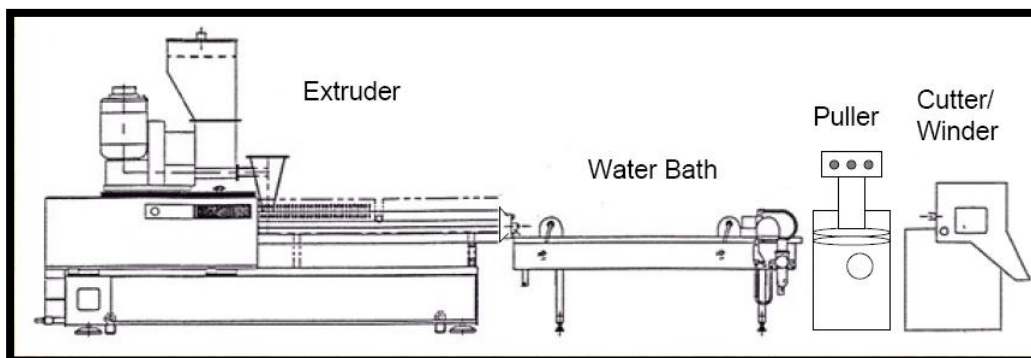
Η λειτουργία των περισσότερων εκβολέων γίνεται με την κάθοδο των πολυμερών υπό μορφή κόκκων, σκόνης ή φοιιδίων από τη χοάνη τροφοδοσίας στο άνοιγμα μεταξύ του περιστρεφόμενου κοχλία (screw) και του θερμαινόμενου κυλίνδρου (barrel). Το πολυμερές μεταφέρεται προς τα εμπρός, συμπιέζεται και τήκεται και τελικά υπό μορφή τήγματος περνά μέσα από τη μήτρα εκβολής όπου παίρνει το κατάλληλο σχήμα προτού εξέλθει και στερεοποιηθεί με ψύξη στην ατμόσφαιρα. Οι δυνάμεις τριβής μεταξύ κυλίνδρου και κοχλία ευθύνονται για την κίνηση του υλικού προς τα εμπρός το οποίο ενώ κινείται θερμαίνεται λόγω της τριβής και της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται από τα θερμαντικά στοιχεία. Όταν η θερμοκρασία του υλικού ξεπεράσει το σημείο τήξης η ζώνη τροφοδοσίας του υλικού στον κοχλία τελειώνει και ξεκινά η ζώνη τήξης. Καθώς το υλικό κινείται προς τα εμπρός το ποσό του στερεού υλικού σε κάθε θέση μειώνεται ως αποτέλεσμα της τήξης. Όταν εξαφανιστεί και ο τελευταίος κόκκος στερεού υλικό έχει πλέον τελειώσει

η ζώνη τήξης και ξεκινά πια η ζώνη δοσιμετρίας του τήγματος. Στη ζώνη αυτή το τήγμα απλώς ωθείται στη μήτρα.

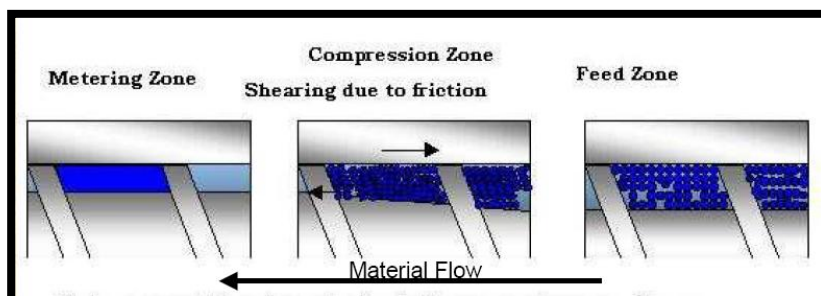
Καθώς το πολυμερικό τήγμα κινείται εντός της μήτρας αποκτά το σχήμα του ροϊκού σωλήνα και πιο συγκεκριμένα του τελευταίου τμήματος της κεφαλής. Δεδομένου ότι η μήτρα ασκεί αντίσταση στη ροή, απαιτείται πίεση προκειμένου να οδηγήσει το τήγμα εντός της μήτρας. Η πίεση αυτή συχνά προσδιορίζεται ως «πίεση κεφαλής» και καθορίζεται από το σχήμα της μήτρας και κατά κύριο λόγο το σχήμα του ροϊκού σωλήνα, τη θερμοκρασία του τήγματος, το ποσοστό ροής από τη μήτρα και από τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του τήγματος. Η «πίεση κεφαλής» δημιουργείται από την μήτρα και όχι από τον εκβολέα.



**Σχήμα 4.1:** Ένας εκβολέας βιομηχανίας



Σχήμα 4.2: Τυπική διάταξη εκβολέα σε γραμμή παραγωγής

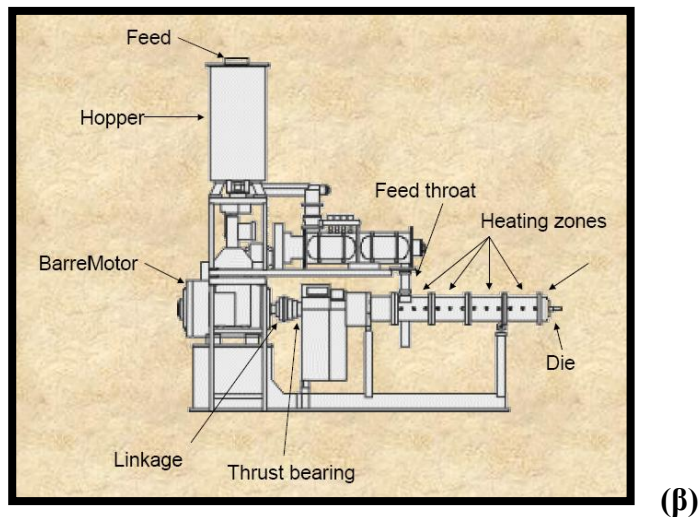
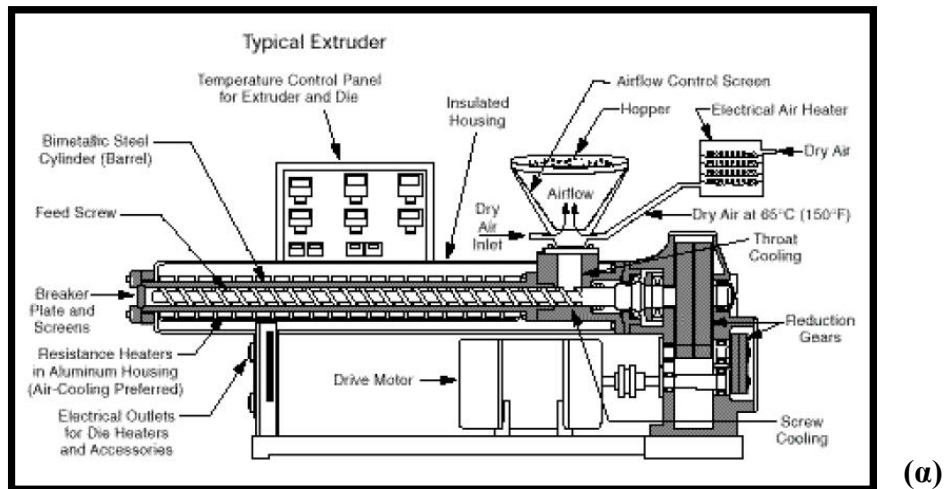


Σχήμα 4.3: Ο κοχλίας και οι ζώνες του



Σχήμα 4.4: Κόκκοι πολυμερών

### 4.3 Τα βασικά μέρη του εκβολέα



Σχήμα 4.5(α)-(β): Εξοπλισμός (hardware) εκβολέα

#### 1. Κινητήρας

Ένας εκβολέας πρέπει να περιλαμβάνει έναν κινητήρα ρυθμιζόμενης ταχύτητας περιστροφής, εφ' όσον απαιτείται λειτουργία με διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής και πολυμερή διαφόρων χαρακτηριστικών επεξεργασίας. Για την ρύθμιση της ταχύτητας εφαρμόζονται τόσο μηχανικά όσο και ηλεκτρικά συστήματα.

- ✦ Μηχανικά: Για μηχανική ρύθμιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα τροχαλίας-ιμάντα. Η μηχανική ρύθμιση εφαρμόζεται σε εκβολείς που απαιτούν ισχύ κινητήρα άνω των 25HP
- ✦ Ηλεκτρικά: υπάρχουν δύο τρόποι ηλεκτρικής ρύθμισης της ταχύτητας. Ο ένας εφαρμόζει κινητήρα συνεχούς ρεύματος μεταβλητής ταχύτητας και ο

άλλος κινητήρας εναλλασσόμενου σε συνδυασμό με μια μαγνητική αρπάγη.

✦ Υδραυλικά

Και οι δύο παραπάνω τρόποι δίνουν ακρίβεια στη ρύθμιση για μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων απ' ότι οι μηχανικά ρυθμιζόμενοι κινητήρες.

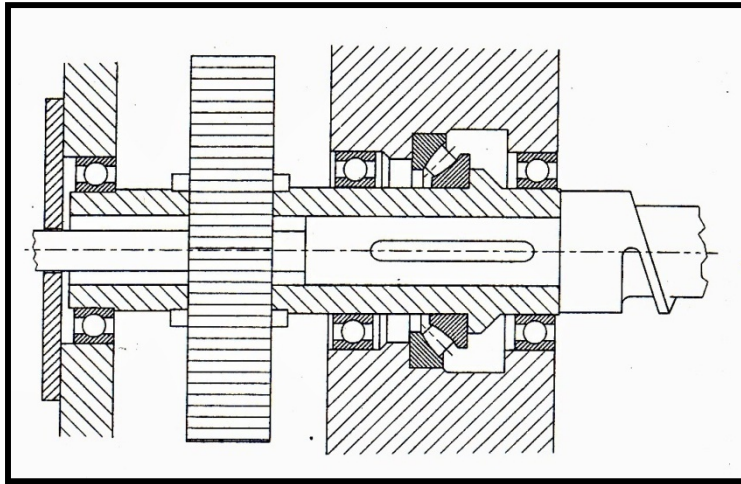


Σχήμα 4.6:Κινητήρας εκβολέα

**2. Έδρανα αντίθλιψης (*thrust bearings*)**

Κατά την περιστροφή του ο κοχλίας δέχεται μια ώθηση από το πολυμερικό τήγμα προς το πίσω μέρος του εκβολέα. Για το λόγο αυτό υπάρχουν τα έδρανα αντίθλιψης (*thrust bearing*) που λειτουργούν για την απόσβεση αυτής της δράσης.



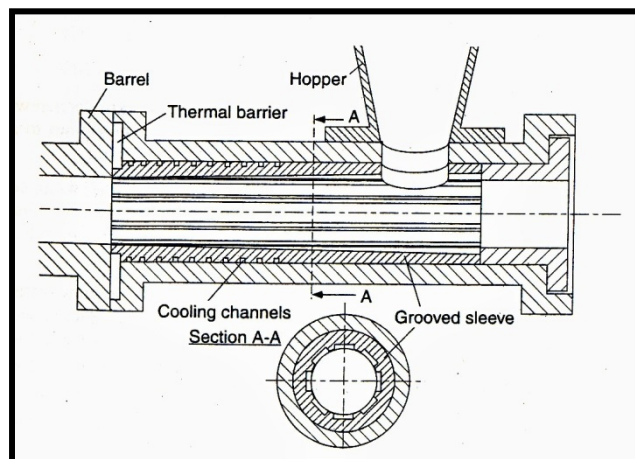


Σχήμα 4.7: Έδρανο αντίθλιψης

### 3. Κύλινδρος

Η εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του σώματος ενός εκβολέα αποτελεί αφ' ενός μια επιφάνεια για ανάπτυξη διάτμησης και αφ' ετέρου για μετάδοση θερμότητας. Ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο ( $L/D$ ) είναι μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού. Σαν μήκος θεωρείται το ενεργό, δηλαδή, η απόσταση από το χωνί τροφοδοσίας μέχρι το φίλτρο, ενώ σαν διάμετρος θεωρείται η εσωτερική διάμετρος του κυλίνδρου. Ο λόγος  $L/D$  είναι ενδεικτικός της διατιθέμενης επιφάνειας για εναλλαγή θερμότητας και ανάμειξης που πρέπει να υποστεί το πολυμερές. Οι συνηθισμένοι λόγοι  $L/D$  σε εκβολείς για θερμοπλαστικά υλικά κυμαίνονται από 16/1 μέχρι 24/1. Το σώμα ενός εκβολέα μπορεί να θερμαίνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις ή με επαγωγικό ρεύμα, είναι όμως δυνατό να θερμαίνεται και μέσω κελύφους που κυκλοφορεί λάδι ή άλλο θερμαντικό ρευστό. Η ηλεκτρική θέρμανση έχει το πλεονέκτημα της γρήγορης απόκρισης, του θερμοκρασιακού ελέγχου κατά ζώνες και δεν συνεπάγεται περιορισμούς ως προς το ύψος της επιθυμητής θερμοκρασίας όπως συμβαίνει με το ρευστό. Επιπλέον τα ηλεκτρικά στοιχεία θέρμανσης μπορούν να κατασκευασθούν σε μεγάλη ποικιλία μεγεθών, σχημάτων και ηλεκτρικής ισχύος. Οι εκβολείς που θερμαίνονται με ηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να ψύχονται με κυκλοφορία αέρα ή νερού. Η απομάκρυνση θερμότητας είναι βασική απαίτηση, όταν υπάρχουν κίνδυνοι από την υπερθέρμανση της ρητίνης λόγω τριβών. Οι μηχανές με μεγαλύτερο μήκος έχουν και μεγαλύτερη επιφάνεια ανταλλαγής

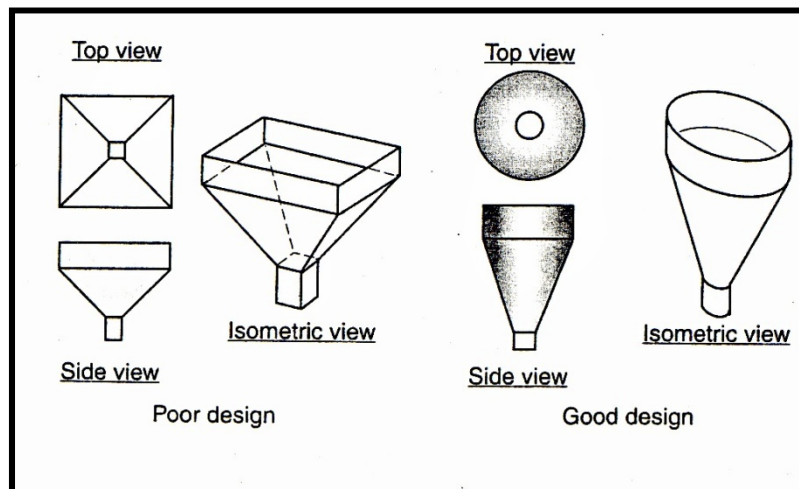
θερμότητας και προτιμώνται για πιο δύστηκτα πολυμερή. Στους περισσότερους κύλινδρους ανοίγονται κάθετες οπές για θερμοστοιχεία (thermocouples) που ανιχνεύουν και ελέγχουν τη θερμοκρασία τους. Οι κύλινδροι σχεδιάζονται για ελάχιστη διαστολή στη μέγιστη πίεση λειτουργίας τους, η οποία είναι 5000psi (34,45MPa) και έχουν ελάχιστη πίεση θραύσης 10000psi (68,9MPa). Οι ακριανές φλάντζες μπορούν να προσαρμοστούν στον κύλινδρο με βίδες ή με shrink and wedge συνδέσμους σχεδιασμένους να παραλαμβάνουν την εσωτερική πίεση των κυλίνδρων. Οι κύλινδροι κατασκευάζονται από χοντρό κραματωμένο χάλυβα. Είναι πλέον καθιερωμένο ο κύλινδρος να επενδύεται με σκληρό κράμα με βάση το κοβάλτιο, για να τον κάνει ανθεκτικό στην τριβή και στις χημικές αντιδράσεις. Υπάρχουν μερικοί κύλινδροι που φτιάχνονται ακόμα από χάλυβα που μπορεί να σκληρυνθεί με νιτριδίωση (εναζώτωση). Οι νιτριδιωμένοι κύλινδροι έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από τους επιμεταλλωμένους. Μερικά υλικά είναι πολύ διαβρωτικά και απαιτούν κύλινδρους από ειδικά κράματα όπως Hastelloy ή Z-nickel. Οι απαιτήσεις ακρίβειας του κυλίνδρου είναι ότι το ολικό σφάλμα ευθυγράμμισης μετά από όλες τις μηχανουργικές κατεργασίες πρέπει να είναι μικρότερο από το μισό της απόστασης κυλίνδρου-κοχλία. Αυτό κυμαίνεται από 0,002 για μηχανές 2 ιντσών (5,08 cm) έως 0,010 για μηχανές 6 ιντσών (15,24cm). Στις σύγχρονες μηχανές οι κύλινδροι είναι εξοπλισμένοι με έναν αεραγωγό για να εξαερίζεται το πολυμερές. Ο αεραγωγός μπορεί να ταπώνεται όταν ο εξαερισμός δεν είναι απαραίτητος.



**Σχήμα 4.8:**Κύλινδρος εκβολέα

#### 4. Χοάνη τροφοδοσίας

Το πολυμερές προωθείται στον εκβολέα μέσω της χοάνης τροφοδοσίας χάρη στην βαρύτητα. Σε πολλές περιπτώσεις υλικών βέβαια η βαρύτητα δεν είναι αρκετή για την προώθηση των κόκκων και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται βοηθητικές διατάξεις. Πολλά υλικά επίσης έχουν την τάση να παγιδεύουν τον αέρα εντός της χοάνης με συνέπεια αυτός να οδηγείται τελικά εντός της μήτρας δημιουργώντας ατέλειες στην επιφάνεια του παραγόμενου προϊόντος και σπάνια εκρήξεις καθώς ο αέρας διαφεύγει από τη μήτρα. Για το λόγο αυτό προτιμώνται οι χοάνες κενού στις οποίες το υλικό αρχικά εισέρχεται σε μια χοάνη και στη συνέχεια οδηγείται σε μια δεύτερη αφού πρώτα αφαιρεθεί ο εγκλωβισμένος αέρας μέσω μιας ειδικής διάταξης.



Σχήμα 4.9: Είδη χοανών τροφοδοσίας

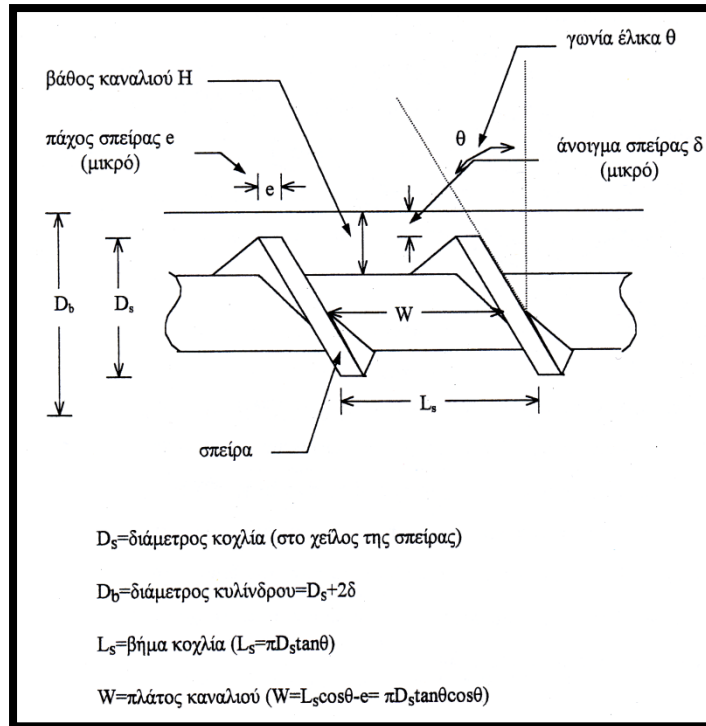
#### 5. Ο κοχλίας

Ο κοχλίας εκτελεί:

- Την μεταφορά ρητίνης μέσα στον εκβολέα
- Την μετάδοση της μηχανικής ενέργειας η οποία αποτελεί τμήμα της διαδικασίας τήξης
- Η ανάπτυξη πίεσης στον εκβολέα έτσι ώστε η ρητίνη να εξωθηθεί στη μήτρα

Η διάμετρος του σώματος σημειώνεται σαν  $D$ . Η γωνία που σχηματίζει η ελίκωση με έναν άξονα κάθετο προς τον κοχλία ονομάζεται γωνία ελίκωσης ( $\theta$ ). Σε πολλούς κοχλίες η ελίκωση προχωρεί σε μια στροφή κατά μήκος ίσο προς τη διάμετρο του “τετραγωνικού βήματος” (squared pitched screw). Αυτό αντιστοιχεί σε

γωνία ελίκωσης ίση προς  $17.65^\circ$ . Το διάστημα κατά το οποίο προχωρεί η ελίκωση σε μια πλήρη περιστροφή ονομάζεται "βήμα" ( $t$ ). Το πέλμα της ελίκωσης είναι η επιφάνεια της που είναι στραμμένη προς το σώμα του συστήματος εκβολής. Το πλάτος του πέλματος και του διάκενου μεταξύ πέλματος και σώματος συμβολίζονται σαν  $e$  και  $\delta$  αντίστοιχα. Το  $\delta$  είναι τόσο μικρό ώστε οι διάμετροι σώματος και κοχλία μπορούν να θεωρηθούν ότι ταυτίζονται στις περισσότερες εφαρμογές. Το διάκενο που υπάρχει μεταξύ των σπειρών της ελίκωσης ονομάζεται αύλακα. Το πλάτος της αύλακας παρίσταται με  $w$  ενώ το ύψος του με  $h$ . Μια σημαντική παράμετρος η οποία συνδέεται με τον κοχλία είναι ο αδιάστατος λόγος  $L/D$ , όπου  $L$  το μήκος του κοχλία και  $D$  η διάμετρός του. Για τα θερμοπλαστικά ο λόγος αυτός κυμαίνεται συνήθως από 16:1 μέχρι 32:1, ενώ για τα ελαστομερή είναι πολύ μικρότερος και κυμαίνεται μεταξύ 4:1 μέχρι 7:1. Η διάμετρος του κοχλία ποικίλει, με τις τιμές κάτω των 20 mm για τους εργαστηριακούς εκβολείς, ενώ στους βιομηχανικούς εκβολείς η διάμετρος φθάνει τα 750 mm. Γενικά όσο αυξάνει το μήκος του κοχλία τόσο αυξάνει η απόδοση της εγκατάστασης ανά μονάδα καταναλισκόμενης ισχύος, καθώς και η ομοιομορφία του τήγματος και η ακρίβεια των διαστάσεων του εξερχόμενου προϊόντος. Η διάμετρος του κυλίνδρου  $D_b$  είναι σταθερή σε όλο το μήκος του εκβολέα ενώ για τη διάμετρο του κοχλία ισχύει  $D_s = D_b - 2 \cdot \delta$  (4.1). Το διάκενο είναι τόσο μικρό ώστε η διάμετρος του κυλίνδρου και η διάμετρος του κοχλία μπορεί να θεωρηθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ταυτίζονται.  $D_b = D_s = D$  (4.2).



Σχήμα 4.10: Η γεωμετρία του κοχλία

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΚΟΧΛΙΑ

D<sub>s</sub> = διάμετρος κοχλία

D<sub>b</sub> = διάμετρος κυλίνδρου

L<sub>s</sub> = βήμα κοχλία (L<sub>s</sub> = π D<sub>s</sub> tanφ)

w = πλάτος καναλιού (W = L<sub>s</sub> cosφ - e = π D<sub>s</sub> tanφ cosφ)

Συχνά ισχύει D<sub>s</sub> = L<sub>s</sub> οπότε πρόκειται για τον επονομαζόμενο κοχλία τετραγωνικού βήματος. Τότε φ = 17,65° (tanφ = 1/π). Έστω αμελητέο άνοιγμα σπείρας δ οπότε D<sub>b</sub> = D<sub>s</sub> = D. Έστω επίσης ότι ο κοχλιάς είναι στατικός και ο κύλινδρος περιστρέφεται με ταχύτητα: V<sub>b</sub> = π · D · N (4.3), όπου N η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κοχλία (σε rpm) και Z η κάτω κατεύθυνση του καναλιού. Η συνιστώσα της ταχύτητας στην κάτω κατεύθυνση του καναλιού θα δίνεται από τη σχέση : V<sub>bz</sub> = V<sub>b</sub> · cosφ = π · D · N · cosφ (4.4). Η απόσταση z σχετίζεται με την αξονική L από τη σχέση z = L/sinφ (4.5). Για το βήμα t του κοχλία ισχύει:

$t = \pi D \tan \phi$  (4.6) . Το πλάτος της αύλακος δηλαδή η κάθετη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ελικώσεων δίνεται από τη σχέση :

$W = t \cos \phi - e = t \cos \phi$  (4.7) και με αντικατάσταση από την εξίσωση (4.5) έχουμε

$W = t \cos \phi - e = t \cos \phi = \pi D \sin \phi - e = \pi D \sin \phi$  (4.8) ενώ ισχύει  $z = \frac{L}{\sin \phi}$  (4.9). Η ροή

λόγω οπισθέλκουσας ισούται με :  $Q_d = \frac{1}{2} V_z HW$  (4.10) και η ροή λόγω πίεσης

ισούται με  $Q_p = \frac{H^3 W \Delta P}{12 \mu L} \sin \phi$  (4.11) οπότε η απλουστευμένη έκφραση για τη ροή

του εκβολέα είναι η ακόλουθη:  $Q = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12 \mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$  (4.12)

όπου  $\Delta P$  η διαφορά πίεσης που αναπτύσσεται στη ζώνη δοσιμετρίας. Στην τελευταία εξίσωση δεν λαμβάνεται υπόψη το πλάτος του πέλματος της έλικας  $e$  το οποίο θεωρείται πολύ μικρό σε σχέση με το πλάτος της αύλακος. Εάν το άνοιγμα  $\delta$  μεταξύ σπείρας του κοχλίου και του κυλίνδρου δεν είναι αμελητέο, πρέπει να αφαιρέσουμε το ποσό της παροχής διαφυγής (leakage flow) που εύκολα αποδεικνύεται ότι είναι:

$Q_L = \frac{\pi D^2 \delta^3}{12 \mu e} \tan \phi \frac{\Delta P}{L}$  (4.13) . Επομένως η εξίσωση παροχής γράφεται τελικά:

$$Q = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12 \mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L} - \frac{\pi D \delta^3}{12 \mu e} \tan \phi \frac{\Delta P}{L} \tan \phi \frac{\Delta P}{L} \quad (4.14)$$

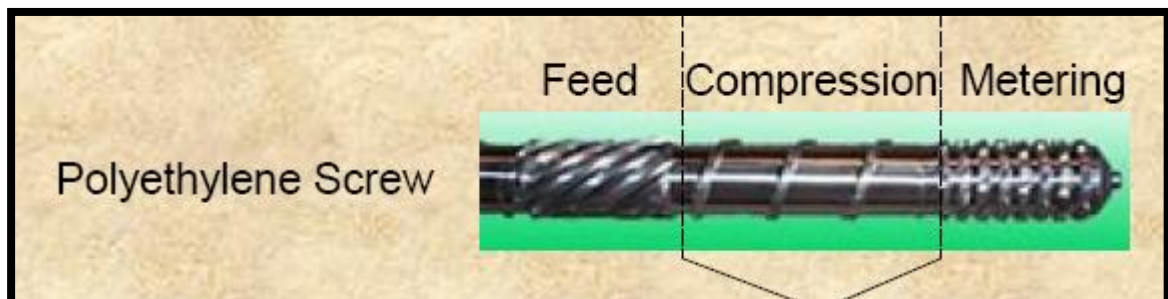
Φυσικά τα πολυμερικά τήγματα είναι ρευστά διατμητικής λέπτυνσης, επομένως πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποιο ισοδύναμο νευτωνικό ιξώδες για την εκτέλεση των υπολογισμών. Στην πράξη μετά τον εκβολέα ακολουθεί η μήτρα μορφοποίησης. Άρα η εκροή από τον εκβολέα είναι εισροή για τη μήτρα. Δηλαδή  $Q_{\text{εκβολέα}} = Q_{\text{μήτρας}}$  (4.15). Σε μήτρα κυκλικής διατομής ακτίνας  $R$  και μήκους  $L_d$  για νευτωνικό ρευστό και ισοθερμοκρασιακές συνθήκες, η ογκομετρική παροχή και η πτώση πίεσης δίνονται

από την εξίσωση Haagen-Poiseulle:  $Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \mu L_d}$  (4.16). Στην περίπτωση μήτρας με

μορφή σχισμής η ογκομετρική παροχή δίνεται από την σχέση  $Q = \frac{w h^3 \Delta P}{8 \mu L_d}$  (4.17)

όπου  $w$  το πλάτος και  $h$  το άνοιγμα της μήτρας. Η σχισμή μπορεί να είναι ευθεία (παραγωγή επίπεδων φύλλων) ή κυκλική (παραγωγή σωλήνων). Στην τελευταία

περίπτωση αντί για το πλάτος της μήτρας  $w$ , χρησιμοποιείται μια μέση περιφέρεια . Εάν δεν υπάρχει ανάπτυξη πίεσης (π.χ. κανένας περιορισμός ροής) στην περίπτωση μήτρας με μορφή σχισμής η ογκομετρική παροχή δίνεται από την σχέση (4.17) όπου  $w$  το πλάτος και  $h$  το άνοιγμα της μήτρας. Η σχισμή μπορεί να είναι ευθεία (παραγωγή επίπεδων φύλλων) ή κυκλική (παραγωγή σωλήνων). Στην τελευταία περίπτωση αντί για το πλάτος της μήτρας  $w$ , χρησιμοποιείται μια μέση περιφέρεια . Εάν δεν υπάρχει ανάπτυξη πίεσης (π.χ. κανένας περιορισμός ροής στο άκρο του εκβολέα), η παροχή θα είναι μέγιστη και ίση με:  $Q_{MAX} = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin\phi \cos\phi$  (4.18) και η μέγιστη δυνατή πίεση που μπορεί να αναπτύξει ένας εκβολέας είναι  $P_{MAX} = 6\pi D L N \mu / H^2 \tan\phi$  (4.19). Επειδή το  $\mu$  είναι μεγάλο για πολυμερικά τήγματα, μπορούν να αναπτυχθούν στον εκβολέα εξαιρετικά μεγάλες (και πολύ επικίνδυνες) πιέσεις. Στο δοσιμετρικό κοχλία ενός εκβολέα διακρίνουμε τρεις ζώνες: τη ζώνη τροφοδοσίας (feed zone), τη ζώνη συμπίεσης ή τήξης (compression zone) και τη ζώνη δοσιμετρίας (metering zone). Η ακριβής λειτουργία των περιοχών αυτών αναλύεται παρακάτω:



Σχήμα 4.11: Τμήματα δοσιμετρικού κοχλία

## Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΕΝΟΣ ΚΟΧΛΙΑ

### ➔ Ζώνη Τροφοδοσίας

Η λειτουργία της ζώνης αυτής έχει ως σκοπό την προθέρμανση του πολυμερούς και την μεταφορά του στο επόμενο τμήμα. Η ζώνη τροφοδοσίας χαρακτηρίζεται από σταθερό και σχετικά μεγάλο βάθος αύλακος. Προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε το υλικό να μην υπερθερμανθεί πολύ γρήγορα γιατί στην περίπτωση αυτή η ρητίνη θα

κολλήσει στον κοχλία και απλώς θα περιστρέφεται χωρίς να μεταφέρεται στο επόμενο τμήμα. Η εν λόγω ζώνη σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει τη μεγαλύτερη δυνατότητα μεταφοράς στις επόμενες ζώνες του κοχλία και να μην παρουσιασθεί έλλειψη του υλικού.

### ➔ Ζώνη συμπίεσης ή Τήξης

Κατά μήκος της ζώνης αυτής το βάθος της αύλακας του κοχλία μειώνεται βαθμιαία, με αποτέλεσμα το τήγμα να συμπιέζεται και να εξαναγκάζεται ο εγκλωβισμένος από το πλαστικό αέρας και άλλες πτητικές ουσίες να εξέλθουν από το πολυμερές.

### ➔ Ζώνη Δοσιμετρίας

Στη ζώνη αυτή ο κοχλίας χαρακτηρίζεται από σταθερό και πολύ μικρό βάθος αύλακος. Το μικρό βάθος αύλακος επιφέρει την ανάπτυξη υψηλών διατμητικών τάσεων στην ρητίνη με αποτέλεσμα την ολοκλήρωση της τήξης του πολυμερούς. Η ανάπτυξη υψηλών διατμητικών τάσεων στη ζώνη οδηγεί στην ανάπτυξη πίεσης στο πολυμερικό τήγμα ούτως ώστε να εξωθηθεί προς την έξοδο του εκβολέα. Το τήγμα ομογενοποιείται και με ομοιόμορφη σύσταση, θερμοκρασία και πίεση οδηγείται με σταθερή παροχή στην μήτρα εκβολής. Η συμπίεση του πολυμερούς οφείλεται στην προοδευτική μείωση στο βάθος αύλακος του κοχλία κατά μήκος του εκβολέα. Μια σημαντική παράμετρος ενός συστήματος εκβολής είναι ο λόγος συμπίεσης (compression ratio) που ορίζεται ως ο λόγος του βάθους της αύλακος στο τμήμα τροφοδοσίας προς το βάθος της αύλακος στο τμήμα δοσιμετρίας. Βασική απαίτηση για ένα σωστά σχεδιασμένο κοχλία, είναι η διατήρηση σταθερού ρυθμού εξόδου του υλικού, εφ' όσον και ο χαρακτηρισμός του είναι «δοσιμετρικός κοχλίας». Η δύναμη τριβής με τα τοιχώματα του κυλίνδρου προστατεύει τα σωματίδια από την ελεύθερη περιστροφή τους με την περιστροφή του κοχλία και επομένως αποτελεί δύναμη προώθησης των στερεών σωματιδίων προς την έξοδο. Η δύναμη τριβής με την επιφάνεια του κοχλία ευνοεί τη περιστροφή των σωματιδίων και κατά συνέπεια αποτελεί επιβραδυντική δύναμη στην αξονική μετακίνηση των σωματιδίων. Επομένως στην περίπτωση που η δύναμη τριβής στην επιφάνεια του κυλίνδρου είναι



μηδενική, δεν συμβαίνει αξονική μετατόπιση του υλικού προς την έξοδο του εκβολέα. Αντίθετα όταν η δύναμη τριβής στον κοχλία είναι μηδενική έχουμε τη μέγιστη αξονική μετατόπιση των σωματιδίων. Για το λόγο αυτό οι κοχλίες έχουν γυαλισμένες επιφάνειες ενώ τα τοιχώματα των κυλίνδρων φέρουν αυλακώσεις για την σκόπιμη αύξηση της τραχύτητας. Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι ο ρυθμός μεταφοράς των στερεών σωματιδίων εξαρτάται από το βάθος της αύλακος του κοχλία. Για την περιοχή μικρών τιμών, ο ρυθμός μεταφοράς των σωματιδίων αυξάνει με την αύξηση του βάθους αύλακος. Εντούτοις, με περαιτέρω αύξηση του βάθους ο ρυθμός μεταφοράς φτάνει σε μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται. Η δύναμη επιβράδυνσης αυξάνεται ενώ η δύναμη προώθησης μένει ίδια γεγονός που οδηγεί στη μείωση του ρυθμού μεταφοράς των στερεών. Ο συντελεστής τριβής επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και επομένως οποιαδήποτε θερμοκρασιακή αλλαγή στον κοχλία ή στον κύλινδρο θα επηρεάσει αντίστοιχα και τις τιμές του συντελεστή τριβής. Έχουν προταθεί εξισώσεις που περιγράφουν την τροφοδοσία στερεών κόκκων σε κοχλίες εκβολέων, απ' όπου εξάγονται τα ακόλουθα υψίστης σημασίας συμπεράσματα:

- ◆ Όσο μικρότερη είναι η τριβή μεταξύ κοχλία και κόκκων τόσο ταχύτερη είναι η προώθηση τους.
- ◆ Όσο μεγαλύτερη είναι η τριβή μεταξύ κόκκων και σώματος του εκβολέα τόσο ταχύτερη είναι η μεταφορά τους.
- ◆ Η αύξηση στο βάθος αύλακος αυξάνει την εγκάρσια επιφάνεια της και επιφέρει αύξηση στο ρυθμό μεταφοράς των σωματιδίων.

Ο κοχλίας συνήθως κατασκευάζεται από κραματωμένο χάλυβα (π.χ. SAE 4140), με μεγάλη σκληρότητα στις θερμοκρασίες τήξης του υλικού. Οι άκρες των ελικώσεων του κοχλία συνήθως καλύπτονται με κάποιο σκληρό κράμα, για να βελτιώσουν την αντοχή σε φθορά. Ο σχεδιασμός του κοχλία καθορίζεται από τον ρυθμό παραγωγής που απαιτείται και από το εκβαλλόμενο πολυμερές.



**Σχήμα 4.12:**Κοχλίες εκβολέων

### 5. Κιβώτιο ταχυτήτων

Τα κιβώτια ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται στους μονοκόχλιους εκβολείς είναι εδώ και πολλά χρόνια, σχεδόν αποκλειστικά, μονάδες άμεσης μετάδοσης (direct-drive units) παρά μειωτήρες ατέρμονα κοχλία (wormgear reducers). Τα γρανάζια έχουν είτε ελικοειδή οδόντωση, είτε τύπου ψαροκόκαλου (herringbone type) για ελάχιστη φθορά κατά τη μέγιστη μεταφορά ροπής. Τα κιβώτια ταχυτήτων είναι σταθερά ρυθμισμένα καθώς οι εκβολείς λειτουργούν γενικά για βδομάδες χωρίς διακοπή. Οι σχέσεις μετάδοσης των κιβωτίων κυμαίνονται από 6:1 έως 12:1 ανάλογα και με τη βασική ταχύτητα του κινητήρα και τις απαιτήσεις ροπής για το κατεργαζόμενο πολυμερές. Τυπικές κλίμακες ταχύτητας του κοχλία είναι 2-35rpm, 10-90rpm, 15-150rpm, ενώ υπάρχουν και άλλες για ειδικές περιπτώσεις. Μηχανές που είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν με ποικιλία πολυμερών έχουν εναλλάξιμα κιβώτια ταχυτήτων όπως αυτό που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αλλάζοντας θέση ή αντικαθιστώντας τα γρανάζια, η σχέση μετάδοσης μπορεί να αλλάξει από μια τιμή που παρέχει υψηλές ταχύτητα και μέτρια ροπή σε μια που δίνει χαμηλές ταχύτητες

και υψηλή ροπή. Είναι πάντα ευνοϊκότερο να χρησιμοποιείται το κιβώτιο ταχυτήτων στην κλίμακα όπου ο κινητήρας λειτουργεί σε υψηλότερες ταχύτητες, τόσο για καλύτερο έλεγχο, όσο και για πιο αποδοτική λειτουργία του κινητήρα.

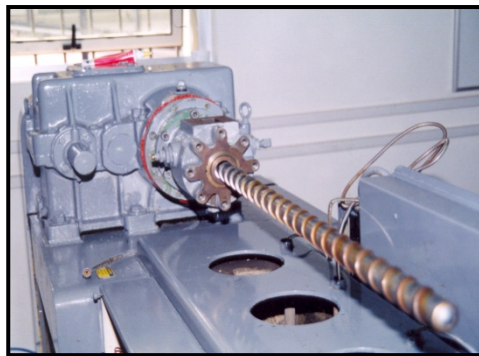
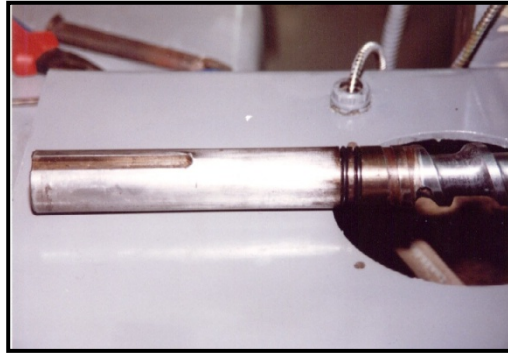
#### **4.4 Ο εκβολέας του εργαστηρίου μας**

Ο εκβολέας που χρησιμοποιείται στο εργαστήριό του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών είναι ένας μονοκόχλιος εκβολέας της εταιρίας Johnson Plastics Machinery. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του είναι τα παρακάτω:

<b>EXTRUDER SERIAL NUMBER</b>	<b>6606-57</b>
<b>REF. SERIAL NUMBER</b>	<b>HB74-43348A</b>
<b>BARREL SERIAL NUMBER</b>	<b>303-P7196-4</b>
<b>BARREL BORE AND L/D RATIO</b>	<b>1 ½ 24.1</b>
<b>REDUCER GEAR</b>	<b>11.32</b>

Η διάταξη του εκβολέα αποτελείται από το κύριο σώμα του εκβολέα και τον κεντρικό πίνακα ελέγχου. Ο κεντρικός πίνακας ελέγχου φέρει τον κεντρικό διακόπτη του ρεύματος, καθώς επίσης ένα στροφόμετρο και ένα αμπερόμετρο τα οποία μετρούν τις στροφές και το ρεύμα του ηλεκτροκινητήρα του εκβολέα. Επίσης υπάρχουν πέντε θερμομέτρα οι ενδείξεις των οποίων (σε βαθμούς °F) επιτρέπουν τη ρύθμιση της θερμοκρασίας συγκεκριμένων τμημάτων του εκβολέα κατά τη διάρκεια της εκβολής. Κατά μήκος του εκβολέα υπάρχουν επίσης τέσσερις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Σε κάθε αντίσταση είναι ενσωματωμένο ένα θερμοστοιχείο που οδηγεί το σήμα σε καθένα από τα θερμομέτρα. Όταν η μετρούμενη θερμοκρασία γίνει ίση με την επιθυμητή, τότε σταματάει αυτόματα το ρεύμα προς τις αντιστάσεις και έτσι επιτυγχάνεται ο έλεγχος της θερμοκρασίας. Όταν ο εκβολέας είναι σε κατάσταση αναμονής όλα τα θερμομέτρα πρέπει να έχουν ένδειξη 100°F. Κάτω από κάθε θερμομέτρο υπάρχει ένας δείκτης που δείχνει κατά πόσο η αντίσταση έχει την επιθυμητή θερμοκρασία και όταν η ένδειξη είναι μηδέν τότε ο η αντίσταση έχει την σωστή θερμοκρασία. Οι στροφές του κοχλία ρυθμίζονται σύμφωνα με την ένδειξη ενός μανομέτρου. Στο τέλος της διεργασίας, ένα άλλο πιο μαλακό, ειδικό πλαστικό χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του εκβολέα. Ο εκβολέας του εργαστηρίου μας

έχει δύο κυκλώματα ψύξης που χρησιμοποιούν φιλτραρισμένο νερό. Η τροφοδοσία αρχικού υλικού, υπό τη μορφή κόκκων, στον εκβολέα γίνεται μέσω ενός χωνιού. Η μήτρα έχει τη δυνατότητα παραγωγής σωλήνων HDPE DN32. Τέλος, στην είσοδο του καλουπιού υπάρχει μανόμετρο ώστε να έχουμε τις απαραίτητες ενδείξεις πίεσης κατά την παραγωγή των σωλήνων.



**Σχήμα 4.13:**Ο δοσιμετρικός κοχλίας του εκβολέα του εργαστηρίου

**Τεχνικά χαρακτηριστικά κοχλία (6607 157)**

Εξωτερική διάμετρος [mm] : 37.5

Βήμα [mm] : 37.5

Εσωτερική διάμετρος κυλίνδρου (σώματος) [mm] : 38

Λόγος μήκους /Εσωτερική διάμετρο κυλίνδρου (σώματος) : 24.1

Επειδή η εξωτερική διάμετρος του κοχλίας ισούται με το βήμα του, ο κοχλίας θεωρείται τετράγωνου βήματος, οπότε η γωνία ελίκωσης προκύπτει 17,65°.

Μήκος ζώνης τροφοδοσίας [mm] : 255 (  $255/37,5 = 6,8$  )

Μήκος μεταβατικής ζώνης [mm] : 304 (  $304/37,5 = 8,1$  )

Μήκος ζώνης ρύθμισης [mm] : 343 (  $343/37,5 = 9,1$  )

Βάθος καναλιού στη ζώνη τροφοδοσίας [mm] : 6,3

Βάθος καναλιού στη ζώνη ρύθμισης [mm] : 2,3

Λόγος συμπίεσης :  $6,3/2,3 = 2,75$

Ολικό μήκος κοχλία [mm] : 1195

#### 4.5 Οι κεφαλές με αράχνη

Προκειμένου να παραχθούν προϊόντα δακτυλιοειδούς διατομής χρησιμοποιούνται:

- **Κεφαλές με αράχνη (mandrel/ spider support die)**
- Κεφαλές με καλάθι (screen pack die)
- Κεφαλές πλάγιας τροφοδοσίας (side fed die)
- Κεφαλές με ελικοειδή διανομέα (spiral mandrel die)

Εμείς θα εστιάσουμε στις κεφαλές με αράχνη. Στις κεφαλές αυτές αλλά και σε όλες όσες αναφέρονται παραπάνω το βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η ζώνη του «σιδερώματος» που βρίσκεται στην έξοδο της μήτρας και η οποία επιτρέπει στο τήγμα να ξεκουραστεί και να αποβάλλει τις όποιες παραμένουσες παραμορφώσεις έχει. Το τήγμα που παρέχει ο εκβολέας σε ένα κυλινδρικό κανάλι ροής, μετασχηματίζεται στην αράχνη σε μια δακτυλιοειδή ροή. Το τήγμα εισάγεται στη περιοχή της αράχνης και ρέει γύρω από τα πόδια της . Τα βασικά τμήματα της κεφαλής, όπως η στήριξη της αράχνης και ο δακτύλιος εξόδου σε μια κεφαλή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες γεωμετρίες. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη ροή στη μήτρα, τοποθετούνται περιφερειακά κοχλίες κεντραρίσματος. Οι κεφαλές με αράχνη χρησιμοποιούνται ευρέως αφού εξασφαλίζουν ομοιόμορφη διανομή τήγματος αλλά τα πόδια της αράχνης αφήνουν σημάδια ροής τα οποία μπορούν να εξαλειφθούν αυξάνοντας τη θερμοκρασία, στην ζώνη της αράχνης. Ωστόσο στις εν λόγω κεφαλές παρουσιάζονται κάποια μειονεκτήματα που οφείλονται σε κατασκευαστικές διαμορφώσεις κυρίως στο πόδι της αράχνης. Τέτοιου είδους προβλήματα όπως για παράδειγμα τα σημάδια στη ροή του πολυμερικού τήγματος που οφείλονται σε γραμμές συγκόλλησης σε ορισμένες περιπτώσεις μόνο είναι ορατά παρόλα αυτά όμως δύνανται να δημιουργήσουν μηχανικά αδύναμες περιοχές στην κεφαλή. Προκειμένου τελικά να

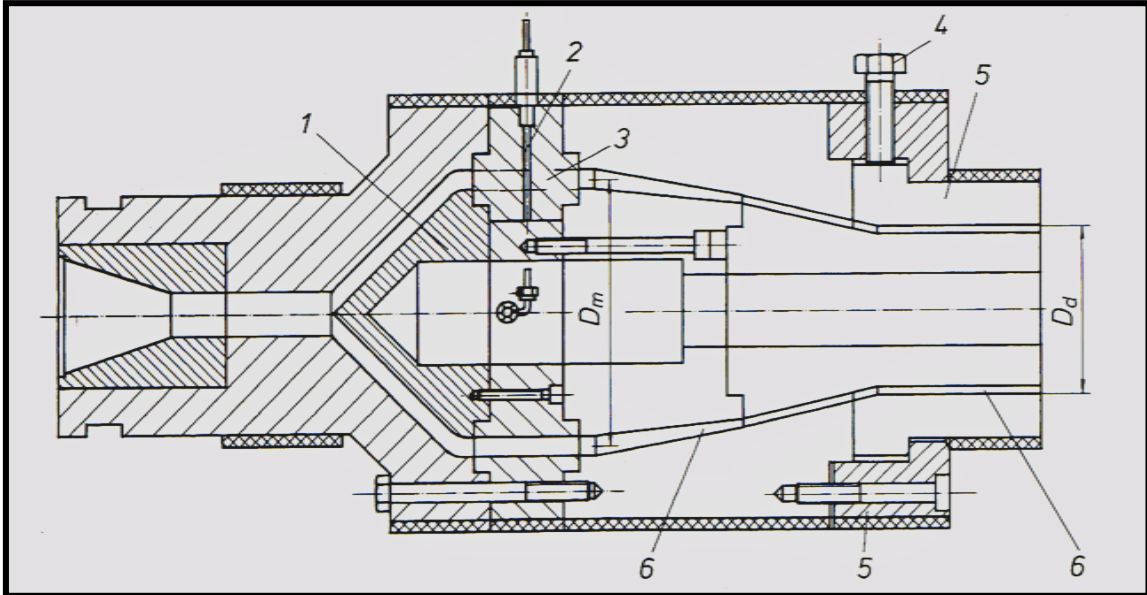
ελαχιστοποιηθούν τα σημάδια στη ροή του τήγματος σε μια κεφαλή με αράχνη υπάρχουν οι παρακάτω τρεις εκδοχές:

- Να αυξήσουμε τη θερμοκρασία ή το χρόνο παραμονής του τήγματος στη μήτρα.
- Να εξασφαλίσουμε ομοιόμορφη περιφερειακή κατανομή της ταχύτητας.
- Να τοποθετήσουμε μια διάταξη περιφερειακά προκειμένου να οριοθετήσουμε της κίνηση των μορίων κατά την διαμήκη έννοια και μεταξύ των ποδιών της αράχνης.

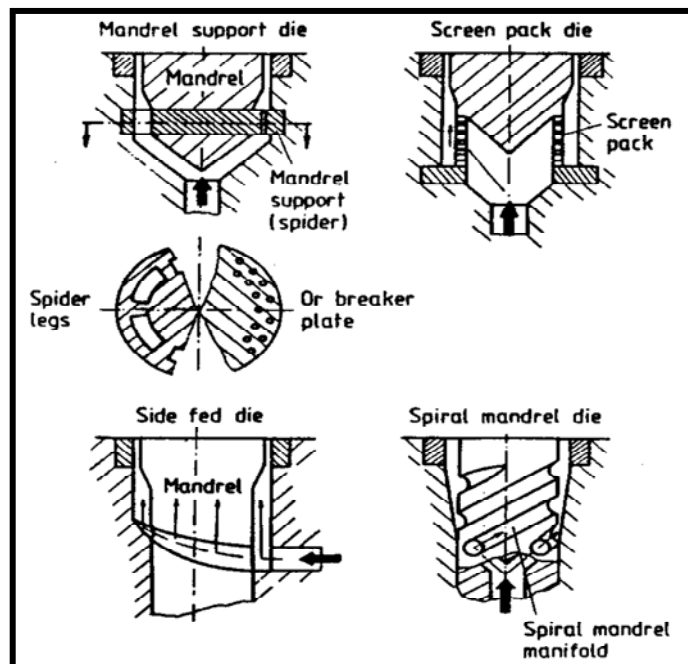
Πρακτικά οι παραπάνω στόχοι επιτυγχάνονται μέσω των κατωτέρω μεθόδων

- Μέσω της τοποθέτησης διατάξεων που θα στρέφονται περί του κύριου άξονα της μήτρας προκειμένου να μειώνονται τα σημάδια στη ροή. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος έγκειται στο γεγονός ότι απαιτεί πρόσθετο κινητήρα κάτι που ελλοχεύει κινδύνους σε θέματα στεγανότητας.
- Μέσω της μόνωσης των ποδιών της αράχνης με αδιάβροχο υλικό. Κάτι τέτοιο όμως πρακτικά είναι αδύνατο λόγω της φθορά που θα υποστεί το μονωτικό υλικό.
- Μέσω της αύξησης του μήκους το ροϊκού σωλήνα προκειμένου να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής του τήγματος εντός της μήτρας. Αυτό είναι κάτι που μπορεί να πραγματοποιηθεί, ωστόσο όμως οι απώλειες στην πίεση δεν πρέπει να ξεπερνούν την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή.
- Μέσω της ώθησης του ρεύματος του ρευστού προκειμένου να ακολουθήσει συγκλίνουσα πορεία μετά την περιοχή των ποδιών της αράχνης.

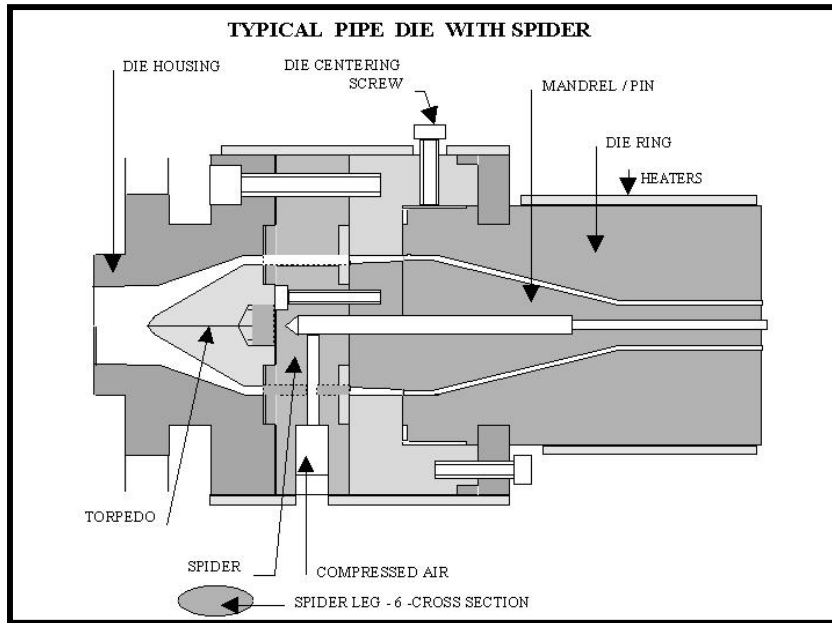
Τέλος, αξίζει να τονίσουμε ότι οι κεφαλές με αράχνη μπορούν να λειτουργήσουν σε μέγιστη πίεση μέχρι **600 bar** κάτι που από ερευνητικής απόψεως είναι ιδιαίτερος ενδιαφέρον. Για το λόγο αυτό στο κεφάλαιο που θα ακολουθήσει θα ελέγξουμε την αντοχή της μήτρας και στην ακραία περίπτωση λειτουργίας της σε πίεση 600 bar.



**Σχήμα 4.14:**1) κώνος αρσενικού κεφαλής, 2) αράχνη, 3) πόδι αράχνης, 4) κοχλίας κεντραρίσματος, 5) δακτύλιος συγκράτησης μήτρας, 6) ζώνη χαλάρωσης

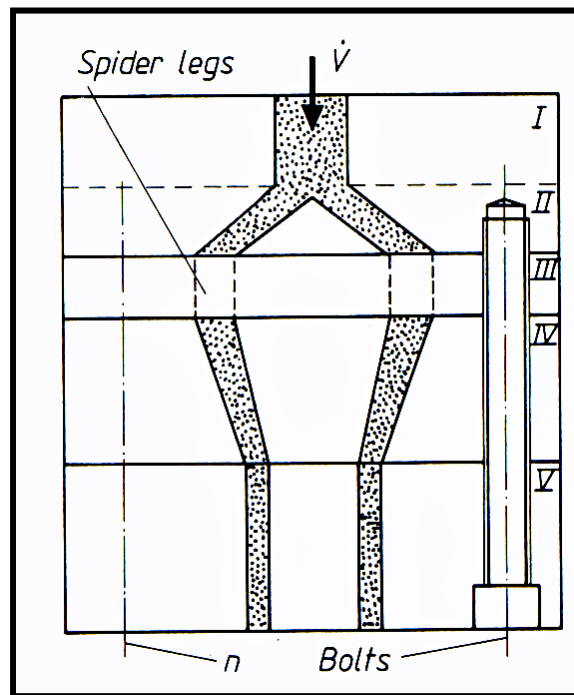


**Σχήμα 4.15:**Μήτρες για την παραγωγή σωλήνων



Σχήμα 4.16: Η κεφαλή με αράχνη

Οι κεφαλές με αράχνη χωρίζονται σε πέντε ζώνες σύμφωνα με το σχήμα που ακολουθεί κάθε μια από τις οποίες εκτελεί μια ξεχωριστή λειτουργία όπως περιγράφεται στη συνέχεια:



Σχήμα 4.17: Ζώνες κεφαλής με αράχνη



- **Ζώνη I και Ζώνη II:** Η ζώνη εισόδου του τήγματος στη μήτρα και ζώνη εκτροπής του από τον άξονα εκβολής και διανομή μέσω του κώνου του πυρήνα (αρσενικού κεφαλής) σε μια δακτυλιοειδή διατομή.
- **Ζώνη III:** Η ζώνη της αράχνης, στην οποία το αρσενικό της μήτρας συγκρατείται από τα πόδια της αράχνης.
- **Ζώνη IV:** Η ζώνη χαλάρωσης, όπου τα σημάδια ροής που δημιουργήθηκαν από τα πόδια της αράχνης μπορούν να εξαλειφθούν και η ροή γίνεται ομοιόμορφη κατά μήκος του καναλιού ροής.
- **Ζώνη V:** Η παράλληλη ζώνη της μήτρας, όπου το εκβαλλόμενο προϊόν διαμορφώνεται στις επιθυμητές διαστάσεις



Σχήμα 4.18 Η ζώνη της αράχνης

#### **4.6 Παράγοντες που λαμβάνουμε υπόψη στο σχεδιασμό μιας μήτρας**

Περίληπτικά οι αρχές που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό μιας μήτρας είναι οι ακόλουθες:

- ✘ Μια μήτρα πρέπει να αποτελείται από λίγα μεμονωμένα τμήματα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος συναρμολόγησης και καθαρισμού.

- ✘ Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στο «κεντράρισμα» των διάφορων τμημάτων ενώ η κατασκευή της πρέπει να γίνεται με απόλυτο σεβασμό στις κατασκευαστικές ανοχές.
- ✘ Επιπλέον, ο μικρός αριθμός μεμονωμένων τμημάτων οδηγεί σε μειωμένες συνδέσεις μεταξύ τους κάτι που περιορίζει τις διαρροές και την διαφυγή τήγματος. Παράλληλα, οι συνδέσεις πρέπει να γίνονται σε περιοχές που ευνοούν τον καθαρισμό και τη συντήρηση της μήτρας.
- ✘ Οι επιφάνειες μόνωσης πρέπει να είναι επίπεδες και μικρής διατομής προκειμένου να εξασφαλίζεται στις περιοχές αυτές ομοιόμορφη κατανομή των δυνάμεων.
- ✘ Το κενό μεταξύ των κινητών και των σταθερών τμημάτων πρέπει να στεγανοποιείται με ελαστικό παρέμβυσμα. Υλικά όπως το αλουμίνιο ή πυράντοχα πλαστικά είναι αποδεκτά.

Επιπροσθέτως δεδομένου ότι επιθυμούμε να επιτύχουμε ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου η μήτρα πρέπει να ρυθμίζεται μέσω κοχλιών.

- ✘ Οι διαστάσεις της μήτρας πρέπει να είναι τέτοιες ώστε οι παραμορφώσεις λόγω της πίεσης να κυμαίνονται σε αποδεκτά πλαίσια.
- ✘ Η διαστολή λόγω της θερμότητας πρέπει να ελέγχεται κυρίως όταν διαφορετικά στοιχεία της μήτρας έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες.

Κατά τη μελέτη και το σχεδιασμό του ροϊκού σωλήνα ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στα παρακάτω στοιχεία:

- ✘ Η τροφοδοσία του τήγματος πρέπει να γίνεται κεντρικά
- ✘ Πρέπει να αποφεύγονται ακμές και σπασίματα που δημιουργούν πρόβλημα στην ροή του τήγματος. Τα ράδια πρέπει να είναι μικρότερα των 3mm.
- ✘ Για υλικά τα οποία εμφανίζουν κάποιες ιδιαιτερότητες οι ζώνες με μεγάλο μήκος συμβάλουν στην παραμονή τους στη μήτρα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να τηρείται η αρχή ελάχιστου όγκου προκειμένου να επιτύχουμε καλή ποιότητα του προϊόντος εκβολής.

- ✘ Η εσωτερική επιφάνεια της μήτρας πρέπει να είναι γυαλισμένη και έναν απαιτείται επενδυμένη με χρώμιο. Η τραχύτητα της δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0,2μm. Η επένδυση με χρώμιο μειώνει το χρόνο παραμονής του τήγματος στη μήτρα , διευκολύνει τον καθαρισμό της μήτρας και περιορίζει την επικόλληση τήγματος στα τοιχώματα αυτής. Ωστόσο το στρώμα του χρωμίου υφίσταται φθορά και πρέπει να ανανεώνεται κατά διαστήματα.

#### **4.7 Υλικά που ενδείκνυνται για την κατασκευή κεφαλών εκβολέων**

Τα υλικά για κεφαλές εκβολής πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- ☞ Να είναι εύκολα κατεργάσιμα.
- ☞ Να είναι ανθεκτικά σε πίεση, θερμοκρασία και φθορά.
- ☞ Να έχουν επαρκή αντοχή .
- ☞ Να έχουν επαρκή επιφανειακή σκληρότητα.
- ☞ Να μπορούν γρήγορα να φινιριστούν σε μια ικανοποιητική επιφάνεια (χωρίς πορώδες).
- ☞ Να ανταποκρίνονται επαρκώς σε μια απλή θερμική κατεργασία.
- ☞ Να εμφανίζουν τις ελάχιστες τάσεις στρέβλωσης και να μην αλλάζουν διαστάσεις κατά τη θερμική τους κατεργασία.
- ☞ Να ανθίστανται έναντι χημικής διάβρωσης.
- ☞ Να παρέχουν δυνατότητα επιμετάλλωσης (εναζώτωση,επιχρωμίωση)
- ☞ Να έχουν καλή θερμική αγωγιμότητα.
- ☞ Να μην εμφανίζουν παραμένουσες τάσεις.

Προκειμένου όμως να επιλέξουμε το κατάλληλο υλικό για την κατασκευή μιας μήτρας οφείλουμε να λάβουμε υπόψη μας τους παρακάτω παράγοντες:

- Τον τύπο του πολυμερούς που θα διαμορφωθεί.
- Το είδος και το μέγεθος των τάσεων που αναπτύσσονται σε μια μήτρα (κυρίως των καμπτικών).

- Τις κατεργασίες που απαιτούνται για τη διαμόρφωση της μήτρας.
- Τις θερμικές κατεργασίες που απαιτούνται για τη μήτρα και το αν αυτές προκαλούν μόνιμες παραμορφώσεις και αλλαγές στις διαστάσεις..

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μητρών εκβολής είναι οι ακόλουθοι:

#### ✦ Χάλυβες που έχουν υποστεί επιφανειακή σκλήρυνση

Οι χάλυβες αυτοί κατεργάζονται εύκολα και μετά από μια επιφανειακή σκλήρυνση ή θερμική κατεργασία παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά έναντι της φθοράς. Οι χάλυβες αυτοί έχουν χαμηλά ποσοστά άνθρακα στη σύνθεσή τους ( $\leq 2\%$ ) και πολλές φορές απαιτείται εμποτισμός ενανθράκωσης. Τέτοιοι χάλυβες είναι ο 1.2162 (21MnCr5), 1.2341 (X6CrMo4).

#### ✦ Χάλυβες που έχουν υποστεί εναζώτωση

Η θερμοχημική κατεργασία της εναζώτωσης εξασφαλίζει επιφανειακή σκληρότητα η οποία διατηρείται σε πολλές περιπτώσεις και μέχρι τους 500°C. Διαθέτουν αντοχή έναντι της φθοράς ενώ δεν υφίστανται εμβάπτιση μετά την εναζώτωση πράγμα που εξασφαλίζει την απουσία στρεβλώσεων. Οι χάλυβες αυτοί δεν είναι πλήρως ανθεκτικοί έναντι της διάβρωσης και για το λόγο αυτό προστίθεται σημαντική ποσότητα χρωμίου. Τέτοιοι χάλυβες είναι οι 1.2852((33AlCrMo4), 1.2307(29CrMoV9) και 1.2851(34CrAl16).

#### ✦ Πλήρως σκληρυμένοι χάλυβες

Οι χάλυβες αυτοί εμφανίζουν αυξημένη σκληρότητα και υψηλή αντίσταση στη φθορά. Ωστόσο η αντοχή τους είναι περιορισμένη εάν συγκριθούν με κάποιους χάλυβες που έχουν υποστεί επιφανειακή σκλήρυνση ή βαφή και εμβάπτιση. Οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται σπάνια και κυρίως σε μικρών διαστάσεων μήτρες. Παραδείγματα τέτοιων χαλύβων είναι οι 1.2344 (X40CrMoV51), 1.2767(X45NiCrMo4), 1.2080(X210Cr12), 1.2842 (90MnCrV8).

#### ✦ Χάλυβες που έχουν υποστεί βαφή και εμβάπτιση

Οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου μια θερμική κατεργασία μπορεί να προκαλέσει διαστασιολογικές αλλαγές και στρεβλώσεις κυρίως σε μεγάλο

μεγέθους μήτρες. Πρακτικά, οι χάλυβες αυτοί υφίστανται ανόπτηση μετά την σκλήρυνσή τους. Αυτό οδηγεί στη μείωση της σκληρότητας και της αντοχής και στην αύξηση της ελαστικότητας. Μετά την βαφή και την εμβάπτιση ήτοι την σκλήρυνση και την ανόπτηση οι επιφάνειες παρουσιάζουν μειωμένη αντίσταση στη φθορά και μειωμένη ικανότητα φινιρίσματος. Ωστόσο οι παραπάνω ιδιότητες μπορούν να βελτιωθούν εάν υποστούν περεταίρω εναζώτωση και επιχρωμίωση. Παράδειγμα οι 1.2711(54NiMoV), 1.2312(40CrMnMoS86), 1.2347(XCrMoVS51).

#### ✦ Χάλυβες με αντογή στη διάβρωση

Οι χάλυβες αυτοί περιέχουν παραπάνω από 12% χρώμιο στη σύνθεσή τους και χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου χημικά διαβρωτικά υλικά π.χ οξέα απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια μια διεργασίας μορφοποίησης πολυμερούς και όταν είναι αδύνατο να γίνει επιχρωμίωση στο κανάλι ροής του πολυμερούς. Οι χάλυβες αυτοί όμως δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται ακόμη και στις σπάνιες περιπτώσεις όπου σε μια διεργασία εκβολής η θερμοκρασία φθάνει τους 400°C. Τέτοιοι χάλυβες είναι οι 1.2083(X40Cr13), 1.2316(X36CrMo17) κ.α .

Μετά από μια λεπτομερή βιβλιογραφική αναζήτηση παρουσιάζουμε παρακάτω τους χάλυβες που ενδείκνυνται για την κατασκευή μητρών εκβολέων για θερμοπλαστικά πολυμερή όπως είναι το HDPE που πραγματευόμαστε στην παρούσα εργασία. Πλήρης αναφορά στις ιδιότητές τους γίνεται στο παράρτημα Α. Εμείς θα περιοριστούμε στον έλεγχο της αντοχής της μήτρας, της αράχνης και του ποδιού της αράχνης θεωρώντας ότι θα κατασκευασθούν από χάλυβα AISI P20 (εμπορική ονομασία IMPAX).

ΧΑΛΥΒΑΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
1.2312, AISI P20+S, 40CrMnMoS8.6	Χάλυβας κατάλληλος για πλαστικά καλούπια σε βελτιωμένη μορφή (εργαλειοχάλυβας).
1.2738, AISI P20+Ni (εμπορική ονομασία IMPAX)	Χάλυβας κατάλληλος για πλαστικά καλούπια σε όλα τα πάχη, υψηλή σκληρότητα και επιφανειακή στιλπνότητα (εργαλειοχάλυβας).
1.2344, H13, 40CrMoV51	Χάλυβας κατάλληλος για μήτρες και υψηλής αντοχής καλούπια πλαστικών (εργαλειοχάλυβας θερμής κατεργασίας).
1.4034+S, AISI 420F, X46CrS13(εμπορική ονομασία RAMAX)	Χάλυβας με καλή κατεργασιμότητα και αντίσταση στη φθορά.
AISI S7,UNIT41907	Χάλυβας με ευκολία στην μηχανική και θερμική κατεργασία.
1.2311, 40CrMnMo7	Χάλυβας με καλή κατεργασιμότητα εφόσον έχει βαφτεί και ψυχθεί.
1.7225, AISI 4140	Χάλυβας με αυξημένη αντίσταση στη φθορά και καλή ολκιμότητα.
CORRAX (εμπορική ονομασία)	Ανοξειδωτος χάλυβας για κατασκευή καλουπιών που εμφανίζει ευκολία στην συγκόλληση και εξαιρετικά καλή αντίσταση στη διάβρωση.
1.210, AISI 1050, ASTM A682	Χάλυβας με καλή κατεργασιμότητα κατάλληλος για καλούπια και πλαστικών.
AISI P21	Χάλυβας υψηλής αντοχής για καλούπια.
1.2083, AISI 420, X4Cr13	Χάλυβας εργαλείων κατάλληλος για την κατασκευή καλουπιών για διαβρωτικά πλαστικά. Έχει αντοχή στην τριβή και καλές λειαντικές ιδιότητες.

#### 4.8 Αστάθειες στη ροή στην μήτρα

Γνωστό και τυπικό φαινόμενο στην εκβολή πολυμερούς τήγματος είναι η διόγκωση του πολυμερικού τήγματος καθώς αποχωρίζεται τη μήτρα. Αυτό μερικές φορές αναφέρεται και σαν διόγκωση μήτρας. Ωστόσο δεν είναι η μήτρα που διογκώνεται αλλά το πολυμερές. Η ελαστικότητα του τήγματος είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνη για τη διόγκωση του καθώς αυτό αποχωρίζεται τη μήτρα. Κατά κύριο λόγο αυτό συμβαίνει λόγω της ελαστικής επαναφοράς της παραμόρφωσης την οποία το πολυμερές υφίσταται στη μήτρα. Η ελαστική επαναφορά είναι χρονικά εξαρτώμενη. Μια μήτρα με μικρού μήκους ζώνη χαλάρωσης θα έχει μεγάλο ποσοστό διόγκωσης. Το πολυμερές έχει αυτό που συχνά αποκαλείται «μνήμη». Μια παραμόρφωση δύναται να επανέλθει σε μεγάλο βαθμό σχετικά σύντομα μετά την εκκίνηση της, ωστόσο όσο περνά ο χρόνος το φαινόμενο της επαναφοράς μειώνεται. Έτσι η ηρεμία στη μήτρα εξαρτάται από τη γεωμετρία στο κανάλι της ροής. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η διόγκωση του τήγματος δεν εμφανίζεται μόνο σε ιξωδο-ελαστικά ρευστά. Δύναται εξίσου να συμβεί σε ένα μη ελαστικό ή σε ένα καθαρά ιξώδες ρευστό. Αυτό έχει επαληθευτεί θεωρητικά και πρακτικά. Προφανώς, σε ένα μη ελαστικό ρευστό, ο μηχανισμός της διόγκωσης του πολυμερικού τήγματος δεν αποτελεί ελαστική επαναφορά της προγενέστερης παραμόρφωσης. Η διόγκωση προκαλείται από εναλλαγή του προφίλ της ταχύτητας καθώς το πολυμερές αποχωρίζεται της μήτρας. Το προφίλ της ταχύτητας μεταβάλλεται από μία παραβολική μορφή μέσα στη μήτρα σε ένα ευθύ προφίλ (plug flow) σε κοντινή απόσταση από τη μήτρα. Στα νευτωνικά ρευστά αυτό προκαλεί ένα μικρό ποσό διόγκωσης του τήγματος (σχεδόν 10%) σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds ( $N_{RE} < 16$ ). Ιξωδο-ελαστικά ρευστά παρουσιάζουν περίπου το ίδιο ποσό διόγκωσης σε χαμηλότερους ρυθμούς διάτμησης, αλλά μεγαλύτερα ποσά διόγκωσης παρατηρούνται σε υψηλούς ρυθμούς διάτμησης (πάνω από 200%). Ένα από τα κύρια προβλήματα με τη διόγκωση τήγματος είναι ότι σε γενικές γραμμές δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στο τελικό προϊόν της εκβολής. Αυτό σημαίνει ότι κάποια μέρη του τήγματος διογκώνονται περισσότερο από κάποια άλλα. Εάν η γεωμετρία στο κανάλι ροής στην έξοδο από τη μήτρα είναι τέτοια ώστε να ταυτίζεται με την απαιτούμενη γεωμετρία του προϊόντος, η διόγκωση θα προκαλέσει παραμόρφωση στο πολυμερικό τήγμα και η ζητούμενη γεωμετρία δεν θα μπορέσει να επιτευχθεί. Γι αυτό λοιπόν, η γεωμετρία του καναλιού εξόδου θα πρέπει σε γενικές γραμμές να διαφέρει από την

απαιτούμενη γεωμετρία του προϊόντος. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό αναλύοντας τα προφίλ των ταχυτήτων στο κανάλι ροής. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι οι ρυθμοί διάτμησης στα τοιχώματα της μήτρας ποικίλουν χαρακτηριστικά. Ο ρυθμός διάτμησης στις άκρες των τοιχωμάτων της μήτρας είναι σχετικά χαμηλός συγκριτικά με το μέσον, τη στιγμή που οι υψηλότεροι βαθμοί διάτμησης παρατηρούνται στο μέσο του τοίχους. Πρακτικά ένας καλός σχεδιαστής μήτρας θα πρέπει να προβλέψει την διόγκωση του τήγματος στην έξοδο της μήτρας και να σχεδιάσει το κανάλι ροής της εξόδου ανάλογα. Αυτό είναι δύσκολο έργο και ο καθορισμός της γεωμετρίας του καναλιού ροής εκτελείται συνήθως με τη μέθοδο *trial & error*. Ακριβής μαθηματική πρόγνωση της διόγκωσης του τήγματος είναι δύσκολη και γι'αυτό ο καθορισμός της κατάλληλης γεωμετρίας για το κανάλι ροής ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ανομοιόμορφη κατανομή της διόγκωσης του τήγματος με μηχανολογικούς υπολογισμούς δεν είναι μάλλον πρακτικό.

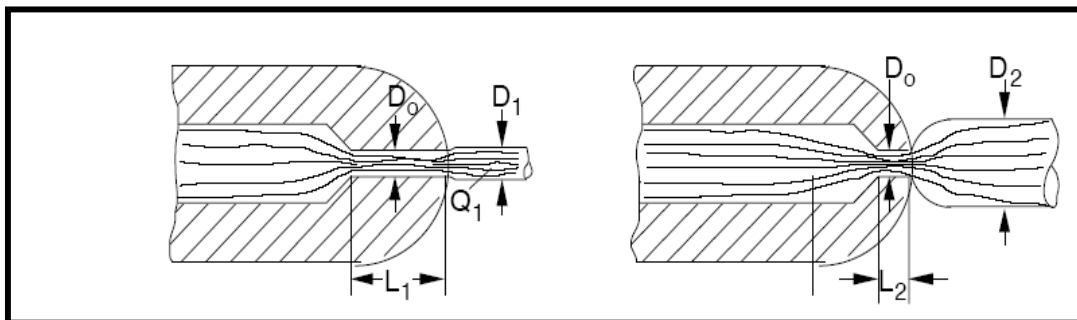
Το μέγεθος της διόγκωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό. Μερικά πολυμερή παρουσιάζουν αξιοσημείωτη διόγκωση (100 έως και 300%) π.χ. πολυαιθυλένιο. Άλλα πολυμερή εμφανίζουν μικρότερη διόγκωση π.χ. πολυβινυλοχλωρίδιο. Όταν το PVC εκβάλλεται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, η διόγκωση κυμαίνεται από 10 έως 20% μόνο. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που το PVC είναι τόσο δημοφιλές υλικό στο προφίλ εκβολής. Σε μια διεργασία εκβολής λαμβάνουν χώρα ορισμένα φαινόμενα αστάθειας ροής στη μήτρα που εν γένει μπορούν να επηρεάσουν τις παραμέτρους της διεργασίας και να καταστήσουν το τελικό προϊόν της εκβολής μη αποδεκτό. Μια χρήσιμη παράμετρος συχνά χρησιμοποιούμενη για τον υπολογισμό των ελαστικών φαινομένων κατά τη ροή είναι

ο αριθμός Deborah που ορίζεται ως:  $De = \frac{\lambda}{tp}$  (4.20) όπου  $\lambda$  είναι ο χρόνος

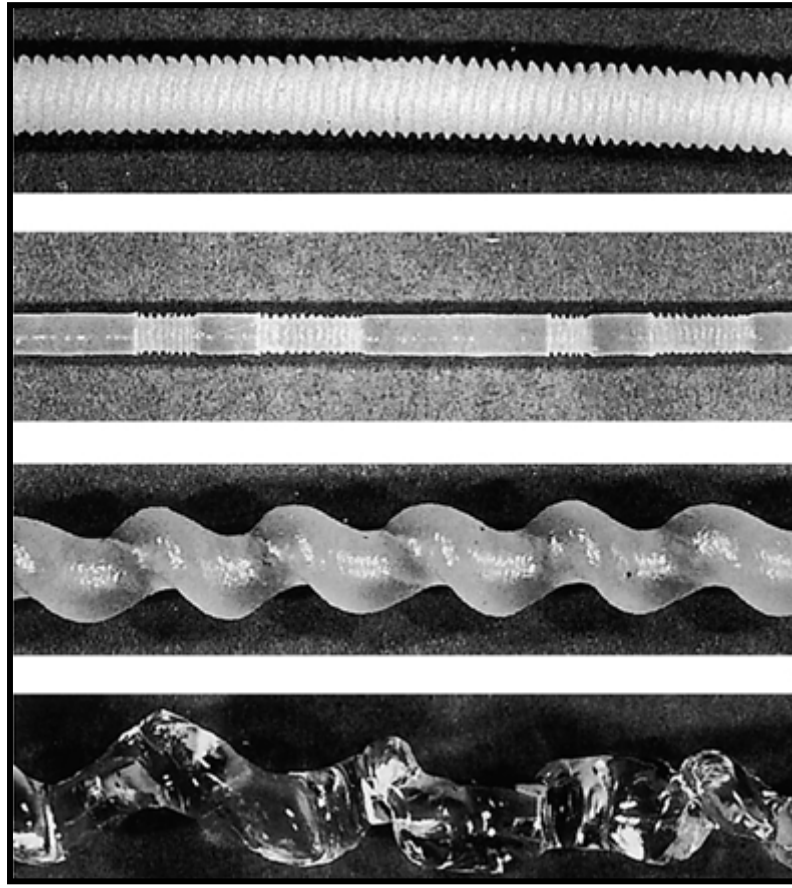
χαλάρωσης του πολυμερούς και  $tp$  είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος της εκβολής που ορίζεται ως ο λόγος της χαρακτηριστικότερης διάστασης της μήτρας προς μέσης ταχύτητας εκβολής μέσω της μήτρας. Όταν ο αριθμός Deborah ισούται με μηδέν τότε πρόκειται για ένα ιξώδες ρευστό ενώ όταν λαμβάνει άπειρη τιμή πρόκειται για ένα ελαστικό στερεό. Καθώς ο αριθμός Deborah λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας το πολυμερές δεν έχει αρκετό χρόνο να ξεκουραστεί κατά της διαδικασία της εκβολής καταλήγοντας σε πιθανές αποκλίσεις των επιθυμητών διαστάσεων ή εμφανίζοντας ανωμαλίες στην επιφάνεια τελικού όπως για παράδειγμα η διόγκωση του προϊόντος της εκβολής, η εμφάνιση του φαινομένου shark skin και η θραύση του τήγματος.



Παρά το ότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διόγκωση του προϊόντος της εκβολής έχει παρατηρηθεί ότι οι απότομες αλλαγές στις οριακές συνθήκες (όπως για παράδειγμα το σημείο διαχωρισμού από τη μήτρα ) συντελούν επίσης στη διόγκωση ή στην παραμόρφωση του προϊόντος της εκβολής. Πρακτικά, η συμβολή της «μνήμης» του ρευστού στη διόγκωση του προϊόντος εκβολής στη μήτρα μπορεί να περιορισθεί αυξάνοντας το μήκος του τελικού ευθύγραμμου τμήματος της μήτρας. Αυτό αποδίδεται σχηματικά στο σχήμα που ακολουθεί . Το μεγάλο μήκος του ευθύγραμμου τμήματος της μήτρας επιτρέπει στο ρευστό να «ξεχάσει» το παλιό του σχήμα. Κυματισμοί στο προϊόν της εκβολής εμφανίζονται σαν αποτέλεσμα των υψηλών ταχυτήτων κατά τη διάρκεια της διεργασίας, όπου το πολυμερές δεν ξεκουράζεται. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως shark skin. Σε υψηλές ταχύτητες εκβολής παρατηρείται ένας διακοπτόμενος διαχωρισμός του τήγματος και του εσωτερικού τοιχώματος της μήτρας. Το φαινόμενο αυτό συχνά αναφέρεται ως φαινόμενο stick-slip και οφείλεται στις υψηλές διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των τοιχωμάτων της μήτρας και του πολυμερούς. Εάν η ταχύτητα αυξηθεί περαιτέρω τότε το προϊόν της εκβολής εμφανίζει ελικοειδή γεωμετρία. Εάν πάλι οι ταχύτητες αυξάνονται χαοτικά τότε εμφανίζεται το φαινόμενο Melt Fracture δηλαδή θραύση του τήγματος.



Σχήμα 4.19: Διόγκωση τήγματος κατά την έξοδό του από τη μήτρα



**Σχήμα 4.20:** Αστάθειες στη ροή του πολυμερικού τήγματος κατά την έξοδό του από τη μήτρα

### **Βιβλιογραφία 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου**

---

- i. Walter Michaeli, “Extrusion Dies for Plastics and Rubber”, Hanser Publishers, New York, (1996)
- ii. Chris Rauwendaal, “Polymer Extrusion”, Hanser Publishers, 4<sup>th</sup> Edition, (2001)
- iii. Δ.Ι.Παντελής, Γ.Δ.Χρυσουλάκης, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα (2003)
- iv. Ταραντίλη Π. Α, «Τεχνική των Πολυμερών», Ε.Μ.Π, (2004)
- v. Μητσούλης Ευ., «Βασικές Αρχές Μορφοποίησης Πολυμερών», Ε.Μ.Π, (1999)
- vi. [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- vii. [www.buau.com.au](http://www.buau.com.au)

---

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> - ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ

---

### 5.1 Εισαγωγή

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι ο έλεγχος της αντοχής της μήτρας εκβολέα από χάλυβα DIN 1.2738 για την παραγωγή πλαστικών σωλήνων διαστάσεων DN 32X2,4 συνολικά και ο έλεγχος αντοχής των επικίνδυνων διατομών αυτής δηλαδή της «αράχνης» και του «ποδιού της αράχνης» υπό τρεις ξεχωριστές συνθήκες λειτουργίας του εκβολέα. Αυτό σημαίνει ότι ελέγχουμε την αντοχή της μήτρας όταν αυτή εργάζεται στη μέγιστη πίεση που μπορεί να αναπτύξει ένας εκβολέας και είναι ίση με 600 bar και σε μια τυχαία πίεση 100 bar. Προκειμένου μάλιστα να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για την συμπεριφορά της μήτρας πραγματοποιούμε έλεγχο και στις επικίνδυνες διατομές αυτής υπό τις προαναφερθείσες τιμές πίεσης αλλά και υπό τις ποσοστιαίες μεταβολές πίεσης που εμφανίζονται στις διατομές αυτές και οι οποίες υπολογίζονται με η χρήση του λογισμικού Comsol Multiphysics 3.5. Ο έλεγχος της αντοχής της μήτρας πραγματοποιείται με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων Cosmoworks 2007 (ο ηλεκτρονικός υπολογιστής που χρησιμοποιούμε για την επίλυση των μοντέλων διαθέτει επεξεργαστή Intel Core 2 Centrino στα 2,27GHz και 4GB RAM).

### 5.2 Λίγα λόγια για το λογισμικό Comsol 3.5

Το Comsol 3.5 είναι ένα υπολογιστικό πακέτο το οποίο βασιζόμενο στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ( Finite Element Method ) επιλύει προβλήματα που περιγράφονται μαθηματικά από διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους. Το λογισμικό προσφέρει την δυνατότητα επίλυσης σύνθετων φυσικών φαινομένων. Αντιμετωπίζει προβλήματα ρεολογίας, μεταφοράς μάζας, προβλήματα δυναμικής και

στατικής ανάλυσης κατασκευών συζευγμένα με ροϊκά ή/και θερμοκρασιακά φαινόμενα, ηλεκτρο-θερμοκρασιακά φαινόμενα, προβλήματα ηλεκτρομαγνητισμού, οπτικής και ακουστικής, ενώ εφαρμογές του βρίσκουμε και σε πεδία όπως τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα, τα ηλεκτρολυτικά κελιά και οι κυψέλες καυσίμου. Το Comsol έχει σχεδιαστεί για την μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων χωρίς να απαιτούνται από τον ερευνητή προγραμματιστικές ικανότητες, αναλυτική γνώση και καταγραφή των σύνθετων και πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τα παραπάνω φαινόμενα. Προσφέρει έτοιμες αυτές τις εξισώσεις (application modes), ενώ δίνει την δυνατότητα τροποποίησης ώστε να ανταποκρίνονται επακριβώς στο προς μελέτη πρόβλημα. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής εξισώσεων, όπως επίσης και συνδυασμός τους με έτοιμες εξισώσεις που προσφέρει το λογισμικό. Συνοδεύεται από βιβλιοθήκη έτοιμων μοντέλων και από CAD εργαλεία για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του προβλήματος ενώ έχει την δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος και απεικόνισης των αποτελεσμάτων. Το Comsol ουσιαστικά αποτελεί εργαλείο για την επίλυση καλά ορισμένων συστημάτων μερικών διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν ένα ή πολλά φυσικά φαινόμενα συγχρόνως, με την καθιερωμένη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, με την χρήση του Comsol Script υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου και τροποποίησης των μοντέλων μέσω γραμμής εντολών (Command Line), αλλά και περαιτέρω ανάλυσης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων. Το λογισμικό της COMSOL Multiphysics διαθέτει εξειδικευμένα επιπρόσθετα εργαλεία για διάφορους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας όπως είναι τα Φαινόμενα Μεταφοράς (Chemical Engineer Module) που αφορούν στην ανάλυση φαινομένων μεταφοράς και χημικών αντιδράσεων, στη σύζευξη φαινομένων μεταφοράς μάζας, ενέργειας και ορμής. Επιπλέον συνδράμει στη μελέτη γεωφυσικών και περιβαλλοντολογικών προβλημάτων αφού περιλαμβάνονται εξειδικευμένες εξισώσεις για φαινόμενα μεταφοράς σε πορώδη υλικά (Γεωφυσικές Επιστήμες, Earth Science Module) καθώς και στην ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, στην προσομοίωση πεδίων, εντάσεων και κυμάτων (Ηλεκτρομαγνητισμός, Electromagnetics Module). Επίσης παρέχει εξειδικευμένη ανάλυση για την μετάδοση θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Περιλαμβάνονται εξισώσεις για μη ισοθερμική ροή, φαινόμενα μεταφοράς σε λεπτά στρώματα και κελύφη και βιοθερμικά φαινόμενα (Μετάδοση Θερμότητας, Heat Transfer Module) και τέλος προσφέρει δυνατότητα μοντελοποίησης των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ηλεκτρομηχανολογικά

συστήματα και μικρο – ροϊκά στοιχεία και συσκευές. Περιλαμβάνει μεταξύ άλλων θερμικά φαινόμενα σε μηχανολογικά συστήματα, συστήματα μικρο-ροής, εφαρμογές σε αισθητήρες και τελικά στοιχεία ελέγχου (Ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, MEMS Module) ενώ παρέχει εξειδικευμένη δυναμική και στατική ανάλυση κατασκευών και σύζευξη με θερμικά,ροϊκά και άλλα φυσικά φαινόμενα (Δομική Μηχανική ,Structural Mechanics Module). Η επίλυση του δικού μας προβλήματος βασίζεται στην ανάλυση φαινομένων μεταφοράς του Chemical Engineering Module.

### **5.3 Βήματα για την επίλυση του CFD προβλήματος για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στην περιοχή της αράχνης και στο πόδι της**

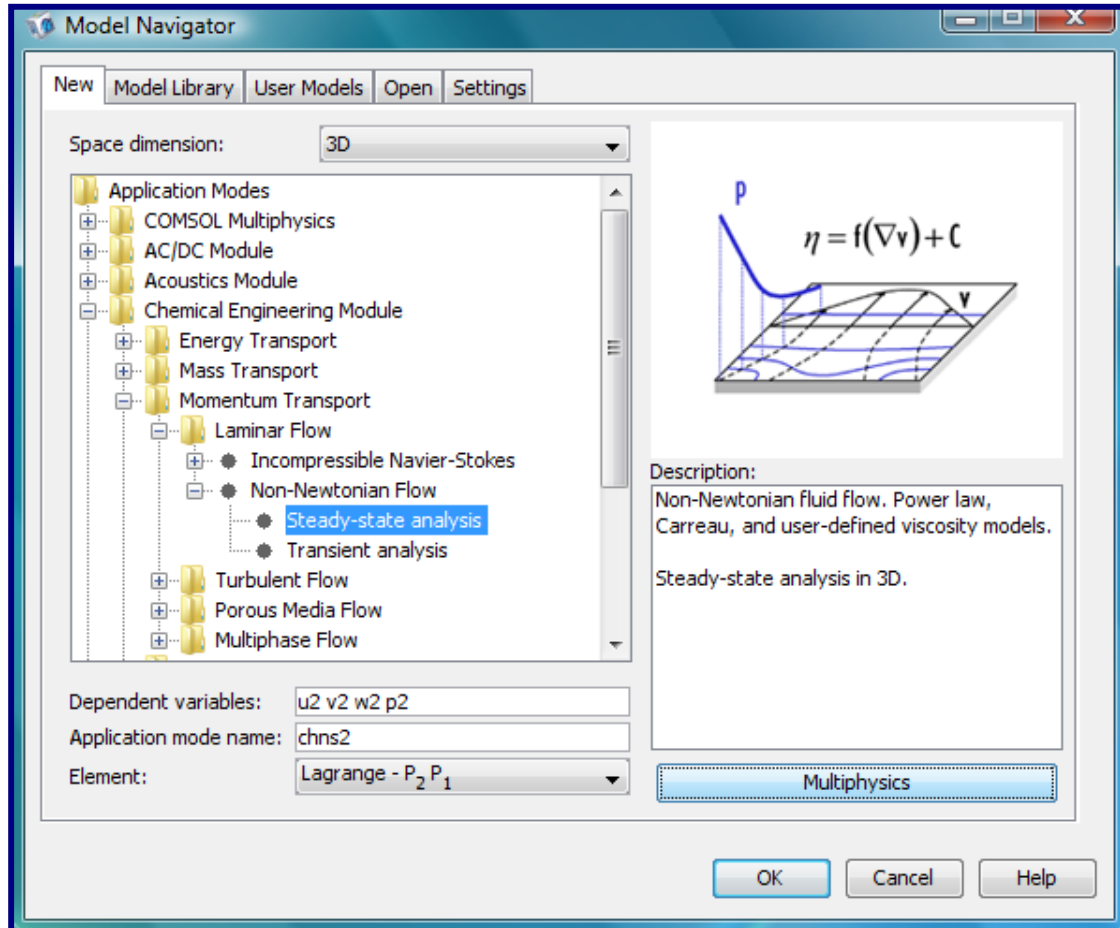
#### **Βήμα 1° –Επιλογή μοντέλου**

Από το menu του **Model Navigator** επιλέγουμε όπως φαίνεται και στο σχήμα τρισδιάστατο πρόβλημα (3D) που αφορά σε Φαινόμενο Μεταφοράς δηλαδή **Chemical Engineering** και στη συνέχεια από την υποενοότητα **Momentum Transport** επιλέγουμε **Laminar Flow** και κατόπιν **Non Newtonian Flow** ενώ στο τέλος προσδιορίζουμε το είδος της επίλυσης δηλαδή **Steady-state Analysis**.

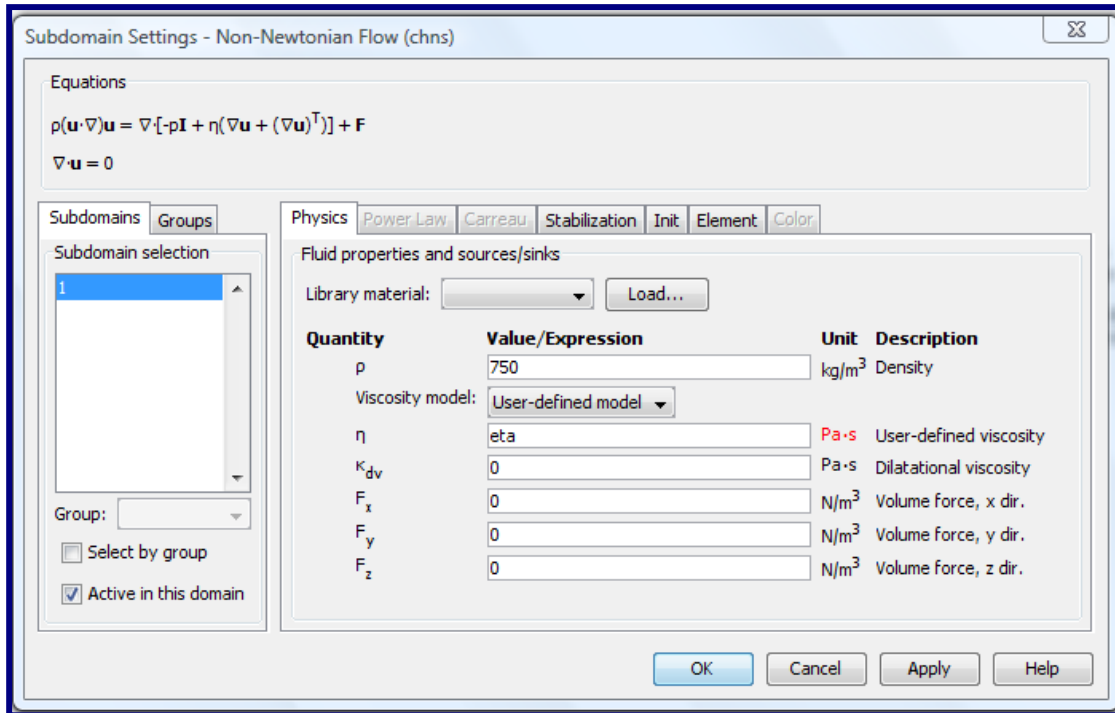
#### **Βήμα 2°-Ιδιότητες ρευστού**

Απο το menu **Multiphysics** επιλέγουμε **Non Newtonian Flow (nn)** και στη συνέχεια από το menu **Physics** επιλέγουμε **Subdomain Settings** και επιλέγουμε (1). Εισάγουμε την τιμή της πυκνότητας του HDPE που είναι ίση με  $750\text{Kg}/\text{m}^3$ . Εν συνεχεία καθορίζουμε ότι πρόκειται για ένα θερμοκρασιακά εξαρτώμενο μοντέλο ιξώδους και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε την εντολή **eta** για να δείξουμε το ιξώδες συνιστά θερμοκρασιακά εξαρτώμενη παράμετρο του μοντέλου. Από το menu **Multiphysics** επιλέγουμε **Convection and Conduction (chnnc)** και στη συνέχεια από το menu **Physics** επιλέγουμε **Subdomain Settings**. Επιλέγουμε και συμπληρώνουμε τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας **k (isotropic)** ίσο με **ka** και τον συντελεστή ειδικής θερμοχωρητικότητας του ρευστού ίσο με **cp**. Τέλος δηλώνουμε ότι δεν έχουμε εσωτερική πηγή θερμότητας **Q=0** και καθορίζουμε το

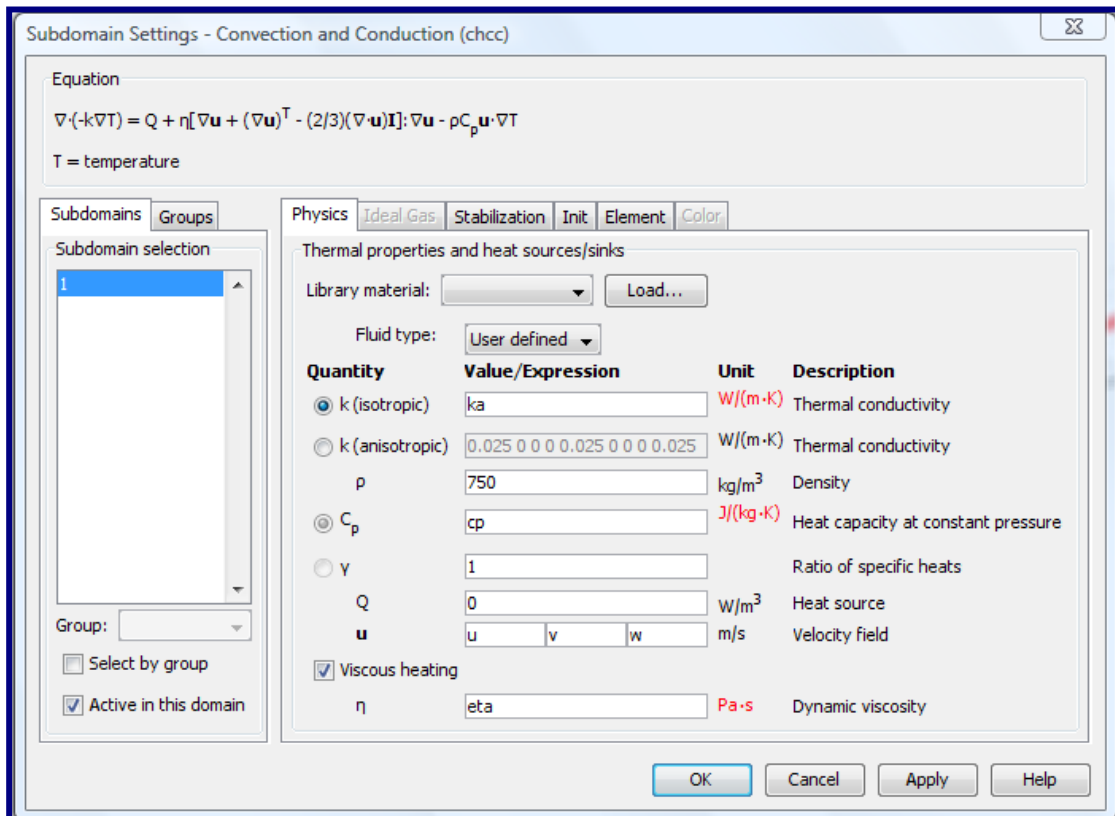
πεδίο ταχυτήτων ίσο με  $u, v, w$ . Επίσης δηλώνουμε και την ύπαρξη ιξώδους θερμότητας λόγω του υψηλού ιξώδους του ρευστού (**viscous heating** →  $\eta = \text{eta}$ )



Σχήμα 5.1:Επιλογή μοντέλου μη νευτωνικού ρευστού



Σχήμα 5.2: Προσδιορισμός ιδιοτήτων μη νευτωνικού ρευστού

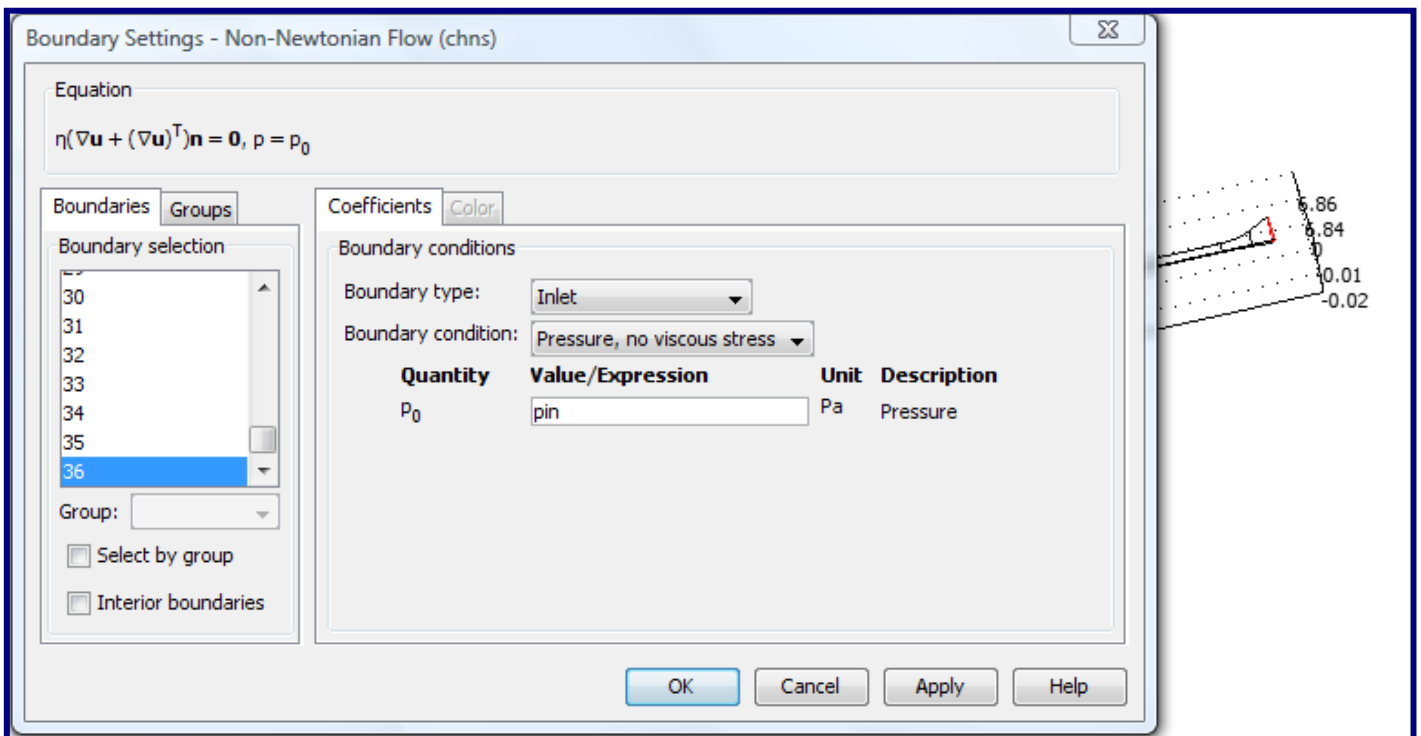


Σχήμα 5.3: Προσδιορισμός συνιστωσών θερμικού προβλήματος

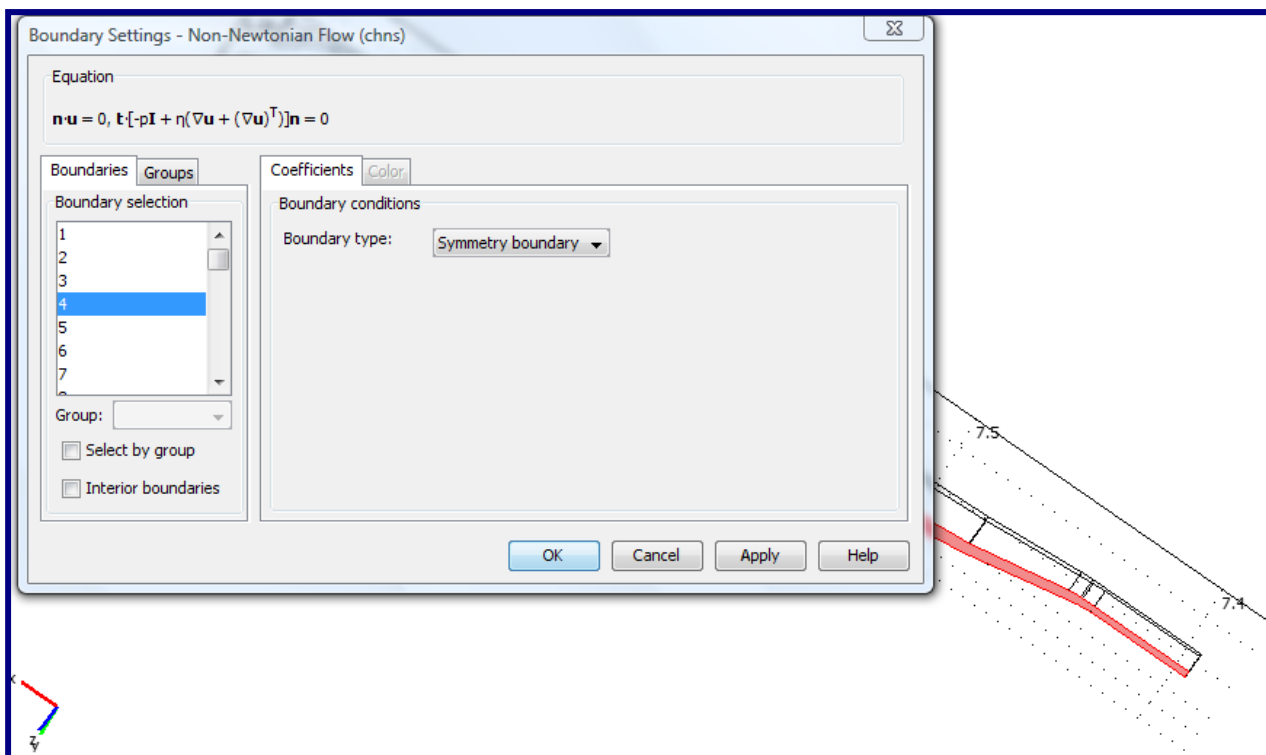


### Βήμα 3°- Οριακές συνθήκες

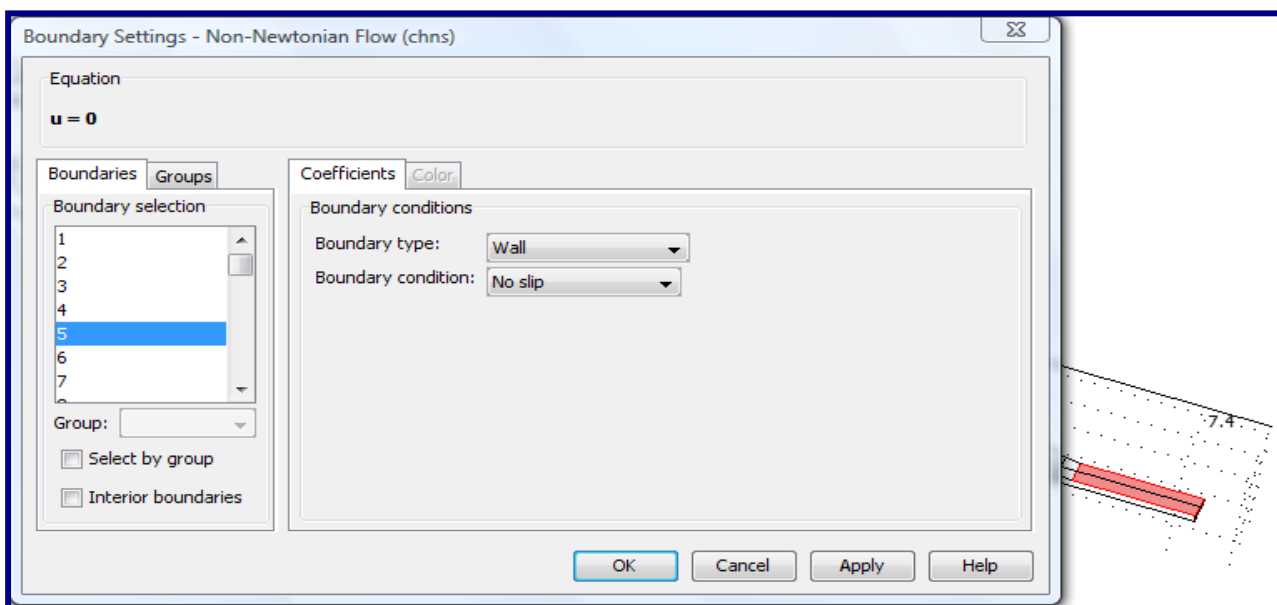
Από το menu **Multiphysics** επιλέγουμε **Non Newtonian Flow** και από το menu **Physics** επιλέγουμε **Boundary Settings**. Οι οριακές συνθήκες είναι για την είσοδο του τήγματος η πίεση εισόδου, οι συνθήκες μη ολίσθησης για τα τοιχώματα και οι συνθήκη συμμετρικών ορίων δεδομένου ότι η γεωμετρία που έχουμε εισάγει είναι το ένα δωδέκατο της γεωμετρίας του ροϊκού σωλήνα. Επίσης από το menu **Multiphysics** επιλέγω **Convection and Conduction** και συνεχίζω από το menu **Physics** επιλέγω **Boundary Settings**. Στο όριο 36 που είναι η είσοδος του τήγματος ορίζω ως σταθερά την ταχύτητα εισόδου. Στο όριο ένα ορίζω Convection flux που σημαίνει ότι στο σημείο αυτό σταματούν όλα τα φαινόμενα μεταφοράς και διάχυσης ενώ σε όλα τα υπόλοιπα όρια η θερμοκρασία θεωρείται σταθερή ίση με  $T_h$ .



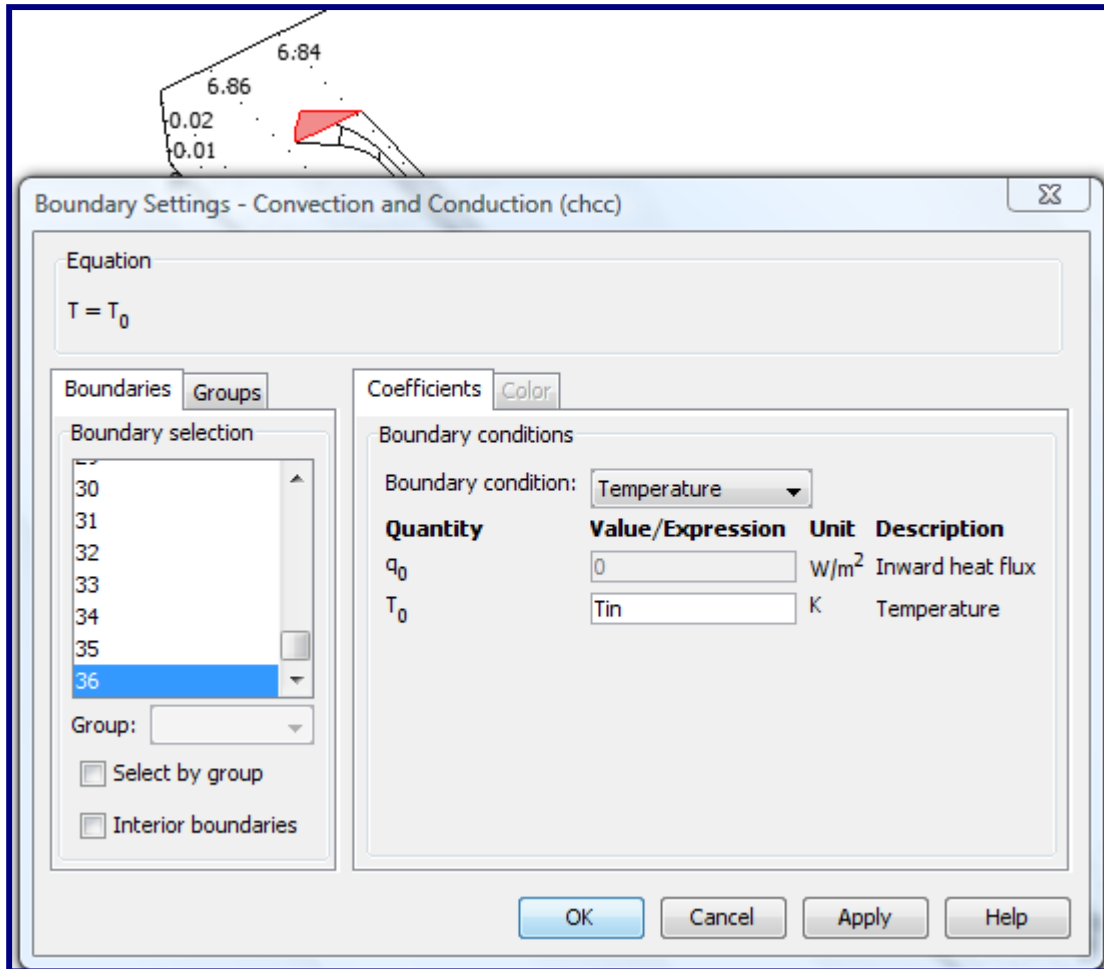
(α)



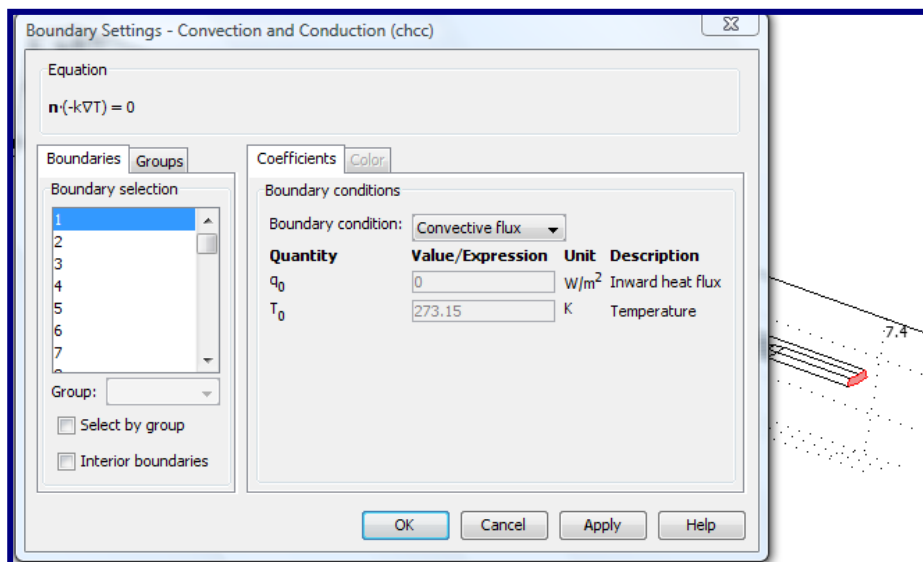
(β)



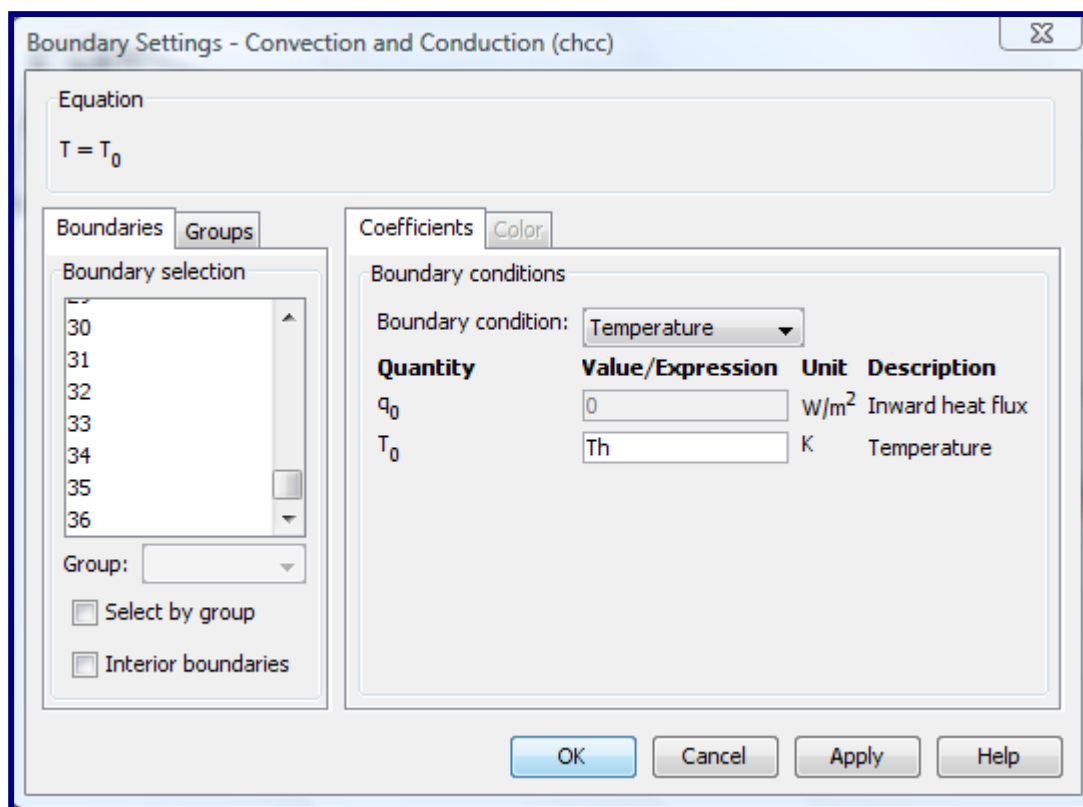
(γ)



(δ)



(ε)

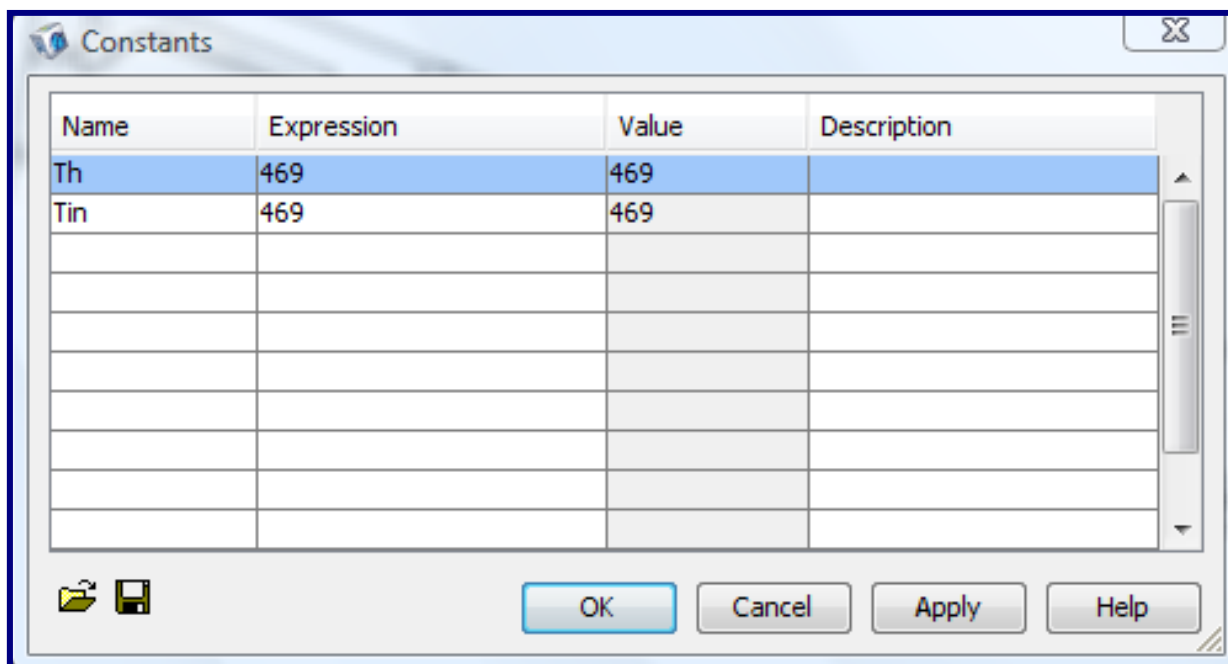


(στ)

Σχήμα 5.4: (α)-(στ): Επιβολή οριακών συνθηκών

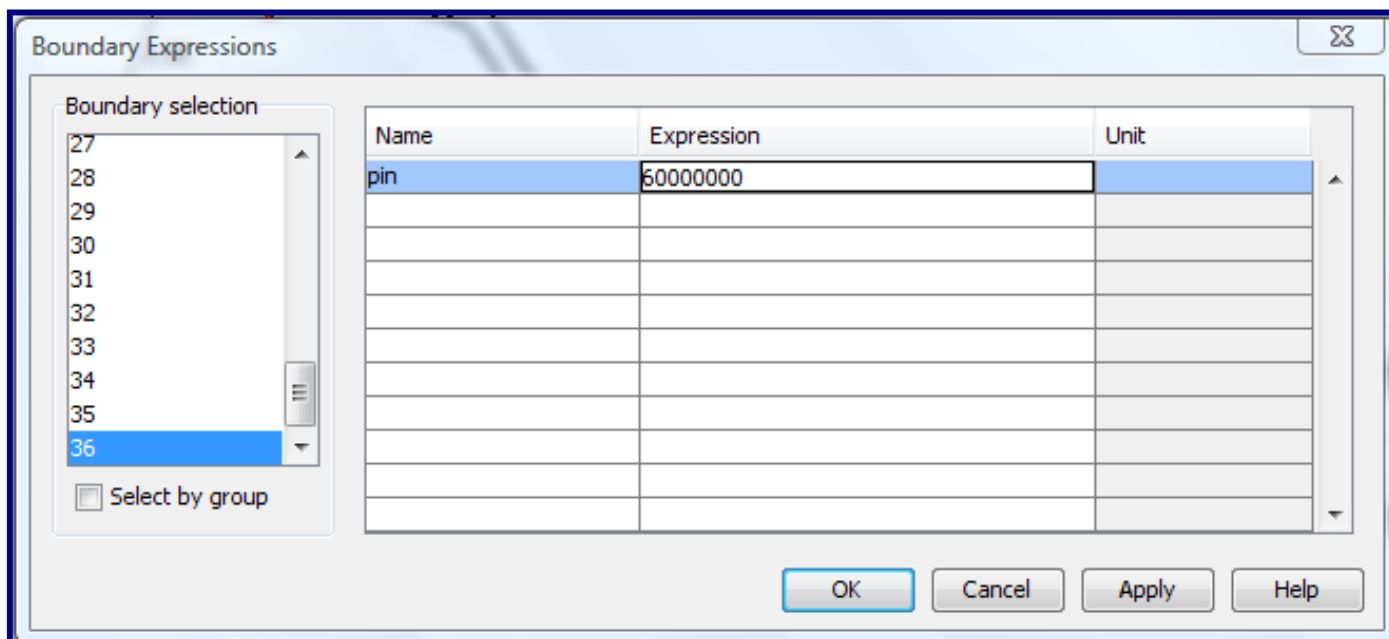
**Βήμα 4° -Καθορισμός σταθερών τιμών**

Από το menu **Options** επιλέγω **Constants** και προσδιορίζω τις τιμές της θερμοκρασίας  $T_{in}$  και  $T_h$ . Από το menu **Options** επιλέγω **Boundary Expressions** και ορίζω την πίεση εισόδου διαφορετική κάθε φορά ανάλογα με την περίπτωση που μελετάμε. Στο τέλος από το menu **Options** επιλέγω **Subdomain Expressions** και καθορίζω τις τιμές των σταθερών για το ρευστό και το θερμικό φαινόμενο σύμφωνα με το μοντέλο Carreau.

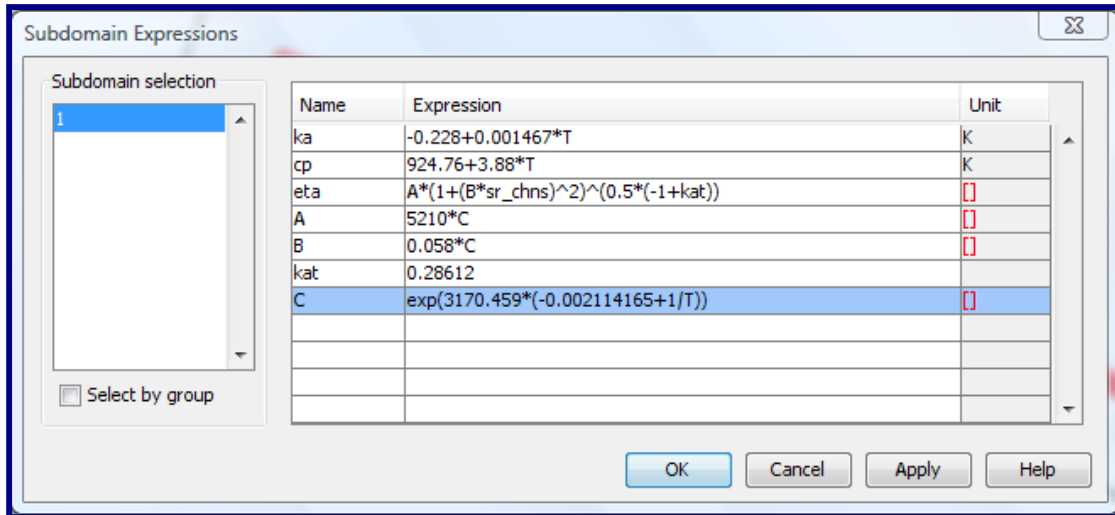


(α)

Σχήμα 5.5 :Δήλωση θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου



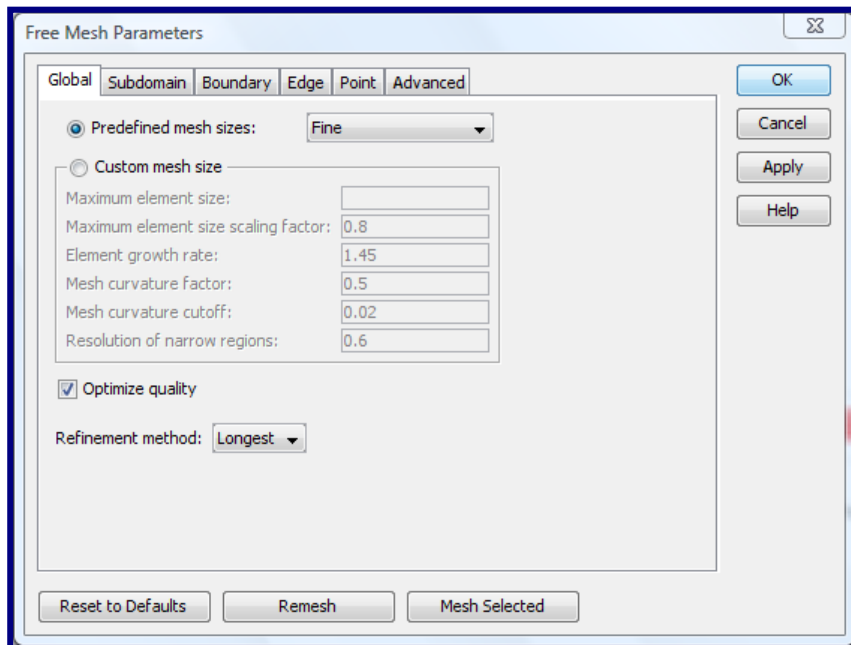
Σχήμα 5.6 :Δήλωση πίεσης εισόδου 100 bar και 600 bar



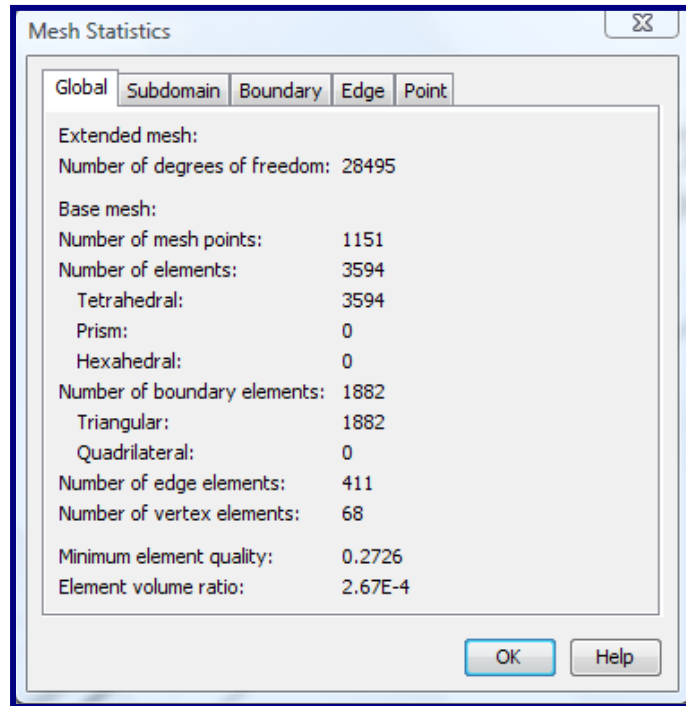
Σχήμα 5.7: Δήλωση σταθερών τιμών μοντέλου Carreau

### Βήμα 5° –Δημιουργία πλέγματος

Από το menu **Mesh** επιλέγουμε **Free Mesh parameters** και επιλέγουμε fine που μας εξασφαλίζει την δημιουργία πυκνού πλέγματος.



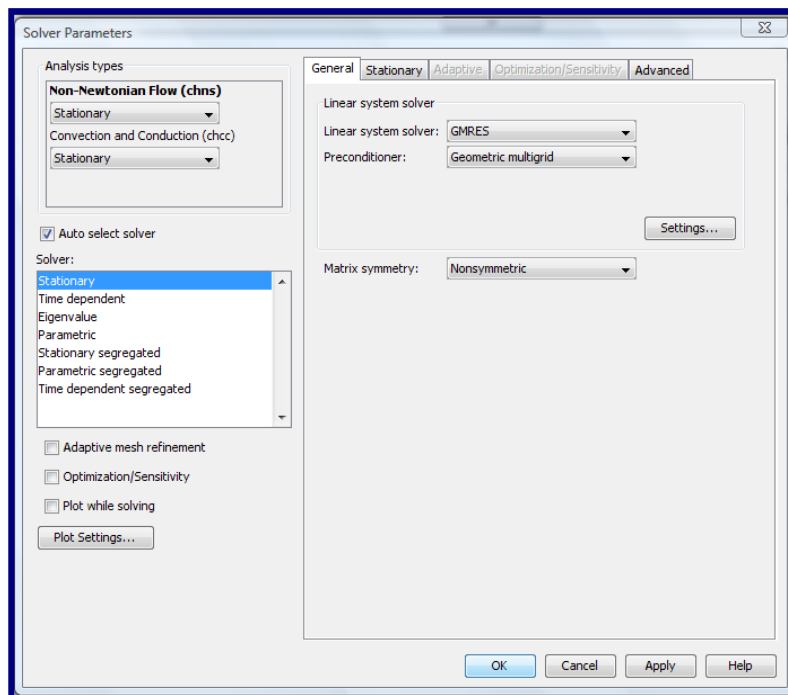
Σχήμα 5.8:Καθορισμός ιδιοτήτων πλέγματος



Σχήμα 5.9:Είδη πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο πλέγμα

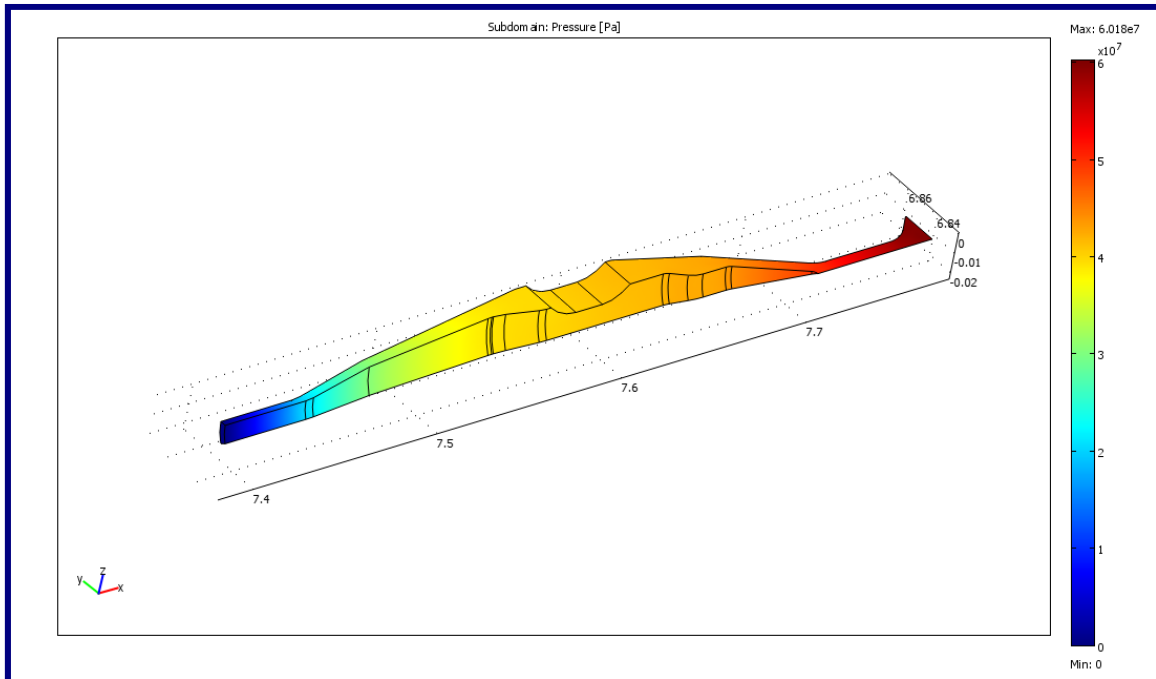
### Βήμα 6<sup>ο</sup> –Επίλυση και αποτελέσματα

Απο το menu Solve επιλέγουμε από το Solver parameters τον κατάλληλο Solver.

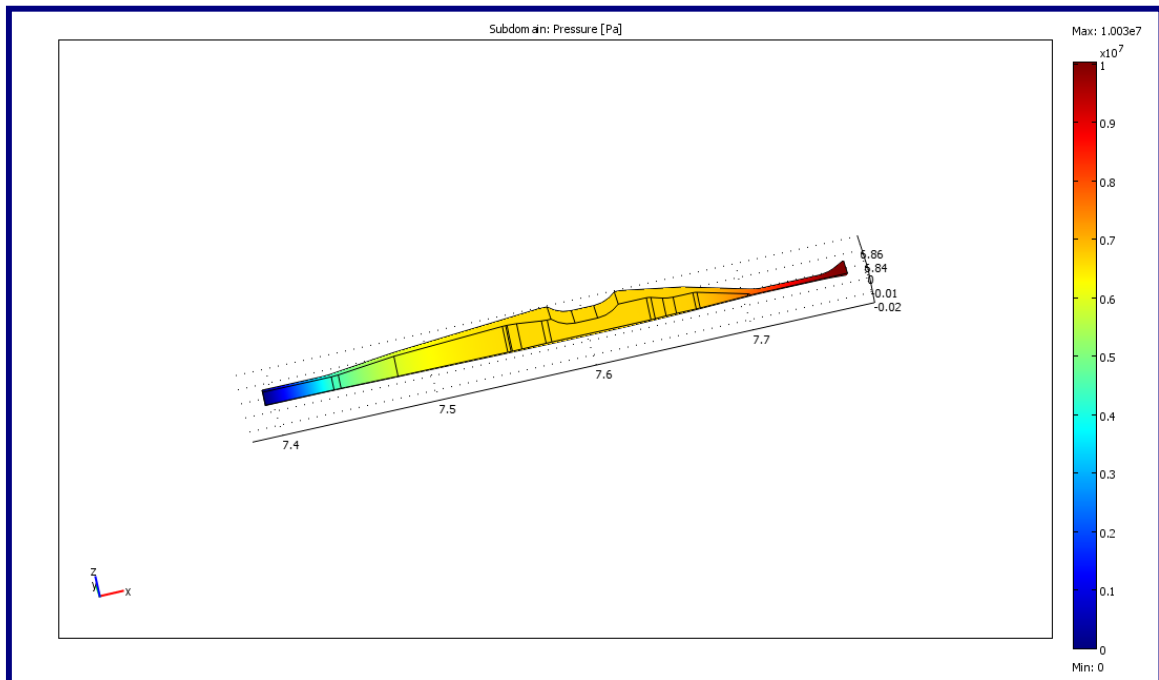


Σχήμα 5.10:Εκλογή solver

Για τις διαφορετικές πιέσεις λειτουργίας τα διαγράμματα μεταβολής της πίεσης είναι:



**Σχήμα 5.11:** Μεταβολή της πίεσης για πίεση εισόδου ίση με 600 bar



**Σχήμα 5.12:** Μεταβολή της πίεσης για πίεση εισόδου ίση με 100 bar



Προκειμένου να δούμε ποια είναι η μεταβολή τις πίεσης στην αράχνη επιλέγουμε από το menu **Postprocessing** την εντολή **Point Evaluation** και επιλέγουμε τα σημεία που ορίζουν την αράχνη και το πόδι της αράχνης και στο κάτω αριστερά τμήμα της οθόνης εμφανίζεται η τιμή της πίεσης.

➡ Για την μήτρα η μεταβολής της πίεσης είναι ίση με  $\Delta P_{die} = |P_{out} - P_{in}| = |0 - 60000000| = 60000000 Pa$  εάν η πίεση εισόδου ισούται με  $P_{in} = 60000000 Pa$  και η πίεση εξόδου είναι ίση με  $P_{out} = 0$  και ομοίως είναι ίση με  $\Delta P_{die} = |P_{out} - P_{in}| = |0 - 100000000| = 100000000 Pa$  όταν η πίεση εισόδου είναι  $P_{in} = 100000000 Pa$  και  $P_{out} = 0$

➡ Για την αράχνη η μεταβολή της πίεσης εάν η πίεση εισόδου είναι  $P_{in} = 60000000 Pa$  ισούται με:

$$\Delta P_{60000000_{spider}} = |3,98063 \cdot 10^7 - 4,230991 \cdot 10^7| = 2503670 Pa$$

➡ Για το πόδι της αράχνης η μεταβολή της πίεσης εάν η πίεση εισόδου είναι  $P_{in} = 60000000 Pa$  ισούται με:

$$\Delta P_{60000000_{leg}} = |3,97774 \cdot 10^7 - 4,168921 \cdot 10^7| = 1911810 Pa$$

Ομοίως για τα  $P_{in} = 100000000 Pa$  η μεταβολή της πίεσης για την αράχνη και το πόδι της είναι ίση με

➡ Για την αράχνη:  $\Delta P_{100000000_{spider}} = |6,622285 \cdot 10^6 - 6,695905 \cdot 10^6| = 73620 Pa$

➡ Για το πόδι της αράχνης:  $\Delta P_{100000000_{leg}} = |6,622947 \cdot 10^6 - 6,67441 \cdot 10^6| = 51463 Pa$

## 5.4 Έλεγχος αντοχής στη μήτρα

### 5.4.1 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

↳ Τα στερεά σώματα θεωρούνται ότι είναι ομοιογενή και ισότροπα, δηλαδή ότι έχουν την ίδια σύνθεση σε όλα τα σημεία του όγκου τους και ότι έχουν την ίδια συμπεριφορά σε όλες τις διευθύνσεις του χώρου.

↳ Τα στερεά σώματα πρέπει να βρίσκονται σε ισορροπία ή να κινούνται ομοιόμορφα για να μπορούν να εκφραστούν όλοι οι νόμοι ισορροπίας της Στατικής.

↳ Μεταξύ των φορτίσεων (τάσεων) και των παραμορφώσεων ισχύει ο νόμος του Hooke που θα αναπτύξουμε παρακάτω.

↳ Η οποιαδήποτε φόρτιση είναι στατικής μορφής. Η διεύθυνση, η φορά και η τιμή της δεν μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Κατά την εφαρμογή μιας φορτίσεως σε ένα σώμα η τιμή της στατικής αυτής φορτίσεως θεωρείται ότι αυξάνεται αργά από το μηδέν μέχρι να λάβει τη μέγιστη στατική της τιμή, οπότε στη συνέχεια παραμένει σταθερή.

## 5.4.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Η έννοια της αντοχής συνδέεται προφανώς άμεσα με τα υλικά από τα οποία είναι δυνατόν να κατασκευαστούν κάποια εξαρτήματα και εν προκειμένω η κεφαλή του εκβολέα. Επειδή η αντοχή είναι ιδιότητα κάθε συγκεκριμένου υλικού, σε μια ορισμένη καταπόνηση είναι αναγκαστική η προσφυγή στο πείραμα όταν ζητείται η πλέον ακριβή τιμή της. Η ανάγκη ιδιαίτερης αντιμετώπισης της αντοχής των στοιχείων μιας μηχανής οφείλεται στο γεγονός ότι η διαμόρφωσή τους τα διαφοροποιεί από τα τυπικά δοκίμια της στατικής και της δυναμικής αντοχής από τα οποία οι πληροφορίες δεν είναι άμεσα επεκτάσιμες σε αυτά.

### 5.4.2.1 ΕΙΔΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΩΝ

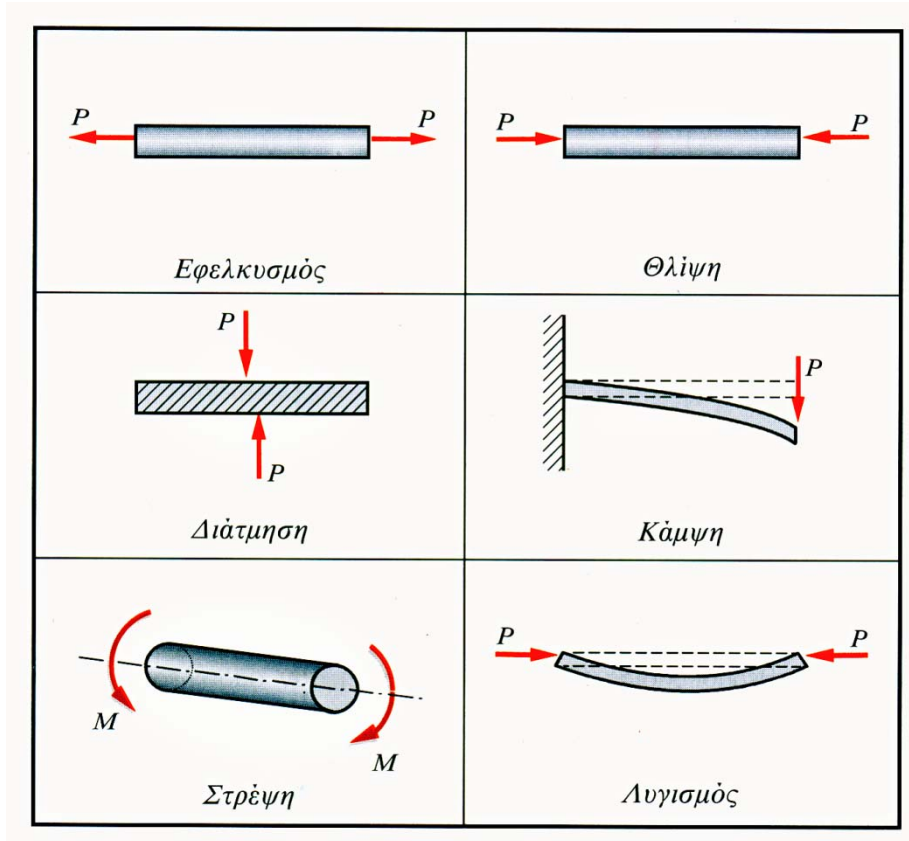
Γνωρίζουμε ότι τα διάφορα υλικά σώματα αποτελούνται από μικρότατα σωματίδια ύλης όπως τα μόρια και τα άτομα μεταξύ των οποίων ασκούνται δυνάμεις συνοχής. Οι δυνάμεις αυτές εκδηλώνονται σαν αντίσταση του υλικού εναντίων των επιβαλλόμενων εξωτερικών δυνάμεων, οι οποίες τείνουν να του προκαλέσουν παραμόρφωση ή ακόμη και λύση της συνέχειάς του δηλαδή θραύση. Εφόσον η πάλη αυτή μεταξύ των εξωτερικών και των εσωτερικών δυνάμεων συνοχής δεν μπορεί να

φτάσει μέχρι και τη θραύση του υλικού, μπορούμε να δεχτούμε ότι επέρχεται ισορροπία μεταξύ τους. Στην ισορροπία αυτή αντιστοιχεί μια μονοσήμαντη παραμόρφωση και μια μονοσήμαντη εντατική κατάσταση ή καταπόνηση.

Οι εξωτερικές δυνάμεις επενεργούν στα σώματα με διάφορους τρόπους και προκαλούν διάφορα είδη απλών και σύνθετων καταπονήσεων. Τα είδη **απλών** αλλά και σύνθετων καταπονήσεων είναι τα εξής:

1. **Εφελκυσμός:** Ένα σώμα καταπονείται σε εφελκυσμό όταν επάνω του επενεργούν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να το διασπάσουν.
2. **Θλίψη:** Ένα σώμα καταπονείται σε θλίψη όταν πάνω του επενεργούν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να το συνθλίψουν.
3. **Διάτμηση:** Ένα σώμα καταπονείται σε διάτμηση όταν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις επενεργούν κάθετα στον άξονά του,
4. **Κάμψη:** Ένα σώμα καταπονείται σε κάμψη όταν οι δυνάμεις ενεργούν κάθετα στον άξονά του. Τότε αναπτύσσονται ροπές κάμψης και προκαλείται καμπύλωση της δοκού.
5. **Στρέψη:** Ένα σώμα καταπονείται σε στρέψη όταν οι δυνάμεις αποτελούν ζεύγος με επίπεδο κάθετο στον άξονά του το οποίο τείνουν να περιστρέψουν.
6. **Λυγισμός:** Ο λυγισμός από άποψη δράσης των δυνάμεων μοιάζει με τη θλίψη, ενώ από άποψη παραμορφώσεων μοιάζει με την κάμψη. Τελικά όμως διαφέρει αρκετά από τις δυο προηγούμενες αποτελώντας ιδιαίτερο τρόπο καταπόνησης, η οποία μάλιστα είναι πολύ επικίνδυνη για τις κατασκευές.

**Σύνθετες καταπονήσεις :** Ένα σώμα είναι δυνατόν να φορτίζεται με συνδυασμό δύο ή και περισσότερων απλών καταπονήσεων, οπότε η προκύπτουσα καταπόνηση ονομάζεται σύνθετη.



Σχήμα 5.13:Είδη καταπονήσεων

### 5.4.2.2 ΕΙΔΗ ΦΟΡΤΙΩΝ

Οι δυνάμεις που δρουν στην εξωτερική επιφάνεια ενός παραμορφώσιμου σώματος όπως προαναφέραμε λέγονται εξωτερικές δυνάμεις . Οι εσωτερικές δυνάμεις αναφέρονται και σαν συνοριακές δυνάμεις επειδή δρουν στα εξωτερικά σύνορα (όρια) του σώματος. Τα εξωτερικά φορτία (δυνάμεις ή ροπές) που ασκούνται σε ένα φορέα ή σε μια κατασκευή γενικότερα διακρίνονται σε:


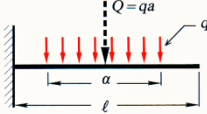
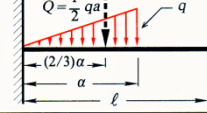
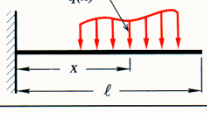
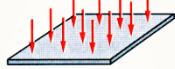
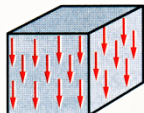
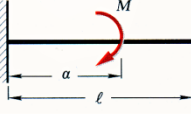
1. **Ημιστατικά** φορτία όταν αυξάνουν ομαλά. Διατηρούν σταθερή τιμή για ένα χρονικό διάστημα και στη συνέχεια απομακρύνονται.
2. **Μόνιμα** φορτία όταν καταπονούν μόνιμα μια κατασκευή. Σαν τέτοιο φορτίο χαρακτηρίζεται το ίδιο βάρος της κατασκευής.
3. **Κρουστικά φορτία** όταν δρουν απότομα με όλη τους την ένταση επάνω σε μια κατασκευή. Αποτέλεσμα αυτών των φορτίων είναι η διάδοση τάσεων κυματικής μορφής και αποτελούν έντονη εντατική κατάσταση.

4. **Εναλλασσόμενα φορτία** όταν μεταβάλλονται ομαλά με την πάροδο του χρόνου. Τα φορτία αυτά έχουν συνήθως σταθερή περίοδο και αποτελούν επίσης έντονη καταπόνηση. Η καταπόνηση αυτή ονομάζεται δυναμική.

Τα **εξωτερικά φορτία** ανάλογα με τον τρόπο που δρουν σε ένα σώμα διακρίνονται σε:

1. **Συγκεντρωμένα φορτία** όταν ασκούνται σε πολύ μικρή περιοχή του σώματος που πρακτικά θεωρείται σημείο γι' αυτό και ονομάζονται σημειακά.
2. **Κατανεμημένα φορτία** όταν ασκούνται σε μια ορισμένη περιοχή του σώματος. Η κατανομή αυτή μπορεί να είναι ομοιόμορφη, παραβολική, τραπεζοειδής κ.λπ. .
3. **Επιφανειακά κατανεμημένα φορτία** όπως είναι το ίδιο βάρος των επιφανειών.

Εκτός από τα παραπάνω είδη φορτίων ένα σώμα μπορεί να φορτίζεται επίσης και από εξωτερική ροπή.

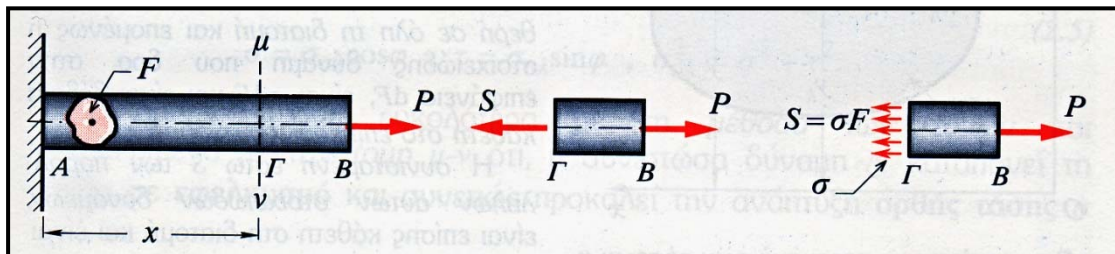
Χαρακτηρισμός φορτίου	Συμβολισμός	Μονάδες μέτρησης
Συγκεντρωμένο ή σημειακό φορτίο		N , Kp , t
Ομοιόμορφη κατανομή φορτίου		N/m , Kp/m , t/m
Τριγωνική κατανομή φορτίου		N/m , Kp/m , t/m
Ανομοιόμορφη κατανομή φορτίου		N/m , Kp/m , t/m
Επιφανειακά κατανεμημένο φορτίο		N/m <sup>2</sup> , Kp/m <sup>2</sup> , t/m <sup>2</sup>
Χωρικά κατανεμημένο φορτίο		KN/m <sup>3</sup> , t/m <sup>3</sup>
Συγκεντρωμένη ροπή		Nm , Kpm , tm

Σχήμα 5.14 Είδη φορτίων

### 5.4.2.3 ΕΙΔΗ ΤΑΣΕΩΝ

#### Ορθή τάση

Έστω μια αβαρής ράβδος AB που είναι πακτωμένη στο ένα της άκρο. Στο άλλο άκρο εφαρμόζουμε ένα αξονικό εφελκυστικό φορτίο P. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των τομών επιτυγχάνουμε οι εσωτερικές δυνάμεις της ράβδου στο σχήμα να φαίνονται σαν εξωτερικές στο σημείο Γ. Για να ισορροπεί η δεξιά τομή της ΓΒ της ράβδου πρέπει σε αυτή να αναπτυχθεί εσωτερική δύναμη S τέτοια ώστε να είναι ίση και αντίθετη της εξωτερικής P. Στο άκρο Γ αναπτύσσονται απειροστές εσωτερικές δυνάμεις που ονομάζονται τάσεις οι οποίες οφείλονται στις δράσεις των σωματιδίων του αριστερά τμήματος ΑΓ επί εκείνων που ήταν σε επαφή και παρέμειναν τελικά στο δεξιό τμήμα ΓΒ μετά την τομή. Οι πολύ μικρές αυτές δυνάμεις υποθέτουμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια της τομής μ-ν και είναι κάθετες σε αυτήν. Από τη συνθήκη ισορροπίας του ελεύθερου σώματος ΓΒ προκύπτει ότι η συνισταμένη της ομοιόμορφης αυτής κατανομής των στοιχειωδών εσωτερικών δυνάμεων, πρέπει να είναι συγγραμμική, ίση και αντίθετη με το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο. Έτσι εάν F είναι το εμβαδόν της διατομής της ράβδου και σ η εσωτερική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας (**τάση**) από τη συνθήκη ισορροπίας της ράβδου κατά τον άξονά της προκύπτει  $S = \sigma \cdot F = P$  και συνεπώς  $\sigma = \frac{P}{F}$  (5.1) που είναι η **ορθή τάση** και έχει μονάδες [N/mm<sup>2</sup>]. Η τάση έχει τα γενικά χαρακτηριστικά της δύναμης είναι συνεπώς διάνυσμα και μπορεί να αναλυθεί σε συνιστώσες. Τέλος, οι ορθές τάσεις που προκαλούν μήκυνση, δηλαδή εφελκυσμό ονομάζονται εφελκυστικές και αυτές που προκαλούν βράχυνση, δηλαδή θλίψη ονομάζονται θλιπτικές.



Σχήμα 5.15: Ορθή τάση

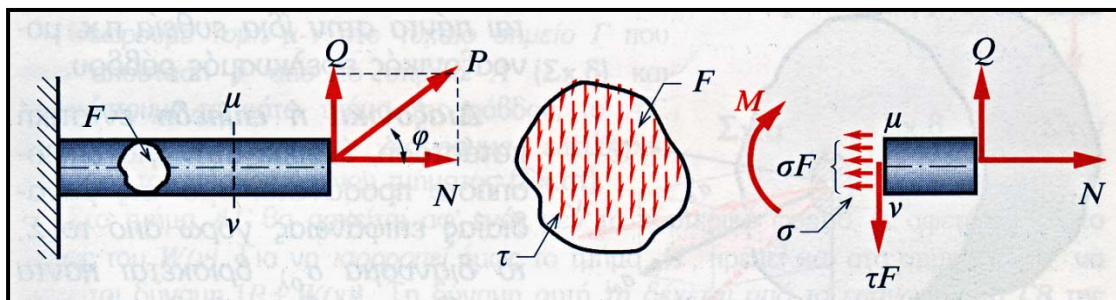
**Διατμητική τάση**

Έστω τώρα ότι η δύναμη  $P$  δρα υπό γωνία ως προς την επιφάνεια  $F$  και σχηματίζει γωνία  $\varphi$  με τον άξονα της ράβδου. Όπως είναι γνωστό η δύναμη  $P$  μπορεί να αναλυθεί σε μια συνιστώσα  $Q$  και σε μια συνιστώσα  $N$ . Με βάση τα παραπάνω ορίζουμε τις τάσεις  $\sigma_{ολ}$ , ορθή  $\sigma$  και διατμητική  $\tau$  ως εξής:

- $\sigma_{ολ} = \frac{P}{F}$ , ολική τάση στην επιφάνεια  $F$  (5.2)

- $\sigma = \frac{N}{F}$ , ορθή τάση στην επιφάνεια  $F$  (5.3)

- $\tau = \frac{Q}{F}$ , **διατμητική τάση** στην επιφάνεια  $F$  (5.4)



Σχήμα 5.16: Διατμητική τάση

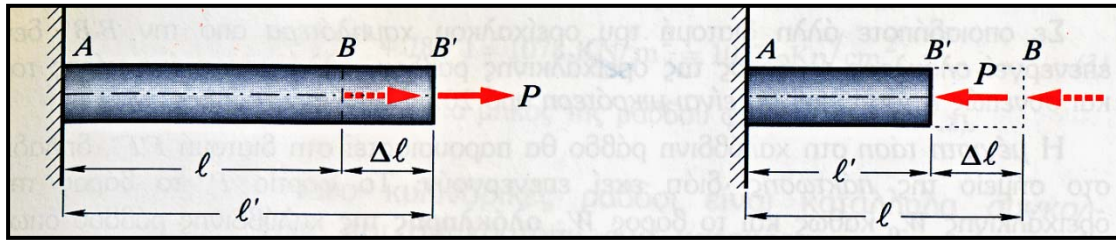
**5.4.2.4 ΕΙΔΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ**

Όπως έχουμε αναφέρει τα διάφορα σώματα καταπονούνται από εξωτερικές δυνάμεις **παραμορφώνονται**, μεταβάλλουν δηλαδή τις γραμμικές τους διαστάσεις ή τις γωνίες τους ή και τα δύο. Διακρίνουμε δύο είδη παραμορφώσεων τη γραμμική και τη γωνιακή παραμόρφωση.

**Γραμμική παραμόρφωση**

Αν στην αβαρή ράβδο  $AB$  αρχικού μήκους  $l$  επιβληθεί εφελκυστικό φορτίο  $P$  στο κέντρο βάρους  $B$  της διατομής της θα παρατηρήσουμε ότι το σημείο  $B$  θα

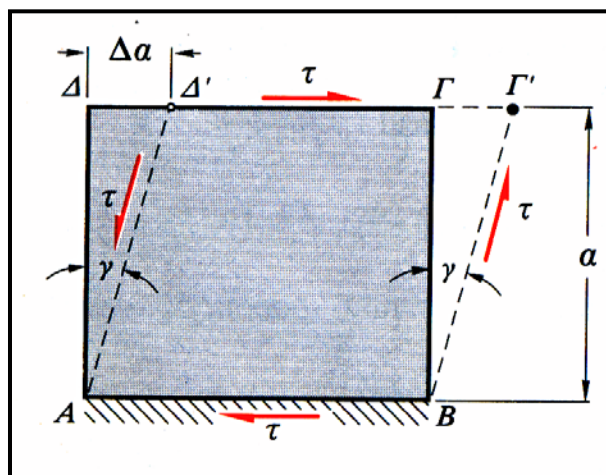
μετατοπιστεί δεξιότερα στη θέση B'. Η απόσταση (BB')=Δl ονομάζεται επιμήκυνση της ράβδου. Ονομάζουμε ανηγμένη παραμόρφωση την ποσότητα  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  (5.5).



Σχήμα 5.17:Εφελκυσμός και θλίψη ράβδου

**Γωνιακή παραμόρφωση**

Για την έννοια της γωνιακής παραμόρφωσης ας θεωρήσουμε έναν κύβο πλευράς α στις έδρες του οποίου επενεργούν διατμητικές τάσεις τ. Με την επενέργεια των διατμητικών τάσεων ο κύβος λαμβάνει τη μορφή του σχήματος που ακολουθεί και σχηματίζεται ο ρόμβος ABΓ'Δ'. Η πολύ μικρή γωνία που σχηματίζεται από την αρχική έδρα ΑΔ και την τελική ΑΔ' θα είναι  $\gamma = \tan \gamma = \frac{\Delta \Delta'}{\Delta \Delta} = \frac{\Delta \alpha}{\alpha}$  (5.6). Η γωνία γ μετριέται σε ακτίνια και την ονομάζουμε **γωνιακή παραμόρφωση ή γωνία ολίσθησης ή διατμητική παραμόρφωση**. Τα παραμορφωσιακά αποτελέσματα επομένως διατμητικών δυνάμεων είναι οι γωνιακές παραμορφώσεις.



Σχήμα 5.18:Γωνιακή παραμόρφωση πρίσματος



### 5.4.2.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ- VON MISES

Με τον όρο αστοχία εννοούμε:

A) Για τα όλκιμα υλικά την εμφάνιση διαρροής που αντιστοιχεί στην τάση διαρροής  $\sigma_{\text{διαρροής}}$  και

B) Για τα ψαθυρά υλικά την έναρξη της θραύσης.

Στην μονοαξονική καταπόνηση μιας κατασκευής (εφελκυσμός, θλίψη) είναι εύκολο να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της αστοχίας, ελέγχοντας ένα δοκίμιο από το υλικό του. Στην περίπτωση όμως που η κατασκευή υποβάλλεται σε σύνθετη καταπόνηση δεν είναι εύκολο να την ελέγξουμε πειραματικά άμεσα. Από τα παραπάνω διεφάνη ότι χρειάζεται ένα κριτήριο αστοχίας που να συσχετίζει την κατάσταση αντοχής μιας κατασκευής που υποβάλλεται σε σύνθετη καταπόνηση με την κατάσταση αντοχής ενός δοκιμίου από το ίδιο υλικό που υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό ή θλίψη. Σύμφωνα λοιπόν με το αναζητούμενο κριτήριο η πραγματική εντατική κατάσταση θα ανάγεται σε μια ισοδύναμη ή συγκριτική μονοαξονική εντατική κατάσταση εξίσου επικίνδυνη με την πραγματική διαξονική ή τριαξονική. Κατά το κριτήριο κρίσιμης στροφικής ενέργειας παραμόρφωσης η διαρροή ενός όλκιμου υλικού σε σύνθετη εντατική κατάσταση αρχίζει όταν η στροφική ενέργεια (η ενέργεια που προκαλεί τη στρέβλωση) που αναπτύσσεται, είναι ίση με την αντίστοιχη στροφική ενέργεια που αναπτύσσεται κατά τη διαρροή του υλικού σε εφελκυσμό. Κατά το κριτήριο αυτό είναι δυνατόν να σημειωθεί διαρροή χωρίς κάποια από τις κύριες τάσεις να υπερβεί το όριο διαρροής ή/και όταν και οι τρεις κύριες τάσεις είναι μικρότερες από το όριο διαρροής.

Γενικά για το συγκεκριμένο κριτήριο ισχύει:  $\sigma_{\text{ισ}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$  (5.7)

Και στην ειδική περίπτωση όπου  $\sigma_y = 0$  ισχύει  $\sigma_{\text{ισ}} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq \sigma_{\text{διαρροής}}$  (5.8)

### 5.4.2.6 ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Την περίπτωση της **στατικής αντοχής** αφορούν οι μόνιμες και οι προοδευτικές φορτίσεις. Στα διάφορα στοιχεία μηχανών ωστόσο υπάρχουν τοπικές ανωμαλίες στη γεωμετρία που έχουν ως συνέπεια τη δημιουργία αυξημένων τασικών πεδίων. Η συγκέντρωση των τάσεων σπάνια αντιμετωπίζεται με τις γνωστές αναλυτικές μεθόδους. Οι ακριβέστεροι υπολογισμοί γίνονται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων μερικές από τις οποίες στηρίζονται στα ενεργειακά θεωρήματα της μηχανικής. Η επίδραση της γεωμετρικής διαμόρφωσης στη στατική αντοχή είναι πολύ μικρότερης σημασίας από εκείνη στη δυναμική αντοχή για τους παρακάτω λόγους:

- ✘ Το μέγεθος της επίδρασης των διαμορφώσεων στη στατική αντοχή είναι πολύ μικρότερο από εκείνο στη δυναμική και
- ✘ Οι μηχανές άρα και τα στοιχεία τους υφίστανται κατά κανόνα δυναμικές καταπονήσεις κατά τη λειτουργία τους οι οποίες και χρονικά καθορίζουν τη διάρκεια ζωής τους.

Η συμπεριφορά των υλικών στη στατική καταπόνηση επηρεάζεται από την ύπαρξη γεωμετρικών ανωμαλιών προκαλώντας σημαντική μείωση στην ολική μήκυνση θραύσης και σημαντική αύξηση στην τάση θραύσης και το όριο διαρροής.

Όμως η πλειονότητα των μηχανολογικών κατασκευών καταπονείται από φορτία δυναμικά των οποίων των μέγεθος μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Το κύριο χαρακτηριστικό της δυναμικής περιοδικής φόρτισης είναι ακριβώς η περιοδική μεταβολή της εντάσεως του φορτίου μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής. Αυτή η μεταβολή του φορτίου ως προς το χρόνο δεν έχει σημασία για την αντοχή του υλικού. Εκείνο που επηρεάζει τη δυναμική αντοχή είναι το μέγεθος της μέγιστης και της ελάχιστης φορτίσεως. Γι'αυτό το λόγο κάθε φορτίο θεωρείται ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου. Η δυναμική φόρτιση ενός στοιχείου έχει σαν αποτέλεσμα την αντίστοιχη διακύμανση των τάσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε αυτό.

### 5.5 Παραδοχές στην αριθμητική επίλυση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Προτού ξεκινήσουμε την μελέτη της αντοχής στη μήτρα κρίνεται σκόπιμο να ξεκαθαρίσουμε το είδος της μελέτης, το είδος της καταπόνησης, τα είδη των φορτίσεων και τις συνθήκες λειτουργίας. Η κεφαλή θεωρείται πακτωμένη στο ένα άκρο της, στο σημείο πρόσδεσής της δηλαδή με το σώμα του εκβολέα. Οι φορτίσεις που ασκούνται στην μήτρα, στην αράχνη και στο πόδι της αράχνης είναι η ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση σε όλο το σώμα της κεφαλής (της αράχνης και του ποδιού ανάλογα με την περίπτωση βλ. παράγραφο 5.3) και η ομοιόμορφα κατανεμημένη διατμητική δύναμη στα τοιχώματα της κεφαλής λόγω του ιξώδους του τήγματος. Οι φορτίσεις αυτές καταπονούν τη μήτρα σε κάμψη και διάτμηση. Επομένως έχουμε να κάνουμε με σύνθετη καταπόνηση. Επιπλέον, θεωρούμε ότι ο εκβολέας εργάζεται στο μέγιστο αριθμό στροφών για τον οποίο η παροχή είναι η μέγιστη και ίση με  $Q_{MAX} = 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί.

Δεδομένου ότι το ρευστό είναι Μη Νευτωνικό και σύμφωνα με τα προαναφερόμενα καταλήγουμε ότι η μήτρα καταπονείται στατικά. Η πίεση που καταπονεί τη μήτρα-την αράχνη και το πόδι της αράχνης είναι ίση με την πτώση της πίεσης που προκύπτει από το αριθμητικό μοντέλο επίλυσης του Comsol στην παράγραφο 5.3 (οι βαρυτικές δυνάμεις αμελούνται).

<b>1<sup>1/2</sup>in</b>	<b>3.81cm</b>	<b>24:1 L/D</b>	<b>50-60 lb/h</b>	<b>0.0063-0.0076 kg/s</b>
<b>2in</b>	5.08cm	24:1 L/D	90-120 lb/h	0.0113-0.0151 kg/s
<b>2<sup>1/2</sup>in</b>	6.35cm	24:1 L/D	150-250 lb/h	0.0189-0.0315 kg/s
<b>3<sup>1/2</sup>in</b>	8.89cm	24:1 L/D	300-400 lb/h	0.0378-0.0504 kg/s
<b>3<sup>1/2</sup>in</b>	8.89cm	30:1 L/D	350-450 lb/h	0.0441-0.0567 kg/s
<b>4<sup>1/2</sup>in</b>	11.43cm	24:1 L/D	700-1000lb/h	0.0882-0.126 kg/s
<b>6in</b>	15.24cm	24:1 L/D	1200-1600 lb/h	0.1512-0.02016 kg/s

**Πίνακας 5.1:**Χαρακτηριστικά εκβολέα και παροχή

Τέλος οι ιδιότητες του υλικού που θα χρησιμοποιήσουμε στον έλεγχο της αντοχής είναι σύμφωνα με το κεφάλαιο 4.7 ο εργαλειοχάλυβας 1.2738, AISI P20+Ni με εμπορική ονομασία IMPAX ο οποίος αποτελεί την κυριότερη επιλογή ποιότητας χάλυβα για την κατασκευή μητρών για θερμοπλαστικά πολυμερή όπως είναι το HDPE με τις παρακάτω ιδιότητες:

<b>Property Name</b>	<b>Value</b>	<b>Units</b>
Elastic modulus	$2 \cdot 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.33	-
Shear modulus	$7.353 \cdot 10^{10}$	N/ m <sup>2</sup>
Mass density	7800	kg/m <sup>3</sup>
Tensile strength	$9.3 \cdot 10^8$	N/m <sup>2</sup>
Yield strength	$8 \cdot 10^8$	N/m <sup>2</sup>
Thermal expansion coefficient	$1.3 \cdot 10^{-5}$	J/K
Thermal conductivity	43	W/(m.K)
Specific heat	440	J/(kg.K)

**Πίνακας 5.2:**Ιδιότητες χάλυβα 1.2738

## **5.6 Έλεγχος αντοχής στη μήτρα με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων του Cosmosworks**

### **5.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το λογισμικό COSMOSWORKS 2007 αποτελεί ένα πακέτο Finite Element Analysis το οποίο μας επιτρέπει να επιλύουμε στατικά και δυναμικά προβλήματα. Στόχος μας είναι ο έλεγχος της αντοχής της μήτρας, της αράχνης και του ποδιού της αράχνης σε διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης. Επιπλέον, μπορούμε να επιβεβαιώσουμε τα σενάρια περί επικίνδυνης διατομής όπου είναι πιθανόν να εμφανιστούν πρώτα λόγω φόρτισης τα πρώτα σημάδια καταστροφής του τεμαχίου. Τέλος, μπορούμε να επιλέξουμε το κατάλληλο υλικό για την κατασκευή της μήτρας. Η ανάλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει μια σειρά από διακριτά βήματα τα οποία αναλύονται παρακάτω.

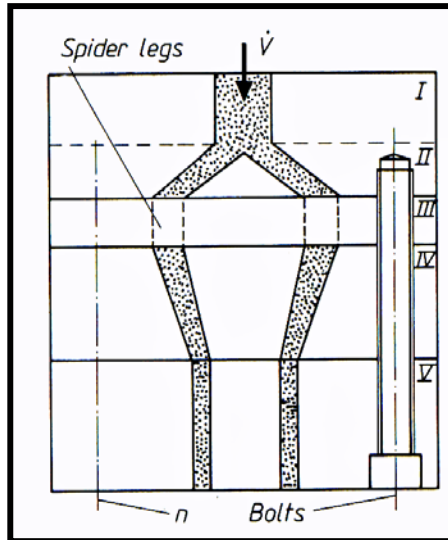
### 5.6.2 ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κατά τη μοντελοποίηση και την ανάλυση μιας δομής στο COSMOSWORKS ακολουθούνται κάποια συγκεκριμένα βήματα που είναι τα εξής:

1. Η δημιουργία της γεωμετρίας με τη χρήση του σχεδιαστικού πακέτου SOLIDWORKS .
2. Ο καθορισμός του προβλήματος προς επίλυση (στατικό,δυναμικό κ.λ.π).
3. Η επιλογή υλικού από την βιβλιοθήκη ή τις βάσεις δεδομένων του COSMOSWORKS και καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού.
4. Η επιβολή οριακών συνθηκών(ώστε να δεσμευθούν οι βαθμοί ελευθερίας) και φορτίσεων σε επιφάνειες, ακμές ή σημεία.
5. Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας με τη δημιουργία πλέγματος με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Εδώ υπάρχει η δυνατότητα να επιλέξουμε το είδος του πλέγματος που θέλουμε να δημιουργηθεί (coarse,fine,finer). Η γένεση πλέγματος αποτελεί το πλέον σημαντικό και δύσκολο σημείο στη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων.
6. Η επίλυση του προβλήματος.
7. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων με χρωματική απεικόνιση πεδίων τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων.

### 5.6.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ, ΣΤΗΝ ΑΡΑΧΝΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΟΔΙ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ

Προκειμένου για τον έλεγχο της αντοχής στη μήτρα θα μας διευκολύνει ιδιαίτερα οι υπολογισμοί των διατμητικών δυνάμεων να γίνουν σε κάθε ζώνη της μήτρας ξεχωριστά. Σύμφωνα λοιπόν με το σχήμα που ακολουθεί και με όσα προαναφέραμε σε προηγούμενα κεφάλαια ισχύουν τα παρακάτω:



Σχήμα 5.19

**Ζώνη I**

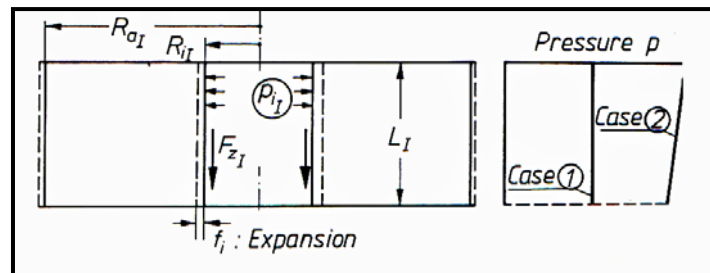
Στη ζώνη αυτή η διατμητική δύναμη λόγω του ιξώδους ισούται με  $F_{Z_I} = \Delta P \pi R_{i_I}^2$ .

Στην περίπτωση που η μεταβολή της πίεσης είναι ίση με :

$$\Delta P = \Delta P_{60000000} = \Delta P_{die} = |P_{out} - P_{in}| = |0 - 60000000| = 60000000 Pa = 600 bar$$

$R_{i_I} = 0,006m$  τότε η διατμητική δύναμη είναι ίση με

$$F_{Z_I 60000000} = \Delta P \pi R_{i_I}^2 = 6782,4 N .$$



Σχήμα 5.20: Διατομή Ζώνης I

**Ζώνη V**

Στη ζώνη αυτή η διατμητική δύναμη λόγω ιξώδους δίνεται από τη σχέση

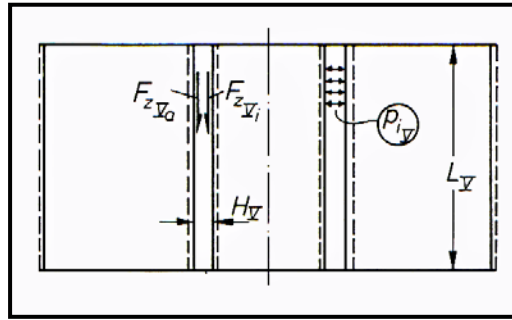
$$F_{Z_V} = \frac{\pi \Delta P}{2} H_V (R_{o_V} + R_{i_V}) .$$

Δεδομένου ότι  $R_{oV} = 0,01925\text{m}$ ,  $R_{iV} = 0,01625\text{m}$ ,  $H_V = 0,003\text{m}$  και επίσης ισχύει

$$\Delta P = \Delta P_{60000000} = \Delta P_{die} = |P_{out} - P_{in}| = |0 - 60000000| = 60000000\text{Pa} = 600\text{bar}$$

η διατμητική δύναμη λόγω τξώδους είναι ίση με

$$F_{ZV60000000} = \frac{\pi \Delta P}{2} H_V (R_{oV} + R_{iV}) = 10032,3\text{N}.$$



Σχήμα 5.21: Διατομή Ζώνης V

## Ζώνη II

Στη ζώνη αυτή κωνικής γεωμετρίας προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική διατμητική δύναμη θα εφαρμόσουμε τη μεθοδολογία των διαμερίσεων. Θα χωρίσουμε της ζώνη αυτή σε μικρές διαμερίσεις οι οποίες θα θεωρήσουμε ότι είναι είτε γεωμετρίας δακτυλίου είτε γεωμετρίας σωλήνα και ανάλογα με τη διαμέριση η διατμητική δύναμη θα υπολογιστεί όπως στις ζώνες I και V παραπάνω. Η συνολική διατμητική δύναμη θα είναι ίση με το άθροισμα των διατμητικών δυνάμεων στις διαμερίσεις. Επειδή στο αριθμητικό μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων μας ενδιαφέρει η οριζόντια συνιστώσα της διατμητικής δύναμης αυτή υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη και τις κλίσεις στα τοιχώματα της μήτρας.

Επομένως σύμφωνα με το σχήμα που ακολουθεί έχουμε για

$$\Delta P = \Delta P_{60000000} = \Delta P_{die} = |P_{out} - P_{in}| = |0 - 60000000| = 60000000\text{Pa} = 600\text{bar} :$$

A/A ΔΙΑΜΕΡΙΣΗΣ	ΕΙΔΟΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΗΣ	$R_{mean_{in}}$ (M)	$R_{mean_{out}}$ (M)	$H_{II\text{ διαμεριστ}}$ (M)	$F_{ZII\text{ διαμεριστ } 60000000}$ (N)
1	tubular	0,007312	0,1015	-	8266,05
2	annular	0,008197	0,014023	0,006	12558,744
3	annular	0,016872	0,025282	0,010819	42960,73109
4	annular	0,022763	0,034477	0,012698	68467,11951
6	annular	0,026338	0,041437	0,0175	111727,0875

**Πίνακας 5.3:** Διατμητικές δυνάμεις στις ζώνη II

Για τις τρεις πρώτες διαμερίσεις η συνολική διατμητική δύναμη που ασκείται στη μήτρα είναι ίση με

$$\sum_{i=1}^3 F_{ZII\text{ διαμεριστ } 60000000} = 63785,52 \cdot \cos 30 = 55293,88\text{N} \quad \text{και για τις άλλες δύο}$$

$$\text{διαμερίσεις είναι ίση με } \sum_{i=4}^5 F_{ZII\text{ διαμεριστ } 60000000} = 180194,2 \cdot \cos 20 = 169327,16\text{N}$$

#### Ζώνη IV

Ομοίως με τη ζώνη II και στη ζώνη αυτή ισχύουν τα ίδια για

$$\Delta P = \Delta P_{60000000} = \Delta P_{die} = |P_{out} - P_{in}| = |0 - 60000000| = 60000000\text{Pa} = 600\text{bar} .$$

A/A ΔΙΑΜΕΡΙΣΗΣ	ΕΙΔΟΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΗΣ	$R_{mean_{in}}$ (M)	$R_{mean_{out}}$ (M)	$H_{IV\text{ διαμεριστ}}$ (M)	$F_{ZIV\text{ διαμεριστ } 60000000}$ (N)
1	annular	0,032279	0,042819	0,0125	88428,48375
2	annular	0,030853	0,038821	0,008579	56306,0677
3	annular	0,028602	0,035443	0,007356	44379,03488
4	annular	0,026288	0,031942	0,006326	34699,79272
5	annular	0,022691	0,027504	0,005	23641,845
6	annular	0,018441	0,022129	0,04624	176715,1306

**Πίνακας 5.4:** Διατμητικές δυνάμεις στη ζώνη IV



Και εδώ όπως και στη ζώνη II ισχύουν για τις διαμερίσεις 1-4

$$\sum_{i=1}^4 F_{ZIV \text{ διαμέρισης } 60000000} = 223813,38 \cdot \cos 90 = 221057,87\text{N} \text{ και για τις διαμερίσεις 5-6}$$

$$\sum_{i=5}^6 F_{ZIV \text{ διαμέρισης } 60000000} = 200356,98 \cdot \cos 14 = 194405,53\text{N}$$

### Ζώνη III

Η ζώνη αυτή που είναι η ζώνη της αράχνης προσεγγίζεται σαν δακτυλιοειδής διατομή

για την οποία ισχύει  $F_{ZIII 60000000} = \frac{\pi \Delta P}{2} H_V (R_{oIII} + R_{iIII})$ . Εφόσον όμως

$$\Delta P = \Delta P_{60000000} = \Delta P_{die} = |P_{out} - P_{in}| = |0 - 60000000| = 60000000\text{Pa} = 600\text{bar}$$

$$R_{oIII} = 0,045\text{m},$$

$$R_{iIII} = 0,0275\text{m},$$

$$H_{III} = 0,0175\text{m}$$

$$\acute{\epsilon}\text{πεται ότι } F_{ZIII 60000000} = 119516,25\text{N}$$

Εάν η μεταβολή της πίεσης είναι ίση με

$$\Delta P = \Delta P_{10000000} = \Delta P_{die} = |P_{out} - P_{in}| = |0 - 10000000| = 10000000\text{Pa} = 100\text{bar} \text{ σύμφωνα}$$

με τα προηγούμενα για την μεταβολή των 100bar ισχύουν τα παρακάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

ΖΩΝΗ	ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ
I	$F_{ZII10000000} = 1130,4\text{N}$
II	$\sum_{i=1}^3 F_{ZII10000000} = 9206,6\text{N}$ $\sum_{i=4}^5 F_{ZII10000000} = 28221,2\text{N}$
III	$F_{ZIII10000000} = 19919,375\text{N}$
IV	$\sum_{i=1}^4 F_{ZIV10000000} = 36842,96\text{N}$ $\sum_{i=5}^6 F_{ZIV10000000} = 6681,3\text{N}$

V	$F_{ZV10000000} = 1672,05N$
---	-----------------------------

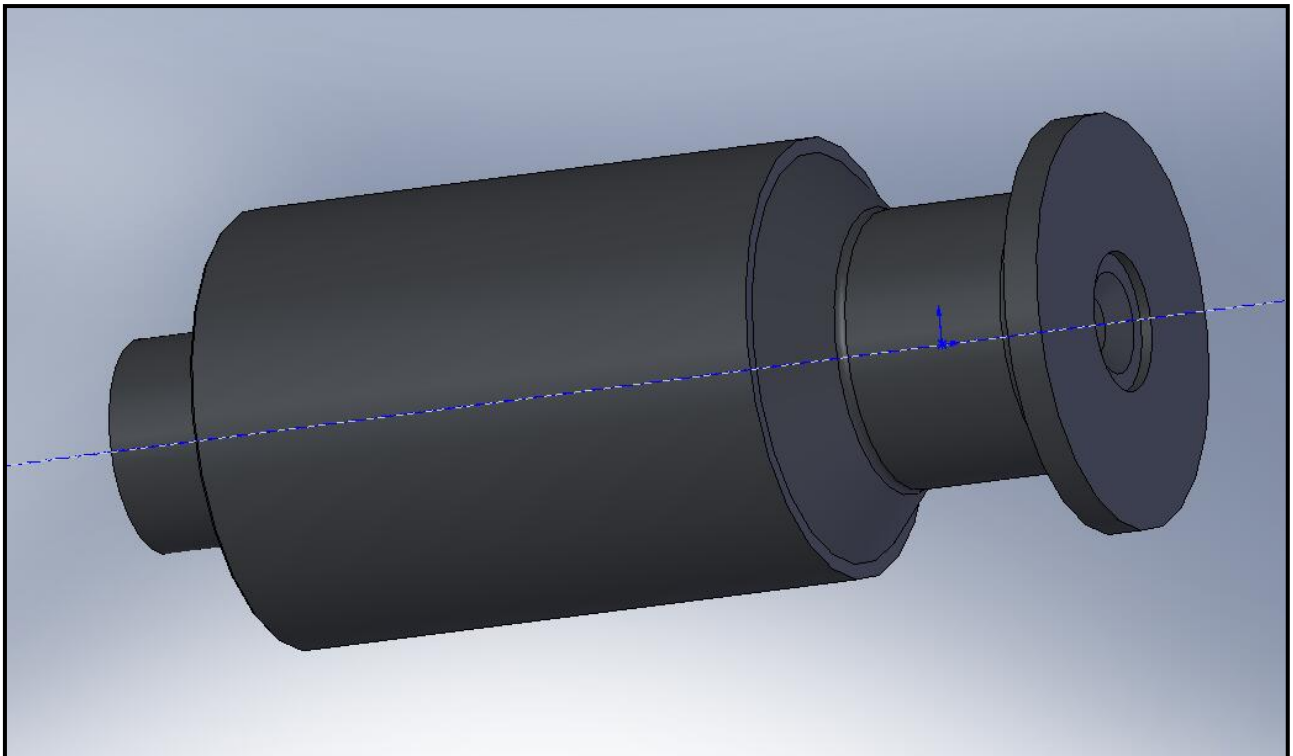
**Πίνακας 5.5:** Διατμητικές δυνάμεις στις ζώνες για πίεση 100bar

Με δεδομένες πλέον τις διατμητικές δυνάμεις μπορούμε να προχωρήσουμε στην επίλυση του αριθμητικού μοντέλου για τον έλεγχο της μήτρας. Ο έλεγχος θα γίνει σε δυο ξεχωριστές φάσεις. Στην πρώτη θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά της μήτρας όταν σε αυτή ασκείται πίεση ίση με 60000000 Pa ή 600 bar και στη δεύτερη θα ελέγξουμε την αντοχή της μήτρας σε πίεση 10000000 Pa ή 100 bar που είναι οι πτώσεις πίεσης στη μήτρα σύμφωνα με το αριθμητικό μοντέλο για το ρευστό. Και στις δύο περιπτώσεις θα επεκτείνουμε τον έλεγχό μας και στις δυο διατομές που θεωρούμε εμείς επικίνδυνες και οι οποίες είναι η ζώνη III της αράχνης και το πόδι της αράχνης τόσο για τις προαναφερθείσες τιμές της πίεσης όσο και για τις ποσοστιαίες μεταβολές της στις περιοχές αυτές. Τα βήματα που θα ακολουθήσουμε είναι αυτά της προηγούμενης παραγράφου. Ο έλεγχος της αντοχής θα γίνει σύμφωνα με το κριτήριο αστοχία Von Mises για το οποίο έγινε αναφορά προηγουμένως.

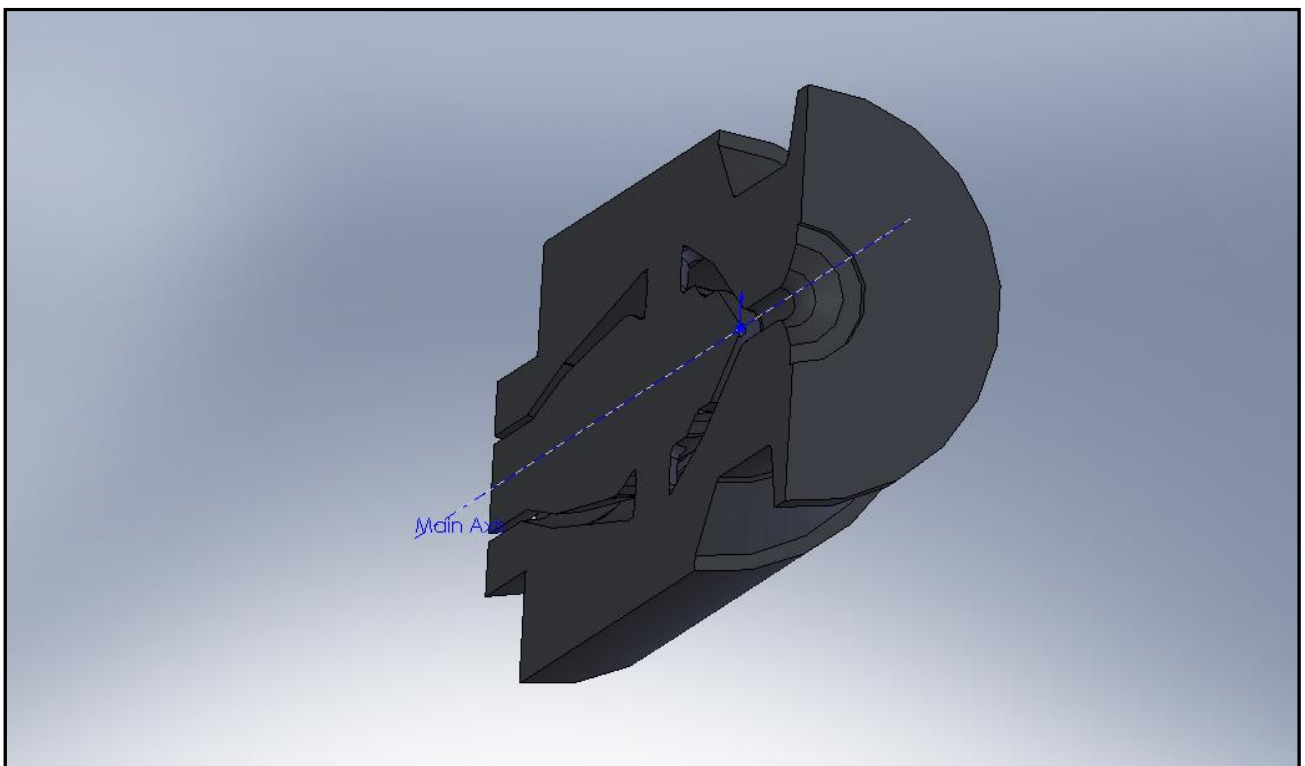
## **1. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΙΣΗ ΜΕ 600 bar**

Τα βήματα της επίλυσης του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων περιγράφονται στην παράγραφο 5.6.2 . Συγκεκριμένα για αυτή την περίπτωση έχουμε:

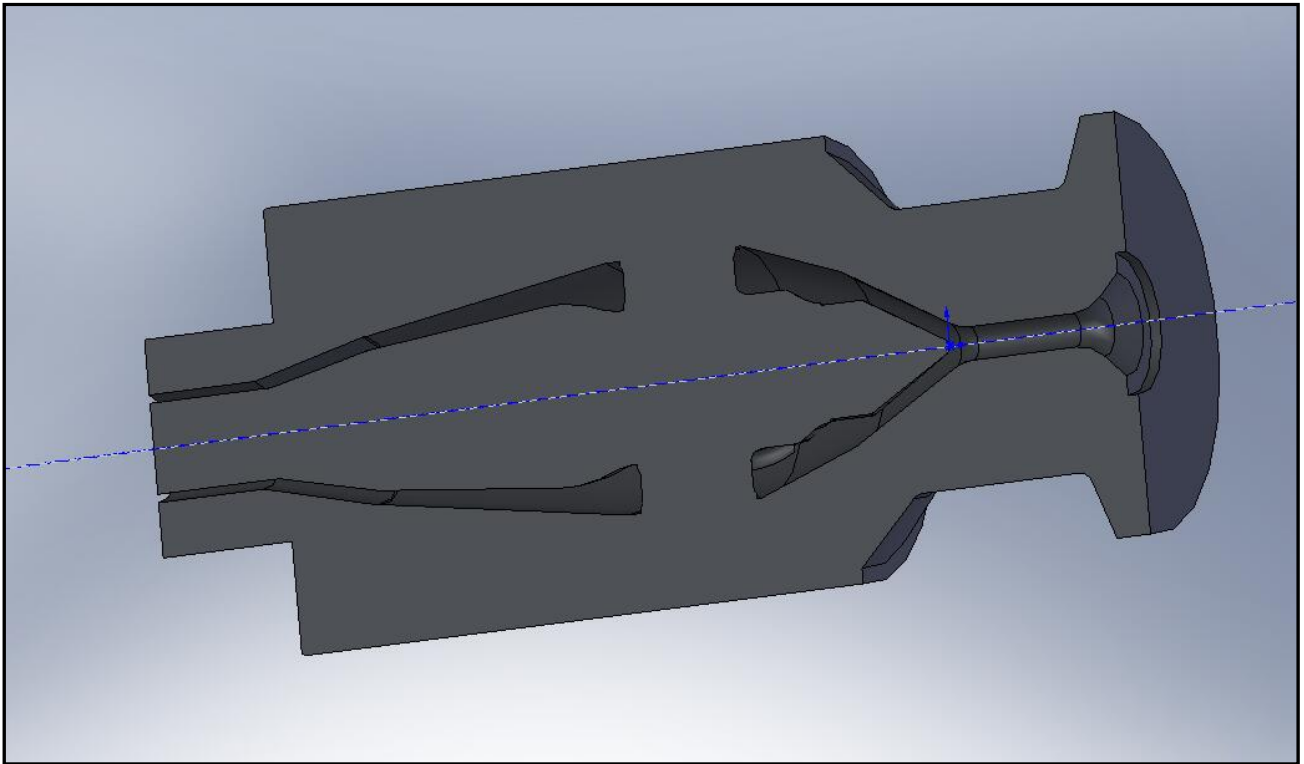
- i. Δημιουργία γεωμετρίας: Η γεωμετρία της μήτρας σχεδιάστηκε στο Solidworks και είναι η ακόλουθη:



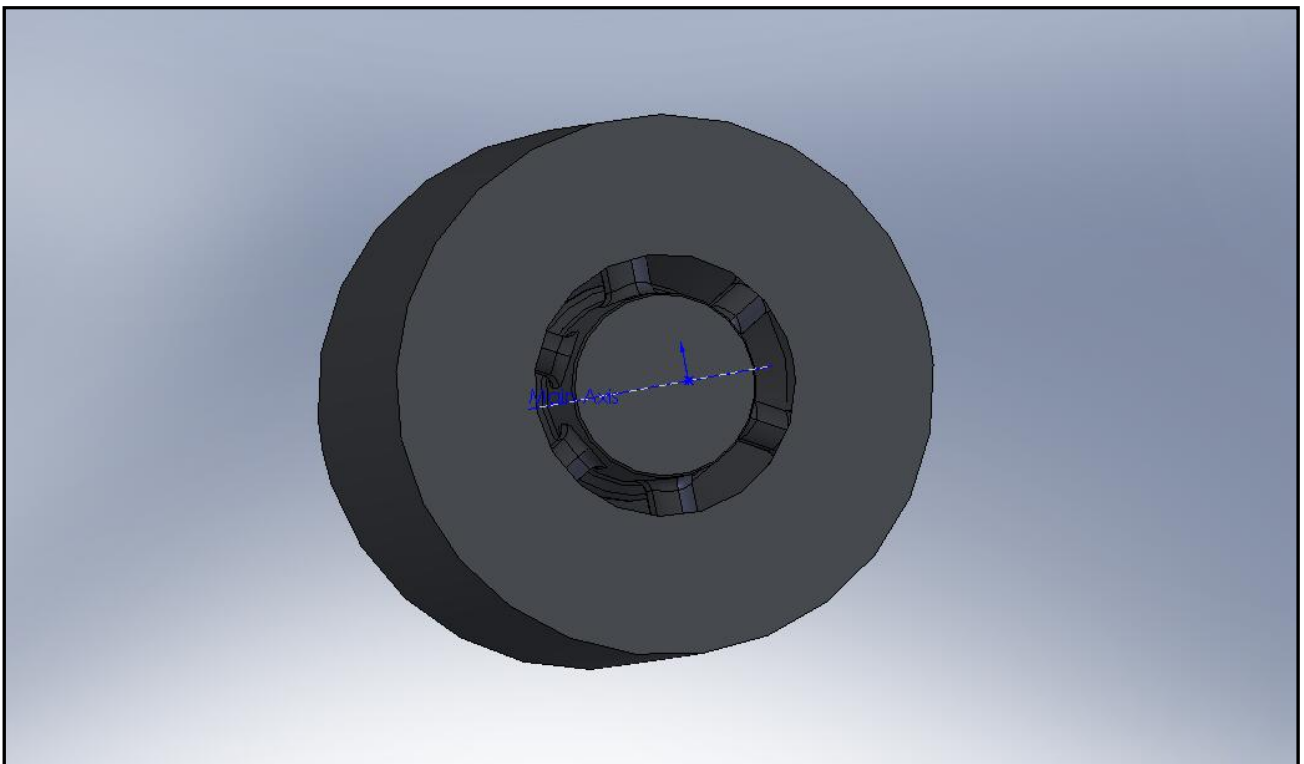
(α)



(β)



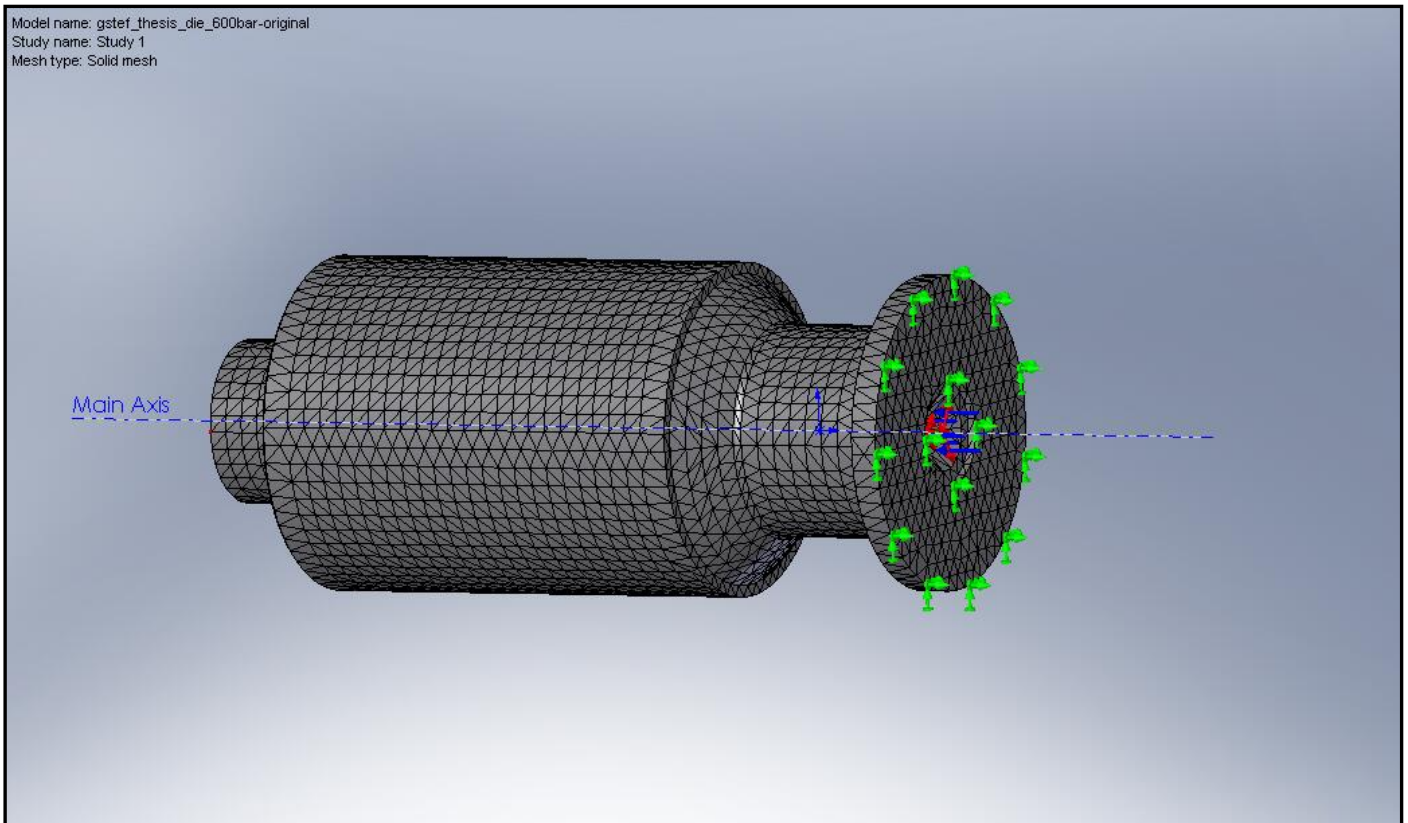
(γ)



(δ)

Σχήμα 5.22(α)-(δ): Γεωμετρία της μήτρας

- ii. Στη συνέχεια καθορίζουμε το είδος του προβλήματος δηλαδή στατικό.
- iii. Επιβάλουμε τις οριακές συνθήκες που είναι η πάκτωση στο σημείο που δένεται η κεφαλή με τον εκβολέα, η πίεση που κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το σώμα της μήτρας και η διατμητική δύναμη λόγω του ιξώδους η οποία έχει υπολογιστεί προηγουμένως.
- iv. Στη φάση αυτή επιλέγουμε το υλικό της μήτρας είτε από τη βιβλιοθήκη του Cosmosworks είτε εάν αυτό δεν διατίθεται δημιουργούμε εμείς ένα αρχείο στη βιβλιοθήκη για το εν λόγω υλικό όπως κάναμε για τον χάλυβα 1.2738.
- v. Ακολουθεί η διακριτοποίηση της γεωμετρίας.

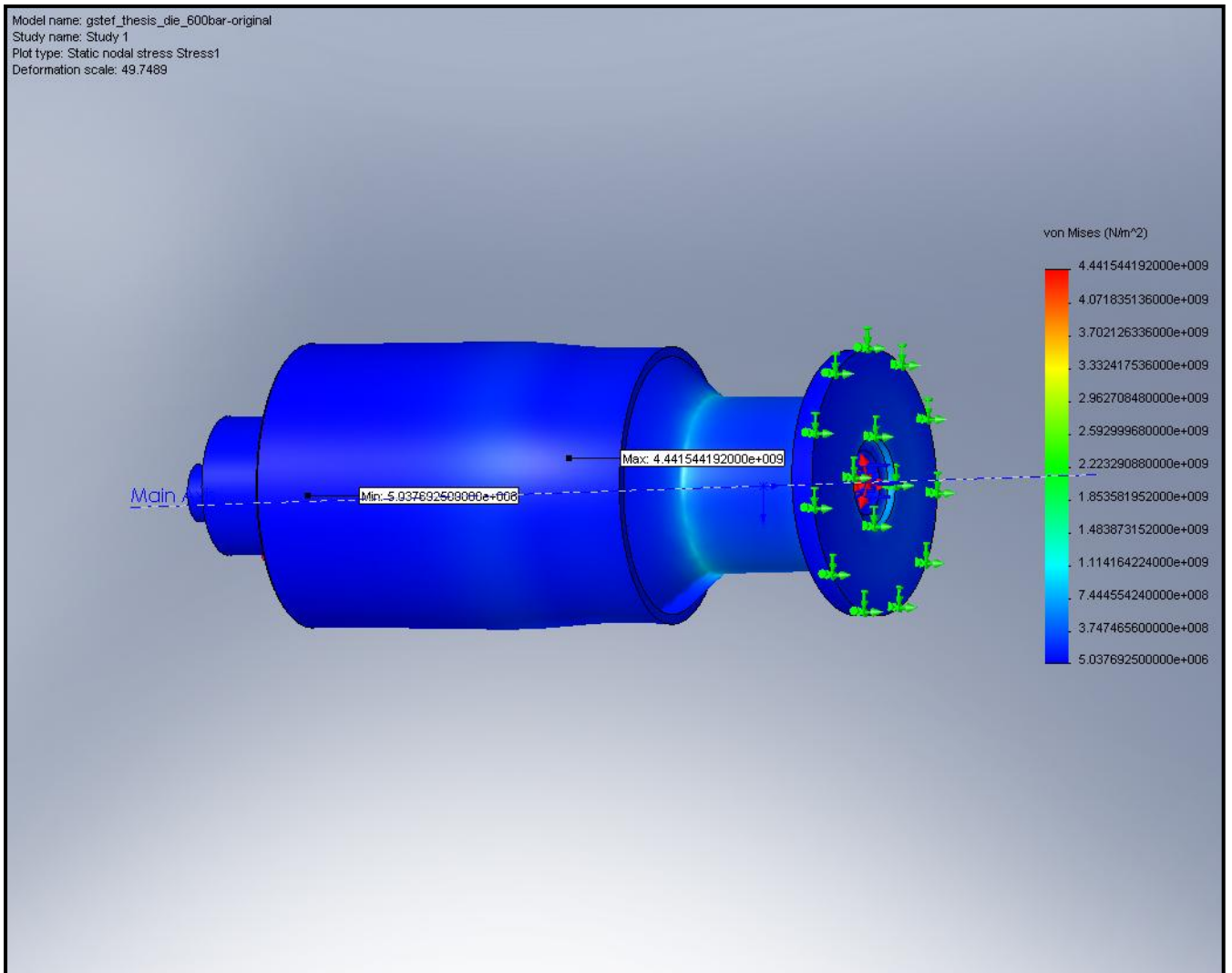


**Σχήμα 5.23:** Δημιουργία πλέγματος

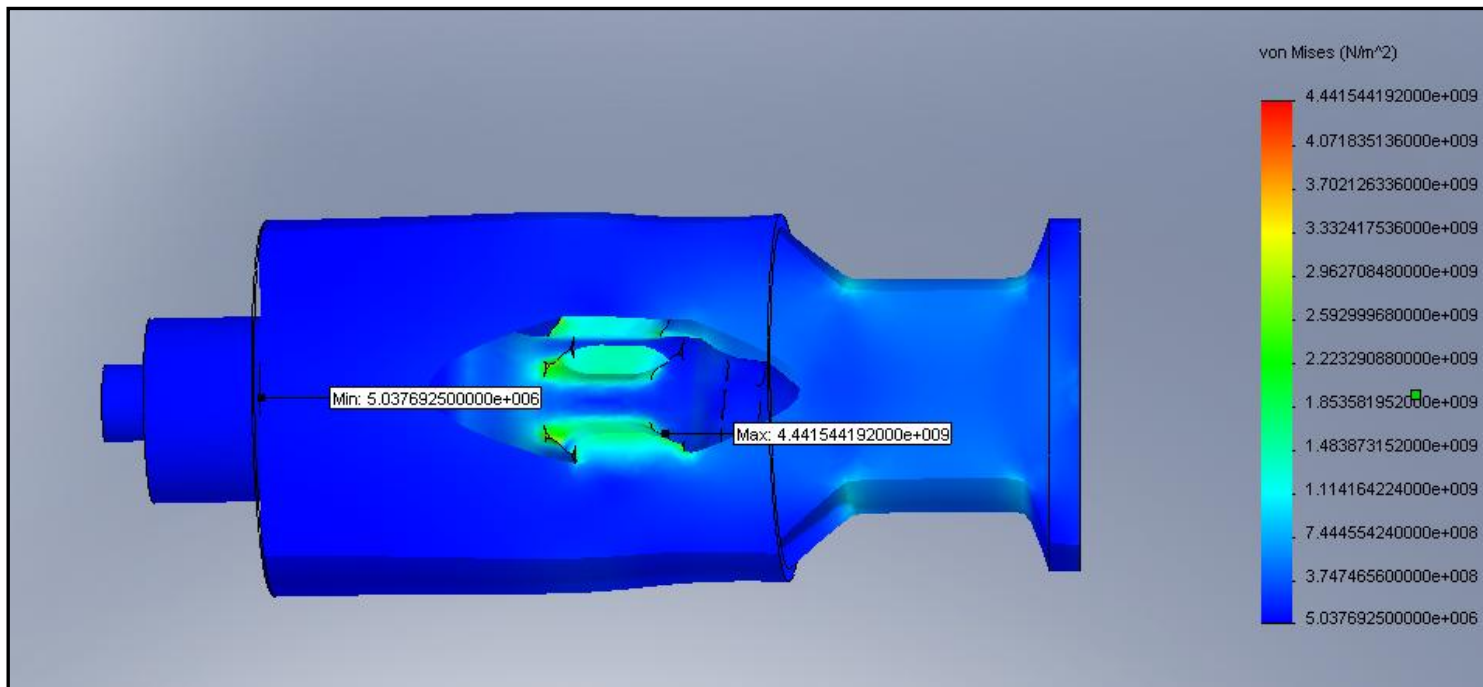
Το πλέγμα αποτελείται από 62256 πεπερασμένα στοιχεία, 92699 κόμβους και 275337 βαθμούς ελευθερίας. Η ποιότητα του πλέγματος που επιλέξαμε είναι fine.

vi. Επίλυση με χρήση του FFEPlus solver και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

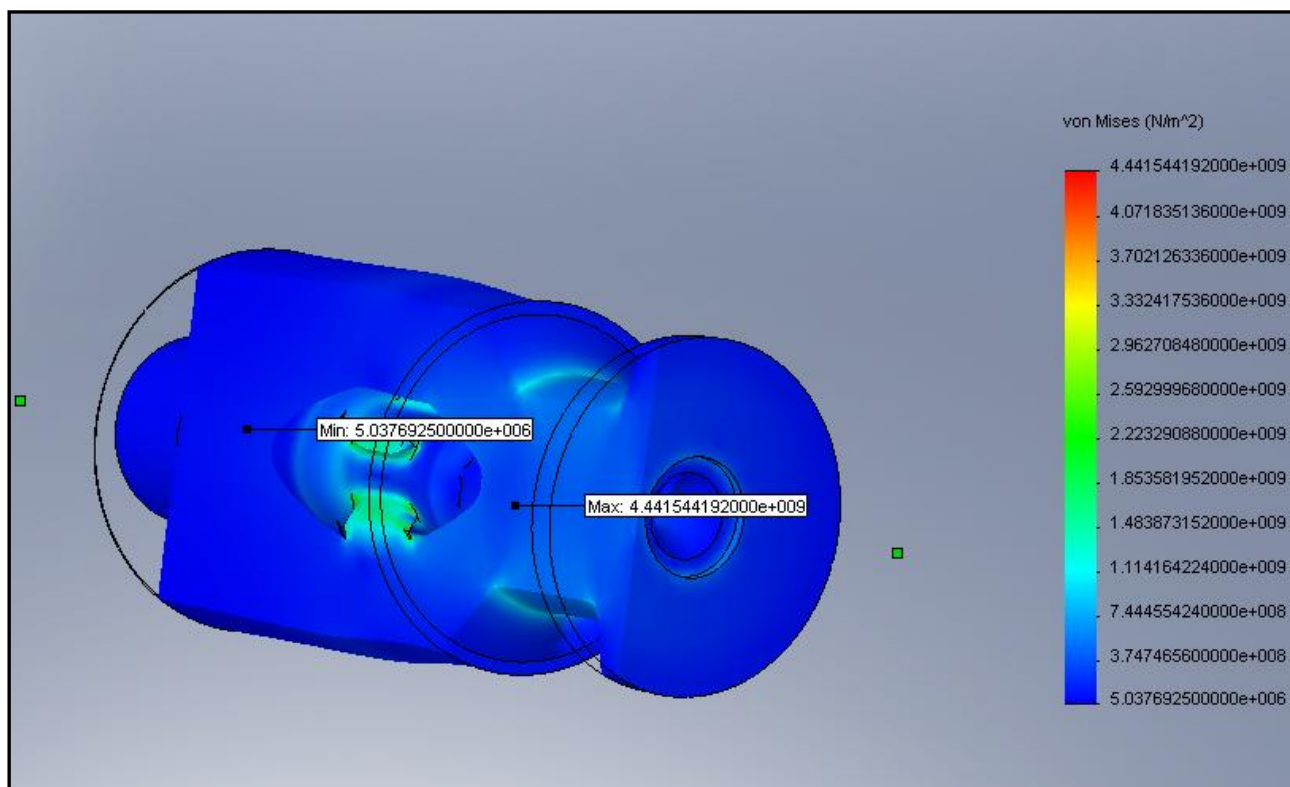
**ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ VON MISES**



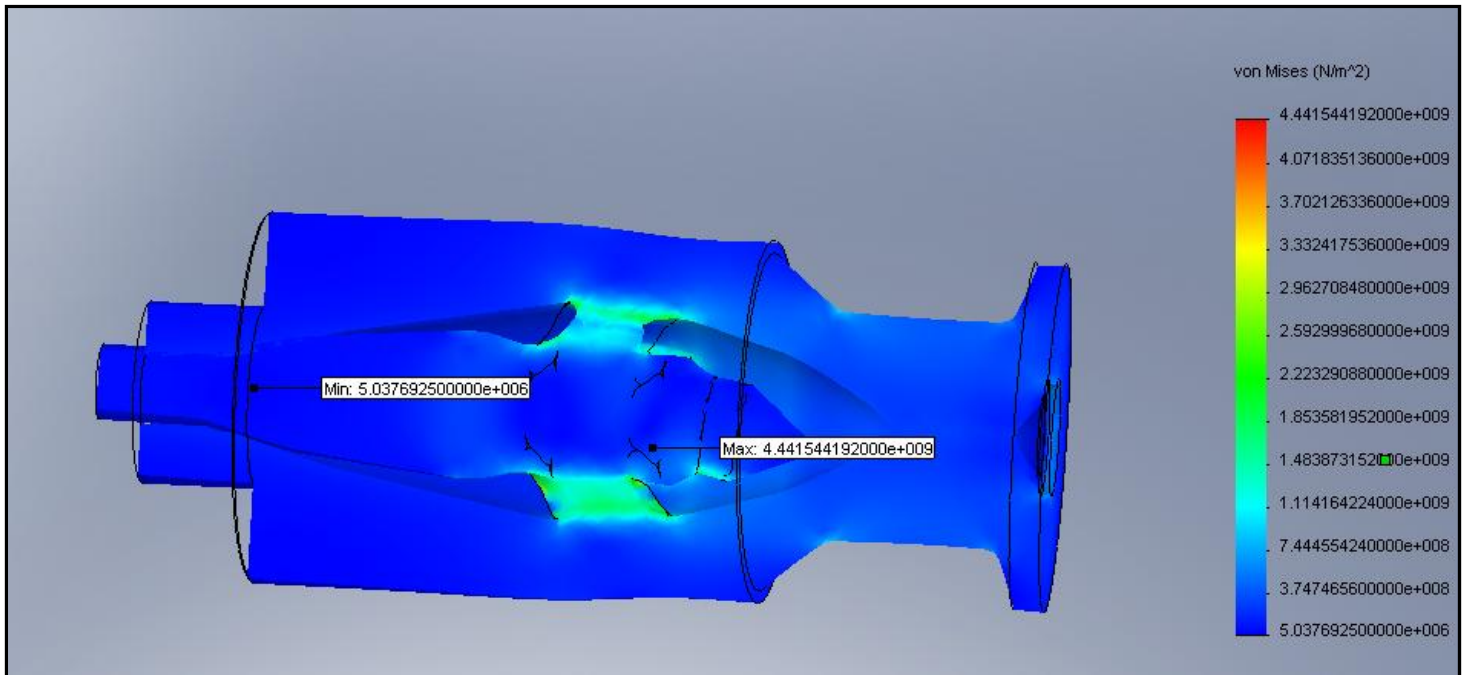
(α)



(β)



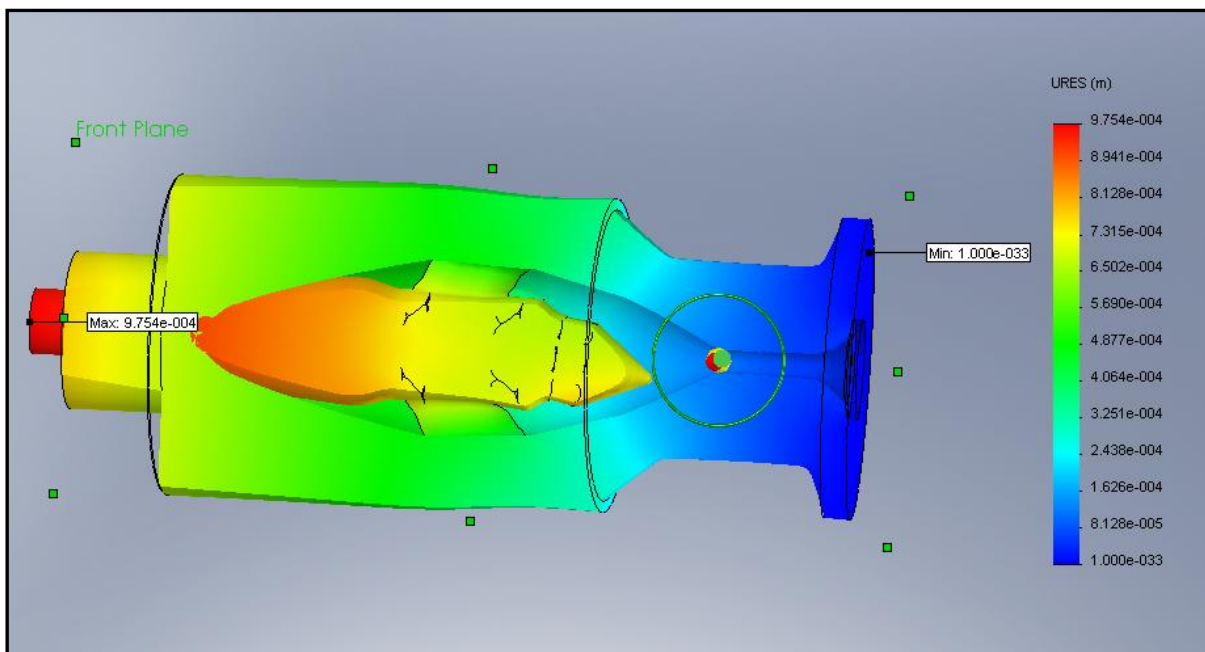
(γ)



(δ)

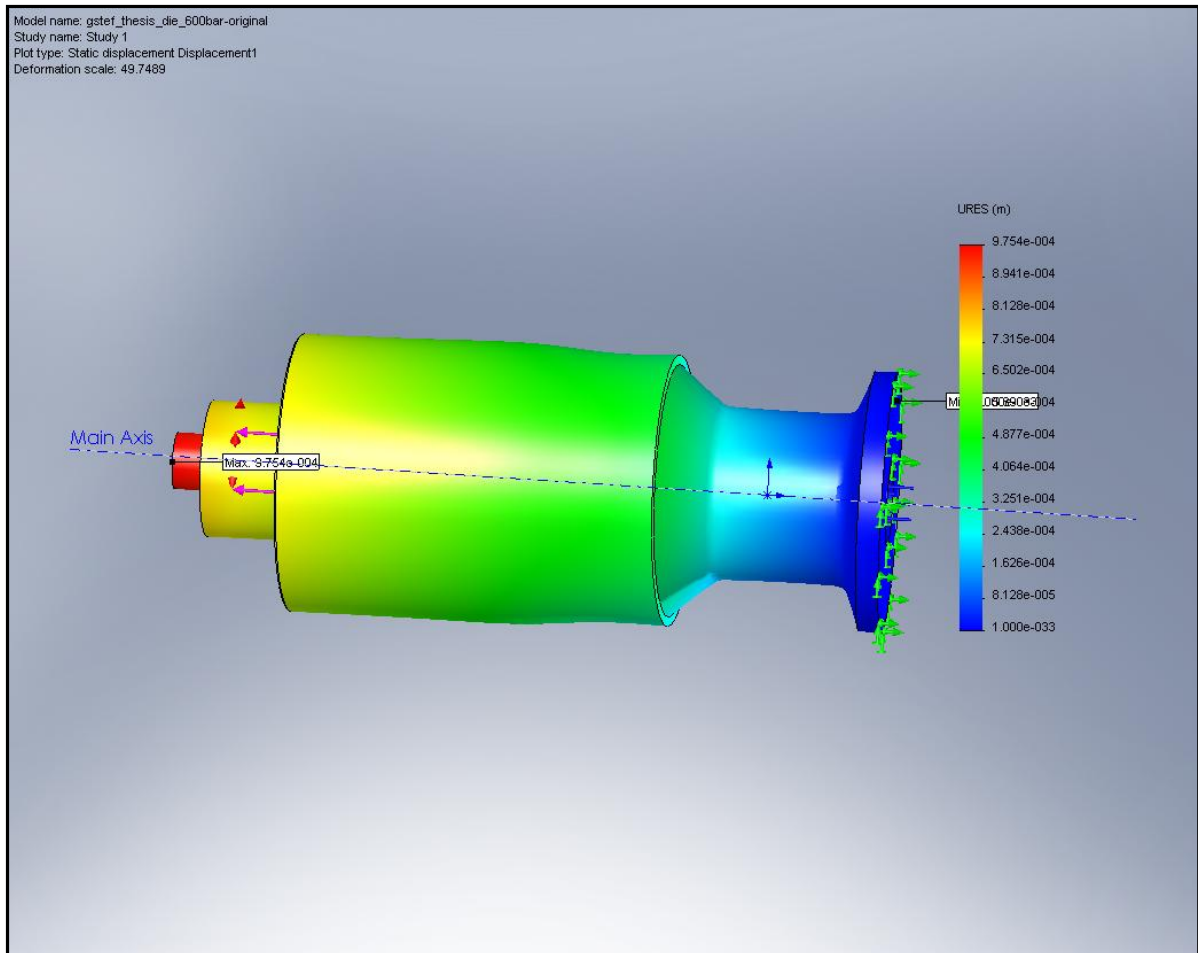
Σχήμα 5.24(α)-(δ): Ισοδύναμη τάση Von Mises στα 600 bar

**ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ**

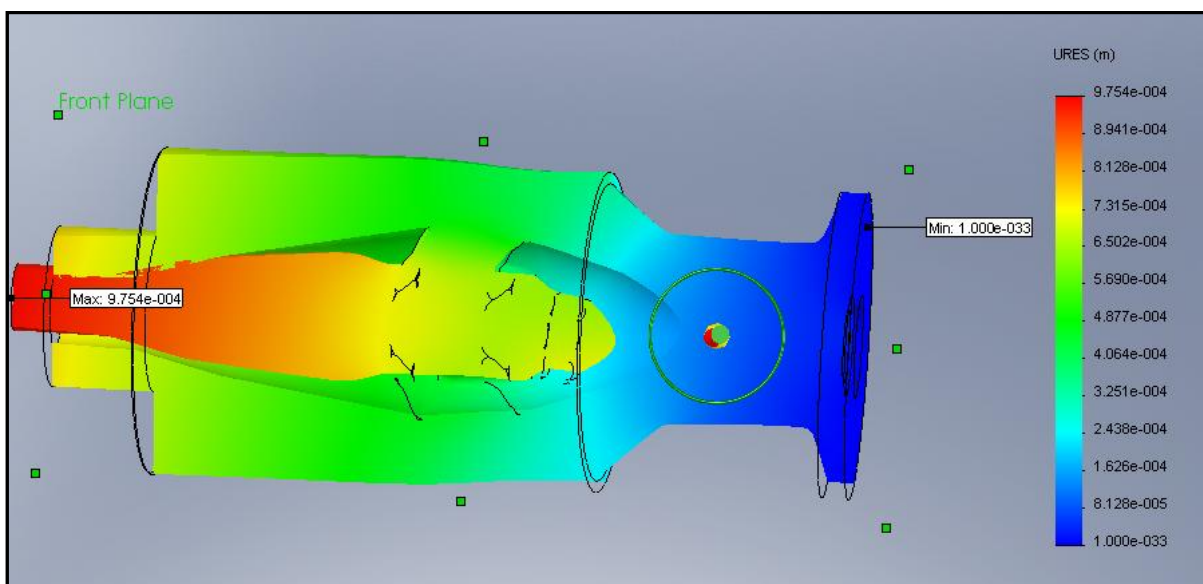


(α)



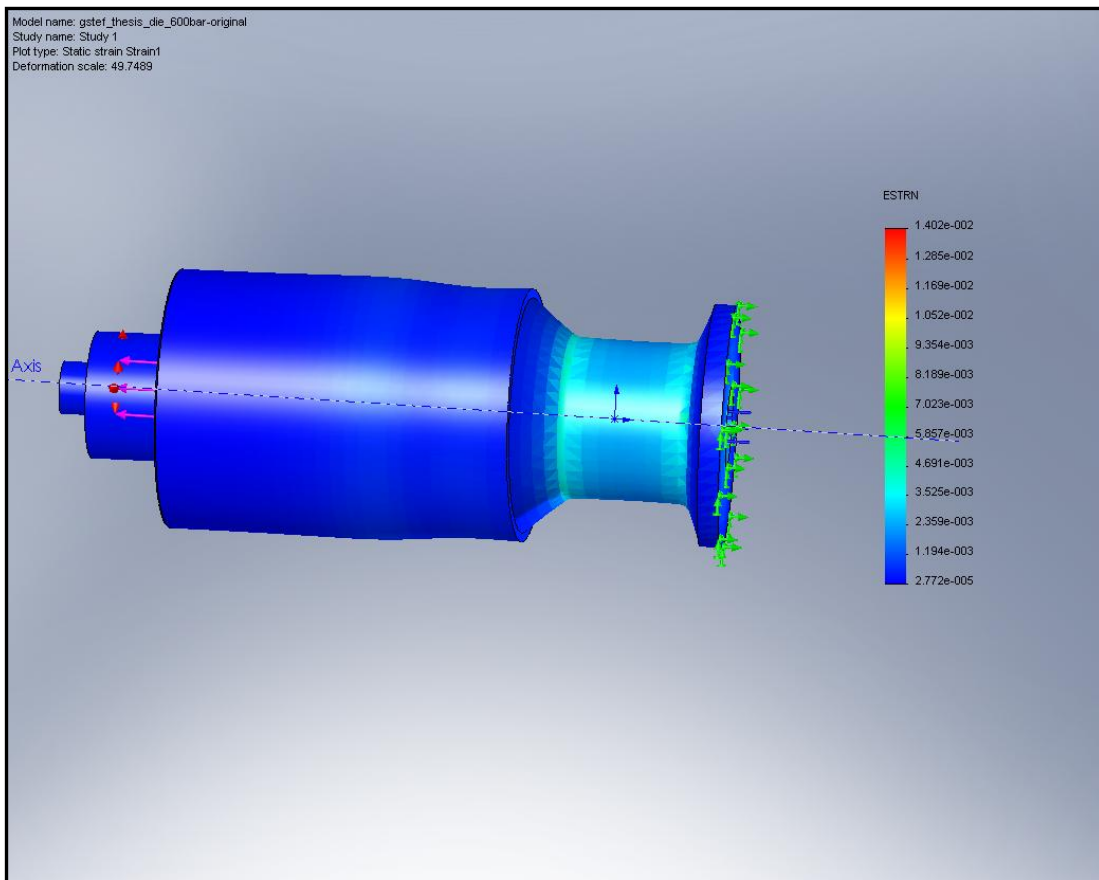


(β)



(γ)

Σχήμα 5.25(α)-(γ): Μετατόπιση στα 600 bar

**ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ**

**Σχήμα 5.26:** Καταπόνηση στα 600 bar

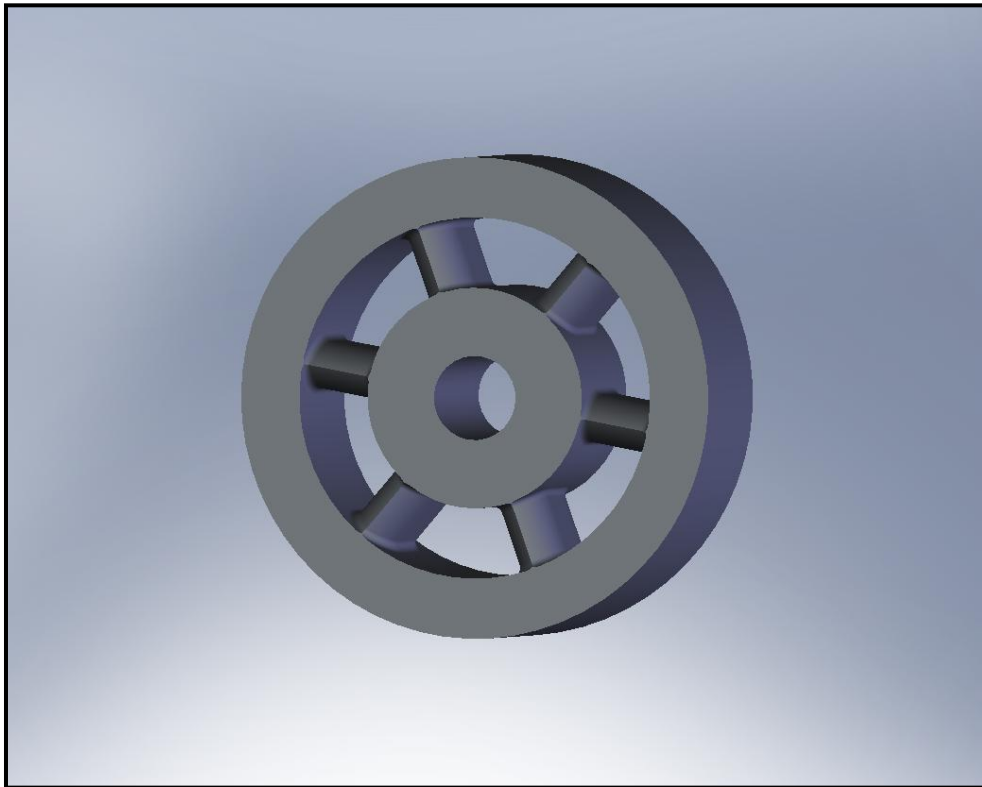
Παρατηρούμε ότι για τη μέγιστη ισοδύναμη τάση ισχύει:

$$\sigma_{ισοδ60000000} = 4,44 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2} > 8 \cdot 10^8 \frac{N}{m^2} = \sigma_{διαρροής}$$

που σημαίνει ότι η μήτρα κινδυνεύει με αστοχία και η επικίνδυνη διατομή είναι το πόδι της αράχνης. Στην ακραία αυτή περίπτωση ισχύει κάτι που επιβεβαιώνεται και από τον έλεγχο στην αράχνη και το πόδι παρακάτω. Επειδή όμως εκ των προτέρων γνωρίζουμε εμπειρικά και διαισθητικά ότι οι πλέον επικίνδυνη διατομή στην κεφαλή είναι η αράχνη και το πόδι της θα επεκτείνουμε τον έλεγχο της αντοχής και στις περιοχές αυτές για πίεση ίση με 600 bar αλλά και για πίεση ίση με την ποσοστιαία μεταβολή της πίεσης που σημειώνεται στις περιοχές αυτές στο μοντέλο του Comsol. Τα βήματα της διαδικασίας είναι όμοια με όσα προηγήθηκαν.

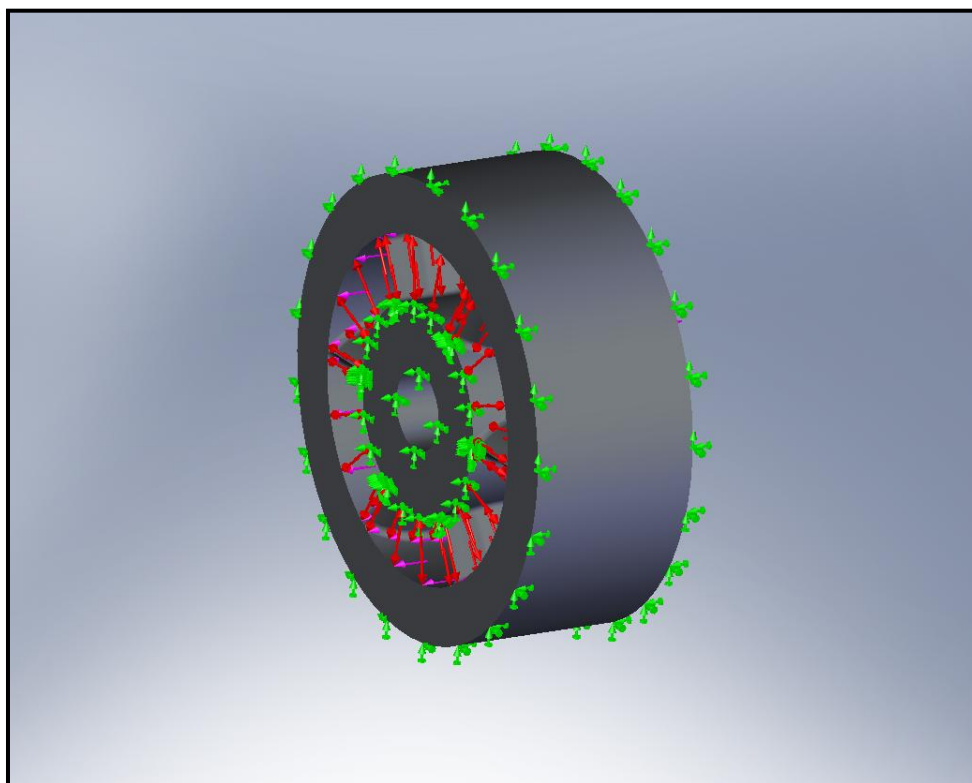
**ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΙΙΙ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ ΓΙΑ ΠΙΕΣΗ 600 bar**

- i. Δημιουργία γεωμετρίας

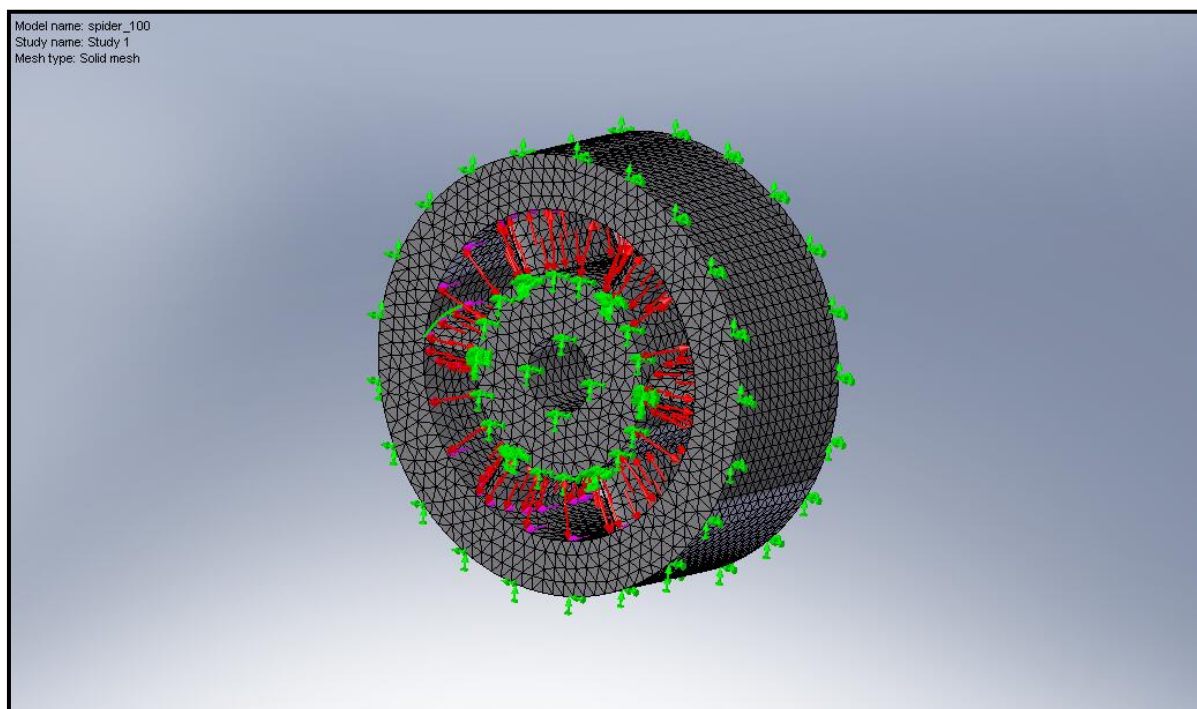


**Σχήμα 5.27:**Γεωμετρία αράχνης

- ii. Δήλωση στατικού προβλήματος  
 iii. Επιβολή φορτίσεων και δέσμευση των βαθμών ελευθερίας: Για την περιοχή της αράχνης η διατμητική δύναμη που ασκείται είναι ίση με  $F_{Z600000000III} = 119516,2N$ .  
 iv. Επιλογή υλικού ως ανωτέρω.  
 v. Διακριτοποίηση της γεωμετρίας.  
 vi. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

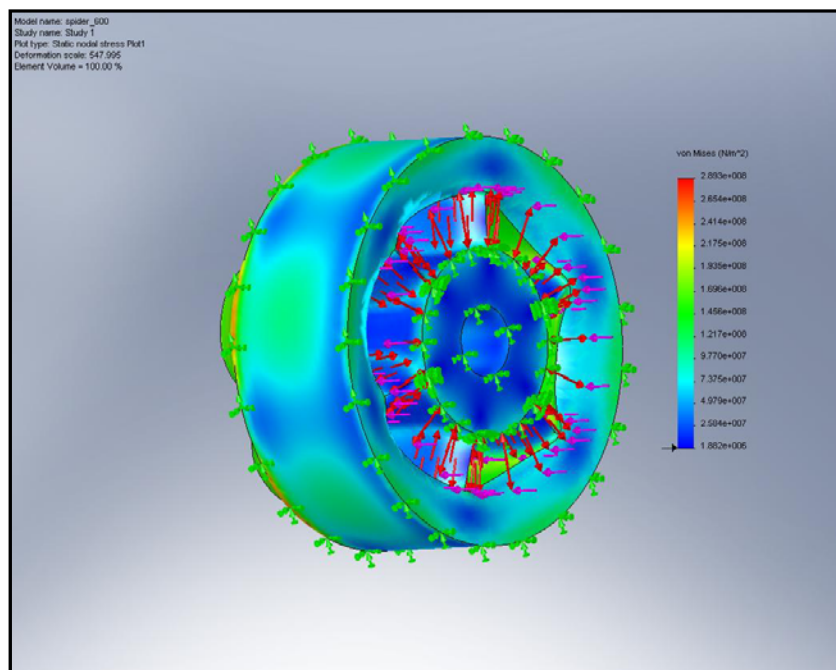
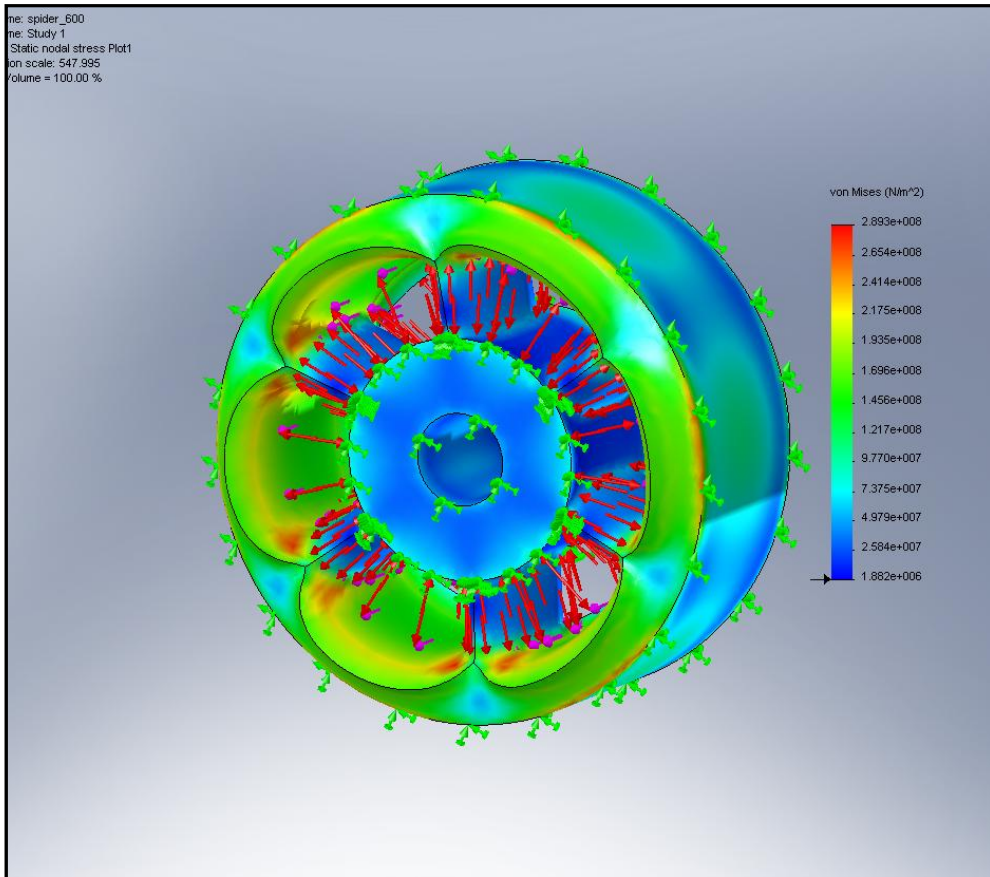


**Σχήμα 5.28:** Δέσμευση βαθμών ελευθερίας και επιβολή φορτίσεων στην αράχνη



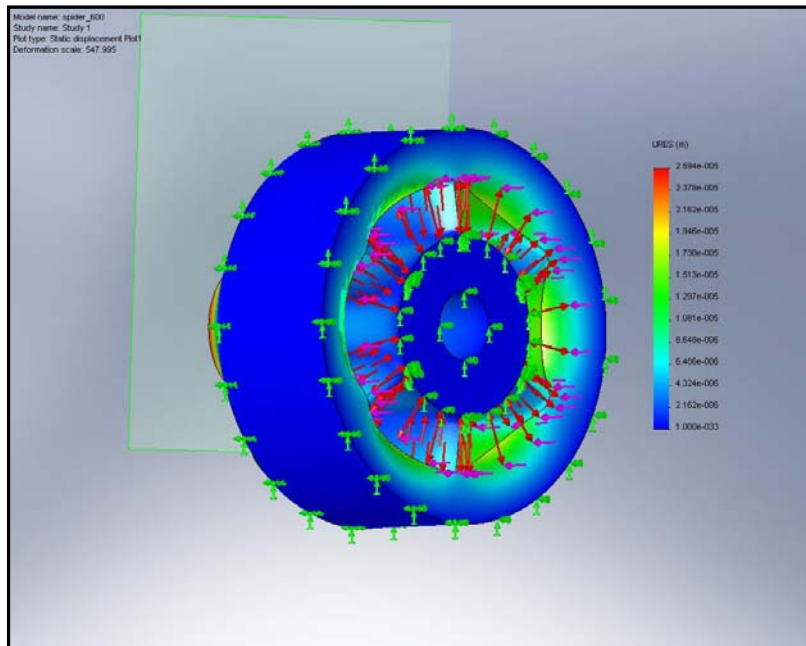
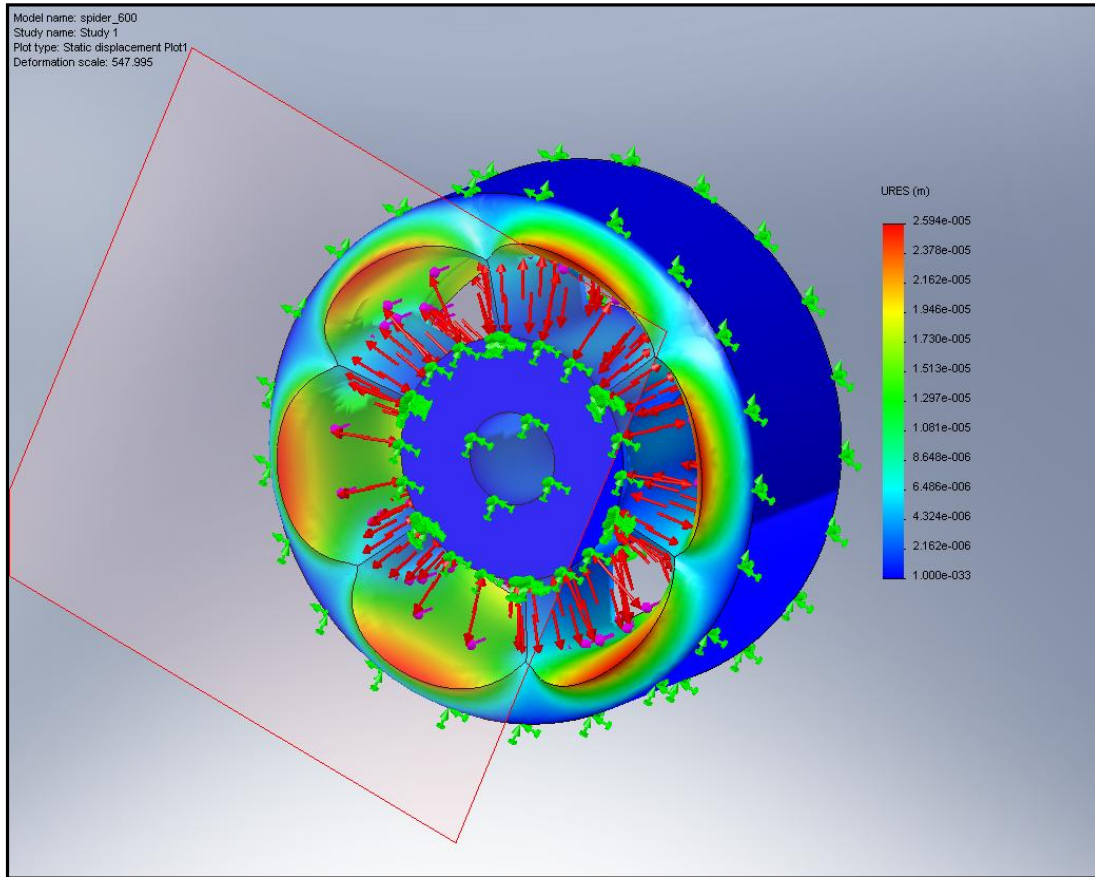
**Σχήμα 5.29:** Δημιουργία πλέγματος αράχνης ποιότητας fine αποτελούμενο από 93999 κόμβους, 63213 στοιχεία και 259923 βαθμούς ελευθερίας

**ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ VON MISES**



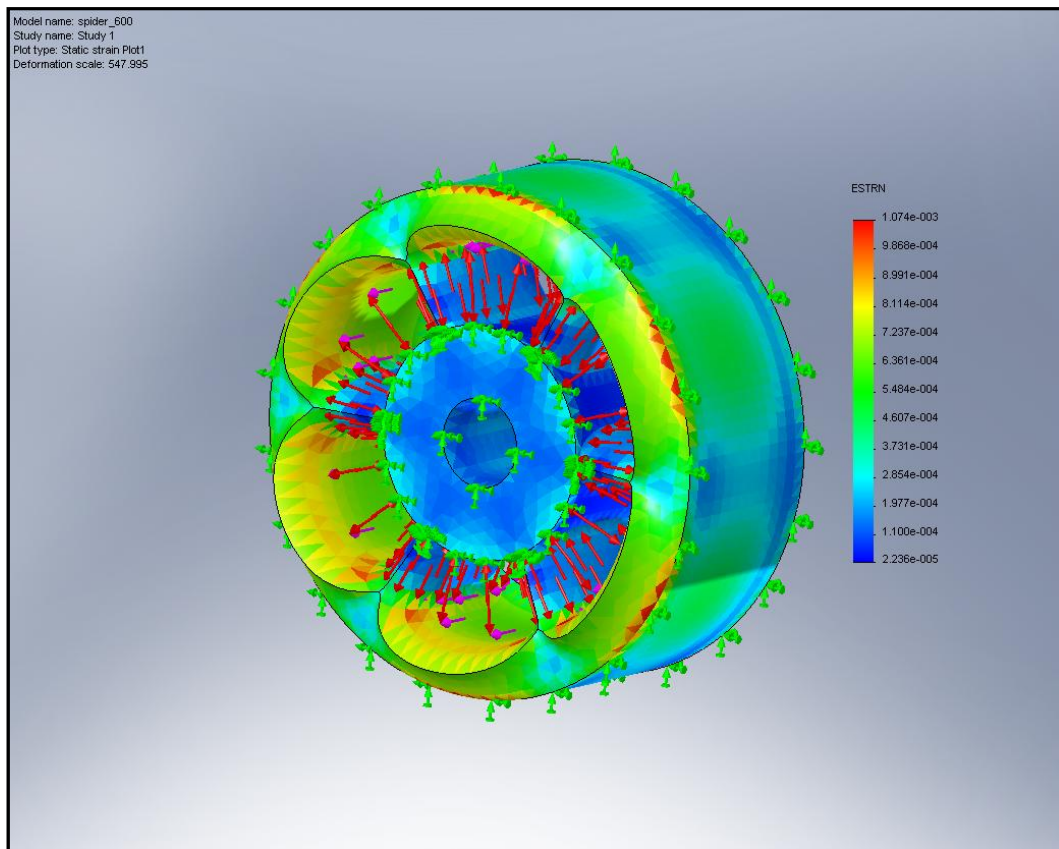
**Σχήμα 5.30:** Ισοδύναμη τάση Von Mises στην αράχνη στα 600 bar

**ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ**



Σχήμα 5.31: Μετατόπιση στην αράχη στα 600 bar

**ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ**



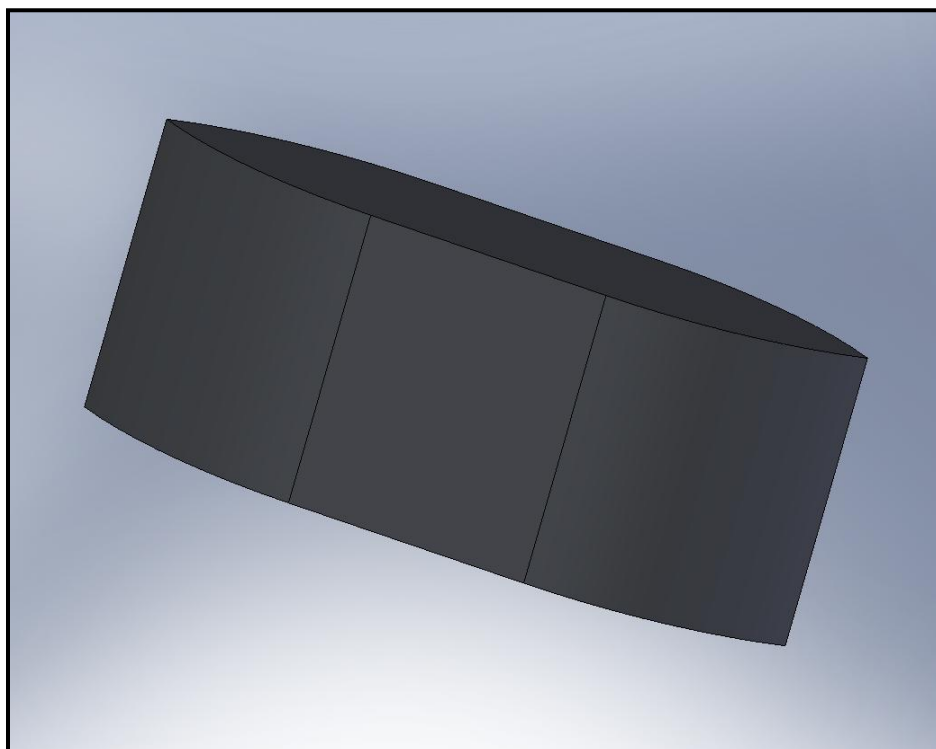
Σχήμα 5.32: Καταπόνηση στην αράχνη 600 bar

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΟ ΠΟΔΙ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ ΓΙΑ 600 bar**

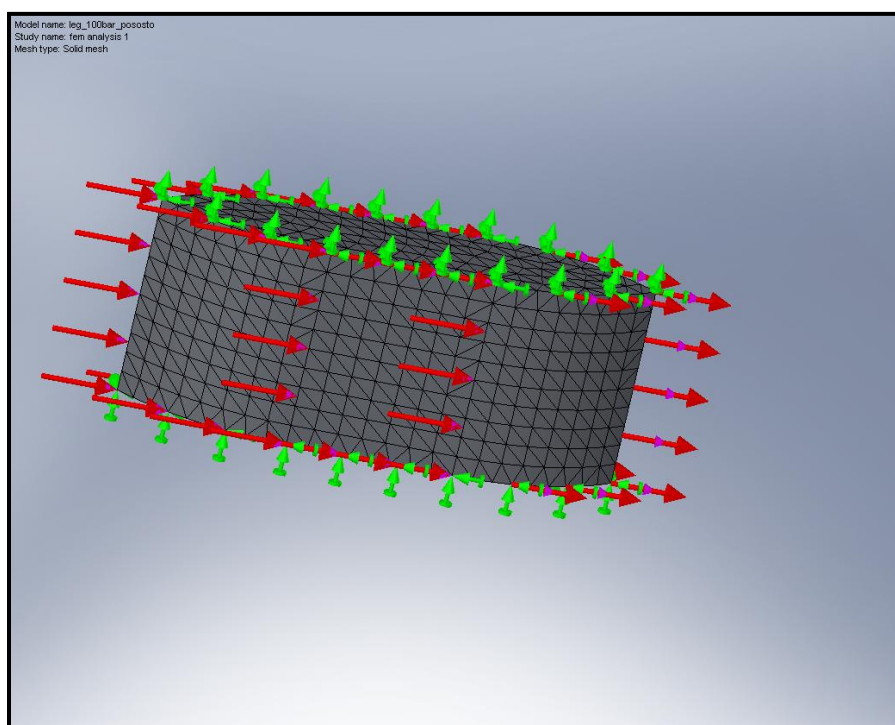
Η διατμητική δύναμη στο πόδι της αράχνης είναι ίση με

$$F_{Zleg} = \frac{F_{Z600000000m}}{n_{legs}} = \frac{119516,2}{6} = 19919,366 N.$$

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα:

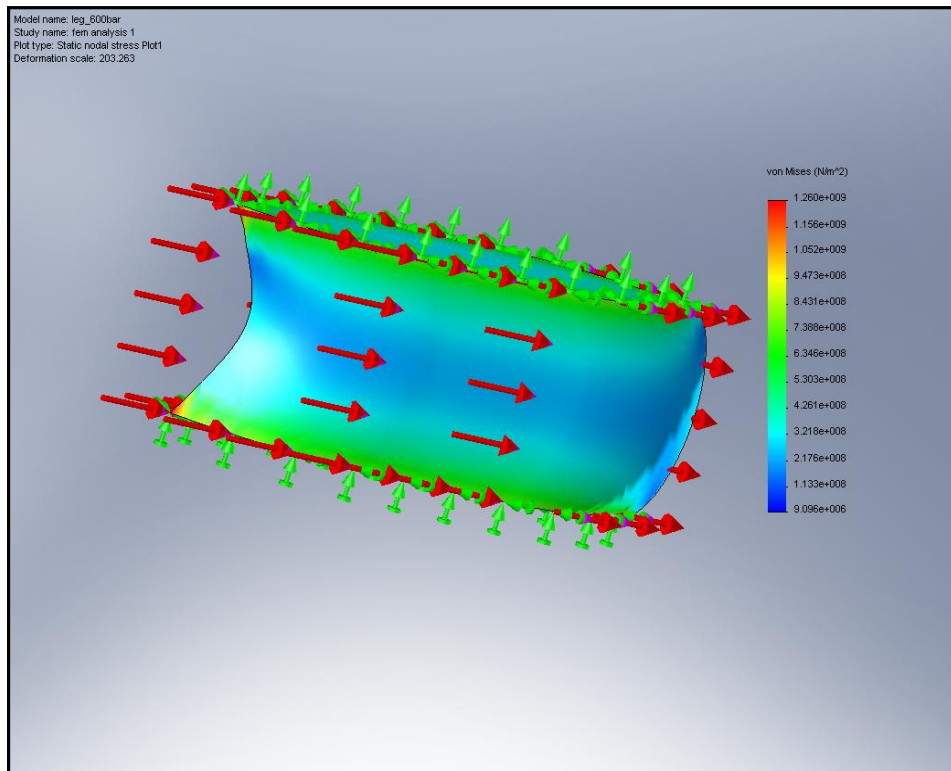


Σχήμα 5.33: Γεωμετρία ποδιού

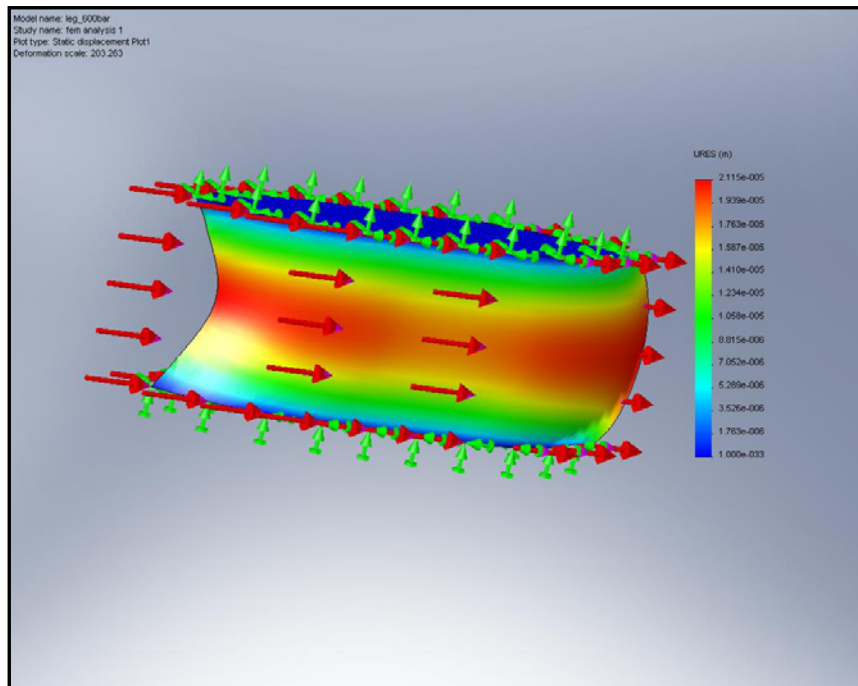


Σχήμα 5.34: Επιβολή φορτίσεων ,δέσμευση των βαθμών ελευθερίας και δημιουργία πλέγματος (fine) με 6937 στοιχεία, 10680 κόμβους και 28967 βαθμούς ελευθερίας

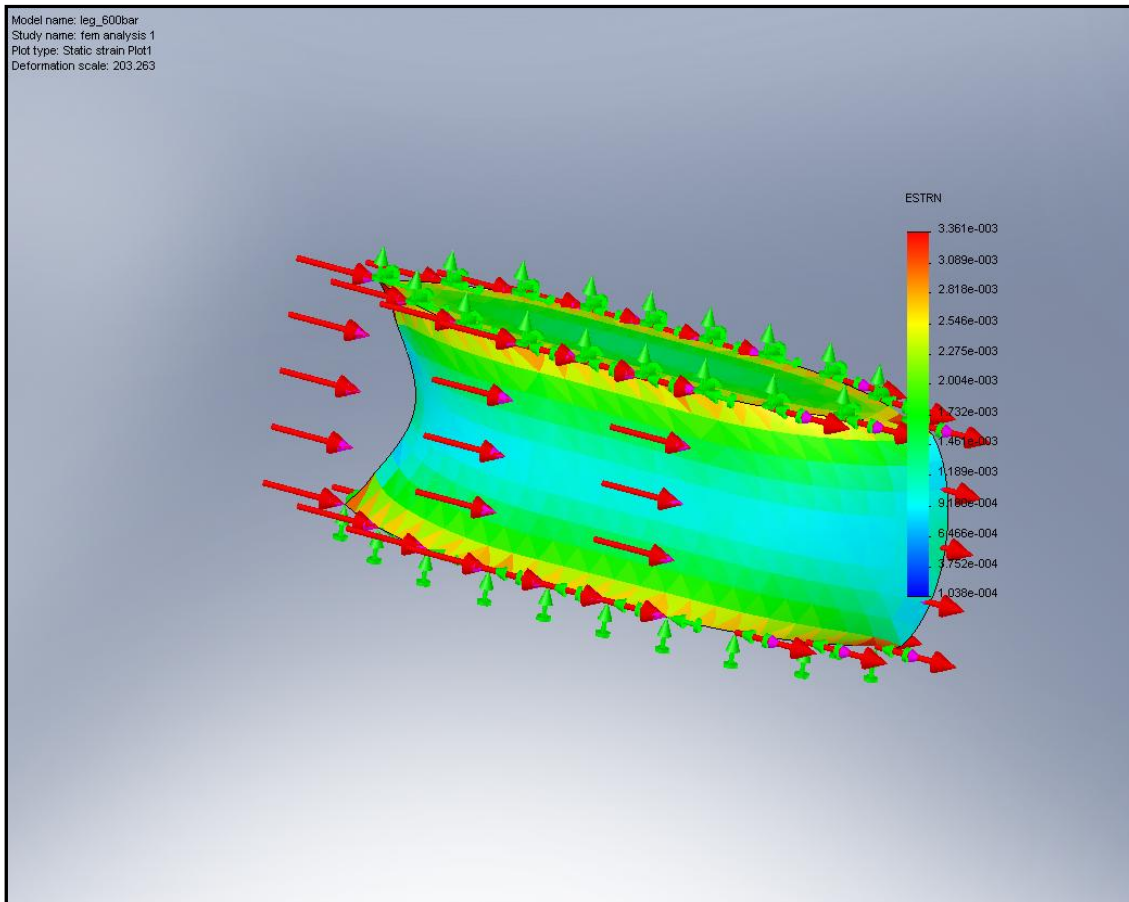




Σχήμα 5.34: Ισοδύναμη τάση στο πόδι στα 600 bar



Σχήμα 5.35: Μετατόπιση στο πόδι στα 600 bar



Σχήμα 5.36: Καταπόνηση στο πόδι στα 600 bar

Παρατηρώντας τα γραφήματα για την ισοδύναμη τάση Von Mises και εφόσον το κριτήριο Von Mises είναι το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιούμε εντοπίζουμε καταρχάς στο γράφημα της μήτρας ότι η ισοδύναμη τάση στο πόδι της αράχνης ξεπερνά το όριο διαρροής του χάλυβα 1.2738:

$$\sigma_{ισοδ600000000} = 1,26 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2 > 8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2 = \sigma_{διαρροής}$$

Επομένως το πόδι της αράχνης παρουσιάζει αστοχία στην ακραία περίπτωση λειτουργίας του εκβολέα στα 600 bar. Ωστόσο στη συνέχεια θα αντιπαραβάλουμε τα αποτελέσματα του αναλυτικού και του αριθμητικού μοντέλου για την αντοχή στο πόδι της αράχνης χρησιμοποιώντας κάποιες παραδοχές ως προς τη γεωμετρία.

**Αναλυτικός υπολογισμός αντοχής στο πόδι της αράχνης:**

Η δύναμη που ασκείται στο πόδι είναι ίση με  $F_{Zleg} = \frac{F_{Z60000000III}}{n_{legs}} = \frac{119516,2}{6} = 19919,366 N$  ενώ από το Comsol η πτώση πίεσης στο πόδι βρέθηκε ίση με. Θεωρούμε ότι ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο λόγω της πίεσης ίσο με  $q = \Delta P \cdot b$  (5.9). Το πόδι καταπονείται σε κάμψη και διάτμηση δηλαδή σε σύνθετη καταπόνηση.

Η ορθή τάση λόγω κάμψης είναι ίση με  $\sigma_b = \frac{\Sigma M_b}{W_x}$  (5.10) όπου  $W_x = \frac{bh^2}{6}$  (5.11) αν

θεωρήσουμε ότι η καλύτερη γεωμετρία που προσεγγίζει το πόδι είναι η ορθογωνική. Από το σχήμα φαίνεται ότι  $b = 0,012m$ ,  $h = 0,045m$   $l = 0.0175m$ . Η ροπή κάμψης

λόγω της διατμητικής δύναμης ισούται με  $M_{bF} = -\frac{F_{zleg} \cdot l}{2}$  (5.12) ενώ λόγω της

πίεσης είναι ίση με  $M_{b\Delta P} = -\frac{q \cdot l^3}{3} = -\frac{\Delta P \cdot b \cdot l^3}{3}$  (5.13). Για την διάτμηση η διατμητική

τάση ισούται με  $\tau = \frac{\Sigma F}{A} = \frac{F_{zleg} + \Delta P \cdot b \cdot l}{A}$  (5.14), όπου  $A = b \cdot h$  (5.15).

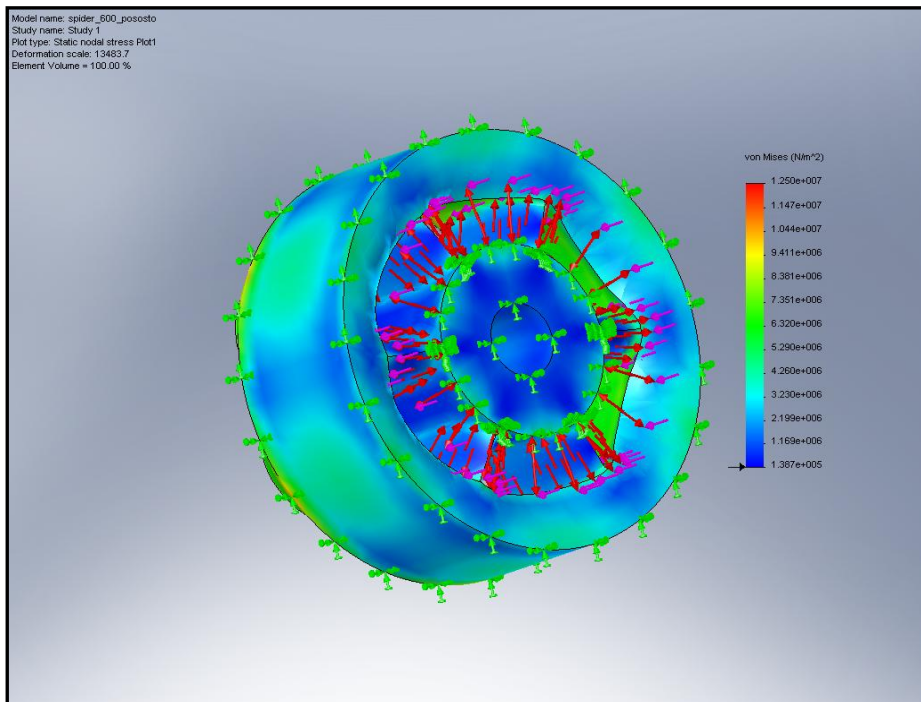
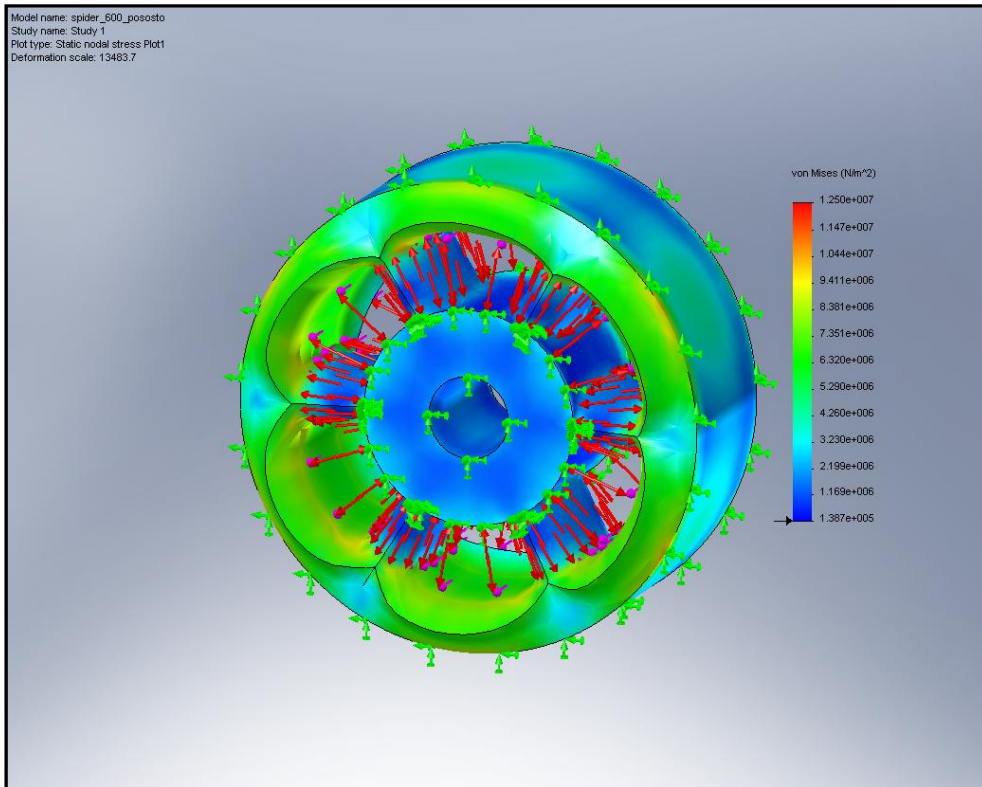
Αντικαθιστώντας προκύπτουν οι τιμές των τάσεων ίσες με  $\sigma_{b60000000} = -43358024,6 N/m^2$  και  $\tau_{60000000} = 60221048,15 N/m^2$ . Η ισοδύναμη τάση

σύμφωνα με το κριτήριο Von Mises είναι ίση με

$\sigma_{ισοδ60000000} = \sqrt{\sigma_{b60000000}^2 + 3 \cdot \tau_{60000000}^2} = 112958586,3 N/m^2 < 8 \cdot 10^8$ . Η διαφορά που

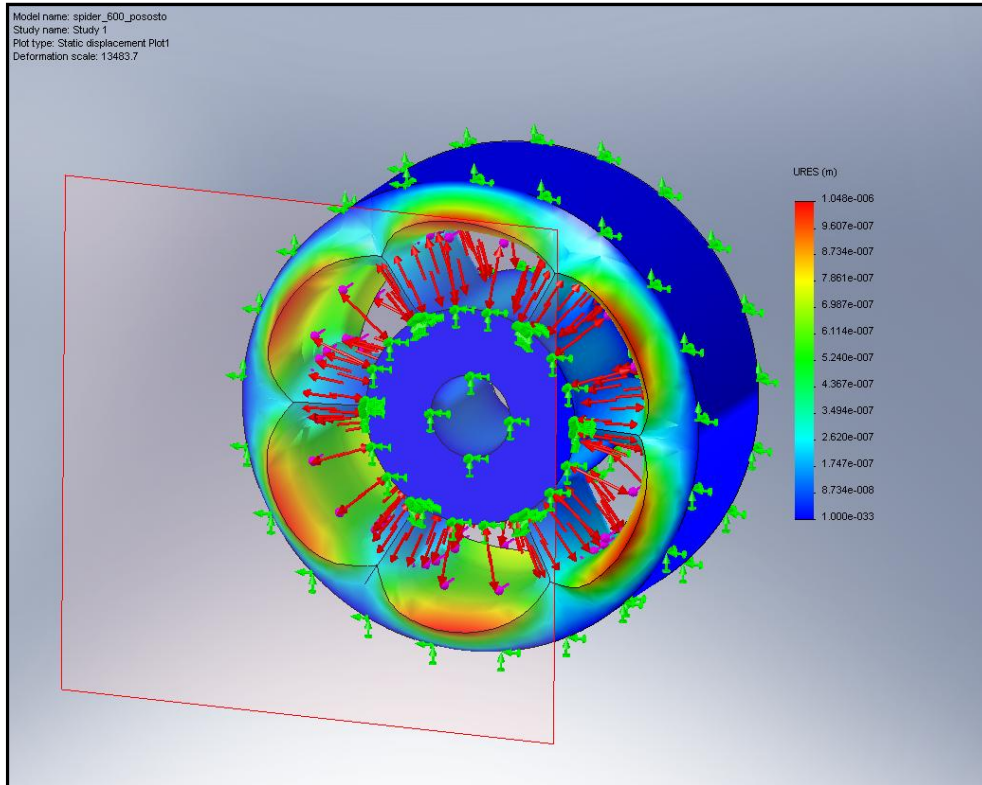
προκύπτει οφείλεται ασφαλώς στις παραδοχές της γεωμετρίας που κάναμε προκειμένου να επιλύσουμε το αναλυτικό μοντέλο. Όμως εμείς θα επεκτείνουμε τον έλεγχο στην **αράχνη** και στο **πόδι της αράχνης** στην ποσοστιαία μεταβολή της πίεσης στα **2503670 Pa** και **1911810 Pa** αντίστοιχα που προκύπτουν από το αριθμητικό ρευστοδυναμικό μοντέλο. Οι δυνάμεις διάτμησης είναι **4987,154 N** και **634,7 N** αντίστοιχα. Για την ποσοστιαία πτώση της πίεσης τα αποτελέσματα των αριθμητικών και των αναλυτικών μοντέλων παρουσιάζονται παρακάτω:

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΗΝ ΑΡΑΧΝΗ ΣΤΑ 2503670 Pa**

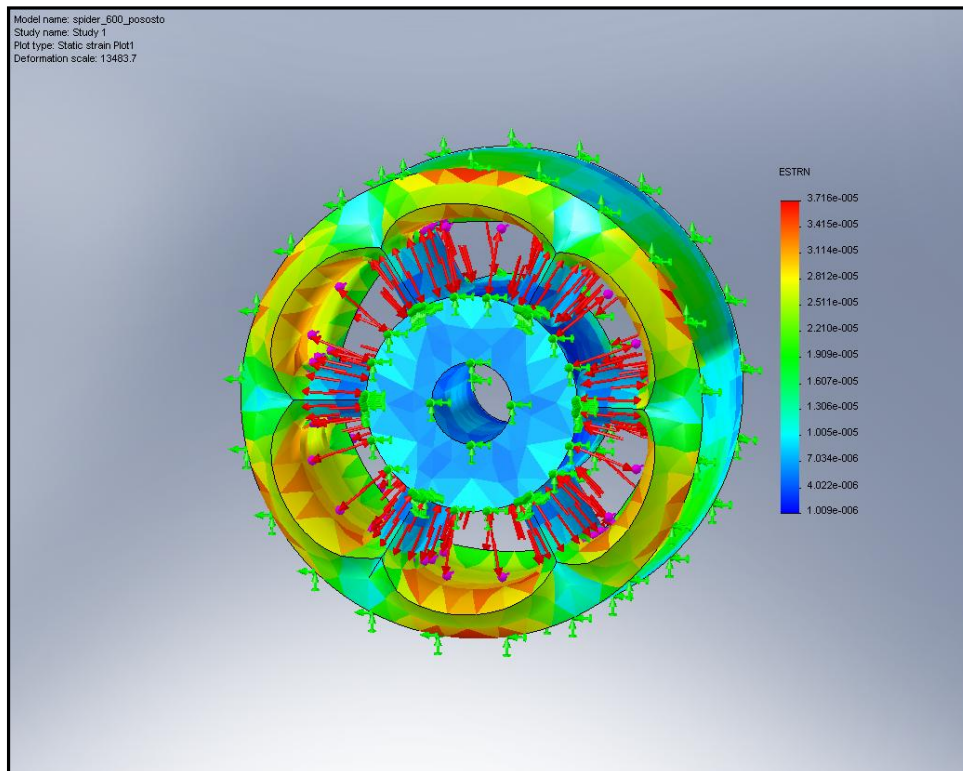


**Σχήμα 5.37:** Ισοδύναμη τάση στην αράχνη στα 2503670 Pa

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

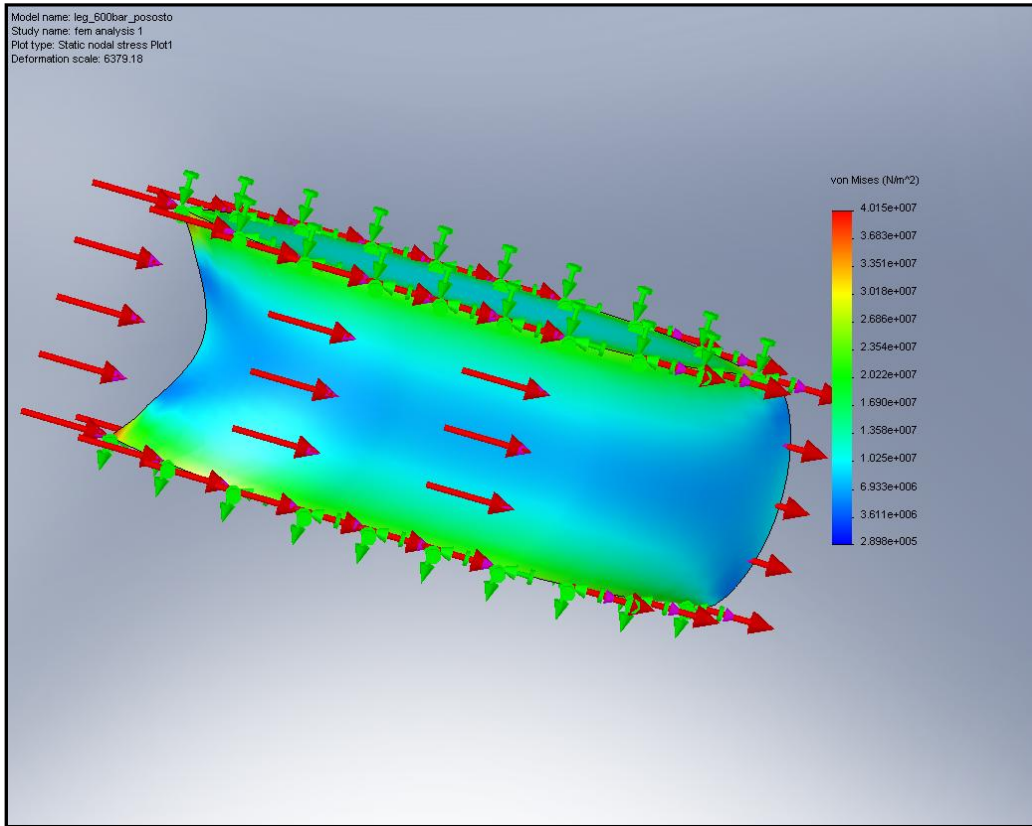


Σχήμα 5.38: Μετατόπιση στην αράχνη στα 2503670 Pa

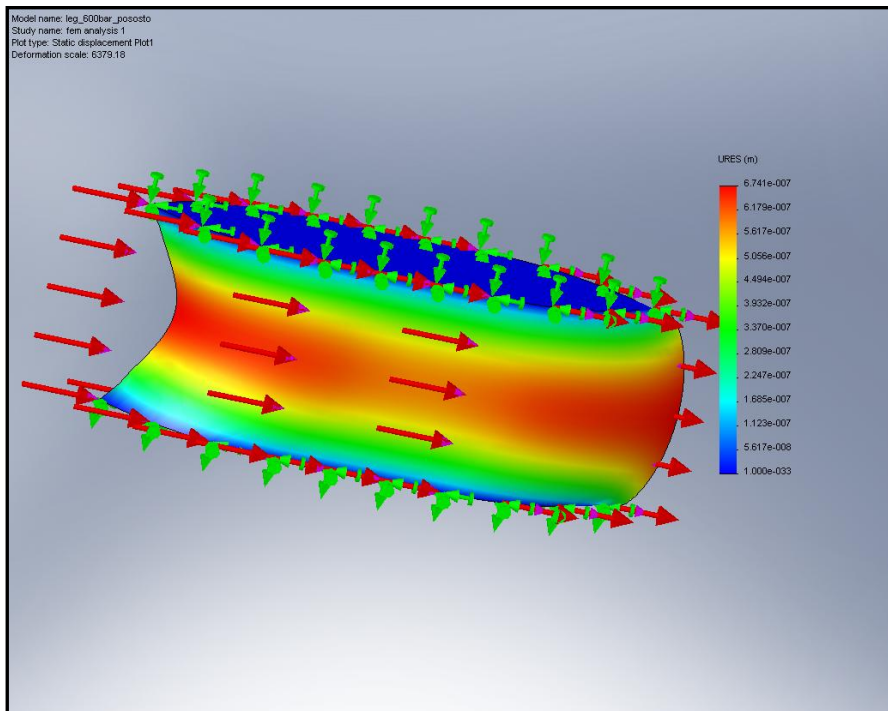


Σχήμα 5.39: Καταπόνηση στην αράχνη στα 2503670 Pa

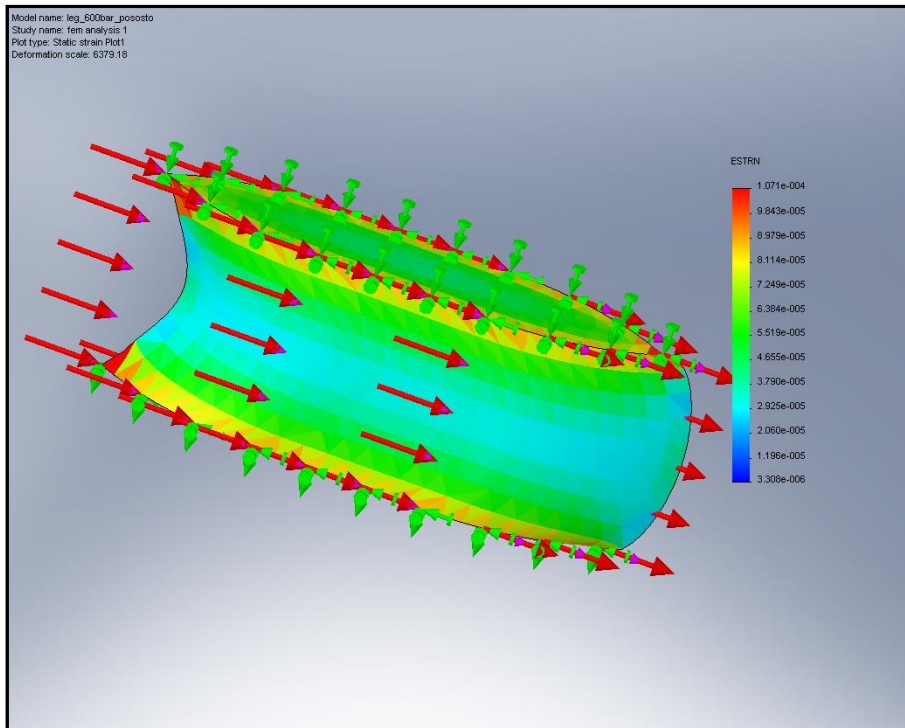
**ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΟ ΠΟΔΙ ΓΙΑ 1911810 Pa**



Σχήμα 5.40: Ισοδύναμη τάση στο πόδι στα 1911810 Pa



Σχήμα 5.41: Μετατόπιση στο πόδι στα 1911810 Pa

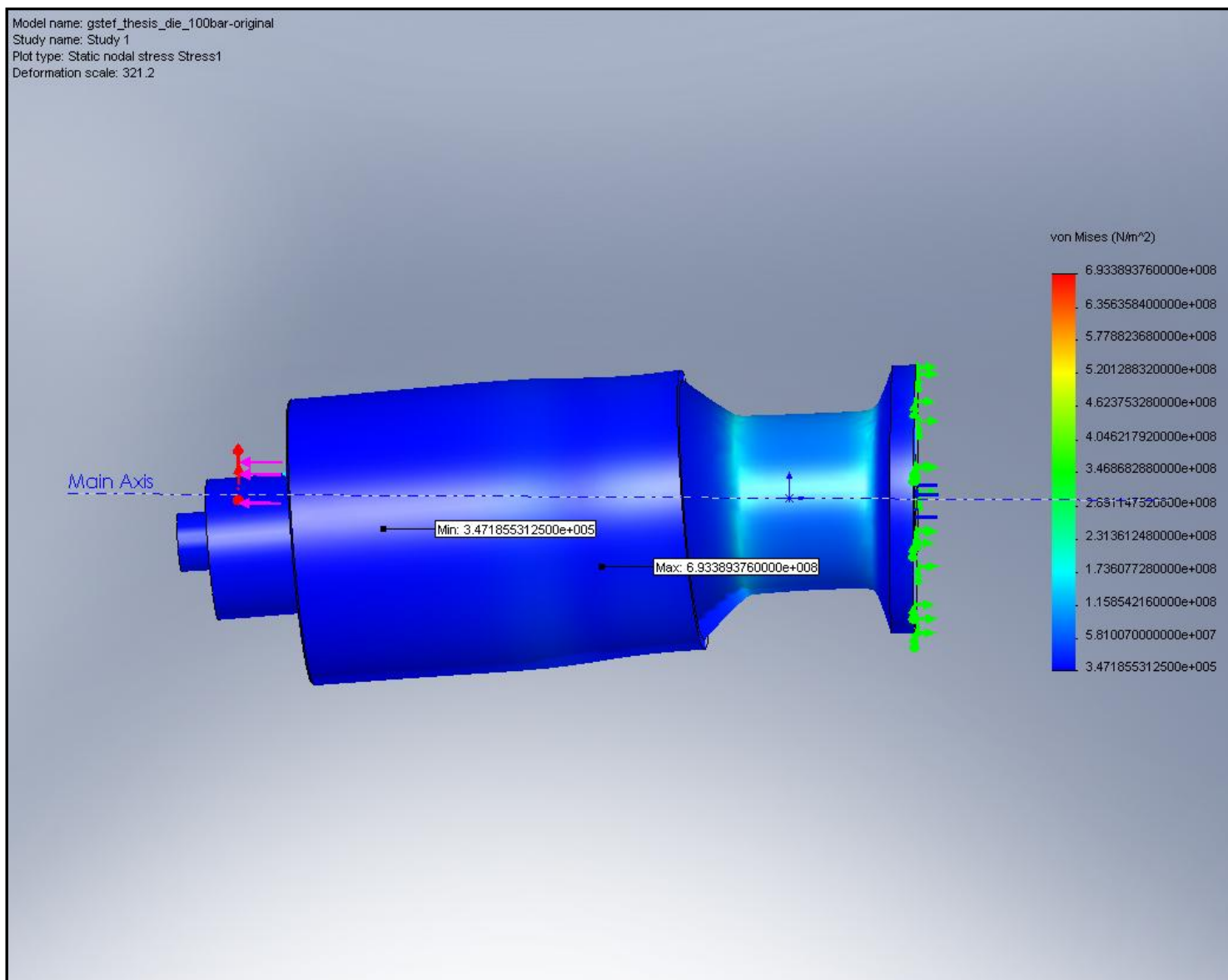


Σχήμα 5.42: Καταπόνηση στο πόδι στα 1911810 Pa

Η ισοδύναμη τάση που προκύπτει ισούται με  $\sigma_{\text{ισοδ}60000000\text{ποσοστο}} = \sqrt{\sigma_{b_{\text{ποσοστο}}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{ποσοστο}}^2} = 3594041,35 \text{ N/m}^2 < 8 \cdot 10^8$ . Από το αριθμητικό μοντέλο η ισοδύναμη τάση προέκυψε  $40150000 \text{ N/m}^2$ . Η διαφορά οφείλεται όπως προαναφέραμε σε παραδοχές στη γεωμετρία.

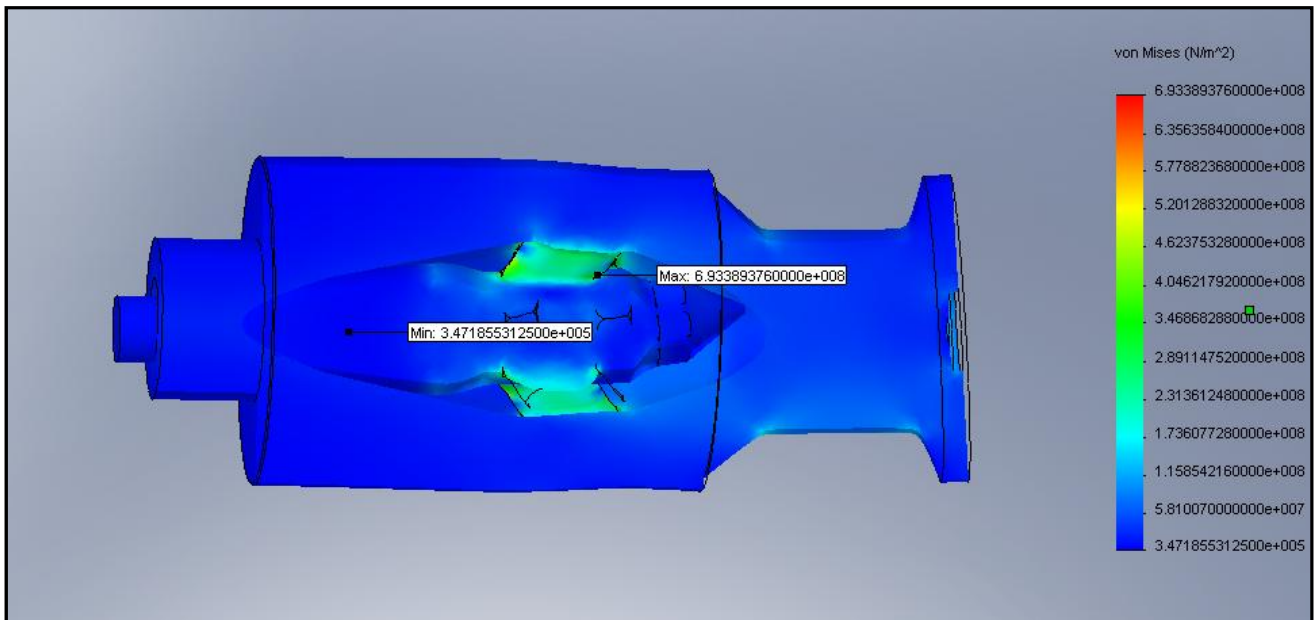
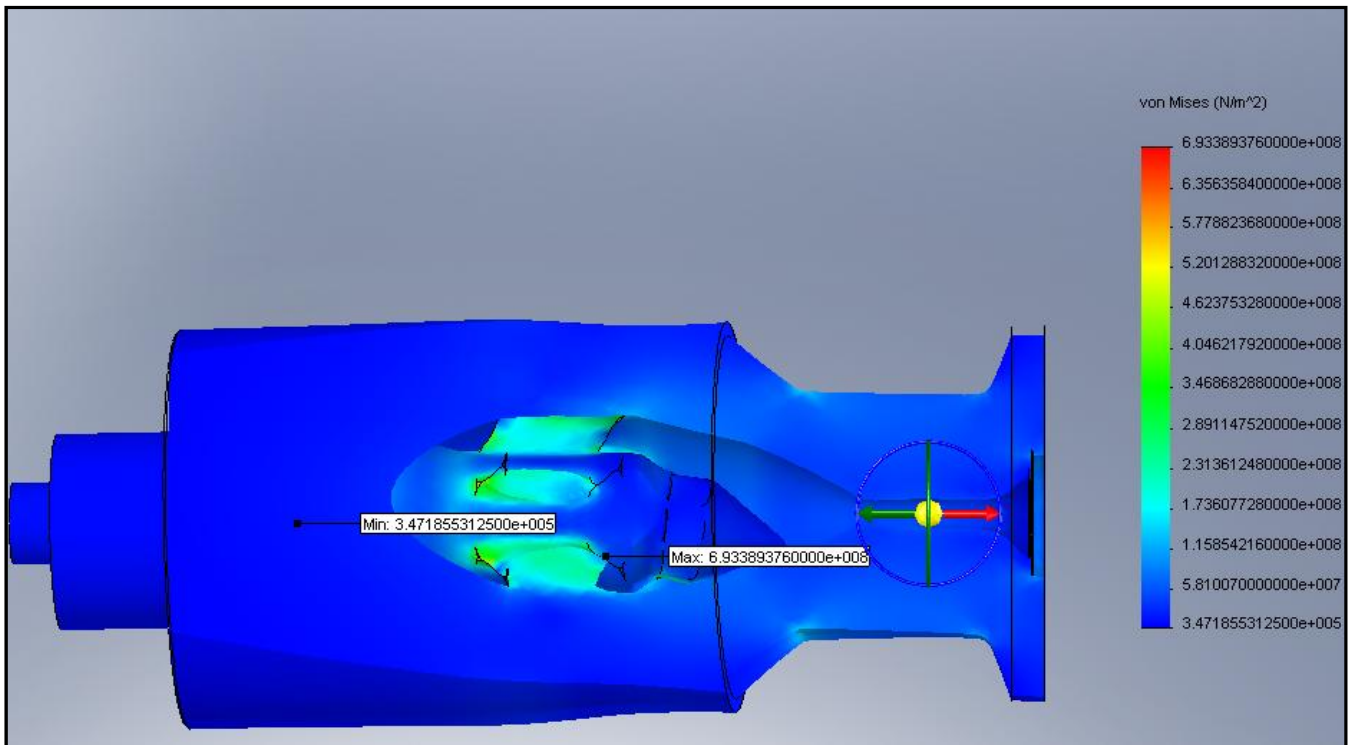
Σε αυτή την περίπτωση του ελέγχου αντοχής της μήτρας διαπιστώσαμε ότι η η αράχνη και το πόδι αυτής δεν παρουσιάζουν ενδεχόμενο αστοχίας. Στο τελευταίο κομμάτι του πειραματικού μέρους της εργασίας θα εστιάσουμε τον έλεγχο της αντοχής στην περίπτωση που η μήτρα λειτουργεί στα 100 bar και όμοια με τα προηγούμενα θα επεκτείνουμε τον έλεγχό στην αράχνη και στο πόδι της στα 100 bar και στην ποσοστιαία πτώση της πίεσης στην αράχνη και στο πόδι. Οι διατμητικές δυνάμεις που εισάγαμε ως φορτίσεις στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτές του Πίνακα 5.5.

## 2. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΙΣΗ ΜΕ 100 bar



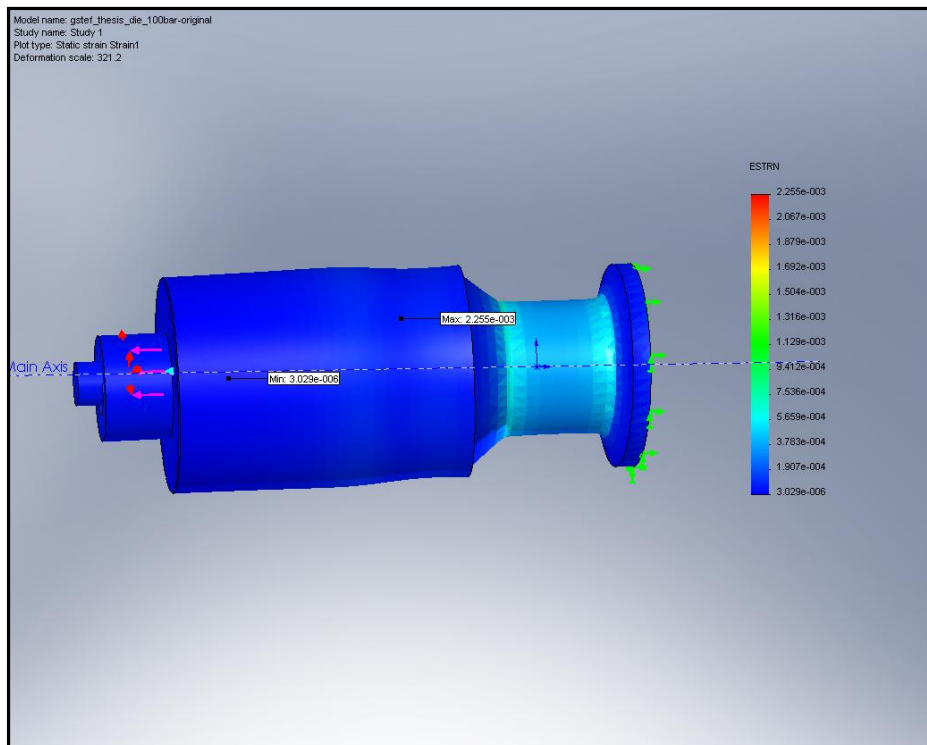
Σχήμα 5.43: Ισοδύναμη τάση Von Mises στην κεφαλή στα 100 bar



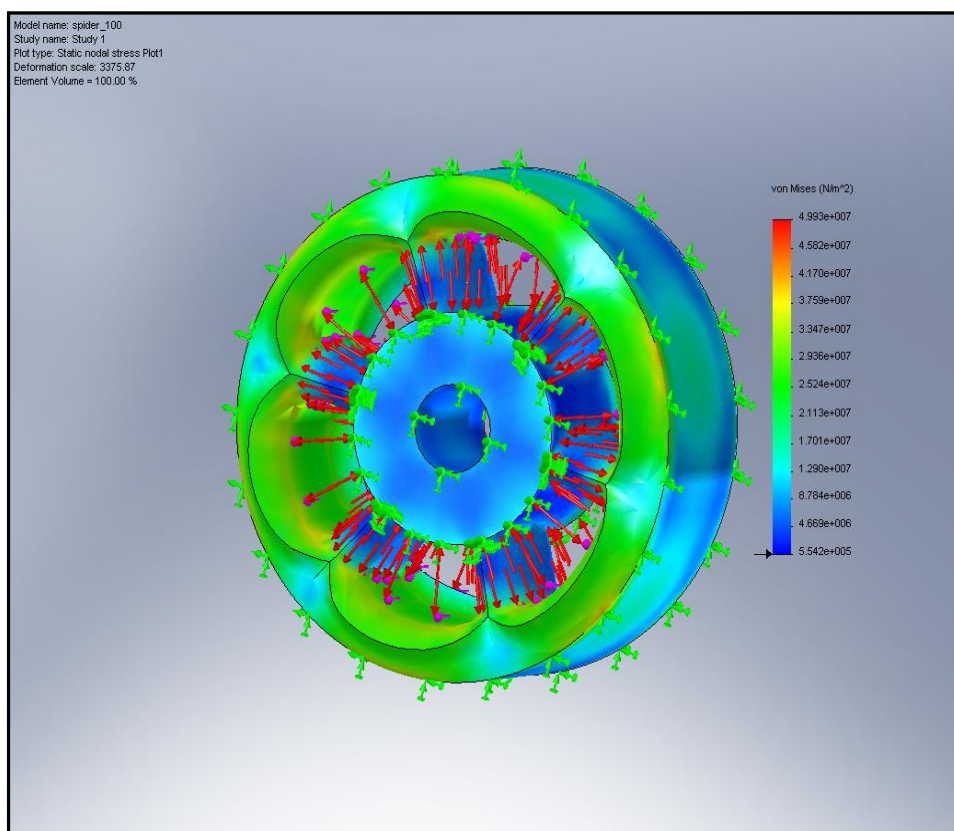


Σχήμα 5.44: Ισοδύναμη τάση Von Mises στην κεφαλή στα 100 bar

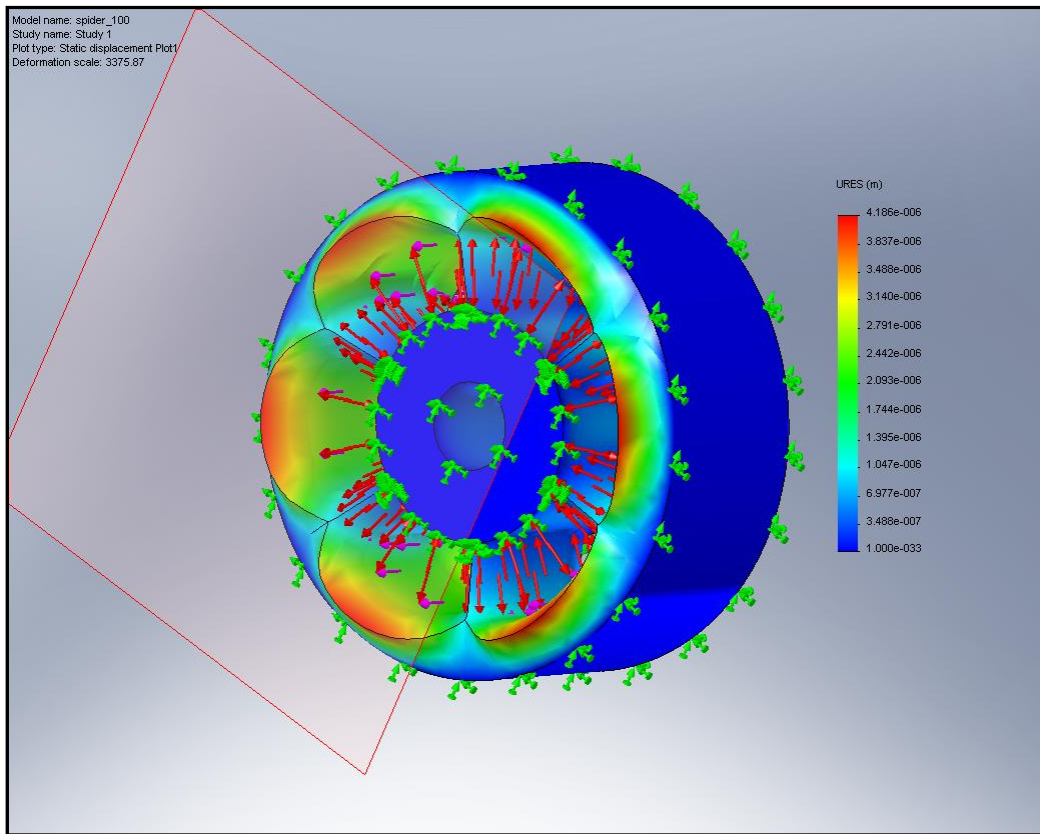
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°



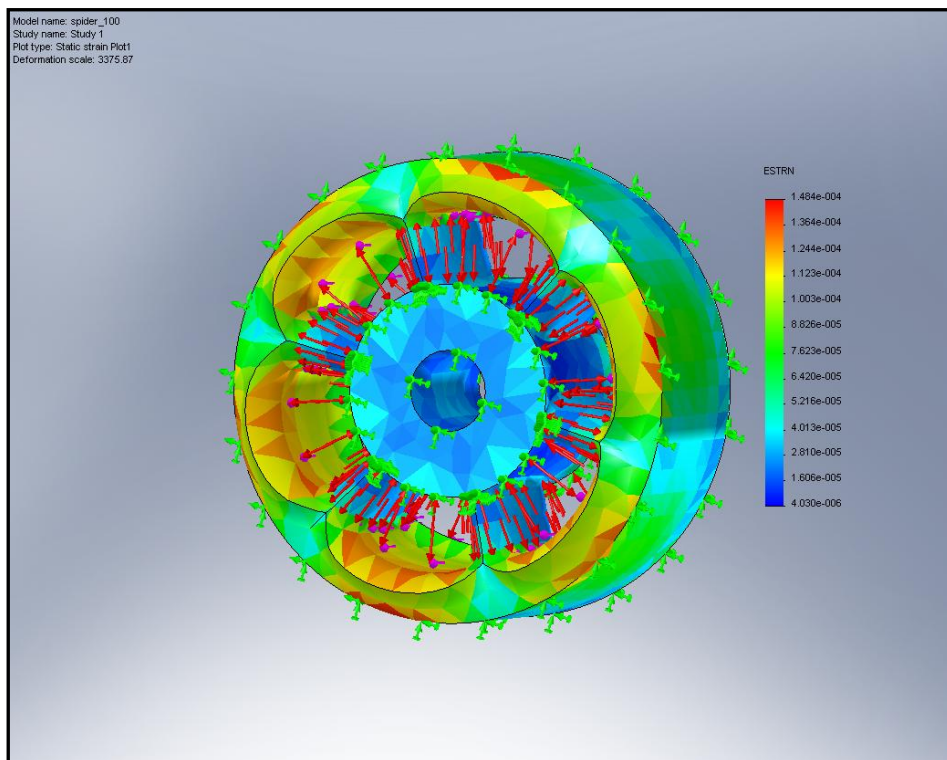
Σχήμα 5.45: Καταπόνηση κεφαλής στα 100 bar



Σχήμα 5.46: Ισοδύναμη τάση αράχνης στα 100 bar

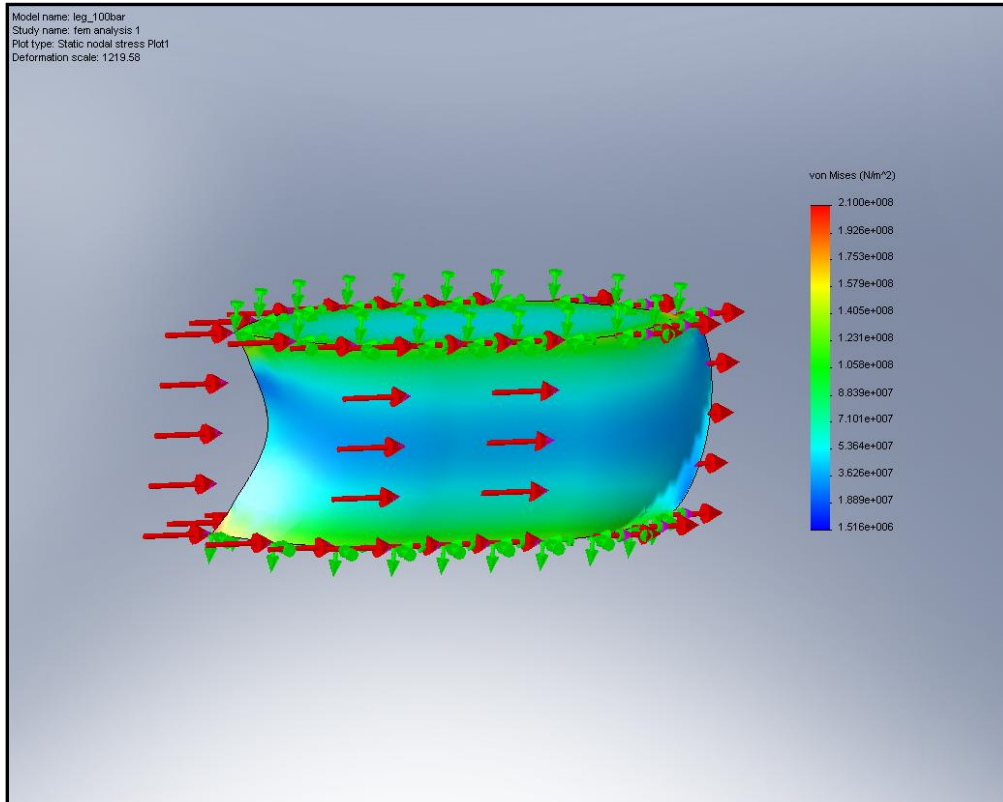


Σχήμα 5.47: Μετατόπιση αράχνης στα 100 bar

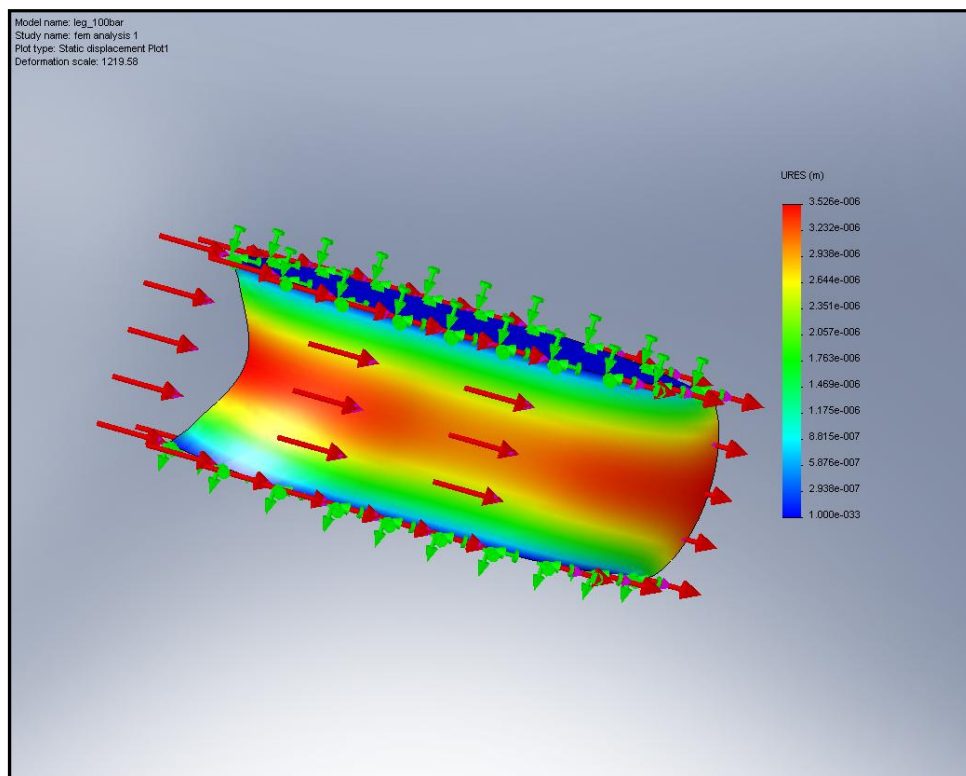


Σχήμα 5.48: Καταπόνηση αράχνης στα 100 bar

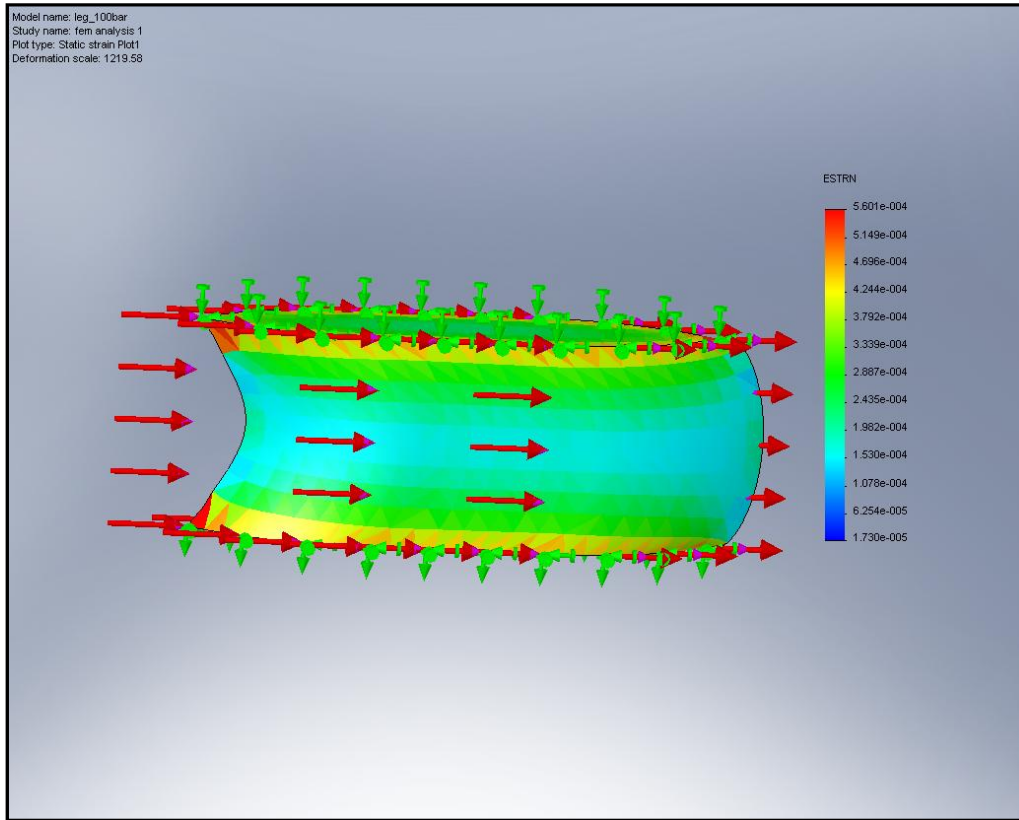
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°



Σχήμα 5.49: Ισοδύναμη τάση στο πόδι στα 100 bar



Σχήμα 5.50: Μετατόπιση ποδιού στα 100 bar

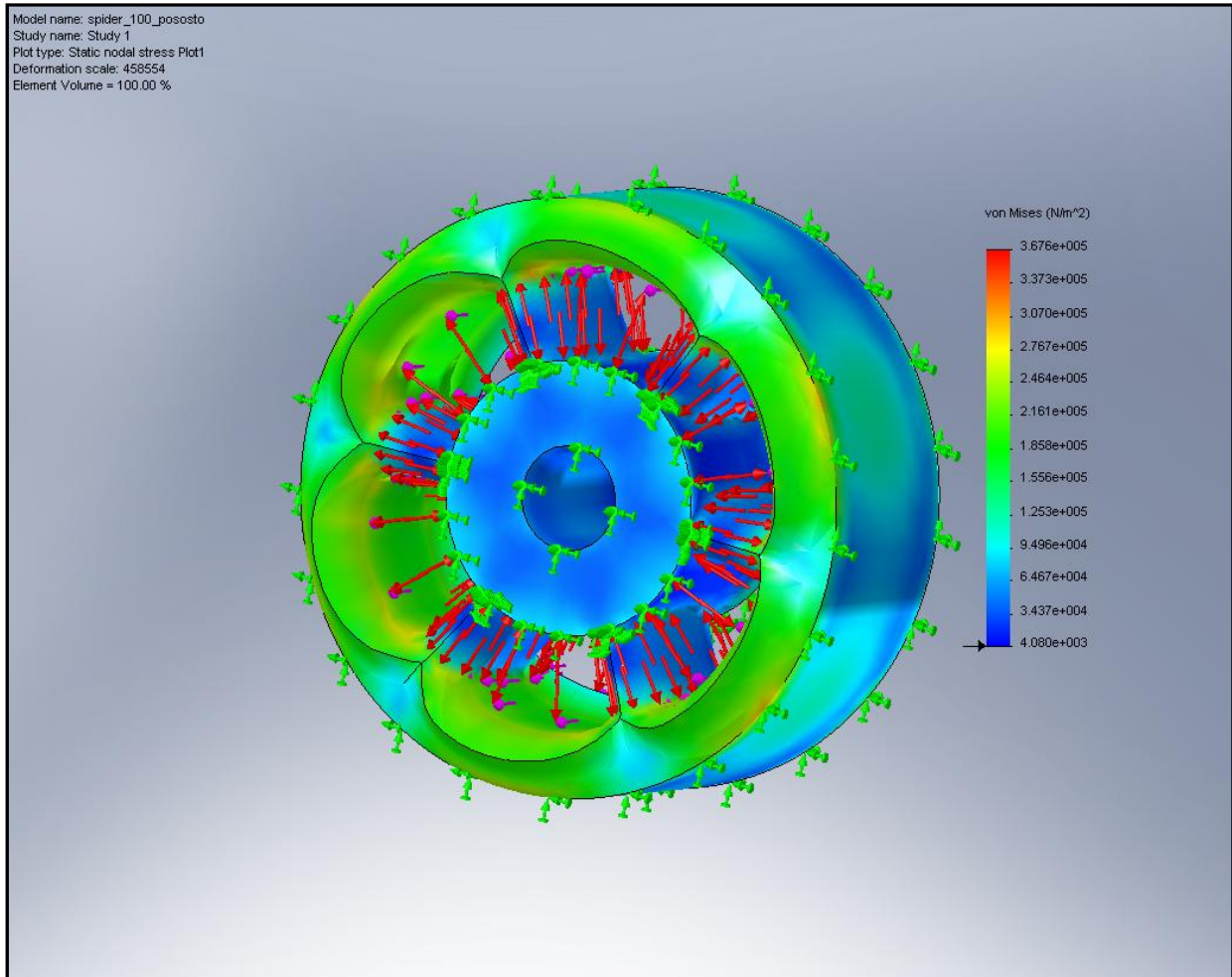


Σχήμα 5.51: Καταπόνηση ποδιού στα 100 bar

**Αναλυτικός υπολογισμός αντοχής στο πόδι της αράχνης:**

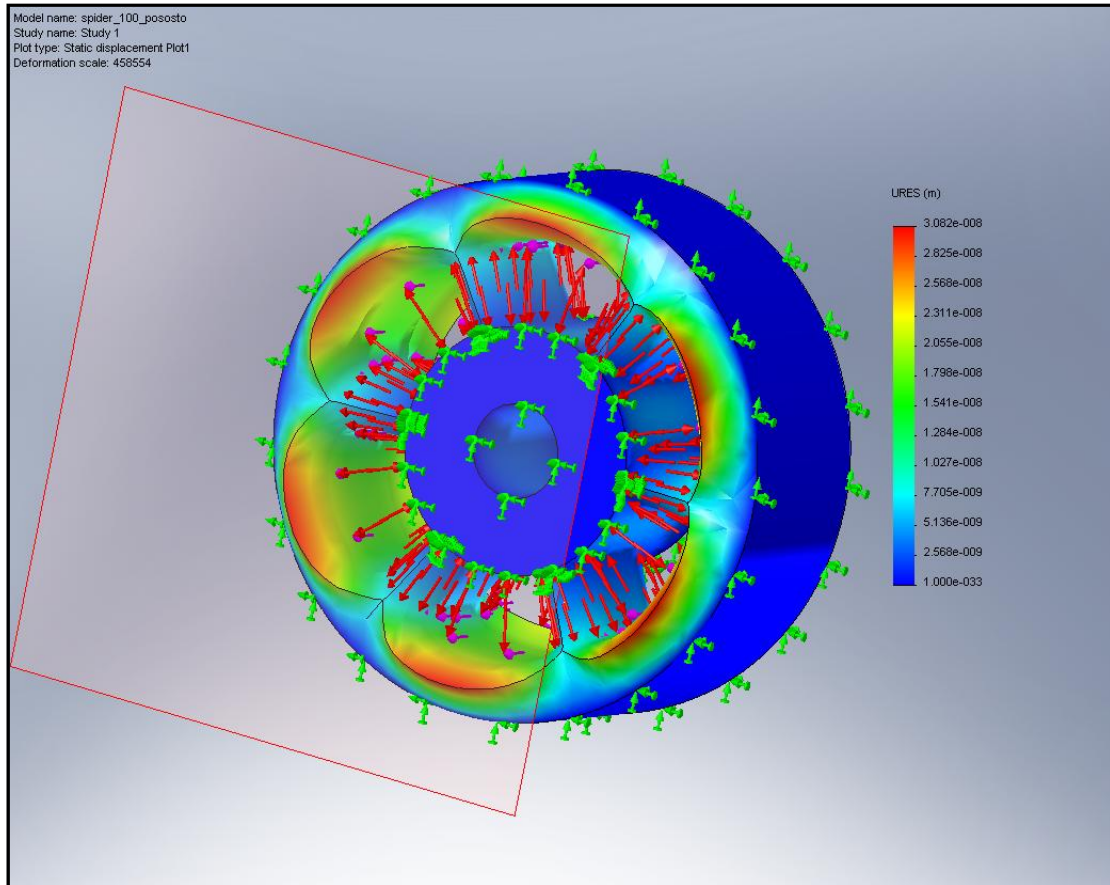
Ομοίως με πριν η δύναμη που ασκείται στο πόδι είναι ίση με  $F_{Zleg} = \frac{F_{Z100000000III}}{n_{legs}} = \frac{119516,2}{6} = 3319,896 N$  ενώ από το Comsol η πτώση πίεσης στο πόδι βρέθηκε ίση με  $\Delta P_{10000000,leg} = |6,622947 \cdot 10^6 - 6,67441 \cdot 10^6| = 51463 Pa$ . Αντικαθιστώντας στις σχέσεις (5.10)-(5.14) προκύπτουν οι τιμές των τάσεων ίσες με  $\sigma_{b_{60000000}} = -43358024,6 N/m^2$  και  $\tau_{60000000} = 60221048,15 N/m^2$ . Η ισοδύναμη τάση σύμφωνα με το κριτήριο Von Mises είναι ίση με  $\sigma_{ισοδ10000000} = \sqrt{\sigma_{b_{10000000}}^2 + 3 \cdot \tau_{10000000}^2} = 112958586,3 N/m^2 < 8 \cdot 10^8$ . Στην προκειμένη περίπτωση η μέγιστη ισοδύναμη τάση στο πόδι από το αριθμητικό μοντέλο είναι ίση με  $2,1 \cdot 10^8 N/m^2$  και η διαφορά οφείλεται όπως και προηγούμενα κυρίως στις παραδοχές της γεωμετρίας. Γενικά όμως από το μοντέλο της μήτρας στα 100 bar η

μέγιστη ισοδύναμη τάση είναι ίση με μικρότερη δηλαδή από το όριο διαρροής του χάλυβα επομένων σύμφωνα με το κριτήριο Von Mises η μήτρα στα 100 bar λειτουργεί ασφαλώς. Τέλος, θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα για την μεταβολή της πίεσης ίση με **73620 Pa** για την αράχνη και **51463 Pa** για το πόδι της αράχνης. Η διατμητική δύναμη είναι **146,646 N** και **17,085 N** αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα ακολουθούν:

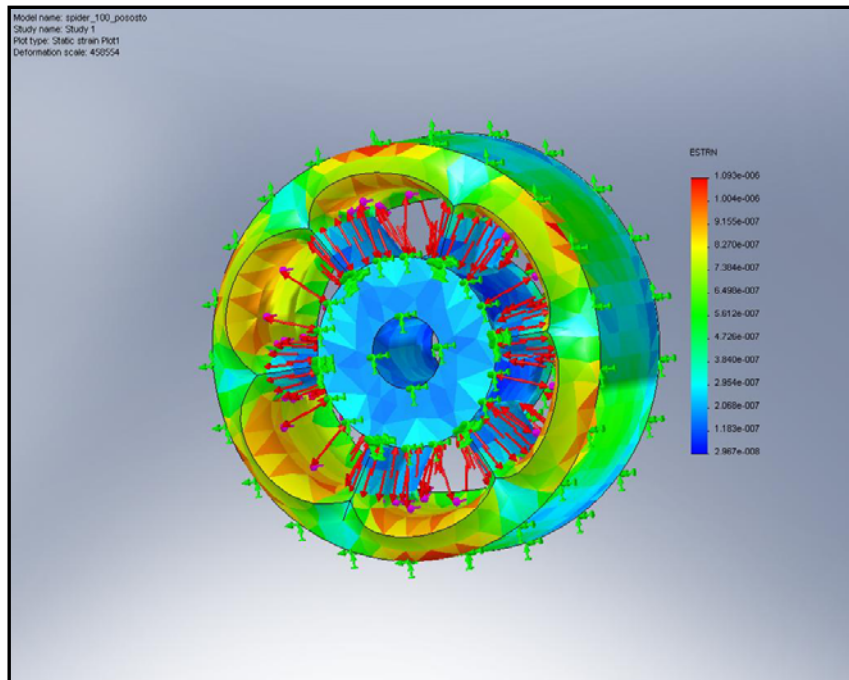


Σχήμα 5.52: Ισοδύναμη τάση στην αράχνη για 73620 Pa

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

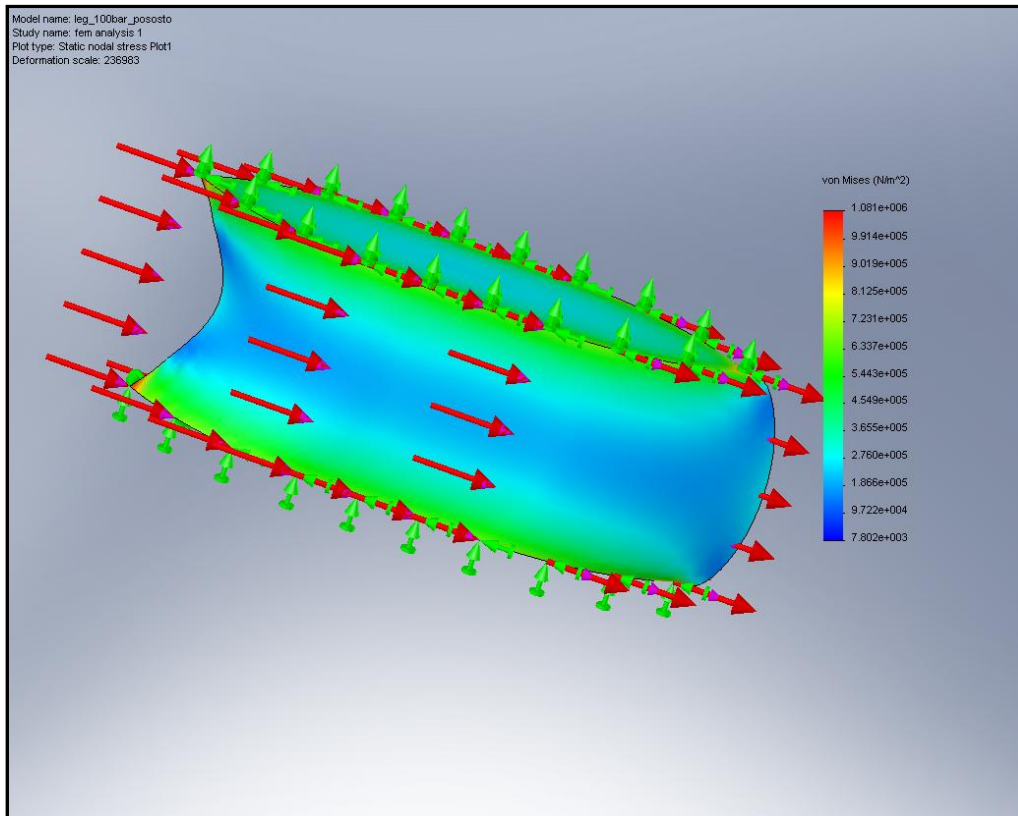


Σχήμα 5.53: Μετατόπιση στην αράχνη για 73620 Pa

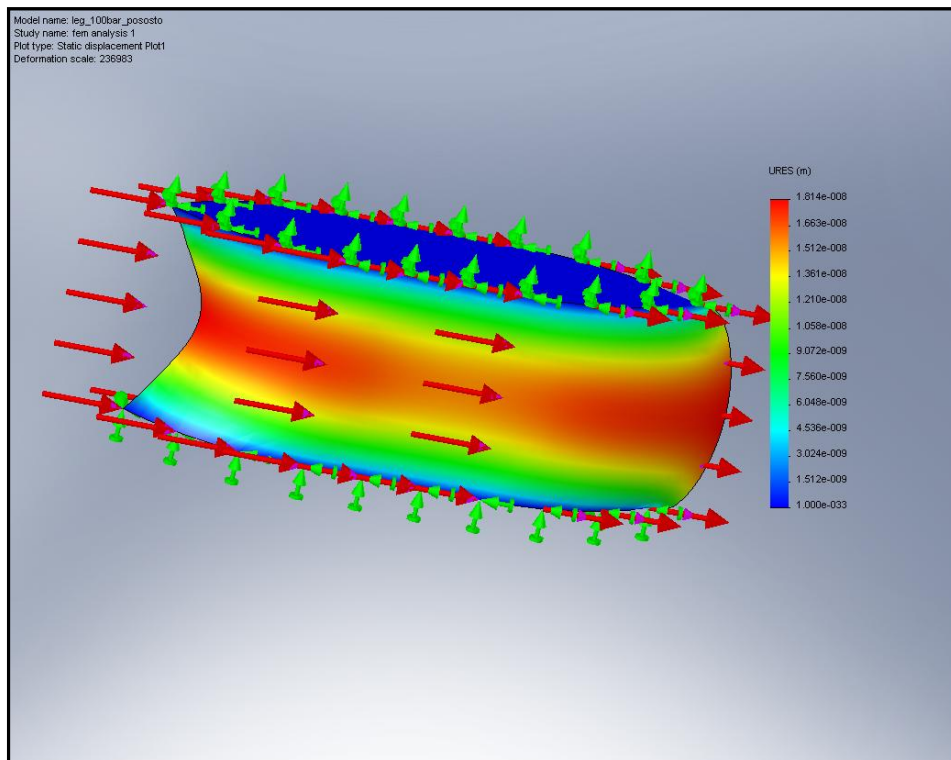


Σχήμα 5.54: Καταπόνηση στην αράχνη για 73620 Pa

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

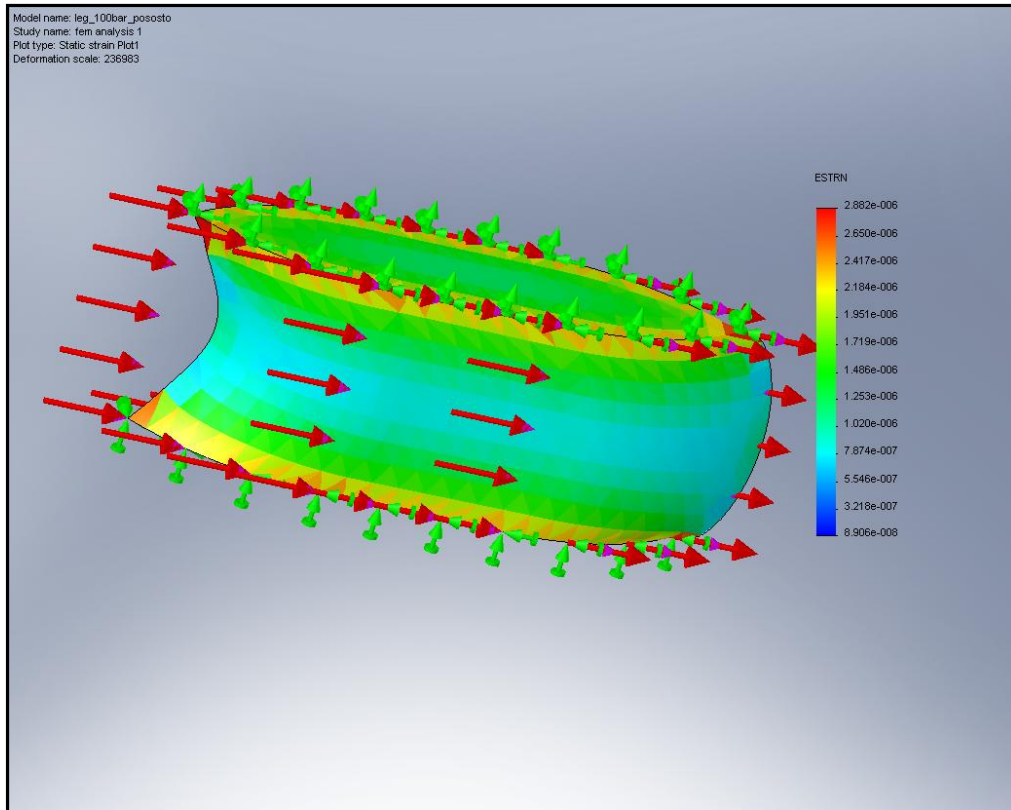


Σχήμα 5.55: Ισοδύναμη τάση στο πόδι για 51463 Pa



Σχήμα 5.56: Μετατόπιση στο πόδι για 51463 Pa





Σχήμα 5.57:Καταπόνηση στο πόδι για 51463 Pa

Για την ποσοστιαία πτώση πίεσης στο πόδι σύμφωνα με το Comsol έχουμε  $\Delta P_{10000000,leg\%οσοστο} = |6,622947 \cdot 10^6 - 6,67441 \cdot 10^6| = 51463 Pa$  ενώ η διατμητική δύναμη

είναι ίση με  $F_{Zleg\%οσοστο} = \frac{F_{Z10000000III\%οσοστο}}{n_{legs}} = 17,085 N$ . Η ισοδύναμη τάση που

προκύπτει ισούται με  $\sigma_{ισοδ10000000} = \sqrt{\sigma_{b\%οσοστο}^2 + 3 \cdot \tau_{\%οσοστο}^2} = 96932,3 N/m^2 < 8 \cdot 10^8$ .

Από το γράφημα της ισοδύναμης τάσης προκύπτει ότι η μέγιστη ισοδύναμη τάση είναι ίση με  $1,081 \cdot 10^6 N/m^2 < 8 \cdot 10^8 N/m^2$ . Η διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων

οφείλεται σε παραδοχές που κάναμε για την επίλυση του αναλυτικού μοντέλου αντοχής για το πόδι. *Συμπερασματικά μετά από την μελέτη των παραπάνω περιπτώσεων συμπεραίνουμε ότι στην περίπτωση που η μήτρα καταπονείται στα 600 bar παρουσιάζεται αστοχία και η επικίνδυνη διατομή είναι το πόδι της αράχνης. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η μήτρα αντέχει με ασφάλεια ενώ και εδώ η επικίνδυνη διατομή είναι το πόδι της αράχνης.*

## **Βιβλιογραφία 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου**

---

- i. Walter Michaeli, “Extrusion Dies for Plastics and Rubber”, Hanser Publishers, New York, (1996)
- ii. Π.Α.Βουθούνης, «Τεχνική Μηχανική-Αντοχή των υλικών», Εκδόσεις του συγγραφέα, Αθήνα (2002).
- iii. Ρ.Γραϊκούσης, «Στοιχεία Μηχανών»,τόμος Ι, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη,(1993)
- iv. Χ.Προβατίδης, Ι.Αντωνιάδης, «Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές», Αθήνα (2004)
- v. Π.Μακρή, «Στοιχεία Μηχανών Ι», Αθήνα (1998)
- vi. Ταραντίλη Π. Α, «Τεχνική των Πολυμερών», Ε.Μ.Π, (2004)
- vii. Μητσούλης Ευ., «Βασικές Αρχές Μορφοποίησης Πολυμερών», Ε.Μ.Π, (1999)
- viii. [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- ix. [www.buau.com.au](http://www.buau.com.au)

---

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

### 5.1 Συμπεράσματα

Στόχος της εν λόγω διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος της αντοχής της μήτρας εκβολέα για την παραγωγή πλαστικών σωλήνων HDPE (διαστάσεων DN 32X2,4) από χάλυβα DIN 1.2738 . Η μελέτη της αντοχής στηρίχτηκε σε δύο διαφορετικά σενάρια ελέγχου και η επίλυσή τους έγινε με τη χρήση πακέτου πεπερασμένων στοιχείων (Cosmosworks 2007). Στο πρώτο σενάριο, ελέγξαμε την αντοχή της μήτρας στην δυσμενέστερη των περιπτώσεων και στο δεύτερο ελέγξαμε την αντοχή της μήτρας σε τυχαία πίεση 100 bar λίγο υψηλότερη από την πραγματική πίεση λειτουργίας του εκβολέα. Θεωρήσαμε λοιπόν αρχικά ότι στη μήτρα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση ίση με 600 bar, που είναι και η μέγιστη πίεση που μπορεί να λειτουργήσει ένας εκβολέας. Όπως αναμενόταν στην επικίνδυνη διατομή του ποδιού στην ζώνη III της αράχνης σύμφωνα με το κριτήριο Von Mises παρουσιάστηκε αστοχία. Είναι βέβαια απαραίτητο να επισημάνουμε στο σημείο αυτό ότι στη μελέτη μας η πίεση που ασκείται είναι ομοιόμορφη κατανεμημένη σε όλο το μήκος της μήτρας κάτι που πρακτικά αλλά και σύμφωνα με το αριθμητικό μοντέλο της ρευστοδυναμικής επίλυσης για πίεση εισόδου ίση με 600 bar δεν ισχύει. Για λόγους ακρίβειας επεκτείναμε τον έλεγχο στη ζώνη της αράχνης και στο πόδι της για πίεση 600bar όπου επιβεβαιώθηκε η αστοχία στο πόδι. Προχωρήσαμε εν συνεχεία στον έλεγχο της αντοχής στην αράχνη και στο πόδι για την ποσοστιαία μεταβολή της πίεσης που προκύπτει από το αντίστοιχο αριθμητικό μοντέλο του Comsol για πίεση εισόδου ίση με 600 bar. Σύμφωνα με τα μοντέλα αυτά δεν τίθεται θέμα αστοχίας και το πόδι της αράχνης αντέχει με ασφάλεια. Ακολούθως ελέγχουμε την αντοχή της

μήτρας στα 100 bar δηλαδή σε μια τιμή πίεσης λίγο υψηλότερη από την πίεση λειτουργίας του εκβολέα σε κανονικές συνθήκες η οποία ισούται με 92,18 bar. Στην περίπτωση αυτή η μήτρα αντέχει με ασφάλεια και μάλιστα προκειμένου να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα επεκτείνουμε και εδώ τον έλεγχό μας στην αράχνη και στο πόδι της τόσο για την ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση των 100 bar όσο και για την ποσοστιαία μεταβολή της πίεση που λαμβάνουμε από το μοντέλο του Comsol για πίεση εισόδου 100 bar. Σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις η μήτρα αντέχει με ασφάλεια και δεν παρατηρείται κάποια επικίνδυνη διατομή. Επισημαίνουμε μάλιστα ότι ο έλεγχος της αντοχής στο πόδι της αράχνης έγινε και με τη χρήση αναλυτικών μοντέλων τα οποία παρουσιάζουν μικρή διαφοροποίηση από τα αναλυτικά γεγονόσ που οφείλεται κατά κύριο λόγο σε παραδοχές στην γεωμετρία στις οποίες οδηγηθήκαμε προκειμένου να επιλύσουμε τα μοντέλα αυτά. Συμπερασματικά, σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι η μήτρα αντέχει με ασφάλεια στη κανονική πίεση λειτουργίας του εκβολέα ενώ επιβεβαιώθηκε ότι ο χάλυβας 1.2738 αποτελεί την ορθή επιλογή υλικού για την κατασκευή της μήτρας γεγονός που επαληθεύει και την εκτενή βιβλιογραφική αναζήτηση που πραγματοποιήσαμε αναφορικά με τα υλικά για την κατασκευή μητρών για θερμοπλαστικά πολυμερή. Μάλιστα, κρίναμε σκόπιμο να παρουσιάσουμε (4° κεφάλαιο- παράγραφος 4.7) μια λίστα από υλικά που προτείνουμε για την κατασκευή της μήτρας εναλλακτικά του χάλυβα 1.2738. Αξίζει τέλος να τονίσουμε ότι βασιζόμενοι στα αριθμητικά μοντέλα του Comsol για την ποσοστιαία πτώση πίεσης για πίεση εισόδου 600 bar, τα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων για την αντοχή της αράχνης και του ποδιού της που αποτελεί την επικίνδυνη διατομή στην μήτρα εξασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία της. Επομένως, οι έλεγχοι αντοχής που πραγματοποιήσαμε στην μήτρα σε όλες τις περιπτώσεις μας δίνουν μια σαφή και ξεκάθαρη εικόνα της στατική συμπεριφοράς της ακόμη και στην δυσμενέστερη των περιπτώσεων ενώ το πόδι της αράχνης επιβεβαιώνεται μέσω όλων των μοντέλων ότι αποτελεί την επικίνδυνη διατομή για την κεφαλή που ελέγξαμε.

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1ο**

**Χάλυβες που προτείνονται για την κατασκευή  
καλουπιών για θερμοπλαστικά πολυμερή**

**AISI 1050 Steel, cold drawn, annealed, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round**Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Carbon Steel](#); [AISI 1000 Series Steel](#); [Medium Carbon Steel](#)**Material Notes:** The composition listed above applies only to structural shapes, plates, strip, and welded tubing. Semifinished products for forging, hot-rolled and cold-finished bars, wire rods, and seamless tubing have a carbon range of 0.48 - 0.55%.**Key Words:** UNS G10500, EN43A, carbon steels**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	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	189	189	
Hardness, Knoop	211	211	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell B	90	90	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell C	11.0	11.0	Converted from Brinell hardness. Value below normal HRC range, for comparison purposes only.
Hardness, Vickers	198	198	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate	655 MPa	95000 psi	
Tensile Strength, Yield	550 MPa	79800 psi	
Elongation at Break	10.0 %	10.0 %	In 50 mm
Reduction of Area	40.0 %	40.0 %	
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	Typical for steel
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel
Poissons Ratio	0.290	0.290	Typical For Steel
Machinability	55 %	55 %	Based on AISI 1212 steel, as 100% machinability
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.0000163 ohm-cm	0.0000163 ohm-cm	annealed specimen; 0°C (32°F)
	0.0000224 ohm-cm @Temperature 100 °C	0.0000224 ohm-cm @Temperature 212 °F	annealed specimen
	0.0000300 ohm-cm @Temperature 200 °C	0.0000300 ohm-cm @Temperature 392 °F	annealed specimen

Thermal Properties	Metric	English	Comments
Specific Heat Capacity	0.486 J/g-°C	0.116 BTU/lb-°F	annealed; 50-100°C (122-212°F)
Thermal Conductivity	49.8 W/m-K	346 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	Typical steel

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.470 - 0.55 %	0.470 - 0.55 %	
Iron, Fe	98.46 - 98.92 %	98.46 - 98.92 %	
Manganese, Mn	0.60 - 0.90 %	0.60 - 0.90 %	
Phosphorus, P	<= 0.040 %	<= 0.040 %	
Sulfur, S	<= 0.050 %	<= 0.050 %	

**References** for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.





**AISI 4140 Steel, oil quenched, 100 mm (4 in.) round (845°C (1550°F) quench, 650°C (1200°F) temper)**

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Alloy Steel](#); [AISI 4000 Series Steel](#); [Low Alloy Steel](#); [Carbon Steel](#); [Medium Carbon Steel](#)

Key Words: ASTM A322, ASTM A331, ASTM A505, ASTM A519, ASTM A646, B.S. 708 A 42 (UK), B.S. 708 M 40 (UK), B.S. 709 M 40 (UK), JIS SCM 4 H, JIS SCM 4, SS14 2244 (Sweden), MIL SPEC MIL-S-16974, SAE J404, SAE J412, SAE J770, DIN 1.7225, UNS G41400, AMS 6381, AMS 6382, AMS 6390, AMS 6395, IS 1570 40Cr1Mo28, IS 4367 40Cr1Mo28, IS 5517 40Cr1Mo28

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	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	229	229	
Hardness, Knoop	252	252	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell B	96	96	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell C	19.0	19.0	Converted from Brinell hardness. Value below normal HRC range, for comparison purposes only.
Hardness, Vickers	241	241	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate	772 MPa	112000 psi	
Tensile Strength, Yield	580 MPa	84100 psi	
Elongation at Break	23.2 %	23.2 %	In 50 mm
Reduction of Area	64.9 %	64.9 %	
Modulus of Elasticity	206 GPa	29700 ksi	Typical for steel
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel.
Poissons Ratio	0.290	0.290	Calculated
Machinability	65 %	65 %	Based on AISI 1212 as 100% machinability.
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel.
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.0000220 ohm-cm	0.0000220 ohm-cm	specimen hardened and tempered; 20 °C (68 °F)
	0.0000263 ohm-cm @Temperature 100 °C	0.0000263 ohm-cm @Temperature 212 °F	specimen hardened and tempered
	0.0000326 ohm-cm @Temperature 200 °C	0.0000326 ohm-cm @Temperature 392 °F	specimen hardened and tempered
	0.0000475 ohm-cm @Temperature 400 °C	0.0000475 ohm-cm @Temperature 752 °F	specimen hardened and tempered
	0.0000646 ohm-cm @Temperature 600 °C	0.0000646 ohm-cm @Temperature 1110 °F	specimen hardened and tempered
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	12.2 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 100 °C	6.78 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 212 °F	
	13.7 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 400 °C	7.61 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 752 °F	
	14.6 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 600 °C	8.11 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 1110 °F	
Specific Heat Capacity 	0.473 J/g-°C @Temperature 150 - 200 °C	0.113 BTU/lb-°F @Temperature 302 - 392 °F	
	0.519 J/g-°C @Temperature 350 - 400 °C	0.124 BTU/lb-°F @Temperature 662 - 752 °F	
	0.561 J/g-°C @Temperature 550 - 600 °C	0.134 BTU/lb-°F @Temperature 1020 - 1110 °F	
Thermal Conductivity 	42.6 W/m-K 33.0 W/m-K @Temperature 600 °C	296 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F 229 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 1110 °F	100 °C
	37.7 W/m-K @Temperature 400 °C	262 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 752 °F	
	42.2 W/m-K @Temperature 200 °C	293 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 392 °F	
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.380 - 0.430 %	0.380 - 0.430 %	
Chromium, Cr	0.80 - 1.10 %	0.80 - 1.10 %	
Iron, Fe	96.785 - 97.77 %	96.785 - 97.77 %	as balance
Manganese, Mn	0.75 - 1.0 %	0.75 - 1.0 %	
Molybdenum, Mo	0.15 - 0.25 %	0.15 - 0.25 %	
Phosphorous, P	<= 0.035 %	<= 0.035 %	
Silicon, Si	0.15 - 0.30 %	0.15 - 0.30 %	

## Bohler-Uddeholm ORVAR® SUPERIOR (Premium AISI H13) Hot Work Tool Steel

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Alloy Steel](#); [Chrome-moly Steel](#); [Tool Steel](#); [Hot Work Steel](#)

**Material Notes:** Chromium-molybdenum-vanadium alloyed steel

A premium Cr-Mo-V-alloyed hot work die steel with good resistance to thermal fatigue. The steel is produced by a special melting and refining technique in order to give mechanical properties with maximum isotropy and is certified to meet a minimum Charpy V-notch test result of 10 ft-lbs (13.6 J). Suitable for a wide variety of hot work applications, including tools for high pressure die casting, hot extrusion and press forging, Orvar® Superior meets or exceeds the NADCA 207-97 and the 207-2003 Superior Specification in dimensions up to 18" in thickness.


Orvar Superior is characterized by:



- A high level of resistance to thermal shock and thermal fatigue
- Good high-temperature strength
- Excellent toughness and ductility in all directions
- Good machinability and polishability
- Excellent through-hardening properties
- Good dimensional stability during hardening

Information provided by Bohler-Uddeholm

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	7.78 g/cc	0.281 lb/in <sup>3</sup>	hardness of 45 HRC
	7.58 g/cc @Temperature 599 °C	0.274 lb/in <sup>3</sup> @Temperature 1110 °F	hardness of 45 HRC
	7.67 g/cc @Temperature 399 °C	0.277 lb/in <sup>3</sup> @Temperature 750 °F	hardness of 45 HRC

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	180	180	Soft annealed (Delivery condition)
Tensile Strength, Ultimate	1420 MPa	206000 psi	hardness of 45 HRC
	1610 MPa	263000 psi	hardness of 52 HRC
Tensile Strength, Yield	1280 MPa	185000 psi	0.2% (hardness of 45 HRC)
	1520 MPa	220000 psi	0.2% (hardness of 52 HRC)
Modulus of Elasticity	210 GPa	30500 ksi	(hardness of 45 HRC)
	140 GPa @Temperature 599 °C	20300 ksi @Temperature 1110 °F	hardness of 45 HRC
	180 GPa @Temperature 399 °C	26100 ksi @Temperature 750 °F	hardness of 45 HRC
Charpy Impact 	27.1 J @Temperature 98.9 °C	20.0 ft-lb @Temperature 210 °F	V-notch (hardness of 45 HRC)
	74.6 J @Temperature 499 °C	55.0 ft-lb @Temperature 930 °F	V-notch (hardness of 45 HRC)

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	12.6 µm/m-°C @Temperature 399 °C	7.00 µin/in-°F @Temperature 750 °F	hardness of 45 HRC
	13.1 µm/m-°C @Temperature 599 °C	7.30 µin/in-°F @Temperature 1110 °F	hardened to 45 HRC
Thermal Conductivity 	25.0 W/m-K @Temperature 20.0 °C	174 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 68.0 °F	hardness of 45 HRC
	29.0 W/m-K @Temperature 399 °C	201 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 750 °F	hardness of 45 HRC
	30.0 W/m-K @Temperature 599 °C	208 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 1110 °F	hardness of 45 HRC

Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	1024 °C	1875 °F heated for 30 min, then quenched in air and tempered 2 + 2 h at 1130 °F (hardness = 45 HRC)	

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.390 %	0.390 %	
Chromium, Cr	5.20 %	5.20 %	
Manganese, Mn	0.40 %	0.40 %	
Molybdenum, Mo	1.40 %	1.40 %	
Silicon, Si	1.0 %	1.0 %	
Vanadium, V	0.90 %	0.90 %	



## Bohler-Uddeholm IMPAX® P20 Hot Work Tool Steel

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Alloy Steel](#); [Chrome-moly Steel](#); [Tool Steel](#); [Hot Work Steel](#)

Material Notes: Chromium-nickel-molybdenum alloyed steel

A pre-hardened Ni-Cr-Mo-steel supplied at 290-341 HB suitable for die casting of zinc, lead and tin. Also suitable for high strength holder blocks.

Impax Supreme offers the following benefits:

- No hardening risks
- No hardening costs
- Time saving, e.g. no waiting for heat treatment
- Lower tool cost
- Modifications easily carried out
- Can be subsequently nitrated to increase surface wear resistance or locally flame hardened to reduce surface damage

Information provided by Bohler-Uddeholm

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	7.81 g/cc	0.282 lb/in <sup>3</sup>	hardness of 310 HB
<a href="#">Info</a>	7.75 g/cc @Temperature 199 °C	0.280 lb/in <sup>3</sup> @Temperature 390 °F	hardness of 310 HB

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	290 - 341	290 - 341	Hardened and tempered (Delivery condition)
Tensile Strength, Ultimate	1010 MPa	146000 psi	(hardness of 325 HB)
<a href="#">Info</a>	896 MPa @Temperature 199 °C	130000 psi @Temperature 390 °F	(hardness of 325 HB)
Tensile Strength, Yield	800 MPa	116000 psi	0.2%, 68°F (hardness of 325 HB)
	896 MPa	130000 psi	0.2%, 68°F (hardness of 325 HB)
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	(hardness of 310 HB)
<a href="#">Info</a>	200 GPa @Temperature 199 °C	29000 ksi @Temperature 390 °F	hardness of 310 HB
Compressive Yield Strength	850 - 1000 MPa	123000 - 145000 psi	
Charpy Impact <a href="#">Info</a>	5.02 - 10.0 J @Temperature -100 °C	3.70 - 7.40 ft-lb @Temperature -148 °F	V-notch
	40.7 - 67.8 J @Temperature 150 °C	30.0 - 50.0 ft-lb @Temperature 302 °F	V-notch

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	12.6 µm/m-°C @Temperature 199 °C	7.00 µin/in-°F @Temperature 390 °F	hardness of 310 HB
Specific Heat Capacity	0.460 J/g-°C @Temperature 20.0 °C	0.110 BTU/lb-°F @Temperature 68.0 °F	hardness of 310 HB
Thermal Conductivity <a href="#">Info</a>	29.0 W/m-K @Temperature 20.0 °C	201 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 68.0 °F	hardness of 310 HB
	30.0 W/m-K @Temperature 199 °C	208 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 390 °F	hardness of 310 HB

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.370 %	0.370 %	
Chromium, Cr	2.0 %	2.0 %	
Manganese, Mn	1.40 %	1.40 %	
Molybdenum, Mo	0.20 %	0.20 %	
Nickel, Ni	1.0 %	1.0 %	
Silicon, Si	0.30 %	0.30 %	
Sulfur, S	<= 0.010 %	<= 0.010 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

## Bohler-Uddeholm CORRAX® Precipitation Hardening Stainless Mold Steel

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Alloy Steel](#); [Stainless Steel](#); [Precipitation Hardening Stainless](#); [Tool Steel](#); [Mold Steel](#)

**Material Notes:** A precipitation hardening stainless steel which offers excellent high corrosion resistance, excellent dimensional stability during hardening and good wear resistance. It can be used at its as-supplied hardness of 34-36 HRC, or a low-temperature aging treatment can increase the hardness up to 50 HRC.




CORRAX® is characterized by:

- Extremely good dimensional stability during the aging process
- High uniformity of properties even in large dimensions
- Very good weldability; no pre-heating necessary
- No hard "white layer" after EDM
- Corrosion resistance superior to AISI 420 and AISI 440C

Information provided by Bohler-Uddeholm

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	7.75 g/cc	0.280 lb/in <sup>3</sup>	hardened to 46 HRC
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell C	34	34	Solution treated (Delivery condition)
Tensile Strength, Ultimate	1100 MPa	160000 psi	Solution treated ~ 34 HRC
	1170 MPa	170000 psi	Aged to ~ 40 HRC
	1520 MPa	220000 psi	Aged to ~ 46 HRC
	1720 MPa	250000 psi	Aged to ~ 50 HRC
Tensile Strength, Yield	689 MPa	100000 psi	0.2%, Solution treated ~ 34 HRC
	1030 MPa	150000 psi	0.2%, Aged to ~ 40 HRC
	1380 MPa	200000 psi	0.2%, Aged to ~ 46 HRC
	1590 MPa	230000 psi	Aged to ~ 50 HRC
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi	(hardened to 46 HRC)
	172 GPa	25000 ksi	hardened to 46 HRC
	@Temperature 399 °C	@Temperature 750 °F	
	193 GPa	28000 ksi	hardened to 46 HRC
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	
Compressive Yield Strength	900 MPa	131000 psi	0.2%, Solution treated ~ 34 HRC
	1300 MPa	189000 psi	0.2%, Aged to ~ 40 HRC
	1600 MPa	232000 psi	0.2%, Aged to ~ 46 HRC
	1800 MPa	261000 psi	0.2%, Aged to ~ 50 HRC
Impact Test	5.42 - 17.6 J	4.00 - 13.0 ft-lb	50 HRC
	20.3 - 40.7 J	15.0 - 30.0 ft-lb	34 HRC
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	11.7 µm/m-°C	6.50 µin/in-°F	hardened to 46 HRC
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	
	12.2 µm/m-°C	6.80 µin/in-°F	hardened to 46 HRC
	@Temperature 399 °C	@Temperature 750 °F	
Thermal Conductivity 	18.0 W/m-K	125 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	hardened to 46 HRC
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	
	21.0 W/m-K	146 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	hardened to 46 HRC
	@Temperature 399 °C	@Temperature 750 °F	
Shrinkage	0.0700 - 0.250 %	0.0700 - 0.250 %	Aging 4hrs (975-1150°F)
	0.0700 - 0.250 %	0.0700 - 0.250 %	Transverse, Aging 4hrs (975-1150°F)
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.030 %	0.030 %	
Chromium, Cr	12.0 %	12.0 %	
Manganese, Mn	0.30 %	0.30 %	
Molybdenum, Mo	1.40 %	1.40 %	
Nickel, Ni	9.20 %	9.20 %	
Silicon, Si	0.30 %	0.30 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this dataset as they were originally entered into MatWeb.

## Bohler-Uddeholm RAMAX® 2 Modified 420F

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Alloy Steel](#); [Chrome-moly Steel](#); [Stainless Steel](#)

**Material** Chromium alloyed steel

**Notes:**

Typical applications for Ramax® 2 are: holders and bolsters for plastic molds, plastic and rubber molds with low requirements on polishability, and dies for plastic extrusion.






RAMAX® 2 is characterized by:

- Excellent machinability
- Good corrosion resistance
- Good hardenability
- Uniform hardness in all directions
- Good indentation resistance

Information provided by Bohler-Uddeholm

**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	7.75 g/cc	0.280 lb/in <sup>3</sup>	hardened and tempered to 350 HB
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	340	340	Hardened and tempered (Delivery condition)
	275 - 475	275 - 475	tempering temp 390-1110°F
Tensile Strength, Ultimate	1140 MPa	165000 psi	(hardened to 350 HB)
	1020 MPa	148000 psi	(hardened to 350 HB)
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	
Tensile Strength, Yield	993 MPa	144000 psi	0.2%, 68°F (hardened to 350 HB)
	917 MPa	133000 psi	0.2%, (hardened to 350 HB)
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	
Elongation at Break	12.0 %	12.0 %	(hardened to 350 HB)
	10.0 %	10.0 %	hardened to 350 HB
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	
Reduction of Area 	46.0 %	46.0 %	hardened to 350 HB
	@Temperature 20.0 °C	@Temperature 68.0 °F	
	48.0 %	48.0 %	hardened to 350 HB
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	
Modulus of Elasticity	215 GPa	31200 ksi	68°F, (hardened and tempered to 350 HB)
	205 GPa	29700 ksi	hardened and tempered to 350 HB
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	
Impact Test	180 J	133 ft-lb	unnotched
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	10.8 µm/m-°C	6.00 µin/in-°F	hardened and tempered to 350 HB
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	
Specific Heat Capacity	0.460 J/g-°C	0.110 BTU/lb-°F	hardened and tempered to 350 HB
	@Temperature 20.0 °C	@Temperature 68.0 °F	
Thermal Conductivity	24.0 W/m-K	167 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	hardened and tempered to 350 HB
	@Temperature 199 °C	@Temperature 390 °F	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as new conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its new conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this dataset as they were originally entered into MatWeb.

## Carpenter S7 Alloy Tool Steel (AISI S7)

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Tool Steel](#); [Air-Hardening Steel](#); [Hot Work Steel](#)

**Material Notes:** Description: Carpenter S7 is a general purpose air hardening tool steel having high impact and shock resistance. It has good resistance to softening at moderately high temperatures. This combination of properties makes it suitable for many hot-work and cold-work applications. It is available as a DeCarb-Free product. DCF bars have been cold finished in the mill, eliminating the need for bar bark removal. Both Carpenter S7 and Bearcat, a trademark of Bethlehem Steel Corp., have the same AISI tool steel designation . . . S7. Iron calculated as balance.

Information provided by Carpenter Technology Corporation.

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
Specific Gravity	7.83 g/cc	7.83 g/cc	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell C	37.0 - 40.0	37.0 - 40.0	Tempered at 1200°F
	59.0 - 61.0	59.0 - 61.0	As hardened
Tensile Strength, Ultimate	2025 MPa	293700 psi	when tempered at 400°F
Tensile Strength, Yield	1520 MPa	220000 psi	0.2% offset, when tempered at 400°F
Elongation at Break	10.0 %	10.0 %	when tempered at 400°F
Reduction of Area	28.0 %	28.0 %	when tempered at 400°F
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear <a href="#">in.</a>	12.59 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$	6.994 $\mu\text{in/in}\cdot^\circ\text{F}$	
	@Temperature 25.0 - 200 °C	@Temperature 77.0 - 392 °F	
	13.33 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$	7.406 $\mu\text{in/in}\cdot^\circ\text{F}$	
@Temperature 25.0 - 400 °C	@Temperature 77.0 - 752 °F		
	14.27 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$	7.928 $\mu\text{in/in}\cdot^\circ\text{F}$	
@Temperature 25.0 - 700 °C	@Temperature 77.0 - 1290 °F		
Transformation Temperature	785 °C	1450 °F	Ac <sub>1</sub>
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.50 %	0.50 %	
Chromium, Cr	3.25 %	3.25 %	
Iron, Fe	93.85 %	93.85 %	
Manganese, Mn	0.70 %	0.70 %	
Molybdenum, Mo	1.40 %	1.40 %	
Silicon, Si	0.30 %	0.30 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

## Industeel CLC 1.2311 Prehardened Mold Steel (300HB/30HRC)

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Carbon Steel](#); [High Carbon Steel](#); [Tool Steel](#); [Mold Steel](#)

**Material Notes:** Description: CLC 1.2311 is a 300HB (30HRC) pre-hardened grade specially designed for plastic mold industry. Chromium, Molybdenum, carbon and manganese additions are optimized to have a fully martensite-bainite microstructure after quenching. The steel is melted in electrical furnace and refined with VOD or DH device. The cleanliness of the steel is guaranteed as well as the soundness. This makes the steel particularly well adapted for mold steel even when polishing or chemical etching are required for surface finish quality.

Iron content calculated as remainder.


Information provided by manufacturer.

**Key Words:** AFNOR 40CMD6, DIN 40CrMnMo7, WERKSTOFF.Nbr 1.2311, AISI P20

**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.

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	300	300	Typical, in Longitudinal and Transverse Direction
Tensile Strength, Ultimate	992 MPa	144000 psi	Typical, Transverse Direction
	1014 MPa	147100 psi	Typical, Longitudinal Direction
Tensile Strength, Yield	821 MPa	119000 psi	Typical, Transverse Direction (Y.S. 0.2%)
	854 MPa	124000 psi	Typical, Longitudinal Direction (Y.S. 0.2%)
Elongation at Break	9.60 %	9.60 %	Typical, EL 5.65 Transverse Direction
	10.8 %	10.8 %	Typical, EL 5.65 Longitudinal Direction
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	Typical, in Longitudinal and Transverse Direction
Charpy Impact	25.0 J	18.4 ft-lb	Typical (Transverse)
	28.0 J	20.7 ft-lb	Typical (Longitudinal)
	23.0 J	17.0 ft-lb	Typical (Longitudinal)
	@Temperature -20.0 °C	@Temperature -4.00 °F	
Charpy Impact, Unnotched	28.0 J	20.7 ft-lb	Typical at -20°C (Longitudinal)
	30.0 J	22.1 ft-lb	Typical at 20°C (Transverse)
	32.0 J	23.6 ft-lb	Typical at 20°C (Longitudinal)

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	11.5 µm/m-°C	6.39 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 100 °C	@Temperature 68.0 - 212 °F	
	11.57 µm/m-°C	6.428 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 200 °C	@Temperature 68.0 - 392 °F	
	12.47 µm/m-°C	6.928 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 300 °C	@Temperature 68.0 - 572 °F	
Thermal Conductivity	34.0 W/m-K	236 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	
	@Temperature 20.0 °C	@Temperature 68.0 °F	

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.40 %	0.40 %	
Chromium, Cr	1.90 %	1.90 %	
Iron, Fe	95.683 - 95.7 %	95.683 - 95.7 %	
Manganese, Mn	1.50 %	1.50 %	
Molybdenum, Mo	0.20 %	0.20 %	
Phosphorous, P	<= 0.012 %	<= 0.012 %	
Silicon, Si	0.30 %	0.30 %	
Sulfur, S	<= 0.0050 %	<= 0.0050 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

## Industeel CLC 1.2312 Prehardened Mold Steel (300HB/32HRC) with Improved Machinability

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Carbon Steel](#); [High Carbon Steel](#); [Tool Steel](#); [Mold Steel](#)

**Material Notes:** Description: CLC 1.2312 is a chromium-manganese-molybdenum grade designed for plastic mold industry. This grade is normally delivered in a prehardened condition at a hardness level of 300HB/32HRC. The grade has a fully homogeneous martensite-bainite microstructure. CLC 1.2312 grade has specific sulfur addition (0.060% typical) in order to increase strongly its machinability. Compared to CLC 1.2311 grade 30% increase in milling speed and 300% increase in drilling speed can be expected. At constant cutting speed, tool life is multiplied by a least 5 when replacing CLC 1.2311 by CLC1.2312 grade.


Iron content calculated as remainder.


Information provided by manufacturer.

**Key Words:** AFNOR 40CMD8S, DIN 40CrMnMoS 8.6, WERKSTOFF Nbr 1.2312, AISI P20+S

**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.

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	300	300	Typical, In Longitudinal and Transverse Direction
Tensile Strength, Ultimate	990 MPa	144000 psi	Typical, Transverse Direction
	1010 MPa	146000 psi	Typical, Longitudinal Direction
Tensile Strength, Yield	820 MPa	119000 psi	Typical, Transverse Direction (Y.S. 0.2%)
	850 MPa	123000 psi	Typical, Longitudinal Direction (Y.S. 0.2%)
Elongation at Break	9.00 %	9.00 %	Typical, Transverse Direction
	10.0 %	10.0 %	Typical, Longitudinal Direction
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	Typical, In Longitudinal and Transverse Direction
Charpy Impact	15.0 J	11.1 ft-lb	Typical (Transverse)
	25.0 J	18.4 ft-lb	Typical (Longitudinal)
 Charpy Impact, Unnotched	15.0 J	11.1 ft-lb	Typical (Longitudinal)
	@Temperature -20.0 °C	@Temperature -4.00 °F	
Charpy Impact, Unnotched	20.0 J	14.8 ft-lb	Typical at 20 °C (Transverse)
	25.0 J	18.4 ft-lb	Typical at -20 °C (Longitudinal)
	30.0 J	22.1 ft-lb	Typical at 20 °C (Longitudinal)

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	11.5 µm/m-°C	6.39 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 100 °C	@Temperature 68.0 - 212 °F	
	11.57 µm/m-°C	6.428 µin/in-°F	
@Temperature 20.0 - 200 °C	@Temperature 68.0 - 392 °F		
12.47 µm/m-°C	6.928 µin/in-°F		
@Temperature 20.0 - 300 °C	@Temperature 68.0 - 572 °F		
Thermal Conductivity	34.0 W/m-K	236 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	
@Temperature 20.0 °C	@Temperature 68.0 °F		

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.40 %	0.40 %	
Chromium, Cr	1.90 %	1.90 %	
Iron, Fe	95.628 - 95.64 %	95.628 - 95.64 %	
Manganese, Mn	1.50 %	1.50 %	
Molybdenum, Mo	0.20 %	0.20 %	
Phosphorous, P	<= 0.012 %	<= 0.012 %	
Silicon, Si	0.30 %	0.30 %	
Sulfur, S	0.060 %	0.060 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

## Latrobe LSS™ 420 Supreme Plastic Mold Steel (AISI 420)

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Stainless Steel](#); [Tool Steel](#); [Mold Steel](#)

**Material Notes:** TLS 420 Supreme is a specially-refined, mold-quality stainless steel that is engineered to provide supreme polishability, good corrosion resistance, and good wear resistance. TLS 420 supreme is manufactured using special melting and remelting techniques. These special melting practices along with proprietary forging practices result in the highest levels of microcleanliness and a homogeneous microstructure. TLS 420 Supreme is the material of choice for the manufacture of plastic molding tools that require the highest lens-quality polished finishes. Typical applications include molds for compact disks (CDs), medical laboratory equipment, optical lenses, and other components, which require critical surface finishes.

Information Provided by Timken Latrobe Steel.

Timken sold Latrobe in December 2006. They are now Latrobe Specialty Steels Co.

**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
Specific Gravity	7.75 g/cc	7.75 g/cc	
Density	7.75 g/cc	0.280 lb/in <sup>3</sup>	
Chemical Properties	Metric	English	Comments
Critical Temperature	802 °C	1480 °F	Ac1
	863 °C	1590 °F	Ac3
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell C	52	52	Air Cooled from 982°C, 30 minutes
	55.5	55.5	Air Cooled from 1010°C, 30 minutes
	56.5	56.5	Air Cooled from 1038°C, 30 minutes
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi	
Izod Impact Unnotched	13.6 J	10.0 ft-lb	Air Cooled from 1010°C; 393°C Temper Temperature
	20.3 J	15.0 ft-lb	Air Cooled from 1010°C; 593°C Temper Temperature
Machinability	55.0 - 60.0 %	55.0 - 60.0 %	1% Carbon Steel
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear <a href="#">link</a>	10.2 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	5.67 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	
	11.7 µm/m-°C @Temperature 30.0 - 538 °C	6.50 µin/in-°F @Temperature 88.0 - 1000 °F	
Thermal Conductivity <a href="#">link</a>	22.84 W/m-K @Temperature 20.0 °C	158.5 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 68.0 °F	
	23.93 W/m-K @Temperature 199 °C	166.1 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 390 °F	
	24.95 W/m-K @Temperature 399 °C	173.2 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F @Temperature 750 °F	
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Chromium, Cr	13.6 %	13.6 %	
Iron, Fe	84.87 %	84.87 %	
Manganese, Mn	0.45 %	0.45 %	
Other	0.380 %	0.380 %	
Silicon, Si	0.40 %	0.40 %	
Vanadium, V	0.30 %	0.30 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2ο**

**Ιδιότητες πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας από  
τη SABIQ**





## SABIC® HDPE B5823

### High density polyethylene for Pipe extrusion

#### Description.

SABIC® HDPE B5823 is developed for blow moulding consumer packaging up to 5 l, combining high stiffness and a good ESCR level. This grade is suitable for packaging the majority of detergents, cleaners, shampoos and cosmetics.

#### Typical data.

Revision 20070911

Properties	Units SI	Values	Test methods
<b>Polymer properties</b>			
<b>Melt flow rate (MFR)</b>			ISO 1133
at 190 °C and 2.16 kg	g/10 min	<b>0.16</b>	
at 190 °C and 5 kg	g/10 min	<b>0.89</b>	
at 190 °C and 21.6 kg	g/10 min	<b>23</b>	
<b>Density</b> <sup>1)</sup>	kg/m <sup>3</sup>	<b>958</b>	ISO 1183
<b>Mechanical properties</b> <sup>1) 2)</sup>			
<b>Tensile test</b> <sup>3) 4)</sup>			ISO 527-2
stress at yield	MPa	<b>28</b>	
stress at break	MPa	<b>22</b>	
strain at break	%	<b>&gt; 1000</b>	
tensile modulus	MPa	<b>1150</b>	
<b>Izod impact notched</b>			ISO 180/A
at 23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	<b>12</b>	
at -30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	<b>6</b>	
<b>Hardness Shore D</b>	-	<b>63</b>	ISO 868
<b>ESCR</b> <sup>5)</sup>	h	<b>13</b>	SABIC method
<b>Thermal properties</b>			
<b>Heat deflection temperature</b> <sup>1) 2)</sup>			ISO 75-2
at 1.80 MPa (HDT/A)	°C	<b>48</b>	
at 0.45 MPa (HDT/B)	°C	<b>85</b>	
<b>Vicat softening temperature</b> <sup>1) 2)</sup>			ISO 306
at 10 N (VST/A)	°C	<b>128</b>	
at 50 N (VST/B)	°C	<b>79</b>	
<b>DSC test</b>			DIN 53765
melting point	°C	<b>133</b>	
enthalpy change	J/g	<b>215</b>	

1) Compression moulding of test specimen according to ISO 1872-2

2) Conditioning of test specimen: temp. 23 °C, relative humidity 50 %, 24 hours

3) Speed of testing: 50 mm/min

4) Test specimen according to ISO 527-2 type 1BA, thickness 2 mm

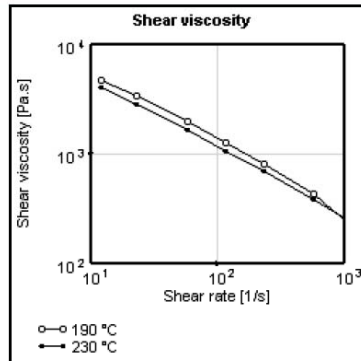
5) Determined in Rhodacal-DS10 at 75 °C, 3 MPa, thickness 1 mm

All information supplied by or on behalf of the SABIC Europe companies in relation to its products, whether in the nature of data, recommendations or otherwise, is supported by research and believed reliable, but the relevant SABIC Europe company assumes no liability whatsoever in respect of application, processing or use made of the above-mentioned information or products, or any consequence thereof. The user undertakes all liability in respect of the application, processing or use of the above-mentioned information or product, whose quality and other properties he shall verify, or any consequence thereof. No liability whatsoever shall attach to any of the SABIC Europe companies for any infringement of the rights owned or controlled by a third party in intellectual, industrial or other property by reason of the application, processing or use of the above-mentioned information or products by the user.



## SABIC® HDPE B5823

High density polyethylene for Pipe extrusion



**General information.** The SABIC® HDPE product range for blow moulding and extrusion is produced in a slurry – or gasphase process using a Cr catalyst. The primary characteristic of SABIC® HDPE grades is a broad molecular weight distribution, which ensures excellent behaviour during extrusion. Additional characteristics are a high purity, excellent stability during processing and a high intrinsic toughness. The carefully balance of environmental stress crack resistance and stiffness is becoming visible on grade level. Typical application area: bottles, cans, containers and technical articles, sheet and thermoforming, profiles and tubes for pressure less applications.

**Health, Safety and Food Contact regulations.** Detailed information is provided in the relevant Material Safety Datasheet and or Standard Food Declaration, available on the Internet ([www.SABIC-europe.com](http://www.SABIC-europe.com)). Additional specific information can be requested via your local Sales Office.

**Quality.** SABIC Europe is fully certified in accordance with the internationally accepted quality standard ISO 9001-2000. It is SABIC Europe's policy to supply materials that meet customers specifications and needs and to keep up its reputation as a pre-eminent, reliable supplier of e.g. polyethylenes.

**Storage and handling.** Polyethylenes resins (in pelletised or powder form) should be stored in such a way that it prevents exposure to direct sunlight and/or heat, as this may lead to quality deterioration. The storage location should also be dry, dust free and the ambient temperature should not exceed 50 °C. Not complying with these precautionary measures can lead to a degradation of the product which can result in colour changes, bad smell and inadequate product performance. It is also advisable to process polyethylene resins (in pelletised or powder form) within 6 months after delivery, this because also excessive aging of polyethylene can lead to a deterioration in quality.

**Environment and recycling.** The environmental aspects of any packaging material do not only imply waste issues but have to be considered in relation with the use of natural resources, the preservations of foodstuffs, etc. SABIC Europe considers polyethylene to be an environmentally efficient packaging material. Its low specific energy consumption and insignificant emissions to air and water designate polyethylene as the ecological alternative in comparison with the traditional packaging materials. Recycling of packaging materials is supported by SABIC Europe whenever ecological and social benefits are achieved and where a social infrastructure for selective collecting and sorting of packaging is fostered. Whenever 'thermal' recycling of packaging (i.e. incineration with energy recovery) is carried out, polyethylene -with its fairly simple molecular structure and low amount of additives- is considered to be a trouble-free fuel.

