



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΒΟΛΗΣ
ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEM)



ΔΗΜΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΔΗΜΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΘΗΝΑ, 2010



.....

Νικόλαος Ε. Δήμου

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέποντα για την εργασία καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, αλλά και για την πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γεώργιο Κούζιλο για την επικοινωνιακή συνεργασία κατά την εκπόνηση της. Τέλος αφιερώνω αυτή τη διπλωματική στους γονείς μου.

Νικόλαος Ε. Δήμου

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκβολή αποτελεί μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές τόσο για τη μορφοποίηση όσο και για την ανάμειξη πολυμερών. Κύριο τμήμα της γραμμής παραγωγής προϊόντων με την μέθοδο της εκβολής είναι ο εκβολέας. Ο εκβολέας που μελετάται και επιχειρείται να βελτιστοποιηθεί στην παρούσα εργασία φέρει μονή κεφαλή τύπου αράχνης.

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι ο εντοπισμός των καλύτερων τιμών των χαρακτηριστικών παραμέτρων του εκβολέα που καθορίζουν την ροή του επεξεργαζόμενου πολυμερούς. Έχει παρατηρηθεί ότι η ύπαρξη του ποδιού της αράχνης δημιουργεί ανωμαλίες στην επιφάνεια του παραγόμενου προϊόντος, με αρνητικές συνέπειες στην αντοχή του. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να αυξήσει την αποδοτικότητα της μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Με δεδομένο ότι οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες της ροής ποικίλουν κατά την παραγωγική διαδικασία (επεξεργαζόμενο υλικό, συνθήκες περιβάλλοντος, πίεση εισόδου στην μήτρα κ.α.), εξετάζονται οι βασικότερες μεταβλητές που αφορούν την γεωμετρία του εκβολέα και επηρεάζουν την ροή (μήκος εξόδου του εκβολέα, γεωμετρία του ποδιού της αράχνης). Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με μία σειρά προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας τα λογισμικά στο SolidWorks® και Comsol® χρησιμοποιώντας την μέθοδο Taguchi.

Η παρουσίαση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, δίνουν τον βαθμό εξάρτησης της ταχύτητας εξόδου υλικού και της αντοχής του εκβολέα με τις παραμέτρους που εξετάζονται και επιλέγονται οι βέλτιστες τιμές τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΚΒΟΛΗ.....	7
1.1 ΠΟΛΥΜΕΡΗ.....	7
1.2 ΕΚΒΟΛΗ.....	9
1.3 ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΜΕ ΚΕΦΑΛΗ ΑΡΑΧΝΗΣ	15
1.4 ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	29
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	29
2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD	30
2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ CAE	31
2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	32
2.5 COMSOL.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI	39
3.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ TAGUCHI	39
3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI	41
3.3 ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI.....	42
3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI	43
3.5 ΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI	45
3.6 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI	46
3.7 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	47
3.8 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ της ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ (ΑΝΟΝΑ)	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	51
4.1 ΣΤΟΧΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	51
4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΕΚΒΟΛΕΑ.....	52
4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ	54
4.4 ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΕΚΒΟΛΕΑ.....	55
4.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	56
4.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	59
4.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	60
• 1° Βήμα.....	60
• 2° Βήμα.....	61
• 3° Βήμα.....	63
• 4° Βήμα.....	69
• 5° Βήμα.....	70
• 6° Βήμα.....	71
• 7° Βήμα.....	73
• 8° Βήμα.....	77
• 9° Βήμα.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	82
5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	82
5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΟΝΑ	85
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΚΒΟΛΗ

1.1 ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Τα πολυμερή που απαντώνται στη φύση είναι αυτά που προέρχονται από φυτά και ζώα. Τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν το ξύλο, το καουτσούκ, το βαμβάκι, το μαλλί, το δέρμα και το μετάξι. Άλλα φυσικά πολυμερή όπως οι πρωτεΐνες τα ένζυμα, το άμυλο κι η κυτταρίνη (κελλουλόζη), είναι σημαντικά στις βιολογικές και φυσιολογικές διεργασίες στα φυτά και τα ζώα. Σύγχρονα επιστημονικά ερευνητικά εργαλεία έχουν κάνει δυνατή την εξακρίβωση της μοριακής δομής αυτής ομάδας υλικών και την ανάπτυξη πολυάριθμων πολυμερών, τα οποία συντίθενται από μικρά οργανικά μόρια. Στην πραγματικότητα, από τη λήξη του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, στο πεδίο των υλικών έχει ουσιαστικά σημειωθεί επανάσταση με την άφιξη των συνθετικών πολυμερών. Τα συνθετικά, μπορούν να παραχθούν φθηνά, και οι ιδιότητες τους είναι εύκολο να ελεγχθούν σε βαθμό που πολλά να είναι ανώτερα από τα αντίστοιχα φυσικά. Σε πολλές εφαρμογές εξαρτήματα από μέταλλο και ξύλο έχουν αντικατασταθεί από πλαστικά, τα οποία έχουν ικανοποιητικές ιδιότητες και μπορούν να παραχθούν με χαμηλό κόστος. Όπως με τα μέταλλα και τα κεραμικά, οι ιδιότητες των πολυμερών είναι περίπλοκα συνδεδεμένες με τα δομικά στοιχεία του υλικού.

Τα περισσότερα πολυμερή αποτελούνται από πολύ μεγάλα μόρια -αλυσίδες ατόμων άνθρακα, στα οποία συνδέονται διάφορα άτομα ή ρίζες. Τα μακρομόρια αυτά μπορούν να γίνουν αντιληπτά ότι αποτελούνται από ομάδες μονομερών, μικρότερες δομικές μονάδες, οι οποίες επαναλαμβάνονται κατά μήκος της αλυσίδας. Παρουσιάστηκε η δομή μερικών από τα χημικώς απλά πολυμερή (π.χ. πολυαιθυλένιο, πολυβινυλοχλωρίδιο και πολυπροπυλένιο).

Τα μοριακά βάρη για υψιπολυμερή μπορούν να ξεπερνούν το ένα εκατομμύριο. Εφόσον όλα τα πολυμερή δεν είναι όλα του ίδιου μεγέθους, υπάρχει μια κατανομή μοριακών βαρών. Το μήκος των αλυσίδων μπορεί επίσης να διευκρινιστεί με το βαθμό πολυμερισμού, τον αριθμολό ομάδων μονομερών ανά μέσο μόριο.

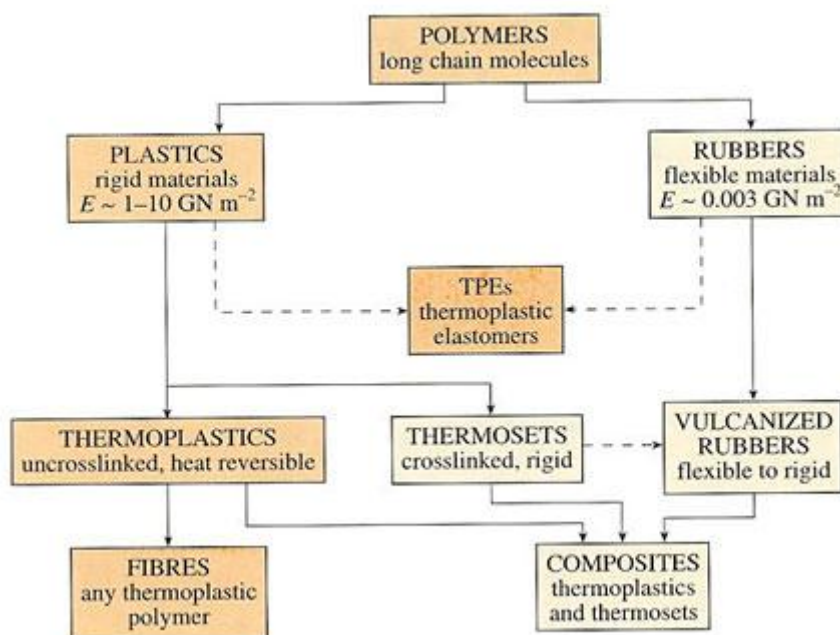
Συζητήθηκαν αρκετά μοριακά χαρακτηριστικά που έχουν επίδραση στις ιδιότητες των πολυμερών. Η μοριακή διαπλοκή συμβαίνει όταν οι αλυσίδες λαμβάνουν συνεστραμμένα, περιελιγμένα, ή έκκεντρα σχήματα ή περιγράμματα (contours). Αναφορικά με τη μοριακή δομή, πλέον των ισοτακτικών, συνδιοτακτικών και ατακτικών στερεοϊσομερών και των *cis* και *trans* γεωμετρικών ισομερών, είναι δυνατές οι γραμμικές, διακλαδωμένες, διασταυρωμένες, και δικτυωμένες δομές. Στα είδη συμπολυμερών περιλαμβάνονται τα τυχαίας δομής και τα εναλλασσόμενης δομής, τα μπλοκ και τα συμπολυμερή εμβολιασμού.

Όταν η συσσώρευση (πακετάρισμα) των μοριακών αλυσίδων είναι τέτοιο ώστε να παράγει μια τακτική ατομική διαμόρφωση, λέμε ότι υπάρχει η συνθήκη της κρυσταλλικότητας. Εκτός από τα πλήρως άμορφα, τα πολυμερή μπορούν να εμφανίζουν ουσιαστικά

πλήρη και μερική κρυσταλλικότητα. Στη δεύτερη περίπτωση, οι κρυσταλλικές περιοχές διασπείρονται μεταξύ των άμορφων περιοχών. Η κρυσταλλικότητα διευκολύνεται στα απλά από χημικής πλευράς πολυμερή που έχουν κανονική και συμμετρική δομή αλυσίδας. Οι μονοκρύσταλλοι πολυμερών μπορούν να αναπτύσσονται από αραιά διαλύματα σαν λεπτά πλακίδια που έχουν δομή αναδιπλωμένης αλυσίδας. Πολλά ημι-κρυσταλλικά πολυμερή σχηματίζουν σφαιρουλίτες. Κάθε σφαιρουλίτης αποτελείται από ένα σύνολο κρυσταλλιτών που σχηματίζουν ταινιοειδείς φυλλώδεις δομές αναδιπλωμένης αλυσίδας, οι οποίες αναπτύσσονται ακτινωτά από το κέντρο προς τα έξω.

Τα πολυμερή ανάλογα με τον τρόπο μορφοποίησής τους διακρίνονται σε:

- ✓ **Θερμοπλαστικά ή πλαστομερή ή πλαστικά (thermoplastics)**
- ✓ **Θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά (thermosettings)**
- ✓ **Ελαστομερή ή ελαστικά (elastomers ή rubbers)**



Σχήμα 1.1 Τύποι πολυμερών

1.2 ΕΚΒΟΛΗ

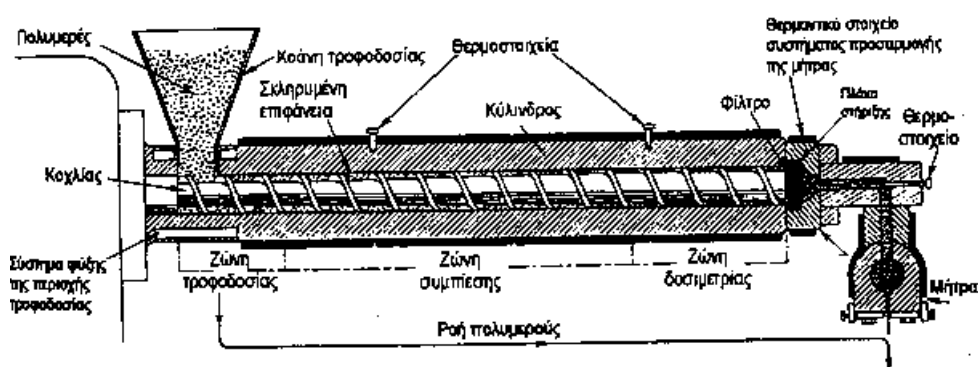
Η εκβολή αποτελεί μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές τόσο για τη μορφοποίηση όσο και για την ανάμειξη πολυμερών. Περίπου το 60% των πλαστικών παγκοσμίως μορφοποιούνται με τη μέθοδο αυτή. Στα προϊόντα που μορφοποιούνται με εκβολή ανήκουν οι σωλήνες, ράβδοι, προφίλ (όπως πλαίσια σε παράθυρα), 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 κοχλίου** και **δύο κοχλίων**.

Διάταξη του εκβολέα

Ο εκβολέας είναι η μονάδα παροχής τήγματος στη διαδικασία της εκβολής. Παρέχει τήγμα του πολυμερούς σε ομοιόμορφη θερμοκρασία και σύσταση με έναν σταθερό και ελεγχόμενο ρυθμό. Οι μηχανές αυτές εξελίχθηκαν, από τις πρώτες διατάξεις που κάποτε μετέτρεψαν τους εκβολείς ελαστικών, στις σύνθετες μονάδες παραγωγής τήγματος που χρησιμοποιούνται τώρα. Οι περισσότεροι εκβολείς που είναι σε χρήση είναι μονοκόχλιοι (single-screw extruders). Οι μηχανές με δύο (twin-screw) ή πολλαπλούς κοχλίες (multiple-screw) είναι πιο πρόσφατη εξέλιξη.

Επίσης υπάρχουν εκβολείς για πιο ειδικές εφαρμογές όπως ο εκβολέας ελαστικού τήγματος (elastic melt extruder) και η γριναζωτή αντλία (gear pump).



Σχήμα 1.2 Κύρια τμήματα εκβολέα

Η λειτουργία των περισσότερων εκβολέων γίνεται με την κάθοδο των πολυμερών υπό μορφή κόκκων, σκόνης ή φολιδίων από τη χοάνη τροφοδοσίας στο άνοιγμα μεταξύ του περιστρεφόμενου κοχλίας (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.

Ο κοχλίας περιστρέφεται από το σύστημα μετάδοσης κίνησης που αποτελείται από ένα κινητήρα (motor) και ένα κιβώτιο ταχυτήτων (gear box) για τον έλεγχο των στροφών του κοχλίας. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης εξασφαλίζει τις απαιτήσεις της διάταξης σε μηχανική ενέργεια. Η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια μιας διάταξης εκβολής αυξάνεται όταν:

- Αυξάνεται η ογκομετρική παροχή εξόδου
- Αυξάνεται η διάμετρος του κυλινδρικού σώματος
- Αυξάνεται το μήκος του κοχλίας και
- Απαιτείται υψηλή ογκομετρική παροχή εξόδου σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι απαιτήσεις σε μηχανική ενέργεια επίσης εξαρτώνται από τον τύπο της πολυμερικής ρητίνης και το σχεδιασμό της μήτρας. Το σύστημα μεταφοράς θερμότητας αποτελείται από θερμαντικά στοιχεία ηλεκτρικής αντίστασης (heating elements), σύστημα ψύξης στην περιοχή της τροφοδοσίας και έναν αριθμό θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία είναι συνδεδεμένα με τους ρυθμιστές θερμοκρασίας οι οποίοι ενεργοποιούν τα θερμαντικά ή ψυκτικά στοιχεία ώστε να διατηρηθεί το επιθυμητό θερμοκρασιακό προφίλ του εκβολέα. 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. Το κύριο σώμα της διάταξης εκβολής αποτελείται από τον κύλινδρο (barrel) και τον κοχλίας (screw).

Ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και η εσωτερική επιφάνεια είναι ειδικά επεξεργασμένη για να έχει αντίσταση στην τριβή και στη διάβρωση. Η εσωτερική διάμετρος του κυλίνδρου είναι μια σημαντική παράμετρος που καθορίζει το μέγεθος και τη δυναμικότητα του εκβολέα. Με τη βοήθεια του ηλεκτροκινητήρα (motor) ο κοχλίας περιστρέφεται αξονικά μέσα στον κύλινδρο, προωθώντας το πολυμερές που τροφοδοτείται μέσω της χοάνης τροφοδοσίας (hopper).

Κατά τη διαδρομή προς την έξοδο το προϊόν τήκεται. Το τήγμα οδηγείται σε μια πλάκα όπου βρίσκονται στερεωμένα μεταλλικά δισκία με διάφορα ανοίγματα, που παίζουν το ρόλο του φίλτρου. Συγκρατούν δηλαδή ακαθαρσίες και ξένα σώματα που μπορεί να βρίσκονται μέσα στο πολυμερές. Μετά το φίλτρο, το τήγμα του πολυμερούς οδηγείται στην κεφαλή του εκβολέα και στη συνέχεια βγαίνει από τη μήτρα (die), έχοντας πάρει τη μορφή που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε. Πρέπει να σημειωθεί ότι, μετά την έξοδο από τον εκβολέα, το μορφοποιημένο τήγμα του πολυμερούς πρέπει να σταθεροποιηθεί.

Η τήξη συντελείται από τους ακόλουθους μηχανισμούς:

- Με τη μεταφορά θερμότητας από τα θερμαντικά στοιχεία
- Με την διάτμηση η οποία προκαλείται από την κίνηση του κοχλίας.

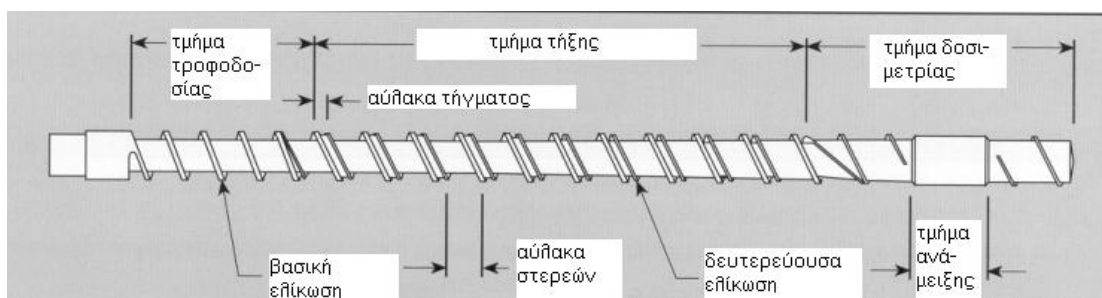
Εξοπλισμός του εκβολέα

• Κοχλίας

Ο κοχλίας εκτελεί σημαντικές λειτουργίες όπως:

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

Στο δοσιμετρικό κοχλία ενός εκβολέα διακρίνουμε τρία τμήματα: το τμήμα τροφοδοσίας (**feed section**), το τμήμα συμπίεσης ή τήξης (**compression section**) και το τμήμα δοσιμετρίας (**metering section**). Η ακριβής λειτουργία των τμημάτων αυτών αναλύεται παρακάτω.



Σχήμα 1.3 Τμήματα δοσιμετρικού κοχλία

Τμήμα Τροφοδοσίας

Η λειτουργία του τμήματος αυτού έχει ως σκοπό την προθέρμανση του πολυμερούς και την μεταφορά του στο επόμενο τμήμα. Το τμήμα 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. Το τμήμα αυτό σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει τη μεγαλύτερη δυνατότητα μεταφοράς στα επόμενα τμήματα του κοχλία και να μην παρουσιασθεί έλλειψη του υλικού.

Τμήμα Συμπίεσης ή Τήξης

Κατά μήκος του τμήματος αυτού 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.

Τμήμα Δοσιμετρίας

Στο τμήμα αυτό 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 πήξης του πολυμερούς. Η ανάπτυξη υψηλών διατμηματικών τάσεων στο τμήμα αυτό 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 κοχλίου 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.

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

- **Κύλινδρος του εκβολέα**

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 δύσπηκτα πολυμερή. Στους περισσότερους κυλίνδρους 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 κυλίνδρους 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.

• **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.

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

• **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. 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.

- **Πίνακας ελέγχου**

Τα όργανα ελέγχου για τον κινητήρα και για τη θερμοκρασία του κυλίνδρου είναι τοποθετημένα σε μια καμπίνα (control cabinet). Μερικές φορές η καμπίνα είναι ανεξάρτητη μονάδα τοποθετημένη κοντά στον εκβολέα, αλλά τελευταία συνηθίζεται να προσαρμόζεται στην ίδια βάση με τον εκβολέα. Τα χειριστήρια ελέγχου της θερμοκρασίας μπορούν να επιλεγθούν ανάμεσα σε διάφορους τύπους ανάλογα με τις ανάγκες της μηχανής και τον βαθμό πολυπλοκότητας της εγκατάστασης παραγωγής.

1.3 ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΜΕ ΚΕΦΑΛΗ ΑΡΑΧΝΗΣ

Στην βιομηχανία παραγωγής πλαστικών σωλήνων συναντάμε πολλούς τύπους κεφαλών αράχνης. Τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν τον τύπο της κεφαλής αναφέρονται κυρίως στα πόδια της αράχνης και έχουν να κάνουν με:

- Την γεωμετρία των ποδιών
- Τον αριθμό των ποδιών
- Τον αριθμό των δακτυλίων που βρίσκονται τα πόδια
- Το μέγεθος των δακτυλίων της αράχνης

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 1.4, Σχήμα 1.5 και Σχήμα 1.6) βλέπουμε λίγα παραδείγματα της ποικιλίας των κεφαλών αράχνης που συναντάμε στην βιομηχανία.



Σχήμα 1.4 Διπλή κεφαλή αράχνης



Σχήμα 1.5 Μονή κεφαλή αράχνης



Σχήμα 1.6 Διάφορα μεγέθη κεφαλών αράχνης

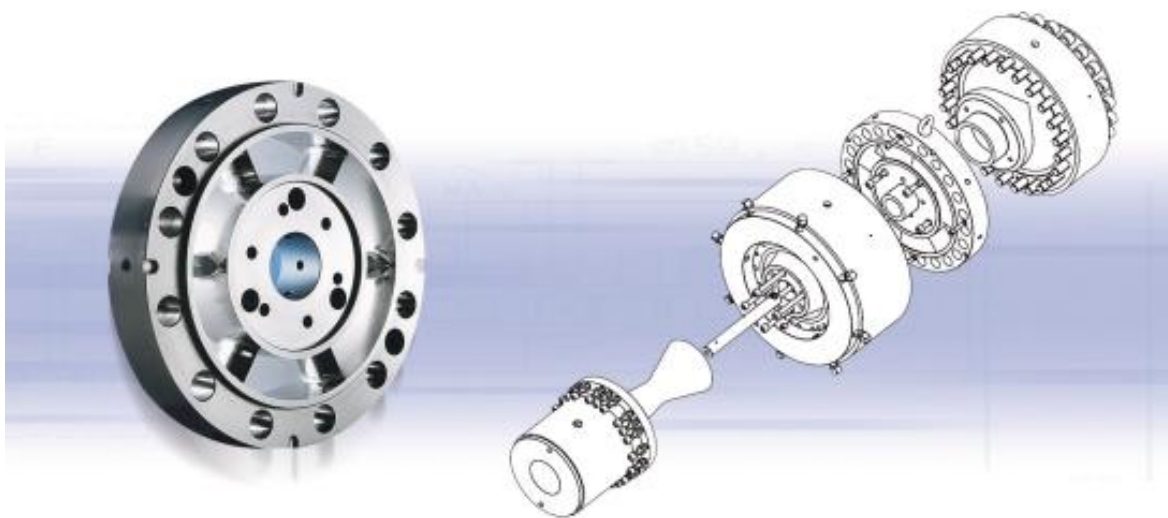
Επίσης, ποικίλουν τα μεγέθη και η γεωμετρία της ίδιας της μήτρας (Σχήμα 1.7 και Σχήμα 1.8).

Αυτό συμβαίνει κυρίως για δύο λόγους:

- a) Έχουμε διαφορετικές απαιτήσεις κάθε φορά στο μέγεθος και την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος.
- b) Προσπάθεια αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν κατά την παραγωγική διαδικασία. Αυτά έχουν να κάνουν κυρίως με την αντοχή της μήτρας και με τις ατέλειες που προκύπτουν στο παραγόμενο προϊόν λόγω της ύπαρξης της κεφαλής αράχνης.

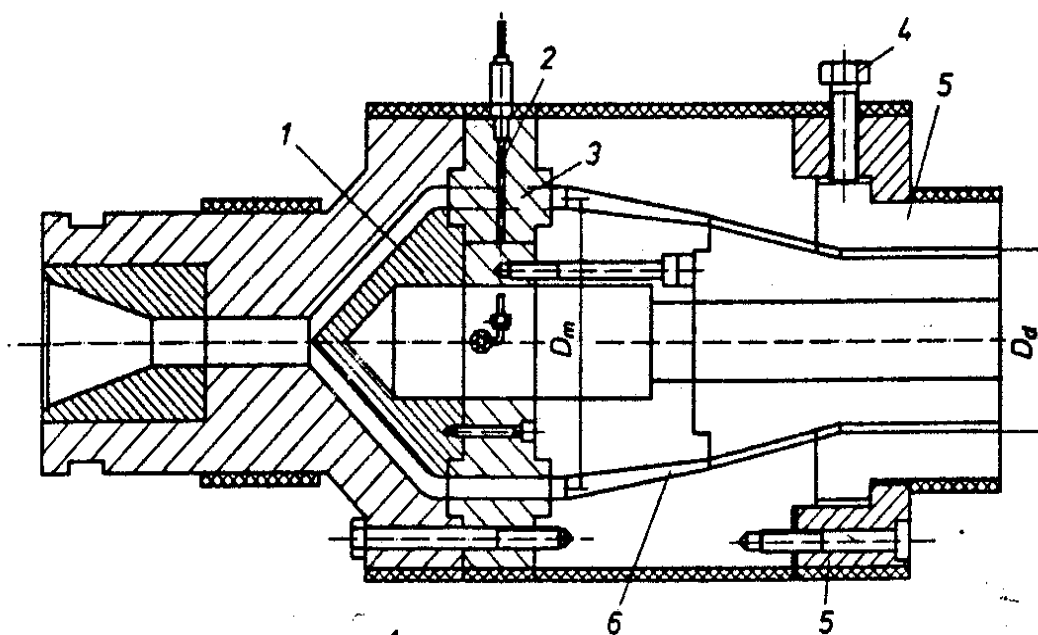


Σχήμα 1.7 Τμήματα μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα με κεφαλή αράχνης



Σχήμα 1.8 Συναρμολόγηση μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα με κεφαλή αράχνης

Στο Σχήμα 1.9 φαίνεται μια κεφαλή κεντρικής τροφοδοσίας με αράχνη και ορισμένα μέρη της.



Σχήμα 1.9 Τομή κεφαλής κεντρικής τροφοδοσίας με αράχνη

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

D_m : μέση διάμετρος της αράχνης,

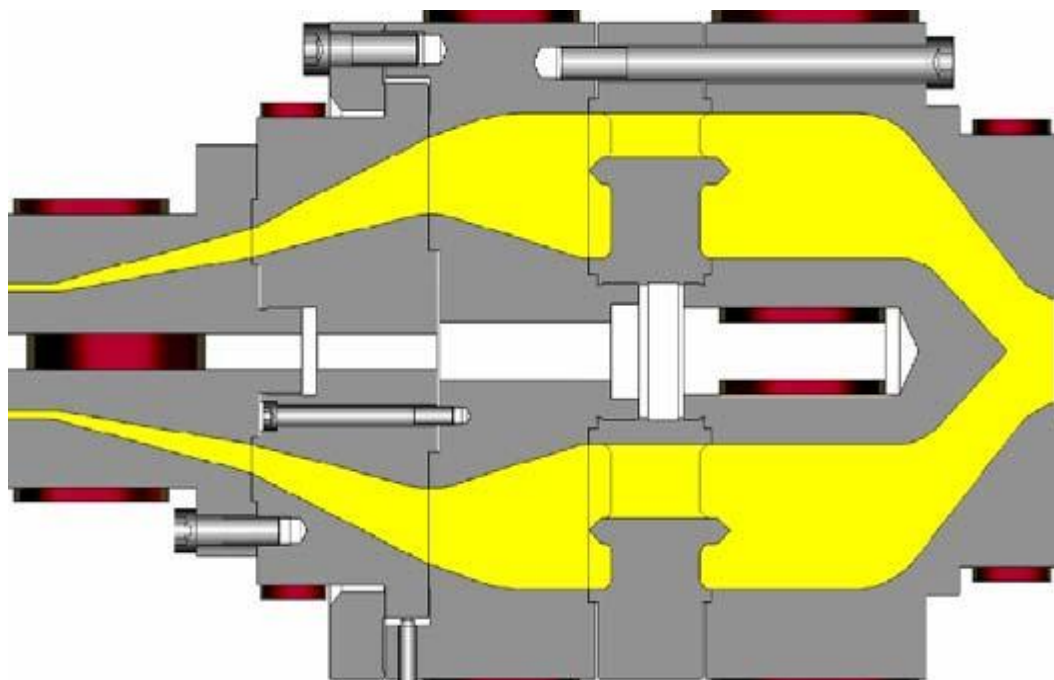
D_d : εξωτερική διάμετρος της μήτρας

➤ Ροή υλικού μέσα από την μήτρα

Το ρεύμα του τήγματος που παρέχει ο εκβολέας σε ένα κυλινδρικό κανάλι ροής, μετασχηματίζεται σε μια δακτυλιοειδή ροή. Το τήγμα εκτρέπεται στη ζώνη της αράχνης σε ξεχωριστά ρεύματα και ρέει γύρω από τα πόδια της αράχνης. Ακολουθεί η συγκλίνουσα περιοχή του πυρήνα στην οποία τα ξεχωριστά ρεύματα ξαναενώνονται. Στο τέλος βρίσκεται η

μήτρα με τα παράλληλα τοιχώματα. Ο λόγος της διαμέτρου της αράχνης προς τη διάμετρο εξόδου για κεφαλές σωλήνων είναι συνήθως 1,4-1,6 για PVC και 2 για PE, ωστόσο αυτές οι τιμές εξαρτώνται και από τη διάμετρο της μήτρας.

Τα βασικά τμήματα της κεφαλής, όπως η στήριξη της αράχνης και ο δακτύλιος εξόδου είναι γενικά εναλλάξιμα ώστε μια κεφαλή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες γεωμετρίες. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη ροή στη μήτρα, αυτή μπορεί να μετακινηθεί ακτινικά με τη βοήθεια κοχλιών κεντραρίσματος που είναι τοποθετημένοι περιφερειακά. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένας δακτύλιος στήριξης της μήτρας.



Σχήμα 1.10 Ροή πολυμερούς σε μήτρα εκβολής πλαστικού σωλήνα με κεφαλή αράχνης

➤ **Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα**

Οι κεφαλές με αράχνη ήταν οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες στο παρελθόν επειδή λόγω της κεντρικής τροφοδοσίας τους επιτρέπουν μια καλή διανομή του τήγματος ανεξάρτητα από τις συνθήκες λειτουργίας.

Ωστόσο έχουν το μειονέκτημα ότι τα πόδια της αράχνης αφήνουν σημάδια ροής. Αυτά δεν είναι πάντα εμφανή όπως τοπικές στενώσεις και ίχνη αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν στη δομή του προϊόντος δημιουργώντας μηχανικά αδύναμες περιοχές.

Ο υψηλός βαθμός προσανατολισμού του τήγματος στην περιοχή των ποδιών της αράχνης είναι μεταξύ άλλων ένας λόγος για τη δημιουργία σημαδιών ροής. Ο προσανατολισμός δημιουργείται από της υψηλές κλίσεις της ταχύτητας όταν το τήγμα προσκολλάται στα τοιχώματα και ειδικά λόγω της μεγάλης επέκτασης μέρους του τήγματος κοντά στο τέλος των ποδιών της αράχνης.

Διαφορές στη πυκνότητα λόγω διαφορών στη θερμοκρασία του τήγματος και της αράχνης μπορούν επίσης να παίξουν έναν ρόλο.

Προκειμένου να μειώσουμε το σημάδια ροής, τα οποία είναι αναπόφευκτα με τη χρήση κεφαλών με αράχνη, υπάρχουν διάφορες τεχνικές.

- ✓ Αύξηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου παραμονής της μάζας του υλικού στην κεφαλή.
- ✓ Ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή στη ζώνη της αράχνης
- ✓ Δημιουργώντας μια ομοιόμορφη δομή σε ολόκληρη την περιφέρεια της κεφαλής προσανατολίζοντας τα μόρια κατά μήκος και ανάμεσα στα πόδια της αράχνης.
- ✓ Αλλαγή της γεωμετρίας των ποδιών της αράχνης.

Για να επιτευχθεί αυτό εφαρμόζονται διάφορες λύσεις, στην πράξη όμως, αυτό που γίνεται σχεδόν πάντα, είναι ο εξαναγκασμός του τήγματος να ακολουθήσει μια έντονα συγκλίνουσα ροή μετά από τα πόδια της αράχνης. Οι κεντρικά τροφοδοτούμενες κεφαλές με αράχνη πρέπει να αντέχουν σε πιέσεις άνω των 600bar διότι τα πολυμερικά τήγματα κάτω από κατάλληλες συνθήκες μπορούν να αναπτύξουν πιέσεις αυτής της τάξεως. Γι' αυτό τα πόδια της αράχνης πρέπει να διαστασιολογούνται έτσι ώστε να αντέχουν με ασφάλεια στις δυνάμεις που προκύπτουν από τις υψηλές πιέσεις. Από πλευρά μηχανικής αντοχής οι εξωτερικές διάμετροι των κεφαλών με αράχνη δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 700mm.

➤ **Αρχές σχεδιασμού κεφαλής με αράχνη**

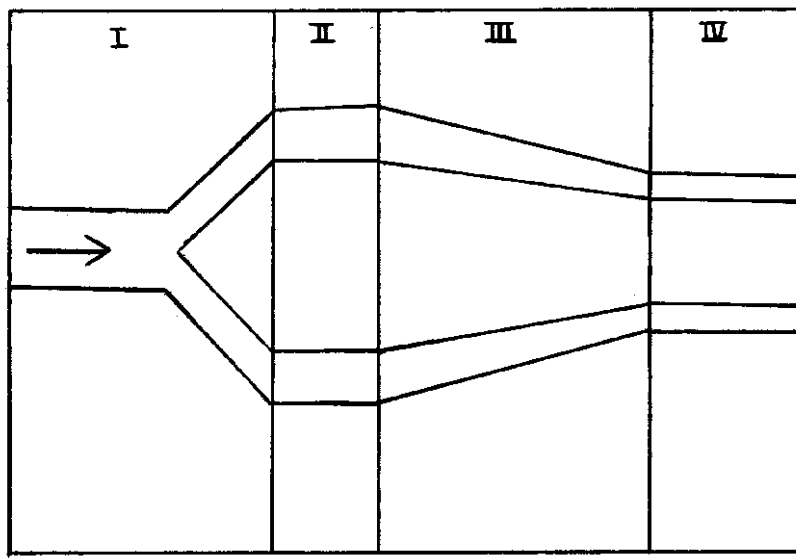
Στις κεφαλές με αράχνη υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές ζώνες οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του καναλιού ροής της κεφαλής και φαίνονται στο Σχήμα 1.11:

α. Η ζώνη εκτροπής (I), στην οποία το τήγμα που εξέρχεται από τον εκβολέα, εκτρέπεται από τον άξονα εκβολής και διανέμεται μέσω μιας δακτυλιοειδούς διατομής.

β. Η ζώνη της αράχνης (II), στην οποία το αρσενικό της μήτρας συγκρατείται από τα πόδια της αράχνης.

γ. Η ζώνη χαλάρωσης (III), όπου η ροή γίνεται ομοιόμορφη κατά μήκος του καναλιού ροής.

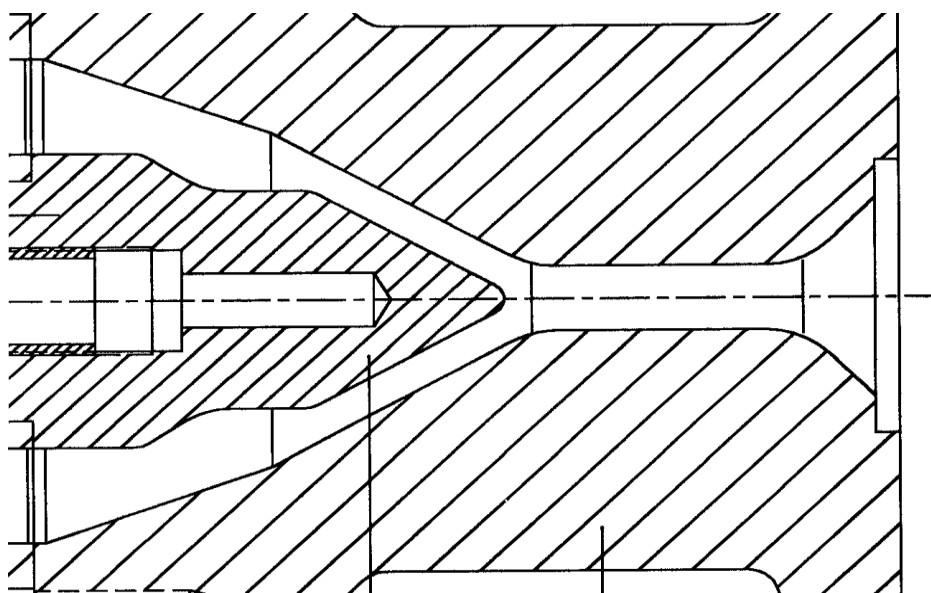
δ. Η παράλληλη ζώνη της μήτρας (IV), όπου το εκβαλλόμενο προϊόν διαμορφώνεται στις επιθυμητές διαστάσεις.



Σχήμα 1.11 Ζώνες του καναλιού ροής της κεφαλής

Η επιλογή των βασικών διαστάσεων της κεφαλής και της μήτρας εξαρτάται από το υλικό της κατεργασίας και από τις επιθυμητές διαστάσεις του τελικού προϊόντος.

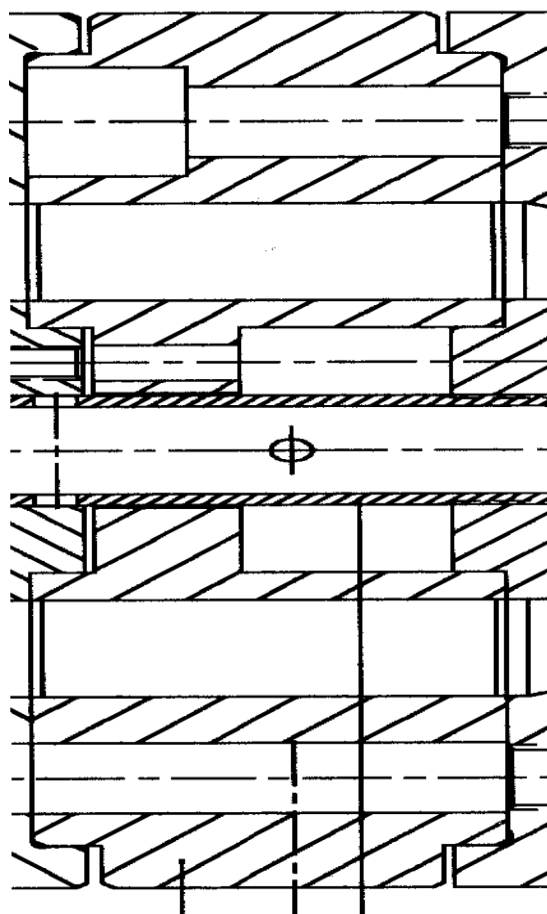
✓ Η ζώνη εκτροπής του τήγματος περιλαμβάνει τον λαιμό της κεφαλής και τον κώνο του αρσενικού της κεφαλής. Πριν από τον κώνο το τήγμα διέρχεται από μια ευθύγραμμη περιοχή κυκλικής διατομής στον λαιμό της κεφαλής όπου του προσδίδεται θερμότητα, και οδηγείται ομαλά στον κώνο. Τέλος, στην άλλη άκρη της κεφαλής υπάρχει ένα κωνικό τμήμα που αποτελεί την είσοδο της κεφαλής.



Σχήμα 1.12 Ζώνη διανομής του τήγματος

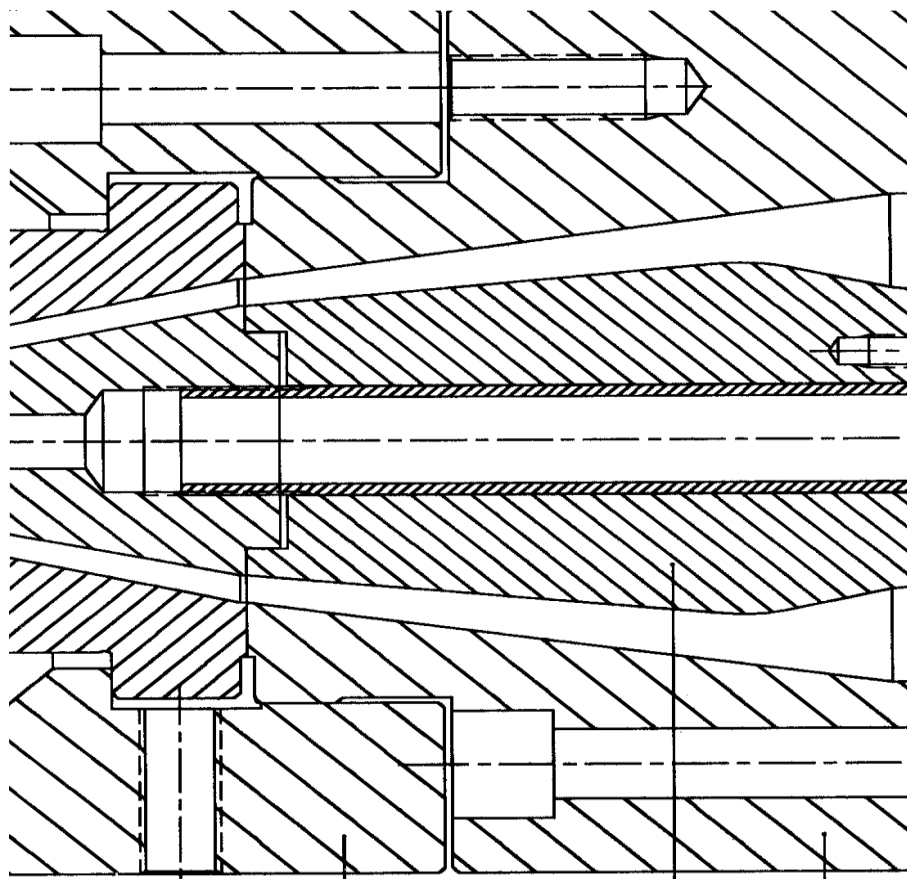
✓ Στις κεφαλές με αράχνη η διάμετρος D_m και η διατομή στην περιοχή της αράχνης σχεδιάζονται μεγαλύτερες από διάμετρο D_d της μήτρας και τη διατομή εξόδου. Αυτό επιτρέπει στο τήγμα που έχει χωριστεί στην περιοχή της αράχνης να επανενωθεί γιατί έτσι μόνο προκύπτει η συγκλίνουσα περιοχή. Επιπλέον με την ίδια κεφαλή μπορούμε να παράγουμε σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων αλλάζοντας μόνο τη διάμετρο της μήτρας. Ο σκοπός στον σχεδιασμό αυτής της ζώνης είναι να γίνουν τα πόδια της αράχνης με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν στις δυνάμεις λόγω της πίεσης και στις διατμητικές τάσεις και να έχουν την ελάχιστη επίδραση στη ροή. Γι' αυτό οι ρεολογικοί και μηχανικοί παράγοντες είναι ιδιαίτερα διαπλεκόμενοι σε αυτή τη ζώνη. Έτσι τα πόδια της αράχνης :

- Δεν πρέπει να είναι μακρύτερα από 30-80mm,
- παχύτερα από 9-12mm και
- αριθμός τους να αυξάνεται περίπου με το τετράγωνο της διαμέτρου.



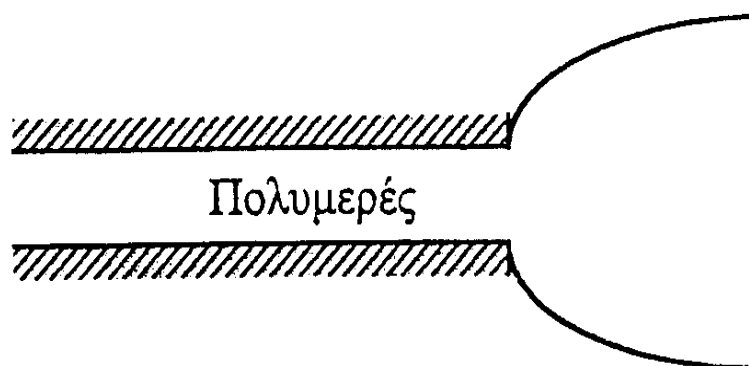
Σχήμα 1.13 Ζώνη διανομής του τήγματος

✓ Η ζώνη χαλάρωσης ξεκινά αμέσως μετά την αράχνη και καταλήγει στην παράλληλη περιοχή της μήτρας. Όπως προαναφέρθηκε η περιοχή αυτή πρέπει να είναι συγκλίνουσα. Στην πράξη η κλίση αυτή μπορεί να φτάσει τις 30° στην περιοχή της μήτρας στην περίπτωση εκβολής PE χωρίς να επηρεάζεται το υλικό.



Σχήμα 1.14 Ζώνη χαλάρωσης

✓ Στην παράλληλη ζώνη της μήτρας το τήγμα του πολυμερούς διογκώνεται εξερχόμενο από τη μήτρα (swelling) κυρίως σε πολυμερή με μεγάλο ιξώδες όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15.



Σχήμα 1.15 Διογκωση του πολυμερούς κατά την έξοδό του από τη μήτρα

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ανακατανομή των ροϊκών γραμμών κατά την έξοδο του ρευστού (Νευτωνική διόγκωση, μέχρι 19%), στην επίδραση της μνήμης εξόδου, στην απελευθέρωση κάθετων τάσεων στην έξοδο και στη θερμική διόγκωση. Ωστόσο, η εξωτερική διατομή της μήτρας συνήθως σχεδιάζεται μεγαλύτερη από την επιθυμητή διατομή του σωλήνα, έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η συρρίκνωση του υλικού.

➤ **Κριτήρια σωστού σχεδιασμού και υλικά για κεφαλές εκβολής**

Οι βασικές διαστάσεις του συνολικού καναλιού ροής μέσα στην κεφαλή οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν, επιλέγονται με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- Επαρκής όγκος του καναλιού ροής για να αποφευχθούν εσωτερικές τάσεις στον σωλήνα εξασφαλίζοντας κατάλληλο χρόνο παραμονής του τήγματος μέσα στην κεφαλή. Εδώ πρέπει να ληφθεί υπόψη ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος παραμονής του συγκεκριμένου υλικού.
- Όταν επιλέγονται οι διαστάσεις δεν πρέπει να υπερβαίνονται οι μέγιστες αναλογίες των διατομών προκειμένου να αποφευχθούν υπερβολικές πιέσεις οπισθέλκουσας. Οι τελευταίες μειώνουν την παροχή και επομένως τον ρυθμό παραγωγής. Επίσης και το ελάχιστο αυτών των αναλογιών πρέπει να τηρείται αλλιώς θα δημιουργούνται ορατές γραμμές ροής.
- Απότομες αλλαγές της διαμέτρου του καναλιού ροής δημιουργούν περιοχές στροβιλισμού της ροής και πρέπει να αποφεύγονται. Επίσης πρέπει να αποφεύγονται ασυνέχειες, εμπόδια και ανωμαλίες στη ροή του υλικού.

➤ **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 και στιβαρότητα
- Να έχουν επαρκή επιφανειακή σκληρότητα
- Να μπορούν εύκολα να φινιριστούν σε μια ικανοποιητική επιφάνεια (χωρίς πορώδεις)
- Να ανταποκρίνονται επαρκώς σε μια απλή θερμική καταπόνηση
- Να έχουν ελάχιστη τάση στρέβλωσης και αλλαγής διαστάσεων κατά τη θερμική τους καταπόνηση
- Να είναι ανθεκτικά σε χημική διάβρωση
- Να παρέχουν δυνατότητα επιμετάλλωσης
- Να έχουν καλή θερμική αγωγιμότητα
- Να μην έχουν προένταση από παραμένουσες τάσεις

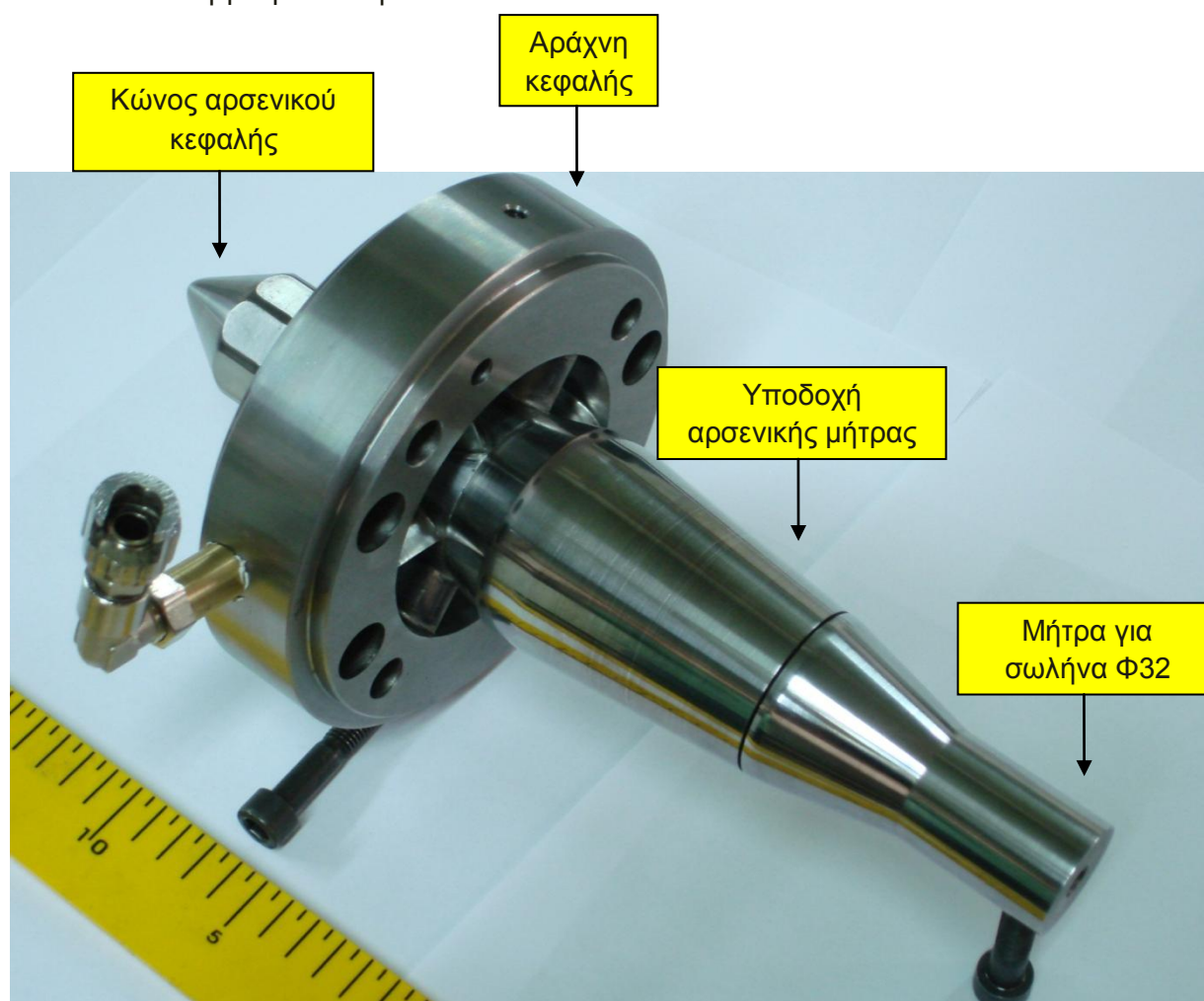
➤ **Επίσης, για να κάνουμε σωστή επιλογή πρέπει να λάβουμε υπόψη τα παρακάτω δεδομένα**

- Το υλικό της κατεργασίας και τον τύπο του πολυμερούς που θα μορφοποιηθεί με εκβολή
- Τη φύση και το μέγεθος των μηχανικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά την εκβολή του πολυμερούς
- Τις κατεργασίες που θα πραγματοποιηθούν για την κατασκευή της μήτρας.
- Τις θερμικές κατεργασίες και καταπονήσεις που θα υποστεί το υλικό της μήτρας και κατά πόσο το επηρεάζουν.

1.4 ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

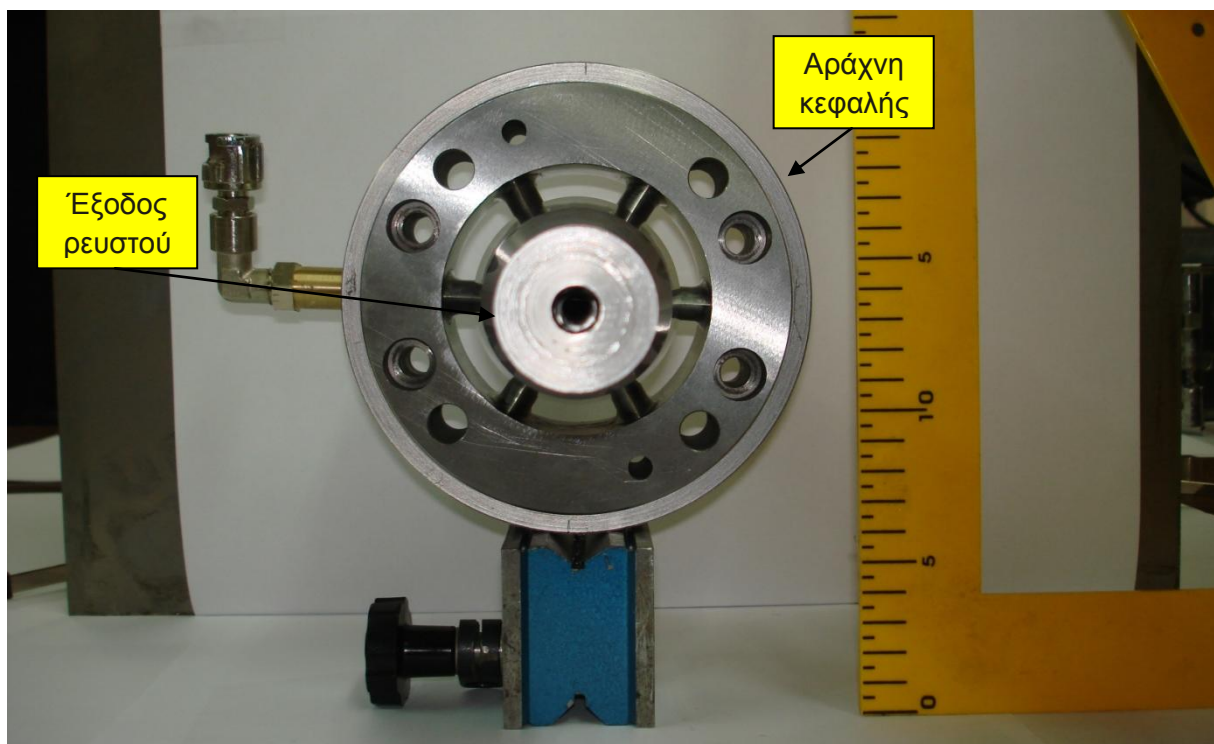
Παρακάτω, παρουσιάζουμε τη γενική διάταξη της μήτρας εκβολής του εργαστηρίου όπου διακρίνονται τα μέρη:

- Κώνος αρσενικού κεφαλής
- Αράχνη κεφαλής
- Υποδοχή αρσενικής μήτρας
- Μήτρα για σωλήνα Φ32

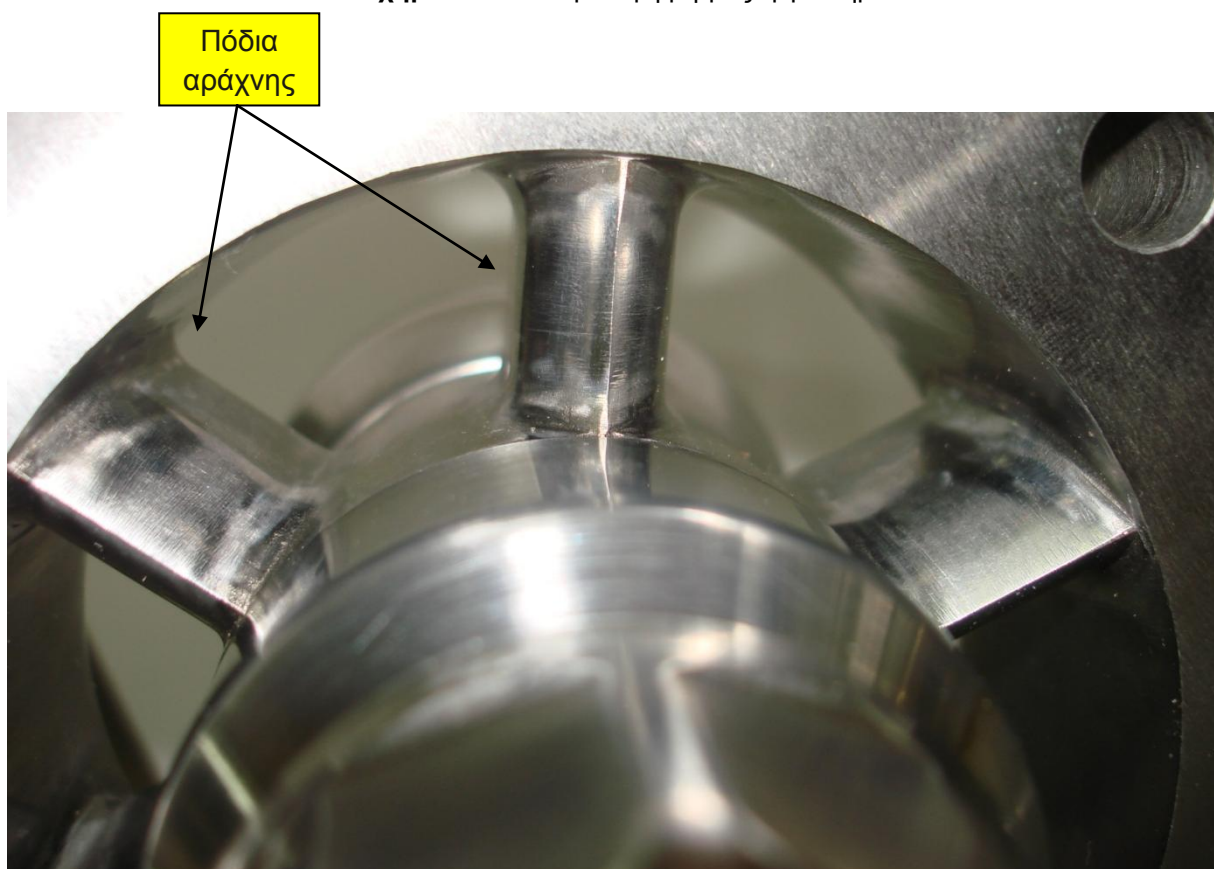


Σχήμα 1.16 Άποψη μήτρας από πίσω

Παρακάτω, παραθέτουμε φωτογραφίες της μήτρας εκβολής του εργαστηρίου:



Σχήμα 1.17 Πλάγια όψη μήτρας εργαστηρίου



Σχήμα 1.18 Πόδια αράχνης κεφαλής της μήτρας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

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

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού.

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

2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD

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

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

2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ CAE

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

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

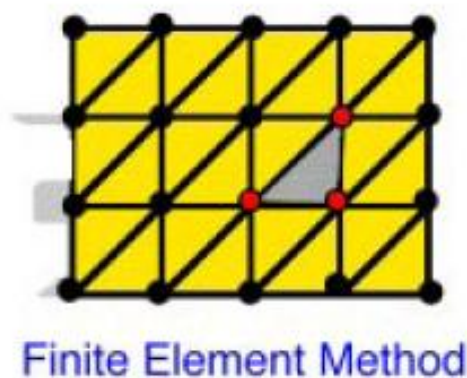
Επίσης, είναι διαθέσιμα πολλά εργαλεία βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Παρόλο που τα εργαλεία βελτιστοποίησης μπορούν να θεωρηθούν σαν εργαλεία CAE, συνήθως ταξινομούνται με ξεχωριστό τρόπο. Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες εξελίσσονται προς την κατεύθυνση αυτόματου σχεδιασμού με ολοκλήρωση των διαδικασιών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

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

2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η FEM έχει την άριστη ευελιξία στη αντιμετώπιση σύνθετης γεωμετρίας και ανώμαλων ορίων, που είναι και το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής. Αυτή η μέθοδος απαιτεί τον διαχωρισμό της φυσικής περιοχής σε πεπερασμένα στοιχεία. Οι μεταβλητές τομέων αντιπροσωπεύονται με τις συναρτήσεις μορφής και τις κομβικές τιμές σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Χρησιμοποίηση των υπόλοιπων τεχνικών ελαχιστοποίησης (ή, ισοδύναμα, 'variational' τεχνικές) όπως η μέθοδος Galerkin, οι διέπουσες εξισώσεις μετασχηματίζονται σε διακριτές μορφές. Για την τρισδιάστατη προσομοίωση της διαμόρφωσης με χύτευση, το ολικό σύστημα πινάκων που προκύπτει από τις αλγεβρικές εξισώσεις είναι συνήθως μεγάλο και σποραδικό, όποιος απαιτεί το μεγάλο υπολογιστική μνήμη και χρόνο CPU. Οι χρόνοι CPU μπορούν να υπολογιστούν ανάλογα με τον αριθμό πεπερασμένων στοιχείων στα πλέγματα και τους βαθμούς ελευθερίας (DOF) ανά κόμβο. Στα μεταβατικά προβλήματα, μια έκφραση πεπερασμένων στοιχείων για τα χρονικά παράγωγα χρησιμοποιείται χαρακτηριστικά από κοινού με τον διαχωρισμό πεπερασμένων στοιχείων.

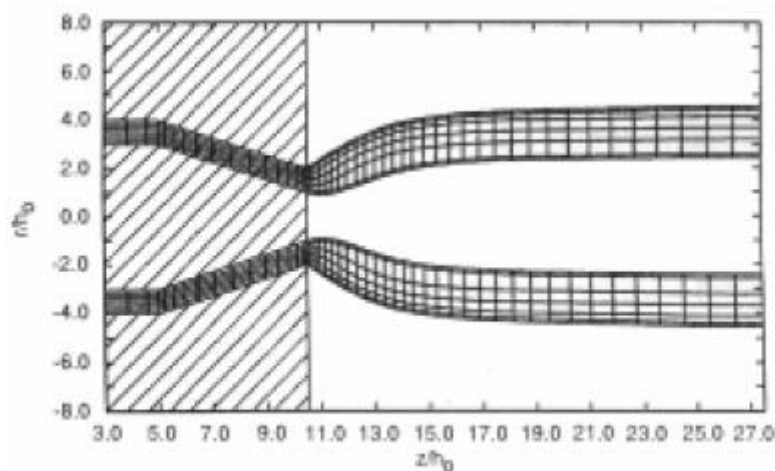
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά νέα τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση των προβλημάτων ροής ρευστών. Έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής στη δεκαετία του '60 μαζί με την εμφάνιση των ψηφιακών υπολογιστών τσέπης, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει γίνει η βάση για τα πιο εμπορικά δομικά δυναμικά προγράμματα και προγράμματα προσομοίωσης ροής ρευστών. Η FEM είναι μια μέθοδος με περιοχές στην οποία ολόκληρη η γεωμετρία που μοντελοποιείται πρέπει να διαχωρίζεται στους κόμβους και τα στοιχεία. Το πλέγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 αντιπροσωπεύει τον διαχωρισμό που απαιτείται ώστε να μοντελοποιηθεί μια δισδιάστατη γεωμετρία με την FEM.



Σχήμα 2.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Αν και αρκετές διαφορετικές μέθοδοι είναι διαθέσιμες για να ληφθούν οι τελικές εξισώσεις, η μέθοδος Galerkin των σταθμισμένων υπολοίπων προτιμάται συνήθως στα προβλήματα ροής ρευστών. Μόλις δημιουργηθεί το πλέγμα, οι διαφορικές εξισώσεις κατεύθυνσης εκφράζονται σε ακέραια μορφή και ενσωματώνονται αριθμητικά για να προκύψει ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων. Λόγω της φύσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, έχει την δυνατότητα να μοντελοποιήσει πολύ πολύπλοκες μορφές. Μπορεί επίσης να παρέχει αρκετά ακριβείς λύσεις στις τοπικές μεταβλητές, όπως οι ταχύτητες ή οι πιέσεις των ρευστών, για μεγάλη ποικιλία προβλημάτων που περιλαμβάνουν μη γραμμικές ροές. Εντούτοις, οι υψηλότερης τάξης παράγωγες λύσεις, όπως οι κλίσεις της ταχύτητας, τείνουν να είναι λιγότερο ακριβείς. Χωρίς σύνθετες προσαρμοστικές τεχνικές πλέγματος, η FEM είναι επίσης δύσκολο να χρησιμοποιηθεί για προβλήματα με κινητά στερεά όρια. Δεδομένου ότι οι εξισώσεις κατεύθυνσης προσεγγίζονται με τη Galerkin μέθοδο, έχουν ένα ορισμένο ποσό εγγενούς λάθους, ακόμη και χωρίς να πραγματοποιηθούν αριθμητικά λάθη, γεγονός το οποίο επιδρά σε όλο τον υπολογισμό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει να γίνει η FEM επισφαλής σε τελείως μη γραμμικές περιπτώσεις. Αν και αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί μερικώς από τις ειδικές 'upwinding' τεχνικές εν τούτοις αυξάνει το μέγεθος της υπολογιστικής προσπάθειας. Επιπλέον, δεδομένου ότι η λύση υπολογίζεται μόνο στους κόμβους και ο παράγων ταχύτητα πρέπει να ληφθεί υπόψη, η τροχιά των μορίων στην περιοχή ροής δεν επιτυγχάνεται εύκολα με την FEM.

Εντούτοις, η FEM χρησιμοποιείται εκτενώς κατά τη προσομοίωση διαδικασιών που δεν είναι καθόλου γραμμικές όπως η ροή των ιξωδοελαστικών υλικών. Παραδείγματος χάριν, στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η προβλεφθείσα διόγκωση κατά την εξώθηση του HDPE διαμέσου μιας συγκλίνουσας μήτρας. Ο Mitsoulis πρόβλεψε τη ροή διάφορων υλικών μέσω μητρώων διαφορετικής γεωμετρίας χρησιμοποιώντας το μοντέλο K-BKZ. Τα αριθμητικά αποτελέσματά του προέκυψαν δεν αποκλίνουν σημαντικά από τα πειραματικά.



Σχήμα 2.2 Προβλεφθείσα διόγκωση κατά την εξώθηση του HDPE διαμέσου μιας συγκλίνουσας μήτρας.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει αποδειχθεί επίσης ιδανική για την προσομοίωση διαδικασιών πλήρωσης καλουπιών, προσανατολισμού ινών, συρρίκνωση και στρέβλωση λεπτών πλαστικών μερών. Η σημαντικότερη δυσκολία που προκύπτει κατά τη προσομοίωση διαδικασιών πλήρωσης καλουπιών (και άλλων διαδικασιών με κινούμενα όρια) είναι η απεικόνιση της παροδικά ελεύθερης επιφάνειας (ή στερεά κινούμενα όρια κατά τη μίξη). Το υλικό αλλάζει σχήμα συνεχώς καθώς ρέει και διαμορφώνεται μέσα στην κοιλότητα, καθιστώντας απαραίτητο να επαναπροσδιοριστεί η γεωμετρία της περιοχής ενδιαφέροντος μετά από κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα. Ο επαναπροσδιορισμός του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων ή του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών είναι το πιο δύσκολο μέρος των προσομοιώσεων όσον αφορά προβλήματα κινούμενων ορίων και πολλές φορές καθιστά την προσομοίωση παράλογη.

Οι Kouba, Vlachopoulos, deLorenzi και Nied ανέπτυξαν μια τεχνική για να μοντελοποιήσουν την 'membrane stretching' κατά τη χύτευση με εμφύσηση και τη θερμοδιαμόρφωση. Αν και οι διαδικασίες είναι βασικά τρισδιάστατες, μπορούν να αντιπροσωπευθούν με δισδιάστατα στοιχεία σε μορφή ελάσματος προσανατολισμένα στον τρισδιάστατο χώρο.

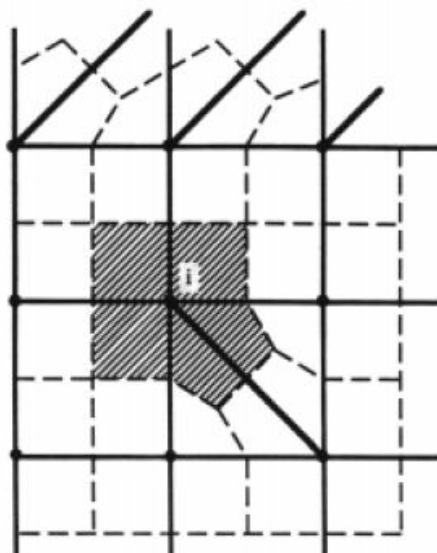
Οι Tadmor, Broyer και Gutfinger χρησιμοποίησαν μια χωρική διαμόρφωση πεπερασμένων διαφορών για να επιλύσουν δισδιάστατα προβλήματα ροής σε γεωμετρικά σύνθετες μορφές. Χρησιμοποιώντας μια Hele-Shaw διατύπωση για να προσομοιώσουν την ροή, η μέθοδος τους είναι εφαρμόσιμη σε ροές σε στενά διάκενα μεταβλητού πάχους, όπως η έγχυση σε καλούπια με λεπτά μέρη και ροών μέσα σε συγκεκριμένες μήτρες εξώθησης. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως ανάλυση ροής δικτύων (FAN), και εφαρμόζεται επιτυχώς σε νευτώνεια και μη νευτώνεια ρευστά. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα 'Eulerian' πλέγμα κελιών που καλύπτει την κοιλότητα ροής. Ένας παράγοντας πλήρωσης συνδέεται με κάθε κελί, δηλαδή ένας αριθμός που κυμαίνεται ανάμεσα στο μηδέν και στο ένα. Ένας μηδενικός παράγοντας πλήρωσης δηλώνει ένα άδειο κελί, και ένας παράγοντας πλήρωσης ίσος με ένα δηλώνει ένα κελί που είναι πλήρες με υλικό. Δημιουργείται μια τοπική ισορροπία μάζας γύρω από κάθε κελί, που έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με άγνωστες παραμέτρους τις πιέσεις στο κέντρο των κελιών. Η τοπική πίεση που προκύπτει από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η διανομή της ροής ανάμεσα στα κελιά, που με την σειρά της χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη ροή μέσα στην κοιλότητα ενημερώνοντας τους παράγοντες πλήρωσης των κελιών. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι απαιτούνται σχετικά λεπτά πλέγματα, ειδικά εάν υπάρχουν καμπύλα όρια στη γεωμετρία. Αυτό το μειονέκτημα μπορεί να υπερνικηθεί με την χρήση τελεστών πεπερασμένων διαφορών, αλλά αυτό καθιστά την προσομοίωση απαιτητική και δύσκολη στη χρήση.

Οι Osswald, Tucker, Wang και άλλοι τροποποίησαν την ανάλυση ροής δικτύων για να μοντελοποιήσουν την μη ισόθερμη ροή των μη νευτώνειων υγρών μέσα σε λεπτές τρισδιάστατες κοιλότητες χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία. Η τεχνική, η οποία είναι συνήθως γνωστή ως προσέγγιση ελέγχου όγκου (CVA), απαιτεί η τρισδιάστατη επιφάνεια σχηματοποίησης να διαιρείται σε πεπερασμένα στοιχεία τριών ή τεσσάρων κόμβων. Τα κελιά

ή οι όγκοι ελέγχου προκύπτουν από τη σύνδεση του κέντρου μάζας των στοιχείων με το μέσο των πλευρών των στοιχείων. Κατά την εφαρμογή της ισορροπίας μάζας σε κάθε κελί, οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι οι ίδιες με εκείνες που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου Galerkin στην εξίσωση κατεύθυνσης για την πίεση. Αυτό επιτρέπει την χρήση των τυπικών τεχνικών συνδυασμού πεπερασμένων στοιχείων κατά την κατάστρωση του συστήματος των γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων.

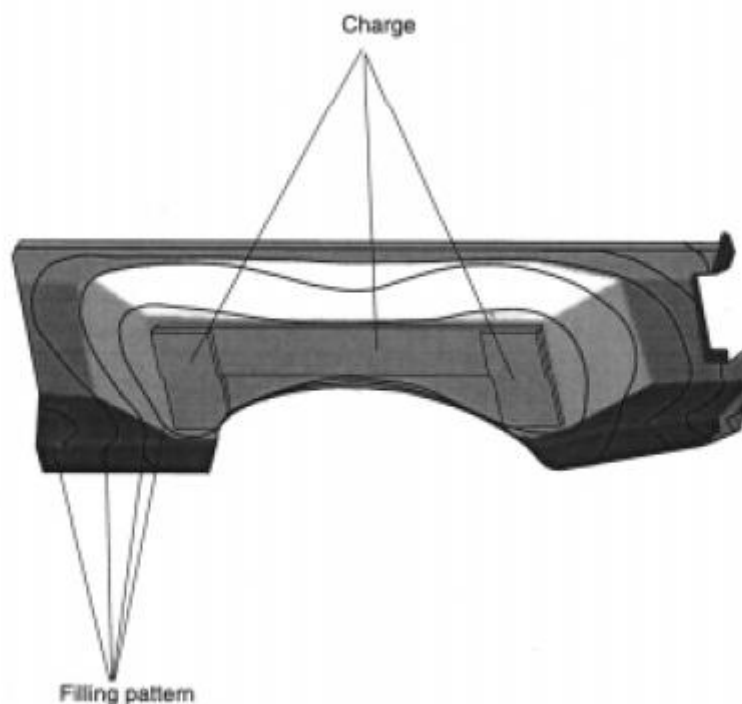
Μια χαρακτηριστική διαμόρφωση των στοιχείων και του κομβικού ελέγχου όγκου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Στο σχέδιο οι συνεχόμενες γραμμές δηλώνουν πλευρές στοιχείων και οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα όρια ελέγχου όγκου. Το διαγραμμισμένο τμήμα αναπαριστά τον όγκο ελέγχου για τον κόμβο i . Αυτή η τεχνική παραμένει ο κυρίαρχος τρόπος διαμόρφωσης της μοντελοποίησης διαδικασιών πλήρωσης μητρών όπως η συμπίεση και η έγχυση σε καλούπια.

Τα εμπορικά διαθέσιμα πακέτα λογισμικού χρησιμοποιούν στο σύνολο τους αυτήν την τεχνική για να περιγράψουν τα μέτωπα της ροής κατά τη διάρκεια της πλήρωσης μητρών. Σαν παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 ένα σχέδιο πλήρωσης μητρών κατά τη πλήρωση με συμπίεση ενός κομματιού SMC που αναπαριστάται με το πλέγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η κατανομή και ο προσανατολισμός των ινών μέσα στο φορμαρισμένο με συμπίεση τμήμα του προφυλακτήρα (φερό) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 και Σχήμα 2.5.

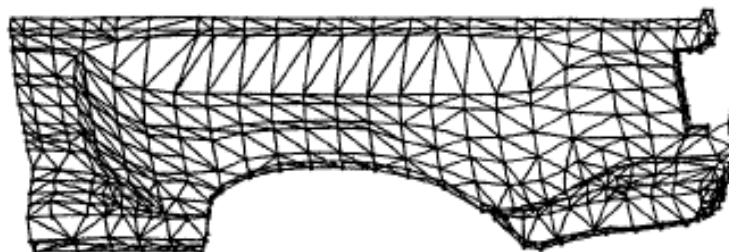


Σχήμα 2.3 Διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων/ όγκου ελέγχου

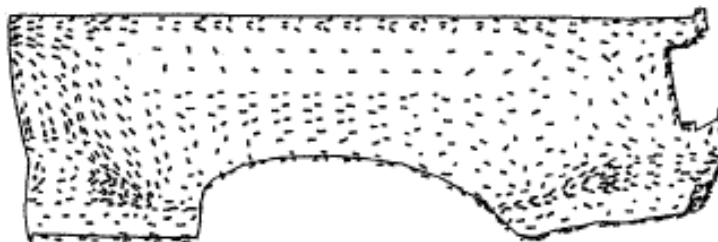
Τα προγράμματα προσομοίωσης πλήρωσης μητρών παρουσιάζουν συμφωνία σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά αποτελέσματα. Απαιτείται ακόμα μεγάλη έρευνα για την πρόβλεψη της πλήρωσης μητρών με έγχυση πολύ λεπτών προϊόντων. Δεδομένου ότι η βιομηχανία μειώνει συνεχώς το πάχος των προϊόντων, αυτό το ζήτημα παραμένει μια κορυφαία ερευνητική προτεραιότητα στον τομέα της πλήρωσης με έγχυση.



Σχήμα 2.4 Προσομοίωση του σχεδίου πλήρωσης με συμπίεση μητρών κατά τη διάρκεια της σχηματοποίησης ενός φτερού SMC αυτοκίνητου



Σχήμα 2.5 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων φτερού αυτοκινήτου

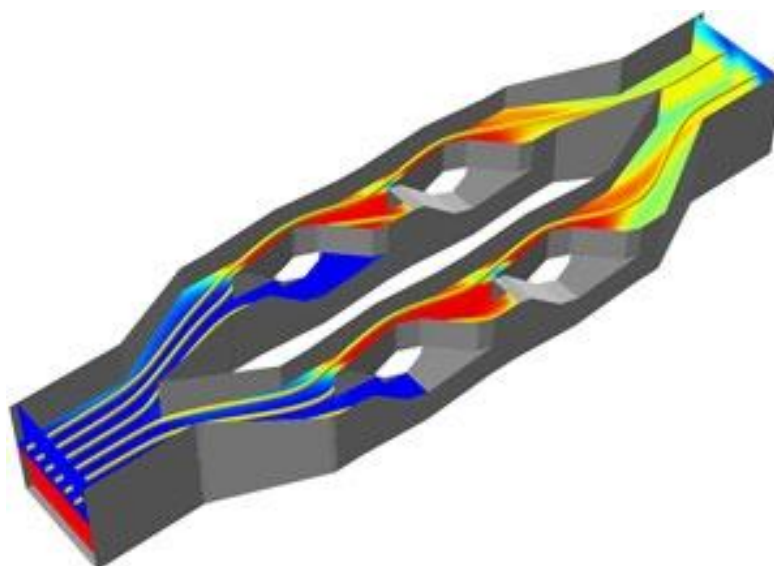


Σχήμα 2.6 Πρόβλεψη προσανατολισμού των ινών κατά την πλήρωση με συμπίεση της μήτρας του φτερού αυτοκινήτου

2.5 COMSOL

Το λογισμικό της COMSOL® Multiphysics διαθέτει εξειδικευμένα επιπρόσθετα εργαλεία για διάφορους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας όπως είναι τα Φαινόμενα Μεταφοράς 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.

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) 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) ενώ παρέχει εξειδικευμένη δυναμική και στατική ανάλυση κατασκευών και σύζευξη με θερμικά,ροϊκά και άλλα φυσικά φαινόμενα (Δομική Μηχανική).



Σχήμα 2.7 Ανάλυση ροής ρευστού με COMSOL® Multiphysics

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI

3.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ TAGUCHI

Κάθε πείραμα πρέπει να προγραμματίσει και να πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε τα συμπεράσματα που εξάγονται να είναι αρκετά και ασφαλή για να μας βοηθούν στην κατανόηση του φαινομένου που μελετάμε. Στα πειράματα που επιδιώκουμε να εξετάσουμε την συμπεριφορά ενός ή περισσότερων μεγεθών σε συνάρτηση ενός ή περισσότερων μεταβλητών, πρέπει να είμαστε προσεκτικοί στην επιλογή της μεθόδου που θα ακολουθήσουμε. Ειδικά όταν τίθεται θέμα βελτιστοποίησης και βαθμού εξάρτησης των προς μελέτη μεταβλητών, αναζητούμε συμφέρουσες σε χρόνο και κόστος μεθόδους προγραμματισμού πειραμάτων, που διασφαλίζουν ταυτόχρονα την σωστή μελέτη του φαινομένου. Τέτοιες μέθοδοι είναι οι εξής:

▪ *Προσέγγιση δοκιμής - λάθους*

Με την μέθοδο δοκιμής – λάθους, εκτελούμε πειράματα δοκιμών. Σε κάθε πείραμα μεταβάλουμε και μετρούμε κατά περίπτωση τα προς μελέτη μεγέθη και καταγράφουμε την συμπεριφορά ή και την εξάρτησή τους. Μετά από κάθε πείραμα παρατηρούμε και αναλύουμε τα αποτελέσματα έτσι ώστε να αποφασίσουμε πώς να εκτελέσουμε το επόμενο πείραμα (δηλαδή ποιά παράμετρος πρέπει να μεταβληθεί και πόσο), με το να απορρίψουμε ή να δεχθούμε τις μεταβολές που έχουμε κάνει. Στόχος της μεθόδου είναι να κατανοήσουμε την επίδραση των μεταβλητών που εξετάζουμε στα μετρούμενα μεγέθη του πειράματος, δοκιμάζοντας ένα εύρος τιμών που καθορίζεται στην πορεία των πειραμάτων. Όπως είναι κατανοητό, συνήθως χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός δοκιμών για να διασφαλίσουμε ότι κατανοούμε το προς μελέτη φαινόμενο.

▪ *Σχεδιασμός πειραμάτων*

Ένα μαθηματικά προγραμματισμένο σύνολο πειραμάτων, στο οποίο όλες οι παράμετροι που μελετάμε οργανώνονται πριν την εκτέλεσή τους, είναι μια πολύ καλύτερη προσέγγιση για να λάβει τα συστηματικά στοιχεία. Θεωρητικά, ένα τέτοιο πλήρες σύνολο πειραμάτων οφείλει να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Συνήθως όμως, ο αριθμός των πειραμάτων και οι πόροι (υλικά και χρόνος) που απαιτούνται είναι απαγορευτικά μεγάλοι. Συχνά αποφασίζουμε να εκτελέσουμε ένα υποσύνολο του πλήρους συνόλου πειραμάτων για να εξοικονομήσουμε χρόνο και κόστος. Έτσι, δεν διασφαλίζουμε ότι θα εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε εκείνες όπου απαιτείται βελτιστοποίηση κάποιων μεγεθών, η μέθοδος δεν δείχνει τις καλύτερες (βέλτιστες) τιμές των παραμέτρων. Προφανώς, μια τέτοια μέθοδος δεν είναι η ενδεδειγμένη για να πραγματοποιήσουμε πειράματα ελέγχου ή βελτιστοποίησης (εκτός από το συντονισμό των διάφορων οργάνων, των επιτροπών, των ανθρώπων, του εξοπλισμού, των υλικών κ.λπ.).

Μέθοδος TAGUCHI

Ο Δρ Taguchi της Ιαπωνικής εταιρίας τηλεπικοινωνιών Nippon (Nippon Telephones and Telegraph Company) ανέπτυξε μια μέθοδο βασισμένη στα πειράματα “ορθογώνιας σειράς” με την οποία μπορούμε να εντοπίσουμε την βέλτιστη τιμή και τον βαθμό επιρροής των μεταβλητών που εξετάζουμε. Οι «ορθογώνιες σειρές» παρέχουν το ελάχιστο δυνατό σύνολο πειραμάτων ώστε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα και να βελτιστοποιήσουμε τις εξεταζόμενες μεταβλητές.

3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

Ο γενικός στόχος της μεθόδου Taguchi είναι να παραχθεί προϊόν υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος για τον κατασκευαστή. Ο Δρ. Taguchi ανέπτυξε μια μέθοδο πειραματικής βελτιστοποίησης για να ερευνήσει πώς οι διαφορετικές παράμετροι έχουν επιπτώσεις στο μέσο όρο και πως η μεταβολή ενός χαρακτηριστικού της διαδικασίας την επηρεάζει. Το πειραματικό σχέδιο που προτείνεται από Taguchi περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση των ορθογώνιων σειρών για να οργανώσει τις παραμέτρους που επιδρούν στη διαδικασία και τα επίπεδα στα οποία πρέπει να ποικίλλουν. Αντί να εξετάσουμε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς, η μέθοδος Taguchi εξετάζει τα ζευγάρια των συνδυασμών. Αυτό επιτρέπει τη συλλογή τόσων απαραίτητων στοιχείων όσων χρειάζονται για να καθορίσουμε ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την μετρούμενη έξοδο και πόσο, με τους ελάχιστους δυνατούς πόρους. Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιείται καλύτερα όταν υπάρχει ένας ενδιάμεσος αριθμός μεταβλητών (3 έως 50), λίγων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών, και όταν μόνο μερικές μεταβλητές συμβάλλουν σημαντικά στην μετρούμενη έξοδο.

Οι σειρές που χρησιμοποιούνται επιλέγονται από τον αριθμό των παραγόντων ελέγχου και από τον αριθμό των επιπέδων τους. Η ανάλυση της διαφοράς των συλλεχθέντων στοιχείων από τον προγραμματισμό της μεθόδου Taguchi μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιλέξουμε νέες τιμές παραμέτρων για να βελτιστοποιήσουμε περαιτέρω τους παράγοντες ελέγχου. Τα στοιχεία από τις σειρές μπορούν να αναλυθούν με τη χάραξη των στοιχείων και την εκτέλεση μιας οπτικής ανάλυσης, για να εξετασθεί ο βαθμός επιρροής τους.

Η μέθοδος Taguchi είναι ένας επιστημονικός μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση προϊόντων, διαδικασιών, υλικών, των εξοπλισμών, και εγκαταστάσεων. Η μέθοδος στοχεύει στη βελτίωση των επιθυμητών χαρακτηριστικών και ταυτόχρονα τη μείωση του αριθμού ατελειών μελετώντας τις μεταβλητές που ελέγχουν τη διαδικασία. Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα της εφαρμοσμένης μηχανικής και περιλαμβάνει τις διαδικασίες σχεδιασμού ή και κατασκευής πρώτων υλών, υποσυστημάτων, επαγγελματικών προϊόντων αλλά και τη βελτιστοποίηση υπηρεσιών, συστημάτων ελέγχου κ.α.

3.3 ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI

Η ποιότητα πρέπει να επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό ενός προϊόντος και όχι να προκύπτει από αυτό. Αυτό διασφαλίζεται μέσω μίας συστηματικής διαδικασίας σχεδιασμού και ελέγχου της μορφής, των παραμέτρων και των ανοχών του προϊόντος. Η ποιότητα που εξετάζεται σε ένα προϊόν σημαίνει ότι τα παραχθέντα προϊόντα που αποκλίνουν σημαντικά του αποδεκτού μέσου όρου, απλά απορρίπτονται.

Η ποιότητα επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση της απόκλισης από έναν στόχο. Το προϊόν πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι ανεπηρέαστο από τους ανεξέλεγκτους εξωτερικούς παράγοντες. Με άλλα λόγια, ο λόγος του σήματος (ποιότητα των προϊόντων) προς τον θόρυβο (ανεξέλεγκτοι παράγοντες) πρέπει να είναι υψηλό.

Το κόστος της ποιότητας πρέπει να ελέγχεται σαν συνάρτηση της απόκλισης από τα αποδεκτά πρότυπα που προκύπτουν από τον βέλτιστο σχεδιασμό με την εξίσωση απώλειας. Η χαμηλή ποιότητα με όφελος στο κόστος παραγωγής έχει επιπτώσεις στον αγοραστή του προϊόντος και άρα στην κοινωνία. Επειδή ο παραγωγός είναι επίσης μέλος της κοινωνίας και επειδή η δυσαρέσκεια πελατών θα αποθαρρύνει τη μελλοντική εμπιστοσύνη στα προϊόντα του, αυτό το κόστος στον πελάτη και την κοινωνία θα επιστρέψει στον παραγωγό. Η μέθοδος Taguchi καθορίζει την εξίσωση “απώλειας” (I) ως τη διαφορά μεταξύ του βέλτιστου στόχου μιας διαδικασίας (τ) και της μετρούμενης τιμής (y).

$$I(y) = k_c \cdot (y - \tau)^2$$

Η σταθερά k_c μπορεί να καθοριστεί με την εξέταση των προδιαγραφών ή ενός αποδεκτού διαστήματος Δ .

$$k_c = \frac{C}{\Delta^2}$$

Συνήθως είναι δύσκολος ο καθορισμός των παραπάνω σταθερών και στην περίπτωση που στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση της μετρούμενης εξόδου, η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$I(y) = k_c \cdot y^2, \text{ όπου } \tau = 0$$

Στην περίπτωση που στόχος μας είναι η μεγιστοποίηση της μετρούμενης εξόδου, η εξίσωση γίνεται:

$$I(y) = \frac{k_c}{y^2}$$

Κατά τον Δρ. Taguchi, βέλτιστο και ποιοτικό είναι ένα προϊόν του οποίου τα βασικά χαρακτηριστικά έχουν την ελάχιστη δυνατή επιρροή από εξωτερικούς, μη ελεγχόμενους παράγοντες.

3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

Τα γενικά βήματα που περιλαμβάνονται στη μέθοδο Taguchi είναι τα ακόλουθα:

- 1) Καθορισμός του στόχου της διαδικασίας και πιά συγκεκριμένα καθορισμός της μεταβλητής που μας ενδιαφέρει. Αυτή μπορεί να είναι ένα ποσοστό ροής, μια θερμοκρασία, η αντοχή μιας κατασκευής κ.λπ.

Ο στόχος μιας διαδικασίας μπορεί επίσης να είναι ένα ελάχιστο ή ένα μέγιστο όπως παραδείγματος χάριν η μεγιστοποίηση της αντοχής ενός προϊόντος. Επίσης, χρειάζεται να ορισθεί ο στόχος της βελτιστοποίησης και άρα ο κατάλληλος λόγος σήματος – θορύβου που θα χρησιμοποιηθεί.

- 2) Καθορισμός των παραγόντων ελέγχου που έχουν επιπτώσεις στη διαδικασία. Αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν την τιμή της μεταβλητής που εξετάζουμε. Επίσης, χρειάζεται να ορισθεί ο αριθμός και οι τιμές των επιπέδων στα οποία οι παράμετροι πρέπει να μεταβάλλονται.

Για παράδειγμα αν καθορίζει η θερμοκρασία την μετρούμενη έξοδο, θα πρέπει να ορίσουμε τον αριθμό και τις τιμές μέσα στις οποίες θα βρίσκεται η βέλτιστη τιμή που αναζητούμε (π.χ. 4 επίπεδα με τιμές 20 °C, 22 °C, 24 °C, 26 °C).

- 3) Με βάση τον αριθμό των παραγόντων ελέγχου και των επιπέδων, επιλέγουμε την κατάλληλη ορθογώνια σειρά. Στη συνέχεια συμπληρώνεται η ορθογώνια σειρά με βάση τις τιμές που έχουμε επιλέξει, ορίζοντας έτσι την εκτέλεση κάθε πειράματος.

- 4) Εκτέλεση των πειραμάτων με βάση τον πίνακα Taguchi που καταρτίσαμε παραπάνω και καταγραφή των μέσων τιμών και των τυπικών αποκλίσεων των ταχυτήτων εξόδων.

- 5) Υπολογισμός του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR), ο οποίος υπολογίζει το αντίστροφο του συντελεστή διασποράς, δηλαδή το λόγο μ/σ , όπου μ είναι ο μέσος της διεργασίας και σ η τυπική απόκλιση της. Έτσι, έχουμε:

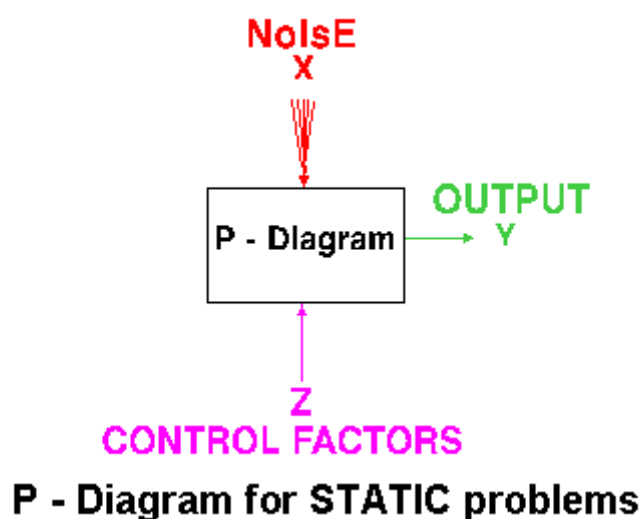
$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right)$$

- 6) Επιλογή ως αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης, το λόγο σήματος προς θόρυβο. Άρα η βέλτιστη τιμή είναι αυτή που αντιστοιχεί στη μικρότερη τιμή του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) του συγκεντρωτικού πίνακα αποτελεσμάτων όπως προτείνει ο Δρ. Taguchi.

- 7) Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των πειραμάτων τα χρησιμοποιούμε σε περαιτέρω ανάλυση με άλλες μεθόδους, π.χ. ANOVA, κλπ.

3.5 ΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

Γενικά, σε μία διαδικασία βελτιστοποίησης έχουμε σαν στόχο να εντοπίσουμε τις καλύτερες τιμές των παραγόντων ελέγχου (Z) που καθορίζουν την επιθυμητή έξοδο του προβλήματος (Y). Όταν η έξοδος εξαρτάται μόνο από αυτούς τους παράγοντες, το πρόβλημα βελτιστοποίησης ονομάζεται στατικό. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση των στατικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπου σημειώνεται και η τυχόν παρουσία θορύβου (X), η οποία τελικά δεν θα επηρεάσει την διαδικασία. Αυτός είναι και ο κύριος στόχος της μεθόδου Taguchi. Να πετύχουμε δηλαδή το επιθυμητό αποτέλεσμα ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή όχι θορύβου στην διαδικασία βελτιστοποίησης.



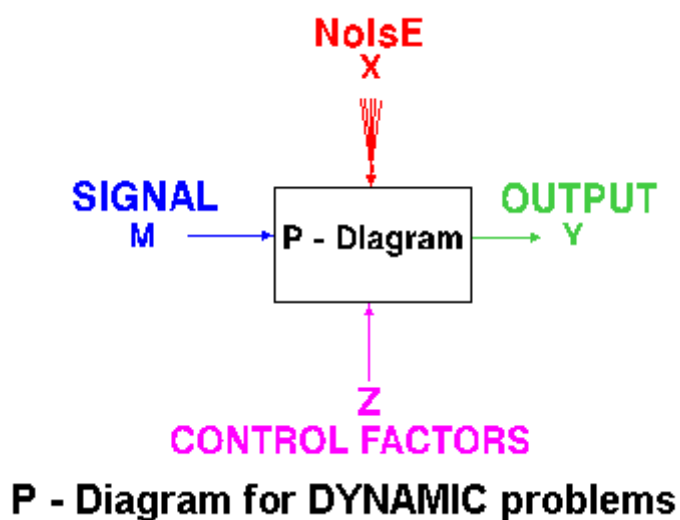
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα στατικών προβλημάτων βελτιστοποίησης

Η μέθοδος Taguchi χειρίζεται την έξοδο Y στη βελτιστοποίηση στατικών προβλημάτων, υπολογίζοντας τη μέση τιμή της μ , αλλά και την τυπική απόκλιση της σ και ελαχιστοποιώντας το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right)$$

3.6 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

Πολλές φορές σε μία διαδικασία βελτιστοποίησης έχουμε μία ή περισσότερες μεταβλητές εισόδου (M). Σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα ονομάζεται δυναμικό και στόχος μας είναι ο καθορισμός των καλύτερων τιμών των παραγόντων ελέγχου έτσι ώστε ο λόγος εισόδου και εξόδου να λάβει την επιθυμητή τιμή. Με την μέθοδο Taguchi επιτυγχάνουμε την ελαχιστοποίηση της επίδρασης του θορύβου στην μεταβολή αυτού του λόγου. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση των δυναμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα δυναμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης

3.7 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Ένα κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου Taguchi που αφορά τον σχεδιασμό προϊόντων, είναι ότι βελτιστοποιεί τα χαρακτηριστικά που επιλέγουμε και διαμορφώνει τα όρια των προδιαγραφών, βελτιώνοντας κατά συνέπεια την ποιότητα των προϊόντων.

Επιπλέον, όσο αφορά τον πειραματικό σχεδιασμό, η μέθοδος είναι απλή και εύκολο να εφαρμοσθεί σε πολλά πεδία της εφαρμοσμένης μηχανικής. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να συντομεύσει τον χρόνο ενός ερευνητικού προγράμματος ή για να προσδιορίσει τα προβλήματα σε μια διαδικασία παραγωγής. Είναι σημαντικό ότι η μέθοδος Taguchi επιτρέπει την ανάλυση πολλών διαφορετικών παραμέτρων χωρίς ένα απαγορευτικά υψηλό κόστος πειραμάτων.

Παραδείγματος χάριν, μια διαδικασία με 8 μεταβλητές, κάθε μια με 3 επίπεδα τιμών, θα απαιτούσε 6561 πειράματα για να εξετάσει όλες τις μεταβλητές. Εντούτοις χρησιμοποιώντας τις ορθογώνιες σειρές Taguchi, μόνο 18 πειράματα είναι απαραίτητα.

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου Taguchi είναι ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και δεν προσδιορίζουν ακριβώς ποια παράμετρος έχει την υψηλότερη επίδραση στην μετρούμενη έξοδο. Η μέθοδος Taguchi έχει επικριθεί για τη δυσκολία να εντοπίσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων.

Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι οι μέθοδος Taguchi είναι ακατάλληλη για την μελέτη δυναμικά μεταβαλλόμενων διαδικασιών. Επιπλέον, δεδομένου ότι η μέθοδος Taguchi έχει σαν στόχο την βελτιστοποίηση από τον αρχικό σχεδιασμό του προϊόντος, κρίνεται μάλλον αναποτελεσματική όταν εφαρμόζεται στα τελευταία στάδια παραγωγής του προϊόντος. Έτσι, θα πρέπει να εφαρμόζεται στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης διαδικασίας.

3.8 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ (ΑΝΟΒΑ)

Αφού κανείς σχεδιάσει κατάλληλα ένα πείραμα και αφού συλλέξει τα πειραματικά αποτελέσματα, χρειάζεται μια τυποποιημένη μέθοδος για να αναλύσει στατιστικά. Αυτό διαφέρει από τη συνηθισμένη πρακτική που συνδέεται με ένα πείραμα ενός παράγοντα κάθε φορά, όπου φθάνει κανείς σε συμπεράσματα μετά από μια απλή σύγκριση των παρατηρούμενων αποτελεσμάτων μιας σειράς δοκιμών με τα αποτελέσματα μιας προηγούμενης σειράς δοκιμών. Στην περίπτωση των καλά σχεδιασμένων πειραμάτων, ο ερευνητής κανονικά θα πρέπει να περιμένει έως ότου ολοκληρωθούν όλες οι πειραματικές δοκιμές (εκτός από περιπτώσεις όπου εμφανώς θεωρείται περιττός ο περαιτέρω πειραματισμός)· μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών, θα πρέπει να γίνει μια στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

Μία από τις πλέον σημαντικές στατιστικές μεθόδους ανάλυσης των δεδομένων, είναι η μέθοδος της ανάλυσης της διασποράς (analysis of variance – ANOVA). Η βασική ιδέα που βρίσκεται πίσω από την ANOVA είναι το να διασπάσουμε την ολική μεταβλητότητα (των πειραματικών αποτελεσμάτων) σε συστατικά διασποράς και κατόπιν να υπολογίσουμε τη σημαντικότητά τους. Τα συστατικά διασποράς είναι εκείνα που σχετίζονται με τις επιδράσεις των παραγόντων (κύριων επιδράσεων ή αλληλεπιδράσεων) και αυτό που συνδέεται με την τυχαία διασπορά, που συνήθως αναφέρεται ως υπόλοιπο (υπ)· ως υπόλοιπο μπορεί να θεωρηθεί το μέγεθος της διασποράς που θα πρέπει να αναμένουμε, αν κανένας παράγοντας δεν έχει επίδραση. Αυτό μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{ολική διασπορά} = \text{διασπορά λόγω επιδράσεων παραγόντων} + \text{υπόλοιπο}$$

Η σημαντικότητα των συστατικών της διασποράς που σχετίζονται με επιδράσεις των παραγόντων υπολογίζεται σε σύγκριση με το υπόλοιπο. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται το F-τεστ για τη σύγκριση των διασπορών.

Παρακάτω, αναλύουμε τα βήματα της μεθόδου ANOVA

Υπολογίζουμε πρώτα το *διορθωτικό παράγοντα (ΔΠ)* ως εξής:

$$\Delta\Pi = \frac{(\text{ολικό άθροισμα όλων των παρατηρήσεων})^2}{\text{συνολικός αριθμός όλων των παρατηρήσεων}} = \frac{(\sum y_i)^2}{n}$$

Ο ΔΠ χρησιμοποιείται για να διορθώσει (από όπου και το όνομα διορθωτικός παράγοντας) το άθροισμα όλων των τετραγωνισμένων παρατηρήσεων $|\sum y_i^2|$ για να πάρουμε το (διορθωμένο) ολικό άθροισμα των τετραγώνων, το **OAT**, ως εξής:

$$OAT = \sum y_i^2 - \Delta\Pi$$

- [Για τις κύριες επιδράσεις έχουμε:](#)

Για το άθροισμα των τετραγώνων της κύριας επίδρασης ενός k -επίπεδου παράγοντα A , με m παρατηρήσεις να αντιστοιχούν σε κάθε επίπεδο $A(i)$, με $i = 1, \dots, k$, έχουμε:

$$AT_A = \frac{A_1^2 + \dots + A_k^2}{m} - \Delta\Pi$$

όπου A_i είναι το ολικό άθροισμα των παρατηρήσεων ανά επίπεδο $A(i)$, με $i = 1, \dots, k$. Αν ο αριθμός των παρατηρήσεων ανά επίπεδο είναι διαφορετικός, ας πούμε m_i , τότε:

$$AT_A = \frac{A_1^2}{m_1} + \dots + \frac{A_k^2}{m_k} - \Delta\Pi$$

Οι βαθμοί ελευθερίας που αντιστοιχούν σε ένα k -επίπεδο παράγοντα (ή σε μια στήλη k επιπέδων σε έναν ισορροπημένο σχεδιασμό) ισούνται με $k-1$.

Ο λόγος $AT_A/\beta_{\varepsilon_A}$, που ονομάζεται μέσο άθροισμα τετραγώνων του παράγοντα A (MAT_A), δίνει μια εκτίμηση για το μέγεθος της μεταβλητότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων που οφείλεται στον παράγοντα A . Επομένως:

$$MAT_A = \frac{AT_A}{\beta_{\varepsilon_A}}$$

- [Για το υπόλοιπο έχουμε:](#)

Αφού υπολογίσουμε το άθροισμα των τετραγώνων όλων των κυρίων επιδράσεων, εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε το άθροισμα των τετραγώνων του υπολοίπου (ή το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων - AT_Y), με αφαίρεση από το OAT . Έχουμε:

$$AT_Y = OAT - AT_A - AT_B - \dots$$

με βαθμούς ελευθερίας υπολοίπου:

$$\beta_{\varepsilon_Y} = \beta_{\varepsilon_{ολ}} - \beta_{\varepsilon_A} - \beta_{\varepsilon_B} - \dots$$

όπου:

$$\beta_{\varepsilon_{ολ}} = n - 1$$

Ο λόγος $AT_Y/\beta\varepsilon_Y$, το μέσο άθροισμα τετραγώνων του υπολοίπου (MAT_Y), αντιπροσωπεύει το μέγεθος της μεταβλητότητας που παραμένει ανεξήγητο, αφού ερμηνευθούν τα στοιχεία της διασποράς που οφείλεται στις κύριες επιδράσεις.. Στην πραγματικότητα, αντιστοιχεί στη διασπορά που εμφανίζεται μεταξύ των επαναλήψεων κάθε πειραματικής δοκιμής. Αριθμητικά, η διασπορά του υπολοίπου είναι το τετράγωνο της διαφοράς ανάμεσα σε κάθε επανάληψη και το μέσο όρο της δοκιμής της, αθροισμένο επί όλων των δοκιμών. Επομένως, το AT_Y μπορούμε να το υπολογίσουμε με τη βοήθεια του γενικού τύπου:

$$AT_Y = \sum_{i=1}^n OAT_i$$

όπου:

n είναι ο αριθμός των πειραματικών δοκιμών και

OAT_i είναι το ολικό (διορθωμένο) άθροισμα των τετραγώνων των παρατηρήσεων εντός της i -στής δοκιμής.

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον F -λόγο, για να εκτιμήσουμε τη σημαντικότητα της επιρροής. Αν ο F -λόγος είναι μεγάλος (εμπειρικός κανόνας: μεγαλύτερος από 4), λέμε ότι το αποτέλεσμα είναι σημαντικό, με άλλα λόγια, ότι η διασπορά που προκαλεί δεν μπορεί να αποδοθεί σε σύμπτωση ή στην τύχη.

$$F\text{-λόγος}_A = \frac{MAT_A}{MAT_Y}$$

Έπειτα υπολογίζουμε την *καθαρή διασπορά* (ή *αμιγής διασπορά*) της πηγής A. Η οποία εκφράζει την καθαρή επίδραση του A.

$$AT'_A = AT_A - \beta\varepsilon_A \cdot MAT_Y$$

Έχοντας μετρήσει την καθαρή διασπορά μιας συγκεκριμένης πηγής, μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την έκταση στην οποία αυτή η πηγή επηρεάζει τα πειραματικά αποτελέσματα, με άλλα λόγια, το μερίδιο της συνολικής πειραματικής διασποράς για το οποίο είναι υπεύθυνη αυτή η πηγή. Αυτό επιτυγχάνεται διαιρώντας την καθαρή διασπορά της πηγής δια του OAT . Παίρνουμε έτσι το λόγο συμβολής ($\Lambda\Sigma$), ο οποίος, σε ποσοστιαία βάση, δίνεται από τον τύπο:

$$\Lambda\Sigma_A = \frac{AT'_A}{OAT} \cdot 100\%$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.1 ΣΤΟΧΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, ένα από τα βασικότερα προβλήματα της παραγωγικής διαδικασίας πλαστικού σωλήνα με μήτρα που φέρει κεφαλή αράχνης, είναι η ύπαρξη ανωμαλιών στην επιφάνεια του τελικού προϊόντος. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη των ποδιών της αράχνης που επιβαρύνει το πεδίο ταχύτητας εξόδου του ρευστού από την μήτρα. Στόχος μας είναι να εντοπίσουμε τον βαθμό επιρροής :

- ✓ της γεωμετρίας των ποδιών της αράχνης στην ταχύτητα εξόδου του ρευστού,
- ✓ του μήκους εξόδου της μήτρας όπου αναμένουμε να ομαλοποιηθεί η ροή του πολυμερούς

και να βελτιστοποιήσουμε τις τιμές των παραμέτρων αυτών (γεωμετρία ποδιού αράχνης, μήκος εξόδου) έτσι ώστε να λάβουμε την ομαλότερη το δυνατόν ροή εξόδου του πολυμερούς. Σαν μεταβλητή εξόδου βελτιστοποίησης της ροής, λαμβάνουμε την τυπική απόκλιση των τιμών των ταχυτήτων του πολυμερούς στην έξοδο από την μήτρα, την οποία θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε.

Επίσης, θα αναλύσουμε τις τυπικές αποκλίσεις των πειραμάτων με τη μέθοδο ανάλυσης της διασποράς, ANOVA. Με αυτή τη μέθοδο θα προσδιορίσουμε την επίδραση των παραγόντων στην έξοδο της μήτρας εκβολής.

Οι τιμές των μεταβλητών εξόδου του αρχικού μοντέλου, αλλά και οι βέλτιστες των εξεταζόμενων παραμέτρων θα υπολογιστούν με μία σειρά προσομοιώσεων στο λογισμικό SolidWorks®.

Το πολυμερές το οποίο διαμορφώνεται στην μήτρα επιλέγεται να είναι το πολυαιθυλένιο, λόγω της ευρείας χρήσης του στην βιομηχανία, με ιδιότητες που φαίνονται στον επόμενο πίνακα :

- Ιδιότητες πολυαιθυλενίου:

Μη Νευτώνειο ρευστό	
Πυκνότητα (Kg/m ³)	1200
Μέγιστο δυναμικό ιξώδες (Pa*s)	565
Ελάχιστο δυναμικό ιξώδες (Pa*s)	364

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες πολυαιθυλενίου

4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΕΚΒΟΛΕΑ

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες της ροής είναι :

- Αρχικές συνθήκες ροής:

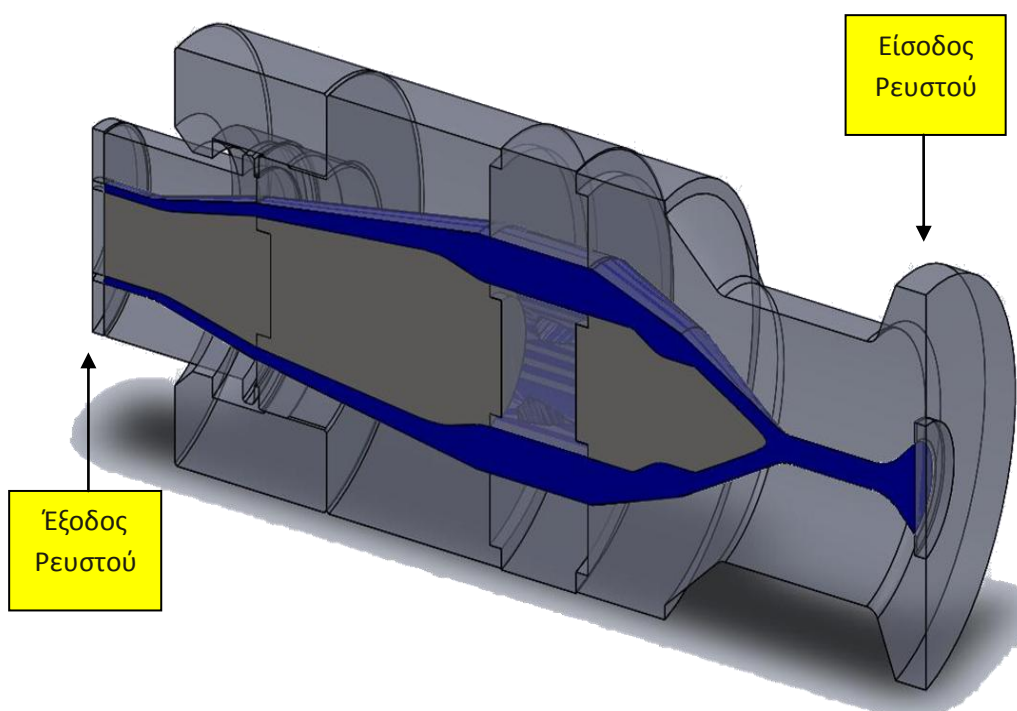
Θερμοκρασία (°K)	467
Πίεση (bar)	1,013 (ατμοσφαιρική)

Πίνακας 4.2 Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης ροής

- Οριακές συνθήκες ροής:

	Είσοδος Ρευστού	Έξοδος Ρευστού
Πίεση (bar)	100 (στατική)	1,013 (ατμοσφαιρική)

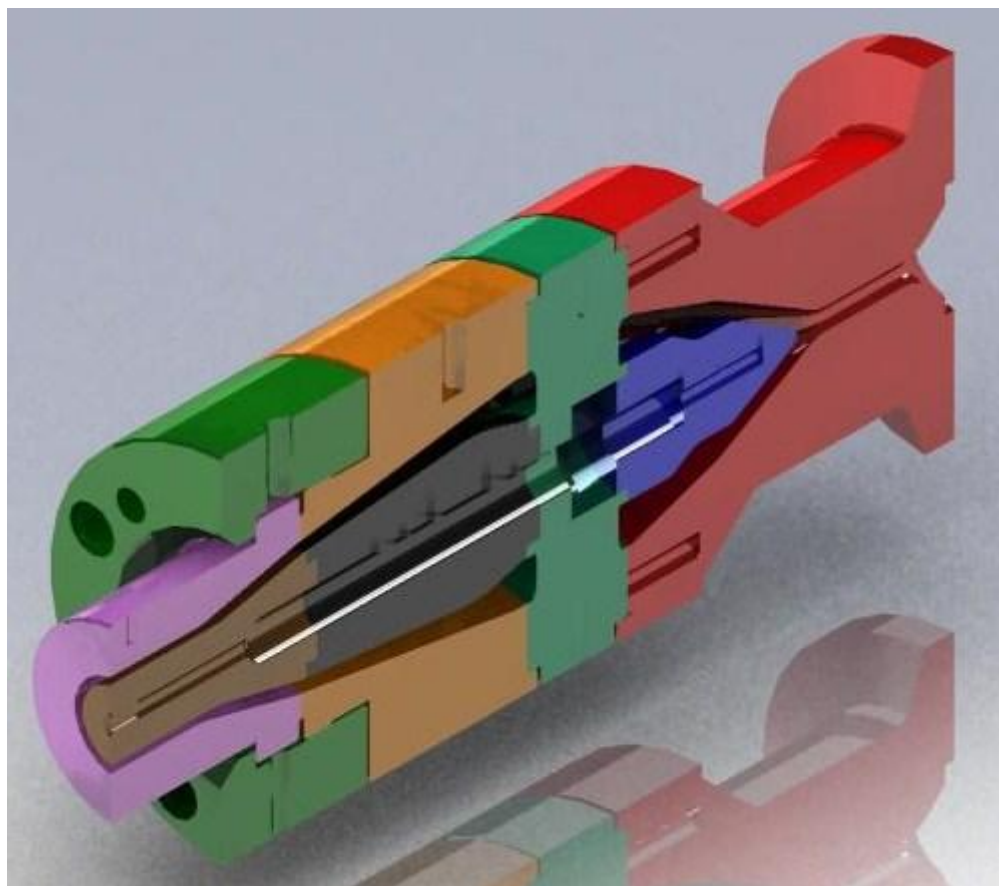
Πίνακας 4.3 Οριακές συνθήκες προσομοίωσης ροής



Σχήμα 4.1 Είσοδος –Έξοδος ρευστού από την μήτρα

Οι οριακές συνθήκες ροής επιλέχθηκαν να μην είναι ακραίες, ώστε να μην επηρεάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας και για να έχουμε ένα σημείο αναφοράς ώστε να εκτιμήσουμε την συμπεριφορά του φαινομένου σε διαφορετικές συνθήκες.

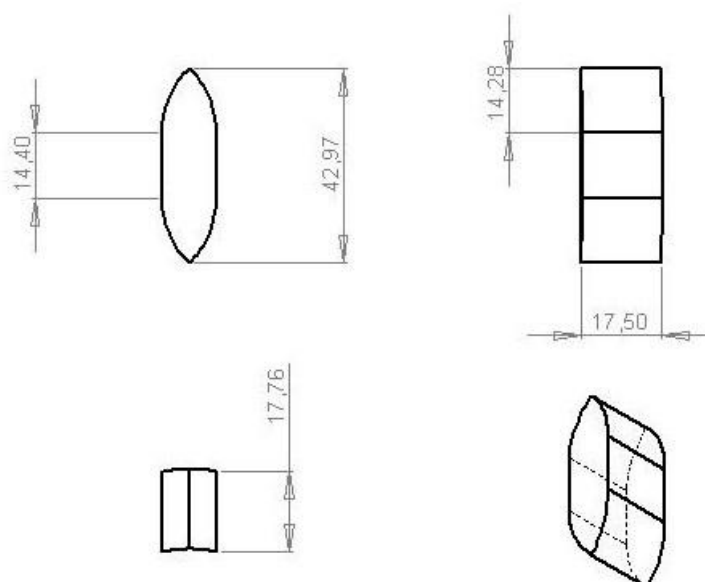
Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε την τομή του μήτρας που θα βελτιστοποιήσουμε :



Σχήμα 4.2 Σχηματική τομή μήτρας

4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ

Η γεωμετρία του ποδιού της αράχνης στην μήτρα που θα βελτιστοποιήσουμε φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4.3 Πόδι αράχνης

Παρατηρούμε ότι το πόδι αποτελείται από τέσσερις συμμετρικές καμπύλες β' βαθμού και ένα ευθύγραμμο τμήμα. Θα επιχειρήσουμε να αλλάξουμε την γεωμετρία αυτή αλλά και να την γενικεύσουμε. Έτσι, θα θεωρήσουμε ότι η επιφάνεια του ποδιού ακολουθεί την γεωμετρία μιας spline τρίτου βαθμού με χαρακτηριστικά των οποίων τις τιμές θα βελτιστοποιήσουμε:

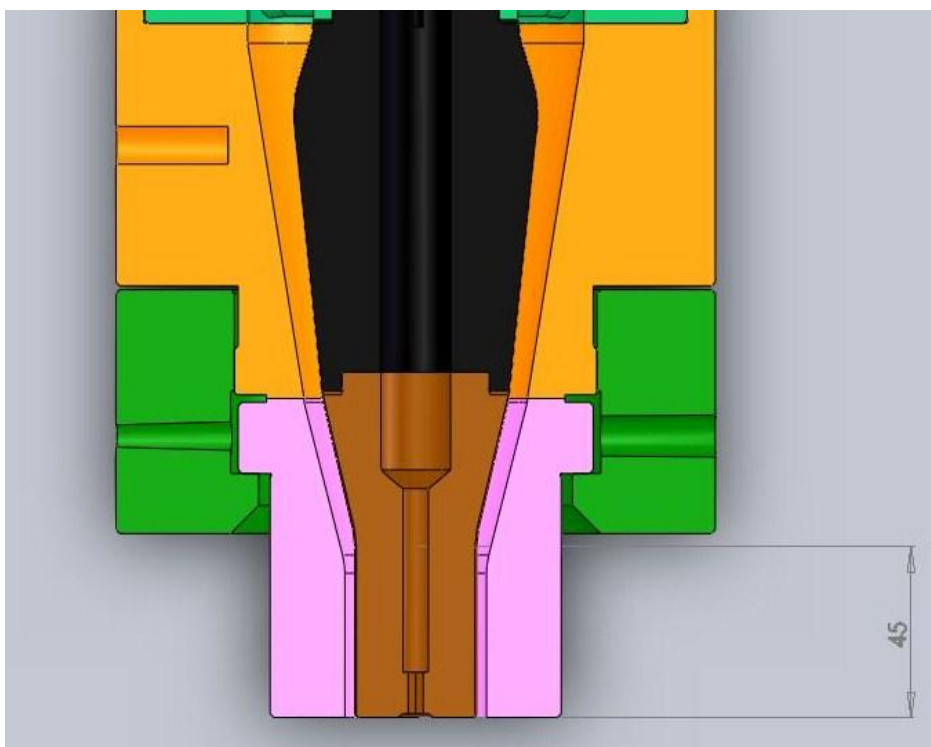
- Το μήκος της spline κατά τον X άξονα (X),
- το μέγιστο ύψος της spline (Y),
- την θέση του μέγιστου σαν ποσοστό του X (f),
- την γωνία εκκίνησης της spline (a) και
- την γωνία τερματισμού της spline (b).

Ο κώδικας που βρίσκεται στη παράγραφο 4.7, συντάχθηκε με την βοήθεια του λογισμικού Matlab[®] και μας βοηθάει να σχεδιάσουμε καμπύλες spline τρίτου βαθμού εισάγοντας τα παραπάνω δεδομένα της επιλογής μας.

Στη συνέχεια εισάγονται αυτές οι καμπύλες στο λογισμικό SolidWorks[®] και σχεδιάζονται τα πόδια της αράχνης που ακολουθούν την γεωμετρία της spline.

4.4 ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΕΚΒΟΛΕΑ

Όπως προαναφέρθηκε, το μήκος εξόδου του εκβολέα ομαλοποιεί την ροή. Όμως, το μεγάλο μήκος αυξάνει τον χρόνο παραμονής του πολυμερούς στην μήτρα με αρνητικά αποτελέσματα. Έτσι, θα πρέπει να εξετάσουμε την επιρροή αυτού του παράγοντα στις μεταβλητές που προαναφέραμε. Η παράλληλη ζώνη και το μήκος της στην μήτρα που θα βελτιστοποιήσουμε φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4.4 Μήκος εξόδου του εκβολέα

4.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο 1 είδαμε ότι τα πόδια της αράχνης δεν πρέπει να είναι μακρύτερα από 30-80 mm και παχύτερα από 9-12 mm. Έτσι θα πρέπει $30 \text{ mm} \leq X \leq 80 \text{ mm}$ και $4,5 \text{ mm} \leq Y \leq 12 \text{ mm}$. Επίσης επιλέγεται να είναι $10\% \leq f \leq 90\%$, $0^\circ \leq a \leq 10^\circ$ και $0^\circ \leq b \leq 10^\circ$. Τέλος, θα θεωρήσουμε ως ελάχιστο μήκος της παράλληλης ζώνης τα 24 mm και μέγιστο το ήδη υπάρχον. Δηλαδή, $24 \text{ mm} \leq L \leq 45 \text{ mm}$. Τέλος, επιλέγουμε τρία όμοια κατανεμημένα επίπεδα τιμών για τις παραμέτρους που θα βελτιστοποιήσουμε. Θα πραγματοποιήσουμε το παρακάτω πείραμα:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΕΠΙΠΕΔΑ		
		1	2	3
L	ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (mm)	24	34,5	45
Y	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	9	10,5	12
X	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	30	55	80
f	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	0,1	0,5	0,9
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	0	5	10
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	0	5	10

Πίνακας 4.1 Παράμετροι βελτιστοποίησης

Με έξι παραμέτρους και τρία επίπεδα τιμών επιλέγεται ορθογώνια σειρά L27 του πίνακα Taguchi

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ					
	ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (mm)	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	f ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	a ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	b ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2
3	1	1	1	1	3	3
4	1	2	2	2	1	1
5	1	2	2	2	2	2
6	1	2	2	2	3	3
7	1	3	3	3	1	1
8	1	3	3	3	2	2
9	1	3	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1	2
11	2	1	2	3	2	3
12	2	1	2	3	3	1
13	2	2	3	1	1	2
14	2	2	3	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1
16	2	3	1	2	1	2
17	2	3	1	2	2	3
18	2	3	1	2	3	1
19	3	1	3	2	1	3
20	3	1	3	2	2	1
21	3	1	3	2	3	2
22	3	2	1	3	1	3
23	3	2	1	3	2	1
24	3	2	1	3	3	2
25	3	3	2	1	1	3
26	3	3	2	1	2	1
27	3	3	2	1	3	2

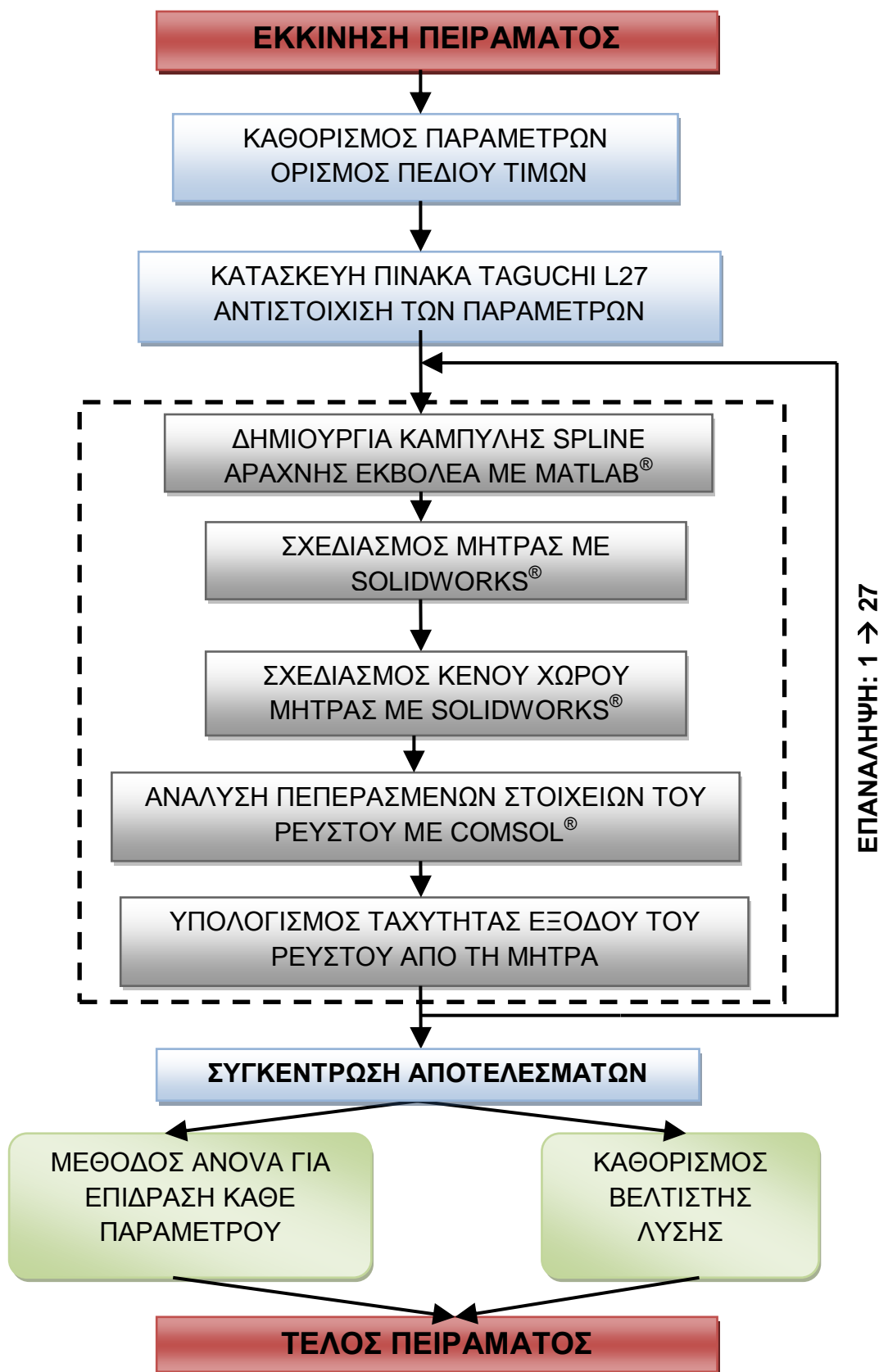
Πίνακας 4.2 L27 του πίνακα Taguchi

Με αντικατάσταση του Πίνακα 4.1 στον Πίνακα 4.2 παίρνουμε τις τιμές της 1^{ης} σειράς πειραμάτων:

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ					
	ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (mm)	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	f ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	a ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	b ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE
1	24	9	30	0,1	0	0
2	24	9	30	0,1	5	5
3	24	9	30	0,1	10	10
4	24	10,5	55	0,5	0	0
5	24	10,5	55	0,5	5	5
6	24	10,5	55	0,5	10	10
7	24	12	80	0,9	0	0
8	24	12	80	0,9	5	5
9	24	12	80	0,9	10	10
10	34,5	9	55	0,9	0	5
11	34,5	9	55	0,9	5	10
12	34,5	9	55	0,9	10	0
13	34,5	10,5	80	0,1	0	5
14	34,5	10,5	80	0,1	5	10
15	34,5	10,5	80	0,1	10	0
16	34,5	12	30	0,5	0	5
17	34,5	12	30	0,5	5	10
18	34,5	12	30	0,5	10	0
19	45	9	80	0,5	0	10
20	45	9	80	0,5	5	0
21	45	9	80	0,5	10	5
22	45	10,5	30	0,9	0	10
23	45	10,5	30	0,9	5	0
24	45	10,5	30	0,9	10	5
25	45	12	55	0,1	0	10
26	45	12	55	0,1	5	0
27	45	12	55	0,1	10	5

Πίνακας 4.3 L27 του πίνακα Taguchi του πειράματος

4.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας

4.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Παρακάτω, θα δείξουμε αναλυτικά την διαδικασία της πρώτης προσομοίωσης αναφέροντας τα βήματα εκτέλεσής της:

- **1^ο Βήμα**

Ορίζουμε τις τιμές των παραμέτρων της πρώτης προσομοίωσης από την πρώτη γραμμή του πίνακα L27 του Taguchi του πειράματος (Πίνακας 4.3). Έτσι, έχουμε:

L: Μήκος εξόδου (mm)	24
Υ: Πάχος ποδιού SPIDER (mm)	9
Χ: Ύψος ποδιού SPIDER (mm)	30
Ποσοστό f καμπύλης SPIDER	0,1
Γωνία a καμπύλης SPIDER	0
Γωνία b καμπύλης SPIDER	0

Πίνακας 4.4 Τιμές παραμέτρων της 1^{ης} προσομοίωσης

- **2^ο Βήμα**

Χρησιμοποιώντας τον κώδικα Matlab[®] κατασκευάζουμε την καμπύλη SPLINE της κεφαλής της αράχνης από τις τιμές των πέντε τελευταίων γραμμών του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 4.4) και αποθηκεύουμε τις τιμές της σε αρχείο Excel[®]:

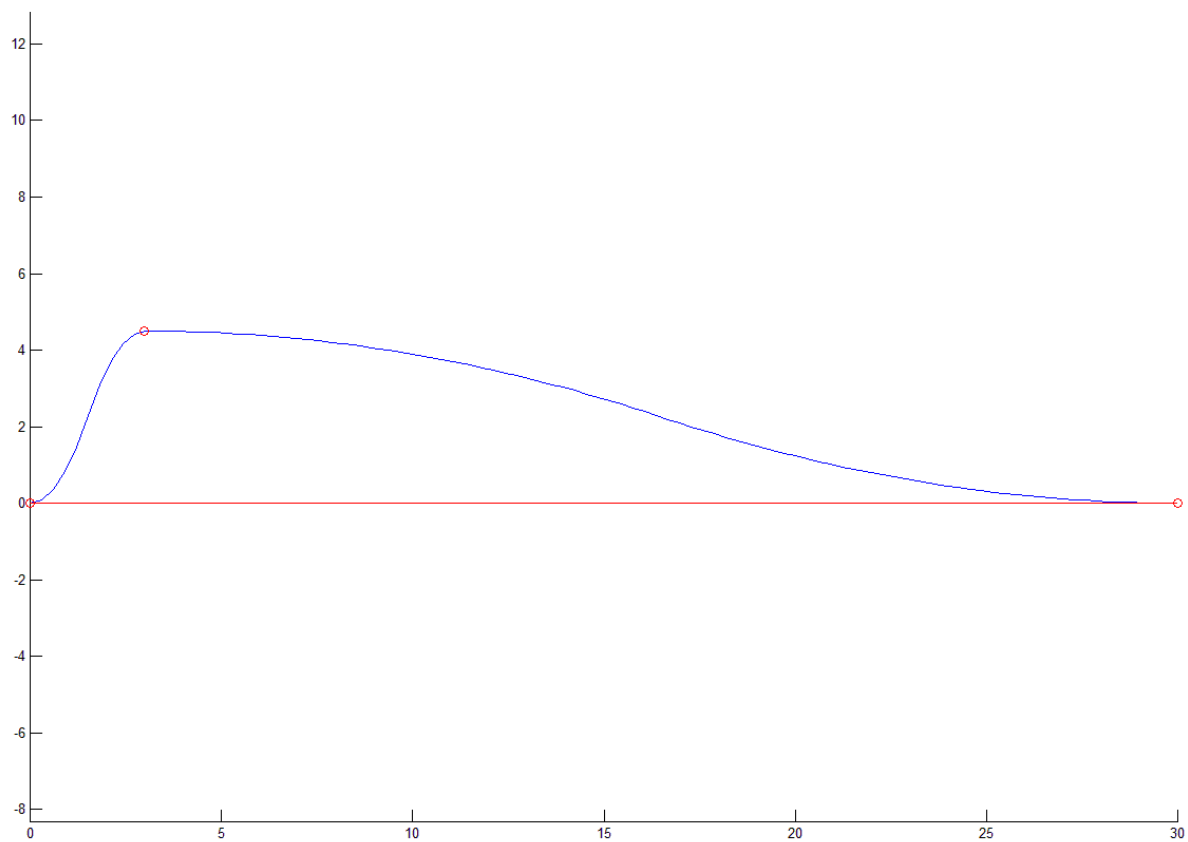
```

% CREATES SPLINE ARCS FOR SPIDER OF EXTRUDER
%
%-----%
function curve
clear
% INSERT THE PARAMETERS OF SPLINE
y=input('max curve height (9-12)=')
x=input('curve length (30-80)=')
f=input('position of curve maximum (as percentage of curve length)=')
a=input('forward attack angle (0-10)=')
b=input('aft attack angle (0-10)=')
%-----%
% DATA PROCESSING
da=tan(a*pi/180);
db=tan(b*pi/180);
spline=spapi(3,[0 0 f*x f*x x x],[0 da y/2 0 0 -db])
t=linspace(0,x,100);
vals=fnval(spline,t);
X(:,1)=t(1,:);
Y(:,1)=vals(1,:);
%-----%
% CREATE THE FIGURE OF SPLINE
figure(1)
hold on
plot(t,vals)
plot([0 f*x x],[0 y/2 0],'or')
plot([0 x],[0 0],'r')
axis equal
hold off
%-----%

```

Κώδικας Matlab[®] για την κατασκευή καμπύλης SPLINE

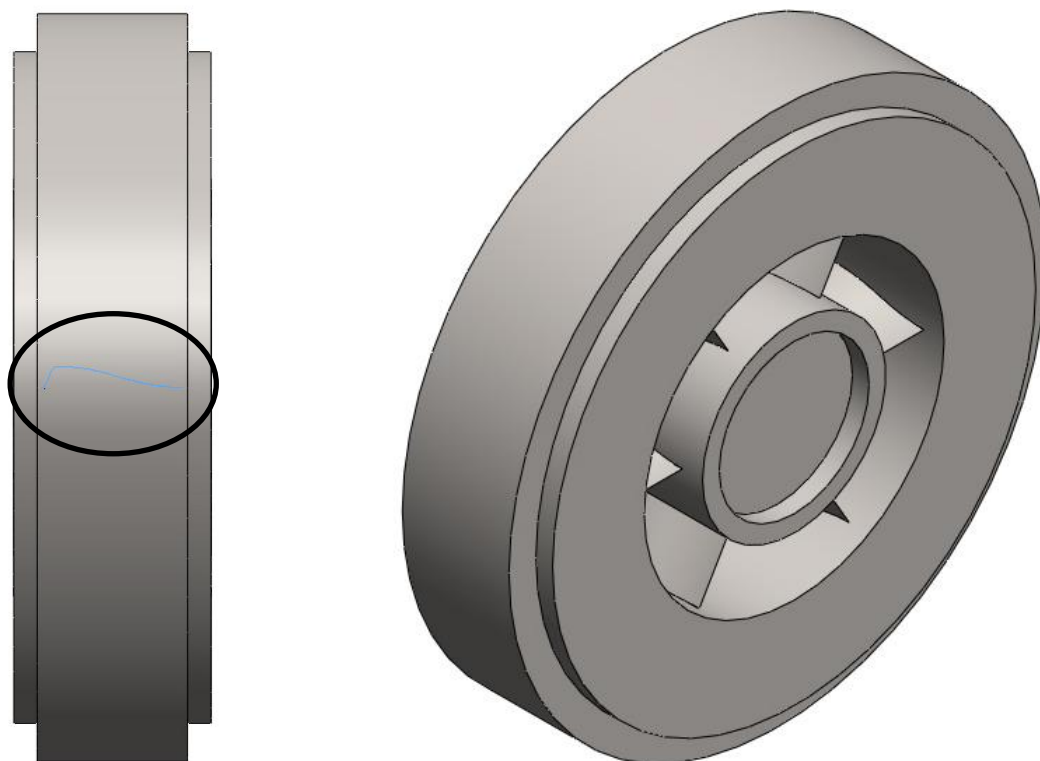
Έτσι, παίρνουμε την παρακάτω καμπύλη για την κεφαλή της αράχνης της πρώτης προσομοίωσης:



Σχήμα 4.6 Καμπύλη SPLINE της κεφαλής αράχνης της 1^{ης} προσομοίωσης

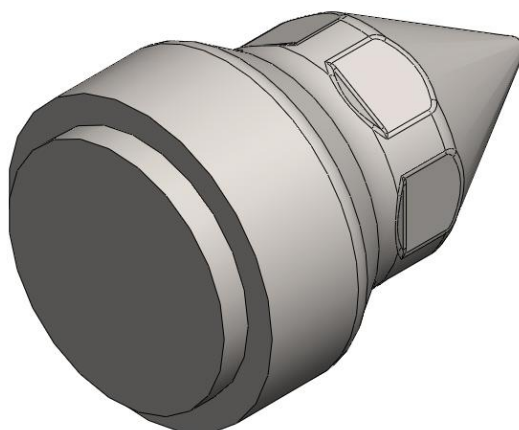
- **3^ο Βήμα**

Χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks® κατασκευάζουμε την κεφαλή της αράχνης, με τη βοήθεια των τιμών της καμπύλης SPLINE και τις διαστάσεις της μήτρας του εργαστηρίου. Έτσι, έχουμε:

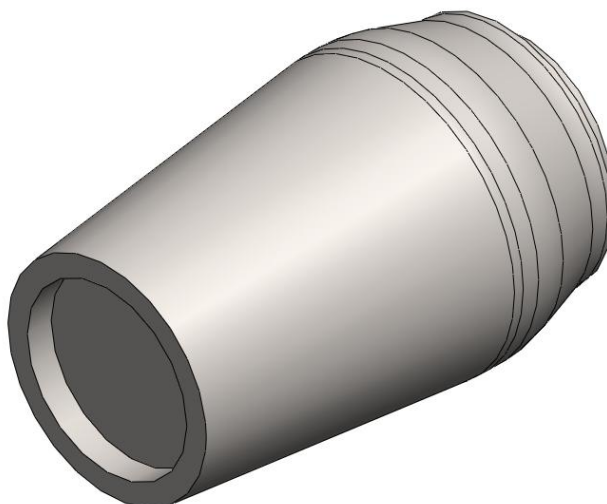


Σχήμα 4.7 Κεφαλής αράχνης της 1^{ης} προσομοίωσης

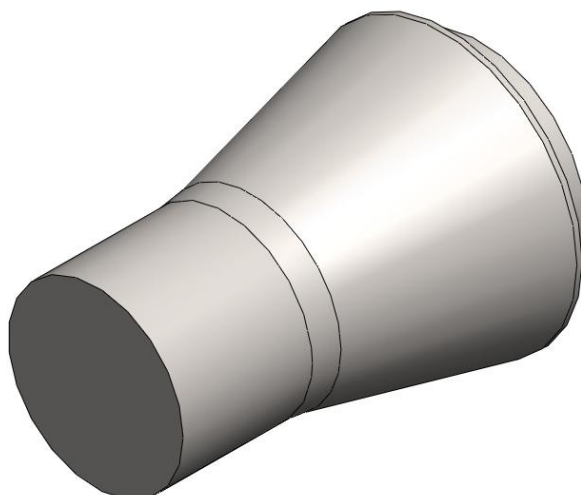
Στη συνέχεια, κατασκευάζουμε τα υπόλοιπα μέρη της μήτρας χρησιμοποιώντας την τιμή της πρώτης γραμμής του πίνακα των παραμέτρων της 1^{ης} προσομοίωσης (Πίνακας 4.4) και τις διαστάσεις της μήτρας του εργαστηρίου. Έτσι, έχουμε:



Σχήμα 4.8 Πίσω τμήμα του κυρίως σώματος

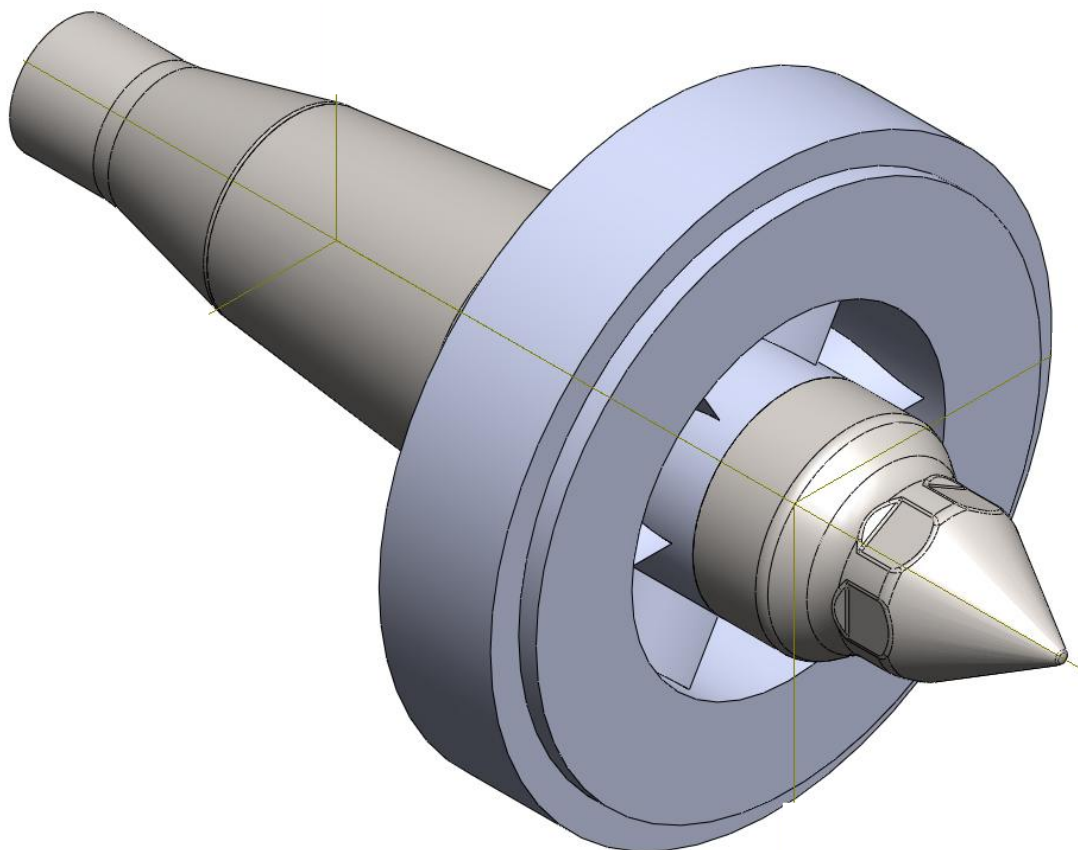


Σχήμα 4.9 Μέσο τμήμα του κυρίως σώματος



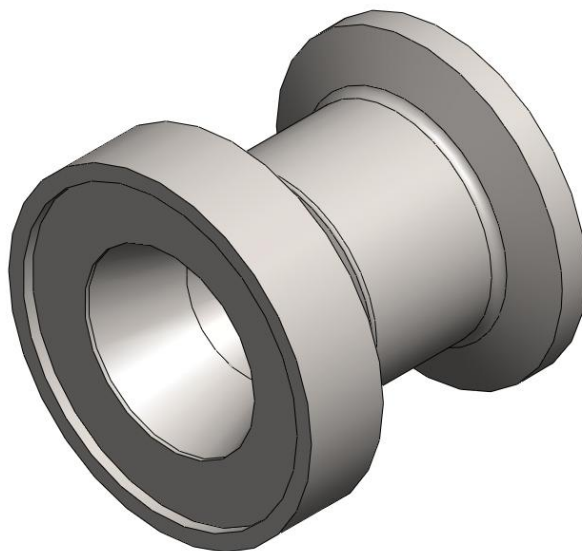
Σχήμα 4.10 Μπροστά τμήμα του κυρίως σώματος

Από τα παραπάνω τμήματα (Σχήμα 4.7 - Σχήμα 4.10) κατασκευάζουμε το κυρίως σώμα της μήτρας:

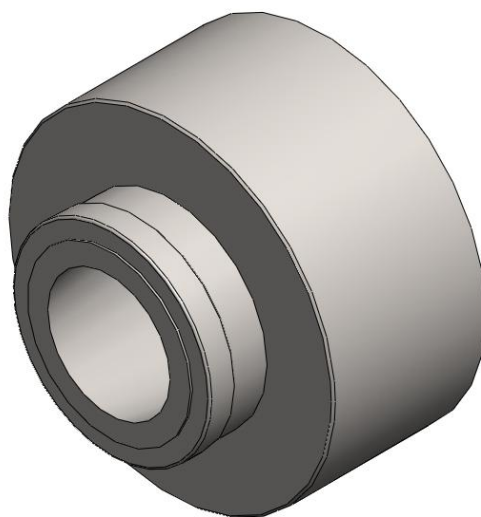


Σχήμα 4.11 Κυρίως σώμα της μήτρας εκβολής

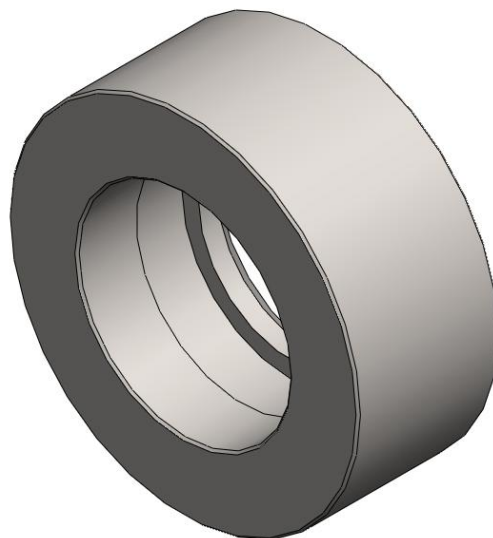
Στη συνέχεια, κατασκευάζουμε τα μέρη του κελύφους της μήτρας με τη βοήθεια των διαστάσεων της μήτρας του εργαστηρίου. Έτσι, έχουμε:



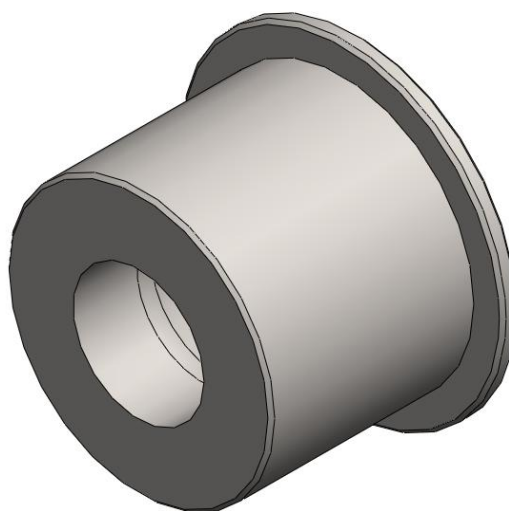
Σχήμα 4.12 Πίσω τμήμα του κελύφους



Σχήμα 4.13 Μέσο - πίσω τμήμα του κελύφους

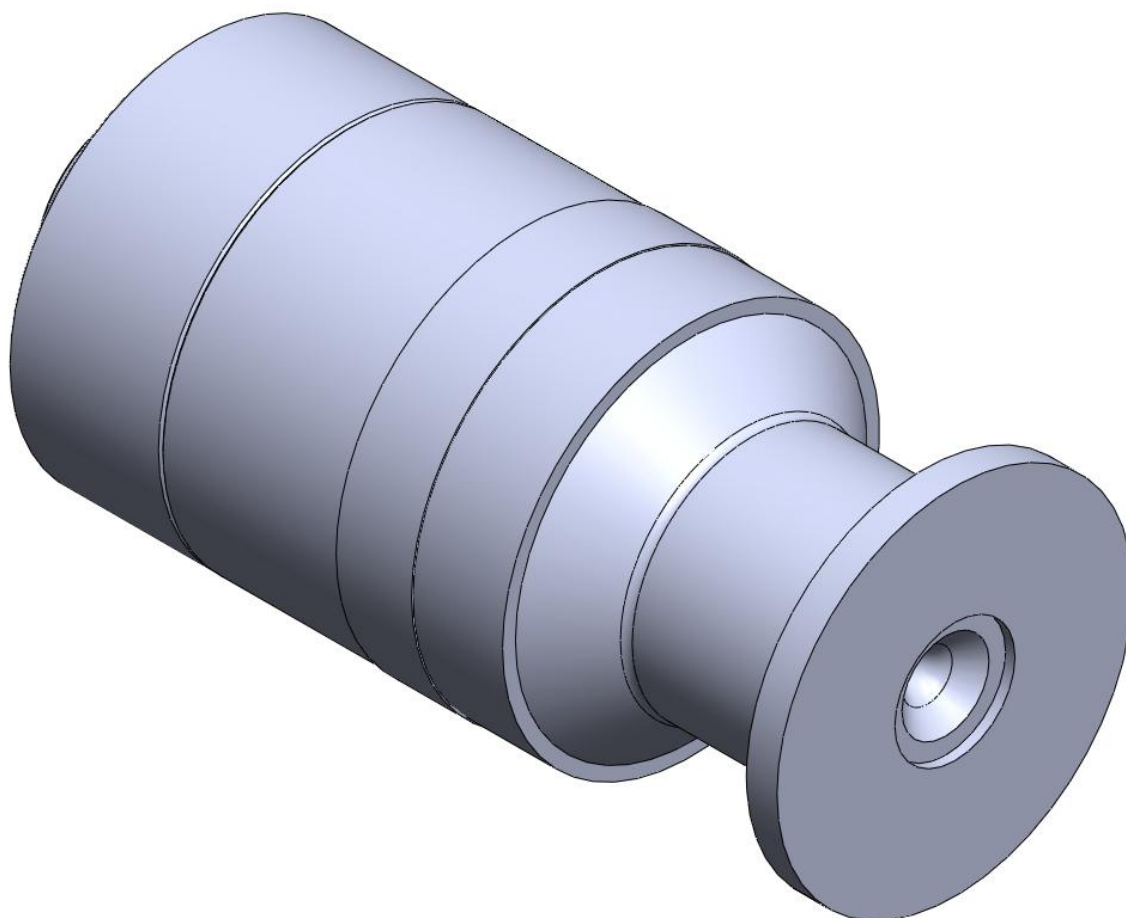


Σχήμα 4.14 Μέσο - μπροστά τμήμα του κελύφους



Σχήμα 4.15 Μπροστά τμήμα του κελύφους

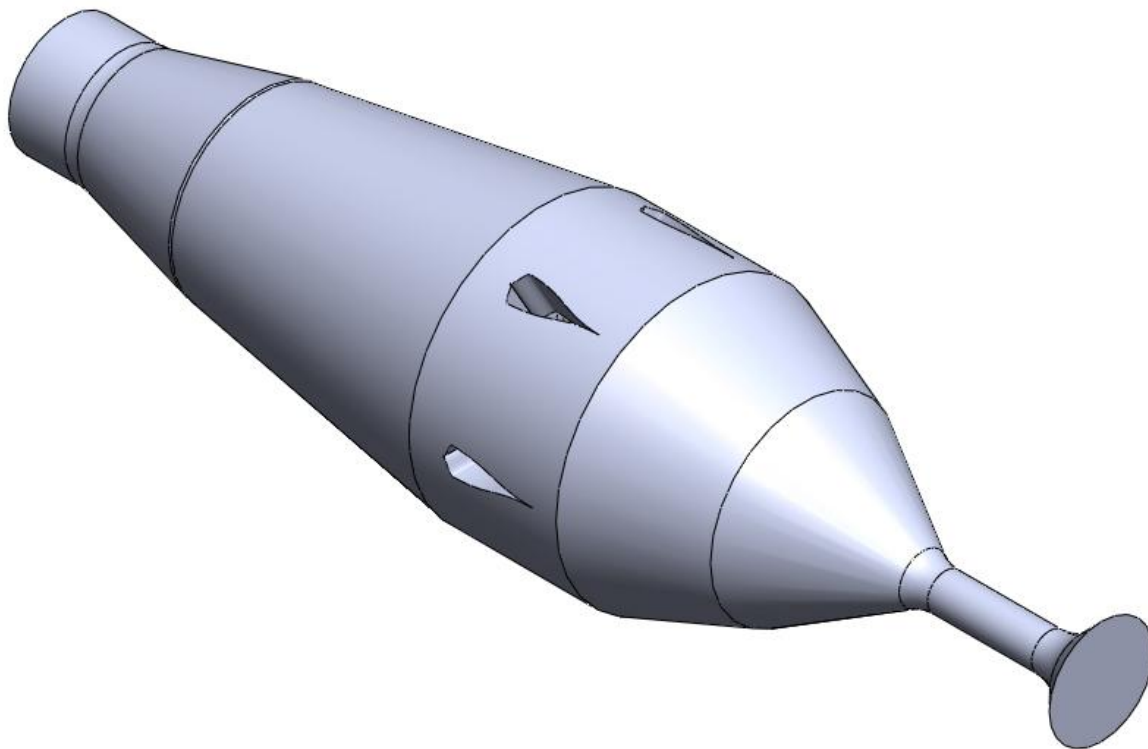
Από τα παραπάνω τμήματα (Σχήμα 4.12 - Σχήμα 4.15) και το κυρίως μέρος της μήτρας (Σχήμα 4.11), κατασκευάζουμε ολόκληρη τη μήτρα εκβολής της πρώτης προσομοίωσης:



Σχήμα 4.16 Μήτρα εκβολής

- **4° Βήμα**

Χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks® απομονώνουμε τον κενό χώρο της μήτρας για περαιτέρω μελέτη του ρευστού. Έτσι, έχουμε:



Σχήμα 4.17 Κενός χώρος της μήτρας (ρευστό)

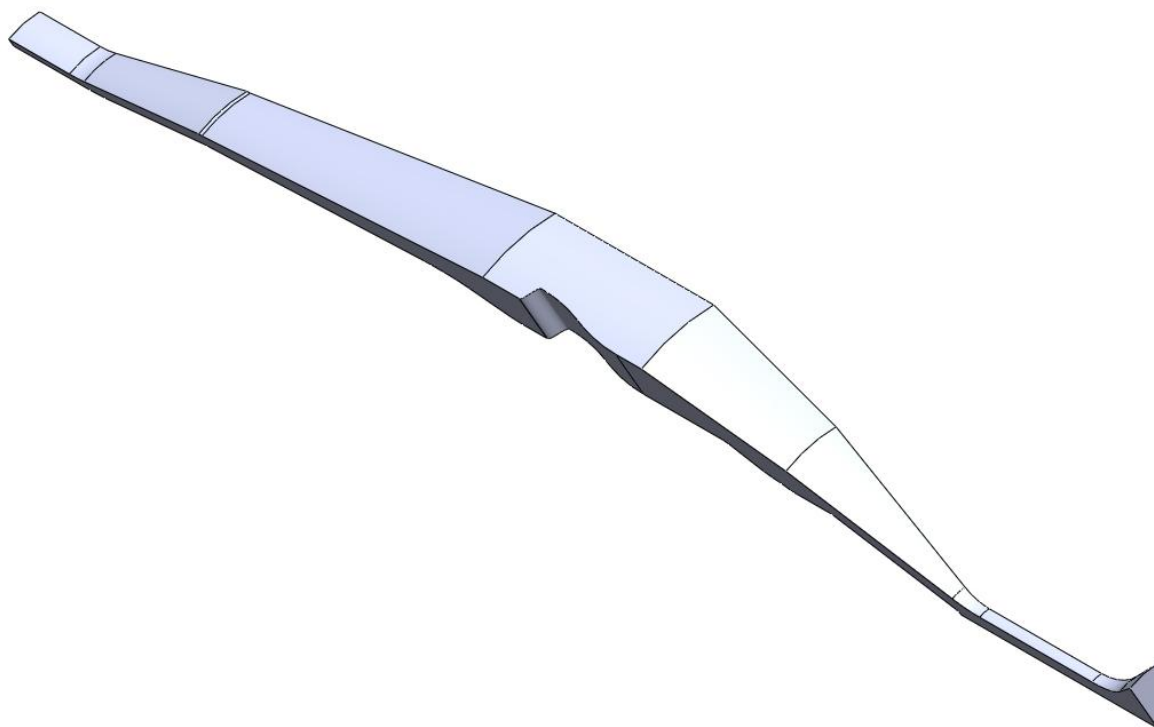
- **5° Βήμα**

Παρατηρούμε ότι στο παραπάνω σχήμα, ότι τα 6 «πόδια αράχνης» (6 υποστηρίγματα) είναι συμμετρικά τοποθετημένα στον ροϊκό σωλήνα και έχουν συμμετρία στη μορφή.

Άρα, η γωνία συμμετρίας είναι:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{6 \cdot 2} = 30^\circ$$

Άρα, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός αυτό και με τη βοήθεια του SolidWorks®, να απομονώσουμε το 1/12 του συνολικού κενού χώρου για να συνεχίσουμε την μελέτη του ρευστού.

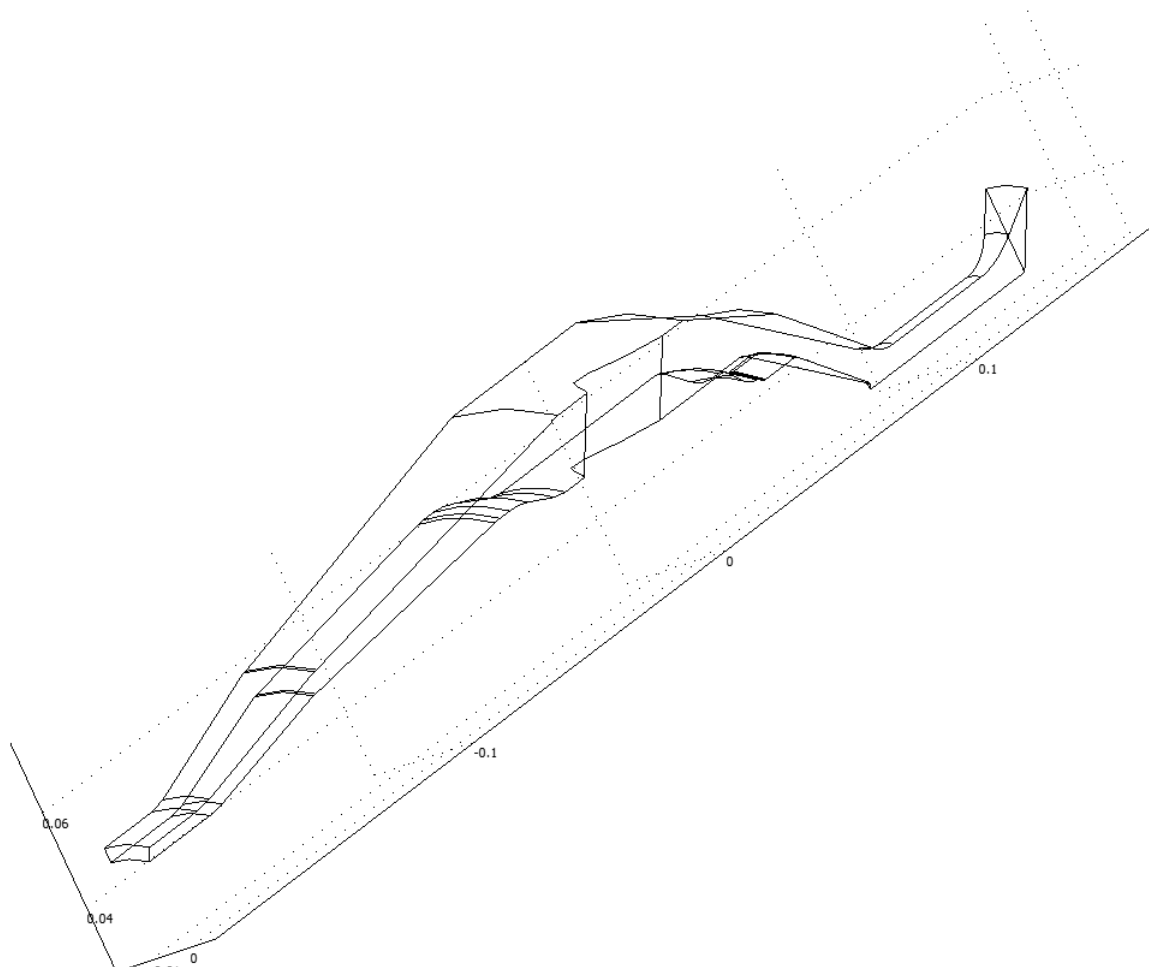


Σχήμα 4.18 Κενός χώρος της μήτρας εκβολής (ρευστό) “κομμένος” κατά 30°

Το μοντέλο αυτό αποθηκεύεται σε μορφή .IGES για να εισάγουμε την γεωμετρία του στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Comsol® και να το επιλύσουμε.

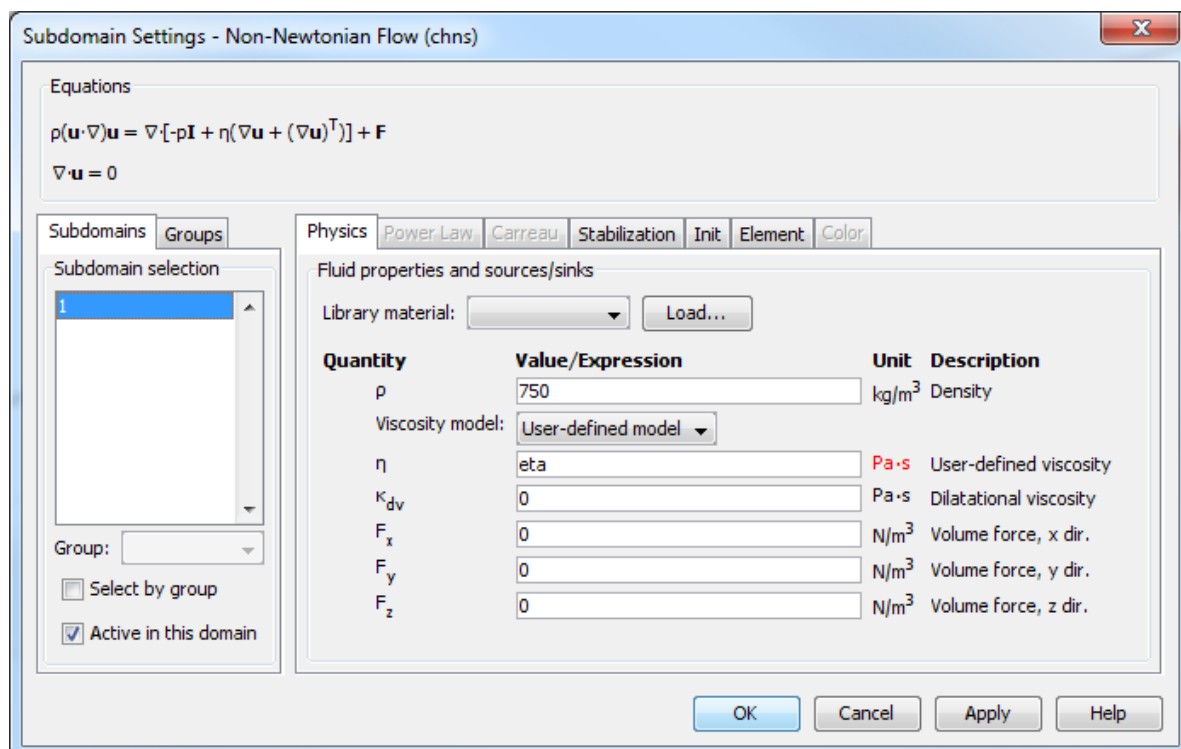
- **6° Βήμα**

Στη συνέχεια εισάγουμε το μοντέλο του παραπάνω βήματος στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Comsol®:

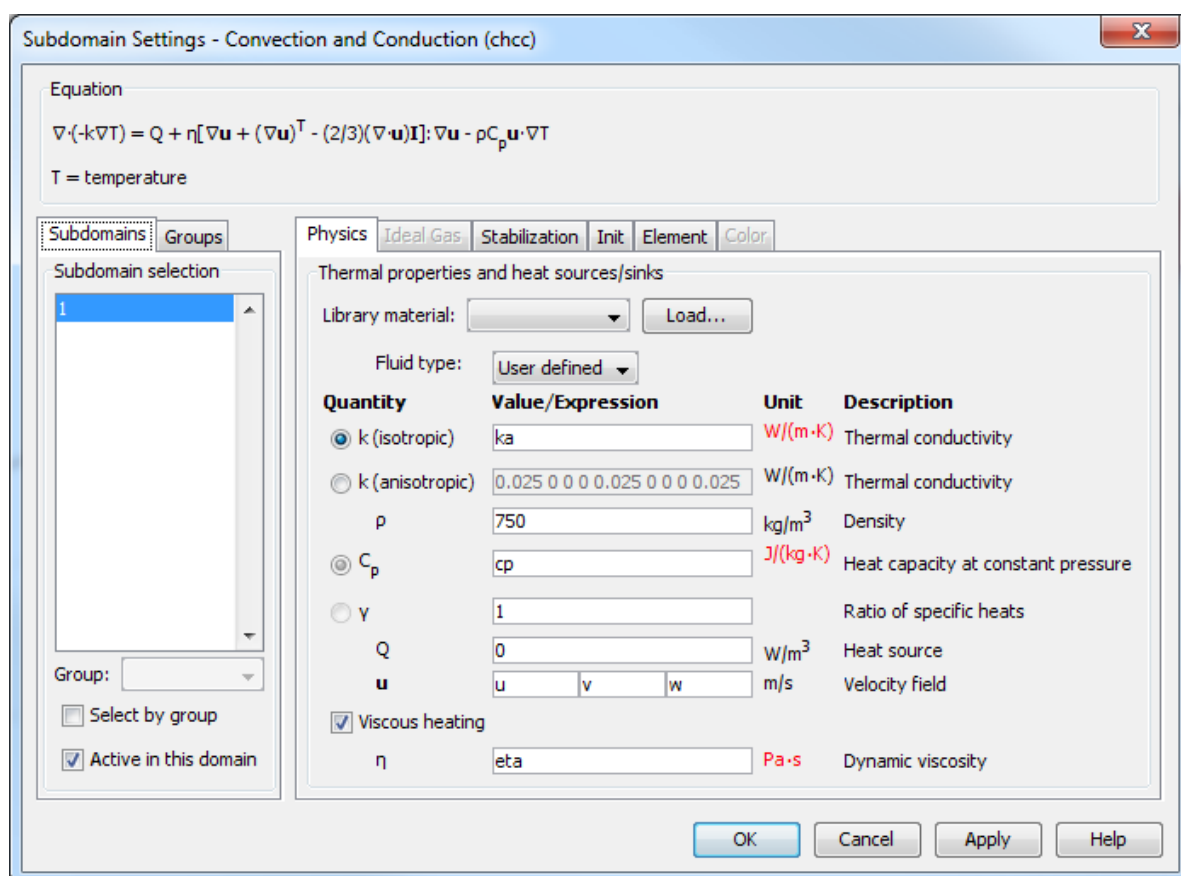


Σχήμα 4.19 Εισαγωγή γεωμετρίας στο Comsol®

και γίνεται ο καθορισμός των ιδιοτήτων του πολυμερικού τήγματος, το οποίο θεωρείται μη νευτωνικό ρευστό. Ο καθορισμός των ιδιοτήτων αφορά τόσο τις ιδιότητες του ρευστού όσο και αυτές του θερμικού προβλήματος:



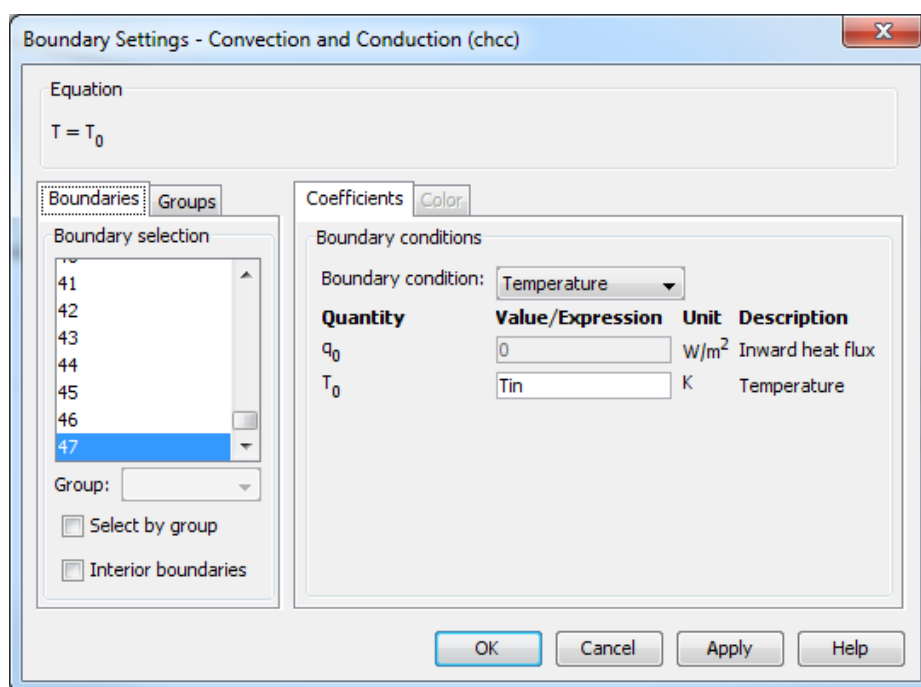
Σχήμα 4.20 Ιδιότητες μη νευτωνικού ρευστού



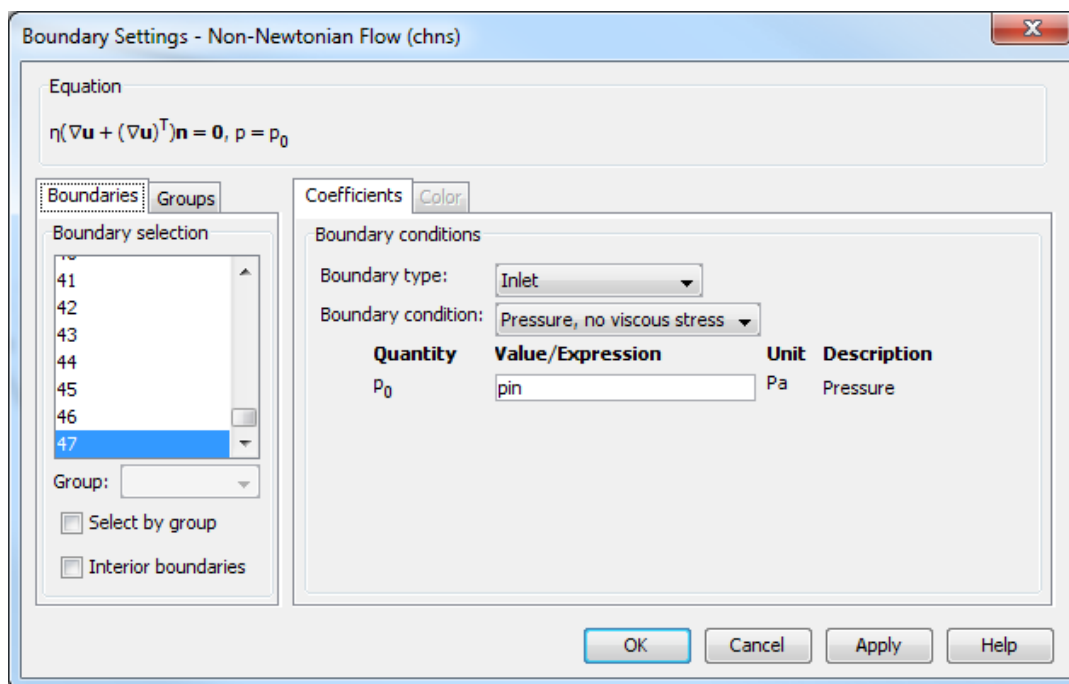
Σχήμα 4.21 Θερμικές ιδιότητες του ρευστού στο πρόβλημα

- **7^ο Βήμα**

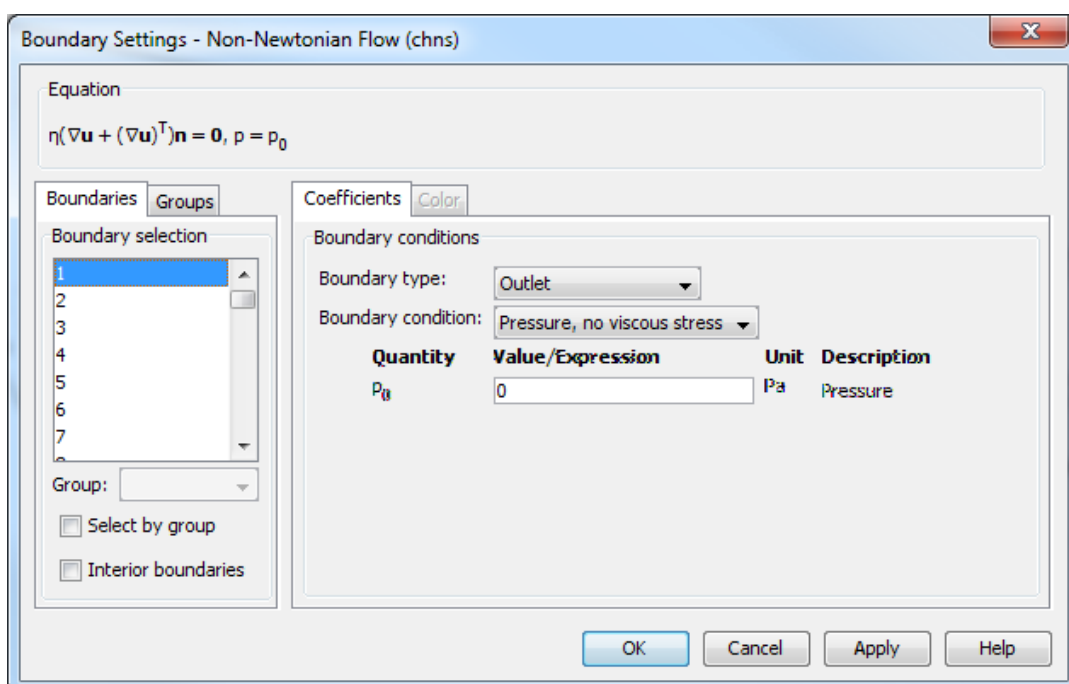
Στη συνέχεια, ορίζουμε τις οριακές συνθήκες στο μοντέλο με παράδειγμα τη θερμοκρασία εισόδου και την πίεση εισόδου και εξόδου. Μια σημαντική οριακή συνθήκη είναι το γεγονός ότι η ταχύτητα ενός ρευστού κοντά σε στερεό τοίχωμα είναι ίση με την ταχύτητα του τοιχώματος. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, επειδή το τοίχωμα είναι ακίνητο (τοιχώμα μήτρας) η ταχύτητα είναι μηδέν πάνω στα τοιχώματα (συνθήκη μη ολίσθησης – no slip). Τέλος, βάζουμε συμμετρία (symmetry) στις επιφάνειες που έχουμε “κόψει” λόγω της συμμετρίας των 30°.



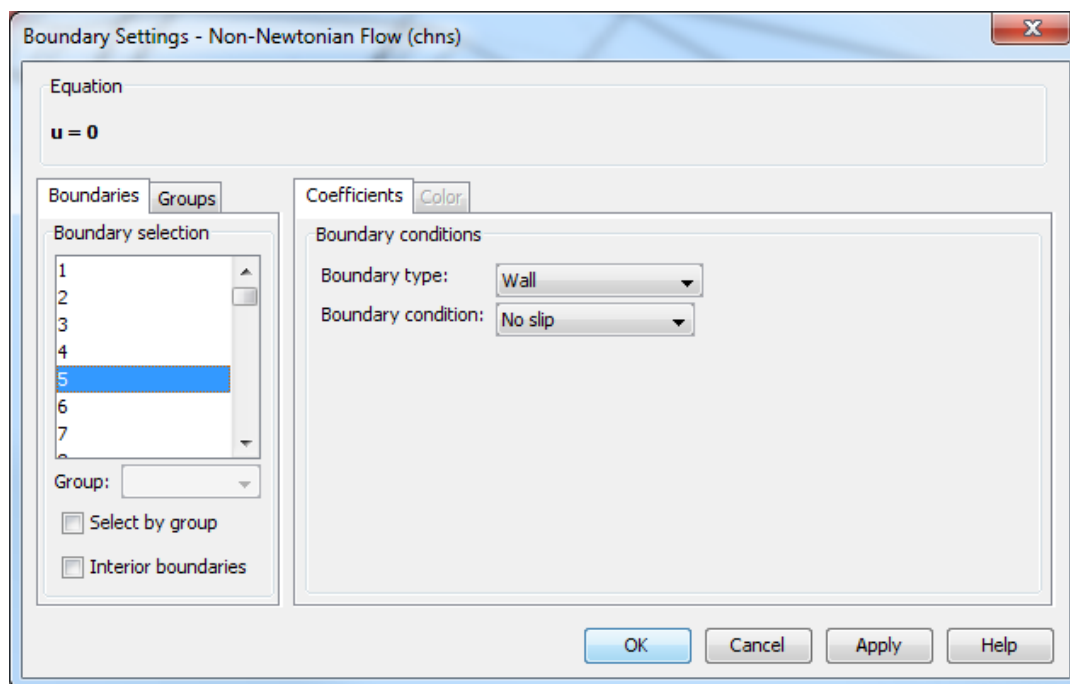
Σχήμα 4.22 Προσδιορισμός θερμοκρασίας εισόδου



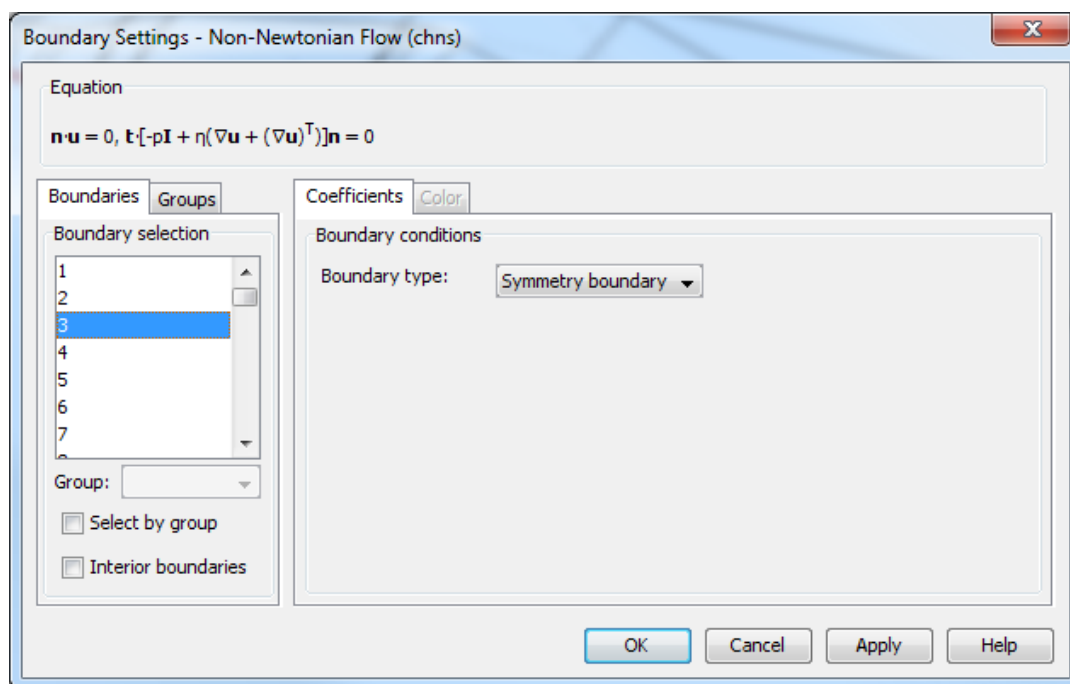
Σχήμα 4.23 Προσδιορισμός πίεσης εισόδου



Σχήμα 4.24 Προσδιορισμός πίεσης εξόδου (μανομετρικές πιέσεις, δηλαδή σχετικές ως προς την ατμοσφαιρική)



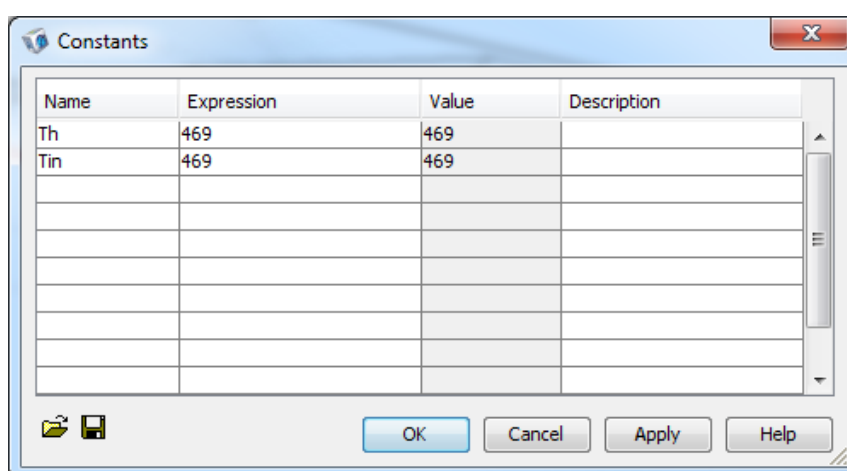
Σχήμα 4.25 Εφαρμογή συνθήκης μη ολίσθησης



Σχήμα 4.26 Εφαρμογή συνθήκης συμμετρίας

Καθορίζουμε επίσης και ορισμένες σταθερές του προβλήματος, είτε ως αριθμούς, όπως η θερμοκρασία στην είσοδο, είτε με μαθηματικές εκφράσεις που τις περιγράφουν, όπως το ιξώδες ή η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού υπό σταθερή πίεση (c_p) και η ειδική αγωγιμότητα (k_a). Οι δύο τελευταίες θερμικές σταθερές καθορίζονται ως πολυώνυμα της θερμοκρασίας, ενώ το ιξώδες (η , όπως το έχουμε ορίσει στο σχήμα 4.21) ακολουθεί το μοντέλο των Carreau και όχι τον εκθετικό νόμο. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο το ιξώδες του υλικού (πολυαιθυλένιο) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (όπου $\mu_{\infty}=0$):

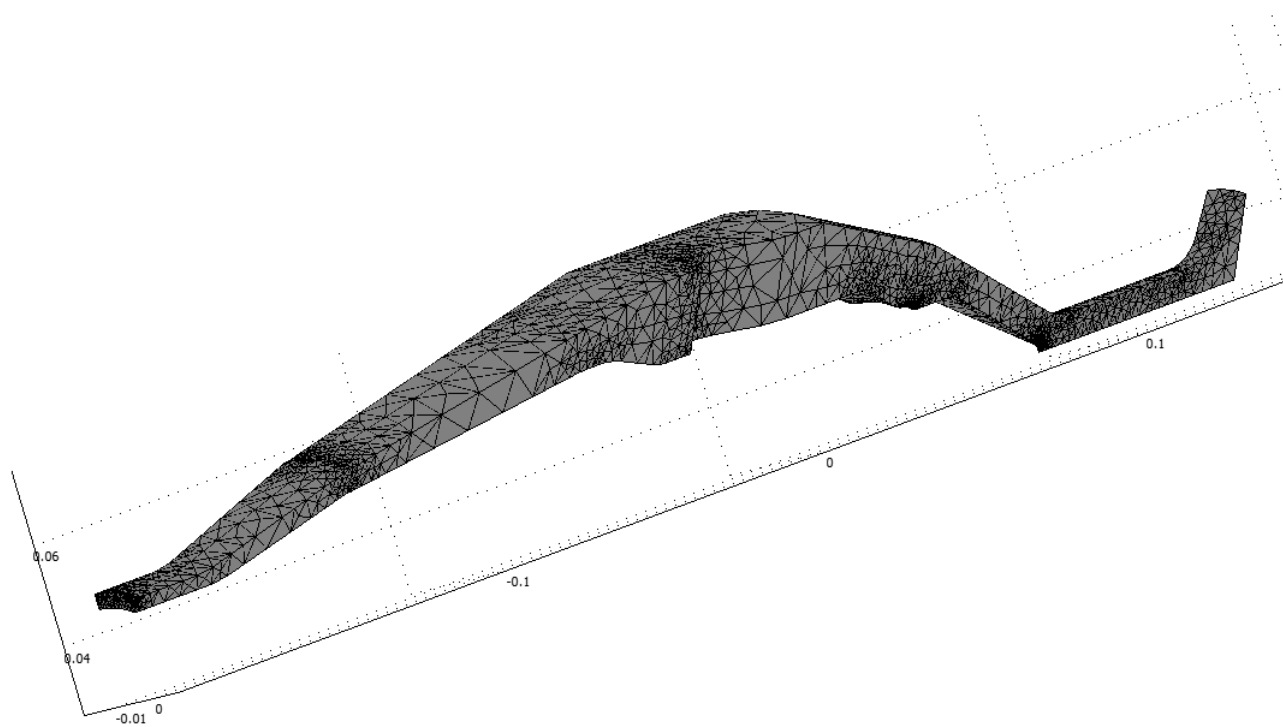
$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \cdot (1 + \lambda \cdot \dot{\gamma})^{\frac{\mu-1}{2}} = \mu_0 \cdot (1 + \lambda \cdot \dot{\gamma})^{\frac{\mu-1}{2}} \quad (2.1)$$



Σχήμα 4.27 Καθορισμός σταθεράς θερμοκρασίας

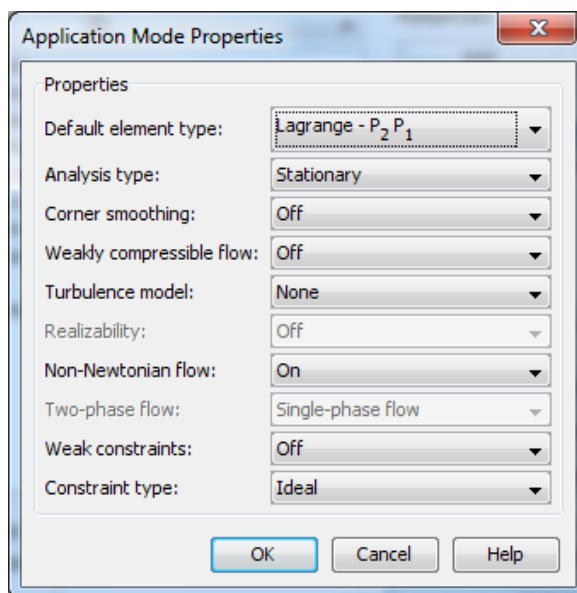
- **8° Βήμα**

Στη συνέχεια παρατίθεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τη ροή του πολυμερούς.

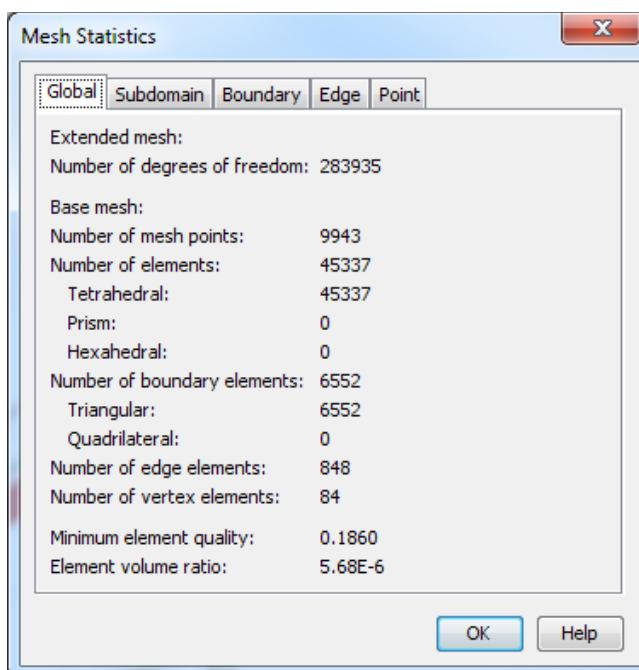


Σχήμα 4.28 Καθορισμός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

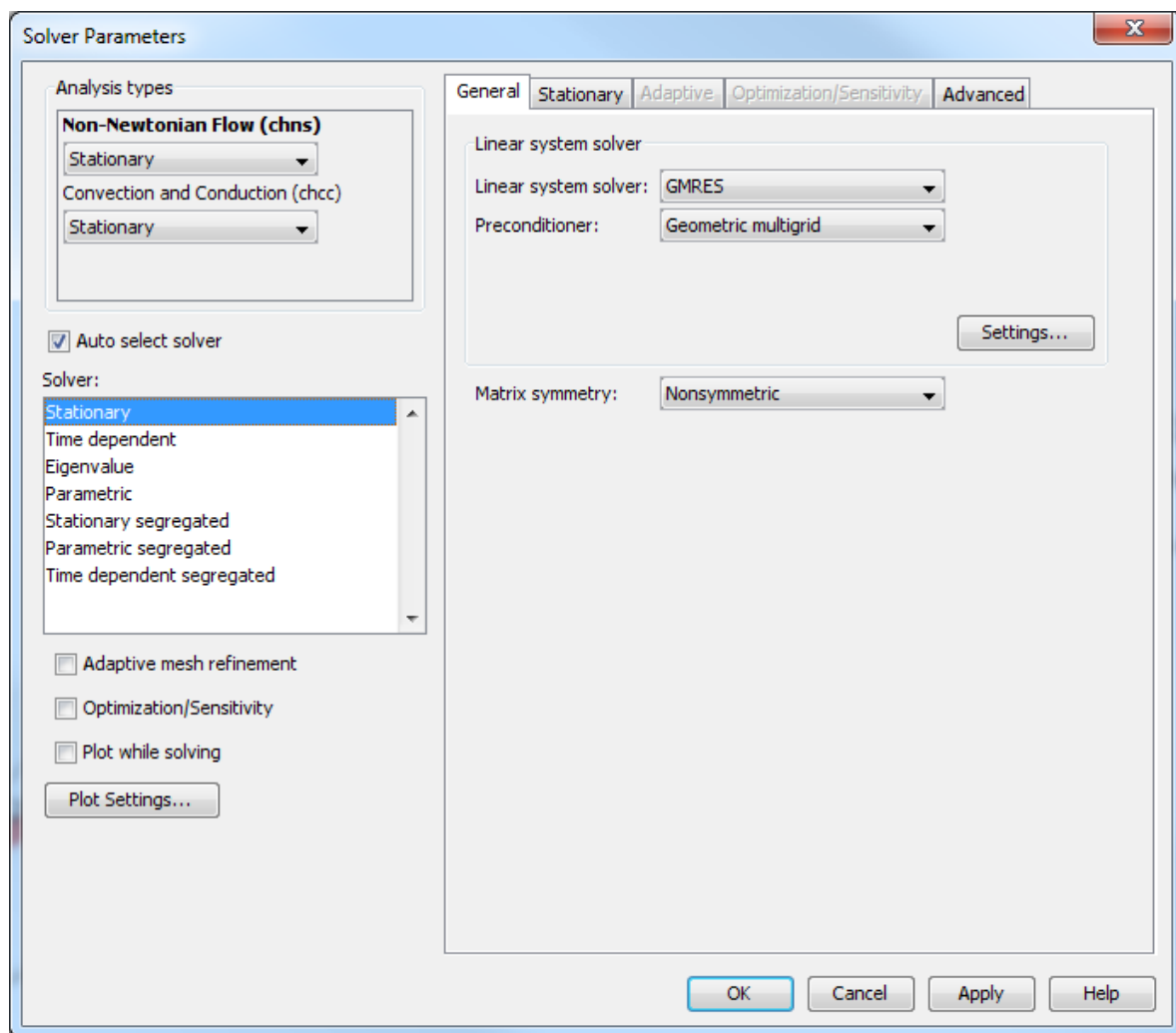
Στις επόμενες εικόνες αναλύεται ο τρόπος ορισμού των πεπερασμένων στοιχείων, το είδος που χρησιμοποιήθηκε (Lagrange - P2 P1, τετραεδρικά) και ο αλγόριθμος (GMRES – επίλυση αραιών μητρώων) που ακολουθήθηκε για την επίλυση των αλγεβρικών συστημάτων που προέκυψαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου των ΠΣ.



Σχήμα 4.29 Ιδιότητες της εφαρμογής



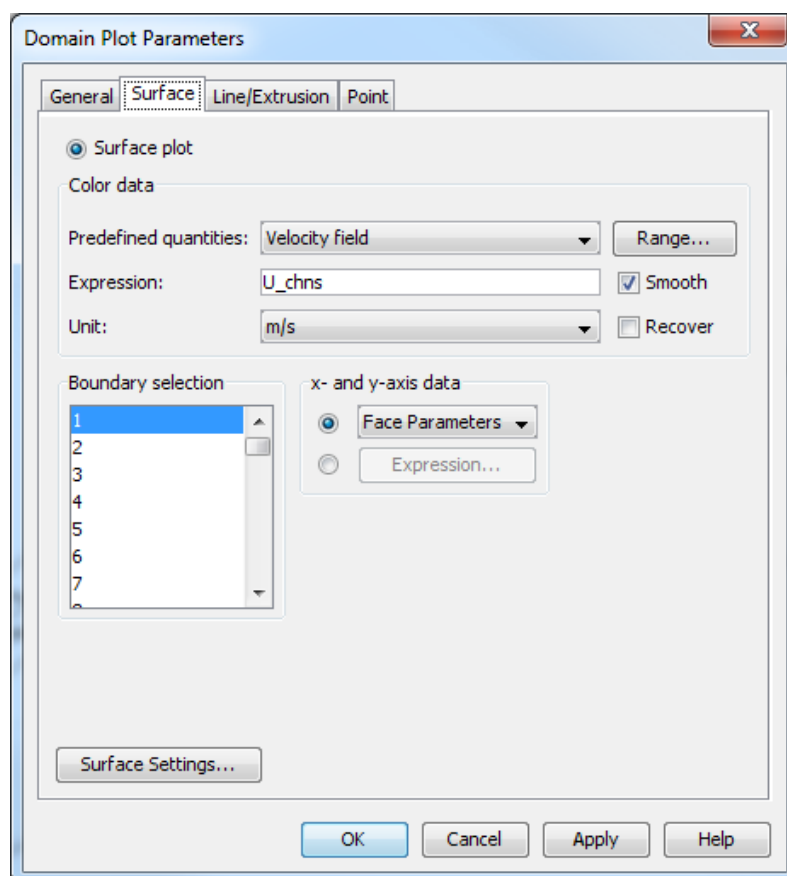
Σχήμα 4.30 Στατιστικά του πλέγματος



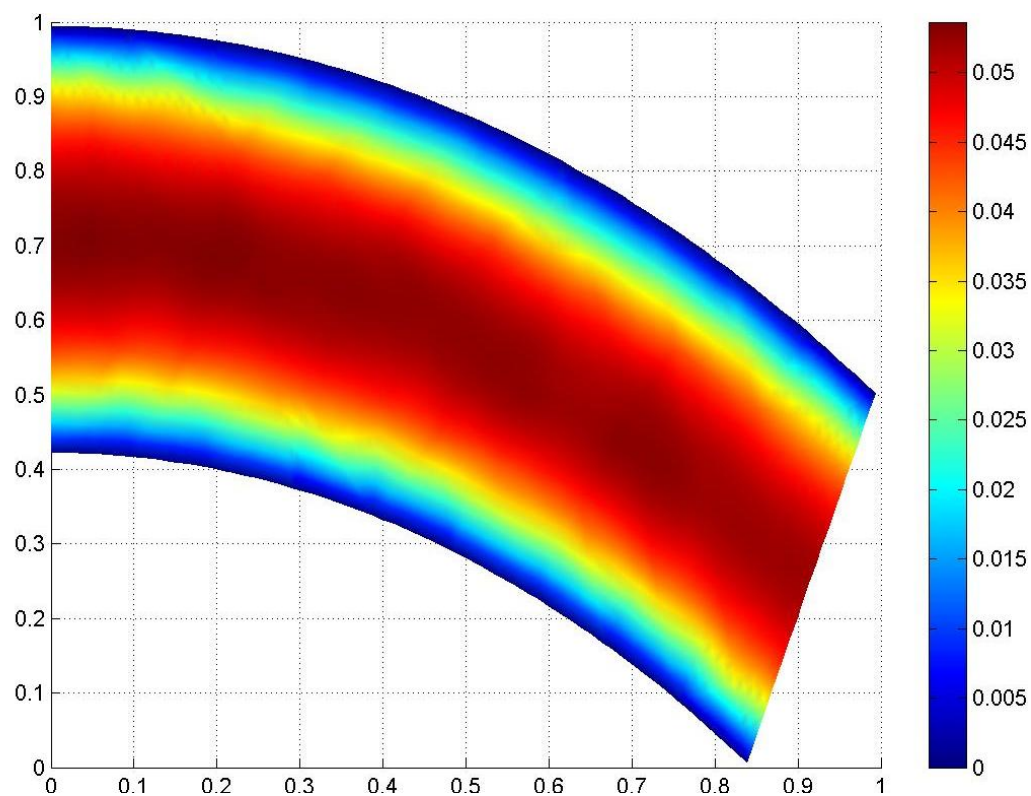
Σχήμα 4.31 Καθορισμός παραμέτρων πεπερασμένων στοιχείων

- **9° Βήμα**

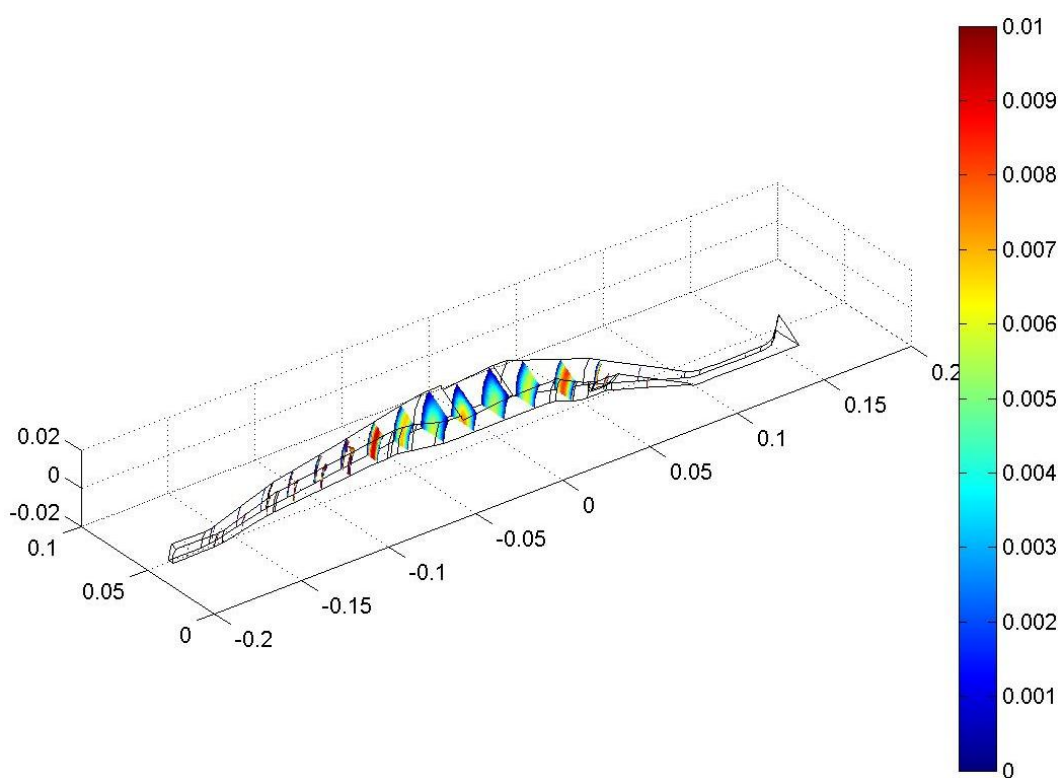
Τέλος, παρουσιάζεται ο τρόπος εξαγωγής των αποτελεσμάτων που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή το προφίλ της ταχύτητας εξόδου και η κατανομή των ταχυτήτων κατά μήκος της μήτρας. Με την βοήθεια της εντολής domain plot parameters επιτυγχάνουμε τα παρακάτω:



Σχήμα 4.32 Καθορισμός παραμέτρων γραφήματος προφίλ ταχύτητας



Σχήμα 4.33 Προφίλ ταχύτητας στην έξοδο της μήτρας της 1^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 4.34 Κατανομή ταχυτήτων κατά μήκος της μήτρας της 1^{ης} προσομοίωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αφού εκτελέσουμε και τα 27 πειράματα, συγκεντρώνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προγράμματος Comsol®. Έτσι, έχουμε:

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (μ)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (σ)	SNR $10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right)$
1	0,037591	0,015877	7,486416
2	0,037617	0,015885	7,487841
3	0,037588	0,01587	7,489195
4	0,037164	0,015769	7,44614
5	0,037203	0,015737	7,473298
6	0,037176	0,015738	7,466466
7	0,036933	0,015744	7,405664
8	0,036898	0,015731	7,404908
9	0,036872	0,01572	7,405055
10	0,029895	0,012831	7,346862
11	0,029884	0,012829	7,34492
12	0,029876	0,012808	7,356505
13	0,029472	0,012736	7,287439
14	0,029465	0,012704	7,307059
15	0,029392	0,012654	7,320193
16	0,029826	0,012745	7,384782
17	0,029891	0,012765	7,390587
18	0,029862	0,012723	7,410802
19	0,024163	0,010575	7,177691
20	0,024279	0,010562	7,229923
21	0,024176	0,010502	7,242287
22	0,024551	0,010649	7,25511
23	0,024663	0,010694	7,257693
24	0,024514	0,010644	7,246368
25	0,024573	0,0106	7,303517
26	0,024591	0,010609	7,301934
27	0,024531	0,01059	7,29604

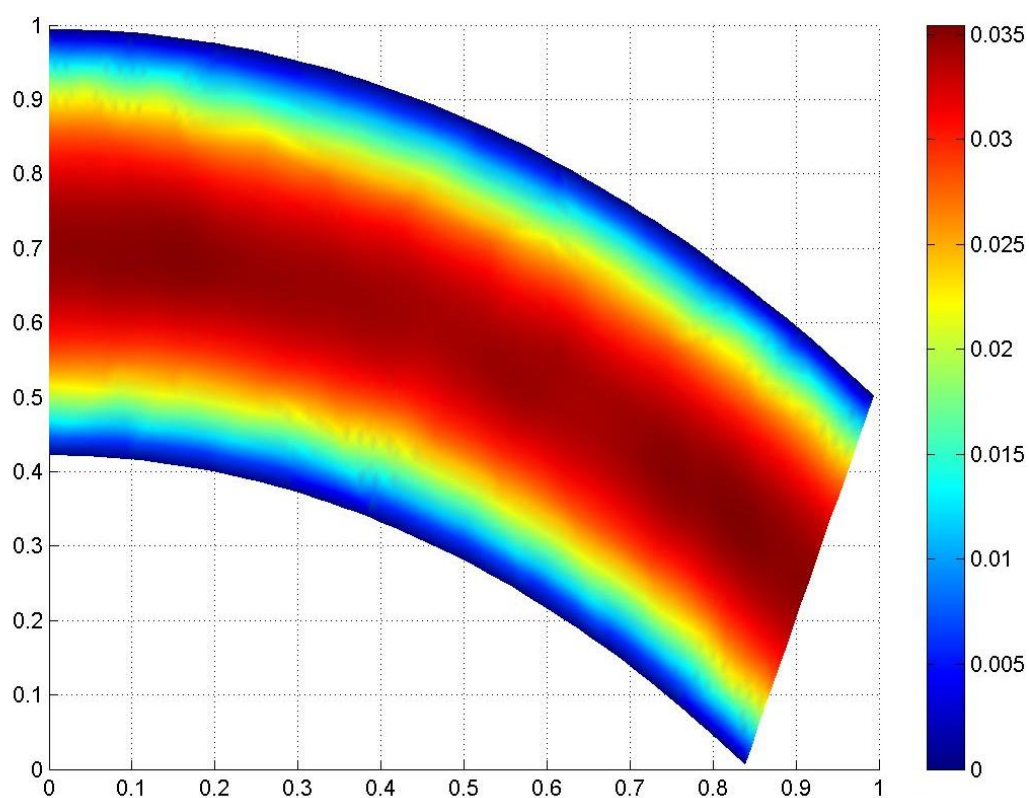
Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 27 πειραμάτων

Από τον προηγούμενο πίνακα εντοπίζουμε τη μικρότερη τιμή του SNR καθώς και τις αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων. Έτσι έχουμε τον παρακάτω πίνακα:

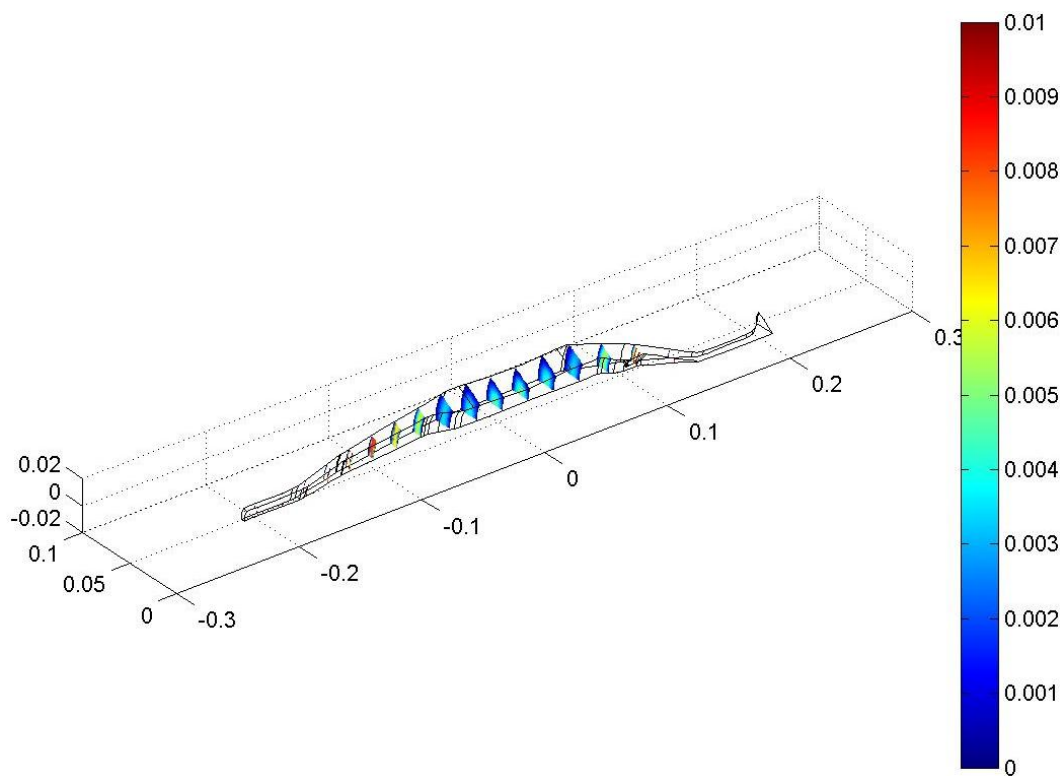
Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΟ SNR	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ					
		L	Y	X	f	a	b
19	7,177691	45	9	80	0,5	0	10

Πίνακας 5.2 Μικρότερη τιμή των SNR όλων των πειραμάτων

Παρακάτω, παραθέτουμε τα γραφήματα του προφίλ ταχυτήτων στην έξοδο της μήτρας εκβολής, καθώς και την κατανομή των θερμοκρασιών κατά μήκος της.



Σχήμα 4.35 Προφίλ ταχύτητας στην έξοδο της μήτρας της 19^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 4.36 Κατανομή ταχυτήτων κατά μήκος της μήτρας της 19^{ης} προσομοίωσης

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΟΝΑ

Στη συνέχεια, θα κάνουμε στατιστική ανάλυση με τη μέθοδο ANOVA, για να βρούμε τους λόγους συμβολής των έξι παραμέτρων, δηλαδή την επίδρασή τους στη ποιότητα του πλαστικού σωλήνα. Αρχικά, θα συμβολίσουμε την κάθε παράμετρο με τα γράμματα A, B, C, D, E, F για λόγους ευκολίας, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ
L	ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (mm)	A
Υ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	B
X	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	C
f	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	D
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	E
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	F

Πίνακας 5.3 Συμβολισμός των παραμέτρων

Στην αρχή υπολογίζουμε πρώτα το *διορθωτικό παράγοντα* ($\Delta\Pi$) ως εξής:

$$\Delta\Pi = \frac{(\text{ολικό άθροισμα όλων των παρατηρήσεων})^2}{\text{συνολικός αριθμός όλων των παρατηρήσεων}} = \frac{(\sum y_i)^2}{n} = 4,38 \cdot 10^3$$

Ο $\Delta\Pi$ χρησιμοποιείται για να διορθώσει (από όπου και το όνομα διορθωτικός παράγοντας) το άθροισμα όλων των τετραγωνισμένων παρατηρήσεων $|\sum y_i^2|$ για να πάρουμε το (διορθωμένο) ολικό άθροισμα των τετραγώνων, το **OAT**, ως εξής:

$$OAT = \sum y_i^2 - \Delta\Pi = 0,6257$$

- Για τις κύριες επιδράσεις έχουμε:

Για το άθροισμα των τετραγώνων της κύριας επίδρασης ενός k -επιπέδου παράγοντα A, με m παρατηρήσεις να αντιστοιχούν σε κάθε επίπεδο $A(i)$, με $i = 1, \dots, k$, έχουμε:

$$AT_A = \frac{A_1^2 + \dots + A_k^2}{m} - \Delta\Pi$$

Άρα, για τους παράγοντές μας έχουμε:

$$AT_A = 0,5133$$

$$AT_B = 0,0100$$

$$AT_C = 0,0788$$

$$AT_D = 0,0121$$

$$AT_E = 0,0035$$

$$AT_F = 9,6724 \cdot 10^{-4}$$

Οι βαθμοί ελευθερίας που αντιστοιχούν σε ένα k -επίπεδο παράγοντα (ή σε μια στήλη k επιπέδων σε έναν ισορροπημένο σχεδιασμό) ισούνται με $k-1$.

Οι βαθμοί ελευθερίας των παραμέτρων μας είναι: $\beta_e = 3-1 = 2$

Ο λόγος $AT_A/\beta_{\varepsilon_A}$, που ονομάζεται μέσο άθροισμα τετραγώνων του παράγοντα A (MAT_A), δίνει μια εκτίμηση για το μέγεθος της μεταβλητότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων που οφείλεται στον παράγοντα A . Επομένως έχουμε:

$$MAT_A = \frac{AT_A}{\beta_{\varepsilon_A}} = 0,2567$$

$$MAT_B = \frac{AT_B}{\beta_{\varepsilon_B}} = 0,0050$$

$$MAT_C = \frac{AT_C}{\beta_{\varepsilon_C}} = 0,0394$$

$$MAT_D = \frac{AT_D}{\beta_{\varepsilon_D}} = 0,0060$$

$$MAT_E = \frac{AT_E}{\beta_{\varepsilon_E}} = 0,0018$$

$$MAT_F = \frac{AT_F}{\beta_{\varepsilon_F}} = 4,8362 \cdot 10^{-4}$$

- Για το υπόλοιπο έχουμε:

Αφού υπολογίσουμε το άθροισμα των τετραγώνων όλων των κυρίων επιδράσεων, εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε το άθροισμα των τετραγώνων του υπολοίπου (ή το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων - AT_Y), με αφαίρεση από το OAT . Έχουμε:

$$AT_Y = OAT - AT_A - AT_B - AT_C - AT_D - AT_E - AT_F = 0,0071$$

με βαθμούς ελευθερίας υπολοίπου:

$$\beta_{\epsilon_Y} = \beta_{\epsilon_{ολ}} - \beta_{\epsilon_A} - \beta_{\epsilon_B} - \beta_{\epsilon_C} - \beta_{\epsilon_D} - \beta_{\epsilon_E} - \beta_{\epsilon_F} = 68$$

όπου:

$$\beta_{\epsilon_{ολ}} = n - 1 = 80$$

Ο λόγος AT_Y/β_{ϵ_Y} , το μέσο άθροισμα τετραγώνων του υπολοίπου (MAT_Y), αντιπροσωπεύει το μέγεθος της μεταβλητότητας που παραμένει ανεξήγητο, αφού ερμηνευθούν τα στοιχεία της διασποράς που οφείλεται στις κύριες επιδράσεις.. Στην πραγματικότητα, αντιστοιχεί στη διασπορά που εμφανίζεται μεταξύ των επαναλήψεων κάθε πειραματικής δοκιμής. Αριθμητικά, η διασπορά του υπολοίπου είναι το τετράγωνο της διαφοράς ανάμεσα σε κάθε επανάληψη και το μέσο όρο της δοκιμής της, αθροισμένο επί όλων των δοκιμών. Επομένως, το MAT_Y μπορούμε να το υπολογίσουμε με τη βοήθεια του γενικού τύπου:

$$MAT_Y = \sum_{i=1}^n OAT_i = 1,0408 \cdot 10^{-4}$$

όπου:

n είναι ο αριθμός των πειραματικών δοκιμών και

OAT_i είναι το ολικό (διορθωμένο) άθροισμα των τετραγώνων των παρατηρήσεων εντός της i -στής δοκιμής.

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον F -λόγο, για να εκτιμήσουμε τη σημαντικότητα της επιρροής. Αν ο F -λόγος είναι μεγάλος (εμπειρικός κανόνας: μεγαλύτερος από 4), λέμε ότι το αποτέλεσμα είναι σημαντικό, με άλλα λόγια, ότι η διασπορά που προκαλεί δεν μπορεί να αποδοθεί σε σύμπτωση ή στην τύχη Έτσι, έχουμε.

$$F\text{-λόγος}_A = \frac{MAT_A}{MAT_\gamma} = 2466$$

$$F\text{-λόγος}_B = \frac{MAT_B}{MAT_\gamma} = 4,9046$$

$$F\text{-λόγος}_C = \frac{MAT_C}{MAT_\gamma} = 378,4430$$

$$F\text{-λόγος}_D = \frac{MAT_D}{MAT_\gamma} = 58,0216$$

$$F\text{-λόγος}_E = \frac{MAT_E}{MAT_\gamma} = 16,8340$$

$$F\text{-λόγος}_F = \frac{MAT_F}{MAT_\gamma} = 4,6466$$

Έπειτα υπολογίζουμε την καθαρή διασπορά (ή αμιγής διασπορά) των παραγόντων, η οποία εκφράζει την καθαρή επίδραση τους:

$$AT'_A = AT_A - \beta_{\varepsilon_A} \cdot MAT_\gamma = 0,5131$$

$$AT'_B = AT_B - \beta_{\varepsilon_B} \cdot MAT_\gamma = 0,0098$$

$$AT'_C = AT_C - \beta_{\varepsilon_C} \cdot MAT_\gamma = 0,0786$$

$$AT'_D = AT_D - \beta_{\varepsilon_D} \cdot MAT_\gamma = 0,0119$$

$$AT'_E = AT_E - \beta_{\varepsilon_E} \cdot MAT_\gamma = 0,0033$$

$$AT'_F = AT_F - \beta_{\varepsilon_F} \cdot MAT_\gamma = 7,5908 \cdot 10^{-4}$$

Έχοντας μετρήσει την καθαρή διασπορά μιας συγκεκριμένης πηγής, μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την έκταση στην οποία αυτή η πηγή επηρεάζει τα πειραματικά αποτελέσματα, με άλλα λόγια, το μερίδιο της συνολικής πειραματικής διασποράς για το οποίο είναι υπεύθυνη

αυτή η πηγή. Αυτό επιτυγχάνεται διαιρώντας την καθαρή διασπορά της πηγής δια του ΟΑΤ. Παίρνουμε έτσι το λόγο συμβολής (ΛΣ), ο οποίος, σε ποσοστιαία βάση, είναι:

$$\Lambda\Sigma_A = \frac{AT'_A}{OAT} \cdot 100\% = 82,0070\%$$

$$\Lambda\Sigma_B = \frac{AT'_B}{OAT} \cdot 100\% = 1,5604\%$$

$$\Lambda\Sigma_C = \frac{AT'_C}{OAT} \cdot 100\% = 12,5568\%$$

$$\Lambda\Sigma_D = \frac{AT'_D}{OAT} \cdot 100\% = 1,8970\%$$

$$\Lambda\Sigma_E = \frac{AT'_E}{OAT} \cdot 100\% = 0,5268\%$$

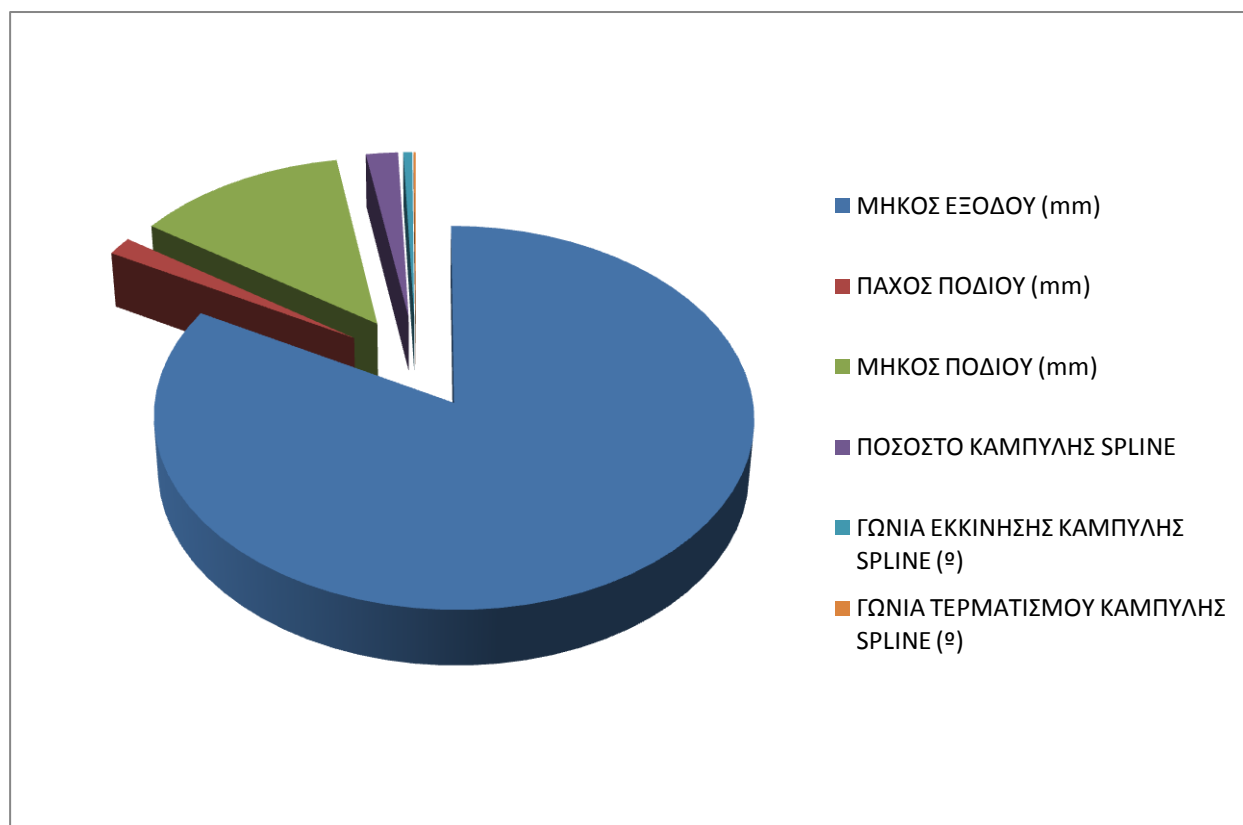
$$\Lambda\Sigma_F = \frac{AT'_F}{OAT} \cdot 100\% = 0,1213\%$$

Στη συνέχεια, θα συγκεντρώσουμε τα παραπάνω αποτελέσματα, βάζοντας πλέον τις κανονικές παραμέτρους και όχι τους συμβολισμούς τους. Έτσι, παίρνουμε τον ακόλουθο πίνακα:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
L	ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (mm)	82 %
Υ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	1,56 %
Χ	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	12,56 %
f	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	1,9 %
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	0,53 %
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	0,12 %

Πίνακας 5.4 Λόγοι συμβολής των παραμέτρων

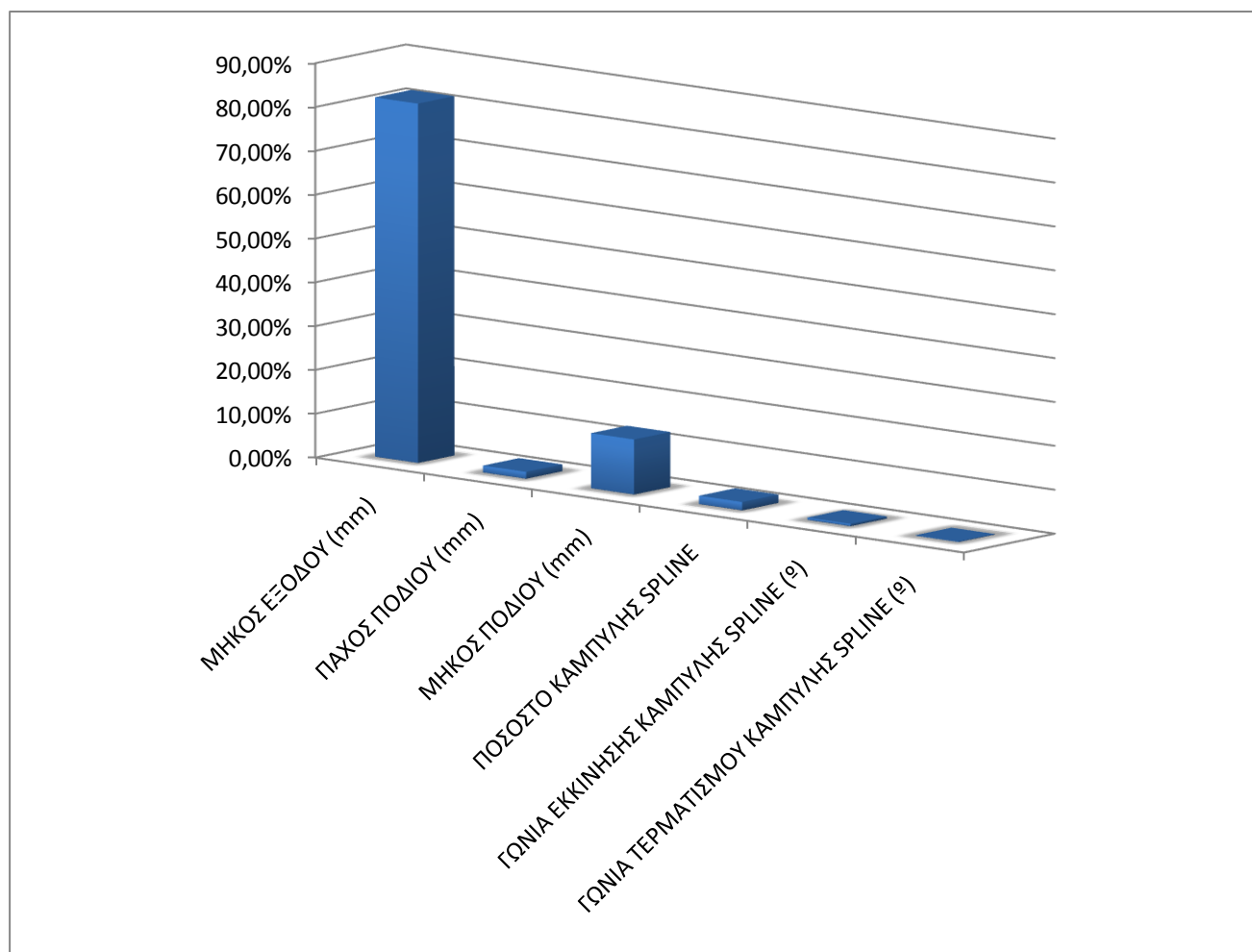
Παρακάτω παραθέτουμε τα ποσοστά των λόγων συμβολής σε γραφήματα Excel®:



Σχήμα 4.37 Λόγοι συμβολής παραμέτρων σε γράφημα τύπου “πίτας”

Παρατηρούμε ότι ο λόγος συμβολής του μήκους εξόδου είναι κατά πολύ μεγαλύτερος των υπολοίπων παραμέτρων. Η δεύτερη παράμετρος που έχει σημαντική επίδραση στο αποτέλεσμα, αν και απέχει πολύ από την προηγούμενη είναι το μήκος ποδιού της αράχνης. Οι υπόλοιπες παράμετροι κυμαίνονται στο $\approx 1 \div 2 \%$ και έχουν πάρα πολύ μικρή επίδραση στη ροή στην έξοδο της μήτρας εκβολής.

Τέλος, παραθέτουμε μια σύγκριση των λόγων συμβολής σε γράφημα τύπου “ράβδων”:



Σχήμα 4.38 Λόγοι συμβολής παραμέτρων σε γράφημα τύπου “ράβδοι”

Περισσότερες παρατηρήσεις και συμπεράσματα για τους λόγους συμβολής και την επίδραση των παραμέτρων παρατίθενται στην παράγραφο 5.3.

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Είναι εμφανής η πολύ μεγάλη διαφορά της επίδρασης του μήκους εξόδου της μήτρας εκβολής από τους υπόλοιπους παράγοντες που έχουμε επιλέξει. Όλες οι αναλύσεις δείχνουν ότι για καλύτερη ροή πρέπει να έχουμε μεγάλο μήκος εξόδου. Για κατασκευαστικούς λόγους το μήκος εξόδου δεν μπορεί να υπερβαίνει όμως τα 45 mm.
- Η επιλογή του ελάχιστου λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) έγινε με βάση τη μέθοδο Taguchi, και θεωρείται η πιο αξιόπιστη επιλογή για την εύρεση της βέλτιστης λύσης.
-

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.Α. Γ. Μάμαλης, «Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», εκδόσεις «ΦΟΙΒΟΣ», Αθήνα, 1996
- 2.Δ. Πρίγκιπας, «Επίδραση πίεσης και θερμοκρασίας στη παραγωγή πλαστικών σωλήνων», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009
- 3.Ε. Β. Μίσσου, «Αναλυτική και αριθμητική προσομοίωση εκβολής πλαστικών σωλήνων», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2008
- 4.Ι. Σιμιτζής, «Τεχνολογία Πολυμερών», Ε.Μ.Π., 1999
- 5.Κ. Πάσσαρης, «Βελτιστοποίηση μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα με τη μέθοδο Taguchi», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009
- 6.Μ. Καμπούρης, «Επεξεργασία Πολυμερών», Ε.Μ.Π., 1983
- 7.Ν. Λογοθέτης, «Μάνατζμεντ Ολικής Ποιότητας: Από τον Deming στον Taguchi και το SPC», Εκδόσεις TQM HELLAS INTERBOOKS, 2005
- 8.Π. Κ. Πισινάρας, «Μελέτη της μορφοποίησης πολυμερούς με τη μέθοδο της εκβολής», Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2006
- 9.Χρ. Προβατίδης, Α. Κανάραχος, «Πεπερασμένα Στοιχεία στη Μηχανολογία», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2000

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

10. C. L. Tucker III, «Fundamentals of Computer Modelling for Polymer Processing», Hasner, Munich, 1989
11. P. J. Ross, «Taguchi Techniques for Quality Engineering», McGraw-Hill, Second Edition
12. R. K. Roy, «A primer on the Taguchi method», SME (Society of Manufacturing Engineers), Dearborn, Michigan
13. S. Levy and J.F. Carley, “Plastics Extrusion Technology Handbook”, 2nd Ed., Industrial Press, 1989 (ISBN: 0-8311-1185-2)
14. Walter Michaeli, “Extrusion dies for plastics and rubber; Design and engineering computations” , 2nd Ed. , Hanser Press (ISBN: 3-446-16190-2) or Oxford University Press (ISBN: 0-19-520910-9)