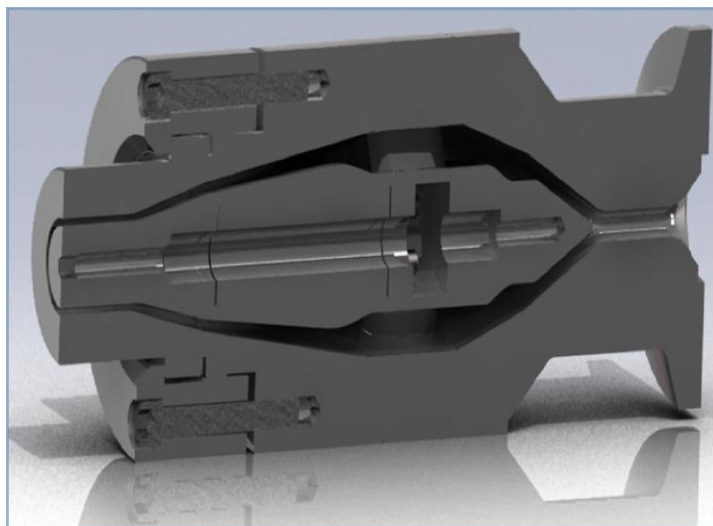




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ:
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**



Κούζιλος Γεώργιος
Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π
Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΜΑΜΑΛΗΣ

Αθήνα 2011

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Μάμαλης Αθανάσιος, Καθηγητής (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Επιβλέπων)
2. Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ)
3. Παπασπυρίδης Κωνσταντίνος, (Καθηγητής Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ)

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Μάμαλης Αθανάσιος, Καθηγητής (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ)
2. Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ)
3. Παπασπυρίδης Κωνσταντίνος, Καθηγητής (Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ)
4. Βοσνιάκος Γεώργιος, Επ.Καθηγητής (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ)
5. Παντελής Δημήτριος, Καθηγητής (Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ)
6. Σιμιτζής Ιωάννης, Καθηγητής (Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ)
7. Ζουμπουλάκης Λουκάς, Επ.Καθηγητής, (Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε από τον Απρίλιο του 2005 έως τον Οκτώβριο του 2011 στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κύριου Αθανάσιου Μάμαλη.

Στο σημείο αυτό, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον Καθηγητή Αθανάσιο Μάμαλη, για τη συνεχή καθοδήγηση και εμπιστοσύνη του προς το πρόσωπό μου κατά την εκπόνηση και συγγραφή της διδακτορικής διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Δημήτριο Μανωλάκο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την αδιάκοπη συνεισφορά και βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω την εταιρεία Πετζετάκης Α.Ε και τον Διευθυντή Διασφάλισης Ποιότητας κύριο Τάσο Κοταρά, του οποίου οι συμβουλές υπήρξαν πολύτιμες για το βέλτιστο σχεδιασμό της μήτρας εκβολής του πλαστικού σωλήνα για την διευκόλυνση που παρείχε για το σχεδιασμό της μήτρας εκβολής του πλαστικού σωλήνα.

Αισθάνομαι την ανάγκη να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ προς το τεχνικό προσωπικό του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την άμεση συνεργασία στην κατασκευή της μήτρας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Κωνσταντίνο Παπασπυρίδη, Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις του στην εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τον πατέρα μου, για την ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχε για όλα αυτά τα χρόνια σπουδών.

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

Κούζιλος Γεώργιος

**«Η ανάπτυξη της γνώσης οδηγεί προς την απλοποίηση παρά
προς την πολυπλοκότητα.»**

L.Ron Hubbard

***Αφιερώνεται
με αγάπη
στους γονείς μου***

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 τη μέθοδο της εκβολής είναι η μήτρα του εκβολέα. Στόχος της παρούσας διδακτορικής εργασίας είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός της μήτρας εκβολής για την παραγωγή σωλήνα από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην ταχύτητα εξόδου και, συνεπώς, αυξημένη μηχανική αντοχή του πλαστικού σωλήνα. Ως μεταβλητή εξόδου βελτιστοποίησης της ροής (αντικειμενική συνάρτηση), λαμβάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο ταχύτητας του πολυμερικού ρευστού στην έξοδο της μήτρας και επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της. Ως παράμετροι βελτιστοποίησης, επιλέγονται συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μήτρας εκβολής. Συνολικά επιλέγονται έξι παράμετροι βελτιστοποίησης, οποίες είναι: το μήκος εξόδου της μήτρας, το μήκος της spline κατά τον X άξονα (X), το μέγιστο ύψος της spline (Y), η θέση του μέγιστου σαν ποσοστό του X (f), η γωνία εκκίνησης της spline (a) και η γωνία τερματισμού της spline (b). Με δεδομένο ότι οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες της ροής ποικίλουν κατά την παραγωγική διαδικασία (κατεργαζόμενο υλικό, συνθήκες περιβάλλοντος, πίεση εισόδου στην μήτρα κ.α.), εξετάζονται οι βασικότερες μεταβλητές που αφορούν στην γεωμετρία της μήτρας και επηρεάζουν τη ροή (μήκος εξόδου της μήτρας, γεωμετρία του ποδιού της αράχνης). Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται μέσω μιας σειράς προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας τα λογισμικά των SolidWorks® και Comsol® σε συνδυασμό με τις μεθόδους Taguchi και επιφάνειας απόκρισης (RSM).

Η βέλτιστη τιμή του μήκους εξόδου της μήτρας είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $L_{OPT} = 24 \text{ mm}$. Η βέλτιστη τιμή του μήκους του ποδιού είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $X_{OPT} = 30 \text{ mm}$. Οι βέλτιστες τιμές για το πάχος του ποδιού της αράχνης (Y) και το μέγιστο της καμπύλης spline (f), είναι αντίστοιχα $Y_{OPT} = 9 \text{ mm}$, $f_{OPT} = 0,2$ (20 %) και $a_{OPT} = 5^\circ$, $b_{OPT} = 5^\circ$.

Η στατική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της ροής, έδειξαν ότι τα τμήματα της μήτρας που βρίσκονται στη ζώνη εκτροπής και στη κεφαλή της αράχνης, συγκεντρώνουν τις υψηλότερες μηχανικές τάσεις. Φαίνεται ότι η μέγιστη τάση δημιουργείται στο πόδι της αράχνης της μήτρας, τα οποία δέχονται αρκετή πίεση από το ρευστό, ενώ παράλληλα στηρίζουν τα εσωτερικά τμήματα της μήτρας εκβολής. Η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται στον κώνο αρσενικού κεφαλής ο οποίος δέχεται τη μεγαλύτερη πίεση από το ρευστό.

SUMMARY

Extrusion is one of the most widely used techniques both for processing and for blending polymers. The main part of production line using the extruder is the die of the extruder. The aim of this doctoral work is the design and optimization of a polymer extrusion die to produce high density polyethylene pipes (HDPE), in order to obtain better uniformity in the velocity of the molten polymer which will lead to increased mechanical strength of the plastic tube. The signal to noise ratio of the polymer at the exit of the die is considered as a flow optimization variable output (objective function), with the aim to be maximized. The optimization parameters are specifically selected geometric characteristics of the extrusion die. A total of six selected optimization parameters were selected, which are the length of the output die, the length of the spline at the X axis (X), the maximum amount of spline (S), the position of the maximum as a percentage of X (f), the angle of departure the spline (a) and the angle of termination of the spline (b). Given that the initial and boundary conditions of the flow varies during the production process (material, ambient conditions, inlet pressure to the die, etc.) the main variables related to the geometry of the die are examined as well as their effect on the flow (along the output die, geometry of the leg of the spider). The optimization was carried out for a series of simulations using the SolidWorks® and Comsol® software packages in conjunction with Taguchi and response surface (RSM) methods. The optimal value of the length of the output die is minimal according to the geometric and construction constraints, namely: $L_{OPT} = 24$ mm. The optimal value of the length of the die leg is the minimum possible under the geometric and construction constraints, namely: $X_{OPT} = 30$ mm. The optimal values of the thickness of the spider leg (Y) and the maximum of the curve spline (f), are respectively $Y_{OPT} = 9$ mm, $f_{OPT} = 0,2$ (20 %), $a_{OPT} = 5^\circ$ and $b_{OPT} = 5^\circ$.

The static analysis performed in conjunction with the simulation results of the flow showed that the parts of the die in its area of diversion (I) and head of the spider (II), are subjected to the highest mechanical stresses. It seems that the maximum stress generated on the legs of the spider's head, which withstand the exerted pressure from the fluid while supporting the internal components of the extrusion die. The maximum deflection is observed on the male cone head which receives the highest pressure from the fluid.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xiii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	xvi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΤΡΩΝ ΕΞΩΘΗΣΗΣ.....	1
1.1 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΗΤΡΩΝ ΕΞΩΘΗΣΗΣ.....	1
1.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	4
1.2.1 Πρακτικοί στόχοι βελτιστοποίησης.....	4
1.2.2 Συνοριακές συνθήκες και περιορισμοί κατά το σχεδιασμό καναλιών ροής	7
1.2.3 Ανεξάρτητες παράμετροι κατά τη βελτιστοποίηση των μητρών.....	7
1.2.4 Εξαρτημένες παράμετροι κατά τη βελτιστοποίηση των μητρών και την μοντελοποίηση τους.....	7
1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	9
1.3.1 Μέθοδοι βελτιστοποίησης ανεξάρτητες της κλίσης.....	11
1.3.2 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης που εξαρτώνται από την κλίση (Gradient-based)	13
1.3.3 Στοχαστικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης.....	14
1.3.4 Εξελικτικές Μέθοδοι.....	16
1.3.5 Επεξεργασία των Οριακών Συνθηκών	19
1.4 ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΜΗΤΡΩΝ ΕΚΒΟΛΗΣ	20
1.4.1 Βελτιστοποίηση ενός καναλιού με συγκλίνουσα γεωμετρία.....	20
1.4.2 Βελτιστοποίηση προφίλ μητρών	21
1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΟΜΕΛΕΤΗ ΜΗΤΡΑΣ	29
2.1. ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	29
2.1.1 Χαρακτηριστικά του υλικού του σωλήνα	31
2.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού.....	31
2.2.1 Κεφαλές με δακτυλιοειδή διατομή μήτρας - Γενικά.....	34
2.2.2 Κεφαλές κεντρικής τροφοδοσίας με αράχνη.....	35
2.2.3 Σχεδιασμός κεφαλής με αράχνη	36
2.2.4 Θέρμανση της κεφαλής.....	42
2.3. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ	44
2.3.1 Γενικές αρχές.....	44
2.3.2 Μέθοδοι βαθμονόμησης	45
2.4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ.....	48
2.5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΤΡΑΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΜΕ ΚΕΝΟ (SIZING SLEEVE)	49

2.6.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΠΑΝΙΟΥ ΨΥΞΗΣ.....	50
2.7.	ΕΛΚΥΣΜΟΣ – ΤΑΝΥΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ.....	52
2.8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ		56
3.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	56
3.1.1	Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών	56
3.1.2	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	57
3.1.3	Μέθοδος συνιοριακών στοιχείων	58
3.1.4	Μέθοδος πεπερασμένων όγκων (FVM)	60
3.1.5	Επιλογή Αριθμητικής Μεθόδου	60
3.2	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ COMSOL.....	61
3.3	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ-ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SOLIDWORKS.....	61
3.4	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ TAGUCHI.....	62
3.4.1	Εισαγωγή στη μέθοδο Taguchi	63
3.4.2	Φιλοσοφία της μεθόδου Taguchi.....	64
3.4.3	Σχεδιασμός πειραμάτων με τη μέθοδο Taguchi	65
3.5	ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	66
3.6	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ.....	68
3.6.1	Παράμετροι Προσομοίωσης.....	68
3.6.2	Προσομοίωση πειραμάτων βελτιστοποίησης	69
3.7	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	82
3.7.1	Συγκέντρωση αποτελεσμάτων (6 παράμετροι)	82
3.7.2	Ανάλυση με τη μέθοδο ANOVA (6 παράμετροι).....	87
3.7.3	Συγκέντρωση αποτελεσμάτων (5 παράμετροι)	88
3.7.4	Ανάλυση με τη μέθοδο ANOVA (5 παράμετροι).....	94
3.7.5	Συγκέντρωση – Ανάλυση αποτελεσμάτων (4 παράμετροι).....	95
3.7.6	Ανάλυση με τη μέθοδο ANOVA (4 παράμετροι).....	99
3.7.7	Συγκέντρωση – Ανάλυση αποτελεσμάτων (2 παράμετροι).....	100
3.7.8	Ανάλυση με τη μέθοδο ANOVA (2 παράμετροι).....	102
3.7.9	Ανάλυση με τη μέθοδο Response Surface Method (RSM)	103
3.8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ		109
4.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	109
4.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ	110
4.3	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	120
4.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	127

4.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	134
4.5.1	Αρχική μήτρα εκβολής.....	134
4.5.2	Βελτιστοποιημένη μήτρα εκβολής.....	139
4.6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	145
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	147
5.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	147
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ ΗDΡΕ.....	153
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ.....	155
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΧΕΔΙΑ ΜΗΤΡΑΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ-ΨΥΞΗΣ.....	164
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝΤΗΓΜΑΤΩΝ.....	168
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ.....	173
	175

EΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Δίκτυο αντιστάσεων	1
Σχήμα 1.2: Διόγκωση προϊόντος εκβολής κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας	5
Σχήμα 1.3: Τελικό προϊόν εκβολής όπου παρατηρείται θραύση του τήγματος.....	6
Σχήμα 1.4: Απεικόνιση νευτώνειων ελαστικών, γραμμικών και μη γραμμικών ιξωδοελαστικών συστημάτων ως συνάρτηση του αριθμού Deborah και της παραμόρφωσης	6
Σχήμα 1.5: Περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	8
Σχήμα 1.6: Συνάρτηση ποιότητας	10
Σχήμα 1.7: Ταξινόμηση των αλγόριθμων βελτιστοποίησης	11
Σχήμα 1.8: Μέθοδος Στρατηγικής Simplex.....	13
Σχήμα 1.9: Κωδικοποίηση, μετάλλαξη και διασταύρωση.....	18
Σχήμα 1.10: Βελτιστοποίηση ενός Καναλιού Συγκλίνουσας Γεωμετρίας.....	20
Σχήμα 1.11: Διατμητικές τάσεις στα τοιχώματα πριν και μετά την βελτιστοποίηση	21
Σχήμα 1.12: Κατανομή της ταχύτητας πριν την βελτιστοποίηση.....	22
Σχήμα 1.13: Δοκιμαστική Γεωμετρία	22
Σχήμα 1.14: Κατανομή της ταχύτητας μετά την βελτιστοποίηση.....	23
Σχήμα 1.15: Γεωμετρία του καναλιού ροής	24
Σχήμα 1.16: Αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.....	24
Σχήμα 1.17: Γεωμετρία των εξωθημένων προφίλ.....	25
Σχήμα 2.1: Εκβολέας-Μονοκόχλιος.....	29
Σχήμα 2.2: Τμήματα δοσιμετρικού κοχλία	30
Σχήμα 2.3: Ο δοσιμετρικός κοχλίας του εκβολέα του εργαστηρίου	33
Σχήμα 2.4: Μονοκόχλιος εκβολέας της εταιρείας JohnsonPlastics	33
Σχήμα 2.5: Τύποι κεφαλών	34
Σχήμα 2.6: 1) κώνος αρσενικού κεφαλής 2) πόδι αράχνης3) κοχλίας κεντραρίσματος 4) δακτύλιος συγκράτησης μήτρας 5) ζώνη χαλάρωσης D _a : εξωτερική διάμετρος της μήτρας..	35
Σχήμα 2.7: Ζώνες του καναλιού ροής της κεφαλής	37
Σχήμα 2.8: Διόγκωση του πολυμερούς κατά την έξοδο του από τη μήτρα.....	37
Σχήμα 2.9: Βασικές διαστάσεις μήτρας	38
Σχήμα 2.10: Ζώνη χαλάρωσης.....	39
Σχήμα 2.11: Ζώνη της αράχνης	40
Σχήμα 2.12: Ζώνη διανομής του τήγματος	41
Σχήμα 2.13: Βαθμονόμηση με αέρα υπό πίεση. (α) μήτρα εκβολής, (β) είσοδος αέρα, (γ) μήτρα βαθμονόμησης, (δ) έμβυσμα	46
Σχήμα 2.14: Θάλαμος κενού με δίσκους και ψεκασμό νερού (α) είσοδος θαλάμου κενού, (β) ενδιάμεσο παρέμβυσμα, (γ) μετρητής υποπίεσης, (δ) βαλβίδα εισαγωγής αέρα, (ε) δίσκος βαθμονόμησης, (ζ) στεγανωτικό παρέμβυσμα	47
Σχήμα 2.15: Μήτρα βαθμονόμησης με διάτρητο κύλινδρο-κάλυμμα και διάταξη πρόψυξης. (α) διάταξη πρόψυξης, (β) κύλινδρος	47
Σχήμα 2.16: Ψύξη σωλήνα με αέρα και νερό.....	48
Σχήμα 2.17: Διαστάσεις μήτρας βαθμονόμησης.....	49
Σχήμα 2.18: Σκαρίφημα μπάνιου ψύξης 1) σωλήνας 2) δεξαμενή νερού, 3) παροχή νερού 4) τράπεζα στήριξης 5) ράουλα	51
Σχήμα 2.19: Σύστημα ελκυσμού με ταινία	52
Σχήμα 2.20: Σύστημα ελκυσμού με ερπύστριες	53
Σχήμα 3.1: Σύγκριση βασικών αριθμητικών τεχνικών.....	56

Σχήμα 3.2: Προβλεφθείσα διόγκωση κατά την εξώθηση του HDPE μέσω συγκλίνουσας μήτρας	57
Σχήμα 3.3: Σύγκριση των BEM και FEM ενός 2D (πλήρως γεμισμένου) εσωτερικού αναμείκτη	59
Σχήμα 3.4: Προσομοίωση της παραμόρφωσης των περιοχών κατά τη διάρκεια της μίξης ..	59
Σχήμα 3.5: Παράμετροι βελτιστοποίησης	67
Σχήμα 3.6: Πόδι αράχνης	67
Σχήμα 3.7: Είσοδος-Έξοδος ρευστού από την μήτρα	69
Σχήμα 3.8: Καμπύλη spline της κεφαλής αράχνης της αριθμητικής προσομοίωσης	69
Σχήμα 3.9: Κεφαλής αράχνης της 1 ^{ης} προσομοίωσης	70
Σχήμα 3.10: Μήτρα εκβολής της 1ης προσομοίωσης	70
Σχήμα 3.11: Μήτρα εκβολής της 1ης προσομοίωσης σε τομή	71
Σχήμα 3.12: Ο κενός χώρος της μήτρας εκβολής	71
Σχήμα 3.13: Συμμετρικό σχήμα κενού χώρου της μήτρας εκβολής κατά 1/12	72
Σχήμα 3.14: Εισαγωγή γεωμετρίας στο Comsol	72
Σχήμα 3.15: Ιδιότητες μη νευτωνικού ρευστού	73
Σχήμα 3.16: Θερμικές ιδιότητες του ρευστού στο πρόβλημα	73
Σχήμα 3.17: Προσδιορισμός θερμοκρασίας εισόδου	74
Σχήμα 3.18: Προσδιορισμός πίεσης εισόδου	74
Σχήμα 3.19: Προσδιορισμός πίεσης εξόδου (σχετικές μανομετρικές πιέσεις, ως προς την ατμοσφαιρική πίεση)	75
Σχήμα 3.20: Εφαρμογή συνθήκης μη ολίσθησης	75
Σχήμα 3.21: Εφαρμογή συνθήκης συμμετρίας	76
Σχήμα 3.22: Καθορισμός σταθεράς θερμοκρασίας	76
Σχήμα 3.23: Καθορισμός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων	77
Σχήμα 3.24: Ιδιότητες της εφαρμογής	77
Σχήμα 3.25: Στατιστικά του πλέγματος	77
Σχήμα 3.26: Καθορισμός παραμέτρων πεπερασμένων στοιχείων	78
Σχήμα 3.27: Καθορισμός παραμέτρων γραφήματος προφίλ ταχύτητας	78
Σχήμα 3.28: Κατανομή ταχυτήτων 1ης προσομοίωσης	79
Σχήμα 3.29: Κατανομή θερμοκρασιών 1ης προσομοίωσης	80
Σχήμα 3.30: Προφίλ ταχύτητας στην έξοδο της 1ης προσομοίωσης	80
Σχήμα 3.31: Προφίλ θερμοκρασίας στην έξοδο της 1ης προσομοίωσης	81
Σχήμα 3.32: Πτώση πίεσης 1ης προσομοίωσης	81
Σχήμα 3.33: Λόγοι συμβολής παραμέτρων βελτιστοποίησης (L, X, Y, f, a, b)	87
Σχήμα 3.34: Λόγοι συμβολής παραμέτρων βελτιστοποίησης (X, Y, f, a, b)	95
Σχήμα 3.35: Λόγοι συμβολής παραμέτρων βελτιστοποίησης (X, f, a, b)	99
Σχήμα 3.36: Λόγοι συμβολής παραμέτρων βελτιστοποίησης (a, b)	102
Σχήμα 3.37: Επιφάνεια απόκρισης των παραμέτρων X_1, X_2	103
Σχήμα 4.1: (α), (β) Σύγκριση του μήκους εξόδου των δύο μητρών εκβολής	109
Σχήμα 4.2: Εισαγωγή μπλοκ γεωμετρίας στο ANSYS Workbench	110
Σχήμα 4.3: Εισαγωγή γεωμετρίας από το SolidWorks	111
Σχήμα 4.4: Γεωμετρία της μήτρας στο Ansys	111
Σχήμα 4.5: Ορισμός συμμετρίας κατά το ήμισυ στη μήτρα	112
Σχήμα 4.6: Συμμετρικό μοντέλο κατά το 1/2	112
Σχήμα 4.7: Εισαγωγή μπλοκ πλέγματος στο ANSYS Workbench	113
Σχήμα 4.8: Απομόνωση της γεωμετρίας του ρευστού	113
Σχήμα 4.9: Ιδιότητες πλέγματος του ρευστού	114

Σχήμα 4.10: Πλέγμα πεπερασμένων όγκων του ρευστού	114
Σχήμα 4.11: Εισαγωγή μπλοκ Fluent στο ANSYS Workbench.....	114
Σχήμα 4.12: Πλέγμα του ρευστού που έχει εισαχθεί στο Fluent	115
Σχήμα 4.13: Βασικές ρυθμίσεις του Fluent.....	115
Σχήμα 4.14: Ορισμός mmως μονάδας μέτρησης	116
Σχήμα 4.15: Ορισμός του είδους του προβλήματος	117
Σχήμα 4.16: Ιδιότητες του πολυαιθυλενίου (HDPE).....	117
Σχήμα 4.17: Ρυθμίσεις επίλυσης του προβλήματος	118
Σχήμα 4.18: Πιέσεις στα τοιχώματα του ρευστού	119
Σχήμα 4.19: Ταχύτητες στα τοιχώματα και τη συμμετρία του ρευστού.....	119
Σχήμα 4.20: Εισαγωγή μπλοκ στατικής ανάλυσης στο ANSYS Workbench	120
Σχήμα 4.21: Βασικές ιδιότητες του χάλυβα IMPAX (ANSYSWorkbench).....	121
Σχήμα 4.22: Βασικές ιδιότητες του υλικού κατασκευής των κοχλιών σύνδεσης (ANSYS Workbench)	122
Σχήμα 4.23: Ιδιότητες πλέγματος των στερεών τμημάτων της μήτρας εκβολής.....	123
Σχήμα 4.24: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της μήτρας εκβολής.....	124
Σχήμα 4.25: Στατιστικά στοιχεία των πεπερασμένων στοιχείων των στερεών τμημάτων ..	124
Σχήμα 4.26: Σύνδεσης μεταξύ της αράχνης και του κώνου της μήτρας αράχνης.....	125
Σχήμα 4.27: Λεπτομέρειες ορισμού πάκτωσης στο λαιμό της κεφαλής	125
Σχήμα 4.28: Λεπτομέρειες ορισμού βαρύτητας στη μήτρα εκβολής	125
Σχήμα 4.29: Ορισμός θερμοκρασίας στη μήτρα εκβολής	126
Σχήμα 4.30: Πίεση τοιχωμάτων στη μήτρα εκβολής	126
Σχήμα 4.31 Ρυθμίσεις της ανάλυσης του προβλήματος	127
Σχήμα 4.32: Ζώνες του καναλιού ροής της κεφαλής	127
Σχήμα 4.33: Πιέσεις των τοιχωμάτων του ρευστού στην αρχική πίεση των 300 bar	135
Σχήμα 4.34: Γραφική απεικόνιση της ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises στην πίεση των 300 bar	136
Σχήμα 4.35: Γραφική απεικόνιση της ολικής παραμόρφωσης στην πίεση των 300 bar	136
Σχήμα 4.36: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας στην πίεση των 300 bar	137
Σχήμα 4.37: Γραφική απεικόνιση της ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises στην πίεση των 300 bar	137
Σχήμα 4.38: Γραφική απεικόνιση της ολικής παραμόρφωσης στην πίεση των 300 bar	138
Σχήμα 4.39: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας στην πίεση των 300 bar	138
Σχήμα 4.40: Πιέσεις των τοιχωμάτων του ρευστού στην αρχική πίεση των 110 bar	140
Σχήμα 4.41: Γραφική απεικόνιση της ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises στην πίεση των 110 bar	141
Σχήμα 4.42: Γραφική απεικόνιση της ολικής παραμόρφωσης στην πίεση των 110 bar	141
Σχήμα 4.43: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας στην πίεση των 110 bar	142
Σχήμα 4.44: Γραφική απεικόνιση της ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises στην πίεση των 300 bar	142
Σχήμα 4.45: Γραφική απεικόνιση της ολικής παραμόρφωσης στην πίεση των 110 bar	143
Σχήμα 4.46: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας στην πίεση των 110 bar	143
Σχήμα 4.47: (α), (β) Σύγκριση μεταξύ των ποδιών της αράχνης των δύο μητρών εκβολής	144
Σχήμα 5.1: Παράμετροι βελτιστοποίησης.....	148
Σχήμα 5.2: Πόδι αράχνης.....	148
Σχήμα 5.3: (α), (β) Σύγκριση του μήκους εξόδου των δύο μητρών εκβολής	151

Πίνακας 1.1: Μεταφορά των αρχών της βιολογίας στην τεχνική διαδικασία βελτιστοποίησης	16
Πίνακας 2.1: Τυποποιημένες διαστάσεις σωλήνων από πολυαιθυλένιο	31
Πίνακας 3.1: Ιδιότητες πολυαιθυλενίου	68
Πίνακας 3.2: Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης ροής	68
Πίνακας 3.3: Οριακές συνθήκες προσομοίωσης ροής	68
Πίνακας 3.4: Παράμετροι βελτιστοποίησης 1 ^{ης} σειράς πειραμάτων	82
Πίνακας 3.5: L27 του πίνακα Taguchi	83
Πίνακας 3.6: L27 του πίνακα Taguchi 1ης σειράς πειραμάτων	83
Πίνακας 3.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του πίνακα L27	85
Πίνακας 3.8: Ανάλυση των αποτελεσμάτων του πίνακα L27	86
Πίνακας 3.9: Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων του L27 ..	86
Πίνακας 3.10: Λόγοι συμβολής των παραμέτρων	87
Πίνακας 3.11: Παράμετροι και τιμές βελτιστοποίησης	88
Πίνακας 3.12: L36 του πίνακα Taguchi για πέντε παραμέτρους	89
Πίνακας 3.13: L36 του πίνακα Taguchi με τις τιμές των παραμέτρων	90
Πίνακας 3.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 36 πειραμάτων	92
Πίνακας 3.15: Συγκεντρωτική ανάλυση αποτελεσμάτων	94
Πίνακας 3.16: Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων	94
Πίνακας 3.17: Λόγοι συμβολής των παραμέτρων	94
Πίνακας 3.18: Παράμετροι και τιμές βελτιστοποίησης	95
Πίνακας 3.19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 36 πειραμάτων	97
Πίνακας 3.20: Συγκεντρωτική ανάλυση αποτελεσμάτων	98
Πίνακας 3.21: Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων	98
Πίνακας 3.22: Λόγοι συμβολής των παραμέτρων	99
Πίνακας 3.23: L9 του πίνακα Taguchi για δύο παραμέτρους	100
Πίνακας 3.24: L9 του πίνακα Taguchi για με τιμές των παραμέτρων	100
Πίνακας 3.25: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 9 πειραμάτων	101
Πίνακας 3.26: Συγκεντρωτική ανάλυση αποτελεσμάτων	101
Πίνακας 3.27: Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων	102
Πίνακας 3.28: Λόγοι συμβολής των παραμέτρων	102
Πίνακας 3.29: Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων με RSM	104
Πίνακας 4.1: Βασικά χαρακτηριστικά προσομοιώσεων	110
Πίνακας 4.2: Οριακές συνθήκες προβλήματος	118
Πίνακας 4.3: Ορισμός υλικών των τμημάτων	123
Πίνακας 4.4: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 100 bar (αρχική μήτρα)	128
Πίνακας 4.5: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 200 bar (αρχική μήτρα)	128
Πίνακας 4.6: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 300 bar (αρχική μήτρα)	129
Πίνακας 4.7: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 400 bar (αρχική μήτρα)	129
Πίνακας 4.8: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 500 bar (αρχική μήτρα)	130
Πίνακας 4.9: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 600 bar (αρχική μήτρα)	130
Πίνακας 4.10: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 100 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)	131
Πίνακας 4.11: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 200 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)	131

Πίνακας 4.12: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 300 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα).....	132
Πίνακας 4.13: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 400 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα).....	132
Πίνακας 4.14: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 500 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα).....	133
Πίνακας 4.15: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 600 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα).....	133
Πίνακας 4.16: Μέγιστες τιμές των ισοδύναμων τάσεων στην αρχική μήτρας	134
Πίνακας 4.17: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 300 bar (αρχική μήτρα)..	139
Πίνακας 4.18: Μέγιστες τιμές των ισοδύναμων τάσεων στην βελτιστοποιημένη μήτρα.....	139
Πίνακας 4.19: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 110bar (βελτιστοποιημένη μήτρα).....	140
Πίνακας 4.20: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 110 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα).....	144
Πίνακας 5.1: Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων με (Taguchi) και (RSM).....	150
Πίνακας 5.2: Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για αρχική και βελτιστοποιημένη μήτρα	150

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΤΡΩΝ ΕΞΩΘΗΣΗΣ

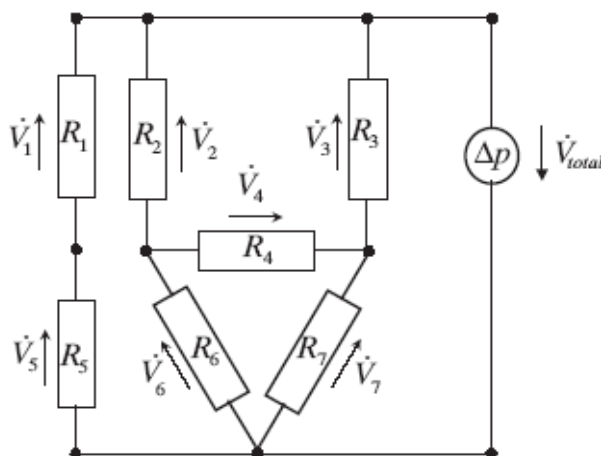
1.1 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΗΤΡΩΝ ΕΞΩΘΗΣΗΣ

Στην επεξεργασία των πλαστικών, ο βασικός στόχος του σχεδιασμού μιας μήτρας εξώθησης ή ενός εκβολέα είναι η ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας του πολυμερικού τήγματος στην έξοδο του καναλιού ροής, ώστε το τελικό προϊόν να μην έχει μεγάλη διακύμανση στις διαστάσεις του. Αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί με κατάλληλο σχεδιασμό του καναλιού ροής.

Συνήθως, γίνεται διάκριση ανάμεσα στις καλούμενες τυπικές μήτρες εξώθησης και στις προφίλ μήτρες εξώθησης. Οι τυπικές μήτρες εξώθησης περιλαμβάνουν απλές γεωμετρικές ροής και χρησιμοποιούνται στην εξώθηση σωλήνων, συμπαγών ράβδων, φύλλων και ταινιών. Τα κανάλια ροής τέτοιων μητρών χαρακτηρίζονται από γεωμετρία τύπου απλού σωλήνα και σχισμής, με σχεδόν συνεχείς διατομές. Αντίθετα οι προφίλ μήτρες εξώθησης, περιλαμβάνουν όλες τις μήτρες, με τις οποίες μπορούν να εξωθηθούν πλαστικά με πιο σύνθετες γεωμετρίες. Η γεωμετρία των καναλιών ροής στις προφίλ μήτρες εξώθησης είναι συχνά αρκετά πολύπλοκες [1].

Οι συνθήκες ροής στις τυπικές μήτρες εξώθησης και στις απλές προφίλ μήτρες εξώθησης με κανάλια ροής, μπορούν να χωριστούν σε τμήματα απλής γεωμετρίας και στη συνέχεια να αναλυθούν με αναλυτικές εξισώσεις πίεσης και ροής σε απλά ή ιδεατά σχήματα (κύκλους, σχισμές, δακτυλίους). Για να υπολογιστούν οι κατανομές της ταχύτητας και της πίεσης, το κανάλι ροής διαιρείται σε απλά γεωμετρικά τμήματα. Για τα τμήματα αυτά, οι απλές εξισώσεις συσχετίζουν τη ροή, \dot{V} , στην πτώση πίεσης, Δp , μέσω μιας αντίστασης ροής R . Για μια περιγραφή της αντίστασης που είναι ανεξάρτητη από τη ροή, η μη γραμμική συμπεριφορά του ιξώδους του πολυμερικού υλικού, όσον αφορά στην ταχύτητα διάτμησης, μπορεί να συμπεριληφθεί με τον εκθέτη ροής η Εξίσωση (1.1)

$$\Delta p = R * \dot{V}^n \quad (1.1)$$



Σχήμα 1.1: Δίκτυο αντιστάσεων

Για ροές διαμέσου τμημάτων απλής γεωμετρίας όπως συγκλίνοντες σωλήνες, σχισμές και δακτυλιοειδή τμήματα, η αντίσταση στα κανάλια ροής μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση της εξίσωσης Hagen-Poiseuille, στην οποία το μη νευτώνειο ρευστό λαμβάνεται υπόψη με τον εκθέτη n [1]. Επομένως, με τη χρήση των εξισώσεων μπορούν να υπολογιστούν οι κατανομές της πίεσης και της ταχύτητας σε μια μήτρα αποτελούμενη από αρκετές απλές γεωμετρικές μορφές. Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίζεται η αντίσταση κάθε μεμονωμένου τμήματος της μήτρας και οι τιμές των αντιστάσεων συνδυάζονται σε ένα δίκτυο αντιστάσεων [1, 2]. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ένα τέτοιο δίκτυο.

Για δεδομένες οριακές συνθήκες (π.χ. πιέσεις εισόδου και εξόδου) ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να αναλυθεί εύκολα με τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων, ανάλογων των νόμων του Kirchhoff. Οι νόμοι του Kirchhoff περιγράφουν τις συνθήκες στους κόμβους και στους βρόγχους. Σύμφωνα με τον νόμο που αναφέρεται στους κόμβους, όπου διάφορες αντιστάσεις ενώνονται μεταξύ τους, το άθροισμα των ρευμάτων (εδώ το ρεύμα αντιστοιχεί σε ροή υλικού) που καταλήγουν σε έναν τέτοιο κόμβο πρέπει να είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων που φεύγουν από αυτόν. Για παράδειγμα στο δίκτυο του Σχήματος 1.1 είναι:

$$\dot{V}_2 + \dot{V}_4 + \dot{V}_6 = 0 \quad (1.2)$$

Ακόμη, σύμφωνα με τον νόμο που αναφέρεται στους βρόγχους, σε ένα κλειστό βρόγχο η πτώση τάσης (εδώ πτώση πίεσης) είναι πάντα μηδενική. Για παράδειγμα:

$$\Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 = 0 \quad (1.3)$$

Χρησιμοποιώντας αυτούς τους νόμους, μπορεί να καταστρωθεί ένα σύστημα εξισώσεων για οποιοδήποτε αυθαίρετο δίκτυο, και μπορούν να υπολογιστούν οι πιέσεις και οι ταχύτητες στην μήτρα. Αν οριστεί μια μεταβλητή ανεξάρτητη της ροής για την συνάρτηση πίεσης-ροής, η εξίσωση (1.1) πρέπει να γραμμικοποιηθεί και το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφει το δίκτυο πρέπει να επιλυθεί μέσω επαναλήψεων. Για την επίτευξη της γραμμικής μορφής, οι αντιστάσεις μετατρέπονται σε μια γραμμική και ανεξάρτητη της ροής μορφή σε κάθε επανάληψη.

$$\begin{aligned} R(\dot{V}) &= R_{const} \dot{V}^{n-1} \\ \Delta p &= R(\dot{V}) * \dot{V} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Με την βοήθεια αυτών των απλών εξισώσεων, για παράδειγμα, η γεωμετρία μιας σχιστής μήτρας μπορεί να υπολογιστεί μέσω μιας αντίστροφης διαδικασίας σχεδιασμού. Αυτό σημαίνει ότι το κανάλι ροής της μήτρας μπορεί να καθοριστεί απευθείας από την επιθυμητή διατομή εκβολής. Ωστόσο, αυτή η απευθείας σχεδίαση, είναι δυνατή μόνο σε λίγες ειδικές γεωμετρικές περιπτώσεις. Αν το δίκτυο που περιγράφει το κανάλι ροής είναι πιο πολύπλοκο, ακόμη και απλές μήτρες εκβολής μπορούν να σχεδιαστούν μόνο μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, στην οποία η γεωμετρία αλλάζει, συνεχώς, μέχρι ότου προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης [3,4]. Στην πράξη, οι πιο σύνθετες μήτρες εξώθησης σχεδιάζονται με επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά, ετοιμάζεται ένα προσχέδιο για το κανάλι ροής και, έπειτα, σύμφωνα με την εμπειρία του σχεδιαστή, γίνονται αλλαγές μέσω

δοκιμών, έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή κατανομή ταχύτητας στην έξοδο της μήτρας εκβολής. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, απαιτούνται δέκα με δεκαπέντε επαναλήψεις για τη βελτιστοποίηση γεωμετρικά συνθέτων προφίλ [5,6].

Τα τελευταία χρόνια, στο σχεδιασμό και στην κατασκευή μητρών εξώθησης, λόγω ανάγκης περιορισμού χρόνου και κόστους, παρατηρείται αυξανόμενη τάση χρήσης υπολογιστικών προγραμμάτων για την προσομοίωση της εκβολής πολυμερούς. Με τη χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν εικονικές δοκιμές στον υπολογιστή και κατά αυτό τον τρόπο να μειωθεί ο αριθμός των δοκιμών σε πραγματικές μήτρες [7,8]. Στην υπολογιστική δοκιμή, χρησιμοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού, στην οποία η κατανομή της ταχύτητας στο κανάλι ροής μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση διαφόρων αριθμητικών μεθόδων.

Συχνά για την προσομοίωση των συνθηκών ροής σε πολύπλοκα σχήματα χρησιμοποιείται η μέθοδος των περασμένων στοιχείων (FEM). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει ακριβή υπολογισμό της ροής σε οποιοδήποτε τρισδιάστατο κανάλι ροής [7,9-11]. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, αφού αρχικά υπολογιστεί η ροή, στη συνέχεια οι κατανομές της ταχύτητας και της πίεσης είναι γνωστές σε κάθε σημείο στη μήτρα, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο μια 'έσωτερική ματιά'. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι αρκετά σύνθετη, καθώς πρέπει να δημιουργηθεί ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για όλη την δομή της μήτρας, με αποτέλεσμα, η χρήση αυτής της μεθόδου είναι σχετικά χρονοβόρα [12].

Οι συνθήκες ροής σε μια μήτρα μπορεί να μελετηθούν μέσω προγραμμάτων προσομοίωσης που βασίζονται σε άλλες υπολογιστικές μεθόδους. Για παράδειγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών (FDM) και συνοριακών στοιχείων (BEM) [13] ή ακόμα ένας συνδυασμός της θεωρίας δικτύων και αυτών των μεθόδων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, παρ' όλα τα πλεονεκτήματα των μεθόδων προσομοίωσης και την συνεχώς αυξανόμενη απόδοση των διαθέσιμων ηλεκτρονικών υπολογιστών, δεν είναι ακόμη δυνατό να ληφθούν υπόψη, μέσω της προσομοίωσης, όλοι οι παράγοντες που επιδρούν στο σχήμα του προφίλ της μήτρας εξώθησης. Ενώ υπάρχουν διαθέσιμα μαθηματικά μοντέλα για πολλά φυσικά φαινόμενα, δεν είναι πάντα δυνατή η ακριβής μέτρηση των παραμέτρων του υλικού που χρησιμοποιείται σε αυτά τα μοντέλα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση μη γραμμικών μοντέλων σε προγράμματα προσομοίωσης μπορεί να οδηγήσει σε αριθμητικές αποκλίσεις που εμποδίζουν τον ακριβή υπολογισμό. Η ιξωδοελαστικότητα των πολυμερικών τηγμάτων και η ολίσθηση μερικών πολυμερικών υλικών στα τοιχώματα της μήτρας είναι μερικά από τα υπολογιστικά προβλήματα που δεν μπορούν να υπολογισθούν πλήρως μέσω των αριθμητικών προσομοιώσεων. Εν τούτοις, τα προγράμματα προσομοίωσης έχουν καταστεί σήμερα απαραίτητο εργαλείο για το σχεδιασμό μητρών εξώθησης.

1.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

1.2.1 Πρακτικοί στόχοι βελτιστοποίησης

Συνήθως υπάρχουν διάφοροι στόχοι όταν σχεδιάζεται μία μήτρα εξώθησης. Ανάλογα με τις οριακές συνθήκες που ισχύουν, αυτοί οι στόχοι μπορεί να θέτουν διαφορετικές προτεραιότητες στη σχεδίαση. Η ποιότητα ενός εξωθημένου προϊόντος επηρεάζεται πρωταρχικά από την κατανομή της ροής του πολυμερούς στην έξοδο της μήτρας εξώθησης. Επομένως, στην επεξεργασία πλαστικών ο πρωταρχικός στόχος του σχεδιασμού μιας μήτρας εξώθησης ή του εκβολέα είναι συνήθως η επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής της ταχύτητας του πλαστικού υλικού κατά την έξοδο του από το κανάλι ροής. Επιπροσθέτως, είναι χρήσιμο οι μήτρες να έχουν το μικρότερο δυνατό φάσμα αντίστασης, ώστε να ελαχιστοποιηθούν ο χρόνος και το κόστος, που σχετίζονται με τον καθαρισμό της μήτρας και της αλλαγής του υλικού επεξεργασίας [2-5,13].

Ένα σημαντικό κριτήριο στο σχεδιασμό μητρών εξώθησης είναι ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης στη μήτρα εκβολής, με στόχο να περιοριστούν οι δυνάμεις πιέσεις, ώστε να μην επιφέρει αστοχία του υλικού κατασκευής της μήτρας. Σημειώνεται ότι οι υψηλές πιέσεις στη μήτρα εξώθησης οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερικού τήγματος και πιθανή υποβάθμιση της τελικής ποιότητας του πλαστικού αντικειμένου. Για την παροχή υψηλής πίεσης απαιτείται ένας πιο ανθεκτικός εκβολέας, του οποίου το κόστος είναι αρκετά υψηλότερο σε σχέση με την αρχική διάταξη εκβολής.

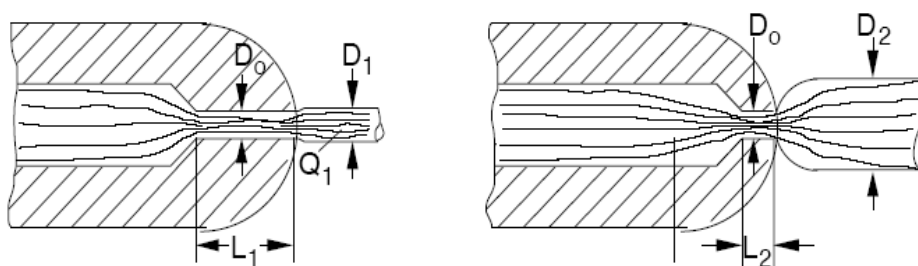
Η διατήρηση συγκεκριμένης διαμητρικής τάσης του πολυμερικού τήγματος στα τοιχώματα της μήτρας εξώθησης αποτελεί αναπόσπαστο κριτήριο στη βελτιστοποίηση μητρών εξώθησης. Το κριτήριο αυτό μπορεί να επεκταθεί στην ταχύτητα διάτμησης, που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις τάσεις στο τήγμα [3,4]. Κατά την σχεδίαση των καναλιών ροής, πρέπει να διασφαλιστεί ότι το τήγμα υπόκειται σε μια συνεχή επιτάχυνση καθώς κινείται από το σημείο εισόδου της μήτρας προς στο σημείο εξόδου της [5]. Η απαίτηση αυτή εφαρμόζεται σε υλικά που τείνουν να εμφανίζουν το φαινόμενο της ολίσθησης στα τοιχώματα της μήτρας.

Μια χρήσιμη παράμετρος συχνά χρησιμοποιούμενη για τον υπολογισμό των ελαστικών φαινομένων κατά τη ροή είναι ο **αριθμός Deborah**

$$De = \frac{\lambda}{t_p} \quad (1.5)$$

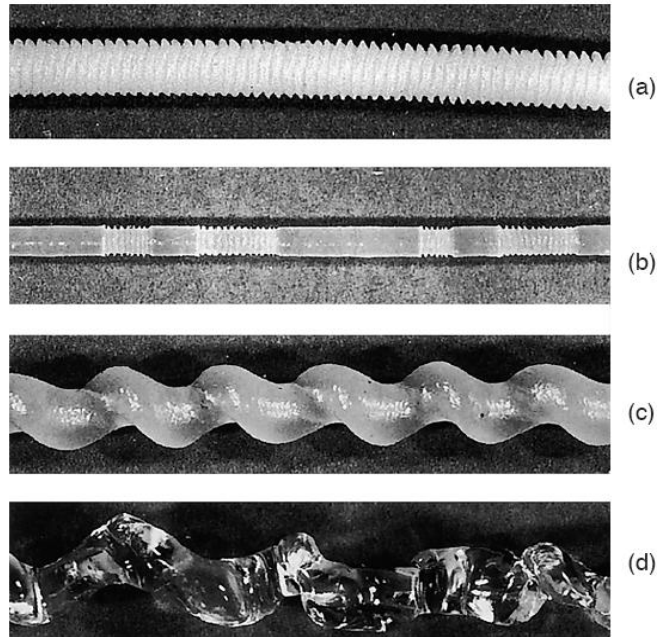
Όπου: λ είναι ο χρόνος χαλάρωσης του πολυμερούς, t_p είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος της εκβολής, που ορίζεται ως ο λόγος της χαρακτηριστικότερης διάστασης της μήτρας προς τη μέση ταχύτητα εκβολής του πολυμερικού ρευστού. Όταν ο αριθμός Deborah λαμβάνει τιμή μηδέν, το υλικό συμπεριφέρεται ως ιξώδες ρευστό, ενώ, όταν λαμβάνει άπειρη

τιμή, συμπεριφέρεται ως ελαστικό στερεό. Όταν ο αριθμός Deborah λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας το πολυμερές δεν έχει αρκετό χρόνο να “χαλαρώσει” κατά τη διαδικασία της εκβολής καταλήγοντας σε πιθανές αποκλίσεις των επιθυμητών διαστάσεων ή εμφανίζοντας ανωμαλίες στην επιφάνεια του, όπως για παράδειγμα η διόγκωση του προϊόντος της εκβολής, η εμφάνιση του φαινομένου **sharkskin** και η θραύση του τήγματος. Μολονότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διόγκωση προϊόντος της εκβολής, έχει παρατηρηθεί ότι οι απότομες αλλαγές στις οριακές συνθήκες (όπως για παράδειγμα το σημείο διαχωρισμού από τη μήτρα) συντελούν επίσης στη διόγκωση ή στην παραμόρφωση του προϊόντος της εκβολής. Πρακτικά, η συμβολή της «μνήμης» του ρευστού στη διόγκωση του προϊόντος εκβολής στη μήτρα μπορεί να περιορισθεί αυξάνοντας το μήκος του τελικού ευθύγραμμου τμήματος της μήτρας. Αυτό αποδίδεται σχηματικά στο σχήμα που ακολουθεί. Το μεγάλο μήκος του ευθύγραμμου τμήματος της μήτρας επιτρέπει στο ρευστό να «ξεχάσει» το παλιό του σχήμα.



Σχήμα 1.2: Διόγκωση προϊόντος εκβολής κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας

Κυματώσεις στο προϊόν εκβολής εμφανίζονται ως αποτέλεσμα των υψηλών ταχυτήτων κατά τη διάρκεια της διεργασίας, όπου το πολυμερές δεν προλαβαίνει να “χαλαρώσει”. Αυτό το φαινόμενο εν γένει είναι γνωστό ως **sharkskin**. Στο Σχήμα 1.3 (a) παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό σε πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας. Επίσης σε υψηλές ταχύτητες εκβολής παρατηρείται ένας διακοπτόμενος διαχωρισμός του τήγματος και του εσωτερικού τοιχώματος της μήτρας, όπως φαίνεται στο φαίνεται στο Σχήμα 1.3 (b). Το φαινόμενο αυτό συχνά αναφέρεται ως φαινόμενο **stick-slip** και οφείλεται στις υψηλές διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των τοιχωμάτων της μήτρας και του πολυμερούς. Το φαινόμενο αυτό απαντάται όταν η διατμητική τάση λαμβάνει την κρίσιμη τομή των 0.1MPa. Εάν η ταχύτητα του πολυμερικού ρευστού αυξηθεί περαιτέρω, τότε το προϊόν εκβολής εμφανίζει ελικοειδή γεωμετρία, όπως για παράδειγμα στο πολυπροπυλένιο του Σχήματος 1.3 (c). Εάν πάλι η ταχύτητα του ρευστού αυξηθεί υπερβολικά, τότε εμφανίζεται το φαινόμενο **Melt Fracture**, δηλαδή θραύση του τήγματος, βλ. Σχήμα 1.3 (d). Έχει παρατηρηθεί ότι η κρίσιμη διατμητική τάση είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας του τήγματος και αντιστρόφως ανάλογη του μέσου μοριακού βάρους του πολυμερούς.

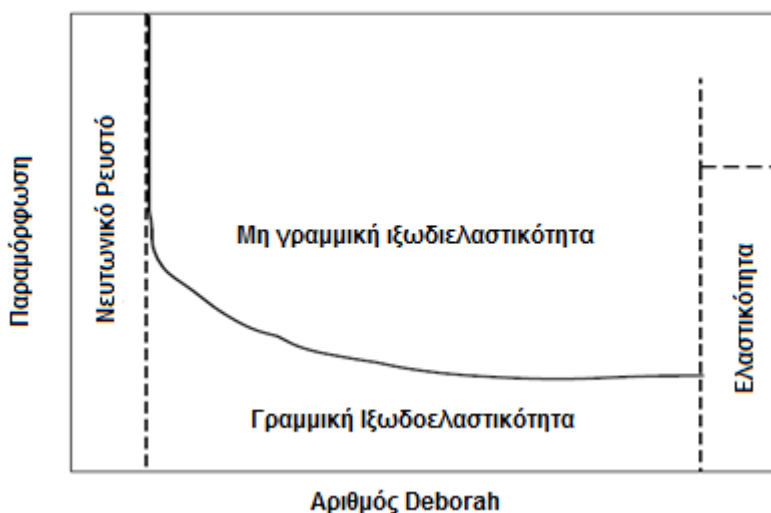


Σχήμα 1.3: Τελικό προϊόν εκβολής όπου παρατηρείται θραύση του τήγματος

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται γραφικά η σχέση μεταξύ χρόνου και παραμόρφωσης για κάθε μοντέλο. Για μικρούς αριθμούς Deborah το πολυμερές μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν νευτώνειο ρευστό ενώ για μεγάλους αριθμούς Deborah το πολυμερές μοντελοποιείται σαν στερεό στο οποίο ισχύει ο νόμος του Hooke

Στην ενδιάμεση ιξωδοελαστική περιοχή διακρίνονται δύο τμήματα :

- Το γραμμικό ιξωδοελαστικό για μικρές παραμορφώσεις
- Και το μη γραμμικό ιξωδοελαστικό για μεγαλύτερες παραμορφώσεις



Σχήμα 1.4: Απεικόνιση νευτώνειων ελαστικών, γραμμικών και μη γραμμικών ιξωδοελαστικών συστημάτων ως συνάρτηση του αριθμού Deborah και της παραμόρφωσης

Ο αριθμός Deborah και ο βαθμός παραμόρφωσης του υλικού κατά τη διάρκεια της διεργασίας εκβολής καθορίζει τον τρόπο, με τον οποίο το σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί και τελικώς να σχεδιαστεί.

1.2.2 Συνοριακές συνθήκες και περιορισμοί κατά το σχεδιασμό καναλιών ροής

Στη σχεδίαση μητρών, η ελευθερία στο σχεδιασμό περιορίζεται από τις οριακές συνθήκες. Για παράδειγμα, ο ελεύθερος χώρος για το κανάλι ροής μπορεί να περιορίζεται από τις μέγιστες διαστάσεις της μήτρας, τη θέση των άλλων καναλιών ροής (σε πολύπλοκες μήτρες) ή ακόμη από άλλα κανάλια τροφοδοσίας (π.χ. σε μήτρες επικάλυψης). Πρόσθετοι περιορισμοί που περιορίζουν την επιλογή της γεωμετρίας του καναλιού ροής απορρέουν μόνο από τις κατασκευαστικές απαιτήσεις της επιθυμητής γεωμετρίας.

Όταν σχεδιάζεται και διαστασιολογείται η μήτρα εξώθησης, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι παρουσιάζονται πολύ υψηλές πιέσεις στα κανάλια ροής. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα πρέπει να εξασφαλιστεί επαρκής μηχανική αντοχή της μήτρας, ώστε να αποφευχθεί η παραμόρφωση του καναλιού ροής.

1.2.3 Ανεξάρτητες παράμετροι κατά τη βελτιστοποίηση των μητρών

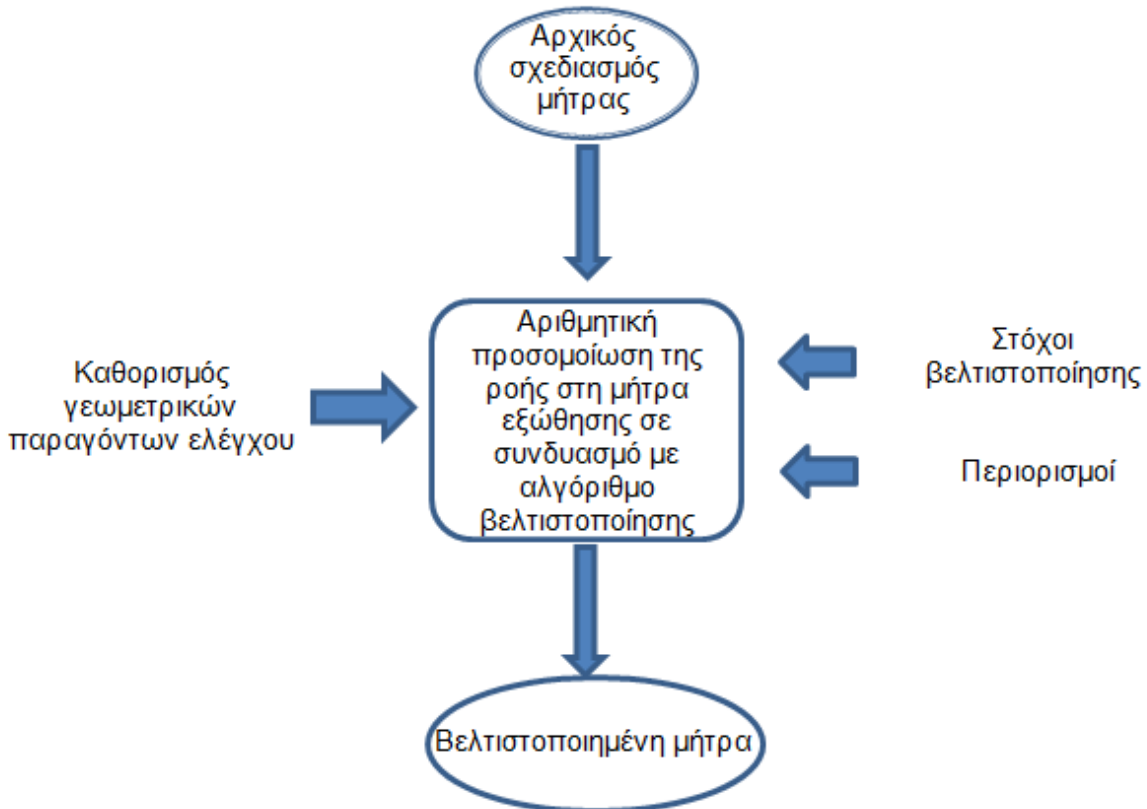
Βάσει των περιορισμών που δίνονται, ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να καθορίσει λεπτομερώς την πλήρη γεωμετρία του καναλιού ροής της μήτρας, δίνοντας βάση στους στόχους της βελτιστοποίησης και του σχεδιασμού. Δεν υπάρχουν ακόμη σχεδιαστικές μέθοδοι για την αρχική ή βασική γεωμετρία του καναλιού ροής που αποτελεί τη βάση για την επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του καναλιού ροής. Συνεπώς, το αρχικό σχέδιο ακόμη υπόκειται στην εμπειρία του σχεδιαστή.

Ο σχεδιαστής καθορίζει γεωμετρικές παραμέτρους που αλλάζουν συνεχώς, μέσω διαδοχικών επαναλήψεων. Η επιλογή των παραμέτρων και του βαθμού στον οποίο θα αλλάξουν, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητοί στόχοι της βελτιστοποίησης, βασίζεται στην ικανότητα του σχεδιαστή [11,13].

1.2.4 Εξαρτημένες παράμετροι κατά τη βελτιστοποίηση των μητρών και την μοντελοποίηση τους

Η καταλληλότητα των επιλεγμένων παραμέτρων αξιολογείται από τον σχεδιαστή κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Στην πορεία αυτής της αξιολόγησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα κριτήρια για την καταλληλότητά τους. Η εκτίμηση της καταλληλότητας του καναλιού ροής, βάσει οποιουδήποτε από αυτά τα κριτήρια, όπως για παράδειγμα η κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο της μήτρας, είναι συχνά υποκειμενικά [6,8,10]. Με μαθηματική περιγραφή ενός κριτηρίου καταλληλότητας, όμως, καθίσταται δυνατή μια αντικειμενική εκτίμηση. Με αυτή τη λογική, τα κριτήρια καταλληλότητας, σύμφωνα με τις συνθήκες ροής στην μήτρα, μοντελοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε, το ποσοστό καταλληλότητας του καναλιού ροής να μπορεί να περιγραφεί από μια αριθμητική τιμή ή έναν πίνακα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η χρήση της αριθμητικής τιμής της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας του ρευστού στην έξοδο της μήτρας, επειδή σχετίζεται με την ομοιόμορφη

κατανομή της ταχύτητας του εκβαλλόμενου πλαστικού αντικειμένου. Η σχεδιαστική διαδικασία για την κατασκευή μητρών εξώθησης, από μαθηματική άποψη, αποτελεί ένα συνηθισμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλές παραμέτρους και περιορισμούς. Σε αυτή την περίπτωση, οι στόχοι της βελτιστοποίησης αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους που επηρεάζονται από την γεωμετρία του καναλιού ροής. Οι ανεξάρτητες παράμετροι περιγράφουν ένα μέρος της γεωμετρίας ή όλη την γεωμετρία, ενώ οι εξαρτημένες παράμετροι παρέχουν μια ποσοτική και ποιοτική ένδειξη του βελτιστοποιημένου προβλήματος.



Σχήμα 1.5: Περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Στη μαθηματική διατύπωση ενός τέτοιου προβλήματος, θα πρέπει να οριστούν μαθηματικές συναρτήσεις, οι οποίες να εμφανίζουν απόλυτο ακρότατο, όταν ανεξάρτητες παράμετροι φτάνουν σε μια βέλτιστη τιμή. Στην ορολογία της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης, αυτές οι μαθηματικές εκφράσεις ονομάζονται συνολικά ως συνάρτηση ποιότητας ή αντικειμενική συναρτήσεις (quality ή merit).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο στόχος της βελτιστοποίησης για ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο της μήτρας εξώθησης είναι δυνατόν να οριστεί μαθηματικά ως την ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας του πολυμερικού ρευστού κατά την έξοδο του από τη μήτρα εκβολής. Μια πιθανή συνάρτηση ποιότητας για το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης δίνεται από τη Σχέση (1.6):

$$f(v_1, \dots, v_n) = \sqrt{\sum_n \alpha_i * (v_i - \bar{v})^2} \quad (1.6)$$

όπου: v_i η μέση ταχύτητα σε ένα τμήμα εξόδου, \bar{v} η μέση ταχύτητα σε όλη την έξοδο και ο α_i συντελεστής βάρους της αντικειμενικής συνάρτησης [1-5]. Ένα κριτήριο καταλληλότητας είναι η απώλεια πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου της μήτρας. Η τιμή αυτή μπορεί να κανονικοποιηθεί με ένα σταθμιστικό παράγοντα ως εξής:

$$f(\Delta p) = \beta * \Delta p \quad (1.7)$$

Συνήθως, επιθυμείται βελτιστοποίηση που να ικανοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερα κριτήρια. Για το σκοπό αυτό, μια συνάρτηση ποιότητας είναι δυνατόν να ορισθεί σαν το σταθμισμένο σύνολο πολλών κριτηρίων

$$Q = \sum_i f_i \quad (1.8)$$

Κατά τον καθορισμό της συνάρτησης ποιότητας, περιγράφεται παραμετρικά το κανάλι ροής με βάση κάποιες γεωμετρικές παραμέτρους, οι οποίες μπορούν να βελτιστοποιηθούν, ώστε η συνάρτηση ποιότητας να πάρει την επιθυμητή τιμή. Είναι δυνατό τότε ο σχεδιαστής να εφαρμόσει επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης της μήτρας, συνδυάζοντας μία μέθοδο προσομοίωσης των συνθηκών ροής στην μήτρα εκβολής με έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Στην επαναληπτική αυτόματη βελτιστοποίηση, οι γεωμετρικές παράμετροι, που καθορίζουν τη γεωμετρία του καναλιού ροής, μπορούν να επιλεγούν με τη βοήθεια διάφορων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, μέχρις ότου οι συνθήκες ροής, που αξιολογούνται αντικειμενικά μέσω των κριτηρίων καταλληλότητας, να λάβουν τη βέλτιστη τιμή.[12,13].

1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στους τομείς της έρευνας και της εφαρμοσμένης μηχανικής υπάρχει μεγάλος αριθμός προβλημάτων που εστιάζουν στην εύρεση μια βέλτιστης τιμής. Από μαθηματική άποψη, αυτό περιλαμβάνει την εύρεση του ακρότατου της αντικειμενικής συνάρτησης μέσα σε ένα καθορισμένο διάστημα τιμών [14-20].

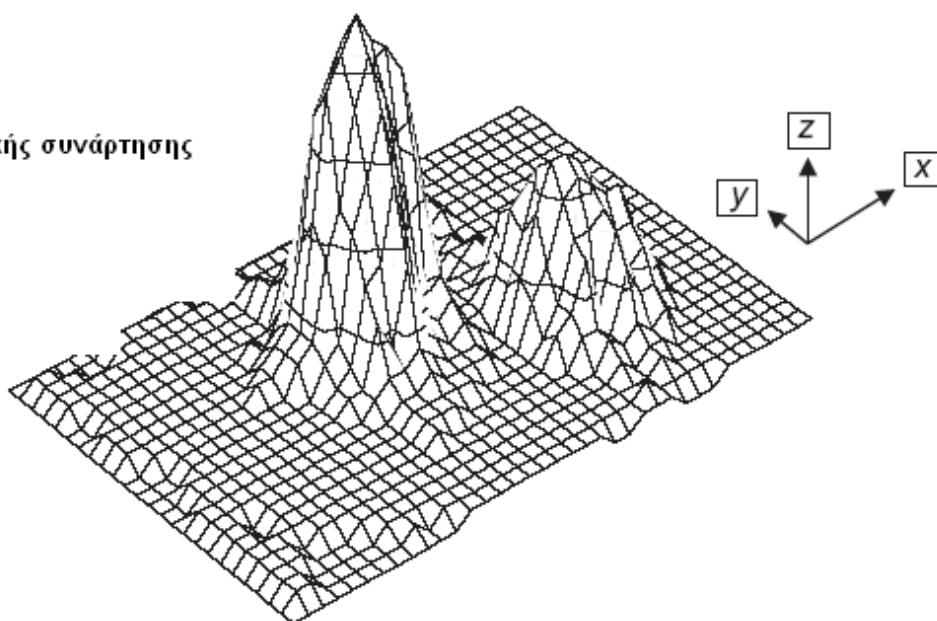
Μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στον καθορισμό και επίλυση προβλημάτων στην εφαρμοσμένη έρευνα και μηχανική, δείχνει σαφώς ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός προβλημάτων που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με τις στρατηγικές βελτιστοποίησης. Έχουν αναπτυχθεί πάρα πολλές στρατηγικές βελτιστοποίησης, οι οποίες υιοθετούν ένα μεγάλο αριθμό διαδικασιών και αλγορίθμων για να εντοπίσουν το ακρότατο όριο [20-25].

Κοινό χαρακτηριστικό σε όλες τις μεθόδους βελτιστοποίησης είναι η αναζήτηση ενός ακρότατου ορίου (μέγιστου ή ελάχιστου) σε ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων. Από θεωρητική άποψη, κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης με n ανεξάρτητες παραμέτρους συστήματος μπορεί να θεωρηθεί ως η μεγιστοποίηση (ή ελαχιστοποίηση) συνάρτησης ποιότητας [14], έτσι ώστε να ισχύει η ακόλουθη συνθήκη [25-28]:

$$f(\underline{x}) = \text{Max! for } \underline{x} \in R^n \quad (1.9)$$

Η συνάρτηση ποιότητας αναπαριστά μια επιφάνεια σε ένα χώρο διαστάσεων $n+1$, όπου το n είναι η διάσταση του διανύσματος X και η τιμή της συνάρτησης δείχνει την καταλληλότητα του επιλεγμένου συνόλου παραμέτρων. Για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με δύο ανεξάρτητες παραμέτρους, αυτή η επιφάνεια πιθανώς να έχει την μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6. Σε αυτήν την απεικόνιση, οι X - και οι Y - άξονες καθορίζουν το χώρο των παραμέτρων. Κάθε σημείο σε αυτήν την x - y επιφάνεια αντιπροσωπεύει ένα σύνολο παραμέτρων. Εάν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί παραμέτρων αντιστοιχούν σε μια αριθμητική τιμή που παρίσταται γραφικά στον z -άξονα, το αποτέλεσμα είναι μια επιφάνεια που περιγράφει την καταλληλότητα ολόκληρου διαστήματος των παραμέτρων. Αυτή η επιφάνεια μπορεί να παρουσιάζει πολύ διαφορετικές μορφές για διαφορετικά προβλήματα [14-17,28]. Ο στόχος κάθε στρατηγικής βελτιστοποίησης είναι να εντοπίσει το βέλτιστο με τους λιγότερους δυνατούς υπολογισμούς [22,23].

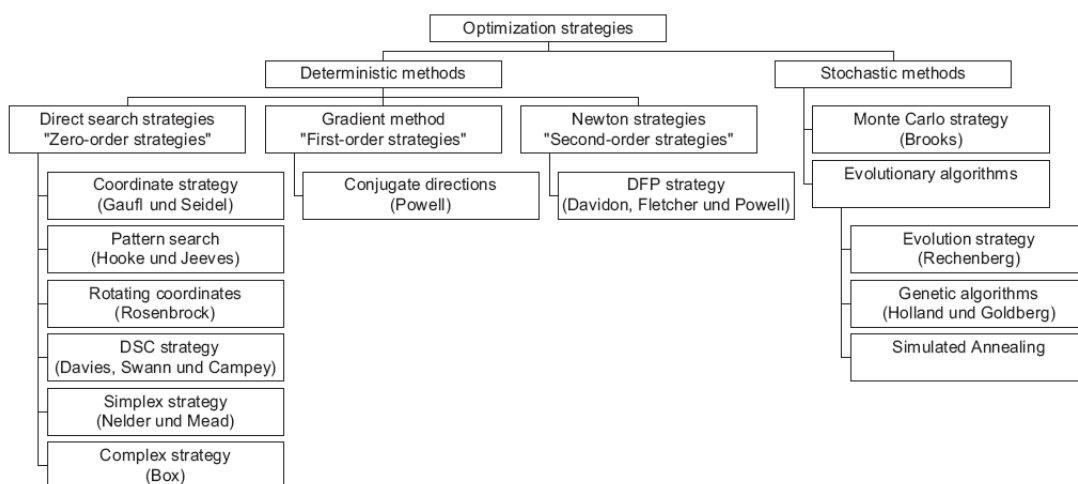
x: Παράμετρος 1
y: Παράμετρος 2
z: Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης



Σχήμα 1.6: Συνάρτηση ποιότητας

Για τα πολυδιάστατα προβλήματα βελτιστοποίησης, οι στρατηγικές βελτιστοποίησης μπορούν να ταξινομηθούν ως ντετερμινιστικές και στοχαστικές μέθοδοι. Για τις ντετερμινιστικές μεθόδους, μια συγκεκριμένη αρχή υιοθετείται για την μετάβαση από ένα σημείο επανάληψης στο επόμενο, ενδεχομένως καλύτερο, σημείο. Θεωρώντας ίδιες αρχικές και οριακές συνθήκες, η βελτιστοποίηση ακολουθεί πάντα την ίδια πορεία με αυτόν τον τύπο στρατηγικής. Με τις στοχαστικές μεθόδους, περιέχονται τυχαία γεγονότα στην πορεία της βελτιστοποίησης [29]. Τα κύρια χαρακτηριστικά των ντετερμινιστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι η άντληση πληροφοριών από τις παραγώγους της αντικειμενικής συνάρτησης και η εφαρμογή βασικών αποτελεσμάτων απειροστικού λογισμού για τον εντοπισμό σημείων τοπικών ελαχίστων της αντικειμενικής συνάρτησης. Παρουσιάζουν γρήγορη σύγκλιση, αλλά δεν παράγουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε συναρτήσεις που παρουσιάζουν περισσότερα από ένα τοπικά ελάχιστα.

Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι δεν μπορούν να διαχωρίσουν ποιοτικά το ολικό από κάποιο τοπικό ελάχιστο, αφού η έρευνα που πραγματοποιούν βασίζεται στα θεωρήματα που αφορούν τις πραγματικές διαφορίσιμες συναρτήσεις. Γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν κρίσιμα σημεία της αντικειμενικής συνάρτησης, στα οποία το διάνυσμα των πρώτων μερικών παραγώγων ισούται με το μηδενικό διάνυσμα. Σημεία με αυτήν την ιδιότητα αποτελούν σημεία ολικών ή τοπικών ακρότατων ή και συγκεκριμένα σημεία καμπής. Επειδή η ισχύς όλων των θεωρημάτων για τις διαφορίσιμες πραγματικές συναρτήσεις είναι τοπική δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός ολικού και τοπικού ελαχίστου. Οι ντετερμινιστικές μέθοδοι καλούνται επίσης στρατηγικές “Hill Climbing”. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω ως προς το εάν οι κλίσεις (gradients) της συνάρτησης ποιότητας ενσωματώνονται στη στρατηγική. Μια ταξινόμηση των κοινών αλγορίθμων βελτιστοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7 [29-31].



Σχήμα 1.7: Ταξινόμηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης

1.3.1 Μέθοδοι βελτιστοποίησης ανεξάρτητες της κλίσης

Στρατηγική Coordinate

Η στρατηγική coordinate του Gaub και Seidel [28] είναι μια εξέλιξη των μονοδιάστατων στρατηγικών βελτιστοποίησης σε πολυδιάστατα προβλήματα. Ξεκινώντας από μια αρχική κατάσταση με αυτήν την στρατηγική, μόνο η πρώτη παράμετρος βελτιστοποιείται, έως ότου η συνάρτηση ποιότητας φθάσει σε ένα μέγιστο, ενώ οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Έπειτα, όλες οι άλλες παράμετροι βελτιστοποιούνται ακολουθώντας την ίδια αρχή. Εάν από μια τροποποίηση των παραμέτρων δεν γίνει καμία βελτίωση στην συνάρτηση ποιότητας, η ακολουθία βελτιστοποίησης διακόπτεται. Η μονοδιάστατη στρατηγική για την εύρεση του βέλτιστου μπορεί να επιλεγεί ελεύθερα.

Στρατηγική Rotating Coordinate

Η στρατηγική rotating coordinate αποτελεί εξέλιξη της στρατηγικής coordinate [32]. Στη στρατηγική αυτή, η κατεύθυνση για τη βελτιστοποίηση δεν καθορίζεται από παραλλήλους προς τους άξονες. Αντ’ αυτού, εισάγεται ένα νέο σύστημα αξόνων για την εύρεση του

βέλτιστου, το οποίο δείχνει πάντα την κατεύθυνση του διανύσματος που ενώνει το αρχικό με το τελικό σημείο του προηγούμενου βήματος επανάληψης. Με αυτή τη διαδικασία, είναι πιθανό να βρεθεί μια ευνοϊκή κατεύθυνση βελτιστοποίησης, που συνήθως οδηγεί σε έναν ταχύτερο ρυθμό σύγκλισης.

Pattern Search (Direct Search)

Η μέθοδος pattern search των Hooke και Jeeves [33] είναι μια εξέλιξη της στρατηγικής coordinate. Με αυτή τη μέθοδο βελτιστοποίησης, μια διερευνητική κίνηση γίνεται αρχικά κατά τρόπο παρόμοιο με τα διερευνητικά βήματα που χρησιμοποιούνται στην στρατηγική coordinate. Υποθέτοντας ότι η γραμμή που συνδέει το αρχικό με το τελικό σημείο αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση, ένα επαναληπτικό βήμα γίνεται σε αυτή την κατεύθυνση με παρεμβολή (κίνηση pattern). Η επιτυχία της παρεμβολής καθορίζεται μόνο μετά από αξιολόγηση της καταλληλότητας με ένα ακόμη διερευνητικό βήμα [33-38]. Εάν η ενέργεια δεν είναι επιτυχής, αναιρείται το βήμα, ενώ, εάν είναι επιτυχής, μεταβαίνει στο επόμενο. Με την τροποποίηση του σημείου και της κατεύθυνσης της παρεμβολής, είναι δυνατό ο μελετητής να επιδράσει στα αποτελέσματα κάθε βήματος ξεχωριστά έτσι ώστε με μόνο μια βαθμιαία αλλαγή στη βέλτιστη κατεύθυνση αναζήτησης το μήκος του βήματος παρεμβολής αυξάνεται κατά διαστήματα, με συνέπεια μια συντομότερη αναζήτηση [37-40]

Στρατηγική DSC

Η στρατηγική DSC, που πήρε το όνομα της από τους Davis, Swann και Campey, είναι ένας συνδυασμός της στρατηγικής rotating coordinate και μιας γραμμική αναζήτησης [41]. Ξεκινώντας από μια αρχική θέση, μια γραμμική αναζήτηση του βέλτιστου διεξάγεται σε κάθε μια από τις coordinate κατευθύνσεις. Αρχίζοντας από το τελικό βέλτιστο σημείο που καθορίζεται με αυτόν τον τρόπο, ακολουθεί μια μονοδιάστατη βελτιστοποίηση στην κατεύθυνση της γραμμής που συνδέει το αρχικό με το τελικό σημείο. Έπειτα, οι άξονες του coordinate συστήματος ευθυγραμμίζονται εκ νέου για να διαμορφώσουν ένα ομαλοποιημένο, ορθογώνιο coordinate σύστημα, και διεξάγεται μια νέα γραμμική αναζήτηση παράλληλα σε αυτούς τους άξονες [28]. Μετά από αυτό, μια μονοδιάστατη βελτιστοποίηση εκτελείται στην κατεύθυνση της γραμμής που συνδέει το αρχικό με το τελικό σημείο [42-44].

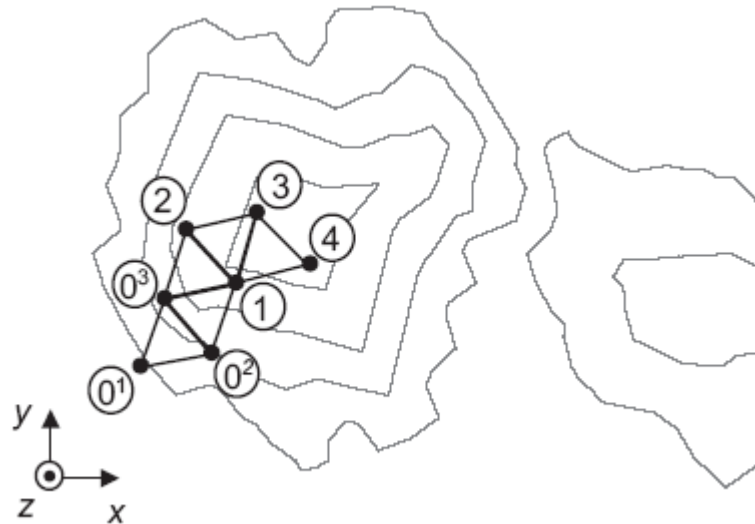
Μέθοδοι Simplex και Complex

Μια άλλη στρατηγική αναζήτησης που διαφέρει από εκείνες που περιγράφονται παραπάνω ακολουθεί τη μέθοδο Simplex των Nelder και Mead [45]. Με αυτή τη μέθοδο, τουλάχιστον $n+1$ αρχικά σημεία, που αντιπροσωπεύουν ένα σύνολο παραμέτρων, διευκρινίζονται σε ένα n -διαστάσεων χώρο αναζήτησης. Τα αρχικά σημεία επιλέγονται ώστε να απέχουν εξ ίσου μεταξύ τους. Αυτό οδηγεί συνήθως σε ένα κανονικό πολύεδρο που καλείται simplex. Η βελτιστοποίηση μέσω αυτής της στρατηγικής προχωρά αρχικά αξιολογώντας όλες τις κορυφές, κάθε μία από τις οποίες περιγράφει ένα σύνολο παραμέτρων (συνήθως με την χρήση μιας συνάρτησης ποιότητας). Στο επόμενο βήμα προσδιορίζεται η κορυφή με τη χειρότερη τιμή σε σχέση με τις άλλες. Αυτό το σύνολο παραμέτρων απορρίπτεται και αντικαθίσταται από το ένα νέο σύνολο που παράγεται με την απεικόνιση του απορριφθέντος σημείου μέσω του κέντρου των παραμενόντων σημείων. Εάν η κορυφή που μόλις δημιουργήθηκε αξιολογηθεί ως η χειρότερη τιμή στην επόμενη επανάληψη, αντικαθίσταται η δεύτερη χειρότερη κ.ο.κ. Εάν, ως αποτέλεσμα αυτής της

διαδικασίας επανάληψης, το simplex πλησιάζει πολύ κοντά στη βέλτιστη τιμή, τότε και μόνο τότε περιστρέφεται γύρω από την κορυφή με τη βέλτιστη τιμή.

Μια πιο στενή προσέγγιση στο βέλτιστο μπορεί έπειτα να επιτευχθεί με τον περιορισμό της απόστασης των σημείων. Στο Σχήμα 1.8 φαίνεται πώς μια τέτοια διαδικασία μπορεί να εκτελεσθεί σε ένα δισδιάστατο χώρο. Οι καμπύλες μέσα στο σχέδιο αντιπροσωπεύουν περιοχές που η συνάρτηση ποιότητας παίρνει την ίδια τιμή. Τα αρχικά σημεία συμβολίζονται με 0^1 , 0^2 και 0^3 . Το σημείο 1 προκύπτει ως το είδωλο του σημείου 0^1 μέσω του μέσου της γραμμής που συνδέει τα σημεία 0^2 και 0^3 κ.ο.κ.

Μία εξέλιξη αυτής της μεθόδου, η μέθοδος complex, επιδέχεται την ενσωμάτωση πρόσθετων συνθηκών υπό μορφή ανισοτήτων [45-47]. Οι σημαντικότερες διαφορές με τη μέθοδο simplex είναι ο μεγαλύτερος αριθμός κορυφών και η αύξηση του μεγέθους του πολυέδρου, που εδώ καλείται complex, μετά από κάθε απεικόνιση [47-50].



Σχήμα 1.8: Μέθοδος Στρατηγικής Simplex

1.3.2 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης που εξαρτώνται από την κλίση (Gradient-based)

Η κατηγορία της 'gradient-based' στρατηγικής βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί, εκτός από τις τιμές της συνάρτησης ποιότητας, τις πρώτες μερικές παραγώγους της για να διευκρινίσει την κατεύθυνση του επόμενου βήματος επανάληψης. Γενικά, η κλίση της συνάρτησης ποιότητας σε διαφορετικές κατευθύνσεις καθορίζεται αρχικά σε κάποιο αρχικό σημείο με αυτήν την μέθοδο. Το νέο σημείο επανάληψης καθορίζεται στην κατεύθυνση που έχει την πιο απότομη κλίση. Η διαδικασία επαναλαμβάνει μέχρι να αλλάξει η κλίση σε κάθε εξεταζόμενη κατεύθυνση και μπορεί να υποτεθεί ότι έχει βρεθεί ένα βέλτιστο.

Οι μέθοδοι gradient που υπάρχουν σήμερα όχι μόνο επιτρέπουν βήματα παράλληλα στους άξονες συντεταγμένων, αλλά και ενσωματώνουν τη γνώση που αποκτάται από τις επιτυχίες και τις αποτυχίες προγενέστερων βημάτων επανάληψης προκειμένου να καθοριστεί μια βέλτιστη κατεύθυνση έρευνας. Με αυτές τις μεθόδους βελτιστοποίησης, η

εύρεση των παράγωγων, οι οποίες μπορεί μερικές φορές να είναι πολύ σύνθετες ή σε πολλές περιπτώσεις δεν μπορούν να καθοριστούν καθόλου, μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα.

Εάν μια συνάρτηση είναι διαφορίσιμη αρκετές φορές, οι πληροφορίες που παρέχονται από υψηλότερες παράγωγους μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά αυτών, από την πρώτη παράγωγο. Η στρατηγική Nextton, παραδείγματος χάριν, χρησιμοποιεί την δεύτερη παράγωγο προκειμένου να αποτελέσει μια συνάρτηση σε μια δοσμένη θέση με τη βοήθεια των όρων από μια σειρά Taylor. Κατ' αυτό τον τρόπο, η επόμενη καλύτερη θέση όσον αφορά την συνάρτηση ποιότητας μπορεί να καθοριστεί σε ένα ενιαίο βήμα χωρίς να χρειαστεί να διεξαχθεί μια γραμμική αναζήτηση [28].

Μέθοδος μέγιστης κλίσης

Αυτή η τεχνική εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η μέγιστη μεταβολή της συνάρτησης γίνεται κατά μήκος του ανύσματος των μερικών παραγώγων (κλίση ή ανάδελτα της συνάρτησης, grad) που παίζει και το ρόλο του ανύσματος κατεύθυνσης **S**. Αυτό μετατρέπεται σε μοναδιαίο και πολλαπλασιάζεται με ένα μήκος βήματος λ πριν χρησιμοποιηθεί σε κάθε στάδιο επανάληψης. Η πιο απλή υλοποίηση της μεθόδου περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

α. Απόδοση αρχικών τιμών x και βήματος λ (π.χ. μέση ή μέγιστη απόλυτη τιμή των παραγώγων της Αντικειμενικής Συνάρτησης στο σημείο x). Επίσης, ορίζεται ο λόγος μεταβολής βήματος, r , που θα χρειαστεί στα επόμενα βήματα.

β. Υπολογισμός του grad F και μετατροπή του σε μοναδιαίο άνυσμα: $S = \nabla F / \|\nabla F\|$

γ. Υπολογισμός της νέας θέσης $x' = x + \lambda S$ και της νέας τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στη συγκεκριμένη θέση

Αν η αντικειμενική συνάρτηση έχει μειωθεί τότε:

δ1. Αν το βήμα είναι μικρότερο από κάποια ανοχή που έχει οριστεί, θεωρείται ότι επήλθε σύγκλιση και τερματίζεται ο αλγόριθμος.

δ2. Αν το βήμα είναι πάνω από την ανοχή, τότε μειώνεται κατά ένα συγκεκριμένο λόγο r που έχει οριστεί μαζί με την ανοχή: $\lambda' = r\lambda$.

ε. Επιστροφή στο βήμα (β).

Σε άλλες παραλλαγές, το βήμα υπολογίζεται κάνοντας δοκιμές (ή και λύνοντας ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης) κατά μήκος του grad F και επιλέγοντας την τιμή που επιφέρει τη μεγαλύτερη μεταβολή στην αντικειμενική συνάρτηση.

1.3.3 Στοχαστικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Σε αντίθεση με τις ντετερμινιστικές μεθόδους, στις στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης υπάρχει το τυχαίο που επηρεάζει την έρευνα. Η βασική τεχνική μέσα σε αυτήν την κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης είναι η στρατηγική Monte Carlo, που

αντιπροσωπεύει την καθαρώς τυχαία, ή σε ασαφές περιβάλλον έρευνα. Με αυτήν τη στρατηγική, οι παράμετροι επιλέγονται τυχαία μέσα από ένα διευκρινισμένο διάστημα τιμών και υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης ποιότητας. Δεν χρησιμοποιείται καμία συστηματική διαδικασία. Η διαδικασία σταματά όταν δεν παρατηρείται καμία περαιτέρω βελτίωση στην τιμή της συνάρτησης ποιότητας μετά από την δοκιμή ενός συγκεκριμένου αριθμού παραμέτρων. Γενικότερα οι μέθοδοι τυχαίας αναζήτησης χωρίζονται σε:

- Αμιγώς τυχαία αναζήτηση (pure random search), όπου η συνάρτηση αποτιμάται σε μια σειρά από σημεία επιλεγμένα με τυχαίο τρόπο και ελάχιστο θεωρείται το σημείο με την χαμηλότερη συναρτησιακή τιμή.
- Μοναδικής εκκινήσεως (single start), όπου ύστερα από μια αμιγώς τυχαία αναζήτηση μια μέθοδος τοπικής ελαχιστοποίησης εφαρμόζεται στο σημείο με την χαμηλότερη συναρτησιακή τιμή.
- Πολλαπλής εκκινήσεως (multi start), όπου μια μέθοδος τοπικής ελαχιστοποίησης εφαρμόζεται σε μια σειρά από σημεία επιλεγμένα με τυχαίο τρόπο και καθολικό ελάχιστο θεωρείται το ελάχιστο με την μικρότερη συναρτησιακή τιμή. Η μέθοδος αυτή αποτελεί τη βάση για μια σειρά από αποτελεσματικότερες και αποδοτικότερες τεχνικές καθολικής ελαχιστοποίησης.
- Μέθοδοι αναζητήσεων με απαγορεύσεις (tabu search). Στις μεθόδους αυτής της κατηγορίας δημιουργείται μία σειρά από κινήσεις. Μία κίνηση επιλέγεται να εκτελεστεί αν έχει διαπιστωθεί από τις προηγούμενες επαναλήψεις του αλγορίθμου ότι μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη τιμή της αντικειμενικής συναρτήσεως. Επιπλέον κατά την διάρκεια εκτελέσεως του αλγορίθμου διατηρείται ένα ιστορικό με μετακινήσεις που θεωρούνται απαγορευμένες, για την αποφυγή εγκλωβισμού της μεθόδου σε τοπικά ελάχιστα που είχαν υπολογιστεί σε προηγούμενα βήματα του αλγορίθμου.
- Μέθοδοι ελεγχόμενης τυχαίας αναζητήσεως (Controlled Random Search). Στις μεθόδους αυτές η συναρτησιακή τιμή αποτιμάται σε μια σειρά από σημεία, τα οποία χρησιμοποιούνται ως βάση για μια σειρά από ενέργειες που εκτελούνται στην συνέχεια, όπως τη δημιουργία του κεντροειδούς του δείγματος και τη δημιουργία ομάδων από την αρχική όπου η αναζήτηση για το ολικό ελάχιστο ενδεχομένως να είναι αποδοτικότερη.
- Μέθοδοι Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing). Η διαδικασία αυτή βασίζεται στη διαδικασία της ανόπτωσης, όπου ένα υλικό αφού θερμανθεί αρκετά στη συνέχεια ψύχεται σταδιακά ώστε να φτάσει σε κατάσταση χαμηλής ενέργειας. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία σε αλγόριθμους διακριτής ελαχιστοποίησης όπως στο πρόβλημα του πλανοδίου πωλητή, αλλά στην συνέχεια εφαρμόστηκε με επιτυχία και σε προβλήματα ελαχιστοποίησης συνεχών συναρτήσεων. Η φυσική διαδικασία της ανόπτωσης μπορεί να περιγραφεί ως εξής: καταρχήν το υλικό θερμαίνεται μέχρι να τηχθεί και στη συνέχεια ψύχεται με σταδιακή και αργή μείωση της θερμοκρασίας. Στην υγρή κατάσταση τα μόρια του υλικού κατανέμονται τυχαία εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας. Στη συνέχεια με την σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας τα μόρια θα οδηγηθούν σε μια κατάσταση χαμηλής ενεργείας και θα αποκτήσουν μία

συγκεκριμένη δομή. Αν η θερμοκρασία μειώνεται γρήγορα (κάτι που αποκαλείται βαφή) το σύστημα ηρεμεί σε κατάσταση υψηλής ενεργείας. Στη διαδικασία καθολικής ελαχιστοποίησης η κατάσταση ελαχίστης ενεργείας είναι το ολικό ελάχιστο που αναζητείται από τη μέθοδο.

1.3.4 Εξελικτικές Μέθοδοι

Οι μέθοδοι σε αυτήν την κατηγορία βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην εφαρμοσμένη μηχανική, δεδομένου ότι είναι συνήθως κατάλληλες για να χειριστούν προβλήματα με πάρα πολλές ανεξάρτητες παραμέτρους. Επιπλέον, προσφέρουν πλεονεκτήματα για τα προβλήματα με κακώς θεωρούμενες τις συναρτήσεις ποιότητας που εμφανίζουν ανεπιθύμητες ιδιότητες όπως αστάθειες, θόρυβο ή ακόμα και απροσδιόριστες τιμές. Οι εξελικτικές μέθοδοι είναι μέθοδοι βελτιστοποίησης που πραγματοποιούν μια βελτιστοποίηση κατά τρόπο παρόμοιο με τη βιολογική εξέλιξη. Σε αυτήν την περίπτωση, οι βιολογικές αρχές μεταφέρονται στις τεχνικές διαδικασίες (Πίνακας 1.1). Οι εξελικτικές μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες. Αφ' ενός, υπάρχει η στρατηγική εξέλιξης, η οποία χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον Rechenberg [46] για τη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος ροής. Από την άλλη, υπάρχουν οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι πρωτοπαρουσιάστηκαν από τους Holland [51] και Goldberg [52, 53].

Αρχή	Βιολογία	Μηχανική
Αντιγραφή	Πανομοιότυπη αναπαραγωγή του γενετικού υλικού	Αντιγραφή ενός υπάρχοντος συνόλου παραμέτρων
Μετάλλαξη	Τυχαία, μη ελεγχόμενη τροποποίηση του γενοτύπου	Τυχαία, μη ελεγχόμενη τροποποίηση του συνόλου των παραμέτρων
Γέννηση	Σχηματισμός ενός φαινοτύπου	Επιλογή του νέου συνόλου παραμέτρων
Ζωή	Επιβίωση της μορφής ζωής στο περιβάλλον	Αξιολόγηση της καταλληλότητας της επιλογής
Επιλογή	Επιλογή των πιο ευπροσάρμοστων οργανισμών και θάνατος των λιγότερο ευπροσάρμοστων ατόμων	Σύγκριση της καταλληλότητας των παραμέτρων σύνολα και απόρριψη των λιγότερο κατάλληλων συνόλων παραμέτρων

Πίνακας 1.1: Μεταφορά των αρχών της βιολογίας στην τεχνική διαδικασία βελτιστοποίησης

Εξελικτικές στρατηγικές

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται μέθοδοι που είναι εμπνευσμένες από τις φυσικές διαδικασίες της εξέλιξης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, ο γενετικός προγραμματισμός, βελτιστοποίηση βασισμένη σε σμήνος σωματιδίων (Particle Swarm Optimization), μέθοδοι διαφορικής εξέλιξης (differential evolution) κ.α. Ο στόχος της εξελικτικής στρατηγικής είναι η βελτιστοποίηση ενός συνόλου παραμέτρων μέσω των καλούμενων ως 'μετάλλαξη' και 'επιλογή'. Η διαδικασία που ακολουθείται για την βελτιστοποίηση, μέσω της εξελικτικής στρατηγικής, μπορεί να χωριστεί σε βήματα ως εξής:

1. Διευκρίνιση ενός ή περισσότερων συνόλων παραμέτρων ως αρχικό σημείο.
2. Αλλαγή όλων των υπαρχόντων συνόλων παραμέτρων τυχαία ή μετάλλαξη όλων των ξεχωριστών συνόλων παραμέτρων και παραγωγή με αυτόν τον τρόπο του καθορισμένου αριθμού 'απογόνων'.
3. Επιλογή των συνόλων παραμέτρων ή 'απογόνων', που θα χρησιμοποιηθούν σαν 'γονείς' για την επόμενη δημιουργία και απόρριψη των υπολοίπων.
4. Αν δεν επιτευχθεί ο στόχος της βελτιστοποίησης, επιστροφή στο 2^ο βήμα.

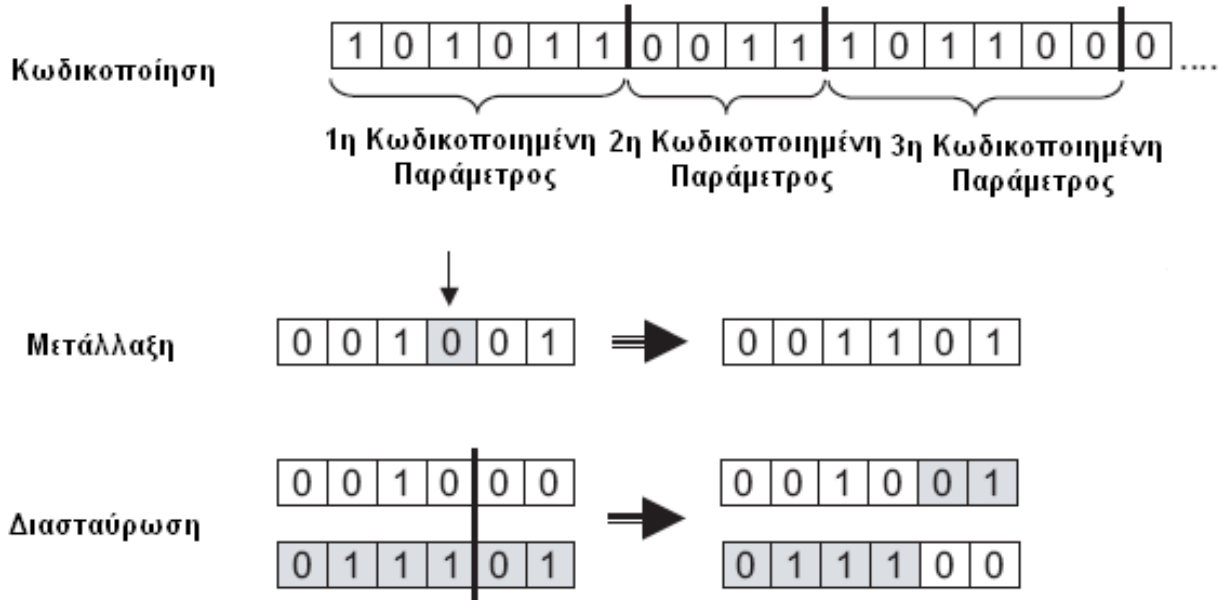
Γενετικοί αλγόριθμοί

Οι γενετικοί αλγόριθμοι στηρίζονται στην αρχή της εξέλιξης των ειδών (evolution species) που αναπτύχθηκε από τον Δαρβίνο. Με βάση την αρχή αυτή το 1975 ο John Holland και οι φοιτητές του ανέπτυξαν τους γενετικούς αλγόριθμους. Ο Holland διατύπωσε έναν αλγόριθμο ο οποίος μιμείται τη φύση για την επίλυση προβλημάτων τεχνητής νοημοσύνης και όχι μόνον. Στην ουσία οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια ειδική τεχνική παραμετρικής βελτιστοποίησης με την οποία επιλύονται περιβλήματα βελτιστοποίησης με ή χωρίς περιορισμούς.

Στην εξελικτική στρατηγική, οι παράμετροι που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν περιγράφονται από πραγματικούς αριθμούς. Παραδείγματος χάριν, η θέση ενός σημείου στον χώρο καθορίζεται με την βοήθεια πραγματικών τιμών. Αντί τέτοιων απεικονίσεων των παραμέτρων μέσω πραγματικών αριθμών, οι γενετικοί αλγόριθμοι υιοθετούν σειρές δυαδικών αριθμών για να περιγράψουν τις παραμέτρους. Όπως τα χρωμοσώματα στη βιολογία, αυτές περιέχουν τις παραμέτρους των συστημάτων σε κωδικοποιημένη μορφή [53]. Τέτοιες σειρές αριθμών φαίνονται στο Σχήμα 1.9. Σε αυτό το παράδειγμα, τρεις διαφορετικές παράμετροι κωδικοποιούνται με την βοήθεια σειρών δυαδικών αριθμών που έχουν διαφορετικό μήκος. Το μήκος τέτοιων σειρών και ο τρόπος που χρησιμοποιείται για την μετατροπή των παραμέτρων των συστημάτων σε δυαδικό κώδικα εξαρτώνται από το πρόβλημα. Μόλις βρεθεί ένα χρήσιμο σύστημα για την κωδικοποίηση των πραγματικών αριθμών σε σειρές δυαδικών αριθμών, τα μεμονωμένα σύνολα παραμέτρων αλλάζουν τυχαία για την βελτιστοποίηση. Κατά την χρησιμοποίηση γενετικών αλγόριθμων, αυτές οι τυχαίες αλλαγές παράγονται μέσω των αποκαλούμενων σημείων μεταλλάξεων (point mutations) και διασταυρώσεων 'crossovers'. Η μετάλλαξη μετατρέπει ένα σημείο σε μια σειρά δυαδικών αριθμών. Το ψηφίο που αλλάζει καθορίζεται τυχαία. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 1.9 απεικονίζει μία μετάλλαξη για μια παράμετρο κωδικοποιημένη από έναν εξαψήφιο δυαδικό αριθμό. Με τη χρήση της διασταύρωσης, δύο νέα σύνολα παραμέτρων παράγονται από δύο υπάρχοντα σύνολα παραμέτρων με την ανταλλαγή τιμών του δυαδικού κώδικα (Σχήμα 1.9). Η διαδικασία που ακολουθείται για την βελτιστοποίηση με την χρήση του γενετικού αλγορίθμου μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα βήματα:

1. Διευκρίνιση διάφορων συνόλων παραμέτρων, τα οποία διαμορφώνουν έναν αρχικό πληθυσμό.
2. Αλλαγή όλων των υπαρχόντων συνόλων παραμέτρων τυχαία ή εκτέλεση μεταλλάξεων.
3. Παράγωγή των νέων συνόλων παραμέτρων μέσω διασταυρώσεων.
4. Επιλογή των συνόλων παραμέτρων ή των "απογόνων" που θα χρησιμεύσουν ως "γονείς" της επόμενης γενιάς και να απορριφθούν τα υπόλοιπα.
5. Αν δεν επιτευχθεί ο στόχος της βελτιστοποίησης, επιστροφή στο 2^ο βήμα.

Βέβαια υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τρόποι για την εκτέλεση ‘μεταλλάξεων’ και την επιλογή των ‘απογόνων’ [54-56]. Γενικά οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ενδιαφέροντα συστήματα μάθησης που έχουν μια σειρά από πλεονεκτήματα όπως:



Σχήμα 1.9: Κωδικοποίηση, μετάλλαξη και διασταύρωση

Μπορούν σε πολλές περιπτώσεις να λύσουν προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν είναι εύκολο ένα πρόβλημα να επιλυθεί ή ακόμα και να διατυπωθεί σε άλλα συστήματα μάθησης, όπως τις μεθόδους ελαχιστοποίησης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι εξαιρετικά απλοί στην υλοποίηση και δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις από το πρόβλημα προς επίλυση. Ο χρήστης πρέπει να κωδικοποιήσει μόνο το αντικειμενικό πρόβλημα με την χρήση χρωμοσωμάτων και την αντικειμενική συνάρτηση προς επίλυση και δεν απαιτείται η κωδικοποίηση παραγώγων. Εξαιτίας της απλότητάς τους μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με άλλα πιο πολύπλοκα μοντέλα επιταχύνοντας την επίλυση ενός προβλήματος και βελτιώνοντας την ποιότητα της λύσης. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων υβριδικών σχημάτων είναι η Λαμαρκιανή και η Δαρβινική προσέγγιση στον χώρο της καθολικής βελτιστοποίησης. Στην πρώτη περίπτωση μετά το τέλος του Γενετικού Αλγορίθμου εφαρμόζεται μια μέθοδος τοπικής βελτιστοποίησης στα αποτελέσματα του αλγορίθμου για την βελτίωση του παραγόμενου αποτελέσματος. Στην δεύτερη περίπτωση η μέθοδος τοπικής βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται κάθε φορά που απαιτείται ο υπολογισμός της καταλληλότητας κάποιου χρωμοσώματος. Η Δαρβινική προσέγγιση παράγει στις περισσότερες περιπτώσεις καλύτερα αποτελέσματα από την Λαμαρκιανή προσέγγιση αλλά χρειάζεται περισσότερο χρόνο και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει και σε εγκλωβισμό σε τοπικά ελάχιστα. Οι γενετικοί τελεστές της επιλογής, διασταύρωσης και της μετάλλαξης δεν υλοποιούνται πάντοτε με τον ίδιο τρόπο. Διαφορετικοί προγραμματιστές μπορούν να επιλέξουν διαφορετική υλοποίηση που να ταιριάζει περισσότερο στα δικά τους προβλήματα. Επίσης μπορούν να επιλέξουν να εισάγουν τους δικούς τους τελεστές οι οποίοι να είναι και

αυτοί εμπνευσμένοι από τη φύση. Εφαρμόζονται σε περισσότερα πεδία από άλλες μεθόδους. Η ευελιξία των γενετικών αλγορίθμων και οι μικρές απαιτήσεις που έχουν από την πλευρά του προγραμματιστή τους καθιστούν ικανούς να εφαρμοστούν σε μια μεγάλη γκάμα υπολογιστικών προβλημάτων. Είναι ανθεκτικοί σε σφάλματα. Σε πολλές περιπτώσεις η αντικειμενική συνάρτηση θα περιέχει θόρυβο ο οποίος μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως η χρήση μη αξιόπιστων μηχανισμών στον υπολογισμό της. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιείται ένα μηχάνημα για την καταγραφή των καρδιακών παλμών ενός ασθενούς το οποίο λόγω του θορύβου, να εισάγει στην μέτρηση ένα σφάλμα 0.1%. Αυτό το σφάλμα θα μπορούσε να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα σε αλλά συστήματα όπου θα απαιτούνταν και υπολογισμός παραγώγων, αλλά οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να το ξεπεράσουν οδηγώντας το σύστημα σε μια αξιόπιστη λύση. Μπορούν εύκολα να παραλληλιστούν. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι βασίζονται σε μια σειρά από λύσεις στις οποίες εφαρμόζονται διάφοροι γενετικοί τελεστές. Μιας και οι υποψήφιες λύσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους μπορούμε εύκολα να δημιουργήσουμε μια παράλληλη εκδοχή τους. Για παράδειγμα, ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να γίνει σε διαφορετικούς επεξεργαστές ή ακόμα είναι δυνατόν να δημιουργηθούν υποπληθυσμοί από λύσεις.

Τα βασικά μειονεκτήματα των γενετικών αλγορίθμων είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις έχουν αργό χρόνο σύγκλισης και σε αρκετές περιπτώσεις τείνουν να εγκλωβιστούν σε τοπικά ελάχιστα της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτά όμως τα μειονεκτήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με προσεκτικό σχεδιασμό του Γενετικού Αλγορίθμου και με κατάλληλη προσαρμογή των παραμέτρων του στο πρόβλημα προς επίλυση.

1.3.5 Επεξεργασία των Οριακών Συνθηκών

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης στην εφαρμοσμένη μηχανική περιλαμβάνουν περιορισμούς. Αυτό σημαίνει ότι οι παράμετροι βελτιστοποίησης μεταβάλλονται μέσα σε συγκεκριμένα αριθμητικά όρια. Παραδείγματος χάριν, η αριθμητική τιμή της πίεσης του πολυμερικού ρευστού στην είσοδο της μήτρας εκβολής περιορίζεται στην μέγιστη διαθέσιμη πίεση που παρέχει η διάταξη του εκβολέα. Φαίνεται σε αυτό το απλό παράδειγμα ότι οι οριακές συνθήκες πρέπει να ενσωματώνονται στην επίλυση του προβλήματος. Για να εξασφαλιστεί αυτό, η συνάρτηση ποιότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τους περιορισμούς κατά την εύρεση του ακρότατου..

Εκφρασμένο από μαθηματική άποψη, ένα ανεξάρτητο πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς μετατρέπεται σε ένα ή περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς με τη μέθοδο της ποινής 'penalty'.

Μέθοδος Ποινής (Penalty)

Οι παράμετροι της αντικειμενικής συνάρτησης είναι δυνατόν να περιοριστούν σε ένα επιτρεπτό εύρος τιμών κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, με την εισαγωγή στην αντικειμενική συνάρτηση των αποκαλούμενων όρων ποινής (penalty). Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία νέα, τροποποιημένη συνάρτηση ποιότητας, της οποίας η τιμή μειώνεται

τεχνητά όταν οι παράμετροι της λαμβάνουν τιμές εκτός του αρχικού επιτρεπτού εύρους . Για να επιτευχθεί αυτό, οι συναρτήσεις ποιότητας πρέπει να προσαρμόζονται κατάλληλα σε κάθε πρόβλημα. Ο μαθηματικός προσδιορισμός για αυτούς τους όρους ποιότητας λαμβάνει την ακόλουθη μορφή κατά την αναζήτηση ενός μέγιστου:

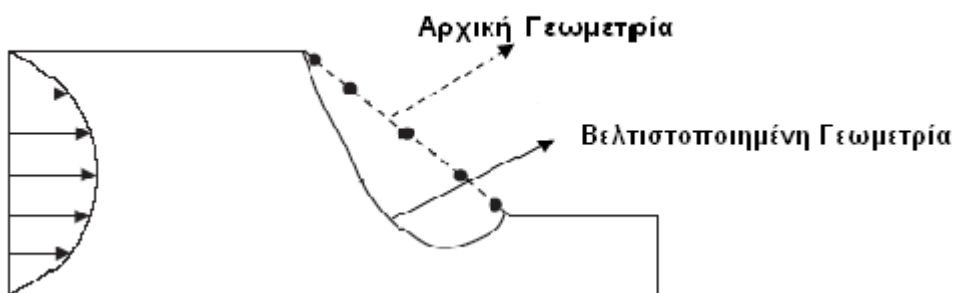
$$S(\underline{x}) = \begin{cases} = 0 & \underline{x} \in M^n \\ < 0 & \underline{x} \notin M^n \end{cases} \quad 1.10$$

1.4 ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΜΗΤΡΩΝ ΕΚΒΟΛΗΣ

1.4.1 Βελτιστοποίηση ενός καναλιού με συγκλίνουσα γεωμετρία

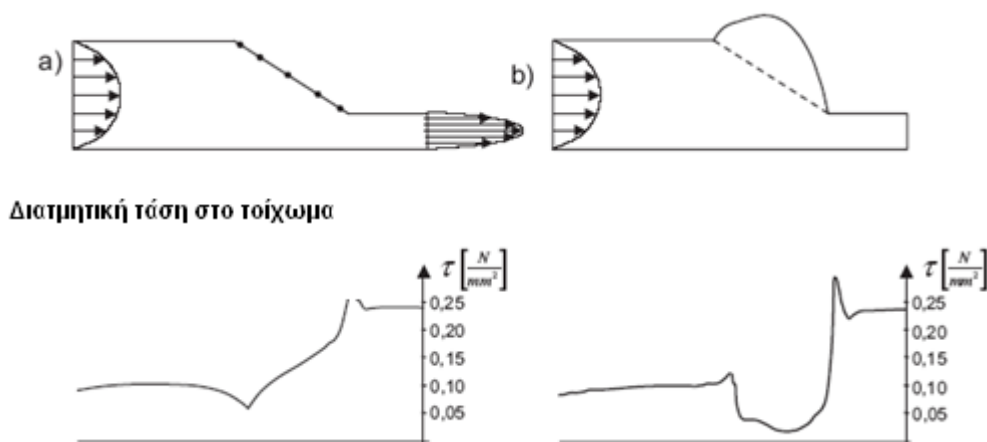
Στο Σχήμα 1.10 απεικονίζεται ένα συγκλίνον κανάλι με αναλογία μείωσης διατομής 3:1, το οποίο βελτιστοποιήθηκε με τη βοήθεια της εξελικτικής στρατηγικής [8,30,32]. Η δισδιάστατη προσομοίωση της ροής πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπροσθέτως, το ανώτερο όριο του συγκλίνοντος τμήματος του καναλιού ροής μοντελοποιήθηκε βάση μιας γραμμής spline, η οποία περιέχει τα σημεία ως ανεξάρτητες γεωμετρικές παραμέτρους. Αυτά τα σημεία ενσωματώθηκαν στη βελτιστοποίηση ως παράμετροι και το πλέγμα των πεπερασμένων-στοιχείων προσαρμόστηκε διαδοχικά στην τροποποιημένη γεωμετρία καναλιών για κάθε βήμα επανάληψης.

Αρχικά τέθηκε ως κριτήριο βελτιστοποίησης η ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής του ρευστού στη μήτρα εξώθησης. Η βελτιστοποιημένη μήτρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10, παρουσιάζει μια γεωμετρική στένωση, η οποία, όπως είναι λογικό, επιταχύνει το πολυμερικό ρευστό κατά μήκος του καναλιού ροής και ο μέσος χρόνος παραμονής μειώνεται. Συνακολούθως, η πτώση της πίεσης στη μήτρα εκβολής αυξάνεται. Στη συνέχεια τέθηκε ως κριτήριο βελτιστοποίησης η ελαχιστοποίηση της πίεσης στη μήτρα εξώθησης.



Σχήμα 1.10: Βελτιστοποίηση ενός Καναλιού Συγκλίνουσας Γεωμετρίας

Η βελτιστοποιημένη μήτρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11, παρουσιάζει μια γεωμετρική διόγκωση, δημιουργώντας στάσιμη περιοχή, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διατμητικής τάσης στα τοιχώματα και της πίεσης.



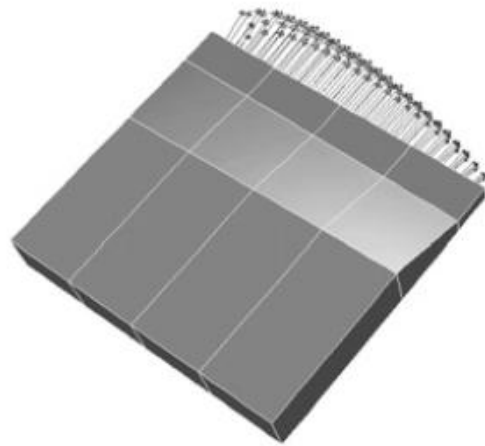
Σχήμα 1.11: Διατμητικές τάσεις στα τοιχώματα πριν και μετά την βελτιστοποίηση

Εντούτοις η βελτιστοποίηση με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της πίεσης δεν μπορεί να γίνει δεκτή από τον σχεδιαστή-μηχανικό, καθώς οι στάσιμες περιοχές οδηγούν στην υποβάθμιση του τήγματος ως αποτέλεσμα του υπερβολικού χρόνου παραμονής στην μήτρα. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με το συνδυασμό αρκετών κριτηρίων βελτιστοποίησης. Σε αυτό το παράδειγμα, θα μπορούσαν ακόμη να ληφθούν υπόψη οι χρόνοι παραμονής ή οι διατμητικές τάσεις στα τοιχώματα προκειμένου να αποτραπεί ο σχηματισμός μιας στάσιμης περιοχής.

1.4.2 Βελτιστοποίηση προφίλ μητρών

Στο Σχήμα 1.12, παρουσιάζεται η αρχική γεωμετρία και η κατανομή της ταχύτητας του πολυμερικού ρευστού, που υπολογίστηκε με την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Αρχικά σχεδιάζεται ορθογώνια γεωμετρία εισόδου και μια σφηνοειδούς σχήματος παράλληλη ζώνη της μήτρας .

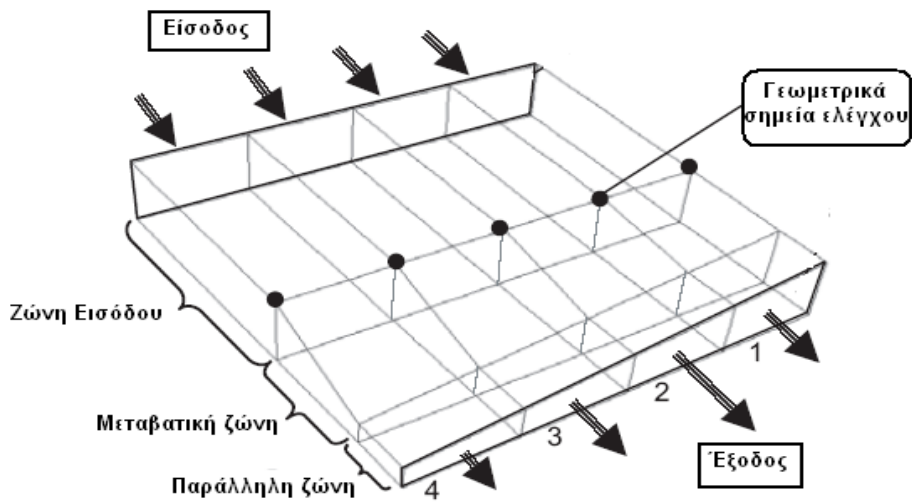
Η μέθοδος προσομοίωσης που επιλέχθηκε για τη βελτιστοποίηση της κατανομής της ταχύτητας στην έξοδο της μήτρας, βασίζεται σε μια υπολογιστική τεχνική που συνδυάζει τη θεωρία δικτύων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) [12,48,49,54-60]. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει τη γρήγορη προσομοίωση της κατανομής των ταχυτήτων μέσα στη μήτρα, και τις μεταβολές της ταχύτητας του τήγματος, που προκύπτουν από τις γεωμετρικές αλλαγές του καναλιού ροής.



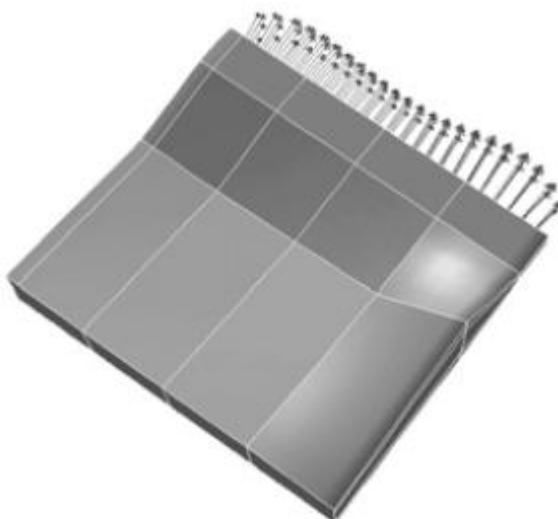
Αρχική Γεωμετρία

Σχήμα 1.12: Κατανομή της ταχύτητας πριν την βελτιστοποίηση

Σε αυτό το παράδειγμα, επιλέχθηκε ως μέθοδος βελτιστοποίησης μια απλή εξελικτική στρατηγική, η οποία παράγαγε πέντε νέα σύνολα παραμέτρων (απόγονοι) από κάθε αρχικό σύνολο παραμέτρων (γονέας). Το καλύτερο σύνολο παραμέτρων επιλέχθηκε από τους απογόνους και χρησιμοποιήθηκε για την επόμενη παραγωγή παραμέτρων [59].



Σχήμα 1.13: Δοκιμαστική Γεωμετρία

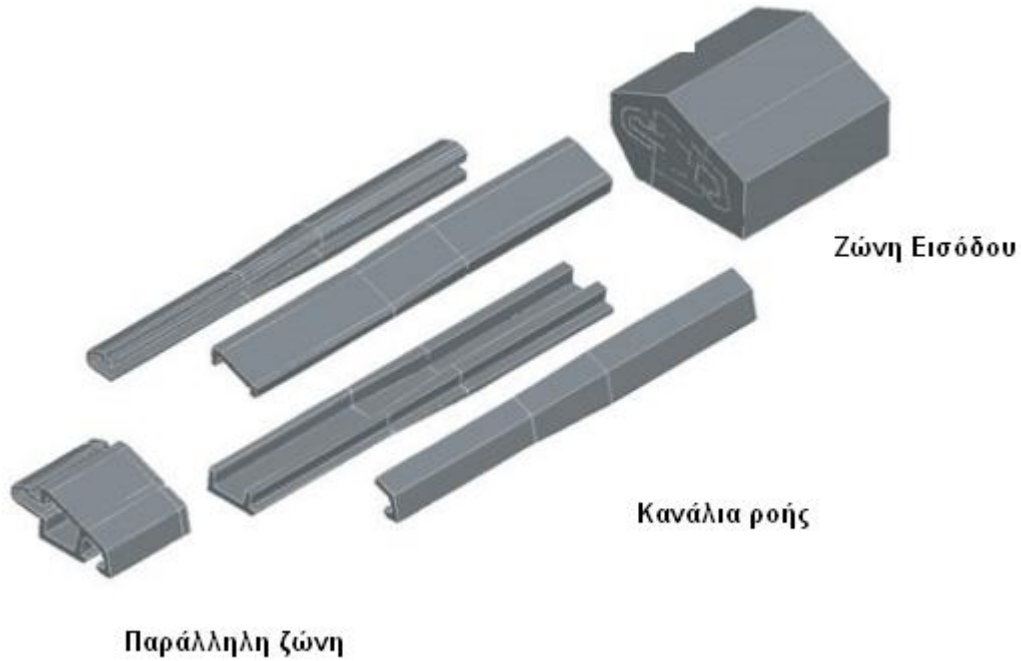


Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία

Σχήμα 1.14: Κατανομή της ταχύτητας μετά την βελτιστοποίηση

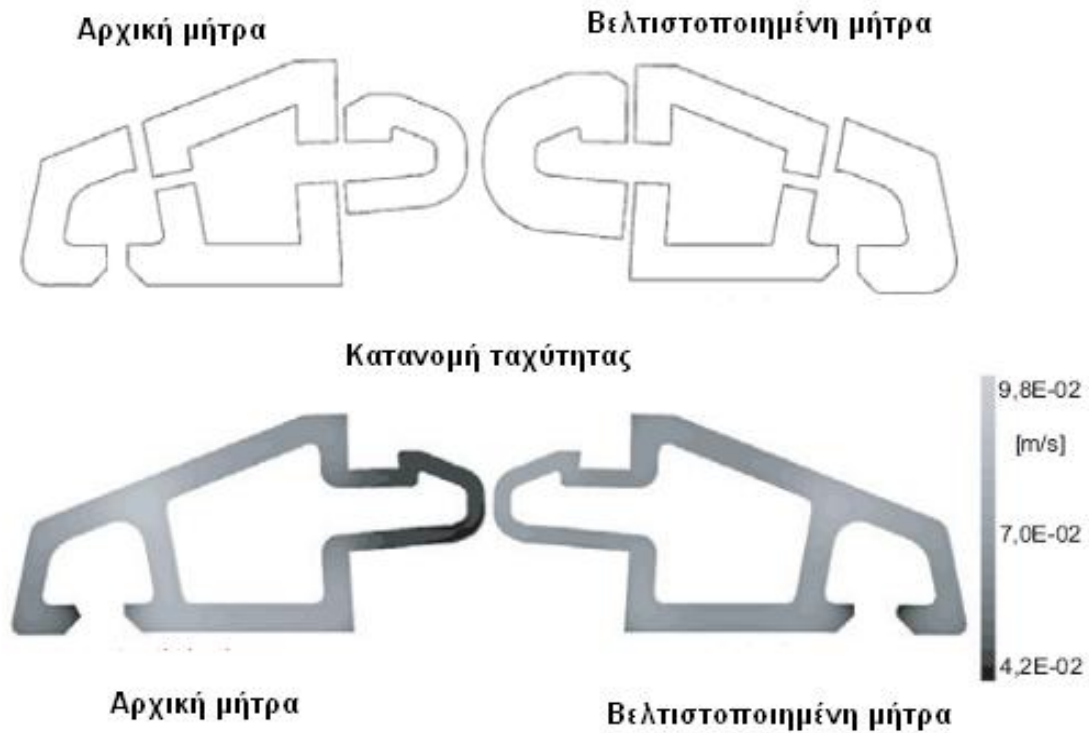
Η κατανομή της ταχύτητας που προκύπτει από την βελτιστοποίηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.14. Φαίνεται σαφώς ότι η αλλαγή στη γεωμετρία βελτίωσε την κατανομή της ταχύτητας του πολυμερικού τήγματος στην έξοδο της μήτρας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η περαιτέρω βελτιστοποίηση της μέσης ταχύτητας του πολυμερικού ρευστού κατά την εξοδό του πραγματοποιήθηκε με τη διαίρεση του καναλιού ροής σε περισσότερα μικρότερα τμήματα.

Ο Szarvasy πραγματοποίησε αυτόματη βελτιστοποίηση μιας σύνθετης μήτρας για την παραγωγή πλαστικών διατομών [6]. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε ως μέθοδος προσομοίωσης, με στόχο να υπολογιστούν οι κατανομές της ταχύτητας και της πίεσης κατά μήκος της μήτρας εκβολής (Σχήμα 1.15). Η βελτιστοποίηση προχώρησε σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, καθορίστηκαν οι μεμονωμένες ογκομετρικές ροές που είναι απαραίτητες για την παροχή ομοιόμορφης κατανομής στα κανάλια ροής της μήτρας. Στο δεύτερο βήμα, βελτιστοποιήθηκε η γεωμετρία κάθε μεμονωμένου τμήματος καναλιού για να επιτευχθεί μια ιδανική πτώση πίεσης σε κάθε μεμονωμένο τμήμα καναλιού της μήτρας. Το σχήμα των καναλιών καθώς και η προσομοίωση της κατανομής της ταχύτητας στην έξοδο της μήτρας πριν και μετά την βελτιστοποίηση παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.16. Τα πλεονεκτήματα που αποφέρει μια τέτοια αυτόματη βελτιστοποίηση στην πρακτική εφαρμογή της κατασκευής μητρών, γίνονται εμφανή, όταν το επιθυμητό εξωθημένο προφίλ συγκρίνεται με εκείνα που λαμβάνονται από διάφορες αρχικές μήτρες εξώθησης. Στο Σχήμα 1.17 παρουσιάζονται τμήματα των επιθυμητών προφίλ, μαζί με τις βελτιστοποιημένες και μη, εξωθούμενες διατομές. Φαίνεται καθαρά ότι με την βελτιστοποίηση η κατανομή του πάχους των τοιχωμάτων βελτιώθηκε σημαντικά σε σχέση με την αρχική μήτρα εξώθησης..



Σχήμα 1.15: Γεωμετρία του καναλιού ροής

Ο Reddy [60] βελτιστοποίησε μια απλή μήτρα, η οποία διαιρέθηκε σε δύο τμήματα, τα οποία είχαν τα ίδιο πλάτος αλλά διαφορετικό ύψος. Τα μήκη των παραλλήλων ζωνών των τμημάτων της μήτρας εξόδου σχεδιάστηκαν και βελτιστοποιήθηκαν αυτόματα, ώστε να επιτευχθεί μια ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας κατά το πλάτος εξόδου της μήτρας.



Σχήμα 1. 16: Αποτελέσματα της βελτιστοποίησης

Ο Νόβrega [61] βελτιστοποίησε μια μήτρα που τα τμήματα εξόδου της, έχουν διαφορετικά πλάτη. Η συγκεκριμένη μήτρα χρησιμοποιείται για την παραγωγή σύνθετων προφίλ. Η μέθοδος προσομοίωσης, που επιλέχθηκε για τη βελτιστοποίηση της κατανομής της ταχύτητας στην έξοδο της μήτρας, βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Ο Νόβrega χρησιμοποίησε την πολυκριτηριακή μέθοδο βελτιστοποίησης και ειδικότερα τη μέθοδο του προγραμματισμού στόχων (goal programming). Σε αυτή τη μελέτη επιλέχθηκε η μέθοδος Simplex ως στρατηγική αναζήτησης του βέλτιστου σημείου.



Σχήμα 1.17: Γεωμετρία των εξωθημένων προφίλ

Ελπιδοφόρα βήματα έχουν γίνει για την αυτόματη βελτιστοποίηση τέτοιων μητρών με τη βοήθεια προγραμμάτων προσομοίωσης της ροής σε συνδυασμό με τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης [60-65]. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή των παραμέτρων και του βαθμού στον οποίο θα τροποποιηθούν, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητοί στόχοι της βελτιστοποίησης, βασίζονται στην ικανότητα του σχεδιαστή

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Plajer, O., *Angewandte Rheologie, Plastverarbeiter* **29**, 4-10, (1978).
- 2) Booy, M.L. *Polymer Eng. and Science* **22**, 432-437, (1982).
- 3) Cohen, A.; Isayen, A.I.: *The Concept of Inverse Formulation and its Application to Die Flow Simulation*, In: *Modeling of Polymer Processing (Recent Developments)*, Hanser Verlag, München, (1991).
- 4) Haberstroh, E.; Hoffmann K.; Kropp, D., *Kautschuk Gummi Kunststoffe* **50**, 304-311, (1997).
- 5) Szarvasy, I.; Sienz, J.; Pittman, J., Hinton, E., *International Polymer Processing* **1**, 15, (2000).
- 6) Szarvasy, I.: *PVC Extrusion die design: Parallel finite element based optimisation of an upstand bead profile die*. In: *3rd ESAFORM Conference on Material Forming*, (2000).
- 7) Krishnaiah, A., Kumaran, K., Chakkingal, U. *Materials Science Forum*, 1574-1577, (2010).
- 8) Mu, Y., Zhao, G., Qin, S., Chen, A. *Polymers for Advanced Technologies* **18**, 1004-1014, (2007).
- 9) Yue, M., Guoqun, Z. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings* **5**, 2581-2585, (2007).
- 10) Donati, L., *Light Metal Age* **64**, 28-33, (2006).
- 11) Lebaal, N., Schmidt, F., Puissant, S. *Finite Elements in Analysis and Design* **45**, 333-340, (2009).
- 12) Sun, Y., Gupta, M. *International Polymer Processing* **20**, 380-387, (2005).
- 13) Chandra, A., Saigal, S. *International Journal of Non-Linear Mechanics* **26**, 1-13, (1991).
- 14) Jendo, S.; Marks, W.; Thierauf, G., *Large Scale Syst.* **9**, 141-150, (1985).
- 15) Chen, W.; Sahai, A.; Messac, A.; Sundararaj, G. *J. Mech. Des.* **122**, 155-163, (2000).
- 16) Tseng, C.H.; Lu, T.W., *Int. J. Numer. Methods Eng.* **30**, 1213-1228, (1990).
- 17) Mordecai Av. *Nonlinear Programming: Analysis and Methods*. Dover Publishing, (2003).
- 18) Psarras, J.; Capros, P.; Samouilidis, J.-E., *Energy* **15**, 583-605, (1990).
- 19) Chen, W.; Wiecek, M.M.; Zhang, J., *J. Mech. Des.* **121**, 179-187, (1999).
- 20) Hwang, C.-L.; Lai, Y.-J.; Liu, T.-Y., *Comput. Oper. Res.* **20**, 889-899, (1993).
- 21) Jorge Nocedal and Stephen J. Wright, *Numerical Optimization*, Springer, (2006).
- 22) Arora, J.S.; Elwakeil, O.A.; Chahande, A.I.; Hsieh, C.C. *Struct. Optim.* **9**, 137-159, (1995).
- 23) Dauer, J.P.; Krueger, R.J., *Appl. Math. Model.* **4**, 171-175, (1980).
- 24) Cohon, J.L. *Multiobjective Programming and Planning*, New York, Academic Press, (1978).
- 25) Goicoechea, A.; Hansen, D.R.; Duckstein, L. *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*, New York, John Wiley and Son, (1982).
- 26) Haug, E.J.; Arora, J.S., *Applied Optimal Design: Mechanical and Structural Systems*. New York: Wiley and Sons, (1979).
- 27) Bendsoe, M.P.; Olhoff, N.; Taylor, J.E. *A variational formulation for multicriteria structural optimization*. *J. Struct. Mech.* **11**, 523-544, (1984).
- 28) Bronstein, I.N.; Semendjaev, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*, Harry Deutsch Verlag, Frankfurt a.M., (1993).
- 29) Schwefel, H.P.: *Evolution and optimum seeking*, John Wiley & Sons, USA, (1995).
- 30) Schwefel, H.P.: *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie*, Band 26 der Reihe *Interdisciplinary systems research*. Birkhäuser Verlag, Basel, (1977).

- 31) Yao, Xin, Chinese Journal of Advanced Software Research **3**, 1, (1996).
- 32) Rosenbrock. H.H., Computer Journal **3**, 212-229, (1960).
- 33) Hooke, R.; Jeeves, TA., Journal of the Association for Computing Machinery **8**, 212-229, (1961).
- 34) Audet C. and Dennis Jr., SIAM J. Opt.**13**, 889-903, (2003).
- 35) Clarke F. H., Optimization and Nonsmooth Analysis, SIAM classics in Applied Mathematics, (1990).
- 36) Colson B., and Toint Ph. L., Optimization Methods and Software **20**, 493-508, (2005).
- 37) Coope I.D. and Price C. J., SIAM J. Opt. **11**, 859-869, (2001).
- 38) Griewank A. and Ph. L. Toint, On the unconstrained optimization of partially separable functions, Academic Press, London, (1981).
- 39) Huyer W. and Neumaier A., J.Global Opt. **14**, 331-355, (1999).
- 40) Jones D., Perttunen C. D., and Stuckman B. E, J. Opt. Theory Applic. **79**, 157-181, (1993).
- 41) Box, M.J.; Davies, D.; Swann W.H.: Non-linear optimization, Oliver Boyd, Edinburgh, Scotland, (1969).
- 42) Box, M.J. The Computer Journal **8**, 42-52, (1965).
- 43) Swann H., Report on the development of a new direct search method of optimization, Tech. Rep.15, Research Note 64/3, I.C.I. Central Instrument Lab, (1964).
- 44) Murray P. E. Gill,W., and Wright M. H., Practical Optimization, Academic Press, London, (1981).
- 45) Nelder, J.A.; Mead, R., The Computer Journal **7**,308-313, (1965).
- 46) Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Frommann-Holzboog, Stuttgart. 1973
- 47) Powell, Michael J. D.,Mathematical Programming **4**, 193-201, (1973).
- 48) Barhen J, Protopopescu V, Reister, Science **276**, 1094–7, (1997).
- 49) Gong, Z.Mathematics and Computers in Simulation **80**, pp. 1903-1910, (2010).
- 50) McKinnon K. I. M., SIAM J. Optim. **9**, 148-158, (1998).
- 51) Holland, J.H., Adaptation in natural and artificial systems, The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, (1975).
- 52) Goldberg, D.E., Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison Wesley. Reading, MA. (1989).
- 53) Bäck, T.; Schwefel, H.Pm, Evolutionary Computation **1**, 1-23, (1993).
- 54) Shen, C., Wang, L., Cao, W., Wu, J.Polymer-Plastics Technology and Engineering **46**,105-112,2007
- 55) Sung-Hyuk; Tappert, Charles C., Journal of Pattern Recognition Research **4**,1–13. (2009).
- 56) Ross T., Fuzzy Logic with Engineering Applications, McGraw-Hill, Inc., USA, (1995).
- 57) Michaeli, W.; Kaul, S.; Wolff, T., Journal of Polymer Processing **21**, 225-237, (2001).
- 58) Huneault M.A.; Lafleur, P.G.; Carreau, P.J.,Intern. Polymer Processing **11**, (1996).
- 59) Michaeli, W.; Kaul, S., Computer-aided optimization of extrusion dies, ANTEC, SPE Annual Technical Conference, San Francisco, USA, (2002).
- 60) Reddy, M.P.; Schaub, E.G.; Reischneider, L.G.; Thomas, H.L., Design and optimization of three dimensional extrusion dies using adaptive finite element method, ANTEC, SPE Annual Technical Conference, New York, USA, (1999).
- 61) Nóbrega, J.M.; Carneiro, O.S.; Pinho, F.T.: Oliveira. P.J., Flow Balancing of Profile Extrusion Dies, ANTEC, SPE Annual Technical Conference, Dallas, USA, (2001).

- 62) Marchal, J.M.; Goublomme, A., Parametric optimization of extrusion dies through numerical simulation, 3rd ESAFORM Conference on Material Forming, (2000).
- 63) Sienz, J.; Marchal. J.; Pittman, J., Profile Extrusion die design using optimisation techniques and an expert system, 3rd ESAFORM Conference on Material Forming, (2000).
- 64) Chmiel, H.; Schümmer, P, Chem. Eng. Sci. **43**, S. 1257-12. (1971).
- 65) Czyborra, L., Offene Fragen bei der rechnerischen Auslegung von Werkzeugen für die Profilextrusion, Promotionsvortrag, IKV, Aachen, (1992).

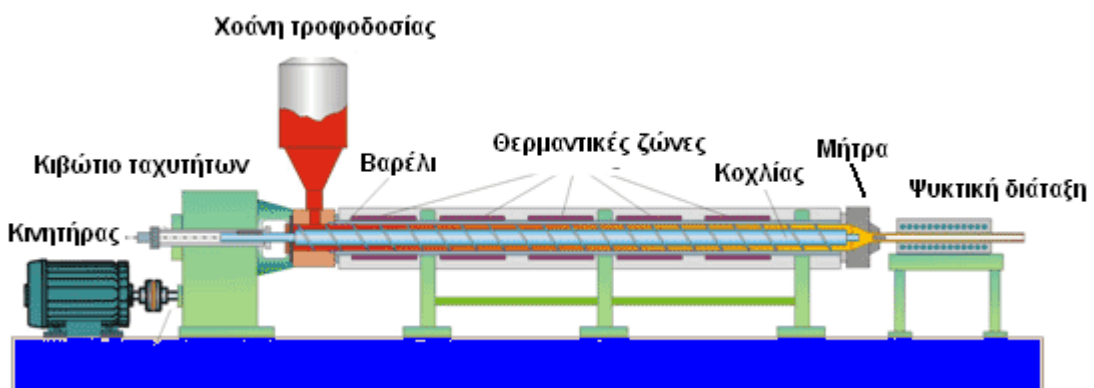
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΟΜΕΛΕΤΗ ΜΗΤΡΑΣ

2.1. ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ

Η εκβολή αποτελεί μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές τόσο για τη μορφοποίηση όσο και για την ανάμιξη πολυμερών. Περίπου το 60% των πλαστικών παγκοσμίως μορφοποιούνται με τη μέθοδο αυτή. Στα προϊόντα που μορφοποιούνται με εκβολή ανήκουν 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. Διακρίνονται συστήματα εκβολής **ενός κοχλίου** και **δύο κοχλίων** [1]. 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) αποτελούν πιο πρόσφατη εξέλιξη. Η λειτουργία των περισσότερων εκβολέων γίνεται με την κάθοδο των πολυμερών υπό μορφή κόκκων, σκόνης ή φοιδών μέσω της χοάνης τροφοδοσίας στο άνοιγμα μεταξύ του περιστρεφόμενου κοχλίου (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 πριν εξέλθει και στερεοποιηθεί με ψύξη στην ατμόσφαιρα [2].

Ο κοχλίας περιστρέφεται από το σύστημα μετάδοσης κίνησης που αποτελείται από ένα κινητήρα (motor) και ένα κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox) για τον έλεγχο των στροφών του κοχλίου. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης εξασφαλίζει τις απαιτήσεις της διάταξης σε μηχανική ενέργεια.

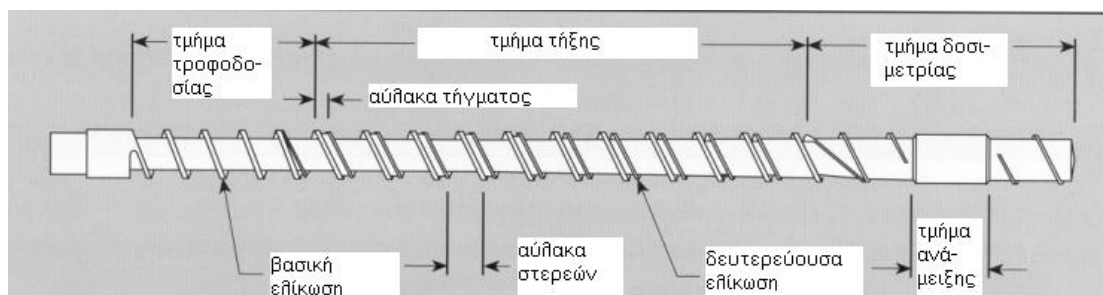


Σχήμα 2.1: Εκβολέας-Μονοκόχλιος

Ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και η εσωτερική επιφάνεια είναι ειδικά κατεργασμένη, ώστε να έχει επαρκή αντίσταση στη φθορά 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, εξωθείται από τη μήτρα (die), έχοντας πάρει την επιθυμητή μορφή.

Στο δοσιμετρικό κοχλία ενός εκβολέα διακρίνονται τρία τμήματα: το τμήμα τροφοδοσίας (**feed section**), το τμήμα συμπίεσης ή τήξης (**compression section**) και το τμήμα δοσιμετρίας (**metering section**).



Σχήμα 2.2: 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. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο υλικό, ώστε να μην υπερθερμανθεί πολύ γρήγορα, γιατί στην περίπτωση αυτή η ρητίνη θα κολλήσει στον κοχλία και δε θα μεταφέρεται στο επόμενο τμήμα του εκβολέα. Το τμήμα αυτό σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να έχει τη μεγαλύτερη δυνατότητα μεταφοράς στα επόμενα τμήματα του κοχλία.

➤ 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 αύλακας. Το μικρό βάθος αύλακας επιφέρει την ανάπτυξη υψηλών διατμητικών τάσεων στην ρητίνη, με αποτέλεσμα την ολοκλήρωση της τήξης του πολυμερούς. Η ανάπτυξη υψηλών διατμητικών τάσεων στο τμήμα αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη πίεσης στο πολυμερικό τήγμα,

ούτως ώστε να εξωθηθεί προς την έξοδο του εκβολέα. Το τήγμα ομογενοποιείται και αποκτά ομοιόμορφη σύσταση, θερμοκρασία, και πίεση, και οδηγείται με σταθερή παροχή στη μήτρα εκβολής. Η συμπίεση του πολυμερούς οφείλεται στην προοδευτική μείωση του βάθους αύλακας του κοχλία κατά μήκος του εκβολέα. Μια σημαντική παράμετρος του συστήματος εκβολής είναι ο **λόγος συμπίεσης** (compression ratio) που ορίζεται ως ο λόγος του βάθους της αύλακας στο τμήμα τροφοδοσίας προς το βάθος της αύλακας στο τμήμα δοσιμετρίας [1].

Αρχικά σχεδιάζεται μήτρα εκβολής για παραγωγή πλαστικού σωλήνα από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), η οποία αποτελεί το αρχικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την περαιτέρω βελτιστοποίηση της μήτρας εκβολής του πλαστικού σωλήνα.

Οι σωλήνες αυτοί τυποποιούνται με βάση την ονομαστική (εξωτερική) τους διάμετρο και την ονομαστική τους πίεση [1-3]. Στον πίνακα 2.1 φαίνονται οι τυποποιημένες διαστάσεις αυτών των σωλήνων κατά ISO-4984.

Ονομαστική διάμετρος D_{nom} (mm)	Πάχος τοιχωμάτων (mm)											
	2,5kb/cm ²		4,05kb/cm ²		6,0 kb/cm ²		10,0 kb/cm ²		12,5 kb/cm ²		16 kb/cm ²	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
016	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2	2,6	2,7	3,2
020	-	-	-	-	-	-	2,3	2,8	2,7	3,2	3,3	3,9
025	-	-	-	-	2,0	2,4	2,8	3,3	3,4	4,0	4,2	4,8
032	-	-	-	-	2,3	2,7	3,6	4,2	4,4	5,0	5,4	6,1
040	-	-	2,0	2,4	2,8	2,3	4,5	5,1	5,5	6,2	6,7	7,6

Πίνακας 2.1: Τυποποιημένες διαστάσεις σωλήνων από πολυαιθυλένιο

Ο σωλήνας που θα παραχθεί για ονομαστική πίεση 6,0kb/cm², έχει ονομαστική διάμετρο $D_{nom}=32\text{mm}$ και πάχος τοιχωμάτων που κυμαίνεται από 2,3mm έως 2,7mm. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκε η συνήθης διάσταση σωλήνων με πάχος $S=2,4\text{mm}$.

2.1.1 Χαρακτηριστικά του υλικού του σωλήνα

Το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) που επιλέχθηκε για την παραγωγή του πλαστικού σωλήνα είναι της εταιρείας **SABIC** με κωδικό **B5823**. Στο φυλλάδιο της εταιρείας για το συγκεκριμένο υλικό (βλ. **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**) δίνονται οι φυσικές, μηχανικές και θερμικές του ιδιότητες. Επίσης δίνονται χρήσιμες πληροφορίες για την διαδικασία εκβολής του, την ποιότητα, την ασφάλεια, την αποθήκευση και την ανακύκλωσή του.

2.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού

Ο εκβολέας που χρησιμοποιήθηκε στο Εργαστήριο της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου είναι μονοκόχλιος εκβολέας της εταιρείας Johnson Plastics Machinery με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά:

Εξωτερική διάμετρος [mm] : 37.5

Βήμα [mm] : 37.5

Εσωτερική διάμετρος κυλίνδρου (σώματος) [mm] : 38

Λόγος μήκους /Εσωτερική διάμετρο κυλίνδρου (σώματος) : 24.1

(Ισχύει, όχι από τη βάση του κοχλία, αλλά από την αρχή της παριάς του 1^{ου} βήματος μέχρι την αρχή της παριάς του τελευταίου). Επειδή η εξωτερική διάμετρος του κοχλία ισούται με το βήμα του, ο κοχλίας θεωρείται τετράγωνου βήματος, οπότε η γωνία ελίκωσης προκύπτει 17,65°)

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

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

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

(Επαλήθευση : $255 + 304 + 343 \approx 24,1 * 37,5$)

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

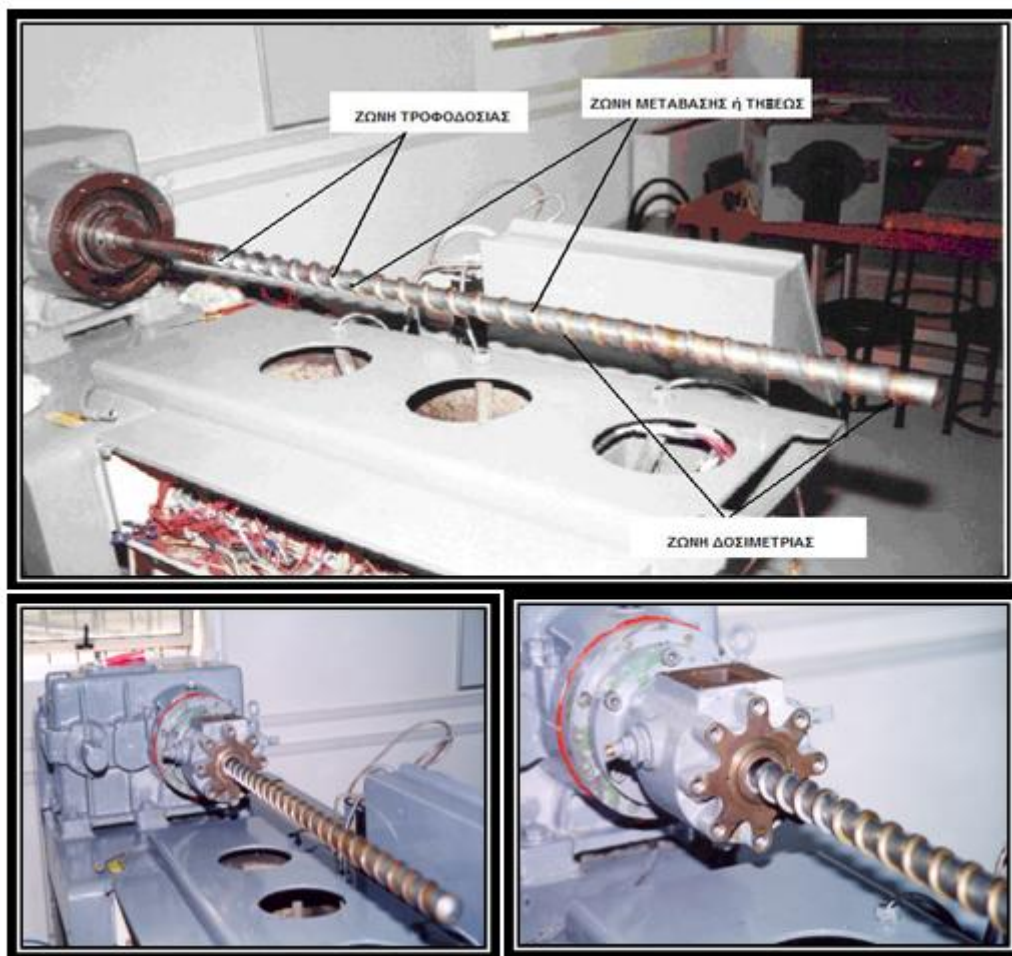
Βάθος καναλιού στη ζώνη ρύθμισης [mm] : 2,3

Λόγος συμπίεσης : $6,3/2,3 = 2,75$

Ολικό μήκος κοχλία [mm] : 1195

(συμπεριλαμβανομένης και της καμπυλότητας στο άκρο του)

Μια καλύτερη εποπτεία της μορφής του κοχλία μπορεί να αποκτήσει κανείς από τις φωτογραφίες που ακολουθούν (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Ο δοσιμετρικός κοχλίας του εκβολέα του εργαστηρίου

Μια γενική εικόνα του εκβολέα φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



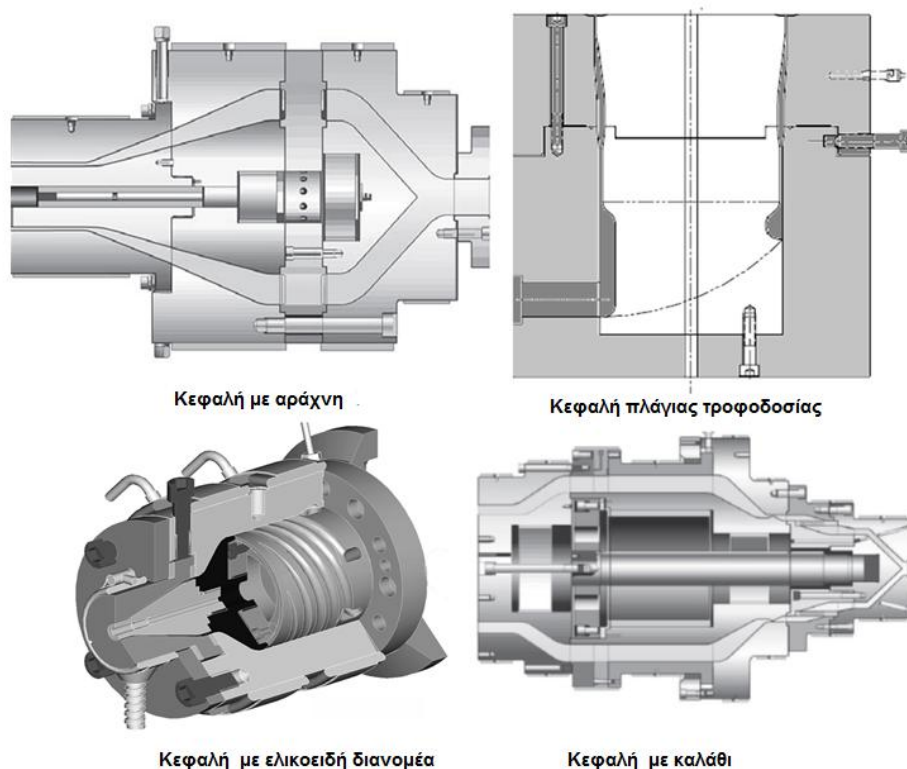
Σχήμα 2.4: Μονοκόχλιος εκβολέας της εταιρείας JohnsonPlastics

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.4 η διάταξη του εκβολέα απαρτίζεται από τον καθ' αυτό εκβολέα και τον κεντρικό πίνακα ελέγχου. Ο κεντρικός πίνακας ελέγχου φέρει τον κεντρικό διακόπτη του ρεύματος, καθώς επίσης ένα στροφόμετρο και ένα αμπερόμετρο τα οποία μετρούν αντίστοιχα, τις στροφές και το ρεύμα του ηλεκτροκινητήρα του εκβολέα.

Επίσης ο κεντρικός πίνακας ελέγχου έχει πέντε θερμόμετρα της κλίμακας Fahrenheit. Στα θερμόμετρα αυτά ρυθμίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία που πρέπει να έχουν συγκεκριμένες περιοχές του εκβολέα κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Κατά μήκος του εκβολέα υπάρχουν τέσσερις ηλεκτρικές αντιστάσεις (τρεις στο σώμα και μία στη μήτρα). Σε κάθε αντίσταση είναι ενσωματωμένο ένα θερμοστοιχείο που οδηγεί το σήμα στο αντίστοιχο θερμόμετρο του πίνακα ελέγχου. Όταν η μετρούμενη θερμοκρασία γίνει ίση με την προρρυθμισμένη επιθυμητή θερμοκρασία, τότε διακόπτεται αυτόματα η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος προς τις αντιστάσεις και, έτσι, επιτυγχάνεται ο έλεγχος της θερμοκρασίας κατά την παραγωγική διαδικασία.

2.2.1 Κεφαλές με δακτυλιοειδή διατομή μήτρας - Γενικά

Οι κεφαλές με δακτυλιοειδή διατομή μήτρας χρησιμοποιούνται για εκβολή σωλήνων, λάστιχων ποτίσματος, για μάνικες, σωληνοειδείς μεμβράνες, επενδύσεις καλωδίων και σωλήνων [2-4]. Η εκβολή σωλήνων και μη ενισχυμένων μανικών γίνεται κυρίως με ευθείες μήτρες [4,5]. Οι σωληνοειδείς μεμβράνες, οι ενισχυμένες μάνικες και οι επενδύσεις γίνονται με τον εκβολέα να σχηματίζει γωνία -συνήθως 90°- σε σχέση με την διεύθυνση εκβολής. Για να παραχθούν τα παραπάνω δακτυλιοειδή προϊόντα χρησιμοποιούνται κυρίως τα ακόλουθα είδη κεφαλών (Σχήμα 2.5): Κεφαλή με αράχνη, πλάγιας τροφοδοσίας, με ελικοειδή διανομέα και με καλάθι.



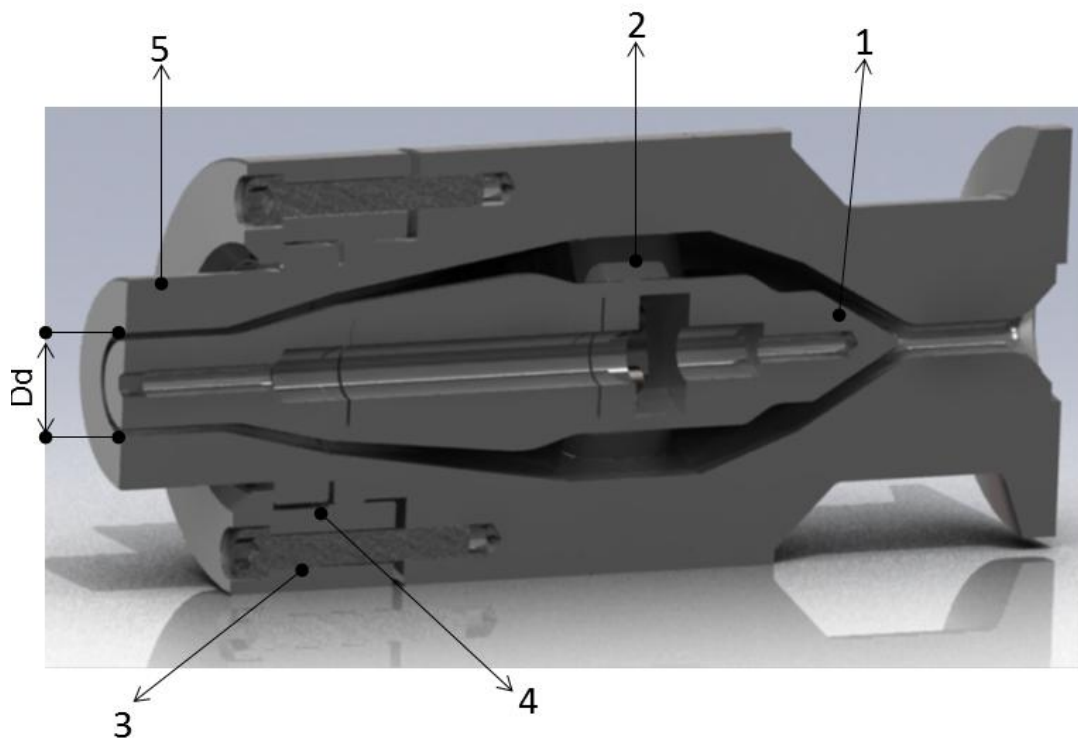
Σχήμα 2.5: Τύποι κεφαλών

Όλες αυτές οι κεφαλές έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό, μια παράλληλη ζώνη στην έξοδο της μήτρας, τον αποκαλούμενο δακτύλιο εξόδου της μήτρας ή κοινώς «σιδέρωμα». Η ζώνη αυτή της μήτρας επιτρέπει στο τήγμα να “χαλαρώσει”. [6-12].

Ένας ξεχωριστός έλεγχος της θερμοκρασίας αυτής της ζώνης εξόδου της μήτρας επιτρέπει έναν αποτελεσματικό έλεγχο της ποιότητας επιφάνειας του εκβαλλόμενου προϊόντος. Επιπλέον, η θέση του δακτυλίου εξόδου της κεφαλής μπορεί να ρυθμιστεί, π.χ. κεντράρισμα σε σχέση με τον πυρήνα (αρσενικό) της μήτρας [7].

2.2.2 Κεφαλές κεντρικής τροφοδοσίας με αράχνη

Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται μια κεφαλή κεντρικής τροφοδοσίας με αράχνη και ορισμένα μέρη της.



Σχήμα 2.6: 1) κώνος αρσενικού κεφαλής 2) πόδι αράχνης 3) κοχλίας κεντραρίσματος 4) δακτύλιος συγκράτησης μήτρας 5) ζώνη χαλάρωσης D_d : εξωτερική διάμετρος της μήτρας

Το ρεύμα του τήγματος που παρέχει ο εκβολέας σε ένα κυλινδρικό κανάλι ροής μετασχηματίζεται σε μια τέτοια κεφαλή με 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 οι κεφαλές γίνονται στενότερες κατά μια γωνία $10^\circ-15^\circ$ και στην οποία τα ξεχωριστά ρεύματα επανενώνονται [1]. Στο τέλος, βρίσκεται η μήτρα με τα παράλληλα τοιχώματα. Ο λόγος του μήκους της παράλληλης ζώνης εξόδου προς το ύψος του διακένου εξόδου για τις μήτρες σωλήνων κυμαίνεται από 10:1 έως 30:1 [13]. 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 [13-15]. Τα βασικά τμήματα της κεφαλής, όπως η στήριξη της αράχνης και ο δακτύλιος εξόδου είναι, γενικά, εναλλάξιμα, ώστε η κεφαλή να μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για διάφορες γεωμετρίες. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη ροή στη μήτρα, αυτή μπορεί να μετακινηθεί ακτινικά με τη βοήθεια κοχλίων κεντραρίσματος που είναι τοποθετημένοι περιφερειακά [15-21]. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιείται ένας δακτύλιος στήριξης της μήτρας. Από όλα τα είδη κεφαλών που προαναφέρθηκαν, οι κεφαλές με αράχνη ήταν οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες στο παρελθόν, επειδή, λόγω της κεντρικής τροφοδοσίας τους επιτρέπουν καλή διανομή του τήγματος ανεξάρτητα από τις συνθήκες λειτουργίας [21-26]. 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. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει η διαφορά πυκνότητας του πολυμερικού ρευστού λόγω διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ τήγματος και μήτρας [27-34]. Προκειμένου να μειωθούν τα σημάδια ροής, τα οποία είναι αναπόφευκτα με τη χρήση κεφαλών με αράχνη, υπάρχουν κυρίως τρεις λύσεις.

- Αύξηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου παραμονής της μάζας του υλικού στην κεφαλή.
- Ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή στη ζώνη της αράχνης
- Δημιουργία ομοιόμορφης δομής σε ολόκληρη την περιφέρεια της κεφαλής και προσανατολισμού των μορίων κατά μήκος και ανάμεσα στα πόδια 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 [1,11]. Οι κεντρικά τροφοδοτούμενες κεφαλές με αράχνη πρέπει να αντέχουν σε πιέσεις άνω των 600 bar διότι τα πολυμερικά τήγματα κάτω από κατάλληλες συνθήκες μπορούν να αναπτύξουν πιέσεις αυτής της τάξεως [13]. Γι' αυτό, τα πόδια της αράχνης πρέπει να διαστασιολογούνται, με σκοπό να αντέχουν με ασφάλεια στις δυνάμεις που προκύπτουν από τις υψηλές πιέσεις. Από πλευράς μηχανικής αντοχής, οι εξωτερικές διάμετροι των κεφαλών με αράχνη δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 700mm [13,15,17].

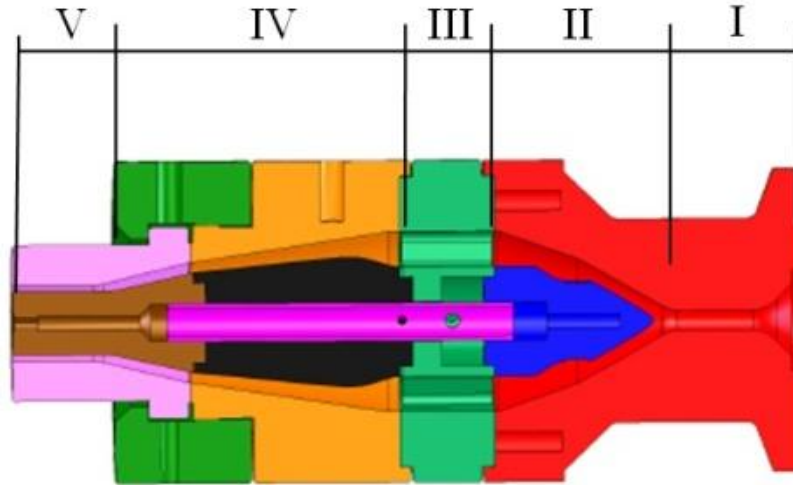
2.2.3 Σχεδιασμός κεφαλής με αράχνη

Στις κεφαλές με αράχνη υπάρχουν πέντε διαφορετικές ζώνες οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του καναλιού ροής της κεφαλής

- Η ζώνη εισόδου, στην οποία το πολυμερικό τήγμα εισέρχεται στη μήτρα από τον εκβολέα (**ζώνη I**)
- Η ζώνη εκτροπής, στην οποία το τήγμα που εξέρχεται από τον εκβολέα εκτρέπεται από τον άξονα εκβολής και διανέμεται μέσω του κώνου του πυρήνα (αρσενικού κεφαλής) σε μια δακτυλιοειδή διατομή (**ζώνη II**)
- Η ζώνη της αράχνης, στην οποία το αρσενικό της μήτρας συγκρατείται από τα πόδια της αράχνης (**ζώνη III**)
- Η ζώνη χαλάρωσης, όπου τα σημάδια ροής που δημιουργήθηκαν από τα πόδια της αράχνης μπορούν να εξαλειφθούν και η ροή γίνεται ομοιόμορφη κατά μήκος του καναλιού ροής (**ζώνη IV**)

- Η παράλληλη ζώνη της μήτρας, όπου το εκβαλλόμενο προϊόν διαμορφώνεται στις επιθυμητές διαστάσεις (**ζώνη V**)

Οι πέντε αυτές ζώνες φαίνονται σχηματικά παρακάτω (βλ. Σχήμα 2.7):



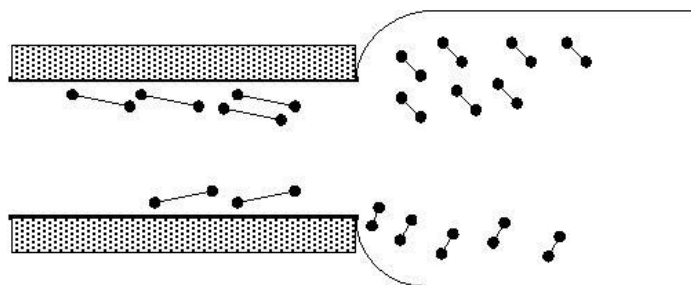
Σχήμα 2.7: Ζώνες του καναλιού ροής της κεφαλής

Η επιλογή των βασικών διαστάσεων της κεφαλής και της μήτρας εξαρτάται από το υλικό της κατεργασίας και από τις επιθυμητές διαστάσεις του τελικού προϊόντος. Ο σωλήνας που παράγεται έχει ονομαστική διάμετρο $D_{nom}=32mm$ και πάχος τοιχώματος $S_{nom}=2,4mm$. Συνιστάται η διάμετρος του σωλήνα που παράγεται σε ένα συγκεκριμένο εκβολέα να κυμαίνεται από 25-100% της διαμέτρου του κοχλία του εκβολέα [1,15].

Διαστασιολόγηση του καναλιού ροής

- **Παράλληλη ζώνη της μήτρας (σιδέρωμα)**

Το τήγμα του πολυμερούς διογκώνεται εξερχόμενο από τη μήτρα (swelling) κυρίως σε πολυμερή με μεγάλο ιξώδες (Σχήμα 2.8).



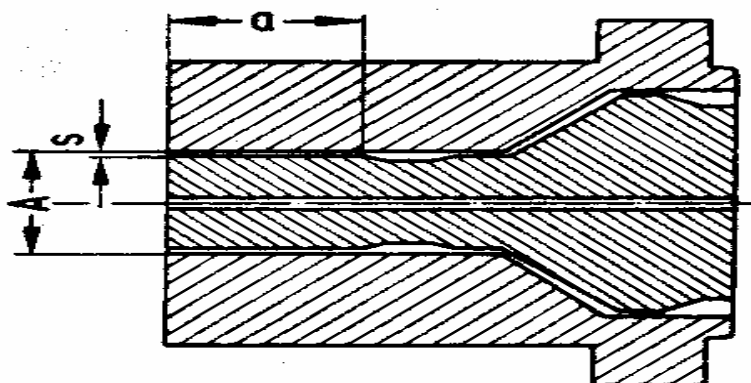
Σχήμα 2.8: Διόγκωση του πολυμερούς κατά την έξοδό του από τη μήτρα

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 [1,2]. Ωστόσο, η εξωτερική διατομή της μήτρας σχεδιάζεται μεγαλύτερη από την επιθυμητή διατομή του

σωλήνα, έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η συρρίκνωση του υλικού που λαμβάνει χώρα: α) κατά την κρυσταλλοποίησή του (3%), όπου έχουμε συστολή λόγω ψύξης και β) κατά την έκτασή του, λόγω του τραβήγματος του υλικού ανάμεσα στην μήτρα και στη μονάδα βαθμονόμησης μέχρι την στερεοποίησή του [16,18-20]. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται οι διαστάσεις της παράλληλης ζώνης της μήτρας (Σχήμα 2.9) όπως προέκυψαν από εμπειρικά δεδομένα για διαφορετικά υλικά [1].

Υλικό σωλήνα	Εξωτερική Διάμετρος Σωλήνα (mm)	A(mm)	S ποσοστό (%) του ονομαστικού πάχους του τοιχώματος	a (mm) σε πίεση 6 έως 10 bar.
PVC-U	20	20	64	30
	160	160	79	75-150 ³⁾
PE-HD	20	21	100-105	20
	160	168	100-105	40 έως 175 ³⁾
PP	20	21	100-105	20
	160	168	100-105	40 έως 175 ³⁾
PA 12 ¹⁾	8	14.2	2.0mm	25
PA 12 ²⁾	20	28.3	3.3mm	25 έως 30 ³⁾
PA 12 ³⁾	22	30	3.3mm	35 έως 50 ³⁾

Πίνακας 2.2: Τιμές των βασικών διαστάσεων της μήτρας



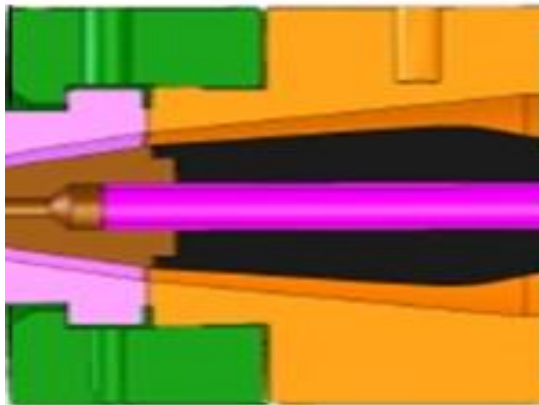
Σχήμα 2.9: Βασικές διαστάσεις μήτρας

Η εξωτερική διάμετρος της μήτρας λαμβάνεται ίση με $D_d=1,05 \cdot D_{nom}$ [1]. Για μικρούς σωλήνες με λεπτά τοιχώματα ο συντελεστής αυτός γίνεται μεγαλύτερος. Στην πράξη οι μήτρες για παραγωγή σωλήνα $\varnothing 32$ έχουν εξωτερική διάμετρο $D_d=38,5\text{mm}$ (ο συντελεστής παίρνει την τιμή 1,2). Για τους ίδιους λόγους, το διάκενο εξόδου της μήτρας S λαμβάνεται για το HDPE ίσο με $1,0-1,05 \cdot S_{nom}$ (Πίνακας 2.2). Στην πράξη οι μήτρες για παραγωγή σωλήνα

Ø32 με πάχος τοιχωμάτων 2,4mm έχουν διάκενο εξόδου **S=3mm**. Σύμφωνα με έναν εμπειρικό κανόνα, το μήκος a της παράλληλης ζώνης της μήτρας (σιδέρωμα) κυμαίνεται από 10-30 φορές το ύψος του διακένου εξόδου S [13]. Για το πολυαιθυλένιο (PE) λαμβάνεται $a=(8-15) \cdot S$. Το μήκος αυτό γίνεται μικρότερο όσο αυξάνεται η διάμετρος του σωλήνα και μεγαλώνει το πάχος των τοιχωμάτων [1]. Λαμβάνεται για τη συγκεκριμένη μήτρα $a=15 \cdot S \Rightarrow a=15 \cdot 3 \Rightarrow a=45\text{mm}$. Η τιμή αυτή βρίσκεται μέσα στα όρια του Πίνακα 2.2. Τα κατασκευαστικά σχέδια της μήτρας φαίνονται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β (Σχέδιο 8)**.

➤ **Ζώνη χαλάρωσης**

Η ζώνη αυτή ξεκινά αμέσως μετά την αράχνη και καταλήγει στην παράλληλη περιοχή της μήτρας. Η περιοχή αυτή πρέπει να είναι συγκλίνουσα (Σχήμα 2.10). Έτσι, η υποδοχή της αρσενικής μήτρας σχεδιάζεται με κλίση 6° , το σώμα της κεφαλής με άνοιγμα 18° , το αρσενικό της μήτρας με κλίση 13° και το θηλυκό 14° , ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή ροή του τήγματος [1,15,21]. Στην πράξη, η κλίση αυτή μπορεί να φτάσει μέχρι 30° στην περιοχή της μήτρας. Τα κατασκευαστικά σχέδια του σώματος της κεφαλής και της υποδοχής της αρσενικής μήτρας φαίνονται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β (Σχέδιο 2 και Σχέδιο 5)**.

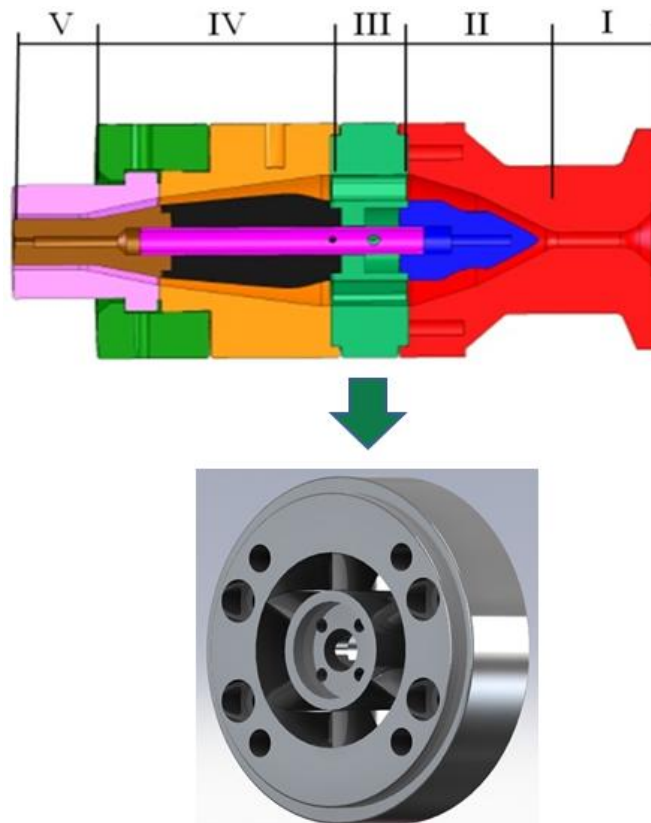


Σχήμα 2.10: Ζώνη χαλάρωσης

➤ **Η ζώνη της αράχνης**

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, κατά αυτόν τον τρόπο, προκύπτει η συγκλίνουσα περιοχή. Επιπλέον, με την ίδια κεφαλή μπορούν να παραχθούν σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων αλλάζοντας μόνο τη διάμετρο της μήτρας. Ο λόγος D_m/D_d της μέσης 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 και στην περίπτωση σωλήνων PE με μεγάλες διαμέτρους μπορεί να φτάσει την τιμή 1,3 [1]. Αν ο λόγος αυτός γίνει πολύ μικρός, υπάρχει ο κίνδυνος το τήγμα που μόλις έχει περάσει την αράχνη να μην επανενωθεί και να δημιουργηθούν γραμμές συγκόλλησης.

Στο σχέδιο της αράχνης η επιλογή $D_m=72,5\text{mm}$ όπως προκύπτει από τον καθορισμό και των υπόλοιπων διαστάσεων δίνει έναν λόγο $D_m/D_d=1,88$ που ικανοποιεί την παραπάνω απαίτηση. Η επιλογή της διαμέτρου D_m είναι τέτοια ώστε να υπάρχει η δυνατότητα με την υπάρχουσα κεφαλή να παραχθούν σωλήνες μεγαλύτερης διαμέτρου (ως και $D_{nom}=60\text{mm}$), με αντικατάσταση μόνο εκείνων των τμημάτων της κεφαλής που βρίσκονται μετά την αράχνη. Ο καθορισμός των διαμέτρων D_m και D_d καθώς και των κλίσεων της περιοχής χαλάρωσης καθορίζουν αυτόματα και το μήκος της περιοχής αυτής, μια εκτίμηση του οποίου είναι: $L=2,5 \cdot D_m=2,5 \cdot 72,5=181,25\text{mm}$ [2,21]. Στο σχέδιο της κεφαλής το μήκος της περιοχής αυτής προκύπτει $L=140\text{mm}$. Ο σκοπός στον σχεδιασμό αυτής της ζώνης είναι να σχεδιαστούν τα πόδια της αράχνης με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν στις δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω των πιέσεων και των διατμητικών τάσεων. Γι' αυτό οι ρεολογικοί και μηχανικοί παράγοντες είναι ιδιαίτερα σημαντικοί σε αυτή τη ζώνη. Τα πόδια της αράχνης πρέπει να κυμαίνονται σε μήκος από 30-80mm και σε πάχος από 9-12mm [1]. Τα πόδια εδώ σχεδιάζονται με μήκος 43mm και πάχος 12mm. Μια άλλη σύσταση βασισμένη σε μελέτες αντοχής καθορίζει το μήκος των ποδιών ίσο με $0,5-0,7 \cdot D_m$ [1,3]. Τα πόδια της αράχνης καταλήγουν και στις δυο άκρες τους σε οξεία γωνία περίπου 8° [8]. Το ύψος των διακένων της αράχνης είναι στην πράξη 10-25mm [13]. Επιλέγεται μία μέση τιμή 17,5mm. Οι γωνίες στη βάση των ποδιών της αράχνης σχεδιάζονται ώστε να μην εμφανίζονται στάσιμες περιοχές κατά τη ροή του τήγματος στη μήτρα εκβολής. Το κατασκευαστικό σχέδιο της αράχνης φαίνεται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β (Σχέδιο 3)**.

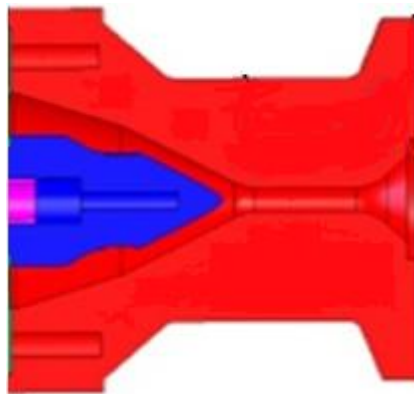


Σχήμα 2.11: Ζώνη της αράχνης

➤ **Ζώνη διανομής του τήγματος**

Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει τον λαιμό της κεφαλής και τον κώνο του αρσενικού της κεφαλής (Σχήμα 2.12). Ο κώνος του αρσενικού της κεφαλής έχει γωνία κορυφής 60° που στην πράξη εξασφαλίζει ομαλή διανομή του τήγματος στη δακτυλιοειδή ζώνη [8]. Το μήκος του κώνου είναι 79mm. Η περιφέρεια του κώνου έχει οκταγωνική διαμόρφωση για να συσφίγγεται στην αράχνη (βλ. **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, Σχέδιο4**)

Πριν από τον κώνο το τήγμα διέρχεται από μια ευθύγραμμη περιοχή κυκλικής διατομής στον λαιμό της κεφαλής στο οποίο προσδίδεται θερμότητα, και οδηγείται ομαλά στον κώνο. Τέλος, στην άλλη άκρη της κεφαλής υπάρχει ένα κωνικό τμήμα που αποτελεί την είσοδο της κεφαλής. Το τμήμα αυτό έχει σχεδιαστεί ίδιο με της προϋπάρχουσας κεφαλής αφενός για να προσαρμόζεται η κεφαλή στη έξοδο του εκβολέα και αφετέρου για να εξασφαλίζεται η ομαλή είσοδος του τήγματος στην κεφαλή (βλ. **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, Σχέδιο1**).



Σχήμα 2.12: Ζώνη διανομής του τήγματος

Το αρσενικό της μήτρας, η υποδοχή του αρσενικού της μήτρας, η αράχνη και ο κώνος αρσενικού κεφαλής ενώνονται μεταξύ τους με ένα σωληνάκι που φέρει σπείρωμα στα άκρα του και το κατασκευαστικό σχέδιο του οποίου φαίνεται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, Σχέδιο 6**. Το αρσενικό της μήτρας, η υποδοχή του αρσενικού της μήτρας, η αράχνη και ο κώνος αρσενικού κεφαλής ενώνονται μεταξύ τους με ένα σωληνάκι που φέρει σπείρωμα στα άκρα του και το κατασκευαστικό σχέδιο του οποίου φαίνεται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, Σχέδιο 6**.

Κριτήρια σωστού σχεδιασμού

Στο σημείο αυτό έχουν καθοριστεί οι βασικές διαστάσεις του συνολικού καναλιού ροής μέσα στην κεφαλή οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν και πιθανόν να επαναπροσδιορισθούν 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. Πρέπει να αποφεύγονται οι απότομες αλλαγές της διαμέτρου του καναλιού ροής γιατί διαφορετικά δημιουργείται στροβιλισμός της ροής [1,13,15,19].

2.2.4 Θέρμανση της κεφαλής

Οι κεφαλές για την εκβολή θερμοπλαστικών υλικών συνήθως θερμαίνονται με ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι οποίες μπορεί να έχουν μόνωση από μαρμαρυγία ή κεραμικό υλικό με τη μορφή θερμαντικών ταινιών ή κυλινδρικού κελύφους. Μια βασική προϋπόθεση για ομογενή θέρμανση της κεφαλής, εκτός από την ομοιόμορφη κατανομή της θερμικής πηγής στην επιφάνειά της, είναι η καλή φυσική επαφή ανάμεσα στις αντιστάσεις και το σώμα της κεφαλής. Για να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση, οι αντιστάσεις εγκλείονται σε περιβλήματα από αλουμίνιο τα οποία προσαρμόζονται με ακρίβεια στο περίγραμμα της κεφαλής αφού αρχικά κατεργαστούν στο επιθυμητό σχήμα και στη συνέχεια προσδεθούν πάνω της με κοχλίες. Η θερμική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας επαφής κυμαίνεται για αντιστάσεις από μαρμαρυγία μεταξύ 2 και 3.5W/cm² και στις κεραμικές από 5 έως 8W/cm² [1,2,13]. Η επιφανειακή θέρμανση της κεφαλής έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Ομοιόμορφη θέρμανση των τοιχωμάτων του καναλιού ροής
- Εύκολη αποσυναρμολόγηση των θερμαντικών στοιχείων (π.χ. αν χρειαστεί να απομακρυνθεί η κεφαλή για καθαρισμό)

Η σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ πηγής θερμότητας και επιφάνειας του καναλιού ροής μπορεί να αποτελεί μειονέκτημα στις εξής περιπτώσεις:

- Όταν η τοπική θερμοκρασία πρέπει να αυξάνεται κατά βούληση (επηρεάζονται γειτονικές ζώνες θέρμανσης)
- Όταν ελέγχονται διαφορετικές θερμικές ζώνες μεγάλων κεφαλών

Ένα ακόμα μειονέκτημα της επιφανειακής θέρμανσης είναι η χαμηλή ενεργειακή απόδοση εξαιτίας των μεγάλων θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον. Θερμική μόνωση της επιφάνειας πιθανόν να μείωνε τις απώλειες, αλλά θα επηρέαζε τον έλεγχο της θερμοκρασίας της κεφαλής, αφού ο ρυθμός ψύξης μιας «υπερθερμασμένης» κεφαλής θα ήταν μειωμένος.

Οι μεγάλες κεφαλές για θερμοπλαστικά υλικά έχουν ξεχωριστά ελεγχόμενες ζώνες θέρμανσης. Ειδικά οι κεφαλές με δακτυλιοειδή διατομή μήτρας έχουν μια ξεχωριστή αντίσταση για την μήτρα και μία ή περισσότερες πρόσθετες αντιστάσεις για το υπόλοιπο σώμα της κεφαλής. Συνήθως, επιλέγεται ένας περιττός αριθμός ζωνών θέρμανσης, έτσι ώστε το κέντρο της κεφαλής να ελέγχεται ξεχωριστά και οι υπόλοιπες ζώνες να διατάσσονται συμμετρικά ως προς το κέντρο. Με αυτή τη λογική, επιλέγονται πέντε (5) ζώνες θέρμανσης με αντίστοιχο αριθμό αντιστάσεων. Το πλάτος των ζωνών θέρμανσης εξαρτάται από την απόσταση ανάμεσα στις αντιστάσεις και το κανάλι ροής.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η επιφάνεια κάθε ζώνης της κεφαλής που πρόκειται να τοποθετηθεί στην αντίσταση (σε cm²), η τιμή της οποίας πολλαπλασιάζεται με την

πυκνότητα ενέργειας μ , που για κεραμικές αντιστάσεις λαμβάνεται ίση με $8\text{W}/\text{cm}^2$. Όλες οι επιφάνειες είναι κυλινδρικές και το εμβαδόν τους δίνεται από τη σχέση $E=\pi D l$, όπου:

E: το εμβαδόν της επιφάνειας (cm^2)

D: η διάμετρος της εκάστοτε ζώνης της κεφαλής (cm)

l: το μήκος της εκάστοτε ζώνης της κεφαλής (cm)

1) Αντίσταση μήτρας

$$E=\pi*7,8*4,5=110,27\text{cm}^2$$

$$8 (\text{W}/\text{cm}^2)*110,27(\text{cm}^2)=882,16\text{W}$$

Η αντίσταση που επιλέγεται πρέπει να έχει λίγο μεγαλύτερη ισχύ από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά, δηλαδή να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$\Phi 78 \times 45$ 1000Watt 230Volt

Κατά ανάλογο τρόπο, υπολογίζονται οι αντιστάσεις των άλλων ζωνών της κεφαλής.

2) Αντίσταση δακτυλίου συγκράτησης μήτρας

$\Phi 160 \times 65$ 1000Watt 230Volt

3) Αντίσταση σώματος κεφαλής

$\Phi 160 \times 70$ 1000Watt 230Volt

4) Αντίσταση αράχνης και λαιμού

$\Phi 160 \times 65$ 1200Watt 230Volt

Εδώ η ισχύς είναι αρκετά μεγαλύτερη από την υπολογιζόμενη, επειδή στη ζώνη της αράχνης η επίτευξη επαρκούς θέρμανσης είναι καθοριστική για τη διαδικασία.

5) αντίσταση λαιμού κεφαλής

$\Phi 101,5 \times 45$ 650Watt 230Volt

α/α αντίστασης	Ονομασία	Διαστάσεις (mm)	Ισχύς (Watt)	Εφαρμοζόμενη τάση (Volt)
1	Αντίσταση μήτρας	$\Phi 78 \times 45$	1000	230
2	Αντίσταση δακτυλίου συγκράτησης μήτρας	$\Phi 160 \times 65$	1000	230
3	Αντίσταση σώματος κεφαλής	$\Phi 160 \times 70$	1000	230
4	Αντίσταση αράχνης και λαιμού	$\Phi 160 \times 65$	1200	230
5	Αντίσταση λαιμού κεφαλής	$\Phi 101,5 \times 45$	650	230

Πίνακας 2.3: Αντιστάσεις της κεφαλής

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του τήγματος για τον έλεγχο της κατεργασίας γίνεται είτε με θερμοστοιχεία (thermocouples, Fe-Co), είτε με θερμομέτρα με αντίσταση πλατίνας (Pt 100) τα οποία είναι εγκατεστημένα στην κεφαλή [8]. Τα θερμομέτρα με αντίσταση είναι ελαφρά πιο ακριβή από τα θερμοστοιχεία στο εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 50 και 400°C.

Από την άλλη μεριά, τα θερμοστοιχεία έχουν πιο επιθυμητά δυναμικά χαρακτηριστικά κατά τη μέτρηση (μικρότερη μάζα και συνεπώς ταχύτερη απόκριση), είναι πιο ανθεκτικά από μηχανικής πλευράς και είναι φθηνότερα. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται συνήθως σε μία οπή και στερεώνονται στην κεφαλή με κλείδωμα τύπου «μπαγιονέτ» ή βιδώνονται με σπείρωμα. Οι οπές για τα θερμοστοιχεία φαίνονται στα σχέδια της κεφαλής και φέρουν σπείρωμα **M14×1,5**. Ένα ελατήριο χρησιμοποιείται για να εξασφαλίζει επαρκή θερμική επαφή. Οι αισθητήρες τοποθετούνται όσο το δυνατό πιο κοντά στο κανάλι ροής, γιατί η επιλογή κατάλληλης θερμοκρασίας είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας της κατεργασίας. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της άκρης του αισθητήρα και του καναλιού ροής καθορίζεται από την αντοχή του εναπομείναντος τοιχώματος. Οι οπές για τους αισθητήρες είναι σημαντικό να γίνονται στο κέντρο της ζώνης θέρμανσης και της αντίστοιχης αντίστασης [12,18].

2.3. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

2.3.1 Γενικές αρχές

Ο σωλήνας από τήγμα θερμοπλαστικού πολυμερούς, αφήνοντας την κεφαλή της μήτρας, πρέπει να στερεοποιηθεί, ώστε να προσδοθούν σε αυτόν οι επιθυμητές διαστάσεις (καλιμπράρισμα). Κατά τη φάση αυτή της διαδικασίας παραγωγής δίνεται ιδιαίτερη σημασία, γιατί από αυτή εξαρτάται η ακρίβεια των διαστάσεων του τελικού προϊόντος και οι παραμένουσες τάσεις στα τοιχώματα του. Η βαθμονόμηση (calibration) σημαίνει ότι το εκβαλλόμενο προϊόν περνά μέσα από μία μήτρα (καλίμπρα) διατομής ανάλογης με το επιθυμητό προφίλ (π.χ. κυλινδρική αν πρόκειται για σωλήνα), έρχεται σε επαφή με τα ψυχρά τοιχώματα της μήτρας, όπου λαμβάνει χώρα απαγωγή θερμότητας και έτσι λαμβάνει το τελικό του σχήμα. Οι καλίμπρες είναι συνήθως μεταλλικές, από μπρούτζο, ατσάλι ή αλουμίνιο.

Στην εκβολή προφίλ, σωλήνων και παρόμοιων ημιέτοιμων προϊόντων οι διατάξεις βαθμονόμησης και ψύξης συνήθως συνδέονται απευθείας με την κεφαλή. Σήμερα, σχεδόν όλα τα προϊόντα εκβολής βαθμονομούνται, με εξαίρεση πολύ απλά προφίλ ή προϊόντα από πλαστικοποιημένο PVC.

Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα συστήματα βαθμονόμησης και ψύξης, λιγότερο ή περισσότερο αποτελεσματικά. Η επιλογή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το προϊόν της εκβολής, την ποιότητα του τελικού προϊόντος, το μέγεθος και την ταχύτητα της παραγωγής, το κόστος παραγωγής και, τέλος, τα διαθέσιμα μέσα (π.χ. στην περίπτωση μιας εργαστηριακής εφαρμογής). Ένας βασικός διαχωρισμός των διαφόρων μεθόδων βαθμονόμησης είναι η ξηρή (dry calibration) και η υγρή βαθμονόμηση (wet calibration). Στην ξηρή βαθμονόμηση το εκβαλλόμενο προϊόν δεν έρχεται απευθείας σε επαφή με το ψυκτικό μέσο, αλλά η θερμότητα του τήγματος απάγεται μέσω της επαφής του με τα μεταλλικά τοιχώματα της καλίμπρας, τα οποία ψύχονται εξωτερικά από το ψυκτικό μέσο. Στην περίπτωση της υγρής βαθμονόμησης η θερμότητα του τήγματος ή τουλάχιστον ένα μέρος αυτής (ανάλογα με τη μέθοδο) απάγεται απευθείας από το ψυκτικό μέσο [1,8].

Η επίτευξη της επαφής του τήγματος, με τη μήτρα βαθμονόμησης προϋποθέτει την ύπαρξη μιας δύναμης μεταξύ των δύο επιφανειών. Η δύναμη αυτή προκαλεί την ανάπτυξη δυνάμεων τριβής κατά μήκος των επιφανειών επαφής καθώς το τήγμα περνά μέσα από την

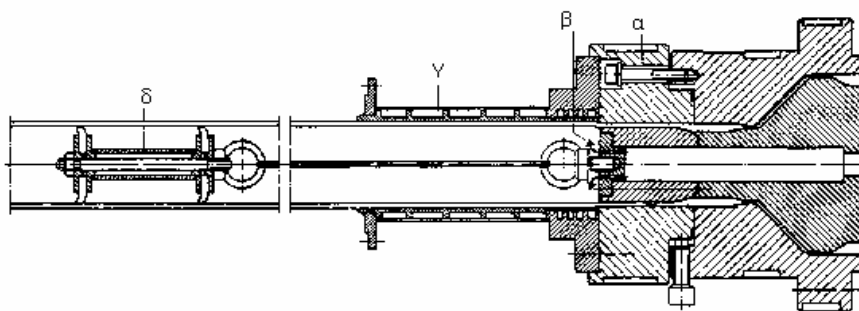
μήτρα. Οι δυνάμεις αυτές υπερνικούνται από το σύστημα τανυσμού (τραβηκτικό). Η μέγιστη επιτρεπόμενη δύναμη τανυσμού καθορίζεται από την ικανότητα παραλαβής φορτίων του προϊόντος και αυτή με τη σειρά της από τη διατομή και την κατανομή των θερμοκρασιών καθώς αυτό διέρχεται από το σύστημα βαθμονόμησης -ψύξης. Πρακτικά, στην είσοδο του συστήματος βαθμονόμησης, όπου η θερμοκρασία του προϊόντος είναι υψηλή και η ικανότητα παραλαβής φορτίων χαμηλή, οι δυνάμεις τανυσμού οδηγούν σε αύξηση του ελκυσμού του τήγματος και συνεπώς, σε διαμήκη παραμόρφωσή του. Επειδή το τήγμα στη συνέχεια στερεοποιείται, η παραμόρφωση αυτού του είδους παραμένει στο τελικό προϊόν. Εξαιτίας της παραμόρφωσης αυτής και της θερμικής συστολής, οι διαστάσεις του προϊόντος κατά τη φορά της εκβολής ελαττώνονται. Αυτό, γενικά, οδηγεί σε μείωση των δυνάμεων επαφής προϊόντος-καλίμπρας και σε μειωμένη ανταλλαγή θερμότητας των επιφανειών, απαραίτητης για την ορθή βαθμονόμηση [35]

Το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται με την επιλογή κατάλληλων (μεγαλύτερων από του σωλήνα) διαστάσεων της μήτρας βαθμονόμησης. Το σύστημα βαθμονόμησης μπορεί να αποτελείται από περισσότερες διαδοχικές μήτρες με κλιμάκωση των διαστάσεων τους για να ταιριάζουν με αυτές του εκβαλλόμενου προϊόντος καθώς αυτό ψύχεται σταδιακά. Καθώς η δύναμη τανυσμού αυξάνεται ανάλογα με το μήκος του συστήματος βαθμονόμησης, το μήκος αυτό καθορίζεται από την ικανότητα παραλαβής φορτίων του προϊόντος ή από την ελάχιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωσή του. Ακόμα και αν η ψύξη είναι πολύ αποτελεσματική, το προϊόν πρέπει να παραμένει στην καλίμπρα μέχρι η σταθερότητα του να είναι τόση, ώστε να αντιστέκεται σε εξωτερικές και εσωτερικές τάσεις, χωρίς να αλλοιώνονται οι διαστάσεις του. Ο χρόνος παραμονής του προϊόντος στην καλίμπρα καθώς και το μήκος της καθορίζουν ουσιαστικά και την ταχύτητα της παραγωγής [11,13].

2.3.2 Μέθοδοι βαθμονόμησης

Βαθμονόμηση με αέρα υπό πίεση (External Calibration with Compressed Air)

Εξωτερική βαθμονόμηση, γενικά, σημαίνει ότι οι εξωτερικές διαστάσεις του σωλήνα καθορίζονται από την μήτρα βαθμονόμησης (sizing sleeve). Η μέθοδος αυτή, έχει γίνει ευρέως αποδεκτή λόγω ορισμένων πλεονεκτημάτων της, κυρίως για μεγάλες παραγωγές σωλήνων, οι οποίες τυποποιούνται με βάση την εξωτερική τους διάμετρο. Με τη μέθοδο αυτή παράγονται, κυρίως, σωλήνες από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) με διάμετρο μεγαλύτερη από 355mm και σωλήνες από πολυολεφίνες με διάμετρο μεταξύ 90 και 110mm. Σε αυτή τη διαδικασία, η επαφή ανάμεσα στη μήτρα βαθμονόμησης και στα εξωτερικά τοιχώματα του σωλήνα επιτυγχάνεται με την υπερπίεση αέρα (περίπου 0,2-1bar). Για τον σκοπό αυτό, αέρας υπό πίεση διοχετεύεται στο εσωτερικό του σωλήνα μέσω του πυρήνα της κεφαλής και πιέζει την εξωτερική του επιφάνεια πάνω στη μήτρα βαθμονόμησης. Στην περίπτωση μικρών σωλήνων, το άλλο άκρο τυλίγεται για να εμποδιστεί η εκφυγή του αέρα. Σε σωλήνες με μεγαλύτερες διαστάσεις, το ελεύθερο άκρο σφραγίζεται με έμβυσμα (floating plug) που συνδέεται με τον πυρήνα της κεφαλής με ένα σχοινί ή αλυσίδα. Σε αυτή τη μέθοδο βαθμονόμησης, η μήτρα είναι καλά κεντραρισμένη και τοποθετημένη, αεροστεγώς, κατευθείαν μετά την κεφαλή εκβολής. Στα συστήματα αυτά συνήθως υπάρχει διάταξη για τον έλεγχο της πίεσης του αέρα ώστε να εντοπίζονται τυχών διαρροές. Η ψύξη της μήτρας και κατ' επέκταση του σωλήνα γίνεται με κυκλοφορία νερού μέσα σε υδροχίτωνιο ή με ψεκασμό νερού κυρίως για μεγαλύτερες σωλήνες [35-39]. Μια τέτοια διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Βαθμονόμηση με αέρα υπό πίεση. (α) μήτρα εκβολής, (β) είσοδος αέρα, (γ) μήτρα βαθμονόμησης, (δ) έμβυσμα

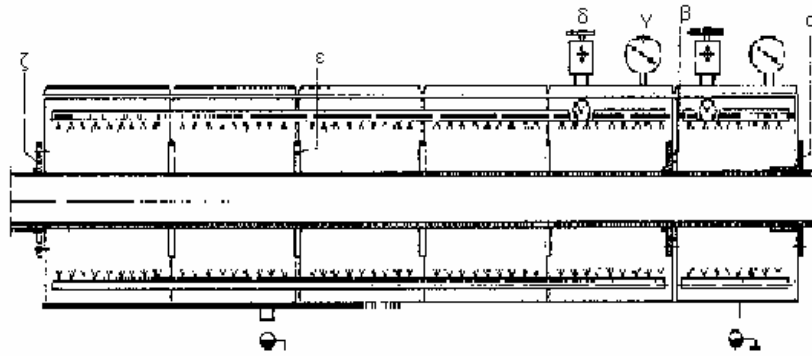
Εξωτερική βαθμονόμηση με κενό (External Calibration with Vacuum)

Αποτελεί την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο, λόγω της εύκολης και ασφαλούς λειτουργίας της. Αυτή η διαδικασία έχει αποδειχθεί επιτυχής για σωλήνες με εξωτερική διάμετρο έως και 2000mm. Στην περίπτωση αυτή, η απαραίτητη επαφή των τοιχωμάτων του σωλήνα με τη μήτρα βαθμονόμησης επιτυγχάνεται με την ύπαρξη κενού, το οποίο προκύπτει από τη διαφορά πίεσης του εσωτερικού του σωλήνα και της πίεσης που επικρατεί στο εσωτερικό του θαλάμου υποπίεσης (vacuum tank). Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν χρειάζεται έμβυσμα στο εσωτερικό του σωλήνα, αρκεί να εξασφαλιστεί ατμοσφαιρική πίεση. Η μήτρα βαθμονόμησης, δηλαδή, το εσωτερικό του θαλάμου υποπίεσης μπορεί να είναι είτε ένα κυλινδρικό χιτώνιο (sizing sleeve), είτε, διαδοχικές πλάκες (plate sizing), ανάλογα με το υλικό εκβολής [11,40-45].

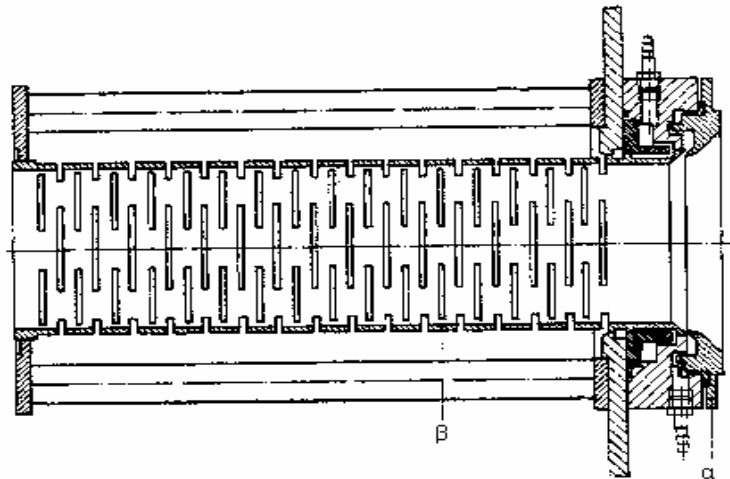
Στην πρώτη περίπτωση, το κενό παρέχεται μέσω οπών περιμετρικά του κυλίνδρου. Ο τύπος αυτός είναι κατάλληλος για χαμηλές ταχύτητες εκβολής και θερμοπλαστικά υλικά, τα οποία ψύχονται γρήγορα, χωρίς παραμορφώσεις.

Στη δεύτερη περίπτωση υπάρχουν μειωμένες τριβές, καθώς ο σωλήνας διέρχεται μέσα από τις πλάκες. Εδώ, επίσης το κενό παρέχεται περιμετρικά. Και στις δύο περιπτώσεις, η ψύξη του σωλήνα στο εσωτερικό του θαλάμου υποπίεσης γίνεται με νερό, το οποίο μπορεί να ψεκάζεται απευθείας στο σωλήνα ή απλά να τον περιβάλλει με τη μορφή κλειστού μπάνιου. Η δεύτερη μέθοδος εφαρμόζεται στην περίπτωση σωλήνων μικρής διαμέτρου.

Οι διατάξεις αυτές σχεδιάζονται με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους και με διαφορετικά υλικά. Ο σχεδιασμός τους εξαρτάται από τις ιδιότητες του τήγματος (ιξώδες, τάση πρόσφυσης κτλ), από τις διαστάσεις του σωλήνα και την ταχύτητα εκβολής. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους είναι αυτά που έχουν καλή θερμική αγωγιμότητα, όπως χαλκός, ορείχαλκος και αλουμίνιο. Διάφορες διατάξεις πρόψυξης (pre-cooling devices) προηγούνται συχνά του θαλάμου κενού, για να σταθεροποιήσουν το εκβαλλόμενο προϊόν, πριν αυτό εισέλθει στη μονάδα βαθμονόμησης. Μονάδες βαθμονόμησης με σταθερές διατάξεις πρόψυξης χρησιμοποιούνται στην εκβολή πολυολεφίνων με μεσαίες ή χαμηλές ταχύτητες. Για υψηλότερες ταχύτητες εκβολής οι διατάξεις πρόψυξης μπορεί να είναι ρυθμιζόμενες [1,11,41,43-45]. Οι διατάξεις που περιγράφηκαν φαίνονται στα Σχήματα 2.14 και 2.15:



Σχήμα 2.14: Θάλαμος κενού με δίσκους και ψεκασμό νερού (α) είσοδος θαλάμου κενού, (β) ενδιάμεσο παρέμβυσμα, (γ) μετρητής υποπίεσης, (δ) βαλβίδα εισαγωγής αέρα, (ε) δίσκος βαθμονόμησης, (ζ) στεγανωτικό παρέμβυσμα

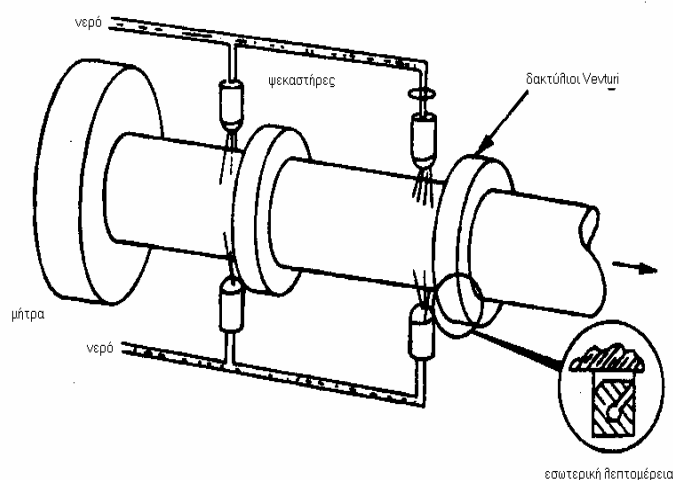


Σχήμα 2.15: Μήτρα βαθμονόμησης με διάτρητο κύλινδρο-κάλυμμα και διάταξη πρόψυξης. (α) διάταξη πρόψυξης, (β) κύλινδρος

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι σωλήνες εκβάλλονται χωρίς βαθμονόμηση, οπότε οι διατάξεις που περιγράφηκαν πιο πάνω απουσιάζουν από τη γραμμή παραγωγής. Αυτό μπορεί να συμβαίνει για διάφορους λόγους: α) Οι απαιτήσεις του τελικού προϊόντος να μην επιβάλλουν ακρίβεια διαστάσεων και μορφής, β) ορισμένα μαλακά υλικά όπως ελαστομερή πολυουρεθάνης, είναι πρακτικά αδύνατο να βαθμονομηθούν με τις παραπάνω μεθόδους, γιατί το τήγμα τους κολλάει πάνω στις μεταλλικές επιφάνειες και δεν μπορούν να διέλθουν από τις μήτρες βαθμονόμησης. Στις περιπτώσεις αυτές, οι σωλήνες εξέρχονται ελεύθερα από τη μήτρα εκβολής και οδηγούνται απευθείας στη μονάδα ψύξης. Η σταθεροποίηση των διαστάσεων και της μορφής τους επιτυγχάνεται σε ένα βαθμό με τη χρήση διαφόρων εξαρτημάτων ή αυτοσχέδιων διατάξεων, όπως κυλινδρικοί δακτύλιοι ψύξης, μέσω των οποίων περνά ελεύθερα ο σωλήνας και δέχεται περιμετρικά νερό με μεγάλη ταχύτητα (είναι οι ίδιοι που χρησιμοποιούνται για την πρόψυξη). Με τις διατάξεις αυτές βελτιώνεται ο ρυθμός ψύξης.

2.4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ

Ο σωλήνας, αφού περάσει από τη μονάδα βαθμονόμησης (αν υπάρχει) οδηγείται στη μονάδα ψύξης, όπου απάγεται το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητάς του και σταθεροποιείται, ώστε να αντέχει την τάνυση και την κοπή χωρίς να παραμορφώνεται. Η ψύξη πραγματοποιείται με τη διέλευση του σωλήνα μέσα από μπάνιο νερού ή με τον περιφερειακό ψεκασμό του με νερό. Στη δεύτερη περίπτωση, επιτυγχάνεται ταχύτερος ρυθμός ψύξης, και κατά συνέπεια, μικρότερο μήκος μονάδας ψύξης. Οι δύο μέθοδοι παρέχουν υψηλούς ρυθμούς απαγωγής θερμότητας και ομοιόμορφη ψύξη. Η ψύξη με ψεκασμό νερού μπορεί να συνδυαστεί με άλλες διατάξεις, όπως δακτυλίους venturi, που παρέχουν αέρα περιφερειακά για πιο αποτελεσματική ψύξη του σωλήνα [42]. Επίσης, η ψύξη των σωλήνων μπορεί να γίνει με συνδυασμό αέρα και νερού, ως ψυκτικών μέσων σε διαδοχικά στάδια. Μια τέτοια διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.16:



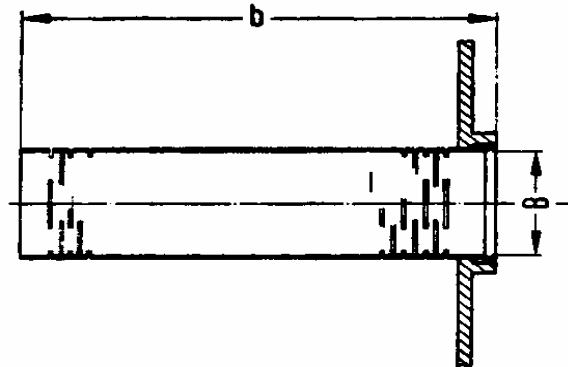
Σχήμα 2.16: Ψύξη σωλήνα με αέρα και νερό

Οι μονάδες ψύξης λειτουργούν με ψεκασμό νερού ή εναλλακτικά με μπάνιο νερού. Στους πίνακες που επισυνάπτονται μαζί με τα εγχειρίδια λειτουργίας των ψυκτικών συστημάτων δίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά των διατάξεων αυτών και πληροφορίες για τις εφαρμογές τους και τον τρόπο λειτουργίας. Συγκεκριμένα, για τα δοχεία κενού αναφέρονται: ο αριθμός των θαλάμων κενού, η εξωτερική διάμετρος των σωλήνων που μπορούν να βαθμονομηθούν, το ενεργό μήκος βαθμονόμησης, η ισχύς των αντλιών νερού και κενού, τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται, ο αριθμός των ψεκαστήρων νερού, οι κύριες διαστάσεις των διατάξεων και το βάρος τους.

Για τα μπάνια ψύξης δίνονται: η εξωτερική διάμετρος των σωλήνων που μπορούν να ψύξουν, το ενεργό μήκος ψύξης, τα φίλτρα, οι σωληνώσεις, ο αριθμός ψεκαστήρων νερού, οι κύριες διαστάσεις των διατάξεων και το βάρος τους. Με βάση τα στοιχεία αυτά μπορεί να γίνει η επιλογή των κατάλληλων διατάξεων βαθμονόμησης και ψύξης για μια συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής.

2.5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΤΡΑΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΜΕ ΚΕΝΟ (SIZING SLEEVE)

Οι κύριες διαστάσεις της μήτρας βαθμονόμησης (Σχήμα 2.17), για διάφορα υλικά και ονομαστικές διαμέτρους σωλήνων, καθώς και οι συνήθεις ταχύτητες της διάταξης τάνυσης, δίνονται στον Πίνακα 2.4 και είναι βασισμένες σε εμπειρικά αποτελέσματα [42].



Σχήμα 2.17: Διαστάσεις μήτρας βαθμονόμησης

Υλικό σωλήνα	Εξωτερική Διάμετρος Σωλήνα (mm)	B(mm)	β(mm)	Ταχύτητα Τραβηκτικού (m/min)
PVC-U	20	20.16	100 έως 150	10 έως 11
	160	161.3	500 έως 600	2.0 έως 2.7
PE-HD	20	21	250	25 έως 40
	160	167.2	640	1.2 έως 2.2
PP	20	21	250	25 έως 40
	160	167.2	640	1.0 έως 2.0
PA 12 ¹⁾	8	8.6	130	55 έως 60
PA 12 ²⁾	20	20.85	130	12 έως 15
PA 12 ³⁾	22	23	130	10 έως 12

1) πάχος τοιχωμάτων 1mm, 2) πάχος τοιχωμάτων 2mm, 3) ανάλογα με το πάχος των τοιχωμάτων

Πίνακας 2.4: Δεδομένα για μήτρες βαθμονόμησης

Ο σωλήνας που θα παραχθεί είναι από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) και έχει εξωτερική διάμετρο 32mm. Με γραμμική παρεμβολή στα δεδομένα του πίνακα για αυτή τη διάμετρο υπολογίζεται η τιμή: $B=33,5\text{mm}$, $\beta=283\text{mm}$ και ταχύτητα ελκυσμού από 23 έως 37m/min. Το πλήρες κατασκευαστικό σχέδιο της μήτρας βαθμονόμησης (ψυγείο) έχει $B=33.1\text{mm}$ και $\beta=280\text{mm}$ (**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ, Σχέδιο 1**). Η μήτρα επίσης περιλαμβάνει διάταξη πρόψυξης του σωλήνα (pre-cooling device) που τροφοδοτείται με νερό (**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ, Σχέδιο 3**). Ο θάλαμος κενού είναι ένα ακριβό σύστημα και η κατασκευή του απαιτεί ειδική τεχνογνωσία και μέσα. Επομένως, για μια εργαστηριακή εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εναλλακτική διάταξη για τη βαθμονόμηση του σωλήνα. Μία τέτοια λύση είναι ο δακτύλιος ψύξης του οποίου το κατασκευαστικό σχέδιο για σωλήνα Φ32 φαίνεται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, ΠΙΝΑΚΑΣ 9**.

2.6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΠΑΝΙΟΥ ΨΥΞΗΣ

Το κύριο ζητούμενο κατά το σχεδιασμό του μπάνιου νερού είναι το μήκος που πρέπει να έχει, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα παραγωγής του πλαστικού σωλήνα. Ο απλούστερος τρόπος για τον υπολογισμό του μήκους του μπάνιου ψύξης είναι με τη χρήση του αριθμού Fourier, F_0 , ο οποίος είναι αδιάστατος και ανάλογος του χρόνου ψύξης του υλικού. Ο αριθμός Fourier δίνεται από την παρακάτω σχέση [1, 46]:

$$F_0 = \alpha \cdot t / X^2 \quad (2.1)$$

α : θερμοκρασιακή αγωγιμότητα mm^2/sec

t : χρόνος ψύξης sec

X : πάχος τοιχωμάτων σωλήνα m .

Αν v είναι η ταχύτητα ελκυσμού του σωλήνα και L το μήκος του μπάνιου ψύξης, τότε:

$$L = v \cdot t \quad (2.2)$$

$$\text{και } F_0 = \alpha \cdot L / (v \cdot X^2) = \text{const.} \quad (2.3)$$

Αν είναι γνωστό το μήκος του μπάνιου ψύξης L_1 που απαιτεί η εκβολή ενός συγκεκριμένου υλικού (α_1) με ορισμένη ταχύτητα v_1 , τότε είναι εφικτό να υπολογιστεί το απαιτούμενο μήκος ψύξης για ένα άλλο υλικό (α_2) με διαφορετική ταχύτητα ελκυσμού v_2 . Επειδή, $F_0 = \text{const}$, τότε,

$$F_{01} = F_{02} \quad \text{ή}$$

$$\alpha_1 \cdot L_1 / (v_1 \cdot X_1^2) = \alpha_2 \cdot L_2 / (v_2 \cdot X_2^2) \Rightarrow L_2 = L_1 \cdot (\alpha_1 / \alpha_2) \cdot (v_2 / v_1) \cdot (X_2 / X_1)^2 \quad (2.4)$$

Οι οριακές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία του νερού ψύξης T_u , ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας a , η θερμοκρασία του τήγματος T_m και η τελική θερμοκρασία του σωλήνα T_e , θεωρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας [1]. Η μέθοδος αυτή δίνει καλά αποτελέσματα μόνο για μεγάλες τιμές του F_0 , δηλαδή, είτε για σωλήνες με πολύ λεπτά τοιχώματα, είτε για μεγάλους χρόνους ψύξης. Επίσης, μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα για μεγαλύτερα πάχη τοιχωμάτων όταν ο λόγος της θερμικής αντίστασης X/λ προς την αντίσταση εξωτερικής μεταφοράς θερμότητας, $1/a$, δηλαδή ο αριθμός Biot, είναι μικρός ($Bi < 100$) [1].

$Bi = a \cdot X / \lambda$, όπου:

a : συντελεστής μεταφοράς θερμοκρασίας $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

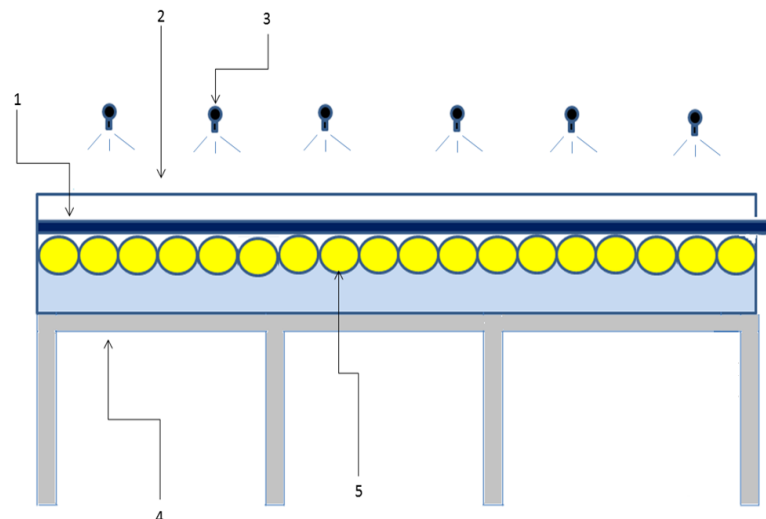
λ : θερμική αγωγιμότητα W/mK

X : πάχος τοιχωμάτων σωλήνα m

Θεωρώντας γνωστή τη συμπεριφορά κατά την ψύξη ενός πλαστικού σωλήνα (HDPE) με ονομαστική διάμετρο 110mm, πάχος τοιχωμάτων $X_1 = 10\text{mm}$, ταχύτητα ελκυσμού $v_1 = 2,2\text{m}/\text{min}$ και μήκος μπάνιου ψύξης $L = 22\text{m}$. Ο σωλήνας που μελετάται για εργαστηριακή παραγωγή, είναι από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), έχει ονομαστική διάμετρο 32mm και πάχος τοιχωμάτων 2,4mm (X_2). Μια ενδεικτική ταχύτητα τραβήγματος είναι

23m/min (v_2). Επειδή το υλικό είναι ίδιο και στις δύο περιπτώσεις $\alpha_1 = \alpha_2$. Με εφαρμογή της Σχέσης (2.4) υπολογίζεται $L_2 = 13,24\text{m}$. Επομένως, απαιτείται για την παραγωγή του συγκεκριμένου σωλήνα με ταχύτητα παραγωγής 23m/min μπάνιο νερού μήκους 13,24m. Το μήκος αυτό για εξωτερική ψύξη του σωλήνα με νερό είναι αρκετά μεγάλο, ωστόσο είναι αναμφισβήτητη η αποτελεσματικότερη μέθοδος σε σύγκριση με την ψύξη με αέρα. Από την άλλη, η εσωτερική ψύξη των σωλήνων με νερό δεν έχει βρει ακόμα βιομηχανική εφαρμογή, αν και οι έρευνες δείχνουν ότι εξασφαλίζει έως και 25% μικρότερο μήκος ψύξης και καλύτερη κατανομή των τάσεων [1].

Όταν έχει υπολογιστεί το απαραίτητο μήκος του μπάνιου ψύξης (ενεργό μήκος) για τον συγκεκριμένο σωλήνα και για δεδομένο ρυθμό παραγωγής, μπορεί να επιλεγθεί η κατάλληλη εμπορική διάταξη ψύξης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο θάλαμος ψύξης πρέπει να έχει ενεργό μήκος ψύξης 13,24m. Στις περιπτώσεις που το μήκος του μπάνιου που υπολογίστηκε, είναι μεγαλύτερο από αυτά των τυποποιημένων διατάξεων, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο ή περισσότερα μπάνια στη σειρά [42,44,46]. Στην Εργαστηριακή εφαρμογή, όπου είναι αδύνατη η εγκατάσταση μιας τέτοιας μονάδας και η επίτευξη υψηλών ρυθμών παραγωγής, προτείνεται η χρήση μιας απλής ιδιοσυσκευής ψύξης. Πρόκειται για ένα μπάνιο νερού το σκαρίφημα του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 2.18.



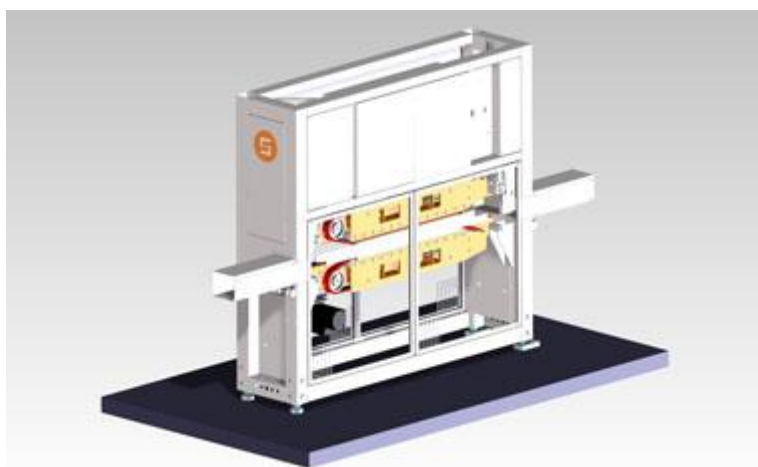
Σχήμα 2.18: Σκαρίφημα μπάνιου ψύξης 1) σωλήνας 2) δεξαμενή νερού, 3) παροχή νερού 4) τράπεζα στηρίξης 5) ράουλα

Το μπάνιο νερού είναι δοχείο τετραγωνικής διατομής 300x300mm κατασκευασμένο από χαλκοειδή μέταλλα πάχους 3mm συγκολλημένα μεταξύ τους. Το μήκος του μπάνιου εξαρτάται από τον επιθυμητό ρυθμό παραγωγής και τον διαθέσιμο χώρο στο εργαστήριο. Το μπάνιο φέρει στο εσωτερικό του ράουλα, τα οποία είναι κατά μήκος τοποθετημένα ανά 500mm και περιστρέφονται ελεύθερα πάνω σε κατάλληλες στηρίξεις. Στο μπροστινό μέρος του μπάνιου τοποθετείται ένα δοχείο υπερχειλίσης με στόμιο εξόδου διαμέτρου 30mm. Ο σωλήνας καθώς εξέρχεται από τον εκβολέα, περνά μέσα από τον δακτύλιο ψύξης που βρίσκεται σε απόσταση 100mm από την άκρη της μήτρας, όπου σταθεροποιούνται σε πρώτο στάδιο οι διαστάσεις του. Στη συνέχεια, εισέρχεται στο μπάνιο ψύξης από την οπή εισόδου, η οποία βρίσκεται σε απόσταση 250mm από την άκρη της μήτρας. Καθώς ο σωλήνας κινείται πάνω στα ράουλα με τη βοήθεια της διάταξης ελκυσμού, περιβρέχεται με νερό από ύψος περίπου 20mm από μια σωλήνωση που φέρει στόμια εξόδου κάθε 200mm. Το νερό είναι

από την παροχή του δικτύου ύδρευσης [46-52]. Η παροχή του νερού είναι συνεχής και έχει ως αποτέλεσμα την αποτελεσματική ψύξη του σωλήνα και την στερεοποίησή του. Όταν το νερό φτάσει στο ύψος των οπών εισόδου και εξόδου του μπάνιου τότε ρέει, διαμέσου αυτών στα δοχεία υπερχειλίσης και από εκεί οδηγείται στην αποχέτευση. Σε περίπτωση που η λύση αυτή εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες παραγωγής, το ψυκτικό νερό ανακυκλοφορεί με τη βοήθεια μιας αντλίας και να ψύχει εκ νέου τον παραγόμενο σωλήνα. Πρέπει να τονιστεί ότι η μήτρα, ο δακτύλιος ψύξης, οι οπές εισόδου και εξόδου του μπάνιου και τα ράουλα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένα, ώστε να διευκολύνεται η μεταφορά του σωλήνα και να μην καταστρέφεται το προϊόν σε αυτή την ευαίσθητη φάση [47,49,52].

2.7. ΕΛΚΥΣΜΟΣ – ΤΑΝΥΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

Η μονάδα ελκυσμού του σωλήνα (τραβηκτικό) έχει ως σκοπό την απομάκρυνση του σωλήνα από τη μήτρα χωρίς να «τσακίζει» και στη συνέχεια, τη μεταφορά του μέσα από τις μονάδες βαθμονόμησης και ψύξης με σταθερή ταχύτητα. Υπάρχουν διατάξεις ελκυσμού με ταινία (belt haul-offs) που χρησιμοποιούνται για ευαίσθητους στην πίεση σωλήνες, σωλήνες με μικρή διάμετρο και λεπτά τοιχώματα και συνήθως για υψηλές ταχύτητες παραγωγής (Σχήμα 2.19). Ισοκατανεμημένη πίεση παρέχεται στον σωλήνα από δύο επίπεδες ή οδοντωτές ταινίες που κινούνται με συγχρονισμένη ταχύτητα. Οι επιφάνειες επαφής των ταινιών με τον σωλήνα είναι από υψηλής αντίστασης σε φθορά ελαστικό ή αφρώδες υλικό για να προστατεύεται το προϊόν.



Σχήμα 2.19: Σύστημα ελκυσμού με ταινία

Ένας άλλος τύπος συστήματος ελκυσμού είναι με ερπύστριες με ελαστικά «μαξιλαράκια» συγκράτησης (caterpillar haul-offs) (Σχήμα 2.20) Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται για σωλήνες μεσαίων και μεγάλων διαμέτρων για να εξασφαλίζει σταθερή μεταφορά. Ανάλογα με το μέγεθος του σωλήνα, η απόσταση ανάμεσα στα «μαξιλάκια» ρυθμίζεται με την παράλληλη μετακίνησή τους, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη επαφή καθ' όλο το μήκος. Η πίεση επαφής πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατό χαμηλότερη, προκειμένου να αποφεύγεται η παραμόρφωση του σωλήνα.



Σχήμα 2.20: Σύστημα ελκυσμού με ερπύστριες

Σε κάθε περίπτωση, κατά τον σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος είναι σημαντικές οι παρακάτω απαιτήσεις:

- Η δύναμη ελκυσμού πρέπει να επιλέγεται με βάση την μονάδα ψύξης, ώστε να μην παραμορφώνεται το πλαστικό προϊόν.
- Η δύναμη ελκυσμού πρέπει να μεταφέρεται ομαλά στον σωλήνα, χωρίς παραμορφώσεις και καταστροφή της επιφάνειάς του.
- Ομοιόμορφη ταχύτητα ελκυσμού για να επιτυγχάνεται σταθερό πάχος τοιχωμάτων του σωλήνα στην κατεύθυνση του ελκυσμού
- Σχεδιασμός των επιφανειών επαφής για αντίσταση στη φθορά :
- Το μέγιστο πλάτος ανοίγματος της εισόδου του συστήματος ελκυσμού πρέπει να είναι περίπου 50mm μεγαλύτερο από τη διάμετρο του μεγαλύτερου σωλήνα που πρόκειται να ελκυστεί.
- Σωλήνες με μικρή στερεότητα και λεπτά τοιχώματα απαιτούν μονάδες ελκυσμού με πολλές μακριές ερπύστριες.

2.8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

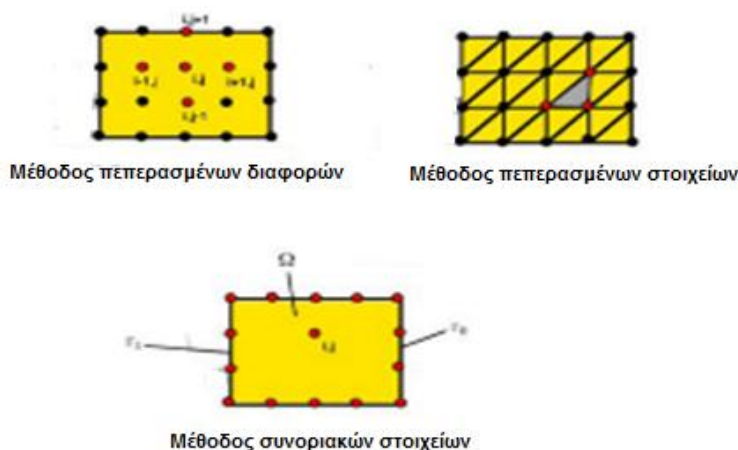
- 1) Michaeli, W. Monoextrusion dies for thermoplastics. In *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, 2nd Ed.; Hanser, (1992).
- 2) Tadmor, Z.; Gogos C.G. Die forming. In *Principles of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, (1979).
- 3) Rosato, D.V. Die design and performance. *Extruding Plastics*; Chapman & Hall, (1998).
- 4) Rauwendaal, C. Die forming. In *Understanding Extrusion*; Hanser, (1998).
- 5) Levy, S.; Carley, J.F. Extrusion dies for specific product lines. In *Plastics Extrusion Technology Handbook*, 2nd Ed.; Industrial Press, Inc., (1989).
- 6) plasticpipe.org/pdf/chapter04.pdf
- 7) enr.bd.psu.edu/extrusion.htm
- 8) www.ril.com/downloads/pdf/extrusion%20principles.pdf
- 9) www.pitfallsinmolding.com/extrusion1.html
- 10) Giles, Harold F.; Wagner, John R.; Mount, Eldridge M. *Extrusion: The definitive processing guide and handbook*, William Andrew, (2005).
- 11) Todd, Robert H.; Allen, Dell K.; Alting, Leo, *Manufacturing Processes Reference Guide*, Industrial Press Inc, (1994).
- 12) Hensen, "Plastics Extrusion Technology", 2nd Ed., Hanser, (1997).
- 13) J. F. T Pittman, G. P Whitham, I. A. Farah, Wall Thickness Uniformity in Plastic Pipes: Computer Simulations of the Effectiveness of Die Mandrel Offsetting and Pipe Rotation in Combating Sag, *Polym. Eng. Sci.* **35**, 921-928, (1995).
- 14) US Pat. 4314958 - Filed 22 Jul, - Phillips Petroleum Company, (1980).
- 15) US Pat. 4548570 - Filed 12 May, - Cosden Technology, Inc. (1983).
- 16) US Pat. 4512943 - Filed 20 May, - Cosden Technology, Inc, (1983).
- 17) US Pat. 3666389 - Filed 24 Nov, - Dominion Gasket a Manufacturing Co, (1969).
- 18) US Pat. 4402658 - Filed 21 Sep, - Phillips Petroleum Company, (1981).
- 19) US Pat. 10784695 - Filed 23 Feb, (2004).
- 20) US Pat. 5580405 - Filed 13 Sep, - Avondale Property (Holdings) Limited, (1994).
- 21) US Pat. 3399262 - Filed 26 Sep, (1966).
- 22) US Pat. 4886438 - Filed 2 Mar, (1988).
- 23) US Pat. 4650367 - Filed 6 Mar, (1986).
- 24) US Pat. 5085567 - Filed 26 Feb, - INOEX GmbH Innovationen und Ausrugstungen fur die Extrusionstechnik (1990).
- 25) US Pat. 3404203 - Filed 28 Jan, - The Dow Chemical Company, (1965).
- 26) US Pat. 5461898 - Filed 9Dec, (1993).
- 27) US Pat. 11719198 - Filed 23 Dec, - UPONOR INNOVATION AB, (2005).
- 28) US Pat. 6488802 - Filed 4 Aug, - Jerry C. Levingston, (2000).
- 29) US Pat. 3387073 - Filed 10 Jan, - Phillips Petroleum Company, (1964).
- 30) US Pat. 4547142 - Filed 31 Dec, - Ruhrchemie Aktiengesellschaft, (1981).
- 31) US Pat. 5513975 - Filed 7 Apr, - Advanced Drainage Systems, Inc., (1994).
- 32) US Pat. 9788910 - Filed 19Feb, (2001).
- 33) US Pat. 5505897 - Filed 7 Apr, - Advanced Drainage Systems, Inc., (1994).
- 34) US Pat. 5460501 - Filed 7Apr, - Advanced Drainage Systems, Inc., (1994).
- 35) US Pat. 5937521 - Filed 23 May, - Seaward International, Inc. (1997)
- 36) V. Kleindienst, *Kunstst.* **63**, 7-11, (1973).
- 37) B. Endrass, High-speed Extrusion of Profiles, *Kunstst.*, 83, 584-586, 1993.

- 38) L. Fradette, P. A. Tanguy, F. Thibault, P. Sheehy, D. Blouin, P. Hurez, J. Polymer Engineering **14**, 295-322, (1995).
- 39) Vlachopoulos J., Recent and Future Challenges in Computer-Aided Polymer Processing Analysis and Die Design, ATV-Semapp Meeting, Odense Denmark, (1998).
- 40) Woei-Shyong, L.; Hsueh-Yu, H., J. Polym. Eng. Sci. **40**, 1085–1094. (2000).
- 41) Kamp, W., & H. D. Kurz., Kunststoffe **70**, 257-263,(1980).
- 42) Dietz, W., Polym. Eng. Sci. **18**, 1030-1036, (1978).
- 43) Sheehy P., Tanguy P. A., Blouin D., Polym. Eng. Sci. **34**, 650-656, (1994).
- 44) Szarvasy, Simulation of Complex PVC Window Profile Cooling During Calibration with Particular Focus on Internal Heat Exchange, 3rd ESAFORM Conference on Material Forming, Stuttgart, Germany, (2000).
- 45) Pittman J. F. T, Whitham G. P, Beech S., Gwynn D., Cooling and Wall Thickness Uniformity in Plastic Pipe Manufacture, Intern. Polymer Processing, IX, 130-140, (1994).
- 46) Pittman J. F. T, Farah I. A., Plast., Rubb. Composites Proc. Appl. **25**, 305-312, (1996).
- 47) Baird D., Collias D., "Polymer Processing-Principles and design", John Wiley and Sons Inc, New York, (1998).
- 48) Crawford R.J., "Plastics Engineering", Pergamon Press, New York (1987).
- 49) US Pat. 5749330 - Filed 26 Feb, - Nippondenso Co., Ltd., Nippon Soken, Inc., (1996).
- 50) US Pat. 10236977 - Filed 9 Sep, (2002).
- 51) US Pat. 4212623 - Filed 31 Jan, - Logic Devices, Inc., (1979).
- 52) US Pat. 6054089 - Filed 9 Mar, (1998).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Προκειμένου για να είναι δυνατή η πρόβλεψη και η μοντελοποίηση των σύνθετων πολυμερικών ροών, πρέπει πρώτα να υπάρχει μια βασική κατανόηση των μαθηματικών σχέσεων που περιγράφουν αυτά τα φαινόμενα. Ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα της ροής, αυτή πρέπει να ικανοποιεί κάποιους φυσικούς νόμους. Αυτοί οι νόμοι μπορούν να εκφραστούν σε μαθηματικούς όρους ως διατήρηση της μάζας, διατήρηση της ορμής, και διατήρηση της ενέργειας (**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ**). Δεδομένου ότι αυτές οι εξισώσεις μπορούν επίσης να συνδυαστούν, π.χ. στην περίπτωση που το ιξώδες εξαρτάται από την θερμοκρασία, η επίλυση μπορεί να είναι ακόμα πιο πολύπλοκη. Στόχος της μοντελοποίησης είναι να ληφθεί ένα φυσικό πρόβλημα, να εφαρμοστούν αυτές οι μαθηματικές εξισώσεις και να επιλυθούν για να προβλεφθούν τα φαινόμενα ροής. Αν και υπάρχουν οι αναλυτικές λύσεις στις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας για μερικά απλά δισδιάστατα προβλήματα, για πιο σύνθετα διδιάστατα προβλήματα ή προβλήματα που απαιτείται τρισδιάστατη ανάλυση, απαιτούνται αριθμητικές μέθοδοι. Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες αριθμητικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται συνήθως για να λυθούν σύνθετα προβλήματα ροής ρευστών (Σχήμα 3.1), η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FDM), η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM) και η μέθοδος πεπερασμένων όγκων (FVM). Κάθε μια από αυτές τις μεθόδους έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της και, επομένως, κάποια μπορεί να προτιμηθεί για ορισμένο τύπο διαδικασίας ή υλικού. Κάθε τεχνική έχει προσαρμοστεί σε κάποια μορφή για τα συγκεκριμένα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στην επεξεργασία πολυμερών.



Σχήμα 3.1: Σύγκριση βασικών αριθμητικών τεχνικών

3.1.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

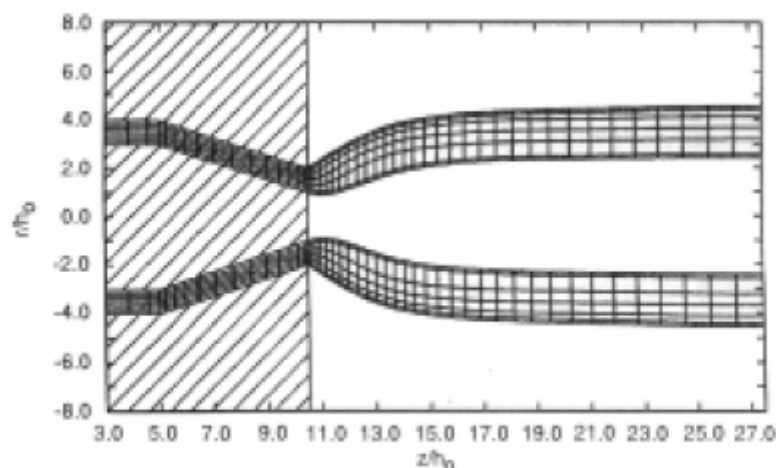
Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών άρχισε να διαδίδεται στη δεκαετία του '30 για τη χρήση σε υπολογισμούς με το χέρι και είναι η απλούστερη στη χρήση και στην κατανόηση [1-5]. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το πλέγμα που θα κατασκευαζόταν για να αντιπροσωπεύσει τη

γεωμετρία μιας διδιάστατης περιοχής. Μόλις δημιουργηθεί το πλέγμα, οι διαφορικές εξισώσεις ξαναγράφονται σε διακριτή μορφή και εφαρμόζονται σε κάθε κομβικό σημείο. Το προκύπτον σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων μπορεί έπειτα να επιλυθεί από την τυποποιημένη γκαουσιανή απαλοιφή ή από πιο πολύπλοκους αριθμητικούς αλγορίθμους [5-7]. Λόγω της απλότητας της μεθόδου, μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλη ποικιλία προβλημάτων. Επίσης η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι εύκολη στον προγραμματισμό και οι προσομοιώσεις με υπολογιστή μπορούν να παρέχουν γρήγορους υπολογισμούς [7].

3.1.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Σε αντίθεση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (FDM), η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι μια σχετικά νέα τεχνική, που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ροής ρευστών. Έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής στη δεκαετία του '60 μαζί με την εμφάνιση των ψηφιακών υπολογιστών τσέπης [8]. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), είναι μια μέθοδος στην οποία ολόκληρη η γεωμετρία που μοντελοποιείται, πρέπει να διαχωρίζεται σε κόμβους και στοιχεία [9,10]. Το πλέγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 αντιπροσωπεύει τον διαχωρισμό που απαιτείται, ώστε να μοντελοποιηθεί μια δισδιάστατη γεωμετρία με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Μόλις δημιουργηθεί το πλέγμα, οι διαφορικές εξισώσεις ξαναγράφονται σε διακριτή μορφή και εφαρμόζονται σε κάθε κομβικό σημείο. για να προκύψει ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), έχει την δυνατότητα να μοντελοποιήσει πολύ πιο πολύπλοκες μορφές από τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (FDM). Μπορεί επίσης να παρέχει αρκετά ακριβείς λύσεις στις τοπικές μεταβλητές του ρευστομηχανικού μοντέλου, όπως είναι η ταχύτητα και η πίεση του ρευστού.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) χρησιμοποιείται εκτενώς κατά τη προσομοίωση ροής ιξωδοελαστικών υλικών. Παραδείγματος χάριν, στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η διόγκωση πλαστικού σωλήνα από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας κατά την εξώθηση από μια συγκλίνουσα μήτρα [11,12].



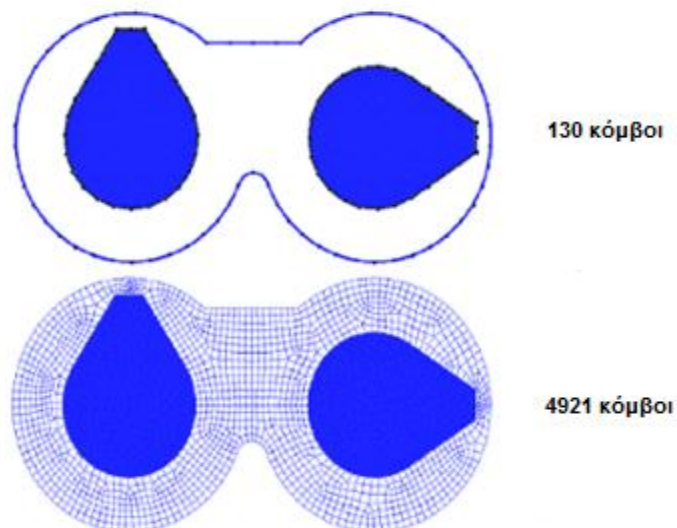
Σχήμα 3.2: Προβλεφθείσα διόγκωση κατά την εξώθηση του HDPE μέσω συγκλίνουσας μήτρας

Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι ιδανική, για την προσομοίωση διαδικασιών πλήρωσης καλουπιών, προσανατολισμού ινών, συρρίκνωση και στρέβλωση λεπτών πλαστικών μερών [13-20]. 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 μεταλλασσόμενης περιοχής 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.

3.1.3 Μέθοδος συνοριακών στοιχείων

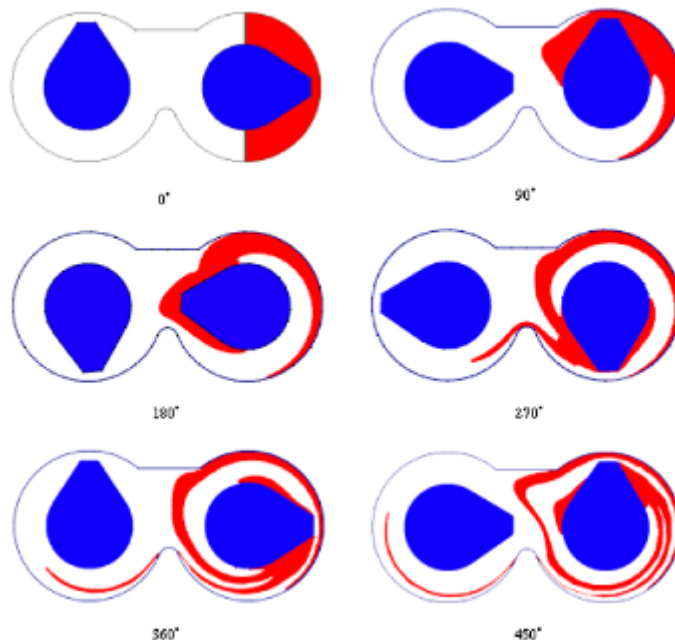
Σε αντίθεση με τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών (FDM) και πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM) απαιτεί μόνο τα όρια των επιφανειών της γεωμετρίας να είναι διακριτά. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, μια δισδιάστατη γεωμετρία απαιτεί μόνο τη διάκριση της καμπύλης που αποτελεί το όριο του τμήματος. Στο Σχήμα 3.3 συγκρίνονται οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και συνοριακών στοιχείων (BEM) ενός δισδιάστατου μοντέλου εσωτερικού αναμείκτη (internal batch mixer) [21-24].

Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM) έγινε δημοφιλής περίπου την ίδια χρονική περίοδο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), αλλά εξαιτίας των σχετικά πολύπλοκων μαθηματικών εργαλείων που απαιτεί, δεν έγινε ευρέως αποδεκτή στους κύκλους των μηχανικών, όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Η διατύπωση της μεθόδου των συνοριακών στοιχείων (BEM) ξεκινά με μια διαφορετική μορφή των διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες εκφράζονται με όρους χωρικών ολοκληρωμάτων [22]. Αυτά τα ολοκληρώματα ανάγονται μέσω του θεωρήματος Green-Gauss σε συνοριακά ολοκληρώματα. Τα ολοκληρώματα επιλύονται αριθμητικά καταλήγοντας σε αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων. Έχει ενδιαφέρον, το γεγονός, ότι μέχρι το σημείο της επίλυσης των ολοκληρωμάτων, δεν γίνονται προσεγγίσεις στις διαφορικές εξισώσεις [24,25]. Κατά συνέπεια, η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM), παρουσιάζει σε ορισμένους τύπους προβλημάτων, μεγαλύτερη αριθμητική ακρίβεια σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (FDM) ή τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) [26,27].



Σχήμα 3.3: Σύγκριση των BEM και FEM ενός 2D (πλήρως γεμισμένου) εσωτερικού αναμίκτη

Μια τυπική προσομοίωση μίξης μέσα σε εσωτερικό αναμίκτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Πρέπει να αναφερθεί ότι, προς το παρόν, όλες οι αναλύσεις μίξης που πραγματοποιούνται σε εσωτερικούς αναμίκτης αναπαριστούν μια πλήρη κοιλότητα ανάμιξης. Εντούτοις, μια διαδικασία ανάμιξης εξαρτάται σημαντικά από το ποσοστό πλήρωσης του αναμίκτη [22].



Σχήμα 3.4: Προσομοίωση της παραμόρφωσης των περιοχών κατά τη διάρκεια της μίξης

3.1.4 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων (FVM)

Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (FVM) εφαρμόζει τις αρχές διατήρησης (μάζας, ορμής, ενέργειας) σε έναν σταθερό όγκο ελέγχου (κελί), και οι ολοκληρωτικές μορφές των διαφορικών εξισώσεων λύνονται στη φυσική περιοχή [28-30]. Η περιοχή υποδιαιρείται σε μικρούς όγκους ελέγχου, και οι μεταβλητές των τομέων πέρα από έναν συγκεκριμένο όγκο ελέγχου αποτιμώνται είτε ως μέσος όρος των τιμών των μεταβλητών στο κέντρο του κελιού (ένα σχέδιο κεντροθετημένου κελιού πεπερασμένων όγκων) είτε ως τιμές στις γωνίες του κελιού (ένα σχέδιο κομβικού σημείου πεπερασμένων όγκων) [29]. Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (FVM) είναι ένας ιδιαίτερος τύπος της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών (FDM). Εντούτοις, η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (FVM) έχει ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (FDM), είναι ιδιαιτέρως κατάλληλη να εφαρμοστεί σε ιδιαίτερα ακανόνιστα και περίπλοκα σχήματα, χρησιμοποιώντας αυθαίρετα μικρά κελιά.[28].

3.1.5 Επιλογή Αριθμητικής Μεθόδου

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκε, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και ειδικότερα το εμπορικό υπολογιστικό πακέτο Comsol 3.5, το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα επίλυσης σύνθετων φυσικών φαινομένων. Συνοδεύεται από βιβλιοθήκη έτοιμων μοντέλων και από CAD εργαλεία για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του προβλήματος, ενώ έχει την δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος και απεικόνισης των αποτελεσμάτων. Ουσιαστικά αποτελεί εργαλείο για την επίλυση καλά ορισμένων συστημάτων μερικών διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν ένα ή πολλά φυσικά φαινόμενα συγχρόνως, με την καθιερωμένη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το υπολογιστικό πακέτο Comsol 3.5 έχει άμεση διασύνδεση με το εμπορικό πρόγραμμα SolidWorks, το οποίο είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό CAD/CAE/CAM.

3.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ COMSOL

Το **COMSOL** είναι ένα υπολογιστικό πακέτο το οποίο βασιζόμενο στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) επιλύει προβλήματα που περιγράφονται μαθηματικά από μερικές διαφορικές εξισώσεις. Το λογισμικό προσφέρει την δυνατότητα επίλυσης σύνθετων φυσικών φαινομένων. Αντιμετωπίζει προβλήματα ρεολογίας, μεταφοράς μάζας, προβλήματα δυναμικής και στατικής ανάλυσης κατασκευών συζευγμένα με ροϊκά ή/και θερμοκρασιακά φαινόμενα, ηλεκτρο-θερμοκρασιακά φαινόμενα, προβλήματα ηλεκτρομαγνητισμού, οπτικής και ακουστικής, ενώ εφαρμογές του συναντώνται σε πεδία όπως τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα, τα ηλεκτρολυτικά κελιά και οι κυψέλες καυσίμου [31-37].

Το **COMSOL** έχει σχεδιαστεί για την μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων χωρίς να απαιτούνται από τον ερευνητή προγραμματιστικές ικανότητες, αναλυτική γνώση και καταγραφή των σύνθετων και πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τα παραπάνω φαινόμενα. Το λογισμικό προσφέρει έτοιμες αυτές τις εξισώσεις (application modes), ενώ δίνει την δυνατότητα τροποποίησης ώστε να ανταποκρίνονται επακριβώς στο προς μελέτη πρόβλημα. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής εξισώσεων, όπως επίσης και συνδυασμός τους με έτοιμες εξισώσεις που προσφέρει το λογισμικό. Συνοδεύεται από βιβλιοθήκη έτοιμων μοντέλων και από CAD εργαλεία για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του προβλήματος ενώ έχει την δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος και απεικόνισης των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, με την χρήση του Comsol Script υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου και τροποποίησης των μοντέλων μέσω γραμμής εντολών (Command Line), αλλά και περαιτέρω ανάλυσης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων.

3.3 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ-ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SOLIDWORKS

Το λογισμικό SolidWorks είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό CAD/CAECAM-Flow, το οποίο είναι προσανατολισμένο κυρίως στον τομέα του ολοκληρωμένου σχεδιασμού μηχανημάτων και ενδείκνυται τόσο για δισδιάστατα (2D) όσο και για τρισδιάστατα (3D) σχέδια, αλλά και στην εναλλαγή μεταξύ τους [38]. 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 διδιάστατου (2-D) παραδοσιακού σχεδίου του μηχανικού, αλλά κυρίως στην περίπτωση τριδιάστατης (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).

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).

Οι δυνατότητες του λογισμικού είναι πάρα πολλές, μερικές από τις οποίες είναι η μοντελοποίηση εξαρτημάτων και συναρμολογημένων συνόλων με αποτελεσματικότητα, η αυτόματη δημιουργία κατασκευαστικών σχεδίων και η προσομοίωση ρεαλιστικής μετάδοσης κίνησης και μηχανικών αλληλεπιδράσεων. Επίσης σε συνδυασμό με το εργαλείο CosmosWorks προσομοιώνει με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μηχανολογικά προβλήματα. Με το πρόσθετο εργαλείο Flow Simulation προσομοιώνει θερμικά και ρεολογικά προβλήματα.

Έχει ενσωματωμένα εργαλεία για το σχεδιασμό τυποποιημένων μηχανολογικών εξαρτημάτων (ρουλεμάν, τροχοί, κοχλίες κτλ), δημιουργία συγκολλήσεων και μεταλλικών κατασκευών, σχεδίασης μεταλλικών επιφανειών (Sheet Metal) και *καικαλουπιών*.

3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ TAGUCHI

Κάθε πείραμα πρέπει να προγραμματιστεί και να πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε τα συμπεράσματα που εξάγονται να είναι αρκετά και ασφαλή για να βοηθούν στην κατανόηση του φαινομένου που εξετάζεται. Στα πειράματα που μελετάται η συμπεριφορά ενός ή περισσότερων μεγεθών σε συνάρτηση μιας ή περισσότερων μεταβλητών, πρέπει ο μηχανικός-σχεδιαστής να είναι προσεκτικός στην επιλογή της μεθόδου που θα ακολουθήσει. Ειδικά όταν τίθεται θέμα βελτιστοποίησης και βαθμού εξάρτησης των προς μελέτη μεταβλητών, αναζητούνται συμφέρουσες σε χρόνο και κόστος προγραμματισμού πειραμάτων, που διασφαλίζουν ταυτόχρονα τη σωστή μελέτη του φαινομένου. Τέτοιες μέθοδοι είναι οι εξής:

➤ **Προσέγγιση δοκιμής - λάθους**

Με την μέθοδο δοκιμής – λάθους, ο μηχανικός-σχεδιαστής εκτελεί πειράματα δοκιμών. Σε κάθε πείραμα μεταβάλλει και μετρά κατά περίπτωση τα προς μελέτη μεγέθη και καταγράφει τη συμπεριφορά ή και την εξάρτησή τους. Μετά από κάθε πείραμα παρατηρεί και αναλύει τα αποτελέσματα, έτσι ώστε να αποφασίσει πώς να εκτελέσει το επόμενο πείραμα (δηλαδή ποιά παράμετρος πρέπει να μεταβληθεί και πόσο), με το να απορρίψει ή να δεχθεί τις μεταβολές που έχει κάνει. Στόχος της μεθόδου είναι να κατανοήσει την επίδραση των μεταβλητών που εξετάζει 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 διασφαλίσει ότι κατανοεί το προς μελέτη φαινόμενο.

➤ **Σχεδιασμός πειραμάτων**

Ένα μαθηματικά προγραμματισμένο σύνολο πειραμάτων, στο οποίο όλες οι παράμετροι, που μελετάει ο μηχανικός-σχεδιαστής, 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[39,40]. Συχνά αποφασίζει να εκτελέσει ένα υποσύνολο του πλήρους συνόλου πειραμάτων για να εξοικονομήσει χρόνο και κόστος. Έτσι, δεν διασφαλίζει ότι θα εξάγει 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 πραγματοποιήσει πειράματα ελέγχου ή βελτιστοποίησης (εκτός από το συντονισμό των διάφορων οργάνων, των επιτροπών, των ανθρώπων, του εξοπλισμού, των υλικών κ.λπ.)[39-43].

➤ **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 μπορεί ο μηχανικός-σχεδιαστής να εντοπίσει τη βέλτιστη τιμή και το βαθμό επιρροής των μεταβλητών που εξετάζει. Οι «ορθογώνιες σειρές» παρέχουν το ελάχιστο δυνατό σύνολο πειραμάτων, ώστε να εξάγει ασφαλή συμπεράσματα και να βελτιστοποιήσει τις εξεταζόμενες μεταβλητές.

3.4.1 Εισαγωγή στη μέθοδο Taguchi

Ο γενικός στόχος της μεθόδου Taguchi είναι να παραχθεί προϊόν υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος για τον κατασκευαστή. Ο 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 τον Taguchi περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση των ορθογώνιων σειρών για να οργανώσει τις παραμέτρους που επιδρούν στη διαδικασία. Η μέθοδος Taguchi εξετάζει τα ζευγάρια των συνδυασμών και όχι όλους τους πιθανούς

συνδυασμούς. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτρέπει τη συλλογή τόσων απαραίτητων στοιχείων όσων χρειάζονται για να καθοριστεί 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 επιλεγθούν νέες τιμές παραμέτρων, για να βελτιστοποιηθούν περαιτέρω οι 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 [44-45].

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.

3.4.2 Φιλοσοφία της μεθόδου Taguchi

Η φιλοσοφία της μεθόδου Taguchi είναι η εξής:

- 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 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 η δυσαρέσκεια πελατών αποθαρρύνει τη μελλοντική εμπιστοσύνη στα προϊόντα του, αυτό το κόστος στον πελάτη και την κοινωνία θα επιστρέψει στον παραγωγό.

3.4.3 Σχεδιασμός πειραμάτων με τη μέθοδο Taguchi

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

- 1) Καθορισμός του στόχου της διαδικασίας και πιο 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, επιλέγεται η κατάλληλη ορθογώνια σειρά. Στη συνέχεια συμπληρώνεται η ορθογώνια σειρά με βάση τις τιμές που έχουν επιλεγεί, ορίζοντας έτσι την εκτέλεση κάθε πειράματος.
- 4) Εκτέλεση των πειραμάτων με βάση τον πίνακα Taguchi που καταρτίστηκε παραπάνω και καταγραφή των απαραίτητων μεγεθών.
- 5) Επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης.
- 6) Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των πειραμάτων χρησιμοποιούνται σε περαιτέρω ανάλυση με άλλες μεθόδους, π.χ. ANOVA

Ένα βασικό σημείο στην ανάλυση είναι η επιλογή σωστής ορθογώνιας σειράς. Αφού επιλεχθούν οι παράμετροι ελέγχου, στη συνέχεια ορίζονται τα επίπεδα τιμών. Εάν η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής μιας παραμέτρου είναι μεγάλη, οι τιμές που εξετάζονται μπορούν να επανεξεταστούν με νέα πειραματική σειρά αν κριθεί απαραίτητο [45]. Γενικά, ο αριθμός επιπέδων για όλες τις παραμέτρους στον πειραματικό σχεδιασμό επιλέγεται να είναι ο ίδιος, για να βοηθήσει στην επιλογή της κατάλληλης ορθογώνιας σειράς.

3.5 ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Κατά την εκβολή των πλαστικών μέσα από κατάλληλες μήτρες, οι διαφορετικές ταχύτητες του πολυμερικού τήγματος σε συγκεκριμένη διατομή του ροϊκού σωλήνα οδηγούν στη δημιουργία «γραμμών συγκόλλησης» εντός του πολυμερικού τήγματος που έχουν δυσμενείς συνέπειες στις τελικές μηχανικές ιδιότητες του πλαστικού σωλήνα [46-49]. Επομένως μεγαλύτερη ομοιομορφία στην ταχύτητα εξόδου συνεπάγεται αυξημένη μηχανική αντοχή του στερεοποιημένου πολυμερούς, δηλαδή των πλαστικών σωλήνων που παράγονται.

Στόχος της παρούσας διδακτορικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση μήτρας εκβολής πολυμερούς για την παραγωγή σωλήνα από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην ταχύτητα εξόδου και συνεπώς αυξημένη μηχανική αντοχή του πλαστικού σωλήνα. Σαν μεταβλητή εξόδου βελτιστοποίησης της ροής, λαμβάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο του πολυμερούς στην έξοδο από την μήτρα και επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) υπολογίζει το αντίστροφο του συντελεστή διασποράς, δηλαδή το λόγο U_m/U_s , όπου U_m και U_s είναι αντίστοιχα η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας εξόδου του πολυμερικού ρευστού από τη μήτρα εκβολής [45,50]. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) της ταχύτητας εξόδου ορίζεται αναλυτικά ως:

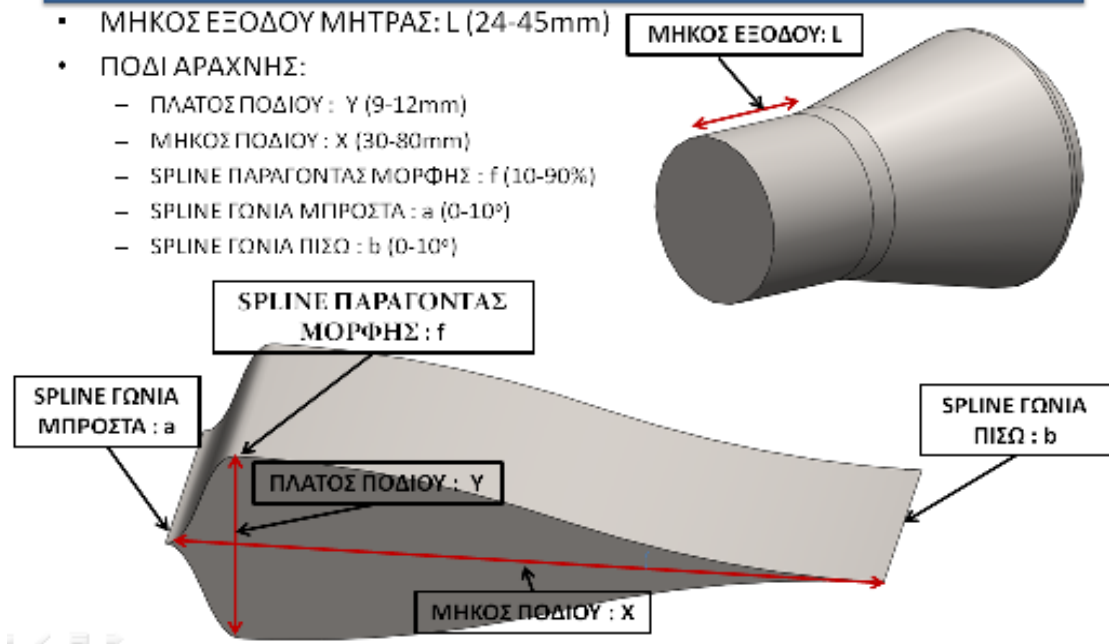
$$SNR_U = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_m^2}{U_s^2} \right)$$

Ως παράμετροι βελτιστοποίησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 επιλέγονται συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μήτρας εκβολής. Συνολικά επιλέγονται έξι παράμετροι βελτιστοποίησης, από τις οποίες η μια είναι το μήκος εξόδου της μήτρας και οι άλλες πέντε σχετίζονται με τη γεωμετρία της κεφαλής αράχνης της μήτρας εκβολής.

- Το μήκος εξόδου L της μήτρας (L)
- 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).

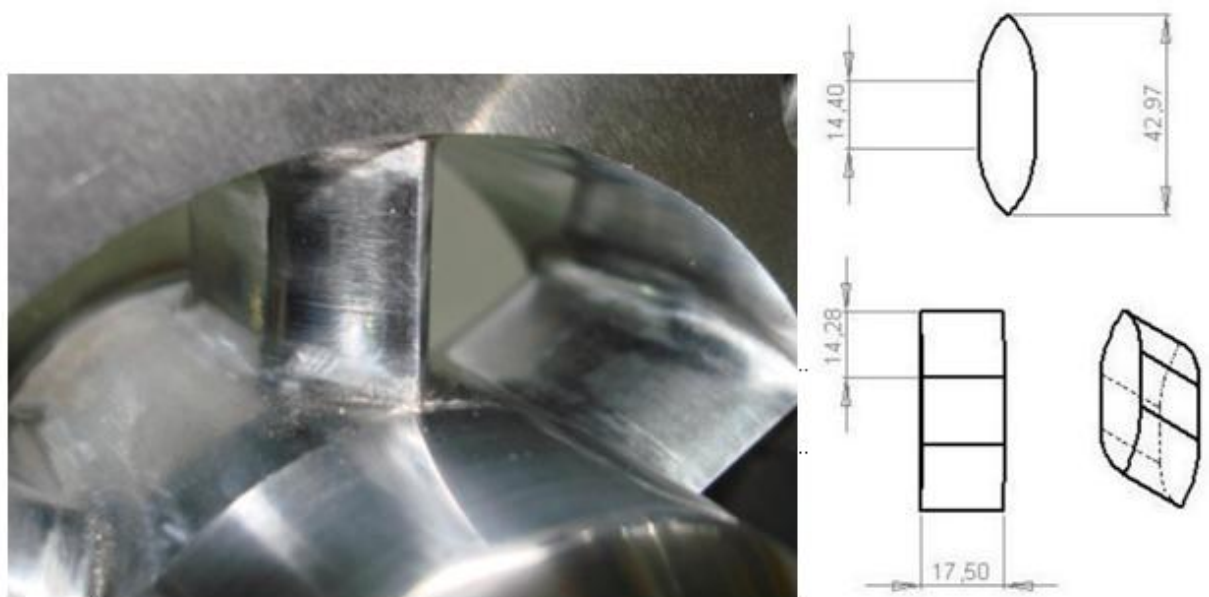
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

- ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΜΗΤΡΑΣ: L (24-45mm)
- ΠΟΔΙ ΑΡΑΧΝΗΣ:
 - ΠΛΑΤΟΣ ΠΟΔΙΟΥ: Y (9-12mm)
 - ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ: X (30-80mm)
 - SPLINE ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΜΟΡΦΗΣ: f (10-90%)
 - SPLINE ΓΩΝΙΑ ΜΠΡΟΣΤΑ: a (0-10°)
 - SPLINE ΓΩΝΙΑ ΠΙΣΩ: b (0-10°)



Σχήμα 3.5: Παράμετροι βελτιστοποίησης

Το μήκος εξόδου της μήτρας κυμαίνεται από 24-45mm. Τα πόδια της αράχνης δεν πρέπει να είναι μακρύτερα από 30-80mm και παχύτερα από 9-12mm. 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 $10\% \leq f \leq 90\%$, $5^\circ \leq a \leq 10^\circ$ και $5^\circ \leq b \leq 10^\circ$. Η γεωμετρία του ποδιού της αράχνης στην μήτρα εκβολής που θα βελτιστοποιηθεί φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.6):



Σχήμα 3.6: Πόδι αράχνης

Το πόδι της αράχνης αποτελείται από τέσσερις συμμετρικές καμπύλες β' βαθμού και ένα ευθύγραμμο τμήμα. Η επιφάνεια του ποδιού της αράχνης ακολουθεί την γεωμετρία μιας spline τρίτου βαθμού με χαρακτηριστικά των οποίων οι τιμές θα βελτιστοποιηθούν (η θέση του μέγιστου σαν ποσοστό του X (f), η γωνία εκκίνησης της spline (a) και η γωνία τερματισμού της spline (b)).

Οι τιμές των μεταβλητών εξόδου του αρχικού μοντέλου, αλλά και οι βέλτιστες των εξεταζόμενων παραμέτρων θα υπολογιστούν με μία σειρά προσομοιώσεων όπου θα χρησιμοποιηθούν τα λογισμικά πακέτα SolidWorks και Comsol.

3.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ

3.6.1 Παράμετροι Προσομοίωσης

Το πολυμερές το οποίο διαμορφώνεται στην μήτρα επιλέγεται να είναι το πολυαιθυλένιο, λόγω της ευρείας χρήσης του στην βιομηχανία, με ιδιότητες που φαίνονται στον Πίνακα 3.1:

- **Ιδιότητες πολυαιθυλενίου**

Ιδιότητες	Units/SI	B5823	Test method
(MFR)			ISO 1133
190 °C, 2.16 Kg	dg/m	0.16	
190 °C, 5 Kg	dg/m	0.89	
190 °C, 21.6 Kg	dg/m	23	
Πυκνότητα	kg/m ³	958	ISO 1183

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες πολυαιθυλενίου

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες της ροής είναι :

- **Αρχικές συνθήκες ροής**

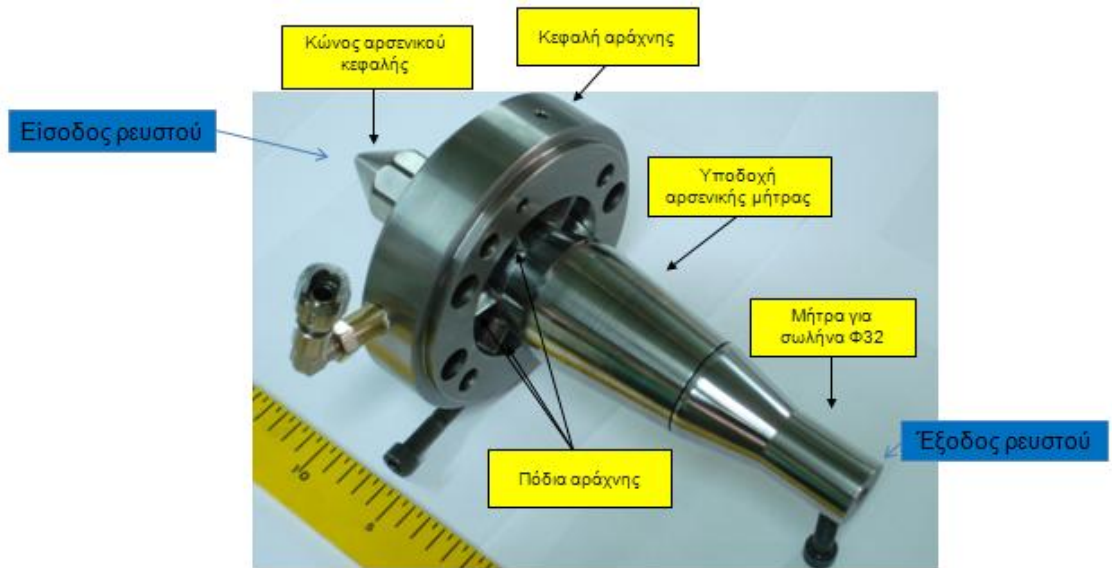
Θερμοκρασία (°C)	196
Πίεση (bar)	1,013 (ατμοσφαιρική)

Πίνακας 3.2: Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης ροής

- **Οριακές συνθήκες ροής**

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

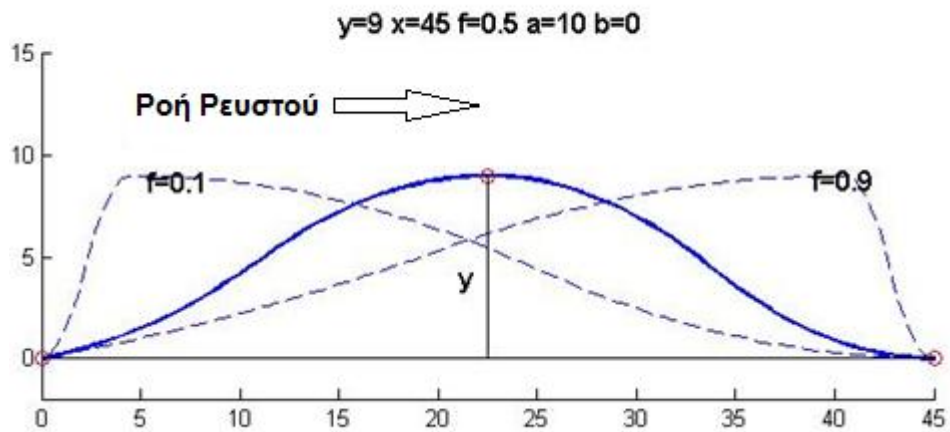
Πίνακας 3.3: Οριακές συνθήκες προσομοίωσης ροής



Σχήμα 3.7: Είσοδος-Εξοδος ρευστού από την μήτρα

3.6.2 Προσομοίωση πειραμάτων βελτιστοποίησης

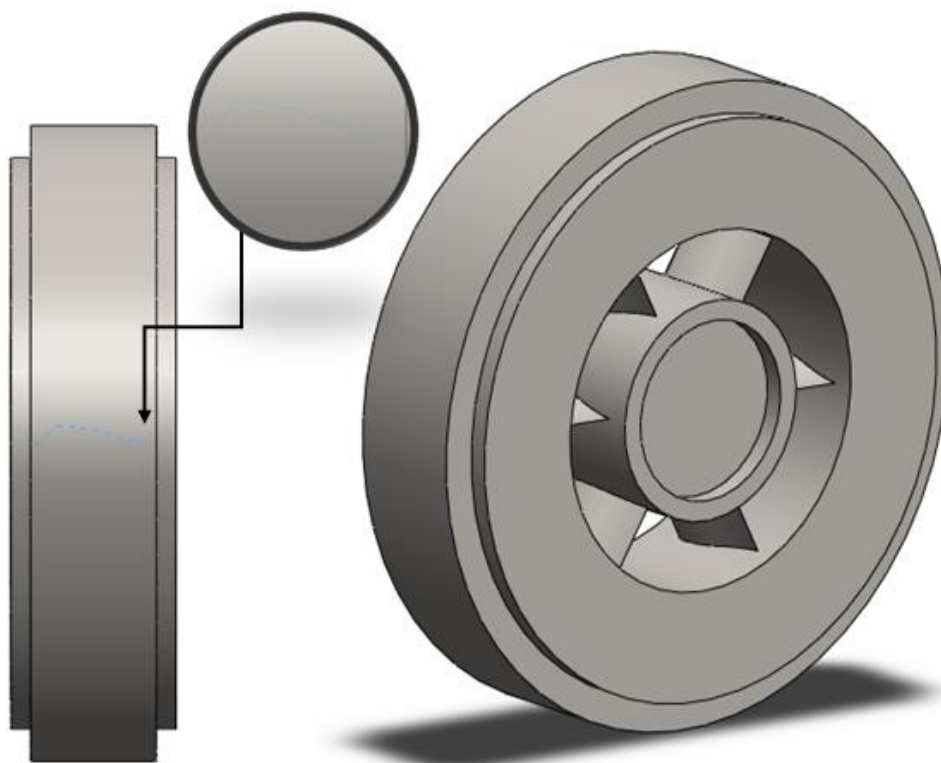
Κατ' αρχάς, ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων της πρώτης προσομοίωσης από την πρώτη γραμμή του πίνακα Taguchi που επιλέγεται κάθε φορά με βάση την εμπειρία του σχεδιαστή. Χρησιμοποιώντας τον κώδικα Matlab σχεδιάζεται η καμπύλη για την κεφαλή της αράχνης της πρώτης προσομοίωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8 :



Σχήμα 3.8: Καμπύλη spline της κεφαλής αράχνης της αριθμητικής προσομοίωσης

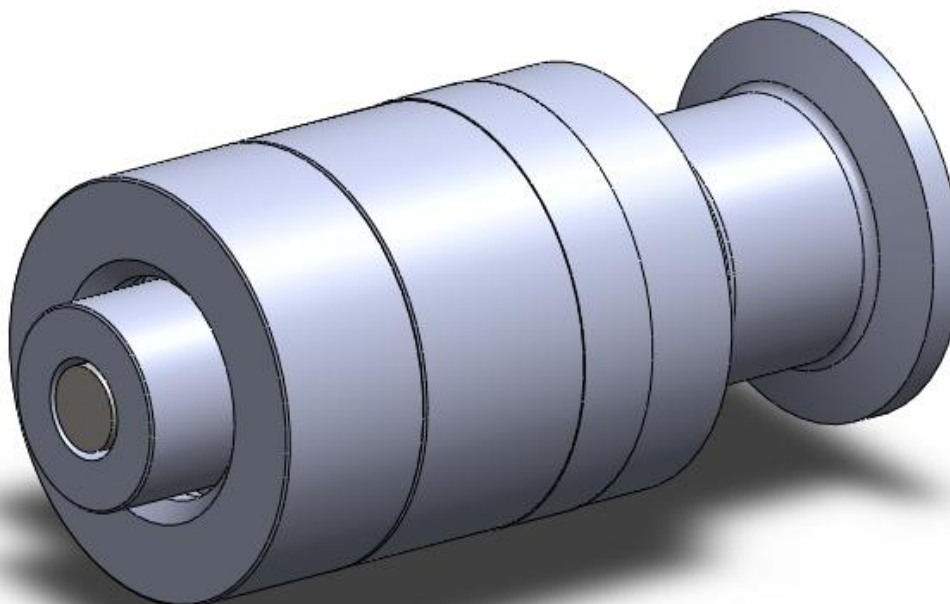
Με τη βοήθεια του παραρτήματος Α, όπου βρίσκονται οι πλήρεις διαστάσεις της μήτρας εκβολής του πλαστικού σωλήνα, χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks σχεδιάζεται η κεφαλή της αράχνης, με τη βοήθεια των τιμών της καμπύλης spline.

....

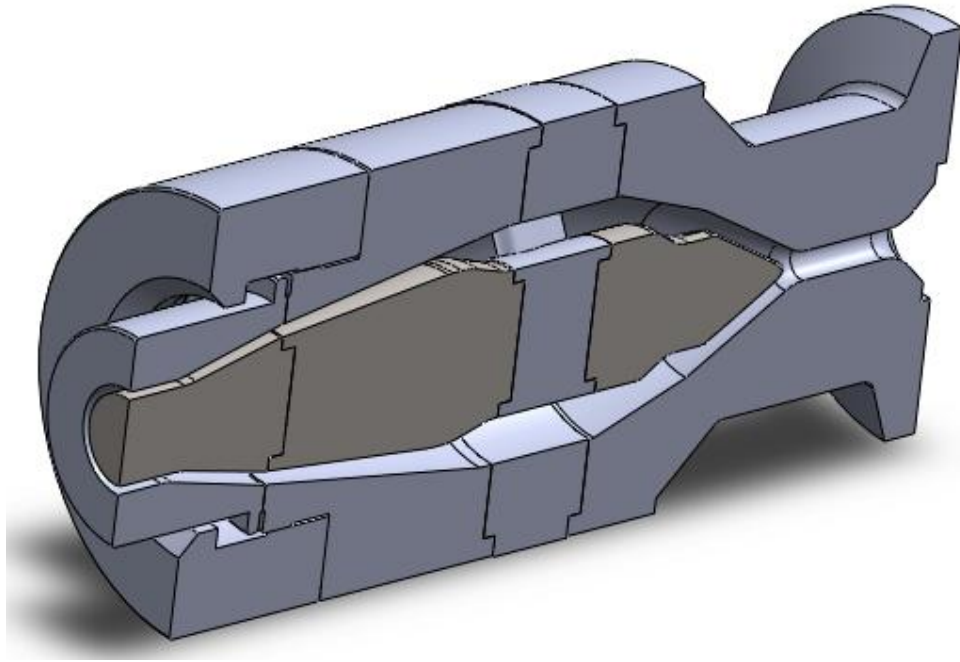


Σχήμα 3.9: Κεφαλής αράχνης της 1^{ης} προσομοίωσης

Στη συνέχεια, σχεδιάζονται τα υπόλοιπα μέρη της μήτρας εκβολής. Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται η μήτρα εκβολής της 1^{ης} προσομοίωσης όπου τα διάφορα μέρη της έχουν συνδεθεί με την βοήθεια της εντολής assembly ενώ στο Σχήμα 3.11 φαίνεται η τομή της.

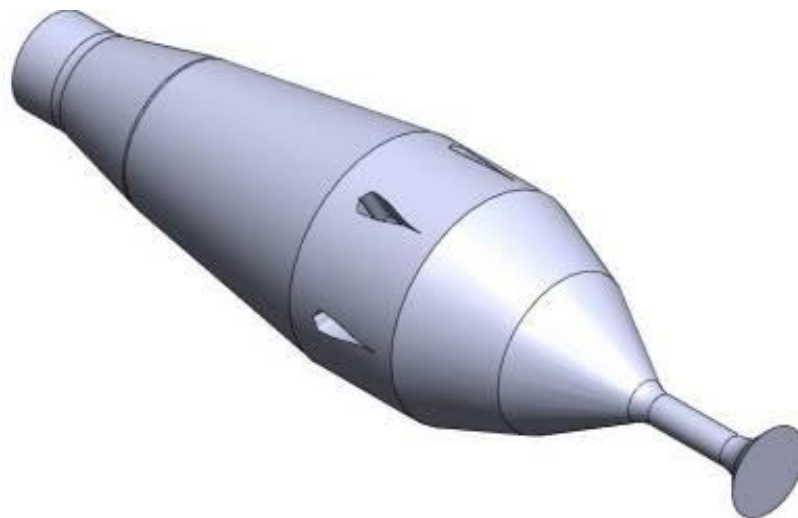


Σχήμα 3.10: Μήτρα εκβολής της 1ης προσομοίωσης



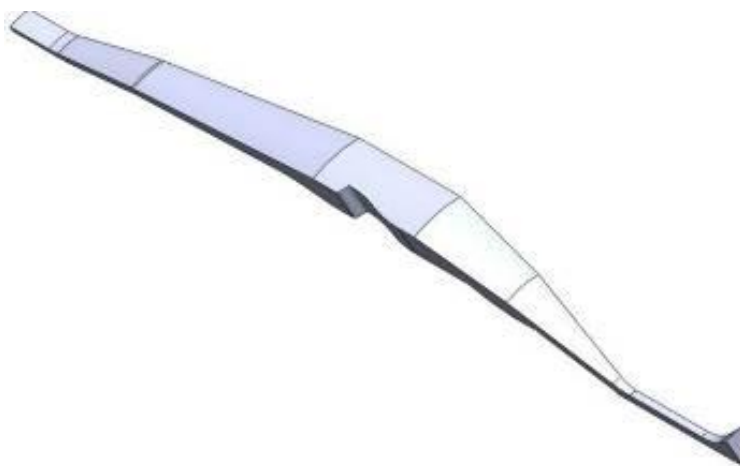
Σχήμα 3.11: Μήτρα εκβολής της 1ης προσομοίωσης σε τομή

Χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks, αλλά και το πρόσθετο Flow Simulation, απομονώνεται το ρευστό της μήτρας.



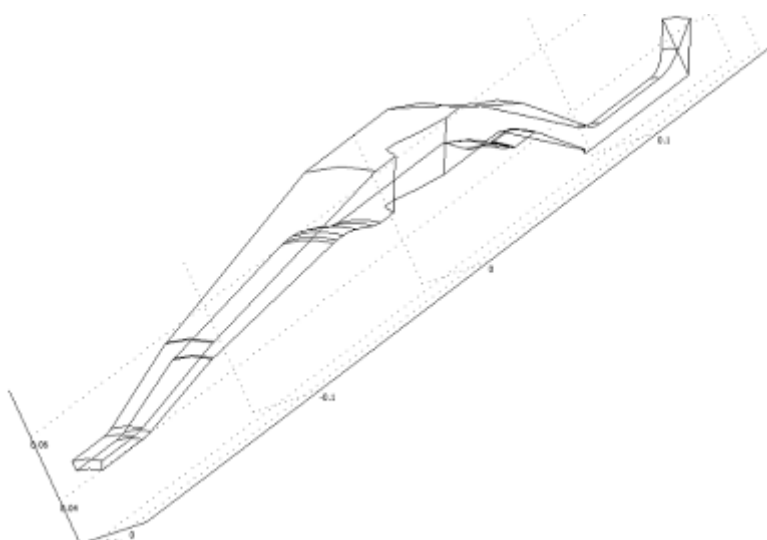
Σχήμα 3.12: Ο κενός χώρος της μήτρας εκβολής

Από το Σχήμα 3.12, φαίνεται ότι τα έξι (6) «πόδια αράχνης» (6 υποστηρίγματα) είναι συμμετρικά τοποθετημένα στον ροϊκό σωλήνα και έχουν συμμετρία στη μορφή. Με βάση αυτή τη λογική, απομονώνεται με τη βοήθεια του SolidWorks το ένα δωδέκατο (1/12) του συνολικού κενού χώρου του ρευστού.



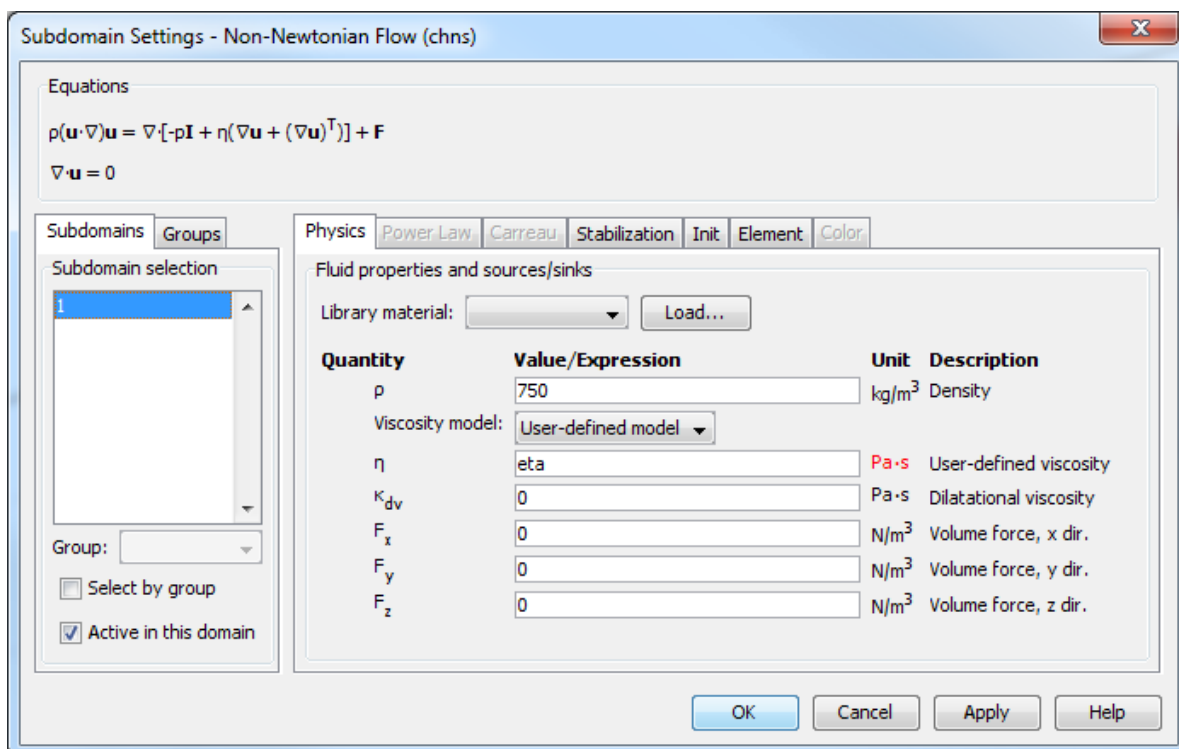
Σχήμα 3.13: Συμμετρικό σχήμα κενού χώρου της μήτρας εκβολής κατά 1/12

Το μοντέλο αυτό αποθηκεύεται σε μορφή .iges και η γεωμετρία του εισάγεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Comsol, ώστε να επιλυθεί το ρευστομηχανικό και θερμικό πρόβλημα.

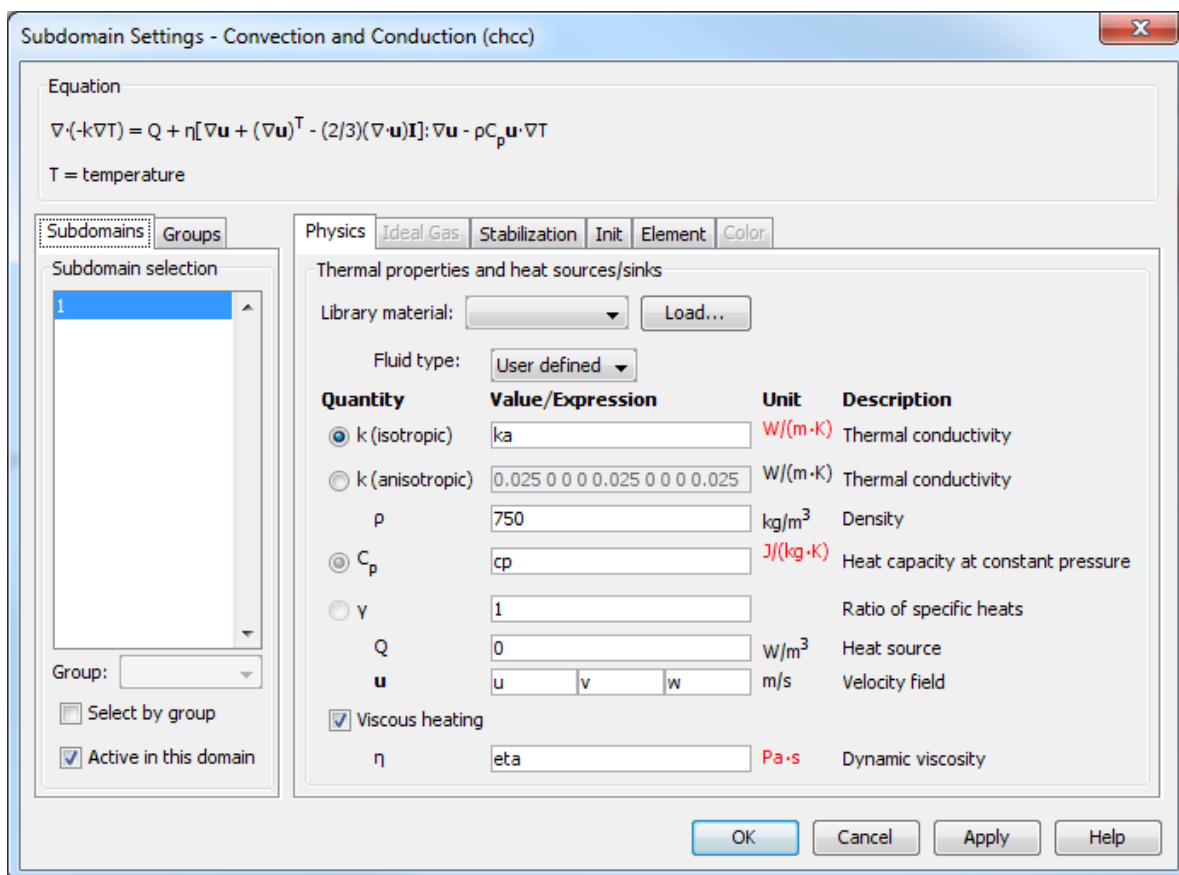


Σχήμα 3.14: Εισαγωγή γεωμετρίας στο Comsol

.... Στη συνέχεια καθορίζονται οι φυσικές και θερμικές ιδιότητες του πολυμερικού ρευστού, το οποίο θεωρείται μη νευτώνειο ρευστό [46,47] :

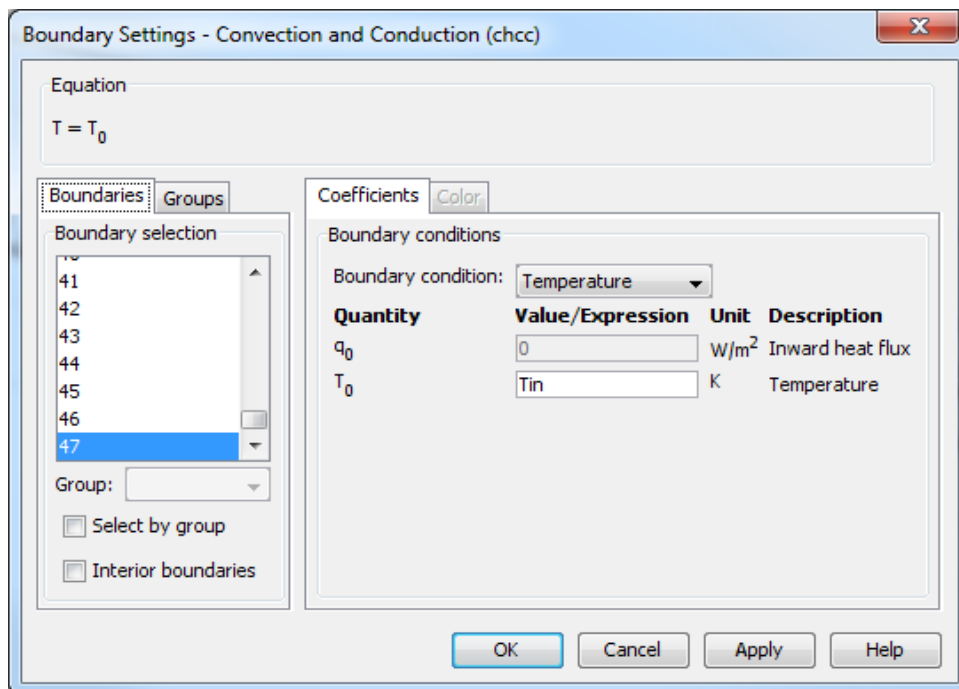


Σχήμα 3.15: Ιδιότητες μη νευτωνικού ρευστού

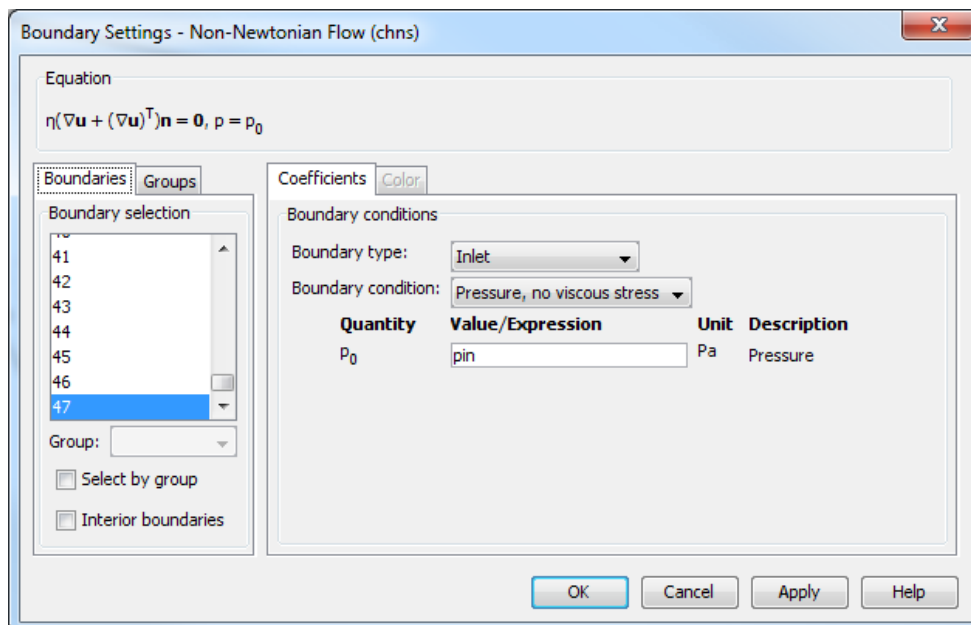


Σχήμα 3.16: Θερμικές ιδιότητες του ρευστού στο πρόβλημα

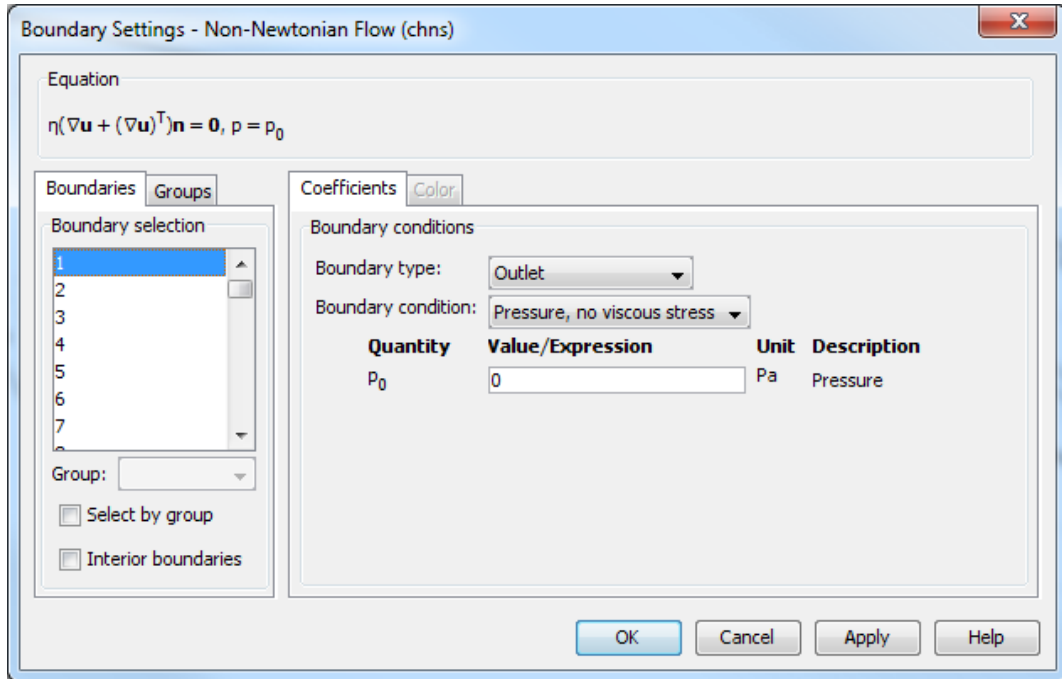
Ακολουθεί, ο ορισμός των οριακών συνθηκών στο ρευστομηχανικό και θερμικό μοντέλο. Μια σημαντική οριακή συνθήκη είναι το γεγονός ότι η ταχύτητα ενός ρευστού κοντά σε στερεό τοίχωμα είναι ίση με την ταχύτητα του τοιχώματος. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, επειδή το τοίχωμα είναι ακίνητο (τοιχώμα μήτρας) η ταχύτητα είναι μηδέν πάνω στα τοιχώματα (συνθήκη μη ολίσθησης – no slip). Τέλος, ορίζεται συμμετρία (symmetry) στις επιφάνειες που έχουν “κοπεί” λόγω της συμμετρίας των 30°.



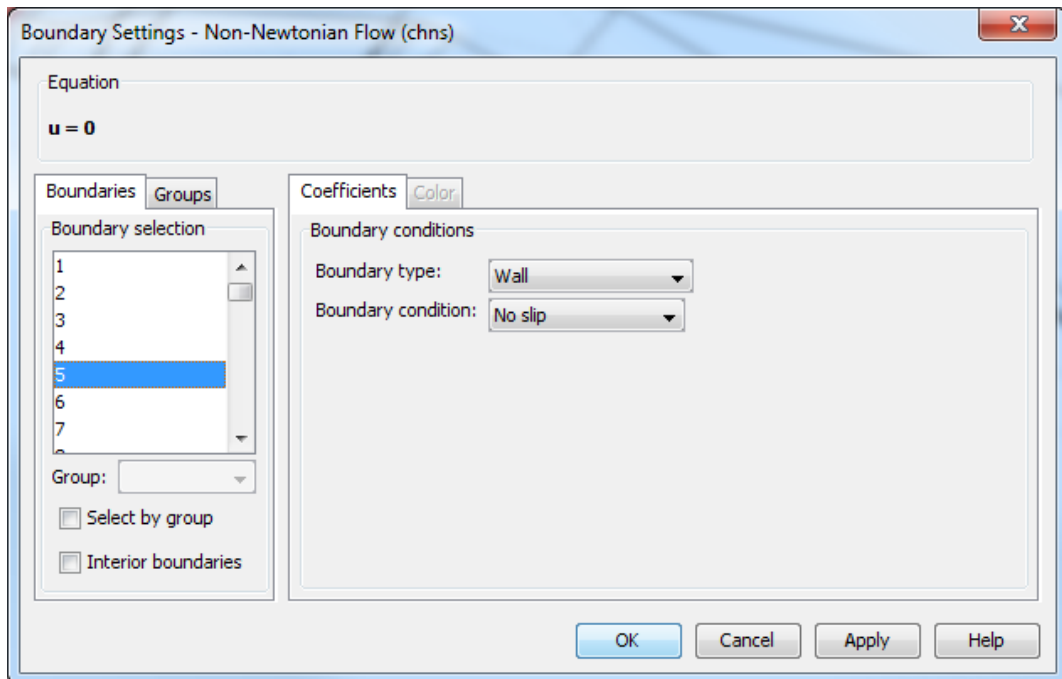
Σχήμα 3.17: Προσδιορισμός θερμοκρασίας εισόδου



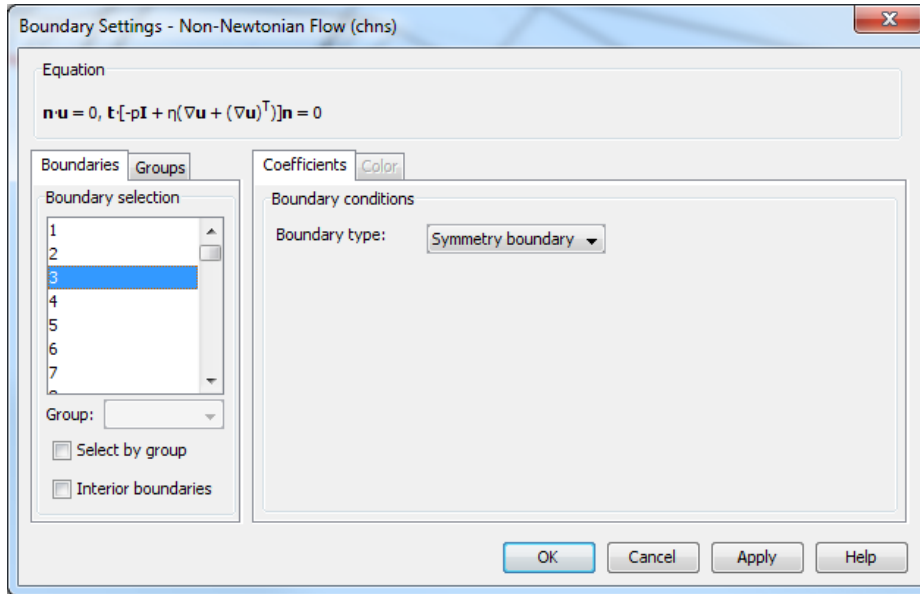
Σχήμα 3.18: Προσδιορισμός πίεσης εισόδου



Σχήμα 3.19: Προσδιορισμός πίεσης εξόδου (σχετικές μανομετρικές πιέσεις, ως προς την ατμοσφαιρική πίεση)



Σχήμα 3.20: Εφαρμογή συνθήκης μη ολίσθησης

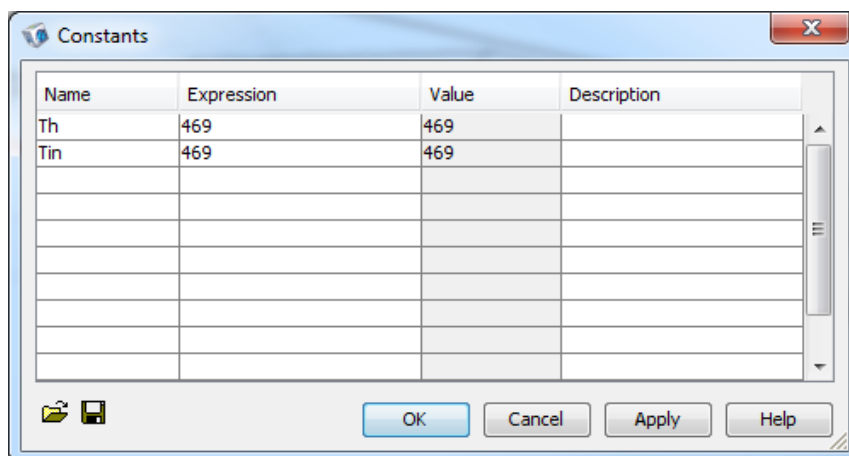


Σχήμα 3.21: Εφαρμογή συνθήκης συμμετρίας

Επίσης καθορίζονται ορισμένες παράμετροι του ρευστομηχανικού προβλήματος, είτε ως σταθερός αριθμός, όπως η θερμοκρασία στην είσοδο της μήτρας, είτε με μαθηματικές εκφράσεις, όπως το ιξώδες ή η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού υπό σταθερή πίεση (c_p) και η ειδική αγωγιμότητα (k_a). Οι δύο τελευταίες θερμοκτικές μεταβλητές, καθορίζονται ως πολυώνυμα της θερμοκρασίας, ενώ το ιξώδες ακολουθεί το μοντέλο Carreau [46,47.51]. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο το ιξώδες του υλικού (πολυαιθυλένιο) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

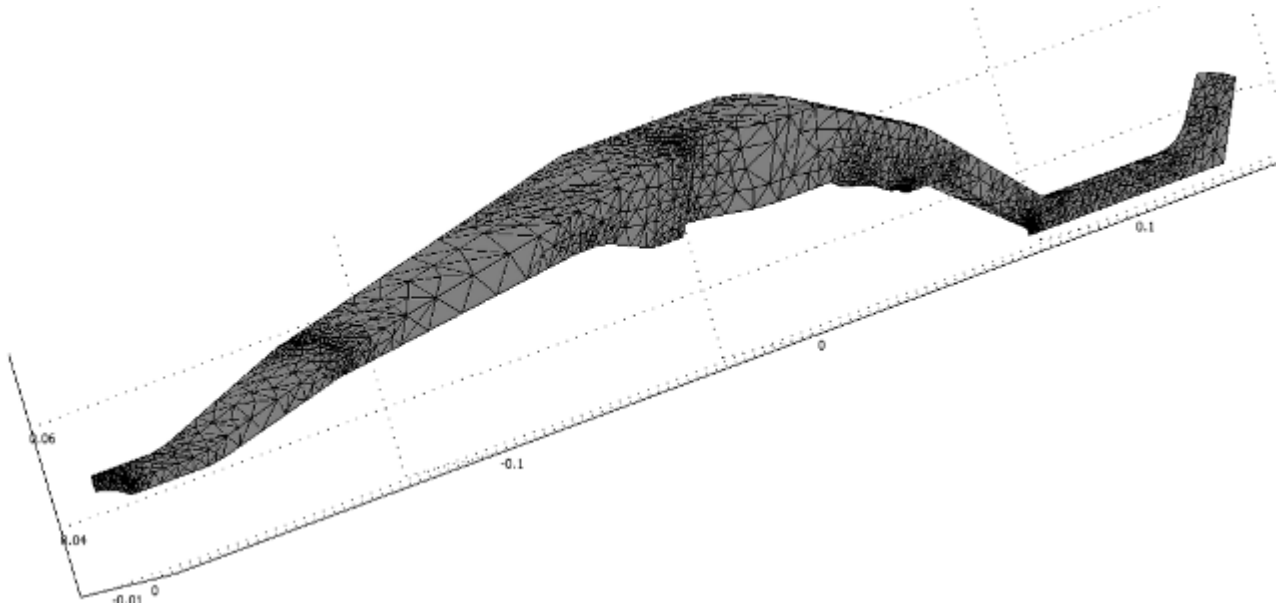
$$n = a_T n_0 (T_R) [1 + (a_T \dot{\lambda} (T_R) \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2}$$

Όπου n_0 είναι το ιξώδες για μηδενικές διατμητικές τάσεις, $\dot{\lambda}$ είναι η σταθερά του χρόνου, no εκθέτης Power Law και a_T είναι ο συντελεστής μετατόπισης και δίνεται από τη σχέση $a_T = \exp[E_o / R(1/T - 1/T_R)]$, E_o είναι η ενέργεια ενεργοποίησης της ροής (flow activation energy), R η παγκόσμια σταθερά αερίων και T_R η θερμοκρασία αναφοράς.



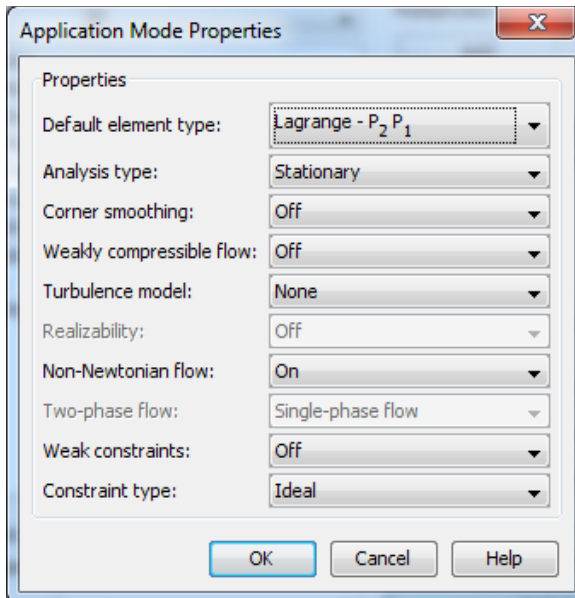
Σχήμα 3.22: Καθορισμός σταθεράς θερμοκρασίας

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

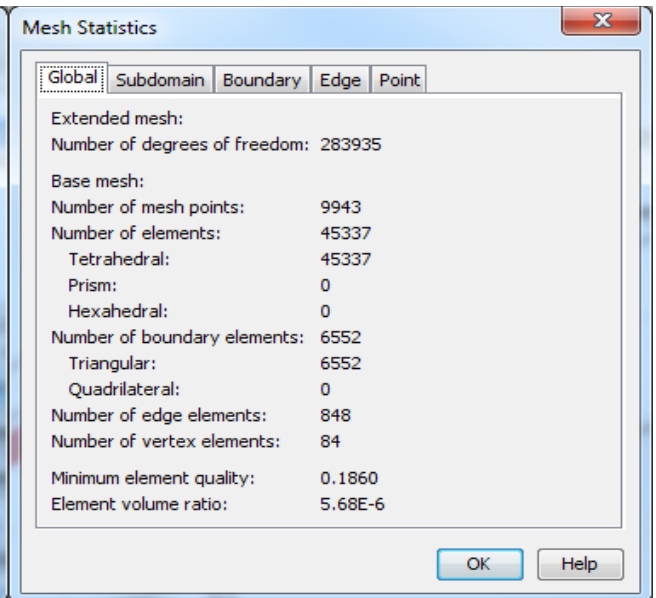


Σχήμα 3.23: Καθορισμός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

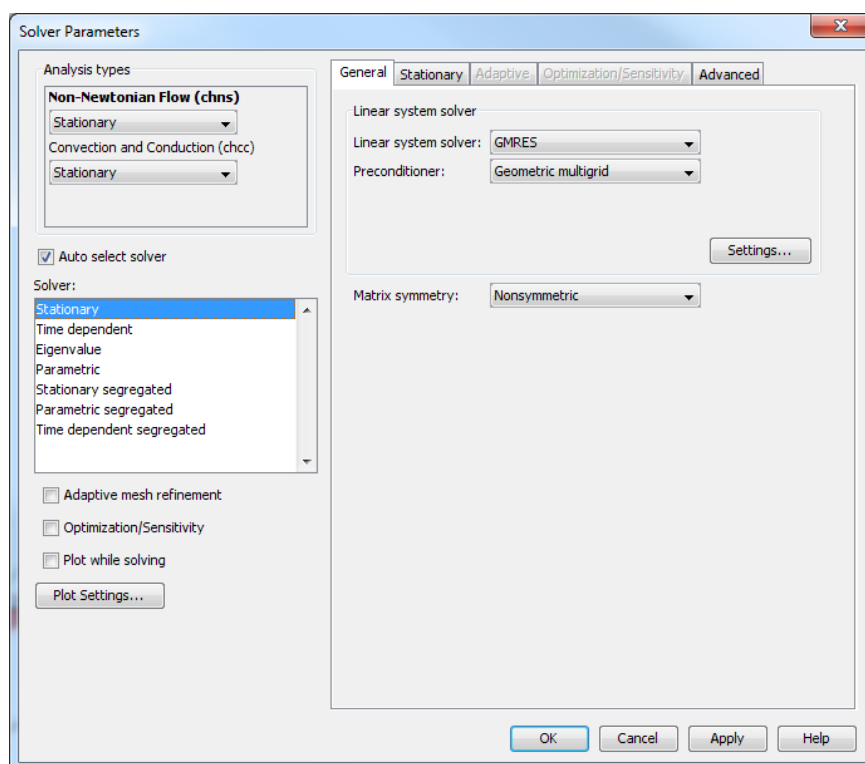
Στις επόμενες εικόνες αναλύεται ο τρόπος ορισμού των πεπερασμένων στοιχείων, το είδος που χρησιμοποιήθηκε (Lagrange - P₂ P₁, τετραεδρικά) και ο αλγόριθμος (GMRES, επίλυση αραιών μητρώων) που ακολουθήθηκε για την επίλυση των αλγεβρικών συστημάτων που προέκυψαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων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



Σχήμα 3.24: Ιδιότητες της εφαρμογής

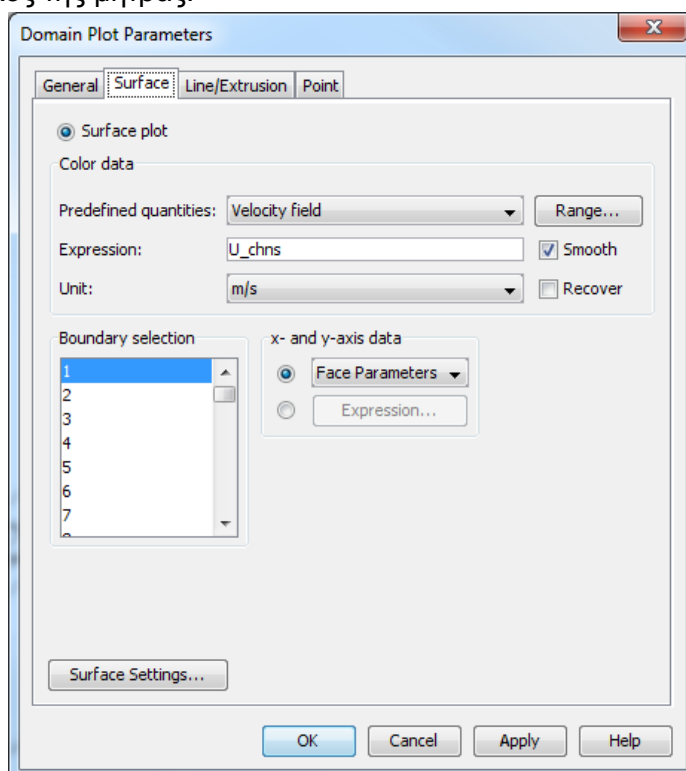


Σχήμα 3.25: Στατιστικά του πλέγματος



Σχήμα 3.26: Καθορισμός παραμέτρων πεπερασμένων στοιχείων

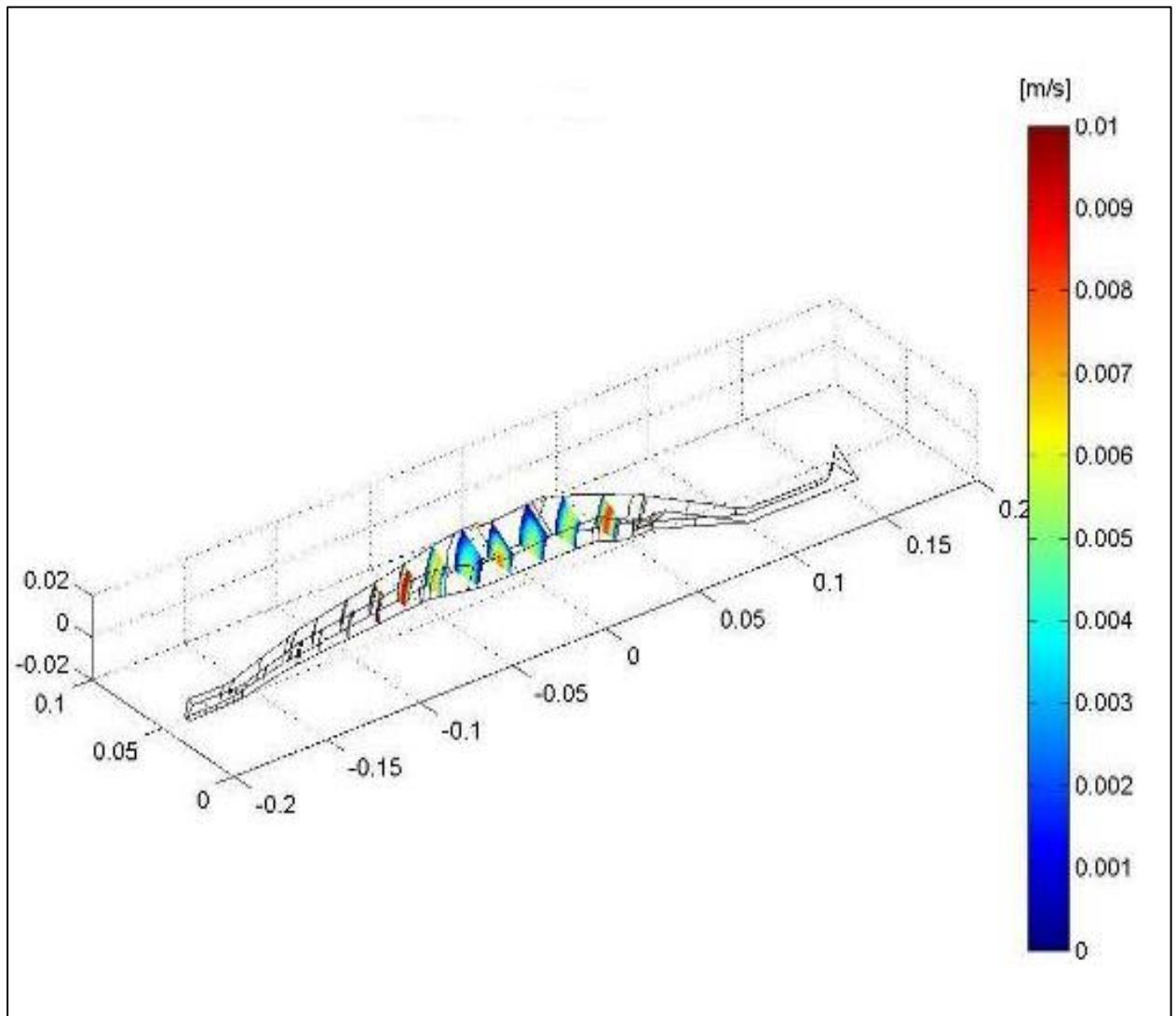
Τέλος, με τη βοήθεια της εντολής domain plot parameters, παρουσιάζεται ο τρόπος εξαγωγής των αποτελεσμάτων του προφίλ της ταχύτητας εξόδου και της κατανομή των ταχυτήτων κατά μήκος της μήτρας.



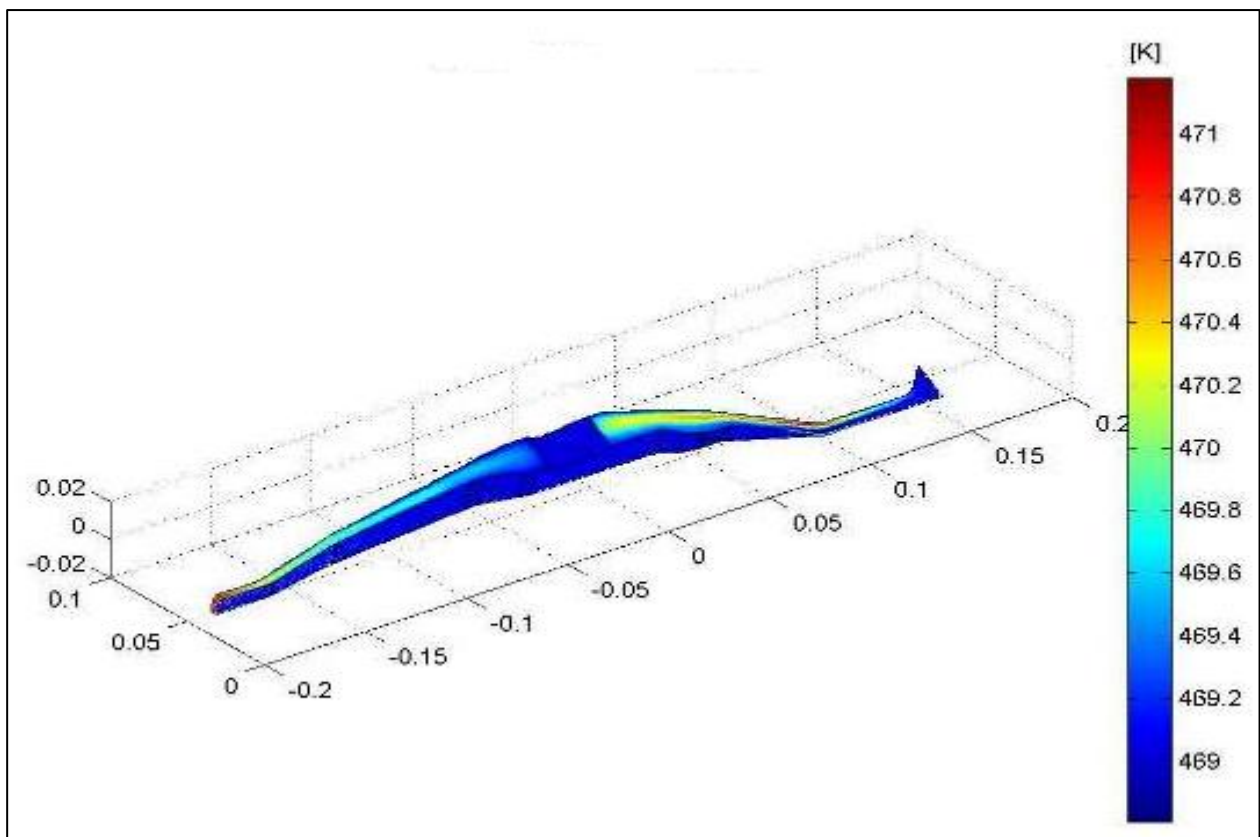
Σχήμα 3.27: Καθορισμός παραμέτρων γραφήματος προφίλ ταχύτητας

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Comsol είναι άμεση και πλήρης αλληλεπίδραση με το Matlab., όλα τα παραπάνω βήματα, καταγράφονται και αποθηκεύονται σε μορφή ASCII σε αρχείο .txt και m-file. Ο κώδικας ανοίγεται από το πρόσθετο Comsol with Matlab και δίνει τα εξής αποτελέσματα:

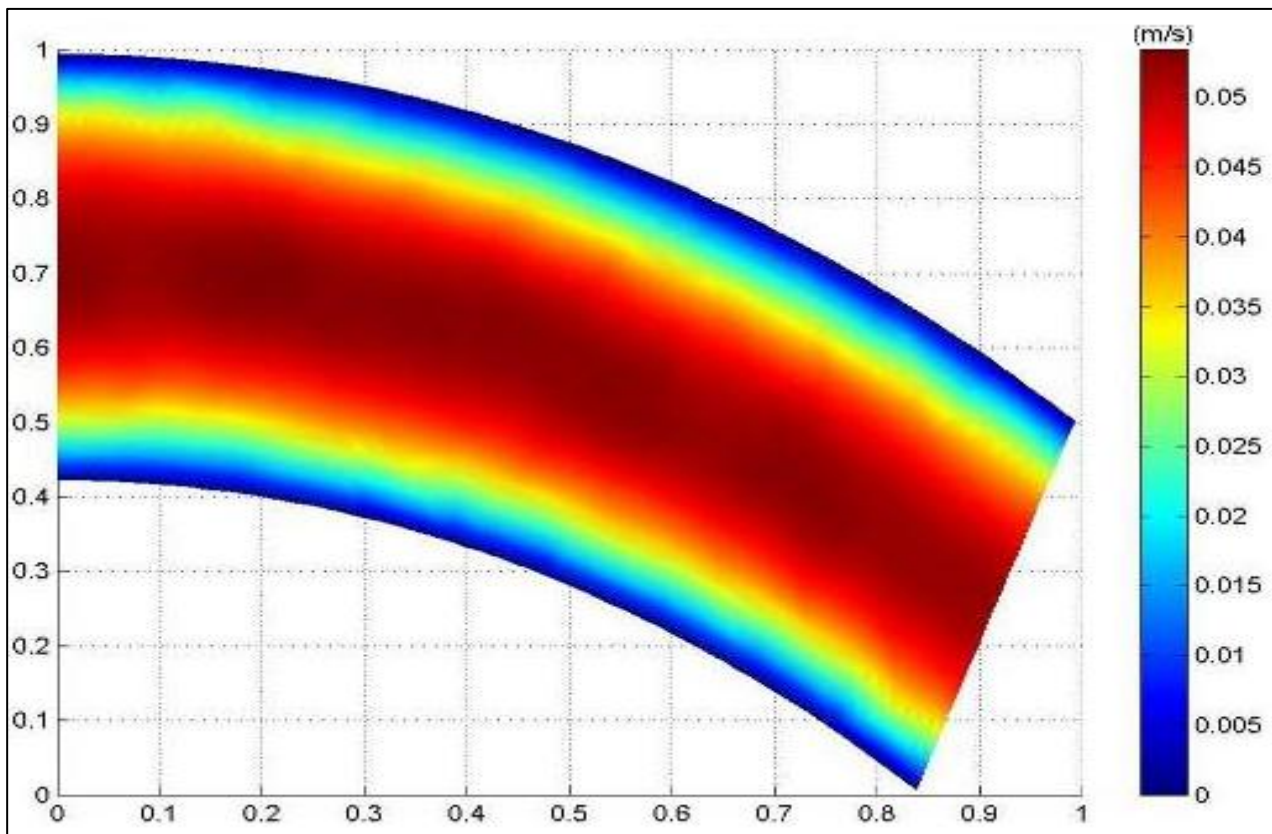
- Μέση ταχύτητα εξόδου από τη μήτρα εκβολής
- Τυπική απόκλιση ταχύτητας εξόδου από τη μήτρα εκβολής
- Μέση θερμοκρασία εξόδου από τη μήτρα εκβολής
- Τυπική απόκλιση θερμοκρασίας εξόδου από τη μήτρα εκβολής
- Χρόνος επίλυσης του μοντέλου
- Γράφημα κατανομής ταχυτήτων κατά το μήκος της μήτρας εκβολής
- Γράφημα κατανομής θερμοκρασιών κατά το μήκος της μήτρας εκβολής
- Γράφημα του προφίλ της ταχύτητας στην έξοδο
- Γράφημα του προφίλ της θερμοκρασίας στην έξοδο
- Γράφημα της πτώσης πίεσης κατά το μήκος της μήτρας εκβολής



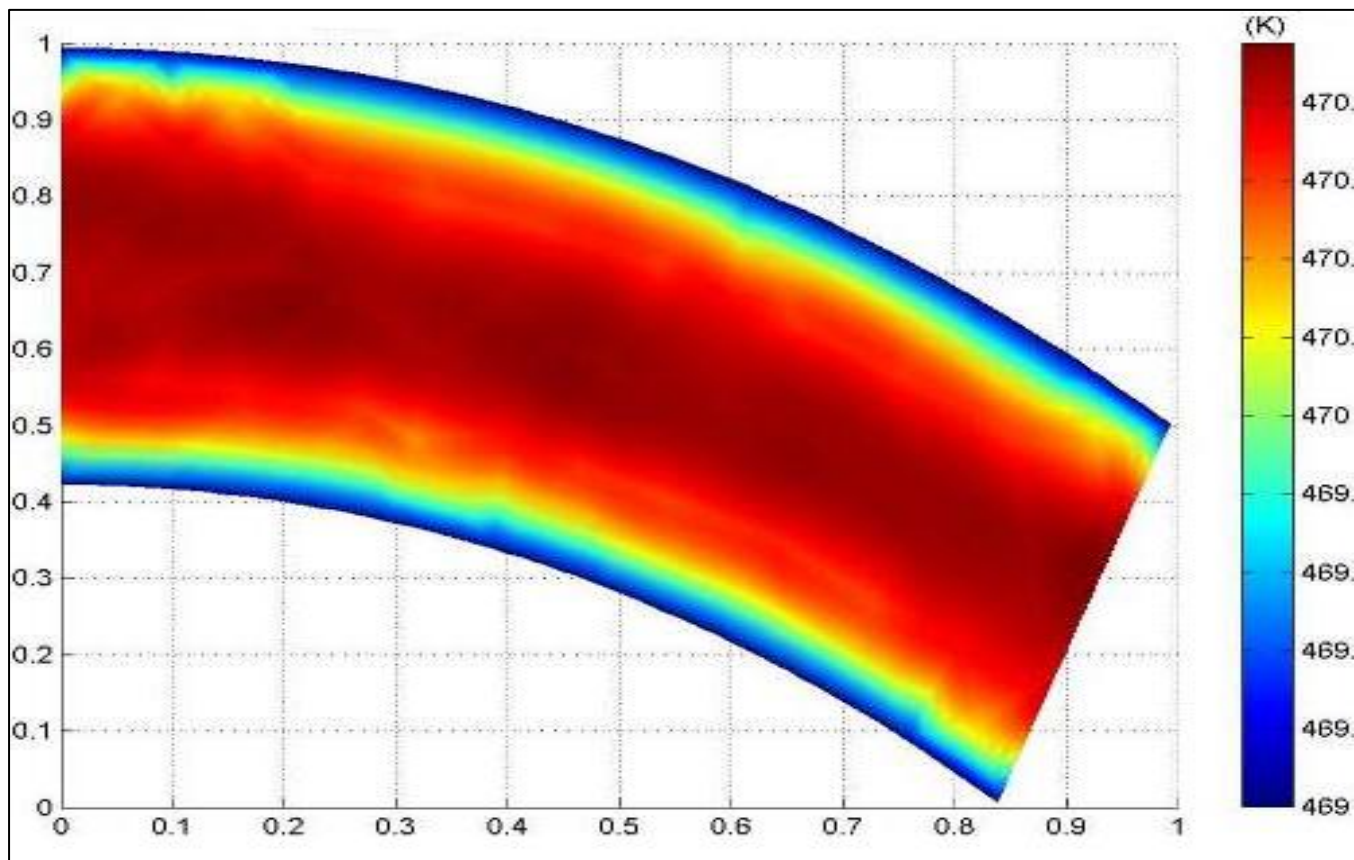
Σχήμα 3.28: Κατανομή ταχυτήτων 1ης προσομοίωσης



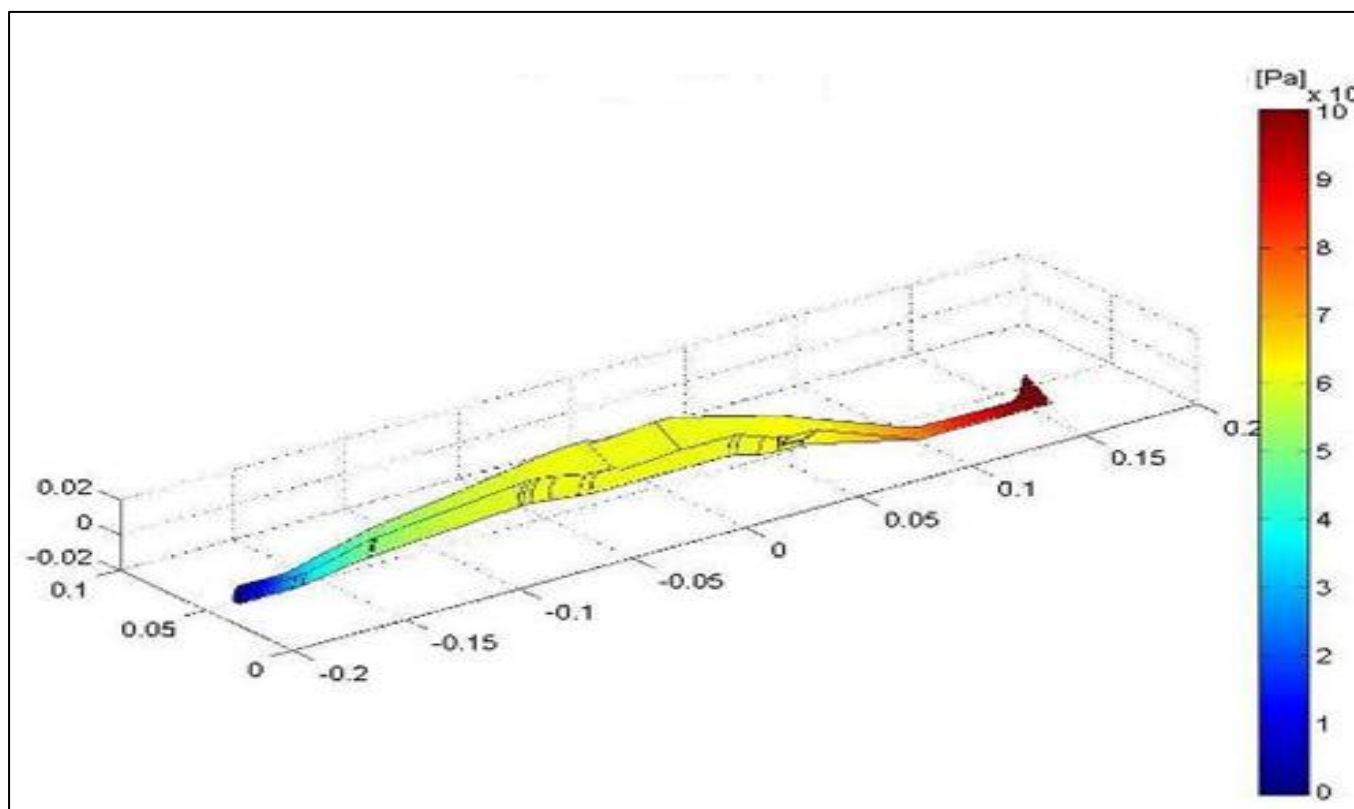
Σχήμα 3.29: Κατανομή θερμοκρασιών 1ης προσομοίωσης



Σχήμα 3.30: Προφίλ ταχύτητας στην έξοδο της 1ης προσομοίωσης



Σχήμα 3.31: Προφίλ θερμοκρασίας στην έξοδο της 1ης προσομοίωσης



Σχήμα 3.32: Πτώση πίεσης 1ης προσομοίωσης

3.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

3.7.1 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων (6 παράμετροι)

Τα πόδια της αράχνης δεν πρέπει να είναι μακρύτερα από 30-80mm και παχύτερα από 9-12mm. 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 $0^\circ \leq b \leq 10^\circ$, ενώ το μήκος της παράλληλης ζώνης τα 24mm και μέγιστο τα 45mm, δηλαδή, $24\text{mm} \leq L \leq 45\text{mm}$. Τέλος, επιλέγονται τρία όμοια κατανομημένα επίπεδα τιμών για τις παραμέτρους που θα βελτιστοποιηθούν. Θα πραγματοποιηθούν τρεις σειρές πειραμάτων, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

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 3.4: Παράμετροι βελτιστοποίησης 1^{ης} σειράς πειραμάτων

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 3.5: L27 του πίνακα Taguchi

Ο Πίνακας 3.6 προκύπτει με αντικατάσταση του Πίνακα 3.4 στον Πίνακα 3.5, ο οποίος δίνει 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 3.6: L27 του πίνακα Taguchi 1ης σειράς πειραμάτων

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το υπολογιστικό πακέτο COMSOL, όπου χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας L27 του Taguchi και έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης του μήκους εξόδου της μήτρας εκβολής και της γεωμετρίας του ποδιού της αράχνης [46] (Πίνακας 3.7).

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (U_m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (U_s)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (T_m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (T_s)	ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (s)
1	0,038	0,016	470,49	0,53	657
2	0,038	0,016	470,49	0,52	658
3	0,038	0,016	470,49	0,52	661
4	0,037	0,016	470,44	0,51	489
5	0,037	0,016	470,44	0,51	482
6	0,037	0,016	470,45	0,51	513
7	0,037	0,016	470,43	0,50	613
8	0,037	0,016	470,43	0,50	556
9	0,037	0,016	470,43	0,49	571
10	0,030	0,013	470,31	0,47	597
11	0,030	0,013	470,31	0,47	561
12	0,030	0,013	470,31	0,47	597
13	0,029	0,013	470,29	0,46	610
14	0,029	0,013	470,29	0,46	608
15	0,029	0,013	470,29	0,46	610
16	0,030	0,013	470,33	0,47	576
17	0,030	0,013	470,33	0,47	557
18	0,030	0,013	470,34	0,47	575
19	0,024	0,011	470,17	0,42	490
20	0,024	0,011	470,17	0,42	523

21	0,024	0,011	470,17	0,42	465
22	0,025	0,011	470,22	0,43	622
23	0,025	0,011	470,22	0,43	607
24	0,025	0,011	470,22	0,43	590
25	0,025	0,011	470,20	0,42	558
26	0,025	0,011	470,20	0,42	562
27	0,025	0,011	470,20	0,42	512

Πίνακας 3.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του πίνακα L27

.... Ο Πίνακας 3.8 προκύπτει χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.7 σε συνδυασμό με την αντικειμενική συνάρτηση που έχει επιλεχθεί ,

$$SNR_U = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_m^2}{U_s^2} \right)$$

A/A ΔΟΚΙΜΗΣ	SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR_U)
1	7,486
2	7,488
3	7,489
4	7,446
5	7,473
6	7,466
7	7,406
8	7,405
9	7,405
10	7,347
11	7,345
12	7,357
13	7,287

14	7,307
15	7,320
16	7,385
17	7,391
18	7,411
19	7,178
20	7,230
21	7,242
22	7,255
23	7,258
24	7,246
25	7,304
26	7,302
27	7,296

Πίνακας 3.8: Ανάλυση των αποτελεσμάτων του πίνακα L27

Μια πρώτη εκτίμηση για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνεται από τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

A/A ΔΟΚΙΜΗΣ	MAX ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ					
		L	Y	X	f	a	b
3	7,489	24	9	30	0,1	10	10

Πίνακας 3.9: Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων του L27

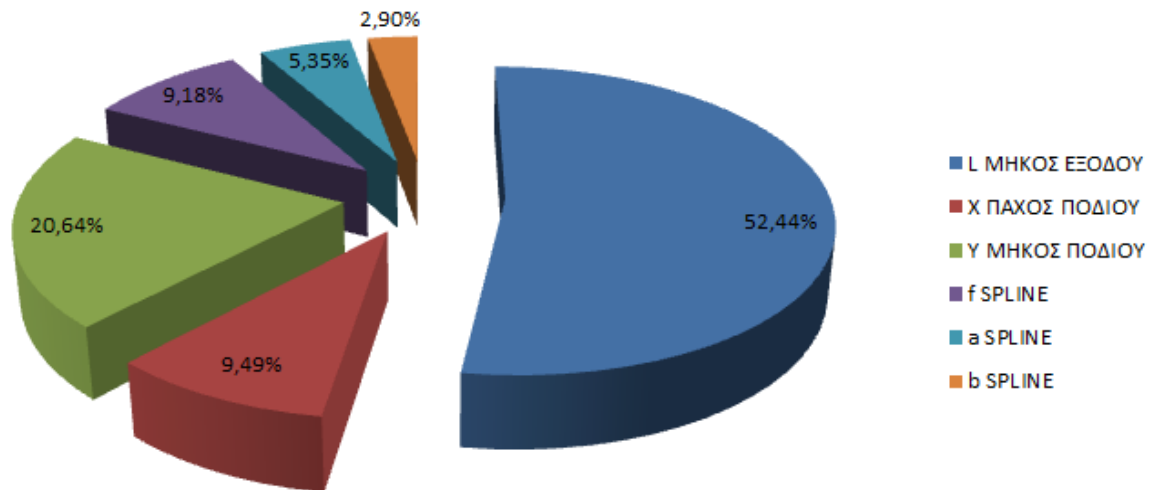
3.7.2 Ανάλυση με τη μέθοδο ANOVA (6 παράμετροι)

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ANOVA, υπολογίζονται οι λόγοι συμβολής των παραμέτρων και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.10).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ	
L	ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (mm)	52,44%	52,44%
Y	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	9,49%	47,56%
X	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	20,64%	
F	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	9,18%	
A	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5,35%	
B	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	2,90%	

Πίνακας 3.10: Λόγοι συμβολής των παραμέτρων

Το μήκος εξόδου και η γεωμετρία του ποδιού της αράχνης συμβάλουν περίπου σε ίδιο ποσοστό στην ομαλή ροή του ρευστού στην έξοδο της μήτρας. Επίσης η βέλτιστη τιμή του μήκους εξόδου είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $L_{OPT} = 24 \text{ mm}$. Στο Σχήμα 3.33 εμφανίζονται τα ποσοστά των λόγων συμβολής των παραμέτρων βελτιστοποίησης L, X, Y, f, a, b) σε γράφημα Excel.



Σχήμα 3.33: Λόγοι συμβολής παραμέτρων βελτιστοποίησης (L, X, Y, f, a, b)

3.7.3 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων (5 παράμετροι)

Η βέλτιστη τιμή του μήκους εξόδου της μήτρας είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $L_{OPT} = 24 \text{ mm}$. Τα πόδια της αράχνης δεν πρέπει να είναι μακρύτερα από 30-80mm και παχύτερα από 9-12mm. 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 $20\% \leq f \leq 80\%$, $5^\circ \leq a \leq 15^\circ$ και $5^\circ \leq b \leq 15^\circ$. Τέλος, επιλέγονται τρία όμοια κατανομημένα επίπεδα τιμών για τις παραμέτρους που θα βελτιστοποιηθούν. Θα πραγματοποιηθούν τριάντα έξι (36) πειράματα, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.12.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΕΠΙΠΕΔΑ		
		1	2	3
Y	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	9	10,5	12
X	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	30	55	80
f	ΜΕΓΙΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (%)	0,2	0,5	0,8
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5	10	15
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5	10	15

Πίνακας 3.11: Παράμετροι και τιμές βελτιστοποίησης

Με πέντε παραμέτρους και τρία επίπεδα τιμών επιλέγεται ορθογώνια σειρά L36 του πίνακα Taguchi.

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ				
	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	f ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	a ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	b ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3
4	1	1	1	1	2
5	2	2	2	2	3
6	3	3	3	3	1
7	1	1	2	3	1
8	2	2	3	1	2
9	3	3	1	2	3
10	1	1	3	2	1
11	2	2	1	3	2
12	3	3	2	1	3
13	1	2	3	1	3
14	2	3	1	2	1
15	3	1	2	3	2
16	1	2	3	2	1
17	2	3	1	3	2
18	3	1	2	1	3
19	1	2	1	3	3
20	2	3	2	1	1
21	3	1	3	2	2
22	1	2	2	3	3
23	2	3	3	1	1
24	3	1	1	2	2
25	1	3	2	1	2
26	2	1	3	2	3
27	3	2	1	3	1
28	1	3	2	2	2
29	2	1	3	3	3
30	3	2	1	1	1
31	1	3	3	3	2
32	2	1	1	1	3
33	3	2	2	2	1
34	1	3	1	2	3
35	2	1	2	3	1
36	3	2	3	1	2

Πίνακας 3.12: L36 του πίνακα Taguchi για πέντε παραμέτρους

Ο Πίνακας 3.13 προκύπτει με αντικατάσταση του Πίνακα 3.11 στον Πίνακα 3.12, ο οποίος δίνει τις τιμές της σειράς πειραμάτων L36 του πίνακα Taguchi.

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ				
	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	f ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	a ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	b ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE
1	9	30	0,2	5	5
2	10,5	55	0,5	10	10
3	12	80	0,8	15	15
4	9	30	0,2	5	10
5	10,5	55	0,5	10	15
6	12	80	0,8	15	5
7	9	30	0,5	15	5
8	10,5	55	0,8	5	10
9	12	80	0,2	10	15
10	9	30	0,8	10	5
11	10,5	55	0,2	15	10
12	12	80	0,5	5	15
13	9	55	0,8	5	15
14	10,5	80	0,2	10	5
15	12	30	0,5	15	10
16	9	55	0,8	10	5
17	10,5	80	0,2	15	10
18	12	30	0,5	5	15
19	9	55	0,2	15	15
20	10,5	80	0,5	5	5
21	12	30	0,8	10	10
22	9	55	0,5	15	15
23	10,5	80	0,8	5	5
24	12	30	0,2	10	10
25	9	80	0,5	5	10
26	10,5	30	0,8	10	15
27	12	55	0,2	15	5
28	9	80	0,5	10	10
29	10,5	30	0,8	15	15
30	12	55	0,2	5	5
31	9	80	0,8	15	10
32	10,5	30	0,2	5	15
33	12	55	0,5	10	5
34	9	80	0,2	10	15
35	10,5	30	0,5	15	5
36	12	55	0,8	5	10

Πίνακας 3.13: L36 του πίνακα Taguchi με τις τιμές των παραμέτρων

Στον Πίνακα 3.14 παρατίθενται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το υπολογιστικό πακέτο COMSOL, όπου χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας L36 του Taguchi.

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (U_m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (U_s)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (T_m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (T_s)	ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (s)
1	0,038	0,016	470,49	0,52	536
2	0,037	0,016	470,44	0,51	439
3	0,037	0,016	470,42	0,49	428
4	0,038	0,016	470,49	0,52	573
5	0,037	0,016	470,44	0,51	469
6	0,037	0,016	470,43	0,50	436
7	0,038	0,016	470,49	0,52	471
8	0,037	0,016	470,45	0,51	470
9	0,037	0,016	470,43	0,50	422
10	0,038	0,016	470,49	0,52	608
11	0,037	0,016	470,46	0,52	476
12	0,037	0,016	470,42	0,49	465
13	0,037	0,016	470,45	0,51	462
14	0,037	0,016	470,43	0,50	432
15	0,038	0,016	470,49	0,52	439
16	0,037	0,016	470,45	0,51	461
17	0,037	0,016	470,43	0,49	432
18	0,038	0,016	470,49	0,53	453
19	0,037	0,016	470,45	0,51	469
20	0,037	0,016	470,42	0,49	433
21	0,038	0,016	470,48	0,52	553
22	0,037	0,016	470,44	0,51	446

23	0,037	0,016	470,43	0,49	449
24	0,038	0,016	470,49	0,52	513
25	0,037	0,016	470,42	0,49	489
26	0,038	0,016	470,49	0,52	559
27	0,037	0,016	470,45	0,51	507
28	0,037	0,016	470,42	0,49	425
29	0,038	0,016	470,49	0,52	615
30	0,037	0,016	470,46	0,52	517
31	0,037	0,016	470,42	0,49	464
32	0,038	0,016	470,49	0,53	535
33	0,037	0,016	470,44	0,51	483
34	0,037	0,016	470,43	0,50	427
35	0,038	0,016	470,49	0,53	439
36	0,037	0,016	470,45	0,51	475

Πίνακας 3.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 36 πειραμάτων

Ο Πίνακας 3.15 προκύπτει χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.14 σε συνδυασμό με την αντικειμενική συνάρτηση που έχει επιλεγθεί,

$$SNR_U = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_m^2}{U_s^2} \right)$$

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _U)
1	7,501
2	7,463
3	7,403
4	7,495
5	7,463

6	7,406
7	7,489
8	7,474
9	7,411
10	7,488
11	7,467
12	7,398
13	7,474
14	7,405
15	7,486
16	7,469
17	7,404
18	7,489
19	7,475
20	7,413
21	7,491
22	7,467
23	7,407
24	7,490
25	7,399
26	7,494
27	7,474
28	7,407
29	7,482
30	7,475
31	7,410

32	7,492
33	7,474
34	7,402
35	7,490
36	7,475

Πίνακας 3.15: Συγκεντρωτική ανάλυση αποτελεσμάτων

Μια πρώτη εκτίμηση για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνεται από τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 3.15), οι τιμές αυτές είναι:

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΑΧ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΟΡΤ	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ				
		Υ	Χ	f	a	b
1	7,501	9	30	0,2	5	5

Πίνακας 3.16: Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων

3.7.4 Ανάλυση με τη μέθοδο ANOVA (5 παράμετροι)

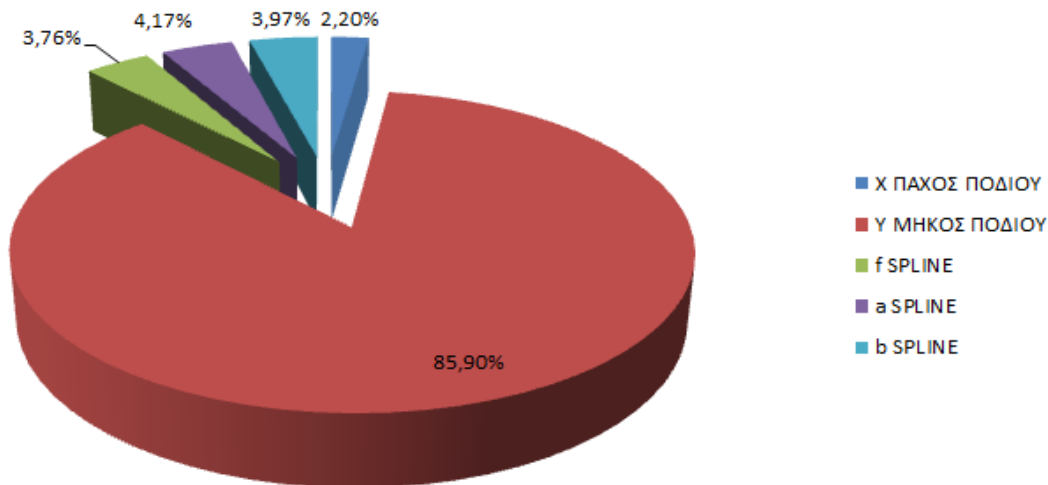
Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ανάλυσης διασποράς (ANOVA) για να υπολογιστούν οι λόγοι συμβολής των πέντε (5) παραμέτρων. Η ανάλυση γίνεται με κώδικα Matlab και αφορά τα τριανταέξι (36) πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
Υ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	2,20%
Χ	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	85,90%
f	ΜΕΓΙΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (%)	3,76%
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	4,17%
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	3,97%

Πίνακας 3.17: Λόγοι συμβολής των παραμέτρων

Το μήκος του ποδιού της αράχνης έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στη ποιότητα του ρευστού στην έξοδο από τη μήτρα, συγκριτικά με τις υπόλοιπες παραμέτρους της γεωμετρίας του ποδιού της αράχνης. Επίσης η βέλτιστη τιμή του μήκους του ποδιού είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $X_{OPT} = 30$ mm.

Στη συνέχεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης, το μήκος του ποδιού της αράχνης θεωρείται σταθερό και ίσο με 30 mm. Στο Σχήμα 3.34 παρατίθενται τα ποσοστά των λόγων συμβολής των παραμέτρων βελτιστοποίησης (X, Y, f, a, b) σε γράφημα Excel.



Σχήμα 3.34: Λόγοι συμβολής παραμέτρων βελτιστοποίησης (X, Y, f, a, b)

3.7.5 Συγκέντρωση – Ανάλυση αποτελεσμάτων (4 παράμετροι)

Η βέλτιστη τιμή του μήκους εξόδου της μήτρας είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $L_{OPT} = 24$ mm. Η βέλτιστη τιμή του μήκους του ποδιού είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $X_{OPT} = 30$ mm. Έτσι θα πρέπει $4,5\text{mm} \leq Y \leq 12\text{mm}$, $20\% \leq f \leq 80\%$, $5^\circ \leq a \leq 15^\circ$ και $5^\circ \leq b \leq 15^\circ$. Τέλος, επιλέγονται τρία όμοια κατανομημένα επίπεδα τιμών για τις παραμέτρους που θα βελτιστοποιηθούν.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΕΠΙΠΕΔΑ		
		1	2	3
Y	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	9	10,5	12
f	ΜΕΓΙΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (%)	0,2	0,5	0,8
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5	10	15
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5	10	15

Πίνακας 3.18: Παράμετροι και τιμές βελτιστοποίησης

Με την ίδια διαδικασία που επιλέχτηκε στα προηγούμενα βήματα βελτιστοποίησης, επιλέγεται πίνακας L36 του Taguchi και πραγματοποιούνται τα υπολογιστικά πειράματα με τις τέσσερις πλέον παραμέτρους. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνονται στον Πίνακα 3.19.

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (U_m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (U_s)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (T_m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (T_s)	ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (s)
1	0,03763	0,01587	470,48780	0,52334	469
2	0,03762	0,01587	470,49000	0,52414	572
3	0,03757	0,01587	470,48910	0,52427	562
4	0,03759	0,01587	470,48750	0,52548	492
5	0,03758	0,01587	470,48990	0,52482	537
6	0,03755	0,01586	470,48720	0,52388	526
7	0,03762	0,01588	470,48910	0,52530	463
8	0,03758	0,01586	470,48900	0,52371	548
9	0,03759	0,01587	470,48810	0,52373	549
10	0,03777	0,01587	470,48540	0,52305	471
11	0,03762	0,01588	470,48940	0,52393	587
12	0,03759	0,01586	470,48960	0,52416	578
13	0,03758	0,01589	470,48530	0,52226	555
14	0,03758	0,01585	470,48980	0,52447	579
15	0,03756	0,01590	470,49370	0,52299	484
16	0,03763	0,01588	470,48940	0,52407	557
17	0,03759	0,01587	470,48890	0,52407	545
18	0,03755	0,01590	470,49260	0,52307	507
19	0,03762	0,01588	470,48900	0,52360	577
20	0,03761	0,01589	470,48880	0,52403	569
21	0,03755	0,01587	470,48630	0,52233	475
22	0,03763	0,01588	470,48910	0,52387	582
23	0,03757	0,01587	470,48800	0,52419	554

24	0,03756	0,01585	470,48610	0,52335	463
25	0,03763	0,01587	470,48780	0,52334	469
26	0,03762	0,01587	470,49000	0,52414	572
27	0,03757	0,01587	470,48910	0,52427	562
28	0,03759	0,01587	470,48750	0,52548	492
29	0,03758	0,01587	470,48990	0,52482	537
30	0,03755	0,01586	470,48720	0,52388	526
31	0,03762	0,01588	470,48910	0,52530	463
32	0,03758	0,01586	470,48900	0,52371	548
33	0,03759	0,01587	470,48810	0,52373	549
34	0,03757	0,01587	470,48540	0,52305	471
35	0,03762	0,01588	470,48940	0,52393	587
36	0,03759	0,01586	470,48960	0,52416	578

Πίνακας 3.19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 36 πειραμάτων

Ο Πίνακας 3.20 προκύπτει από τον Πίνακα 3.19 σε συνδυασμό με την αντικειμενική συνάρτηση που έχει οριστεί.

A/A ΔΟΚΙΜΗΣ	SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR_U)
1	7,489430809
2	7,49163595
3	7,492608842
4	7,496884166
5	7,485273808
6	7,492047395
7	7,486768629
8	7,484020859
9	7,48443785
10	7,51528899
11	7,491122606
12	7,492172386

13	7,496340357
14	7,495324087
15	7,487704652
16	7,487374587
17	7,489481554
18	7,488901451
19	7,493522348
20	7,493595289
21	7,48967277
22	7,486938197
23	7,491896631
24	7,495387751
25	7,479101995
26	7,496537701
27	7,466829076
28	7,496026112
29	7,491587385
30	7,46300166
31	7,493573709
32	7,485713483
33	7,480157437
34	7,491595988
35	7,487725735
36	7,494046694

Πίνακας 3.20: Συγκεντρωτική ανάλυση αποτελεσμάτων

Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται από τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και δίνονται στον Πίνακα 3.21.

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΑΧ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΟΡΤ	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ			
		Υ	f	a	b
10	7,51528899	9	0,2	15	10

Πίνακας 3.21: Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων

3.7.6 Ανάλυση με τη μέθοδο ANOVA (4 παράμετροι)

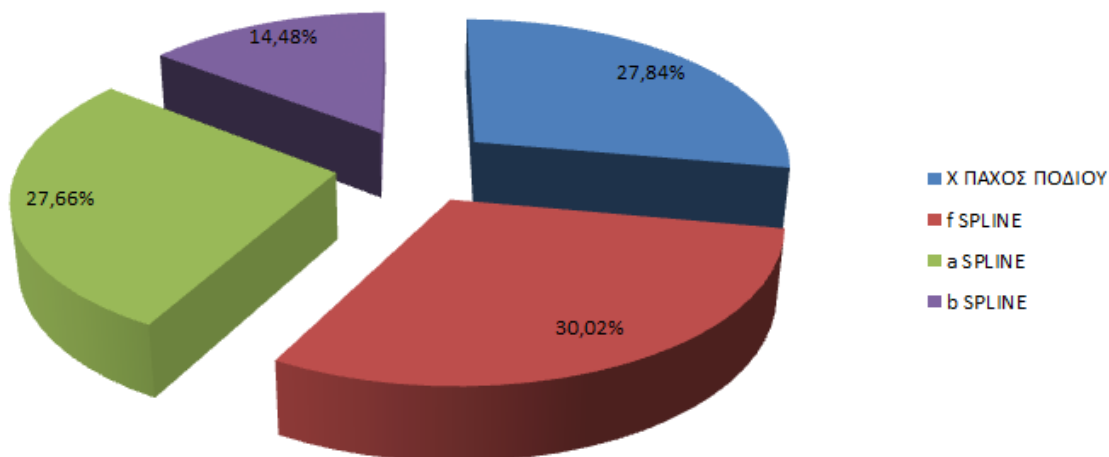
Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί, η μέθοδος ανάλυσης διασποράς (ANOVA) για να υπολογιστούν οι λόγοι συμβολής των τεσσάρων (4) παραμέτρων.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
Y	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	27,84%
f	ΜΕΓΙΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (%)	30,02%
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	27,66%
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	14,48%

Πίνακας 3.22: Λόγοι συμβολής των παραμέτρων

Από τα παραπάνω, διαφαίνεται ότι οι τέσσερις παράμετροι έχουν σχεδόν ίδια επίδραση στη ποιότητα του ρευστού στην έξοδο από τη μήτρα, με ελαφρά υπεροχή του μεγίστου f της καμπύλης spline, συγκριτικά με τις υπόλοιπες παραμέτρους της γεωμετρίας του ποδιού της αράχνης.

Όσον αφορά το πάχος του ποδιού της αράχνης (Y) και το μέγιστο της καμπύλης spline (f), διαφαίνεται ότι οι βέλτιστες είναι οι ελάχιστες δυνατές σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $Y_{OPT} = 9 \text{ mm}$, $f_{OPT} = 0,2 \text{ (20 \%)}$. Στη συνέχεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης, το πάχος του ποδιού σταθερό και το μέγιστο της καμπύλης θεωρούνται σταθερά. Στο Σχήμα 3.34 φαίνονται τα ποσοστά των λόγων συμβολής των παραμέτρων βελτιστοποίησης (X, f, a, b) σε γράφημα.



Σχήμα 3.35: Λόγοι συμβολής παραμέτρων βελτιστοποίησης (X, f, a, b)

3.7.7 Συγκέντρωση – Ανάλυση αποτελεσμάτων (2 παράμετροι)

Η βέλτιστη τιμή του μήκους εξόδου της μήτρας είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $L_{OPT} = 24$ mm. Η βέλτιστη τιμή του μήκους του ποδιού είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $X_{OPT} = 30$ mm. Οι βέλτιστες τιμές για το πάχος του ποδιού της αράχνης (Y) και το μέγιστο της καμπύλης spline (f), είναι αντίστοιχα $Y_{OPT} = 9$ mm, $f_{OPT} = 0,2$ (20 %). Έτσι θα πρέπει $5^\circ \leq a \leq 15^\circ$ και $5^\circ \leq b \leq 15^\circ$. Κατά αυτόν τον τρόπο, με μόνο δύο (2) παραμέτρους για την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης επιλέγεται πίνακας L9 του Taguchi ο οποίος φαίνεται στον Πίνακα 3.23.

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	
	a ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	b ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

Πίνακας 3.23: L9 του πίνακα Taguchi για δύο παραμέτρους

Ο Πίνακας 3.24 προκύπτει με αντικατάσταση των γεωμετρικών τιμών των παραμέτρων στον Πίνακα 3.23.

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	
	a ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	b ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE
1	5	5
2	5	10
3	5	15
4	10	5
5	10	10
6	10	15
7	15	5
8	15	10
9	15	15

Πίνακας 3.24: L9 του πίνακα Taguchi για με τιμές των παραμέτρων

\

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνονται στον Πίνακα 3.25.

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (U_m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (U_s)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (T_m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (T_s)	ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (s)
1	0,03765	0,01584	470,4896	0,52456	626
2	0,03757	0,01586	470,489	0,5246	589
3	0,03762	0,01588	470,4901	0,52428	553
4	0,03751	0,01583	470,4864	0,5252	561
5	0,0376	0,01588	470,4877	0,52505	552
6	0,03756	0,01586	470,4924	0,52608	562
7	0,03763	0,01588	470,4893	0,52439	539
8	0,03762	0,01587	470,4901	0,52419	533
9	0,03762	0,01588	470,4901	0,52437	569

Πίνακας 3.25: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 9 πειραμάτων

Ο Πίνακας 3.26 προκύπτει χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.25 σε συνδυασμό με την αντικειμενική συνάρτηση που έχει επιλεγεί ,

$$SNR_U = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_m^2}{U_s^2} \right)$$

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR_U)
1	7,52129328
2	7,489049705
3	7,493399095
4	7,492253097
5	7,485271754
6	7,49122383
7	7,491909885
8	7,497166264
9	7,4921105

Πίνακας 3.26: Συγκεντρωτική ανάλυση αποτελεσμάτων

Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται από τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. οι τιμές αυτές δίνονται στον Πίνακα 3.27.

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	MAX ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΟΡΤ	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	
		a	b
1	7,52129328	5	5

Πίνακας 3.27: Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων

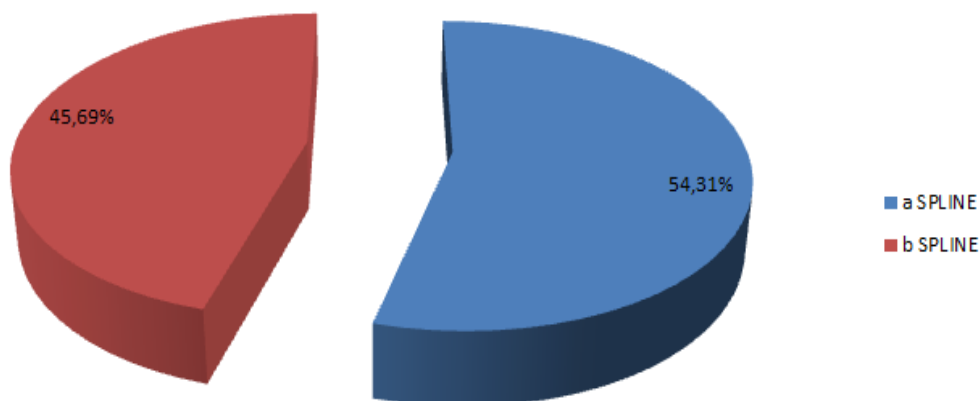
3.7.8 Ανάλυση με τη μέθοδο ANOVA (2 παράμετροι)

Χρησιμοποιείται η μέθοδος ανάλυσης διασποράς (ANOVA) για να υπολογιστούν οι λόγοι συμβολής των δύο (2) παραμέτρων. Η ανάλυση γίνεται με κώδικα Matlab και αφορά τα εννέα (9) πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	54,31%
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	45,69%

Πίνακας 3.28: Λόγοι συμβολής των παραμέτρων

Από τα παραπάνω, φαίνεται ότι οι γωνίες, εκκίνησης και τερματισμού, έχουν σχεδόν την ίδια επίδραση στην ποιότητα του ρευστού στην έξοδο της μήτρας εκβολής και παρατηρείται ότι οι βέλτιστες τιμές είναι οι ελάχιστες δυνατές σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $a_{OPT} = 5^\circ$, $b_{OPT} = 5^\circ$. Στο Σχήμα 3.36 φαίνονται τα ποσοστά των λόγων συμβολής των παραμέτρων βελτιστοποίησης (a, b) σε γράφημα Excel.

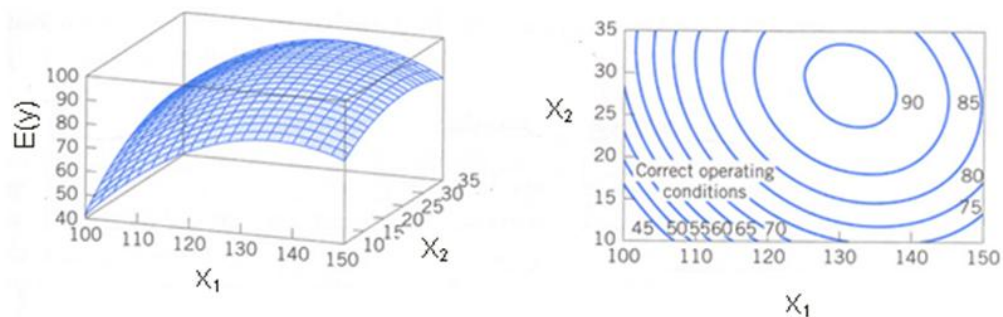


Σχήμα 3.36: Λόγοι συμβολής παραμέτρων βελτιστοποίησης (a, b)

3.7.9 Ανάλυση με τη μέθοδο Response Surface Method (RSM)

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της επιφάνειας απόκρισης (RSM), για να εντοπιστεί το ελάχιστο του πολυωνύμου που δημιουργείται από τις υπολογισμένες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, όλων των σειρών πειραμάτων.

Αν η αναμενόμενη τιμή της απόκρισης είναι $E(y)$, η επιφάνεια που παριστάνεται από την εξίσωση $E(y) = f(X_1, X_2)$ ονομάζεται επιφάνεια απόκρισης (Response Surface). Η απόκριση παριστάνεται σαν επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.37.



Σχήμα 3.37: Επιφάνεια απόκρισης των παραμέτρων X_1, X_2

Για να αναγνωρίσει κανείς το σχήμα της επιφάνειας απόκρισης, συχνά καταφεύγει στο διάγραμμα προβολής της επιφάνειας στο επίπεδο X_1, X_2 . Το διάγραμμα αυτό έχει καμπύλες (contours), που η καθεμιά είναι προβολή της επιφάνειας απόκρισης σε ορισμένο ύψος ή με συγκεκριμένη τιμή. Οι καμπύλες βοηθούν στην μελέτη των επιπέδων των τιμών των x_1, x_2 που επιφέρουν αλλαγές στο σχήμα ή το ύψος της επιφάνειας απόκρισης. Το πρώτο βήμα στην RSM (Response Surface Methodology) είναι η εύρεση μιας κατάλληλης προσέγγισης μεταξύ της σχέσης απόκρισης και των ανεξαρτήτων μεταβλητών. Συνήθως, γίνεται χρήση ενός πολυωνύμου χαμηλής τάξης σε κάποια περιοχή των ανεξάρτητων μεταβλητών. Αν η απόκριση προσεγγίζεται με γραμμική συνάρτηση των ανεξάρτητων μεταβλητών, ισχύει το μοντέλο πρώτου βαθμού.

$$y = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

Αν υπάρχει καμπυλότητα στο σύστημα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί πολυώνυμο υψηλότερου βαθμού όπως το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν οι παράμετροι των προσεγγιστικών πολυωνύμων. Οι παράμετροι είναι οι τιμές των συντελεστών β που ελαχιστοποιούν το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων [49-52]. Η ανάλυση της επιφάνειας απόκρισης μπορεί να θεωρηθεί σαν «ανέβασμα σε λόφο», όπου η κορυφή του λόφου αντιπροσωπεύει το σημείο με τη μέγιστη απόκριση. Αν το σημείο του βέλτιστου (optimum) είναι σημείο ελάχιστης απόκρισης, τότε μπορεί κανείς να θεωρήσει την μέθοδο σαν «κατέβασμα σε κοιλάδα»

Ο ενδεχόμενος στόχος της RSM είναι να προσδιοριστούν οι συνθήκες λειτουργίας για αριστοποίηση του συστήματος ή να προσδιοριστεί η περιοχή του πεδίου ορισμού των παραγόντων για την οποία ικανοποιούνται οι προδιαγραφές λειτουργίας. Οι μέθοδοι «αναρρίχησης λόφου» της RSM εγγυώνται σύγκλιση μονάχα σε τοπικό βέλτιστο (local optimum). Με αυτή την λογική θα εντοπιστούν οι βέλτιστες τιμές της γεωμετρίας της μήτρας και θα συγκριθούν με τις τιμές που εντοπίστηκαν με την τεχνική Taguchi.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΕΠΙΠΕΔΑ			ΜΕΘΟΔΟΣ	
		1	2	3	ANOVA	RSM
L	ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (mm)	24	34,5	45	24	24
Y	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	9	10,5	12	9	9
X	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	30	55	80	30	30
f	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	0,1	0,5	0,9	0,2	0,2
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	0	5	10	5	5
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	0	5	10	5	0
SNR	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ				7,52	7,53

Πίνακας 3.29: Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων με RSM

Από τον Πίνακα 3.29 φαίνεται η απόλυτη σύγκλιση των δύο μεθόδων, στην εύρεση των βέλτιστων τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης, με στόχο τη βελτιστοποίηση της μήτρας εκβολής πολυμερούς για την παραγωγή σωλήνα από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην ταχύτητα εξόδου και συνεπώς αυξημένη μηχανική αντοχή του πλαστικού σωλήνα. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων, είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο στα χέρια του μηχανικού σχεδιαστή, καθώς τα πλεονεκτήματα του σε σχέση με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης είναι η ακρίβεια στην εύρεση των βέλτιστων τιμών σε συνδυασμό με τον μικρό υπολογιστικό χώρο και χρόνο που απαιτεί.

3.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Bandyopadhyay, S., Layek, G.C. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation **16**, 252-265, (2011).
- 2) Grippo, L., Sciandrone, M. Optimization Methods and Software **25**, 971-999, (2010).
- 3) Mori N., Tsuji Y., Nakamura K., Yoshikawa C., Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics **56**, 85-97, (1995).
- 4) Benito J. J., Ureña F., Gavete L., Applied Mathematical Modelling **25**, 1039-1053, (2001).
- 5) www.siam.org/books/textbooks/fr16_book.pdf
- 6) Yu Bo, Kawaguchi Yasuo, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics **116**, 431-466, (2004).
- 7) Wolfgang Hackbusch, Iterative Solution of Large Sparse Systems of Equations, Springer-Verlag, (1994).
- 8) Zienkiewicz O. C. and Taylor R. L., The Finite Element Method, 4th ed., McGraw-Hill, London, (1989).
- 9) F. Ding and A. J. Giacomini, Polymer Eng. and Sci. **44**, 1811-1827 (2004).
- 10) Reddy J. N., Introduction to Finite Elements in Engineering, 3rd ed., Prentice Hall, (2002).
- 11) Mitsoulis E, AZChE J. **32**, 497 (1986).
- 12) Mitsoulis E and Heng F. L., Rheol. Acta **26**, 414, (1987).
- 13) Tham N C and Mennig G, Rheol. Acta **40**, 67-73, (2001).
- 14) Bohme G. and Broszeit J, Theor. Comput. Fluid Dyn. **9**, 65-74, (1997).
- 15) Bohme G. and Wunsch O., Arch. Appl. Mech. **67**, 167-78, (1997).
- 16) Codina R. and Soto O., Int. J. Numer. Methods Eng. **46**, 1559-73, (1999).
- 17) Shojaei, A., Ghaffarian, S.R., Karimian, S.M.H., Composites Science and Technology **63**, 1931-1948, (2003).
- 18) Potente, H., Kurte, M., Ridder, H., International Polymer Processing **18**, 115-121, (2003).
- 19) Michaeli, W., Kratz, M., Marx, E., Macromolecular Materials and Engineering **287**, 660-664, (2002).
- 20) Mitsoulis, E., Applied Rheology **9**, 198-203, (1999).
- 21) Khayat, R.E., Plaskos, C., Genouvrier, D., International Journal for Numerical Methods in Engineering **50**, 1347-1368, (2001).
- 22) www.madisongroup.com/publications/pptrends.pdf
- 23) Nguyen-Thien, T., Tran-Cong, T., Engineering Analysis with Boundary Elements **24**, 95-106, (2000).
- 24) Stradins, L., Osswald, T.A. Engineering Analysis with Boundary Elements **16**, 197-202, (1995).
- 25) Ang W. T., A Beginner's Course in Boundary Element Methods, Universal Publishers, Boca Raton, USA, (2007).
- 26) Banerjee P.K., The Boundary Element Methods in Engineering, McGraw-Hill Book Company, England., (1994).
- 27) Gernot Beer, Ian Smith, Christian Duenser, The Boundary Element Method with Programming: For Engineers and Scientists, Springer, (2008).
- 28) Leveque R.J., Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems, Cambridge University, New York, (2002).

- 29) www-gm3.univ-mrs.fr/polys/gm3-07/gm3-07.pdf
- 30) Crochet M.J., A.R. Davies, K. Walters, Numerical Simulation of Non-Newtonian Flow, Elsevier Science, Amsterdam, (1984).
- 31) Kunen, E., Keith, J.M., Grant, P.W., King, J.A., Morrison, F.A. Journal of Applied Polymer Science **106**, 433-438, (2007).
- 32) epubl.ltu.se/1402-1617/2006/242/LTU-EX-06242-SE.pdf
- 33) Gamache, R.W., Machine Design **76**, 132-133, (2004).
- 34) Duwel, A., Candler, R.N., Kenny, T.W., Varghese, M. Journal of Microelectromechanical Systems **15**, 1437-1445, (2006).
- 35) Pokorný, M., Raida, Z. Radioengineering **17**, 47-52, (2008).
- 36) Shi, Z., Wang, X. Journal of Power Sources **185**, 985-992, (2008).
- 37) www.comsol.com
- 38) www.solidworks.com
- 39) Hubka, V. Principles of Engineering Design., Springer-Verlag, (1982).
- 40) Box G.E.. Statistics for Experimenters., J. Wiley and Sons, New York, (1978).
- 41) John P. W.. Statistical Design and Analysis of Experiments. Macmillan Co., New York , (1971).
- 42) Montgomery D. C.. Design and Analysis of Experiments., J. Wiley and Sons, New York, (1991).
- 43) Papalambros P. and Wilde.D., Principles of Optimal Design., Cambridge University Press, New York, (1988).
- 44) Taguchi G., Introduction to Quality Engineering., Asian Productivity Organization, Unipub, White Plains, NY, (1986).
- 45) Roy Ranjit K., Design of Experiments Using the Taguchi Approach, J. Wiley and Sons, New York, (2001).
- 46) Mamalis, A.G., Kouzilos, G., Vortselas, A.K., AIP Conference Proceedings 1255, 40-42, (2010).
- 47) Mamalis, A.G., Spentzas, K.N., Kouzilos, G., Theodorakopoulos, I., Pantelelis, N.G., Advances in Polymer Technology **29**, 173-184, (2010).
- 48) Soury E., Behravesh A.H., Ghasemi H, and Zolfaghari A., J. Reinforc. Plast. Compos., DOI: 10.1177/0731684408089507 (in press).
- 49) Nobrega J.M., Carneiro O.S., Oliveira P.J., and Pinho F.T., "Flow Balance Optimization of Profile Extrusion Dies," in 18th Annual Conference of the Polymer Processing Society, PPS-18, Guimaraes, June 16–20 (2002).
- 50) Logothetis N., Appl. Statist. **39**, 31-48, (1990).
- 51) Macosko, C. W. , Rheology: Principles, Measurements and Applications; Wiley-VCH, New York, (1994).
- 52) Khuri A.I, and Cornell J.A.. "Response Surfaces," 2nd edition, Marcel Dekker. New York, (1996).

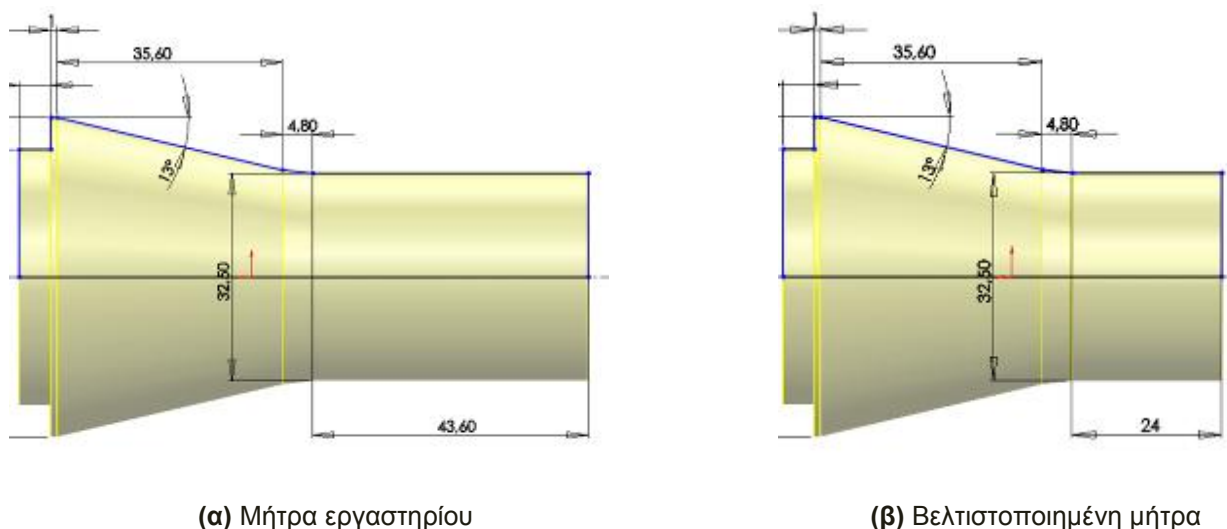
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση στη μήτρα εκβολής με στόχο να υπολογιστούν μηχανικές τάσεις, μετατοπίσεις και παραμορφώσεις που οφείλονται στην πίεση του ρευστού, στη θερμοκρασία του ρευστού και της μήτρας, καθώς και στη βαρύτητα και να βγουν ασφαλή συμπεράσματα για την αντοχή της. Το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι το ANSYS Workbench, το οποίο είναι εμπορικό υπολογιστικό πακέτο προσομοίωσης, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων όγκων (Fluent, CFX) [1-4]. Οι μήτρες εκβολής που θα αναλυθούν είναι:

- η **αρχική** μήτρα εκβολής (**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**)
- η **βέλτιστη** μήτρα εκβολής (**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε**)

Η βέλτιστη μήτρα διαφέρει από την αρχική μήτρα στα τμήματα της κεφαλής αράχνης και στη μήτρα για σωλήνα $\varnothing 32$ (εσωτερικό & εξωτερικό τμήμα). Συγκεκριμένα, το μήκος εξόδου της υφιστάμενης μήτρας είναι 43,6mm, ενώ το μήκος εξόδου της βελτιστοποιημένης μήτρας εκβολής είναι 24mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1:



Σχήμα 4.1: (α), (β) Σύγκριση του μήκους εξόδου των δύο μητρών εκβολής

Θα πραγματοποιηθούν έξι (6) προσομοιώσεις για κάθε μήτρα εκβολής, στις οποίες θα μεταβάλλεται η πίεση στην είσοδο του ρευστού, ενώ η θερμοκρασία ρευστού και στερεού θα θεωρηθεί σταθερή στους 196 °C, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.

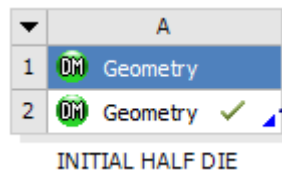
α/α	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΠΙΕΣΗ (bar)
1	196	100
2	196	200
3	196	300
4	196	400
5	196	500
6	196	600

Πίνακας 4.1: Βασικά χαρακτηριστικά προσομοιώσεων

Γίνεται έλεγχος της αντοχής των δύο μητρών σε διάφορες τιμές πίεσης εισόδου του ρευστού στη μήτρα από 100 έως και 600 bar [5-9]. Αρχικά γίνεται προσομοίωση της ροής του ρευστού, για να υπολογιστεί η πίεση στα τοιχώματα του ρευστού και, στη συνέχεια, πραγματοποιείται στατική ανάλυση, όπου λαμβάνονται υπόψη η πίεση, η θερμοκρασία και η βαρύτητα, για να υπολογιστούν οι ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις τόσο ολόκληρης της μήτρας, όσο και των επιμέρους τμημάτων της.

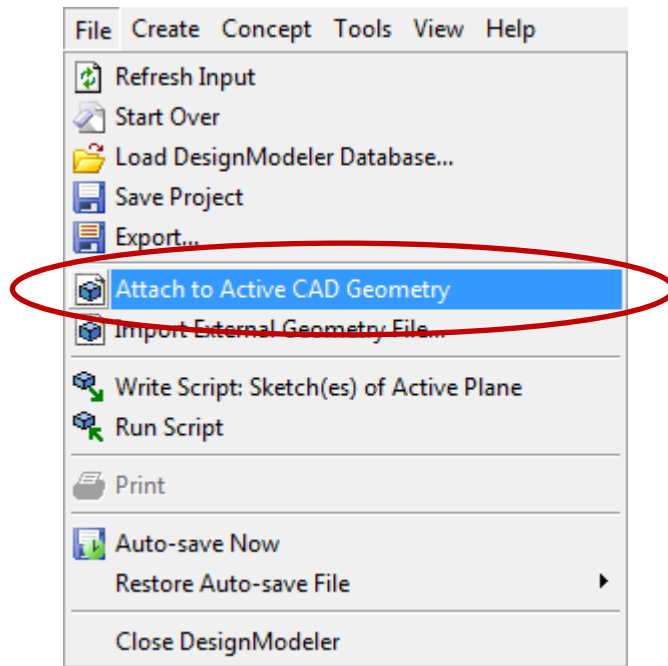
4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ

Αρχικά εισάγεται ένα μπλοκ γεωμετρίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



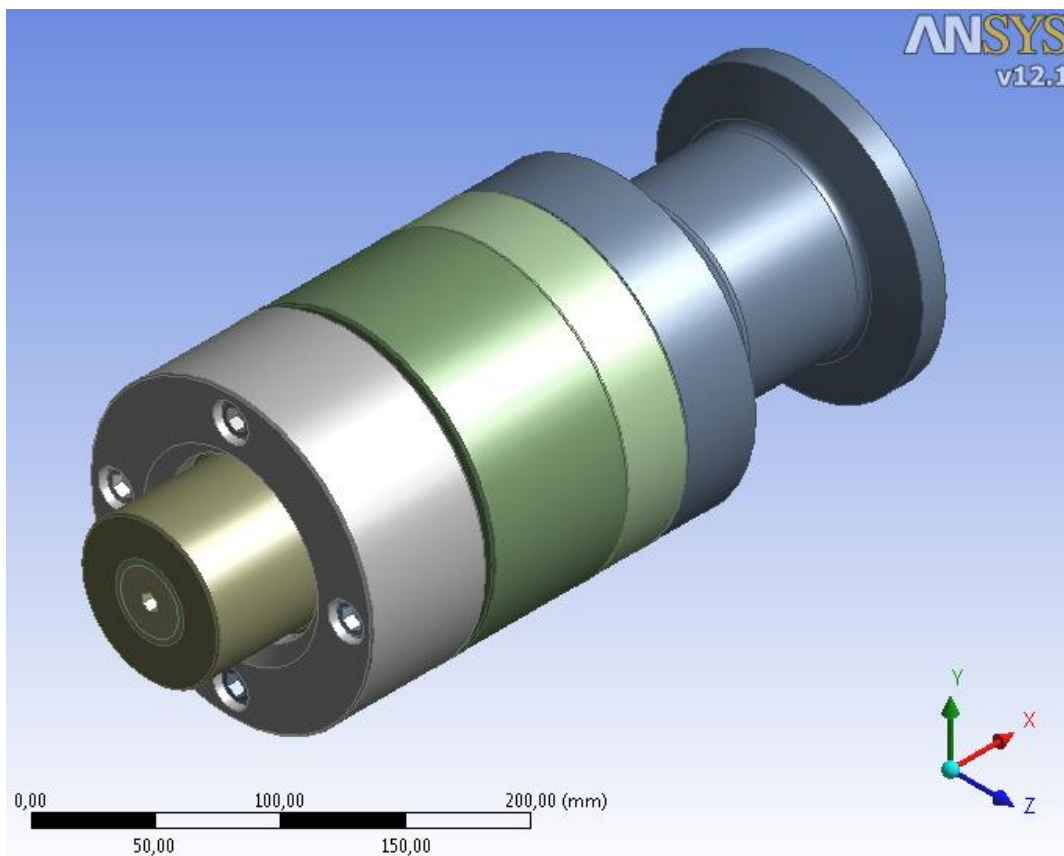
Σχήμα 4.2: Εισαγωγή μπλοκ γεωμετρίας στο ANSYS Workbench

Στη συνέχεια, στο περιβάλλον της γεωμετρίας (Design Modeler) γίνεται η εισαγωγή της γεωμετρίας υπάρχει στο υπολογιστικό πρόγραμμα SolidWorks χρησιμοποιώντας το menu: Attach to Active CAD Geometry, δεδομένου ότι τα δύο προγράμματα έχουν άμεση αλληλεπίδραση.



Σχήμα 4.3: Εισαγωγή γεωμετρίας από το SolidWorks

Κατ' αυτό τον τρόπο, εισάγεται η γεωμετρία της μήτρας, ορίζοντας όλα τα μέρη της μήτρας ως στερεά (solid), ενώ το κενό χώρο της ως ρευστό (fluid) [10,11].

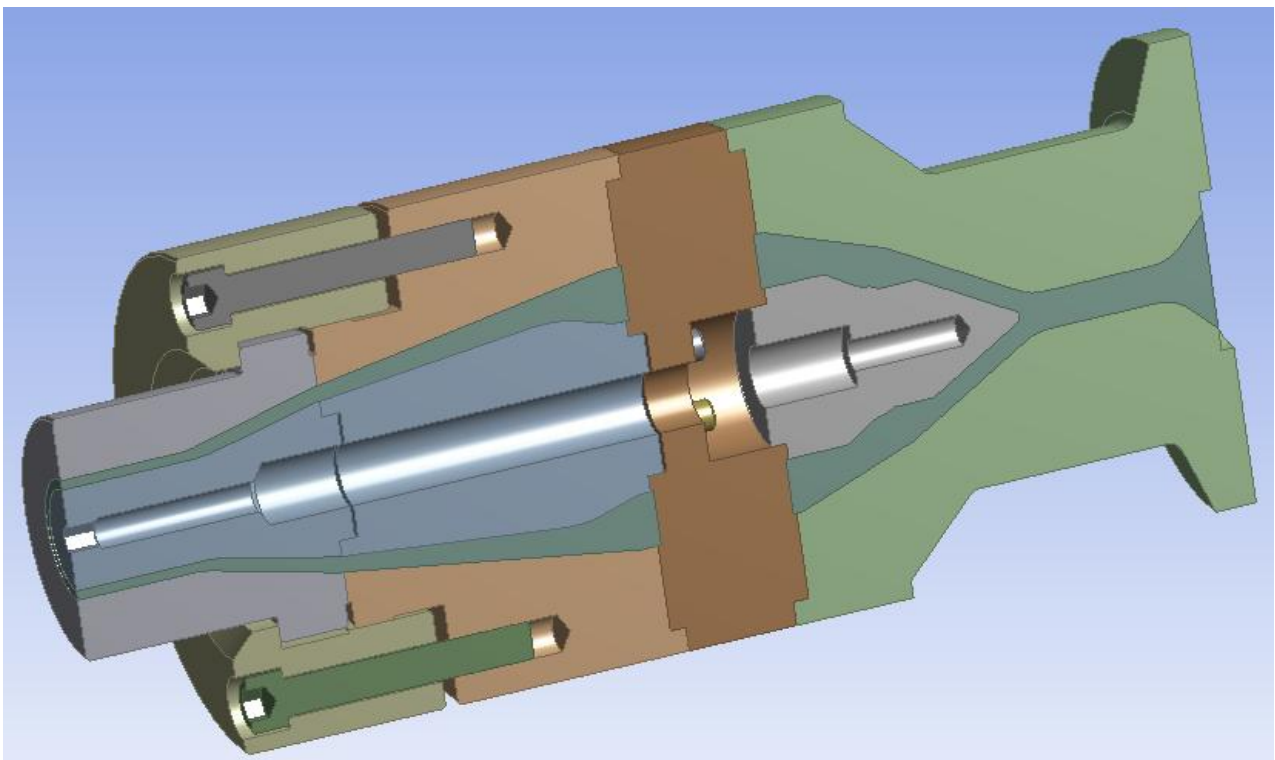


Σχήμα 4.4: Γεωμετρία της μήτρας στο Ansys

Για λόγους εξοικονόμησης μνήμης του υπολογιστή, αλλά και ταχύτητας κατά τις προσομοιώσεις, θα αναλυθεί το ½ της μήτρας.

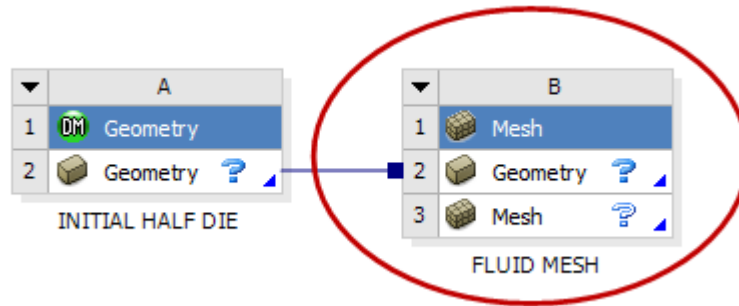
Details View	
Details of Symmetry	
Symmetry	Symmetry
Number of Planes	1
Symmetry Plane1	ZXPlane
Model Type	Full Model
Target Bodies	All Bodies

Σχήμα 4.5: Ορισμός συμμετρίας κατά το ήμισυ στη μήτρα



Σχήμα 4.6: Συμμετρικό μοντέλο κατά το ½

Αρχικά, εισάγεται μπλοκ πλέγματος στο περιβάλλον του ANSYS Workbench, το οποίο συνδέεται με το μπλοκ της γεωμετρίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

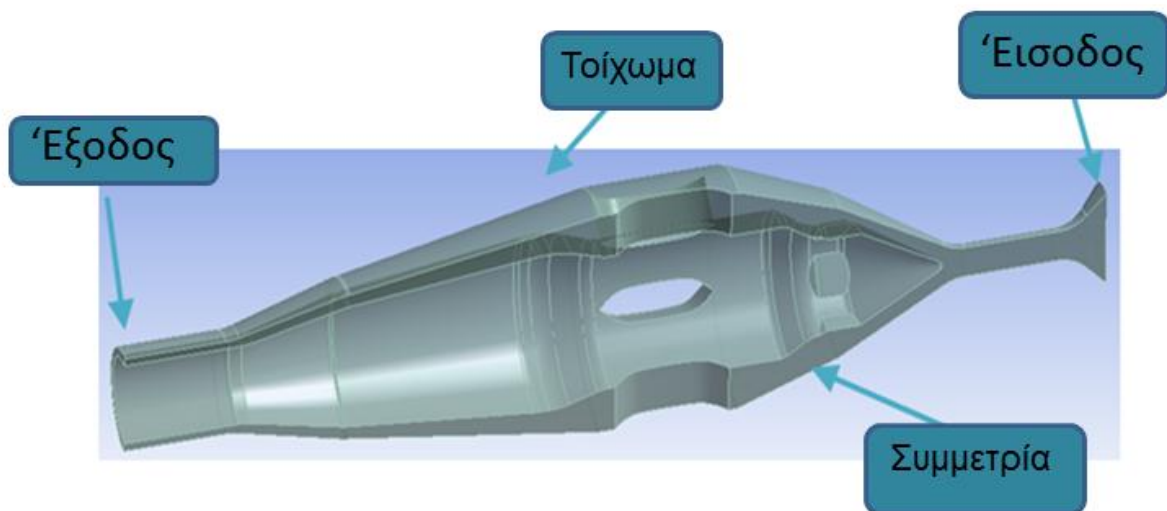


Σχήμα 4.7: Εισαγωγή μπλοκ πλέγματος στο ANSYS Workbench

Στη συνέχεια, μέσα στο περιβάλλον του πλέγματος (Meshing) από το menu→Mesh, απομονώνεται το ρευστό μέσω της εντολής suppress στα στερεά τμήματα της μήτρας εκβολής (solid), και ορίζονται οι διάφορες επιφάνειες του ρευστού:

- Inlet (Είσοδος)
- Outlet (Έξοδος)
- Wall (Τοίχωμα)
- Symmetry (Συμμετρία)

όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8:

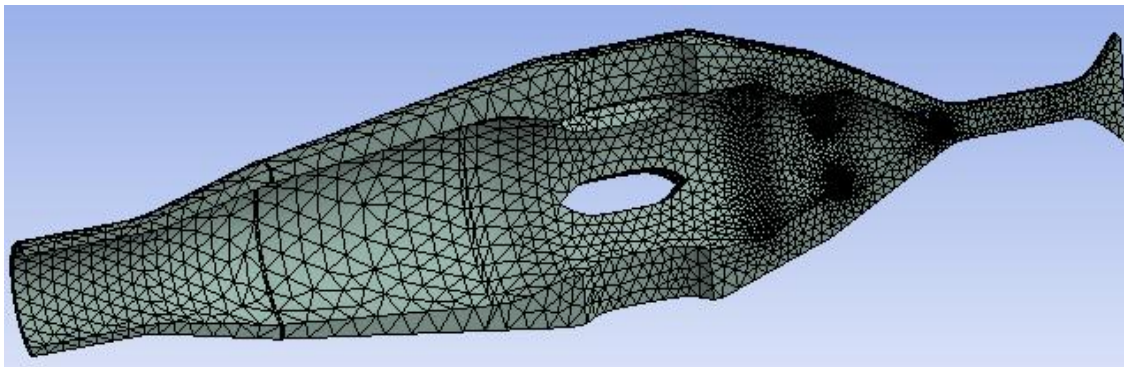


Σχήμα 4.8: Απομόνωση της γεωμετρίας του ρευστού

Με αυτή τη διαδικασία δημιουργείται το κατάλληλο αριθμητικό πλέγμα για την επίλυση του ρευστομηχανικού μοντέλου. Τα χαρακτηριστικά και η δομή του αριθμητικού πλέγματος φαίνονται στο Σχήμα 4.8 και 4.9, αντίστοιχα.

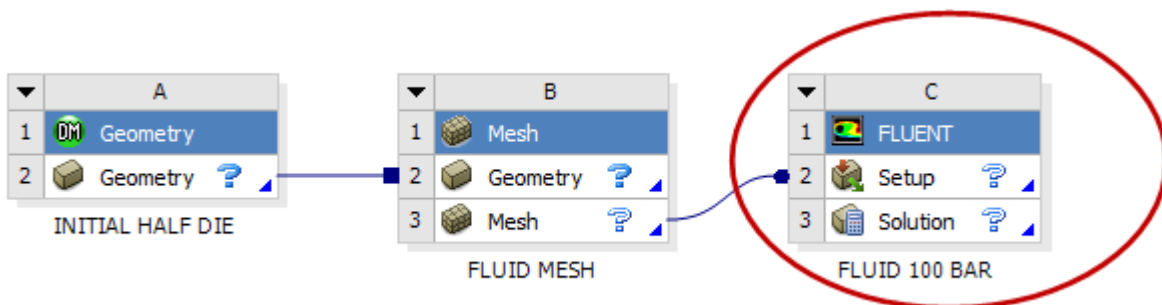
Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
[-] Sizing	
Use Advanced Si...	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Norma...	Default (18,0 °)
Min Size	Default (1,8763e-004 m)
Max Face Size	Default (1,8763e-002 m)
Max Tet Size	Default (3,7525e-002 m)
Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge L...	4,6542e-006 m

Σχήμα 4.9: Ιδιότητες πλέγματος του ρευστού



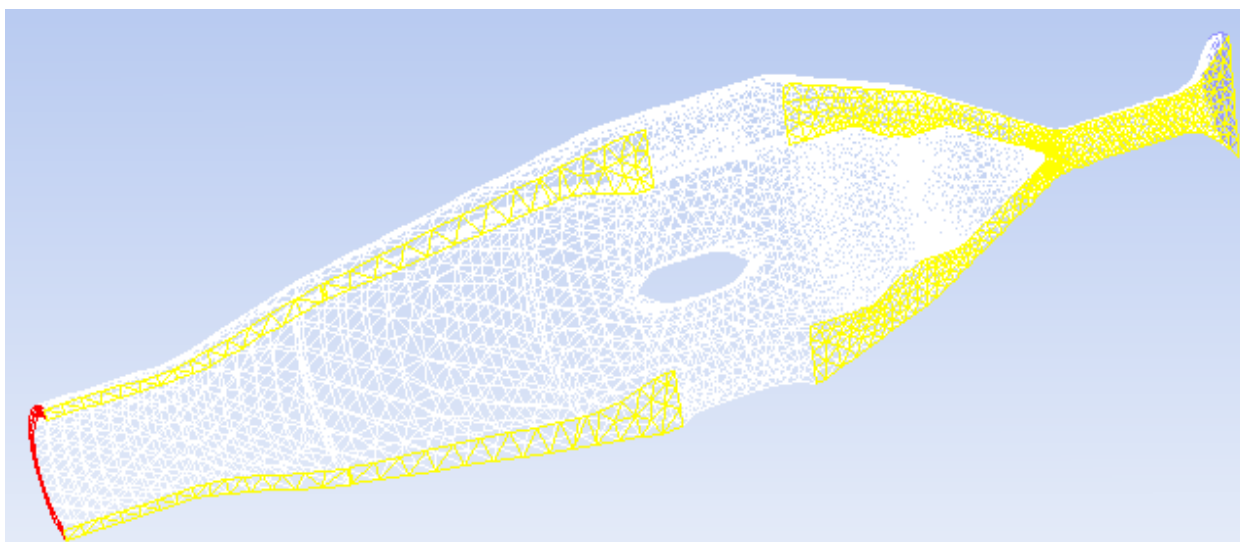
Σχήμα 4.10: Πλέγμα πεπερασμένων όγκων του ρευστού

Το συγκεκριμένο αριθμητικό πλέγμα έχει δημιουργηθεί για την επίλυση του ρευστομηχανικού μοντέλου από τον επιλυτή Fluent του ANSYS Workbench. Στη συνέχεια, μέσα στο περιβάλλον του ANSYS Workbench, εισάγεται το μπλοκ του Fluent και συνδέεται με το μπλοκ του πλέγματος.



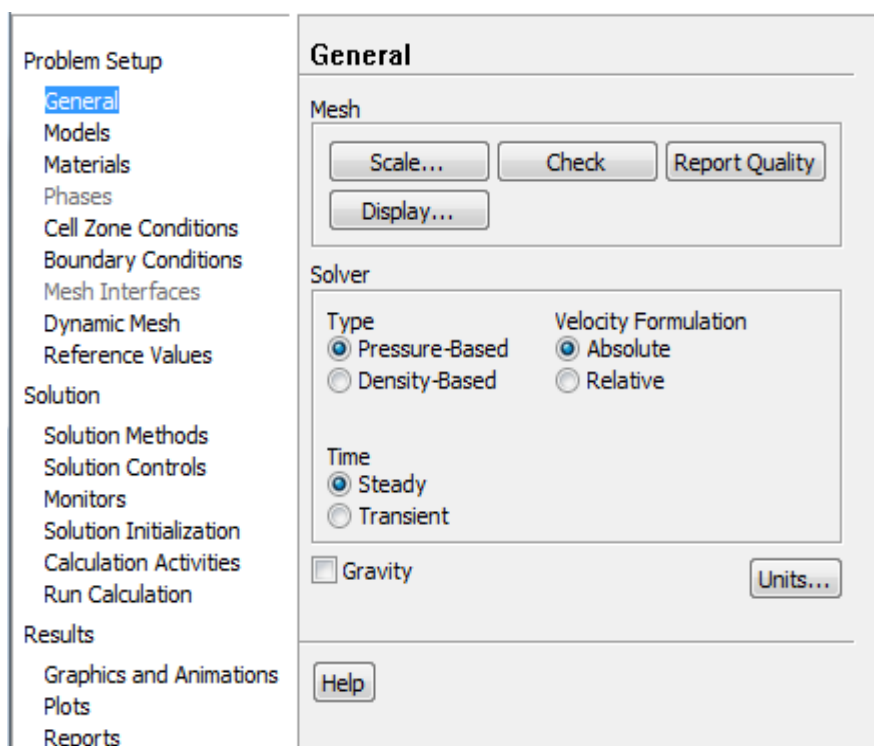
Σχήμα 4.11: Εισαγωγή μπλοκ Fluent στο ANSYS Workbench

Στο περιβάλλον του Fluent από το menu → Setup εισάγεται αυτόματα το πλέγμα που είχε δημιουργηθεί όπως φαίνεται στα Σχήμα 4.11 και 4.12:



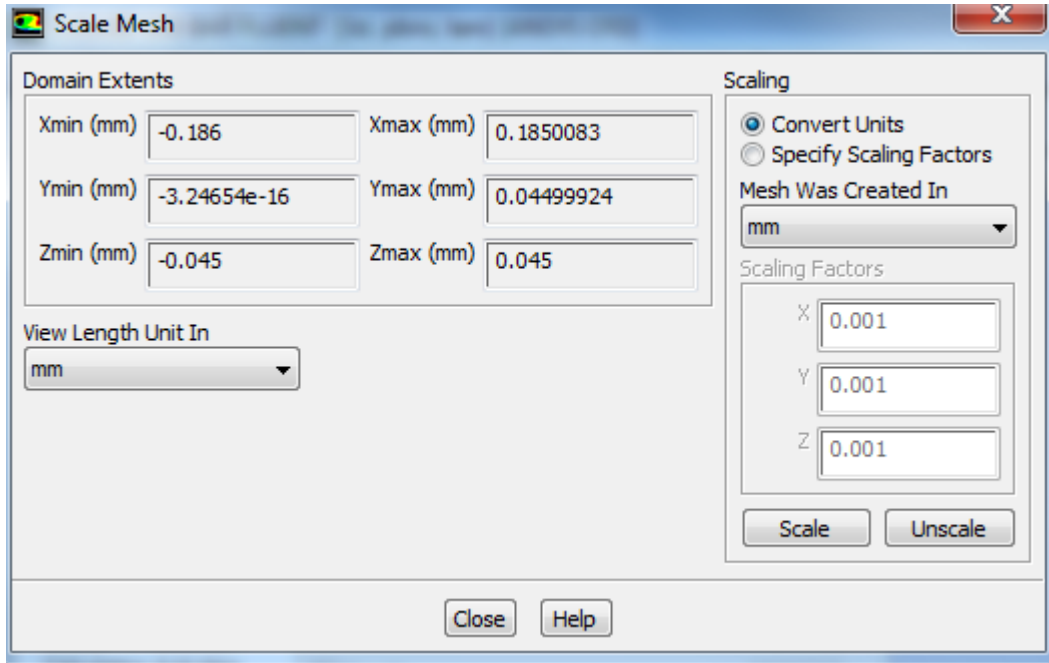
Σχήμα 4.12: Πλέγμα του ρευστού που έχει εισαχθεί στο Fluent

Τα στοιχεία που διακρίνονται είναι: η προέλευση του πλέγματος, η είσοδος και έξοδος του ρευστού, η συμμετρία και η επιφάνεια στο τοίχωμα της μήτρας. Στη συνέχεια, ορίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της ανάλυσης.



Σχήμα 4.13: Βασικές ρυθμίσεις του Fluent

Στο submenu→Scale, ορίζεται η μονάδα μέτρησης του πλέγματος (mm).



Σχήμα 4.14: Ορισμός πως μονάδας μέτρησης

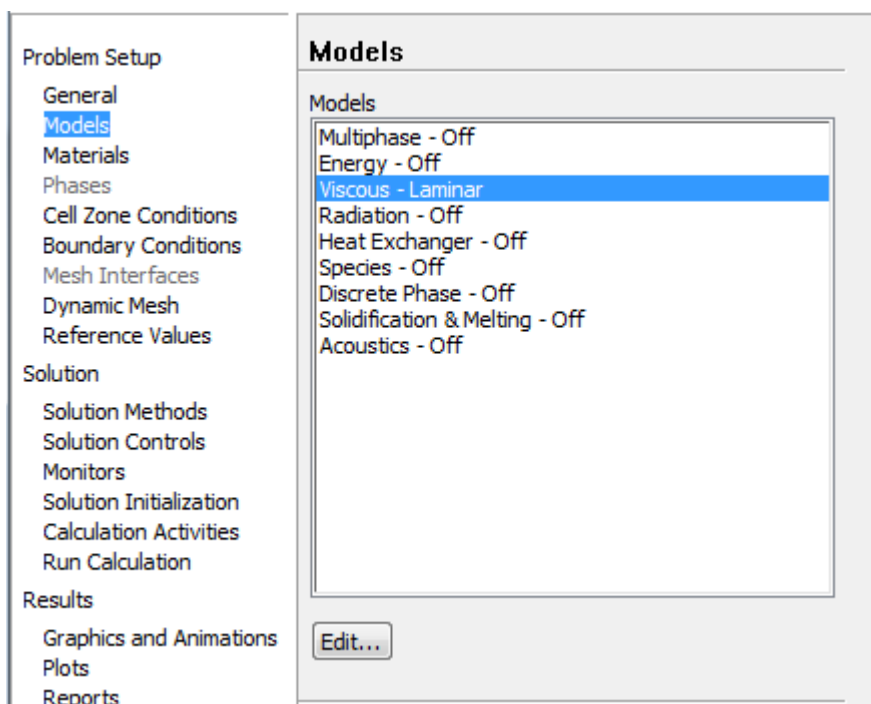
Η εντολή submenu→Report Quality δίνει αριθμητικά δεδομένα για την ποιότητα του πλέγματος, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 για το συγκεκριμένο υπολογιστικό πρόβλημα.

<p>Mesh Quality: Applying quality criteria for tetrahedra/mixed cells. Maximum cells quish = 8.16671e-001 Maximum cells kewness = 9.02963e-001 Maximum aspect ratio = 2.53697e+001</p>

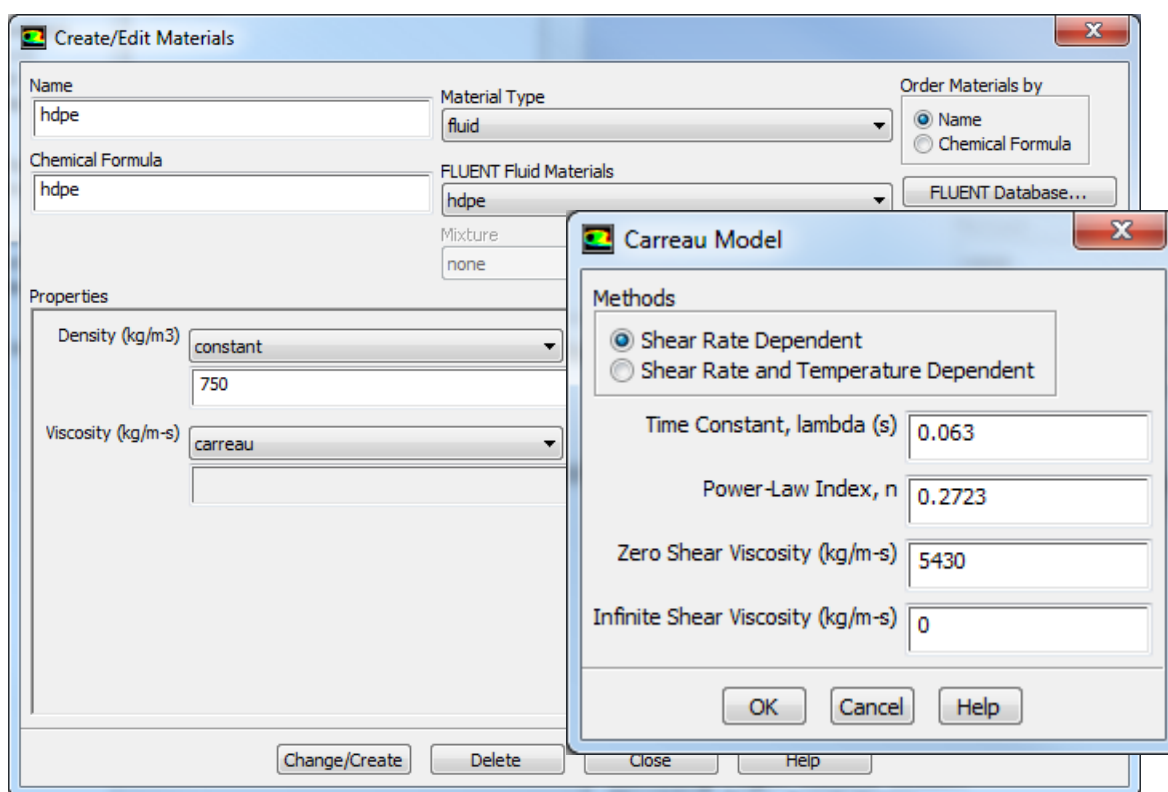
Πίνακας 4.2: Ποιότητα του πλέγματος

Αμέσως μετά, ορίζεται το είδος του προβλήματος, το οποίο είναι ροή μη νευτωνικού ρευστού. Ορίζονται οι ιδιότητες του ρευστού, το οποίο είναι πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE). Το ιξώδες του πολυμερικού ρευστού ακολουθεί το μοντέλο Carreau [12-14]. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο, το ιξώδες του υλικού (πολυαιθυλένιο) υπολογίζεται από τη Σχέση 4.1:

$$n = a_T n_0 (T_R) [1 + (a_T \dot{\lambda} (T_R) \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2}$$



Σχήμα 4.15: Ορισμός του είδους του προβλήματος



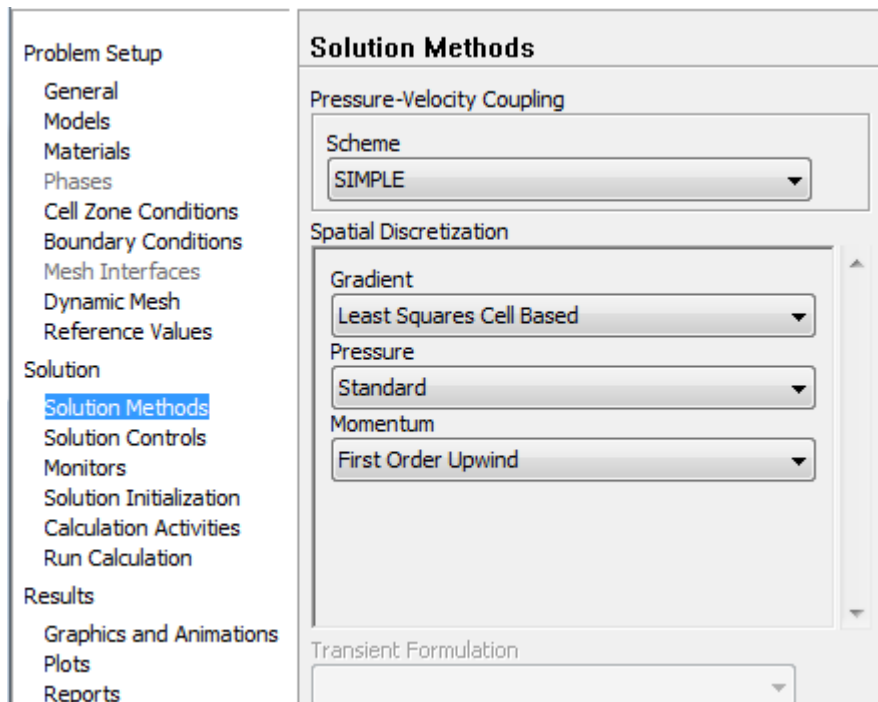
Σχήμα 4.16: Ιδιότητες του πολυαιθυλενίου (HDPE)

Ακολουθως, ορίζονται οι οριακές συνθήκες του προβλήματος, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 4.2:

ΕΙΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ		ΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ
Είσοδος	Inlet	Πίεση: 100 bar
Έξοδος	Outlet	Πίεση: 1 bar
Επίπεδο ZX	ZX Plane	Συμμετρία (Symmetry)
Τοίχωμα	Wall	Μη ολίσθηση (No Slip)

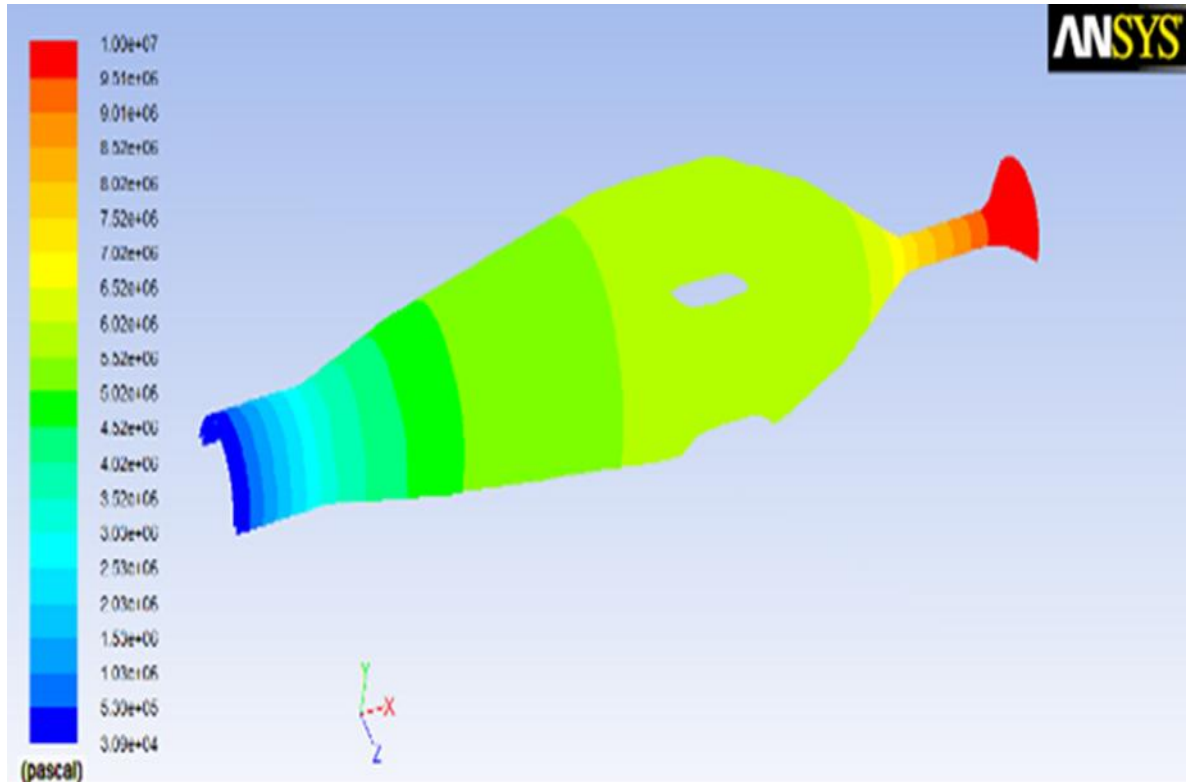
Πίνακας 4.2: Οριακές συνθήκες προβλήματος

Στη συνέχεια, ορίζονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις για την επίλυση του προβλήματος, βλ. Σχήμα 4.17:

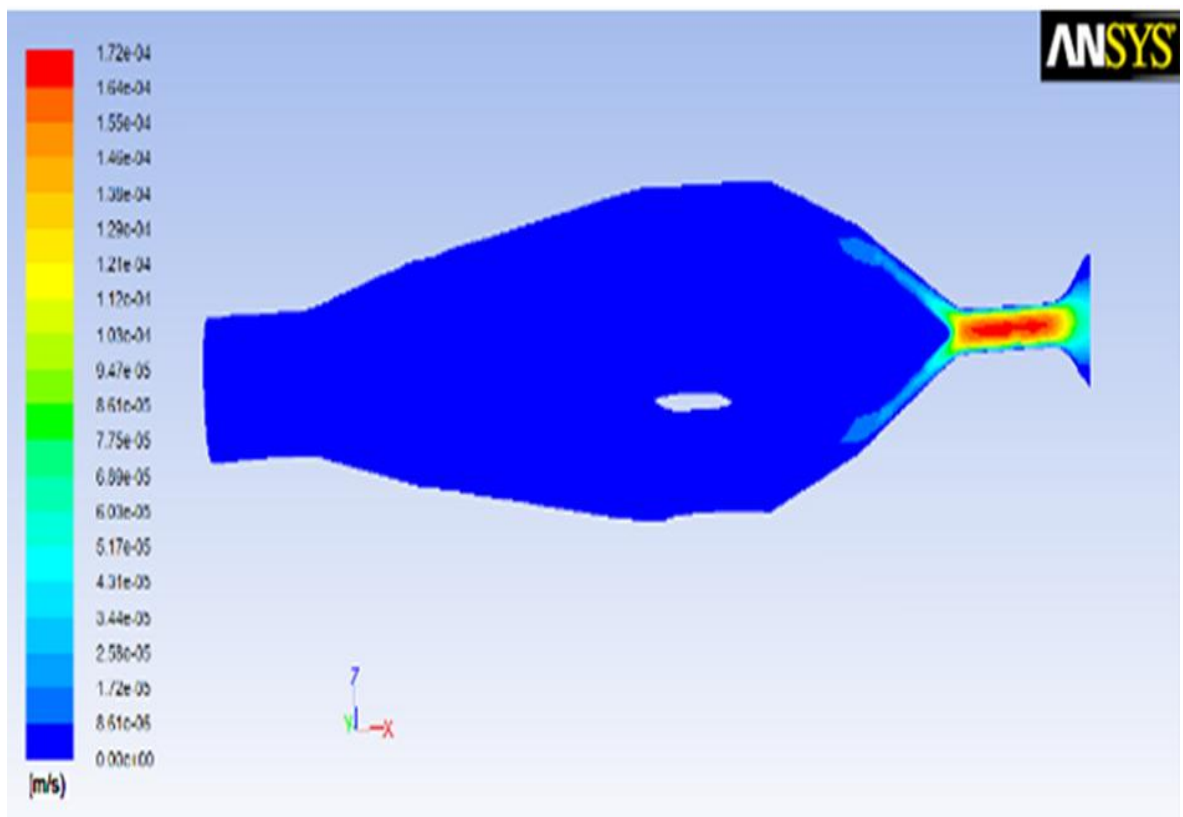


Σχήμα 4.17: Ρυθμίσεις επίλυσης του προβλήματος

Η κατανομή της πίεσης και της ταχύτητας στη μήτρα εκβολής φαίνονται στα Σχήματα 4.18 και 4.19, αντίστοιχα.



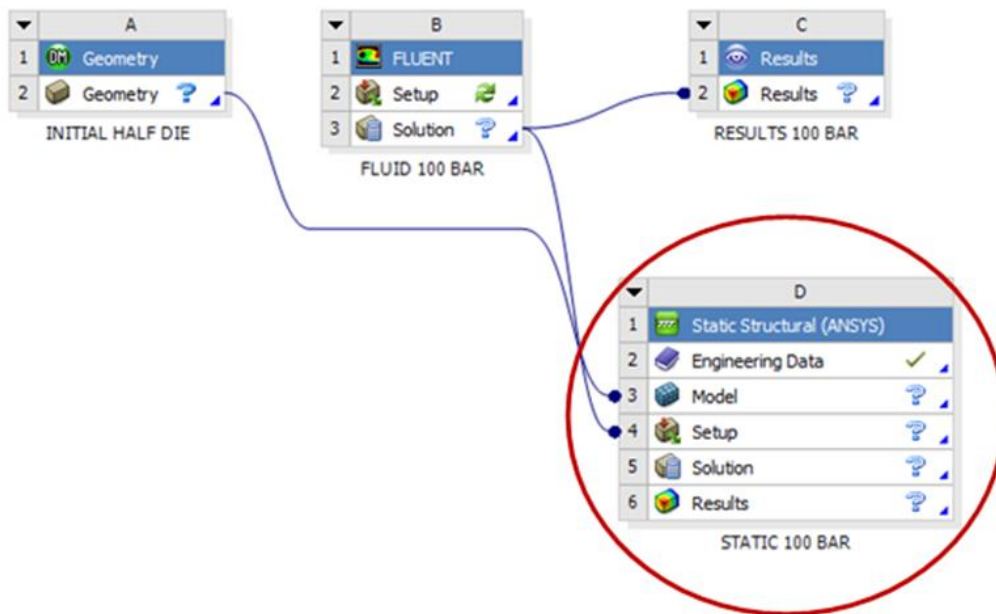
Σχήμα 4.18: Πίεσεις στα τοιχώματα του ρευστού



Σχήμα 4.19: Ταχύτητες στα τοιχώματα και τη συμμετρία του ρευστού

4.3 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Μετά την επίλυση του μοντέλου της ροής, μέσω του βασικού menu του ANSYS Workbench εισάγεται το μπλοκ →Results, το οποίο συνδέεται με το →Solution του Fluent, ώστε τα αποτελέσματα να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα για την επίλυση του στατικού προβλήματος. Η στατική ανάλυση γίνεται μέσω της εντολής μπλοκ →Static Structural, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.20: Εισαγωγή μπλοκ στατικής ανάλυσης στο ANSYS Workbench

Στη συνέχεια, επιλέγεται η εντολή menu→Engineering Data όπου ορίζεται το υλικό κατασκευής της μήτρας και των επιμέρους τμημάτων της. Το υλικό κατασκευής των επιμέρους τμημάτων της μήτρας εκβολής του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών είναι χάλυβας IMPAX [15], οι βασικές ιδιότητες του οποίου αναφέρονται στο Σχήμα 4.21.

Outline of Schematic O2: Engineering Data			
	A	B	C
1	Contents of Engineering Data		Source
2	Material		Description
3	IMPAX	<input type="checkbox"/>	C:\Users\Manos\Desktop\ANALYSH MHTRAS - SIMPLE\ANALYSH MHTRAS - ... Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	Structural Steel	<input type="checkbox"/>	C:\Users\Manos\Desktop\ANALYSH MHTRAS - SIMPLE\ANALYSH MHTRAS - ... Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material		

Properties of Outline Row 3: IMPAX		
	A	B
1	Property	Value
2	Density	7850
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,3E-07
5	Reference Temperature	22
6	Isotropic Elasticity	
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
8	Young's Modulus	2,005E+11
9	Poisson's Ratio	0,33
10	Bulk Modulus	1,9657E+11
11	Shear Modulus	7,5376E+10
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular
16	Strain-Life Parameters	
17	Display Curve Type	Strain-Life
18	Strength Coefficient	9,2E+08
19	Strength Exponent	-0,106
20	Ductility Coefficient	0,213
21	Ductility Exponent	-0,47
22	Cyclic Strength Coefficient	1E+09
23	Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2
24	Tensile Yield Strength	8,96E+08
25	Compressive Yield Strength	9,5E+08
26	Tensile Ultimate Strength	1,01E+09
27	Compressive Ultimate Strength	0

Σχήμα 4.21: Βασικές ιδιότητες του χάλυβα IMPAX (ANSYS Workbench)

Το υλικό κατασκευής των κοχλιών σύνδεσης είναι ανοξειδωτος χάλυβας με βασικές ιδιότητες όπως αναφέρονται στο Σχήμα 4.22.

Outline of Schematic O2: Engineering Data			
	A	B	D
1	Contents of Engineering Data		Source
2	Material		
3		<input type="checkbox"/>	C:\Users\Manos\Desktop\ANALYSH MHTRAS - SIMPLE\ANALYSH MHTRAS - ... Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4		<input type="checkbox"/>	C:\Users\Manos\Desktop\ANALYSH MHTRAS - SIMPLE\ANALYSH MHTRAS - ... Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material		

Properties of Outline Row 4: Structural Steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2		7850	kg m ⁻³
3			
4		1,2E-05	C ⁻¹
5		22	C
6			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
12		Tabular	
16			
17	Display Curve Type	Strain-Life	
18	Strength Coefficient	9,2E+08	Pa
19	Strength Exponent	-0,106	
20	Ductility Coefficient	0,213	
21	Ductility Exponent	-0,47	
22	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa
23	Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2	
24		2,5E+08	Pa
25		2,5E+08	Pa
26		4,6E+08	Pa
27		0	Pa

Σχήμα 4.22: Βασικές ιδιότητες του υλικού κατασκευής των κοχλιών σύνδεσης (ANSYS Workbench)

Ακολουθεί ο ορισμός του υλικού για κάθε επιμέρους τμήμα της μήτρας εκβολής, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3:

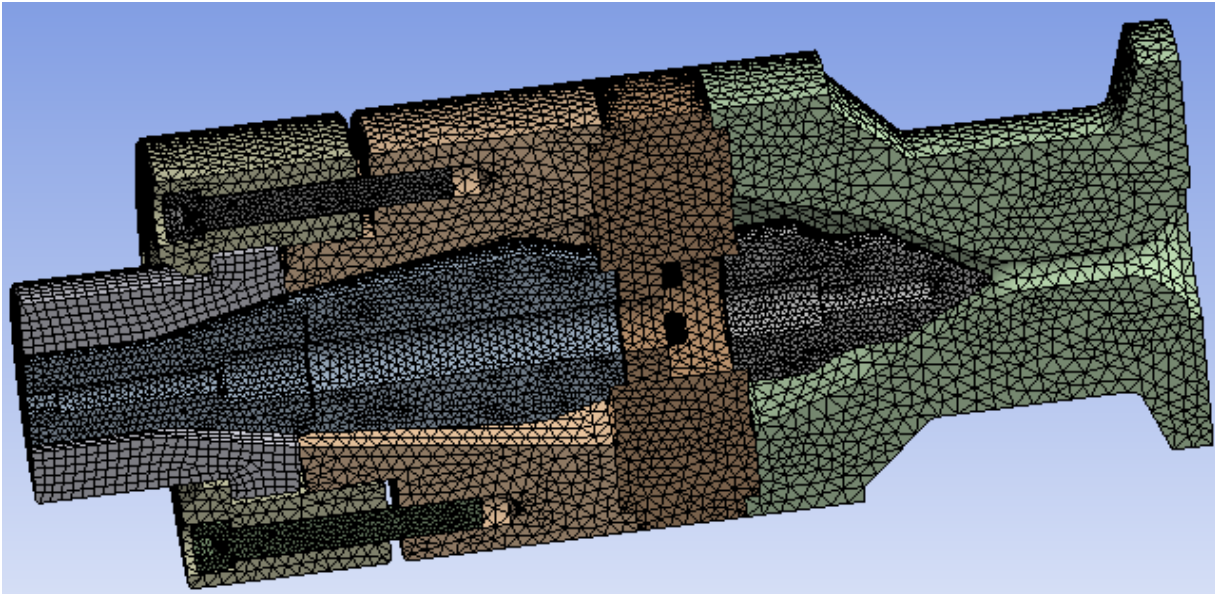
ΤΜΗΜΑ	ΥΛΙΚΟ
Μονή αράχνη κεφαλής με έξι πόδια	Χάλυβας IMPAX
Υποδοχή αρσενικής μήτρας	Χάλυβας IMPAX
Εσωτερικό τμήμα μήτρας για σωλήνα Ø32	Χάλυβας IMPAX
Κώνος αρσενικού κεφαλής	Χάλυβας IMPAX
Λαιμός κεφαλής	Χάλυβας IMPAX
Σώμα κεφαλής	Χάλυβας IMPAX
Εξωτερικό τμήμα μήτρας για σωλήνα Ø32	Χάλυβας IMPAX
Δακτύλιος συγκράτησης μήτρας	Χάλυβας IMPAX
DIN 912 Ø6 x 25 mm --- 25 N	Ατσάλι (Structural Steel)
DIN 912 Ø10 x 50 mm --- 50 N	Ατσάλι (Structural Steel)
DIN 912 Ø12 x 80 mm --- 80 N	Ατσάλι (Structural Steel)
DIN 912 Ø12 x 120 mm --- 120 N	Ατσάλι (Structural Steel)

Πίνακας 4.3: Ορισμός υλικών των τμημάτων

Δημιουργείται το πλέγμα, του οποίου τα χαρακτηριστικά και η δομή, όπως φαίνονται στα Σχήματα 4.23 και 4.24, αντίστοιχα.

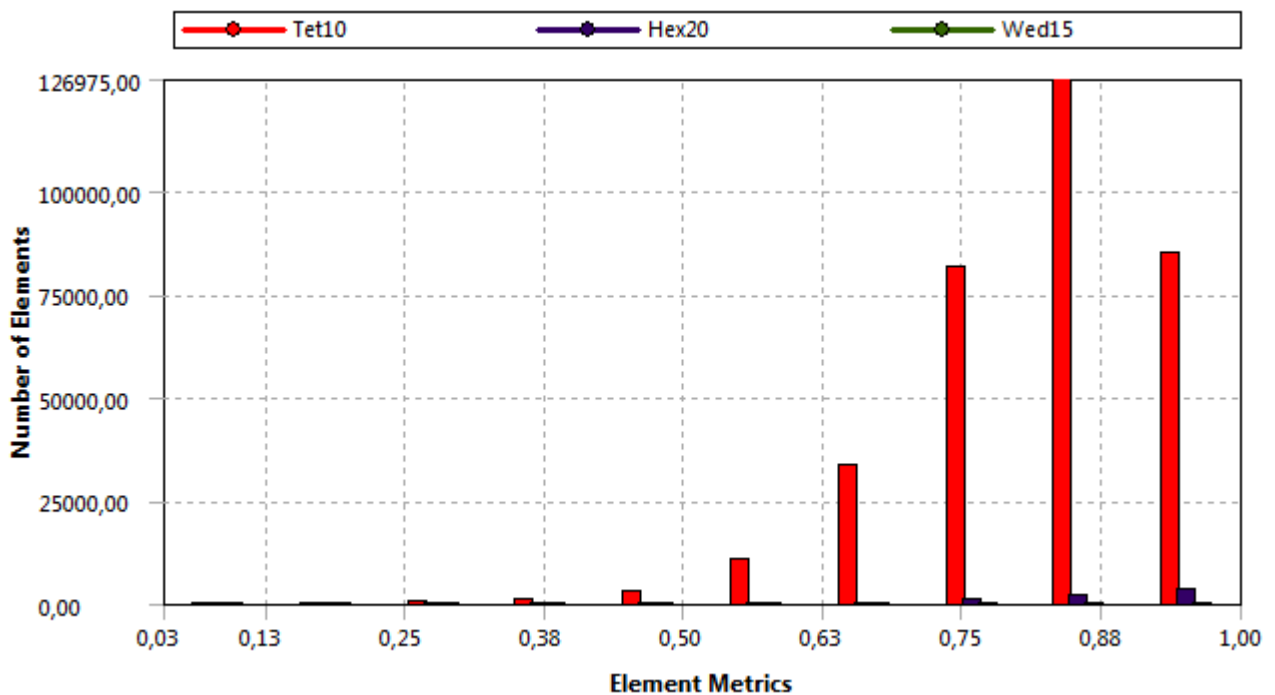
Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
[-] Sizing	
Use Advanced Si...	On: Curvature
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Curvature Norma...	Default (70,3950 °)
Min Size	Default (0,103550 mm)
Max Face Size	Default (10,3550 mm)
Max Tet Size	Default (20,710 mm)
Growth Rate	Default (1,850)
Minimum Edge L...	0,942480 mm

Σχήμα 4.23: Ιδιότητες πλέγματος των στερεών τμημάτων της μήτρας εκβολής



Σχήμα 4.24: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της μήτρας εκβολής

Στατιστικά στοιχεία σχετικά με τον αριθμό και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.25:



Σχήμα 4.25: Στατιστικά στοιχεία των πεπερασμένων στοιχείων των στερεών τμημάτων

Αφού ορίστηκε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων σε όλα τα τμήματα της μήτρας, στη συνέχεια, ορίζονται οι συνδέσεις μεταξύ των τμημάτων της.

Details of "Bonded - 3 - ARAXNI KEFALIS-1 To 4 - KONOS ARSENIKOY KEFALIS-1"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	2 Faces
Target	2 Faces
Contact Bodies	3 - ARAXNI KEFALIS-1
Target Bodies	4 - KONOS ARSENIKOY KEFALIS-1
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic
Behavior	Symmetric
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Pure Penalty
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Never
Pinball Region	Program Controlled

Σχήμα 4.26: Σύνδεσης μεταξύ της αράχνης και του κώνου της μήτρας αράχνης

Στο Σχήμα 4.27, ορίζονται οι οριακές συνθήκες του στατικού προβλήματος. Κατ' αρχήν, ορίζεται πάκτωση (Fixed Support) στο λαιμό κεφαλής .

Details of "Fixed Support"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

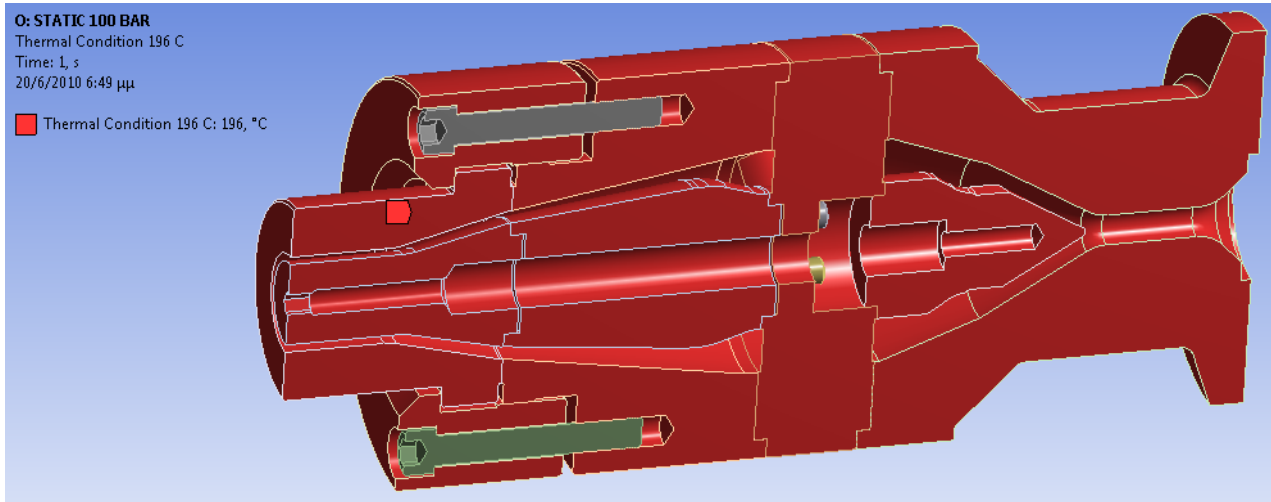
Σχήμα 4.27: Λεπτομέρειες ορισμού πάκτωσης στο λαιμό της κεφαλής

Αμέσως μετά ορίζεται η βαρύτητα (Standard Earth Gravity) ως φόρτιση στη μήτρα εκβολής

Details of "Standard Earth Gravity"	
Scope	
Geometry	All Bodies
Definition	
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	-0, mm/s ² (ramped)
Y Component	-0, mm/s ² (ramped)
Z Component	-9806,6 mm/s ² (ramped)
Suppressed	No
Direction	-Z Direction

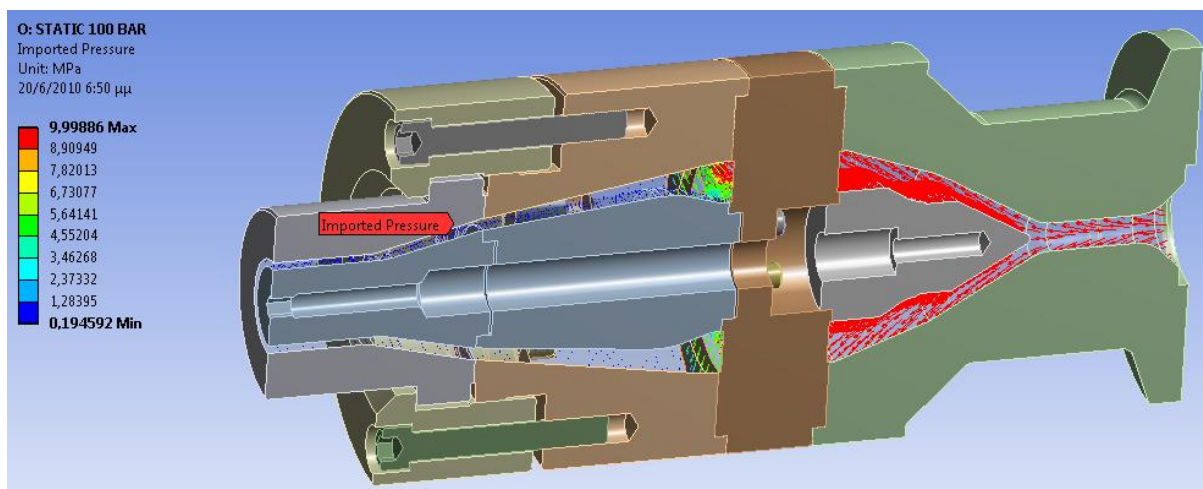
Σχήμα 4.28: Λεπτομέρειες ορισμού βαρύτητας στη μήτρα εκβολής

Έπειτα, επειδή το πρόβλημά είναι θερμικό, ορίζεται η οριακή θερμοκρασιακή συνθήκη (Thermal Condition) στα τμήματα της μήτρας εκβολής, όπου η θερμοκρασία λαμβάνεται σταθερή και ίση με 196 °C, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.29



Σχήμα 4.29: Ορισμός θερμοκρασίας στη μήτρα εκβολής

Τέλος, εισάγεται η πίεση που έχει υπολογιστεί από τον επιλυτή Fluent, επιλέγοντας ως επιφάνεια επαφής τη διεπιφάνεια ρευστού/στερεού (Σχήμα 4.30) και γίνεται η επιλογή του κατάλληλου επιλυτή για την αριθμητική ανάλυση της αντοχής της μήτρας (Σχήμα 4.31).



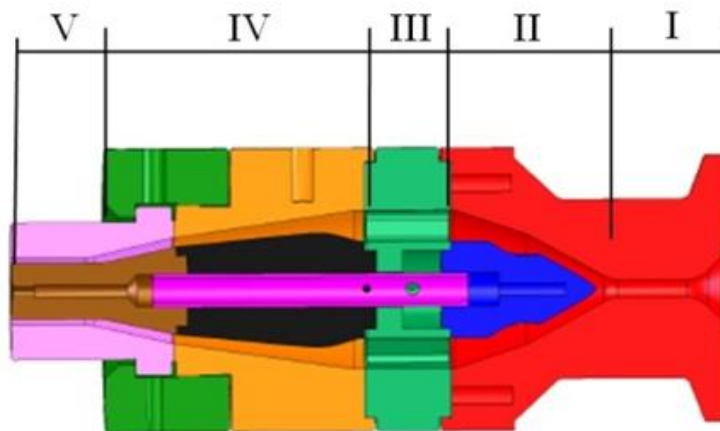
Σχήμα 4.30: Πίεση τοιχωμάτων στη μήτρα εκβολής

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

Σχήμα 4.31 Ρυθμίσεις της ανάλυσης του προβλήματος

4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η στατική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της ροής έδειξαν ότι τα τμήματα της μήτρας που βρίσκονται στη ζώνη εκτροπής (I) και στη κεφαλή της αράχνης (II), συγκεντρώνουν τις υψηλότερες μηχανικές τάσεις.



Σχήμα 4.32: Ζώνες του καναλιού ροής της κεφαλής

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά όλοι οι πίνακες με τις τιμές των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων για τα τμήματα της αράχνης και του κώνου κεφαλής, για πιέσεις ρευστού από 100 έως και 600 bar για τις δύο μήτρες εκβολής (εργαστηρίου και βελτιστοποιημένης).

	ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΤΡΑ			ΙΜΡΑΧ	
100 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	290,14
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	56,426
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		290,14
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		47,7
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		172,13
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		56,426
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		203,41
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		17,605

Πίνακας 4.4: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 100 bar (αρχική μήτρα)

	ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΤΡΑ			ΙΜΡΑΧ	
200 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	579,45
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	112,64
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		579,45
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		93,372
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		344,14
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		112,64
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		385,69
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		33,344

Πίνακας 4.5: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 200 bar (αρχική μήτρα)

	ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΤΡΑ				ΙΜΡΑΧ
300 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	868,44
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	168,81
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		868,44
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		138,98
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		516,12
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		168,81
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		568,07
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		49,079

Πίνακας 4.6: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 300 bar (αρχική μήτρα)

	ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΤΡΑ				ΙΜΡΑΧ
400 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1157,1
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	224,92
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		1157,1
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		184,52
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		688,02
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		224,92
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		750,43
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		64,805

Πίνακας 4.7: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 400 bar (αρχική μήτρα)

		ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΤΡΑ			ΙΜΡΑΧ
500 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1446
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	281,09
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		1446
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		230,12
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		860,05
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		281,09
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		932,96
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		80,551

Πίνακας 4.8: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 500 bar (αρχική μήτρα)

		ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΤΡΑ			ΙΜΡΑΧ
600 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1735,3
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	337,33
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		1735,3
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		275,78
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		1032,2
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		337,33
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		1115,6
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		96,317

Πίνακας 4.9: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 600 bar (αρχική μήτρα)

	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ				ΙΜΡΑΧ
100 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	776,81
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	94,724
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		776,81
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		85,979
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		236,86
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		94,724
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		184,68
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		15,27

Πίνακας 4.10: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 100 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)

	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ				ΙΜΡΑΧ
200 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1548,5
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	188,78
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		1548,5
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		169,55
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		471,98
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		188,78
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		348,9
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		81,182

Πίνακας 4.11: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 200 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)

		ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ			ΙΜΡΑΧ
300 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	2315,6
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	282,67
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		2315,6
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		252,94
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		707,45
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		282,67
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		513,24
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		41,942

Πίνακας 4.12: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 300 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)

		ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ			ΙΜΡΑΧ
400 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	3080,6
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	376,46
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		3080,6
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		336,23
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		942,97
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		376,46
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	ΜΑΧ (MPa)		677,53
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΑΧ (μm)		55,3

Πίνακας 4.13: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 400 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)

	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ				ΙΜΡΑΧ
500 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	3849,1
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	470,5
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		3849,1
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		419,76
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		1178,7
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		470,5
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		842,12
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		68,68

Πίνακας 4.14: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 500 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)

	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ				ΙΜΡΑΧ
600 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	4618,4
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	564,57
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		4618,4
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		503,33
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		1414,4
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		564,57
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		1006,7
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		82,058

Πίνακας 4.15: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 600 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)

Από τους Πίνακες (4.4-4.15) φαίνεται ότι η μέγιστη τάση εντοπίζεται στα πόδια της αράχνης της κεφαλής, τα οποία δέχονται αρκετή πίεση από το ρευστό, ενώ παράλληλα στηρίζουν τα εσωτερικά τμήματα της μήτρας εκβολής. Επίσης, μεγάλη τιμή της ισοδύναμης τάσης εντοπίζεται στο λαιμό της κεφαλής και, συγκεκριμένα, στο σημείο στήριξης της μήτρας στον εκβολέα. Η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται στον κώνο αρσενικού κεφαλής, ο οποίος δέχεται τη μεγαλύτερη πίεση από το ρευστό.

4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

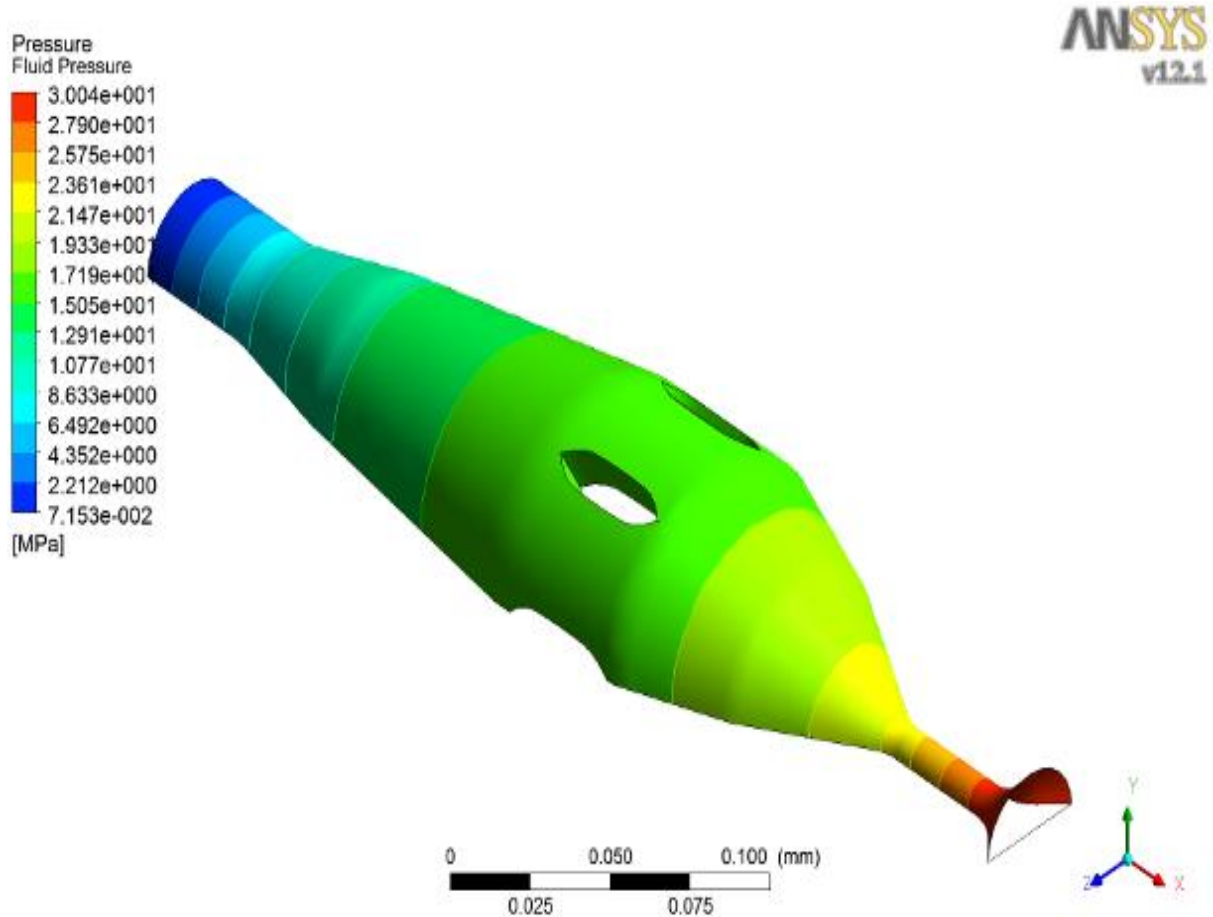
4.5.1 Αρχική μήτρα εκβολής

Στόχος της ανάλυσής είναι ο υπολογισμός των ορίων των πιέσεων που μπορεί να δεχθεί καθεμιά από τις δύο μήτρες που έχουν σχεδιασθεί, ώστε να μελετηθεί αν η μέγιστη ισοδύναμη τάση που εμφανίζεται στις δυο μήτρες ξεπερνά ή όχι το όριο διαρροής του υλικού κατασκευής των τμημάτων της μήτρας. Το όριο διαρροής του υλικού (χάλυβας IMPAX) είναι 896 MPa. Η μέγιστη ισοδύναμη τάση της μήτρας εκβολής παρατηρείται στη κεφαλή της αράχνης και συγκεκριμένα στα πόδια της. Κατ' αυτό τον τρόπο, θα ελεγχθεί αν η ισοδύναμη τάση που εμφανίζεται στην κεφαλή αράχνης υπερβαίνει το όριο διαρροής του χάλυβα IMPAX.

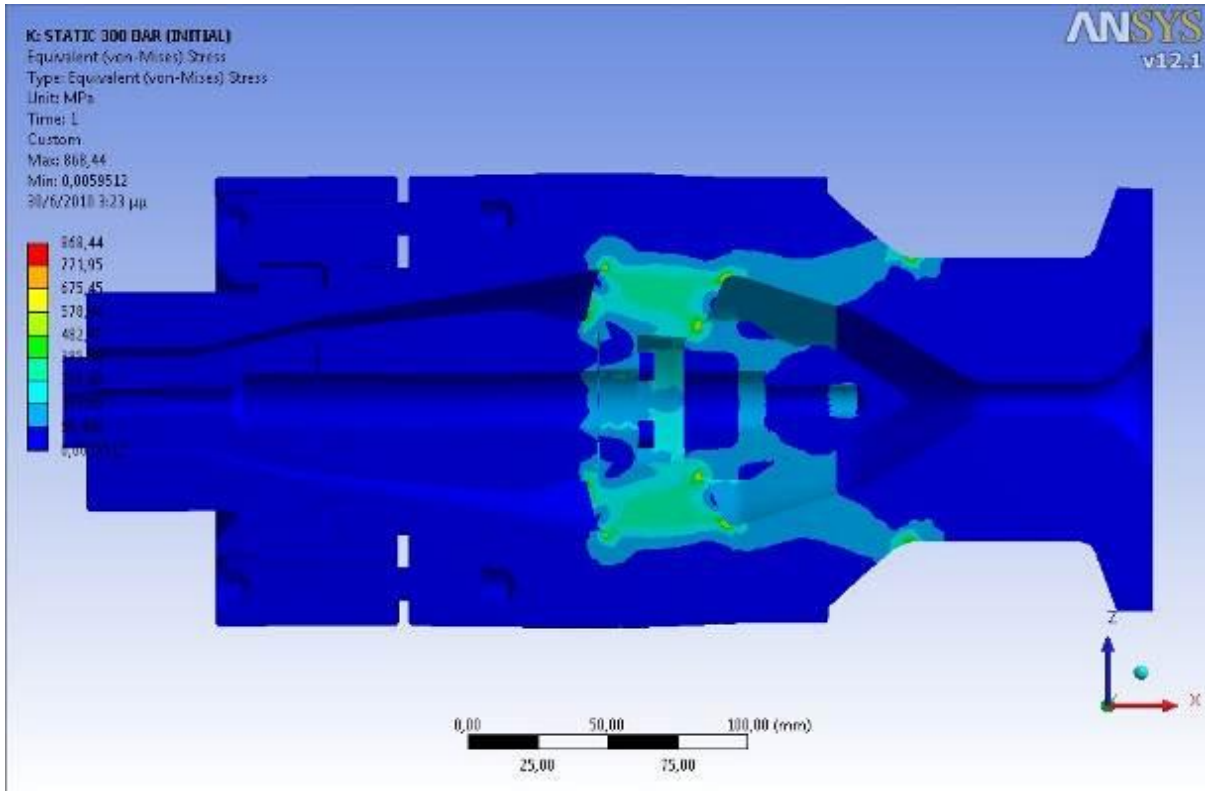
ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΤΡΑ				IMPAX	ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ
100 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	290,14	896
200 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	579,45	896
300 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	868,44	896
400 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1157,1	896
500 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1446	896
600 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1735,3	896

Πίνακας 4.16: Μέγιστες τιμές των ισοδύναμων τάσεων στην αρχική μήτρας

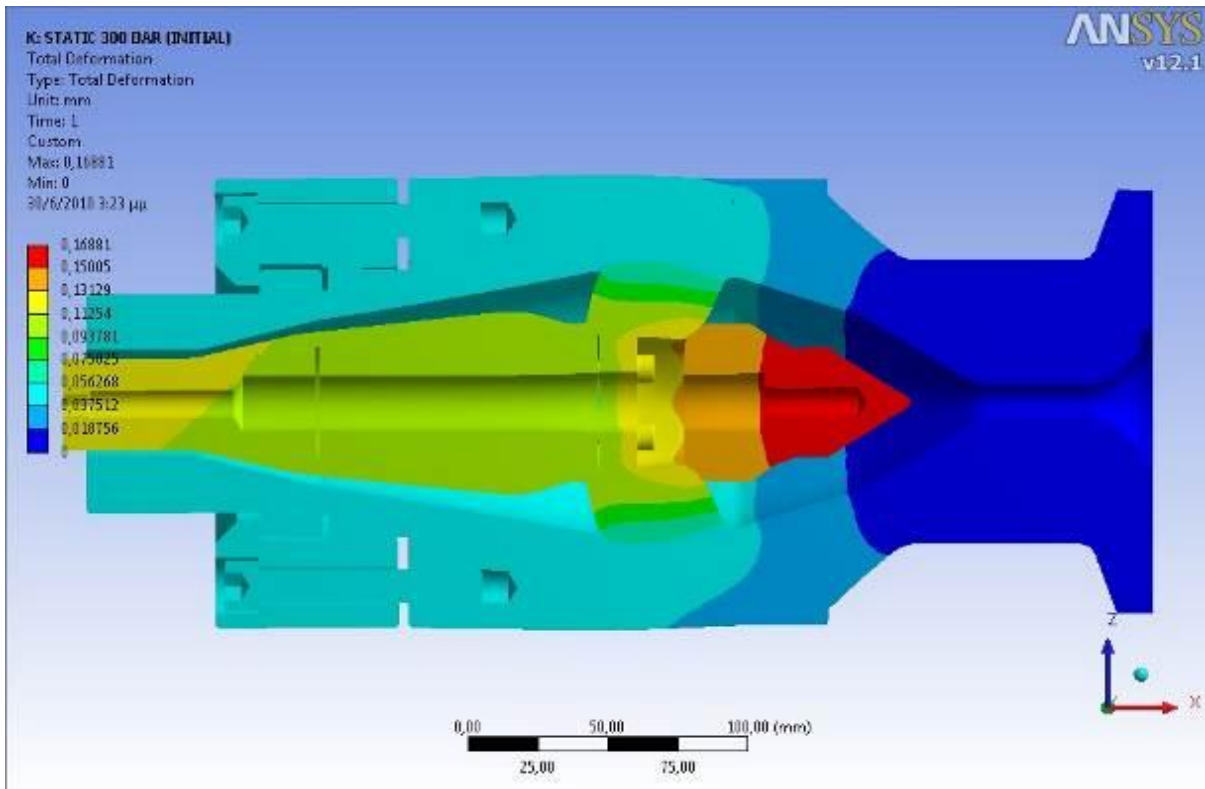
Η μέγιστη πίεση που μπορεί να δεχθεί η αρχική μήτρα από το ρευστό, ανέρχεται στα 300 bar, ώστε η μέγιστη ισοδύναμη τάση των ποδιών της αράχνης να μην υπερβαίνει το όριο διαρροής του υλικού. Στα Σχήματα (4.33-4.39) παρουσιάζονται οι γραφικές απεικονίσεις των τάσεων και παραμορφώσεων ολόκληρης της μήτρας εκβολής, αλλά και της κεφαλής αράχνης.



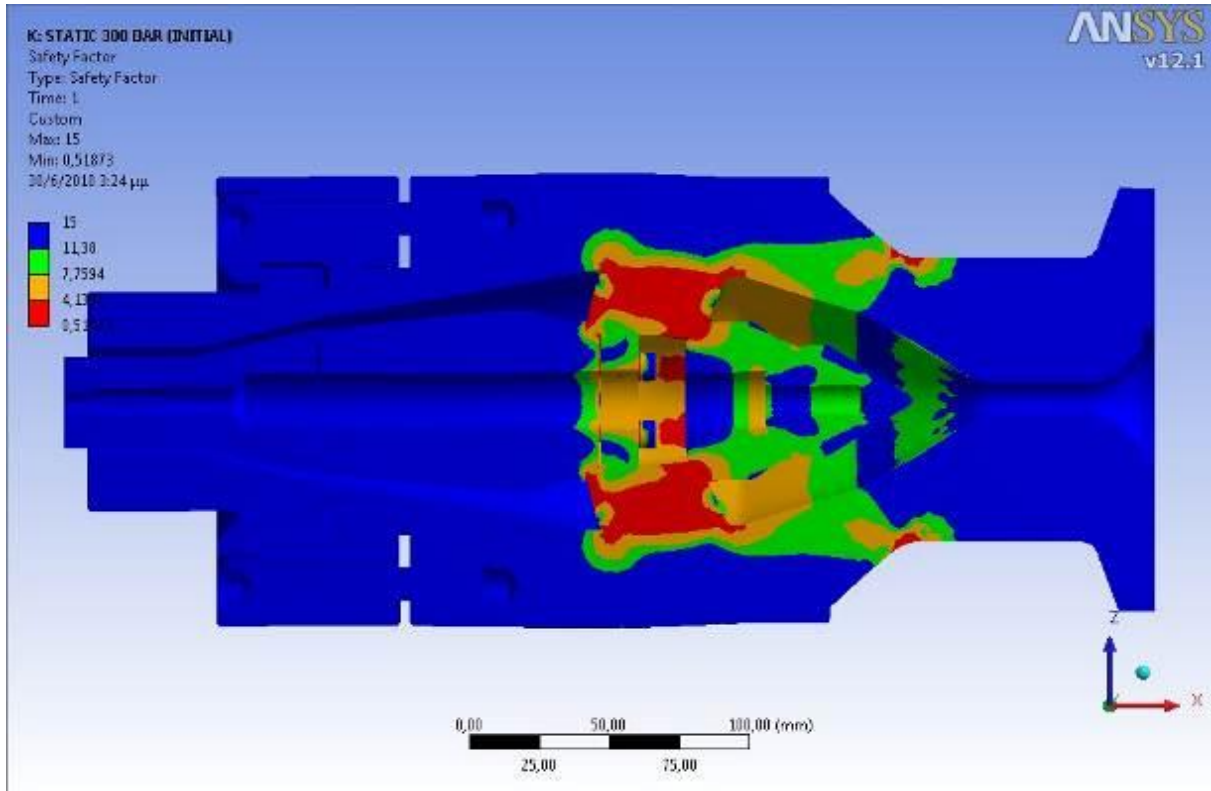
Σχήμα 4.33: Πιέσεις των τοιχωμάτων του ρευστού στην αρχική πίεση των 300 bar



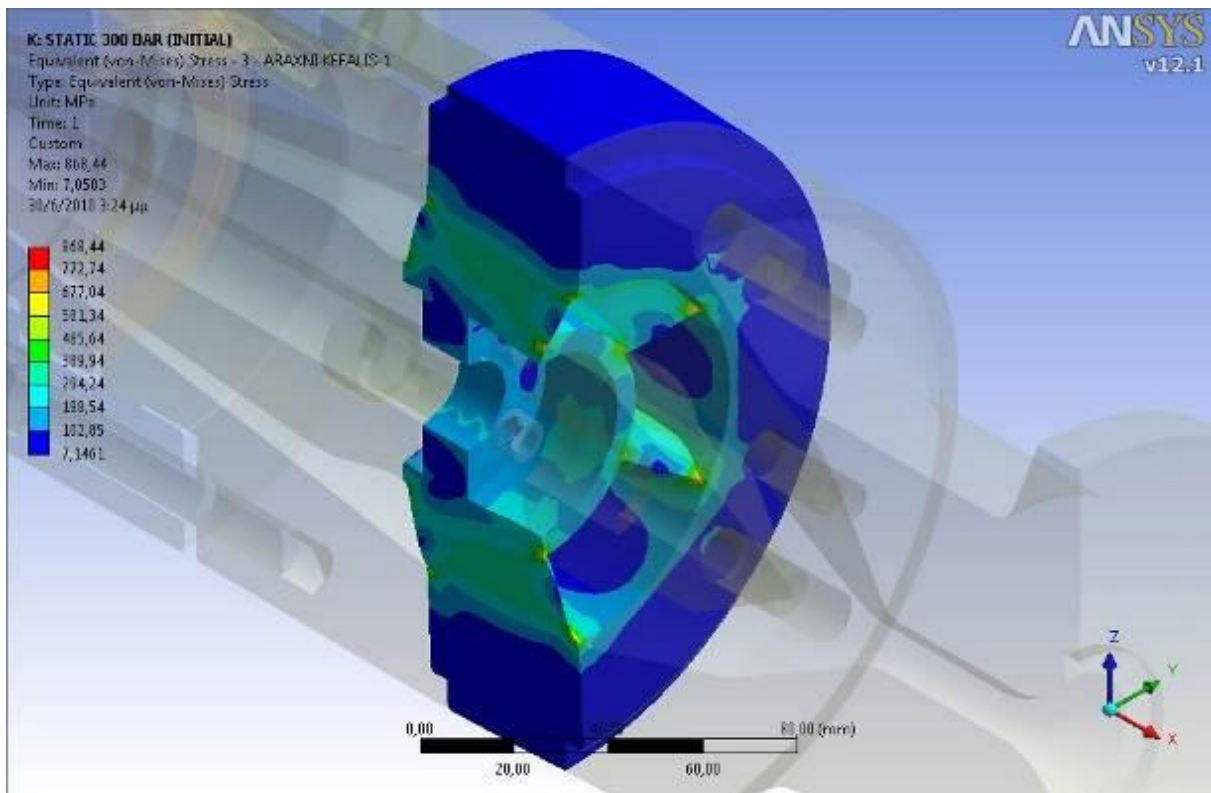
Σχήμα 4.34: Γραφική απεικόνιση της ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises στην πίεση των 300 bar



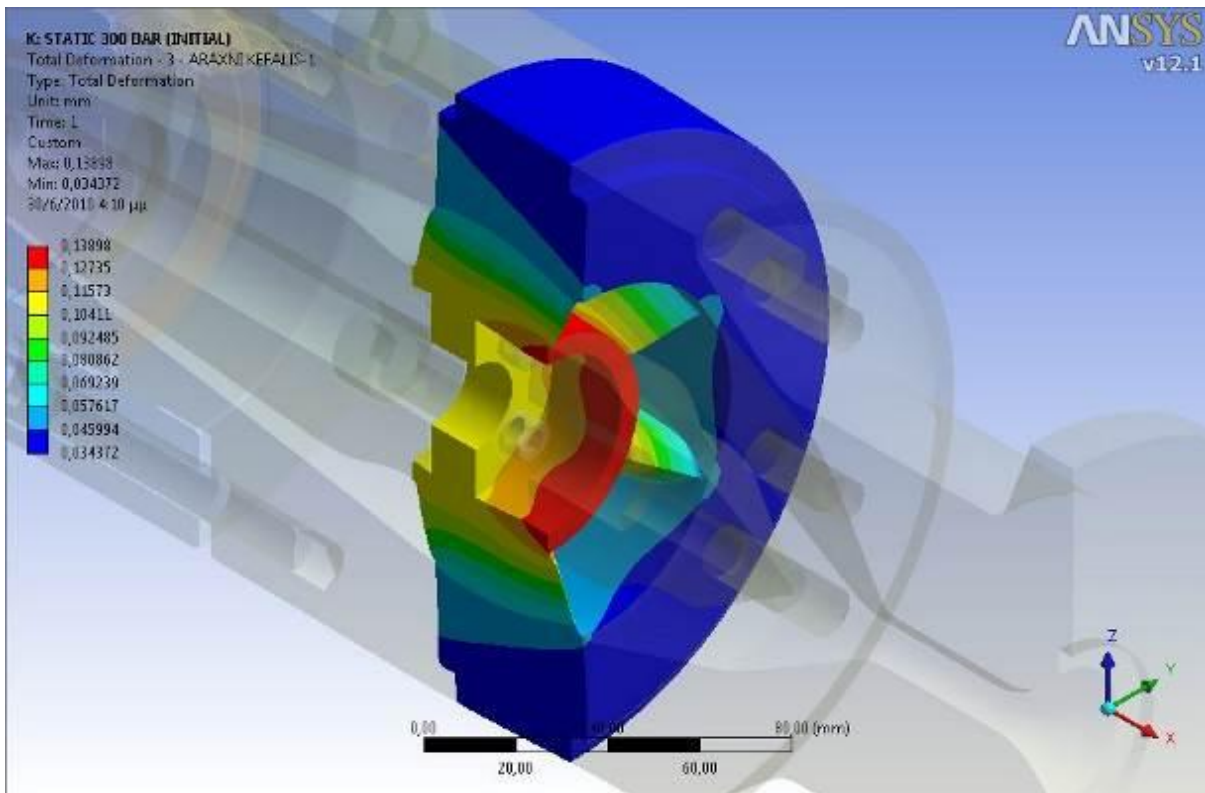
Σχήμα 4.35: Γραφική απεικόνιση της ολικής παραμόρφωσης στην πίεση των 300 bar



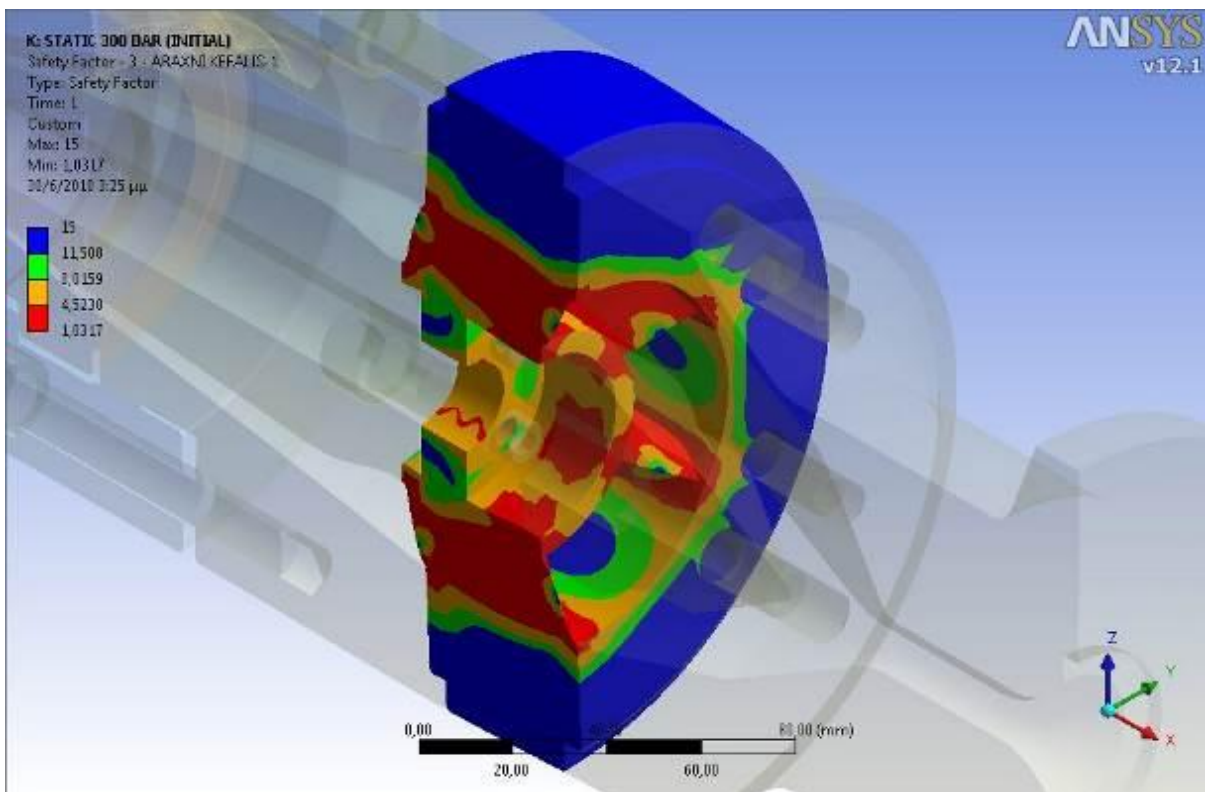
Σχήμα 4.36: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας στην πίεση των 300 bar



Σχήμα 4.37: Γραφική απεικόνιση της ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises στην πίεση των 300 bar



Σχήμα 4.38: Γραφική απεικόνιση της ολικής παραμόρφωσης στην πίεση των 300 bar



Σχήμα 4.39: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας στην πίεση των 300 bar

Στον Πίνακα 4.17 δίνονται, η μέγιστη ισοδύναμη τάση, η συνολική παραμόρφωση και ο συντελεστής ασφαλείας της μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα.

	ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΤΡΑ				ΙΜΡΑΧ	ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ
300 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	868,44	896
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	168,81	
		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	MIN	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1,0317	

Πίνακας 4.17: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 300 bar (αρχική μήτρα)

4.5.2 Βελτιστοποιημένη μήτρα εκβολής

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ				ΙΜΡΑΧ	ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ
100 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	776,81	896
200 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1548,5	896
300 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	2315,6	896
400 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	3080,6	896
500 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	3849,1	896
600 BAR	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	4618,4	896

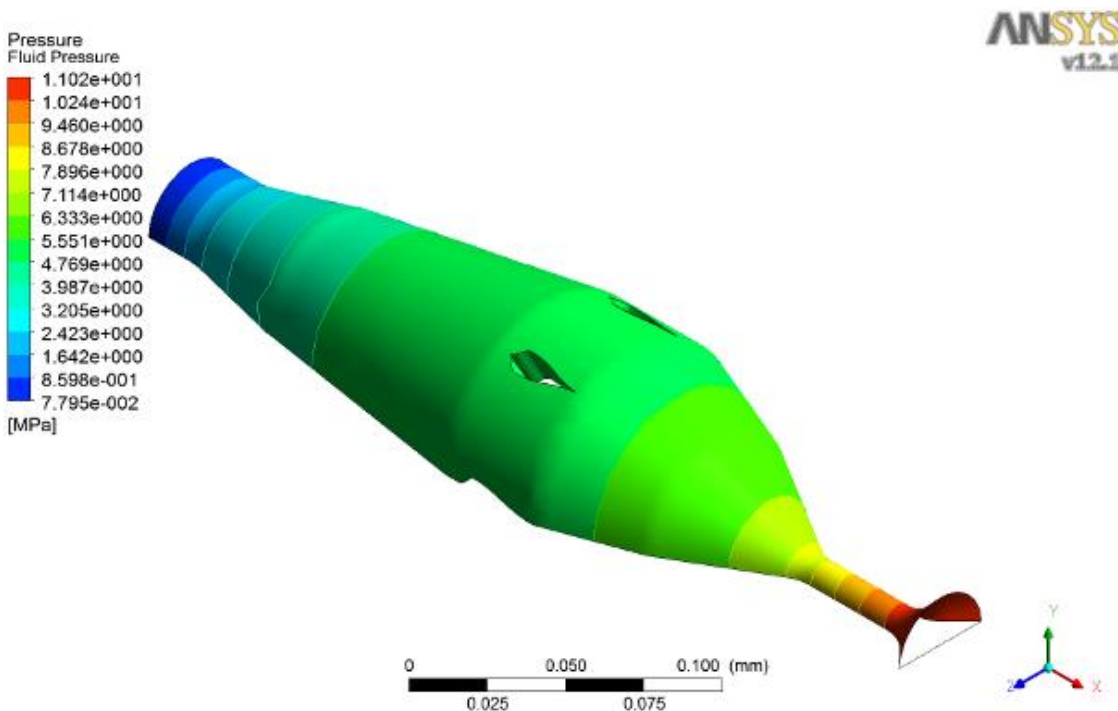
Πίνακας 4.18: Μέγιστες τιμές των ισοδύναμων τάσεων στην βελτιστοποιημένη μήτρα

Η μέγιστη πίεση που μπορεί να δεχθεί η βελτιστοποιημένη μήτρα, από το ρευστό, είναι 110 bar (Πίνακες 4.18, 4.19), ώστε η μέγιστη ισοδύναμη τάση των ποδιών της αράχνης να μην υπερβαίνει το όριο διαρροής του υλικού.

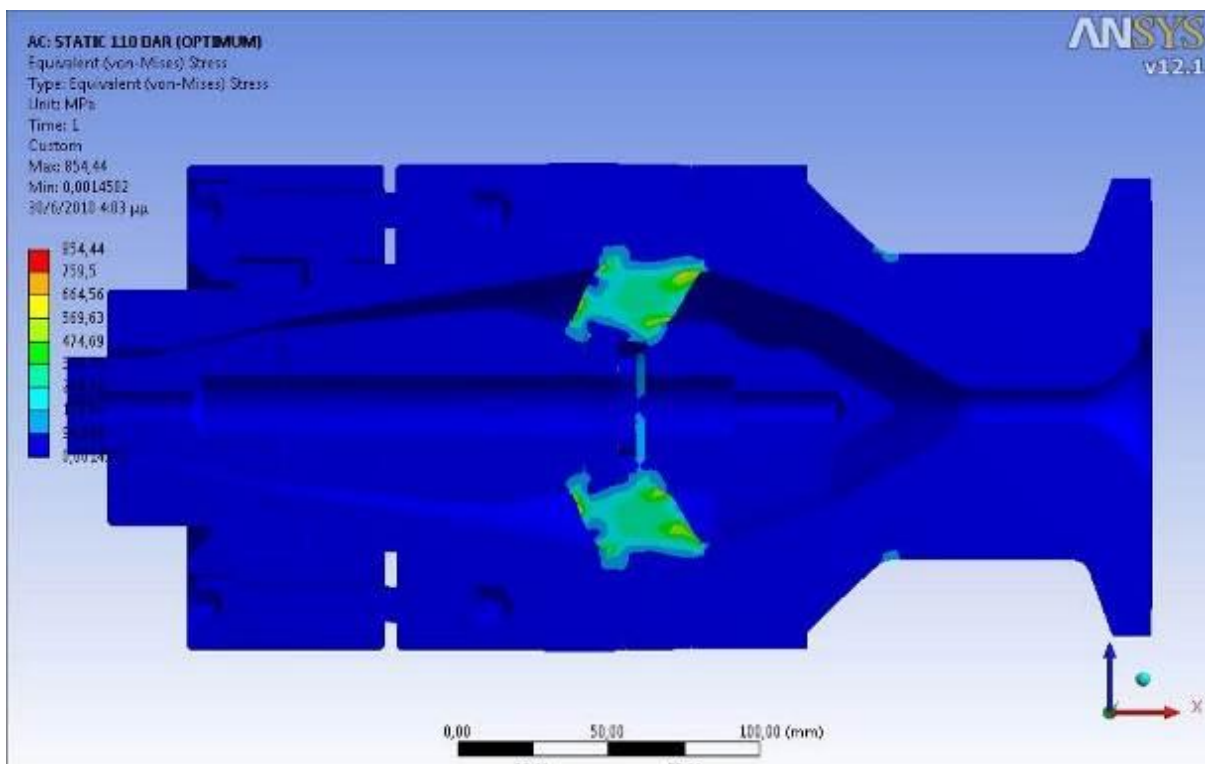
		ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ			ΙΜΡΑΧ
110BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	845,44
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	104,16
	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		845,44
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		94,362
	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		260,38
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		104,16
	ΛΑΙΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)		201,12
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)		16,602

Πίνακας 4.19: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 110bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)

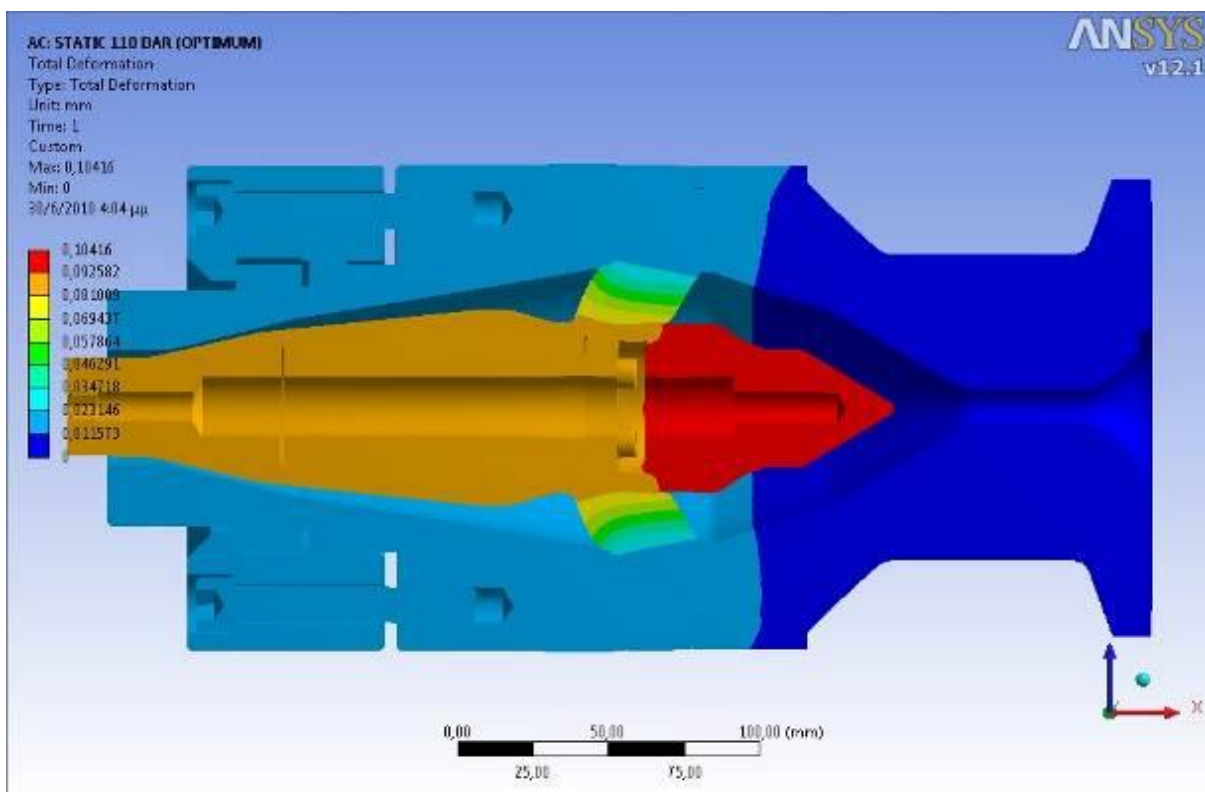
Στα Σχήματα 4.40-4.46 παρουσιάζονται οι γραφικές απεικονίσεις των τάσεων και παραμορφώσεων ολόκληρης της μήτρας εκβολής, αλλά και της κεφαλής αράχνης.



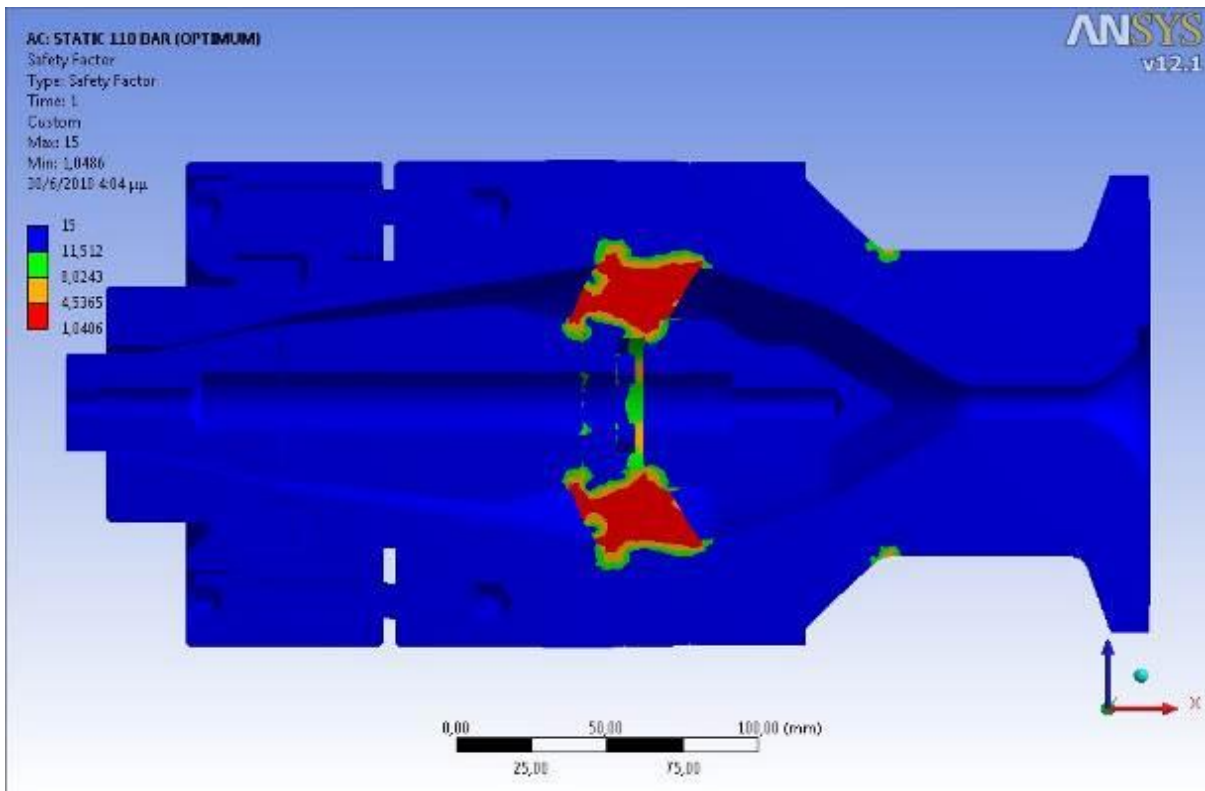
Σχήμα 4.40: Πιέσεις των τοιχωμάτων του ρευστού στην αρχική πίεση των 110 bar



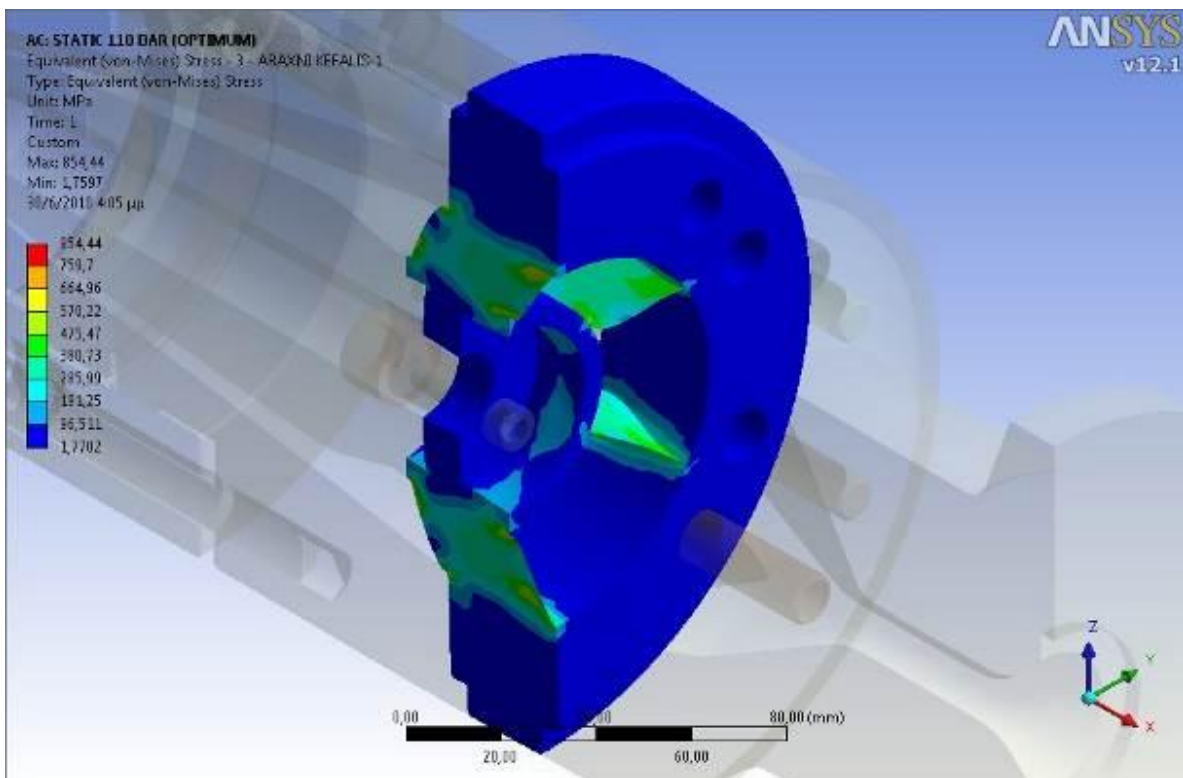
Σχήμα 4.41: Γραφική απεικόνιση της ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises στην πίεση των 110 bar



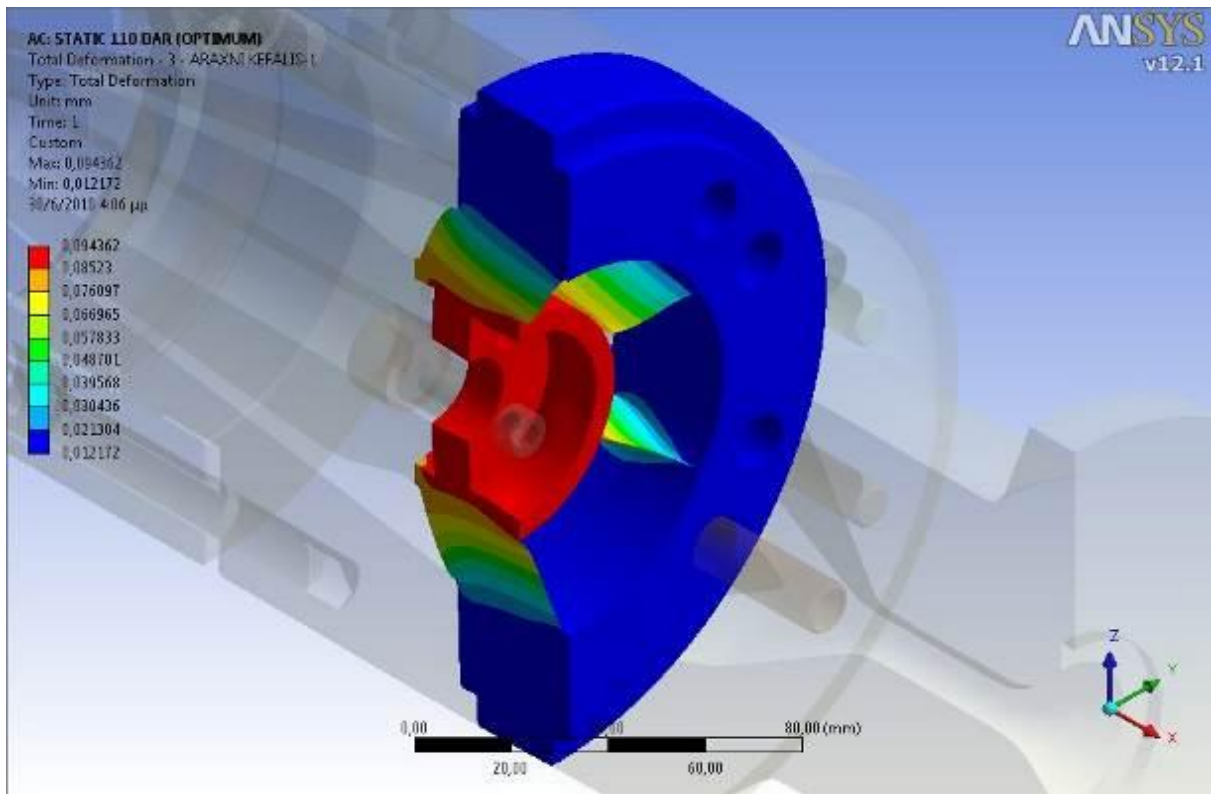
Σχήμα 4.42: Γραφική απεικόνιση της ολικής παραμόρφωσης στην πίεση των 110 bar



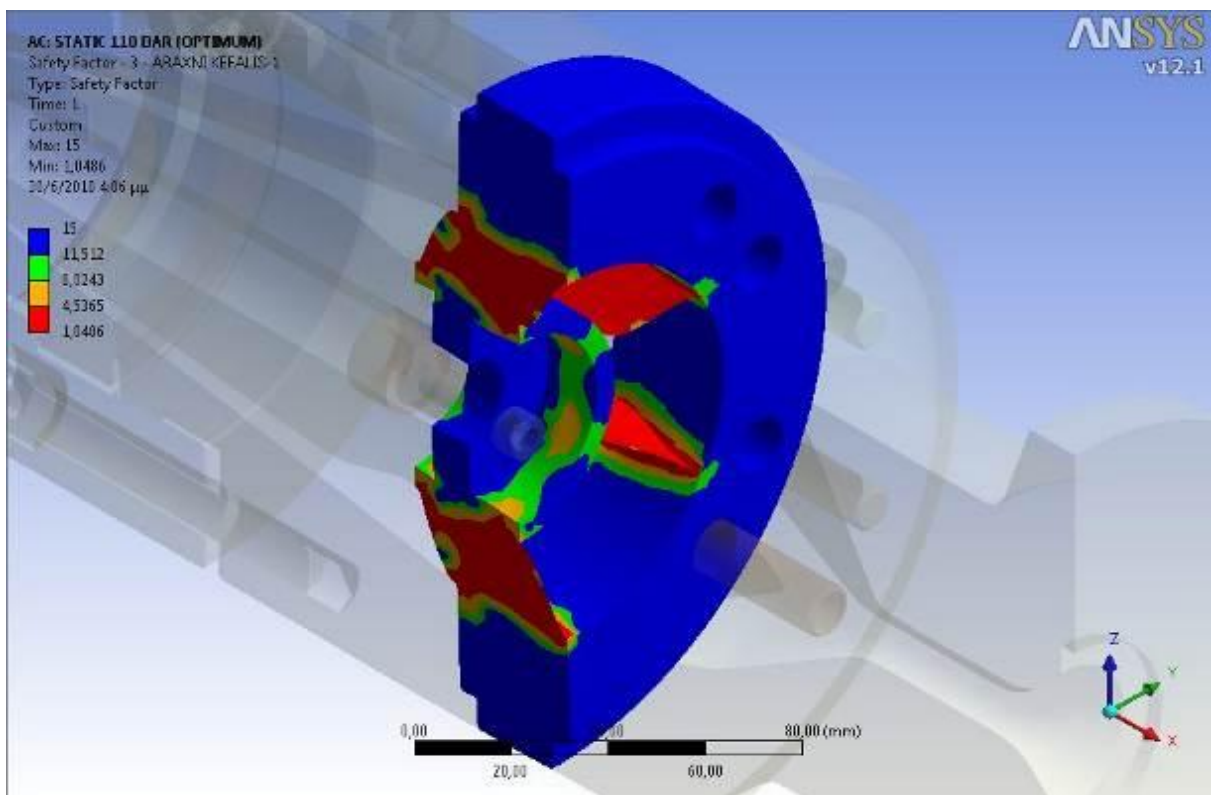
Σχήμα 4.43: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας στην πίεση των 110 bar



Σχήμα 4.44: Γραφική απεικόνιση της ισοδύναμης τάσης κατά von-Mises στην πίεση των 300 bar



Σχήμα 4.45: Γραφική απεικόνιση της ολικής παραμόρφωσης στην πίεση των 110 bar



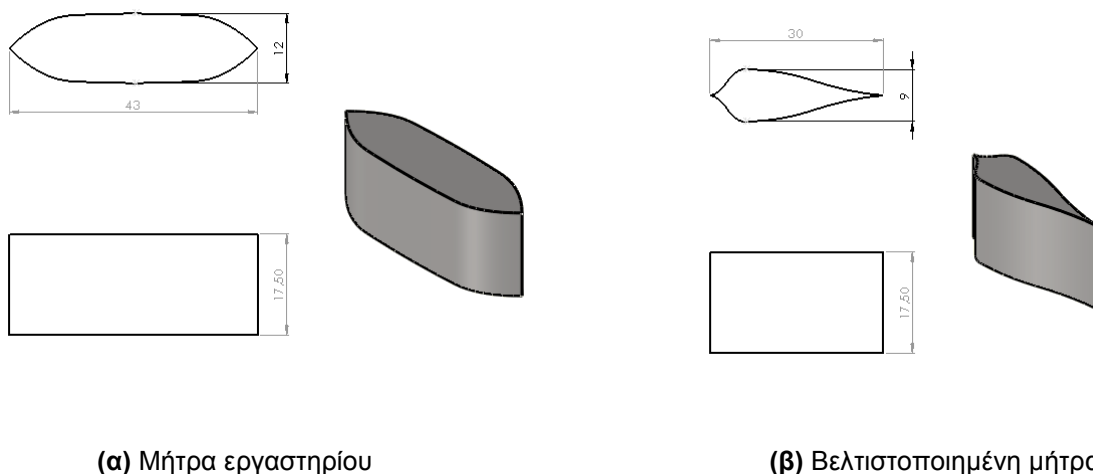
Σχήμα 4.46: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας στην πίεση των 110 bar

Στον Πίνακα 4.20 δίνονται, η μέγιστη ισοδύναμη τάση, η συνολική παραμόρφωση και ο συντελεστής ασφαλείας της μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα, για τη βελτιστοποιημένη μήτρα.

		ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ			ΙΜΡΑΧ	ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ
110 BAR	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ	MAX (MPa)	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	845,44	896
		ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	MAX (μm)	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΗΣ	104,16	
		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	MIN	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1,0486	

Πίνακας 4.20: Μέγιστες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων στα 110 bar (βελτιστοποιημένη μήτρα)

Η βελτιστοποιημένη μήτρα εκβολής παρουσιάζει μικρότερη αντοχή σε υψηλές πιέσεις σε σχέση με την αρχική μήτρα εκβολής του πλαστικού σωλήνα. Η μέγιστη πίεση του ρευστού που αντέχει η βελτιστοποιημένη μήτρα είναι τα 110 bar, ενώ αντίστοιχα η αρχική μήτρα αντέχει πίεση 300 bar. Αυτό είναι φυσιολογικό, γιατί τα πόδια της αράχνης της βελτιστοποιημένης μήτρας είναι λεπτότερα και μικρότερα σε μήκος, σε σχέση με την αρχική μήτρα (Σχήμα 4.47).



Σχήμα 4.47: (α), (β) Σύγκριση μεταξύ των ποδιών της αράχνης των δύο μητρών εκβολής

Οι τυπικές πιέσεις που δίνονται από τη βιομηχανία για μήτρες εκβολής πλαστικών σωλήνων (πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο) με διάμετρο 32 mm, κυμαίνονται από 80 έως 100 bar. Επίσης, αποφεύγονται οι υψηλές πιέσεις, ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα στους εκβολείς και για να επιτυγχάνεται ομαλοποιημένη ροή στη μήτρα εκβολής.

4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) www.ansys.com
- 2) Thomas Glatzel, Litterst Christian, Cupelli Claudio, Lindemann Timo, Moosmann Christian, Niekrawietz Remigius, Streule Wolfgang, Zengerle Roland, Koltay Peter, *Computers & Fluids* **37**, 218-235, (2008).
- 3) Reh Stefan, Daniel Beley- J, Mukherjee Siddhartha, Hui Khor Eng , *Structural Safety* **28**, 17-43, (2006).
- 4) Kayabasi Oguz, Ekici Bulent *Materials & Design* **29**, 963-971, (2008).
- 5) Michaeli, W. *Monoextrusion dies for thermoplastics*. In *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, 2nd Ed.; Hanser, (1992).
- 6) Tadmor, Z.; Gogos C.G. *Die forming*. In *Principles of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, (1979).
- 7) Rosato, D.V. *Die design and performance*. *Extruding Plastics*; Chapman & Hall, (1998).
- 8) Rauwendaal, C. *Die forming*. In *Understanding Extrusion*; Hanser, (1998).
- 9) Hensen, "Plastics Extrusion Technology", 2nd Ed., Hanser, (1997).
- 10) François Sigrist-Jean, Garreau Stéphane., *Finite Elements in Analysis and Design* **43**, 287-300, (2007).
- 11) Münch C., Ausoni P., Braun O., Farhat M., Avellan F., *Journal of Fluids and Structures* **26**, 1018-1033, (2010).
- 12) Macosko, C. W. *Rheology: Principles, Measurements and Applications*; Wiley-VCH, New York, (1994).
- 13) Mamalis, A.G., Spentzas, K.N., Kouzilos, G., Theodorakopoulos, I., Pantelelis, N.G., *Advances in Polymer Technology* **29**, 173-184, (2010).
- 14) Mamalis, A.G., Kouzilos, G., Vortselas, A.K., *AIP Conference Proceedings* 1255, 40-42, (2010).
- 15) www.uddeholm.se/english/files/impax_hihard-english.pdf

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διδακτορικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση μήτρας εκβολής πολυμερούς για την παραγωγή σωλήνα από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην ταχύτητα εξόδου και συνεπώς αυξημένη μηχανική αντοχή του πλαστικού σωλήνα.

Ως μεταβλητή εξόδου βελτιστοποίησης της ροής (αντικειμενική συνάρτηση), λαμβάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο του πολυμερούς στην έξοδο από την μήτρα και επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) υπολογίζει το αντίστροφο του συντελεστή διασποράς, δηλαδή το λόγο, U_m/U_s , U_m και U_s είναι αντίστοιχα η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας εξόδου του πολυμερικού ρευστού από τη μήτρα εκβολής [45,50]. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) της ταχύτητας εξόδου ορίζεται αναλυτικά ως:

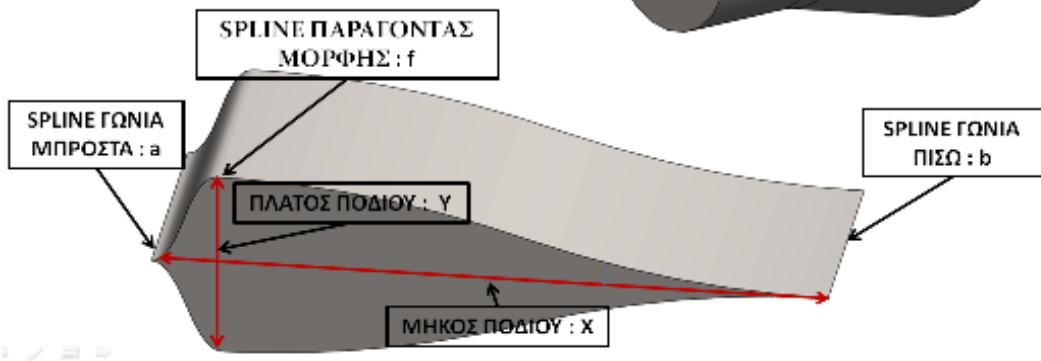
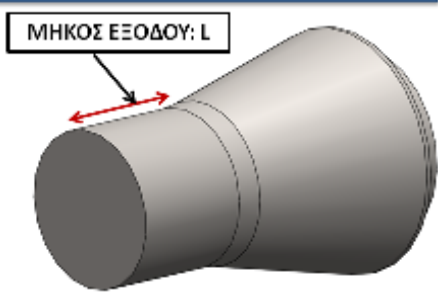
$$SNR_U = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_m^2}{U_s^2} \right)$$

Ως παράμετροι βελτιστοποίησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 επιλέγονται συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μήτρας εκβολής. Συνολικά επιλέγονται έξι παράμετροι βελτιστοποίησης, από τις οποίες μία είναι το μήκος εξόδου της μήτρας και οι άλλοι πέντε σχετίζονται με τη γεωμετρία της κεφαλής αράχνης της μήτρας εκβολής.

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

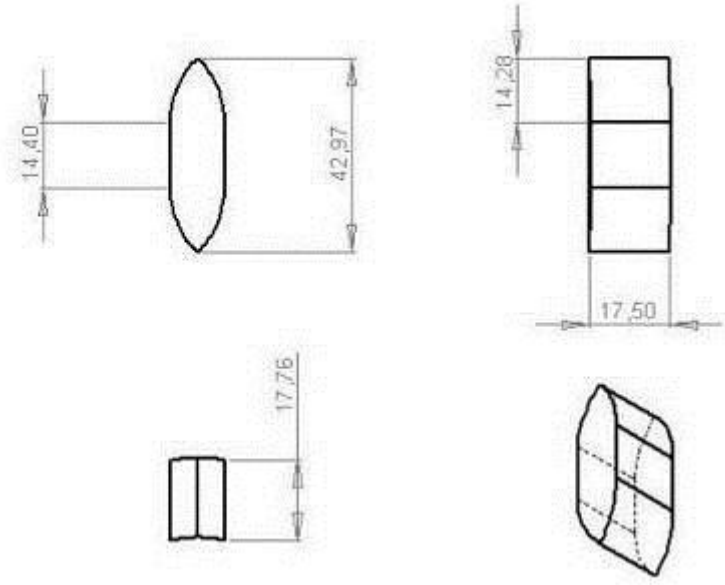
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

- ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΜΗΤΡΑΣ: L (24-45mm)
- ΠΟΔΙ ΑΡΑΧΝΗΣ:
 - ΠΛΑΤΟΣ ΠΟΔΙΟΥ : Y (9-12mm)
 - ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ : X (30-80mm)
 - SPLINE ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΜΟΡΦΗΣ : f (10-90%)
 - SPLINE ΓΩΝΙΑ ΜΠΡΟΣΤΑ : a (0-10°)
 - SPLINE ΓΩΝΙΑ ΠΙΣΩ : b (0-10°)



Σχήμα 5.1: Παράμετροι βελτιστοποίησης

Το μήκος εξόδου της μήτρας κυμαίνεται από 24-45mm, ενώ τα πόδια της αράχνης θα πρέπει να έχουν μήκος, $30\text{mm} \leq X \leq 80\text{mm}$ και πάχος $4,5\text{mm} \leq Y \leq 12\text{mm}$. Επίσης επιλέγεται να είναι $20\% \leq f \leq 80\%$, $5^\circ \leq a \leq 15^\circ$ και $5^\circ \leq b \leq 15^\circ$. Η γεωμετρία του ποδιού της αράχνης στη μήτρα εκβολής που θα βελτιστοποιηθεί φαίνεται στο Σχήμα 5.2:



Σχήμα 5.2: Πόδι αράχνης

Το πόδι της αράχνης αποτελείται από τέσσερις συμμετρικές καμπύλες β' βαθμού και ένα ευθύγραμμο τμήμα. Η επιφάνεια του ποδιού της αράχνης ακολουθεί την γεωμετρία μιας spline τρίτου βαθμού με χαρακτηριστικά, των οποίων οι τιμές θα βελτιστοποιηθούν (η θέση του μέγιστου ως ποσοστό του X (f), η γωνία εκκίνησης της spline (a) και η γωνία τερματισμού της spline (b)). Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με μία σειρά προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας τα λογισμικά στο SolidWorks® και Comsol®, σε συνδυασμό με τη μέθοδο Taguchi και τη μέθοδο της επιφάνειας απόκρισης (RSM).

Το εμπορικό υπολογιστικό πακέτο Comsol 3.5, προσφέρει τη δυνατότητα επίλυσης σύνθετων φυσικών φαινομένων και βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Συνοδεύεται από βιβλιοθήκη έτοιμων μοντέλων και από εργαλεία CAD για το σχεδιασμό της γεωμετρίας του προβλήματος, ενώ έχει τη δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος και απεικόνισης των αποτελεσμάτων. Ουσιαστικά, αποτελεί εργαλείο για την επίλυση καλά ορισμένων συστημάτων μερικών διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν ένα ή πολλά φυσικά φαινόμενα συγχρόνως, με την καθιερωμένη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το υπολογιστικό πακέτο Comsol 3.5 έχει άμεση διασύνδεση με το εμπορικό πρόγραμμα SolidWorks, το οποίο είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό CAD/CAE/CAM.

Η μέθοδος Taguchi είναι μια επιστημονική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση προϊόντων, διαδικασιών, υλικών, εξοπλισμών και εγκαταστάσεων. Η μέθοδος στοχεύει στη βελτίωση των επιθυμητών χαρακτηριστικών και ταυτόχρονα στη 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 και κατασκευής πρώτων υλών, υποσυστημάτων, επαγγελματικών προϊόντων αλλά και τη βελτιστοποίηση υπηρεσιών, συστημάτων ελέγχου κ.α. Ένα βασικό σημείο στην ανάλυση είναι η επιλογή σωστής ορθογωνίας σειράς. Αφού επιλεγθούν οι παράμετροι ελέγχου, στη συνέχεια ορίζονται τα επίπεδα τιμών. Εάν η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής μιας παραμέτρου είναι μεγάλη, οι τιμές που εξετάζονται μπορούν να επανεξεταστούν με νέα πειραματική σειρά αν κριθεί απαραίτητο [45].

Η βέλτιστη τιμή του μήκους εξόδου της μήτρας είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $L_{OPT} = 24$ mm. Η βέλτιστη τιμή του μήκους του ποδιού είναι η ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $X_{OPT} = 30$ mm. Οι βέλτιστες τιμές για το πάχος του ποδιού της αράχνης (Y) και το μέγιστο της καμπύλης spline (f), είναι αντίστοιχα $Y_{OPT} = 9$ mm, $f_{OPT} = 0,2$ (20 %) και $a_{OPT} = 5^\circ$, $b_{OPT} = 5^\circ$.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η μέθοδος της επιφάνειας απόκρισης (RSM), για να εντοπιστεί το ελάχιστο του πολυωνύμου που δημιουργείται από τις προκύπτουσες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των σειρών πειραμάτων.

Από τον Πίνακα 5.1 φαίνεται η απόλυτη σύγκλιση των δύο μεθόδων, στην εύρεση των βέλτιστων τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης, με στόχο τη βελτιστοποίηση μήτρας εκβολής πολυμερούς για την παραγωγή σωλήνα από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην ταχύτητα εξόδου και, συνεπώς, αυξημένη μηχανική αντοχή του πλαστικού σωλήνα. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο στα χέρια του μηχανικού-σχεδιαστή, καθώς τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης είναι η ακρίβεια στην

εύρεση των βέλτιστων τιμών, σε συνδυασμό με το μικρό υπολογιστικό χώρο και χρόνο που απαιτεί.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΕΠΙΠΕΔΑ			ΜΕΘΟΔΟΣ	
		1	2	3	ΑΝΟΝΑ	RSM
L	ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (mm)	24	34,5	45	24	24
Υ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	9	10,5	12	9	9
Χ	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	30	55	80	30	30
f	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	0,1	0,5	0,9	0,2	0,2
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	0	5	10	5	5
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	0	5	10	5	0
SNR	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ				7,52	7,53

Πίνακας 5.1: Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων με (Taguchi) και (RSM)

Από τον Πίνακα 5.2 φαίνεται ότι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (SNR) της βέλτιστης μήτρας σε σχέση με την αρχική μήτρα αυξήθηκε κατά 29%.

	SNR
Αρχική Μήτρα	5,80
Βέλτιστη Μήτρα	7,52

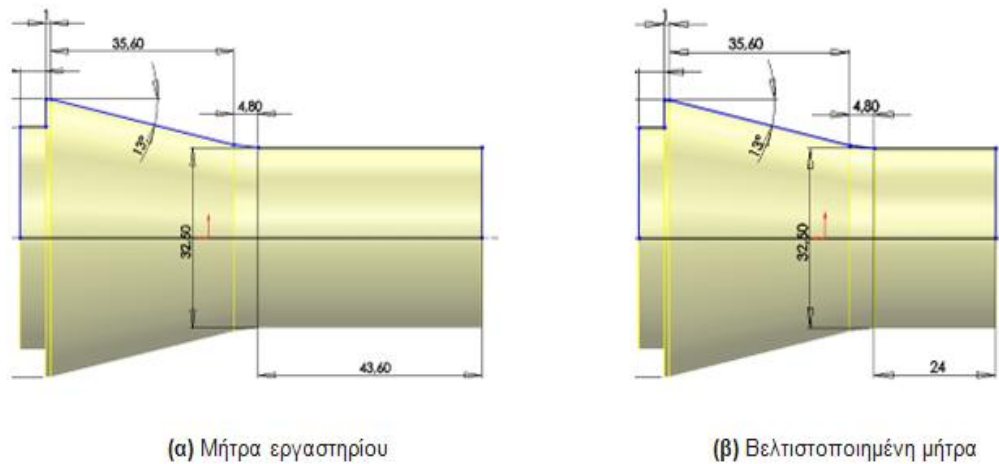
Πίνακας 5.2: Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για αρχική και βελτιστοποιημένη μήτρα

Η στατική ανάλυση στη μήτρα εκβολής, με στόχο να υπολογιστούν μηχανικές τάσεις, μετατοπίσεις και παραμορφώσεις που οφείλονται στην πίεση του ρευστού, καθώς και στη βαρύτητα, πραγματοποιείται με το λογισμικό ANSYS Workbench.

Οι μήτρες εκβολής που αναλύθηκαν είναι:

- η **αρχική** μήτρα εκβολής (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β)
- η **βέλτιστη** μήτρα εκβολής (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε)

Η βέλτιστη μήτρα διαφέρει από την αρχική μήτρα στα τμήματα της κεφαλής αράχνης και στη μήτρα για σωλήνα $\varnothing 32$ (εσωτερικό & εξωτερικό τμήμα). Συγκεκριμένα το μήκος εξόδου της μήτρας του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών είναι 43,6 mm ενώ το μήκος εξόδου της βελτιστοποιημένης μήτρας εκβολής είναι 24 mm, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5.3: (α), (β) Σύγκριση του μήκους εξόδου των δύο μητρών εκβολής

Γίνεται έλεγχος της αντοχής τόσο της υφιστάμενης μήτρας όσο και της βελτιστοποιημένης μήτρας η οποία έχει σχεδιασθεί σε διάφορες τιμές πίεσης εισόδου του ρευστού στη μήτρα, συγκεκριμένα από 100 έως και 600 bar. Πρώτα, γίνεται προσομοίωση της ροής του ρευστού, για να υπολογιστεί η πίεση στα τοιχώματα του ρευστού και στη συνέχεια πραγματοποιείται στατική ανάλυση, όπου λαμβάνεται υπόψη η πίεση, η θερμοκρασία και η βαρύτητα, για να υπολογιστούν οι ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις τόσο ολόκληρης της μήτρας, όσο των επιμέρους τμημάτων της.

Η στατική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της ροής, έδειξαν ότι τα τμήματα της μήτρας που βρίσκονται στη ζώνη εκτροπής (I) και στη κεφαλή της αράχνης (II), συγκεντρώνουν τις υψηλότερες μηχανικές τάσεις. Φαίνεται ότι η μέγιστη τάση δημιουργείται στα πόδια της αράχνης της κεφαλής, τα οποία δέχονται αρκετή πίεση από το ρευστό ενώ παράλληλα στηρίζουν τα εσωτερικά τμήματα της μήτρας εκβολής. Επίσης, μεγάλη τιμή στην ισοδύναμη τάση έχουμε στο λαιμό της κεφαλής και συγκεκριμένα στο σημείο στήριξης της μήτρας με τον υπόλοιπο εκβολέα. Η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται στον κώνο αρσενικού κεφαλής ο οποίος δέχεται τη μεγαλύτερη πίεση από το ρευστό.

Η μέγιστη πίεση που μπορεί να δεχθεί η υφιστάμενη μήτρα από το ρευστό είναι 300 bar, έτσι ώστε να μην ξεπερνά η μέγιστη ισοδύναμη τάση το όριο διαρροής του υλικού. Αντίστοιχα για τη βελτιστοποιημένη μήτρα είναι 110 bar, δηλαδή η βελτιστοποιημένη μήτρα εκβολής παρουσιάζει μικρότερη αντοχή σε υψηλές πιέσεις σε σχέση με την αρχική μήτρα εκβολής του πλαστικού σωλήνα. Αυτό είναι φυσιολογικό, γιατί τα πόδια της αράχνης της βελτιστοποιημένης μήτρας είναι λεπτότερα και μικρότερα σε μήκος, σε σχέση με την αρχική μήτρα. Οι τυπικές πιέσεις που δίνονται από τη βιομηχανία για μήτρες εκβολής πλαστικών σωλήνων (πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο) με διάμετρο 32 mm, είναι από 80 έως 100 bar. Επίσης, αποφεύγονται οι υψηλές πιέσεις, ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα στους εκβολείς και να επιτυγχάνεται ομαλοποιημένη ροή στη μήτρα εκβολής.

Πολύ ελπιδοφόρα βήματα έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια στη βελτιστοποίηση τέτοιων μητρών με την βοήθεια προγραμμάτων προσομοίωσης της ροής σε συνδυασμό με τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή των παραμέτρων και του βαθμού στον οποίο θα αλλάξουν, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητοί στόχοι της βελτιστοποίησης βασίζονται στην ικανότητα του σχεδιαστή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ HDPE

**SABIC® HDPE B5823****High density polyethylene for Pipe extrusion****Description.**

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

Typical data.

Revision 20070911

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

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

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

3) Speed of testing: 50 mm/min

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

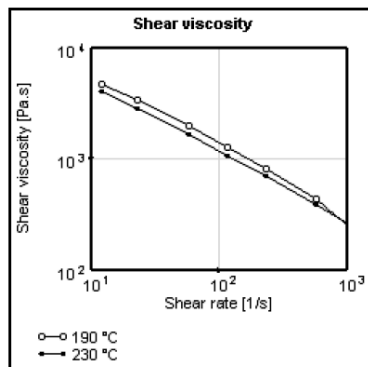
5) Determined in Rhodacal-DS10 at 75 °C, 3 MPa, thickness 1 mm

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



SABIC® HDPE B5823

High density polyethylene for Pipe extrusion



General information. The SABIC® HDPE product range for blow moulding and extrusion is produced in a slurry – or gasphase process using a Cr catalyst. The primary characteristic of SABIC® HDPE grades is a broad molecular weight distribution, which ensures excellent behaviour during extrusion.

Additional characteristics are a high purity, excellent stability during processing and a high intrinsic toughness. The carefully balance of environmental stress crack resistance and stiffness is becoming visible on grade level.

Typical application area: bottles, cans, containers and technical articles, sheet and thermoforming, profiles and tubes for pressure less applications.

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

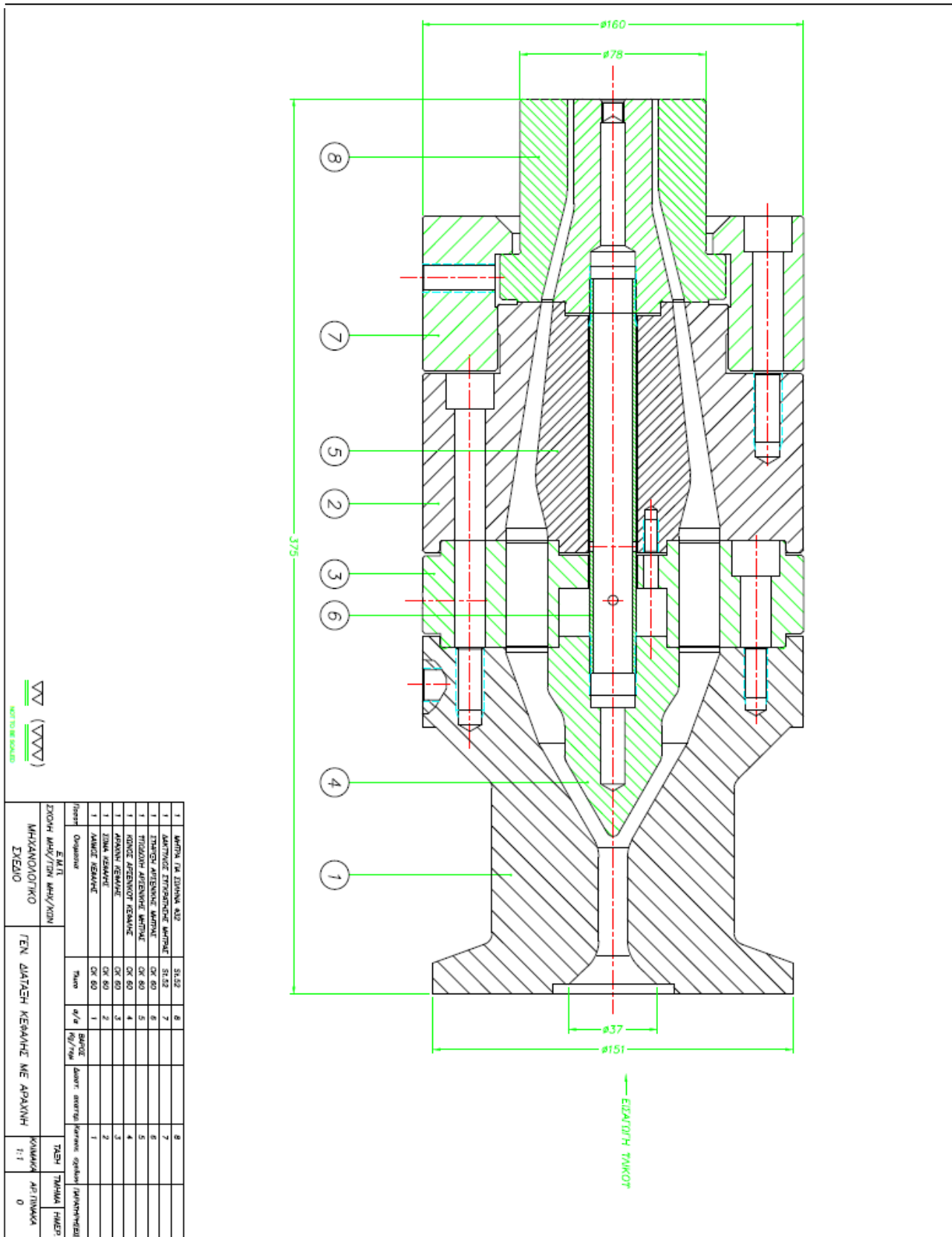
Quality. SABIC Europe is fully certified in accordance with the internationally accepted quality standard ISO 9001-2000. It is SABIC Europe's policy to supply materials that meet customers specifications and needs and to keep up its reputation as a pre-eminent, reliable supplier of e.g. polyethylenes.

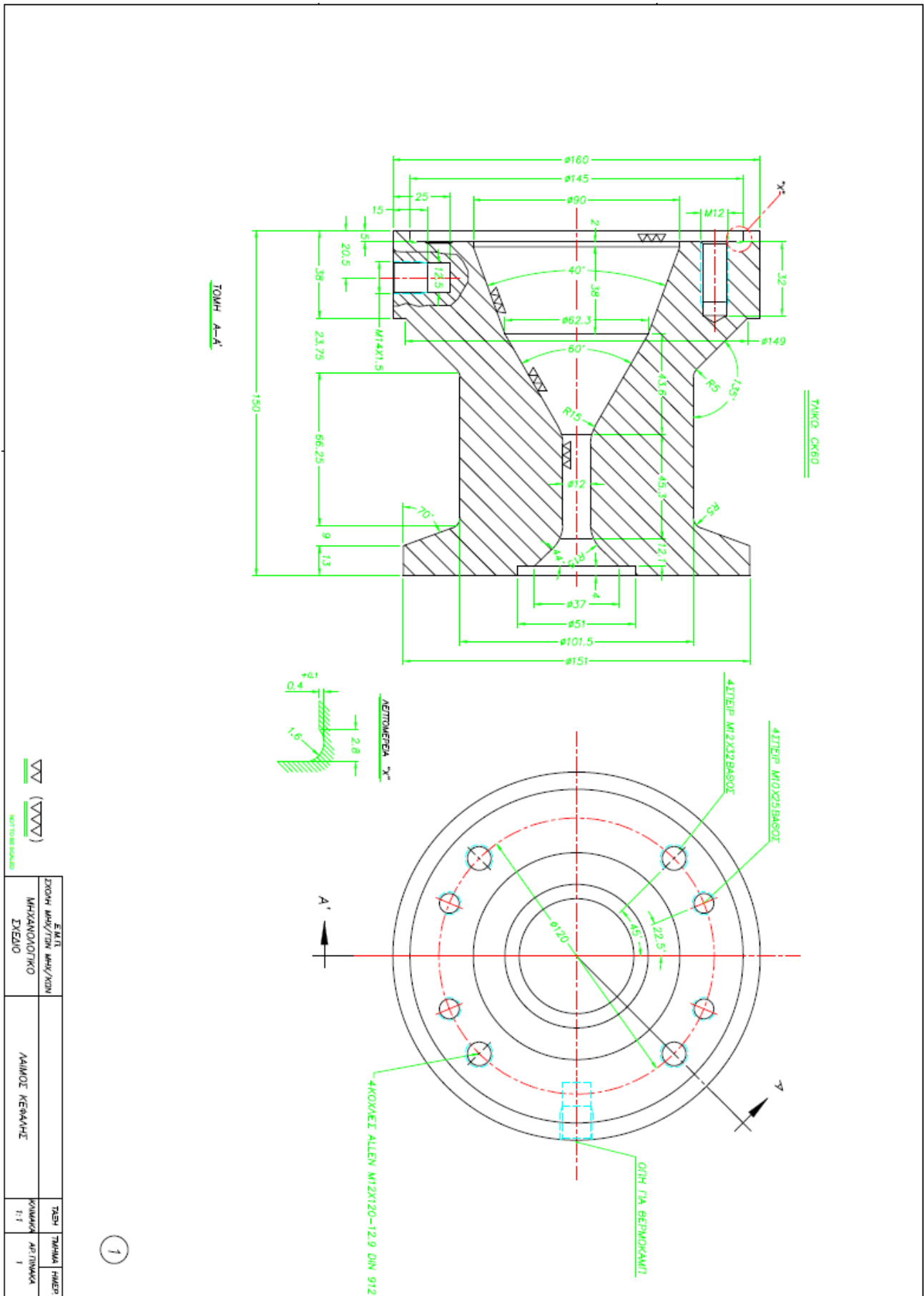
Storage and handling. Polyethylenes resins (in pelletised or powder form) should be stored in such a way that it prevents exposure to direct sunlight and/or heat, as this may lead to quality deterioration. The storage location should also be dry, dust free and the ambient temperature should not exceed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

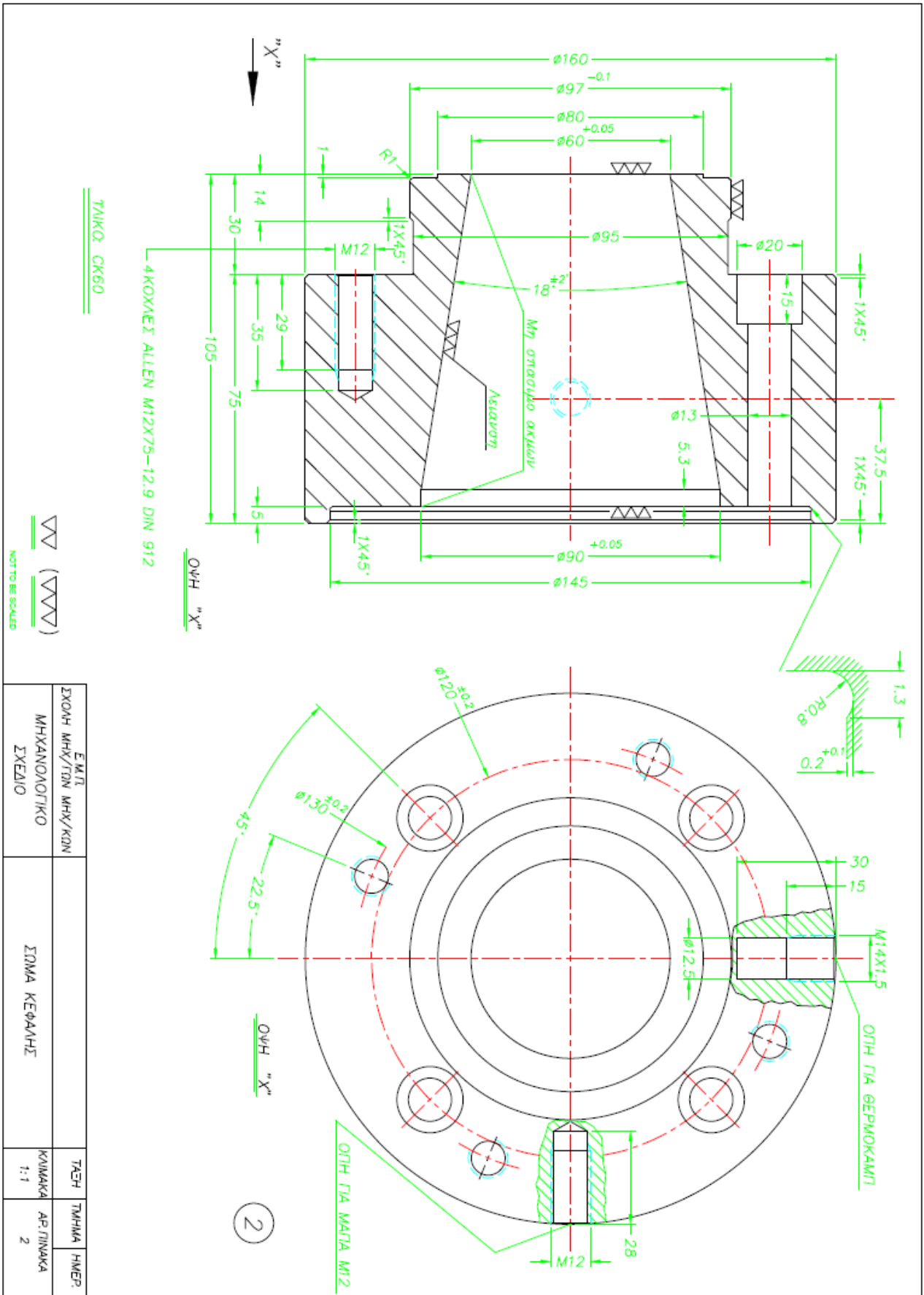
Environment and recycling. The environmental aspects of any packaging material do not only imply waste issues but have to be considered in relation with the use of natural resources, the preservations of foodstuffs, etc. SABIC Europe considers polyethylene to be an environmentally efficient packaging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

internet www.SABIC-europe.com
email TCC.TM-PE@SABIC-europe.com

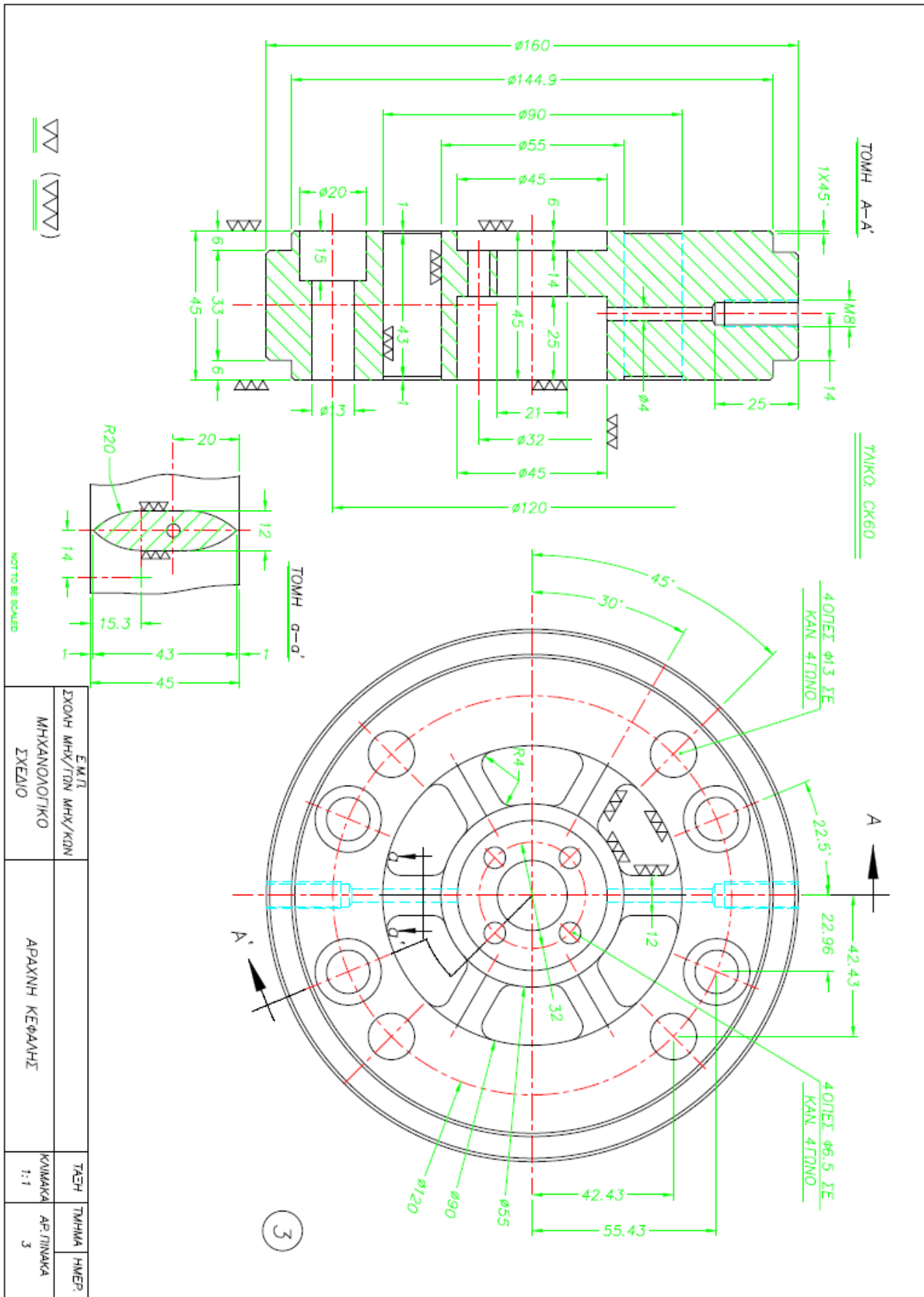
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ

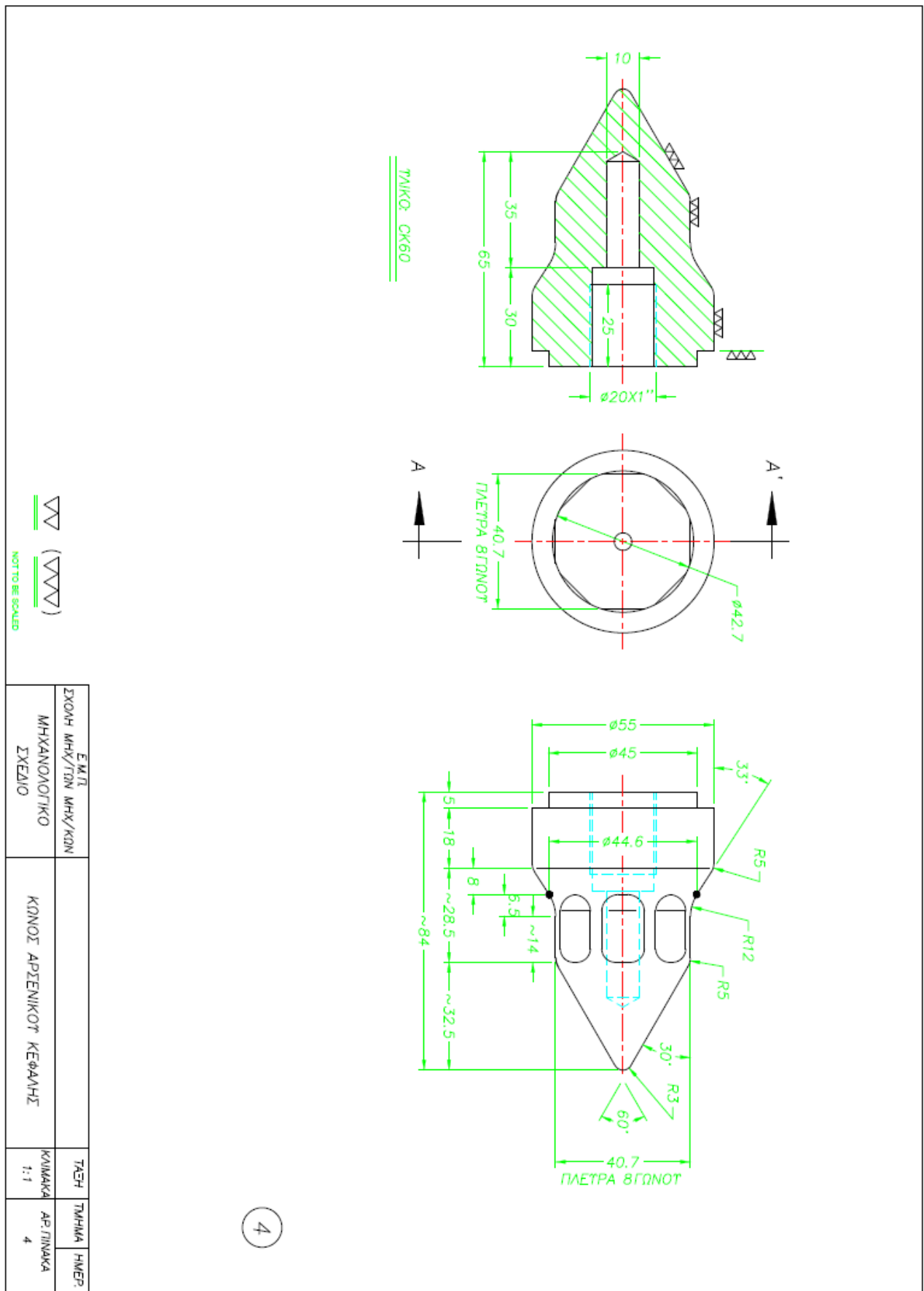




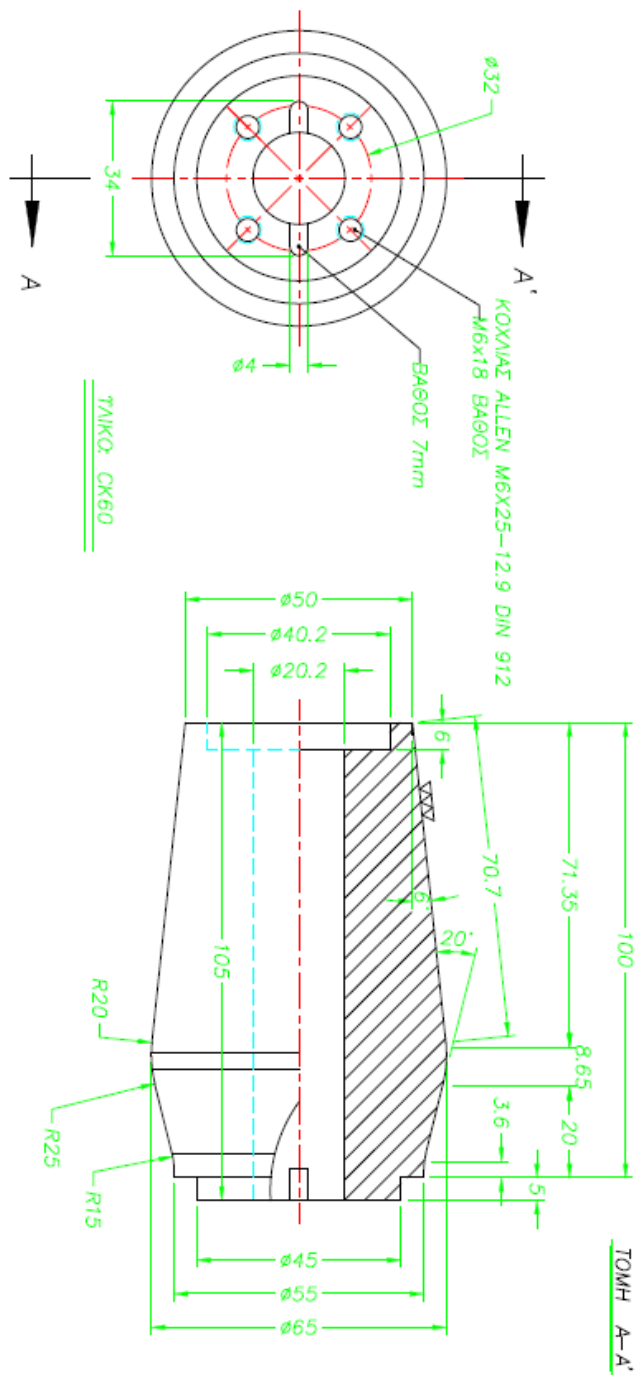


Ε.Μ.Π.	ΣΧΟΛΗ ΜΗΧ/ΤΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ	ΤΕΧΝ	ΤΜΗΜΑ	ΗΜΕΡ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ	ΣΩΜΑ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΑΡ. ΠΙΝΑΚΑ	2
ΣΧΕΔΙΟ		1:1		





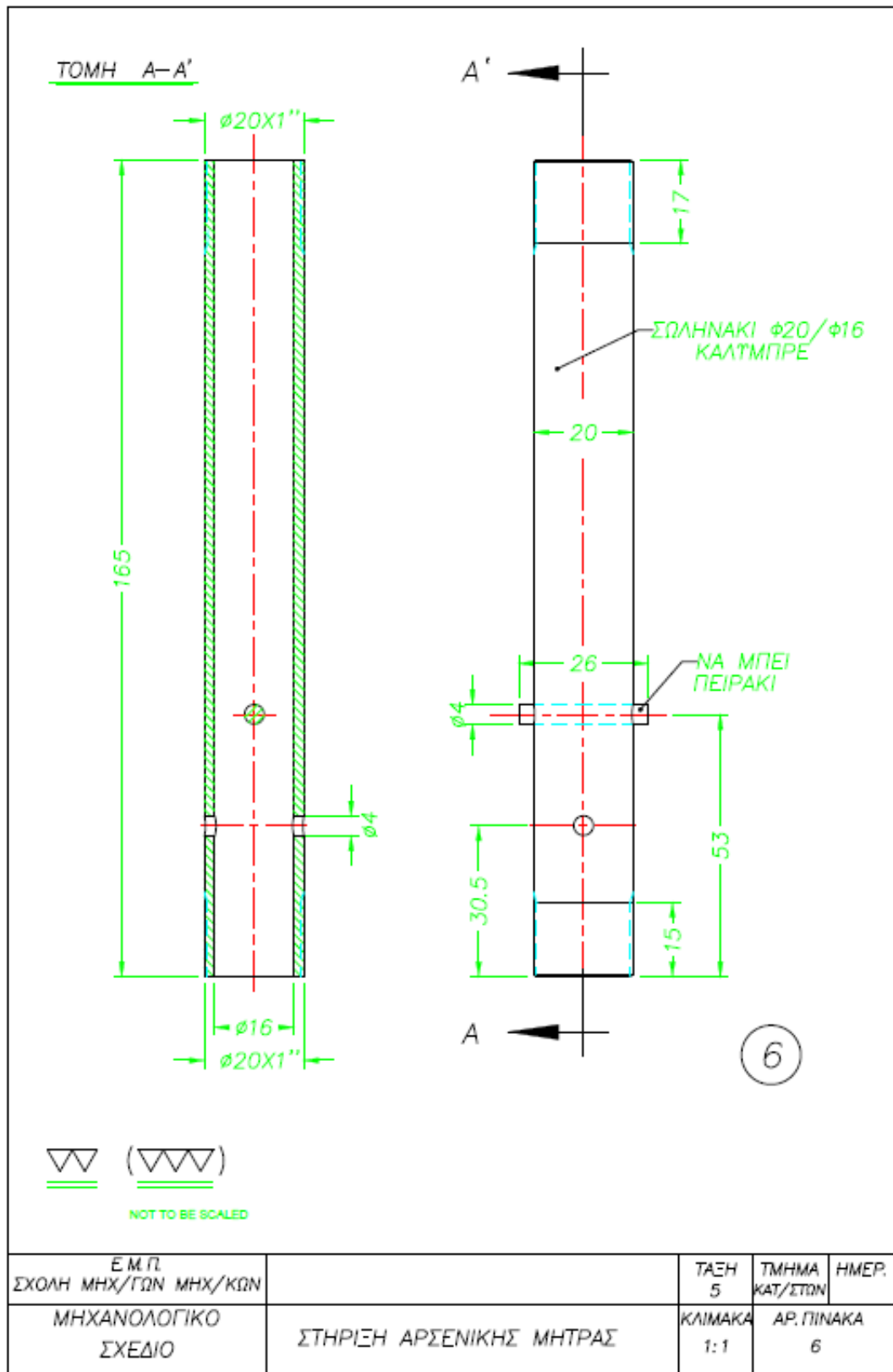
4

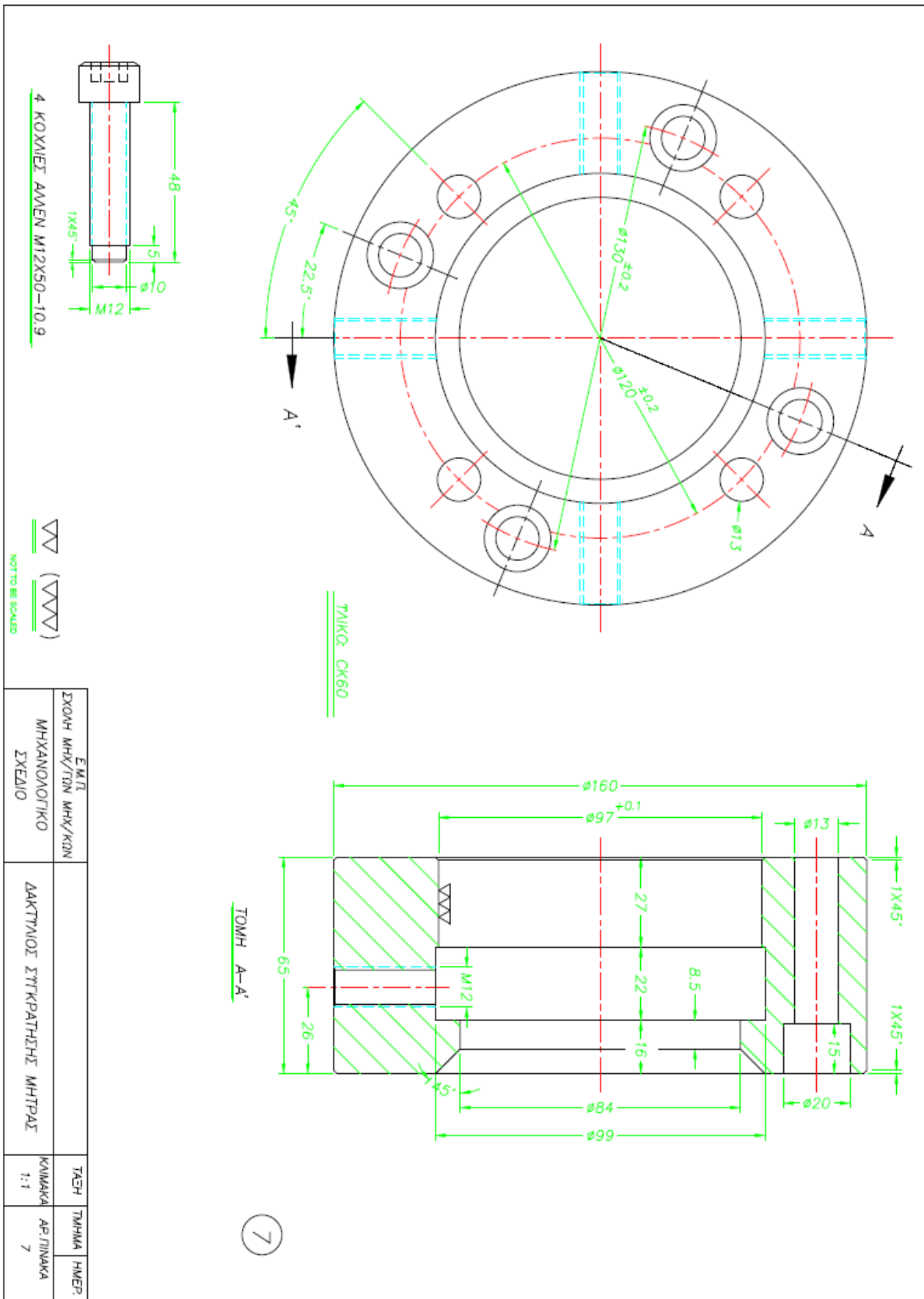


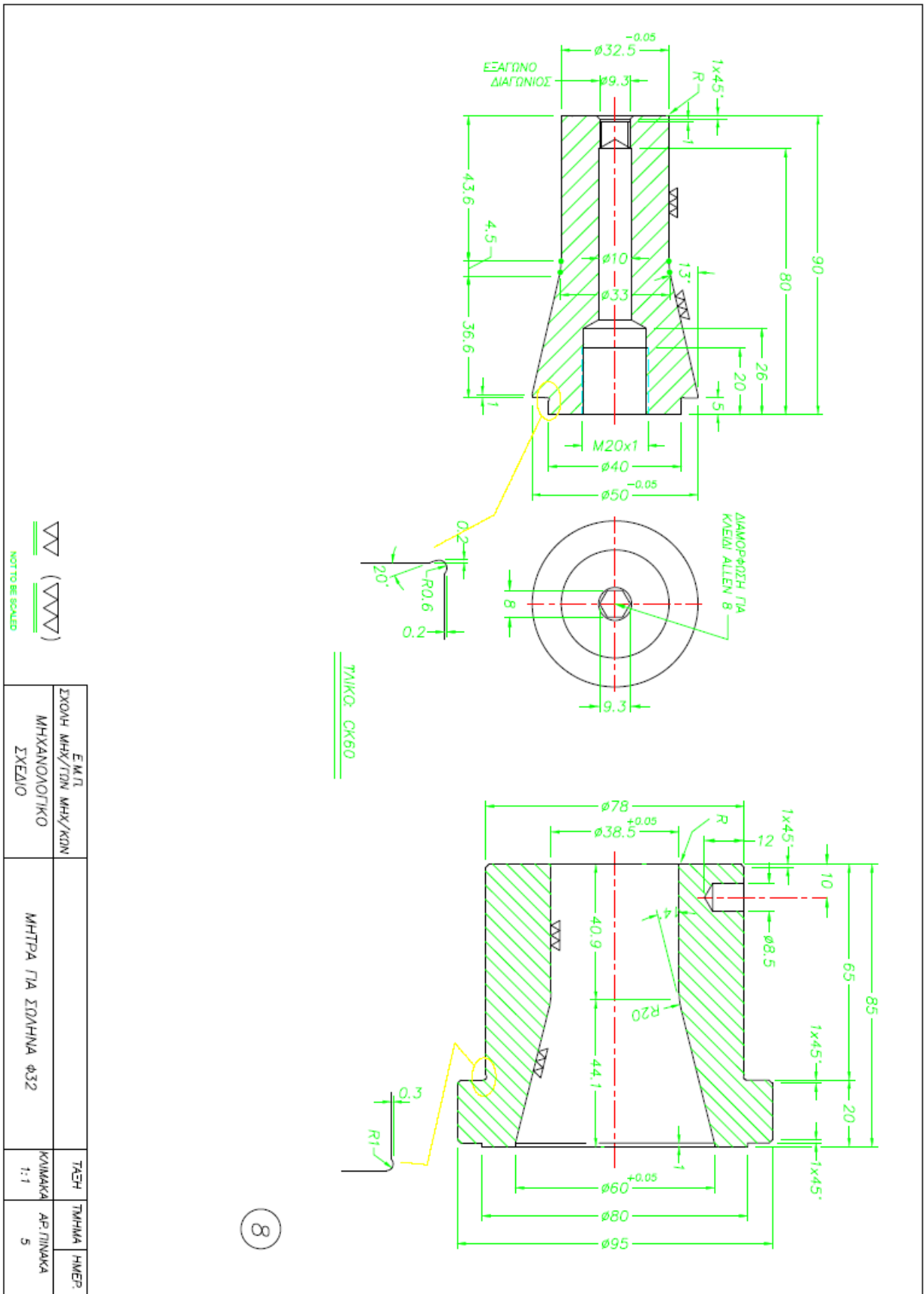
NOT TO BE SCALE

Ε.Μ.Π. ΣΧΟΛΗ ΜΗΧ/ΤΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ	ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΤΑΞΗ ΚΥΜΑΚΑ 1:1	ΤΜΗΜΑ ΑΡ. ΠΙΝΑΚΑ 5	ΗΜΕΡ.
ΠΤΟΔΟΧΗ ΑΡΣΕΝΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ				

5

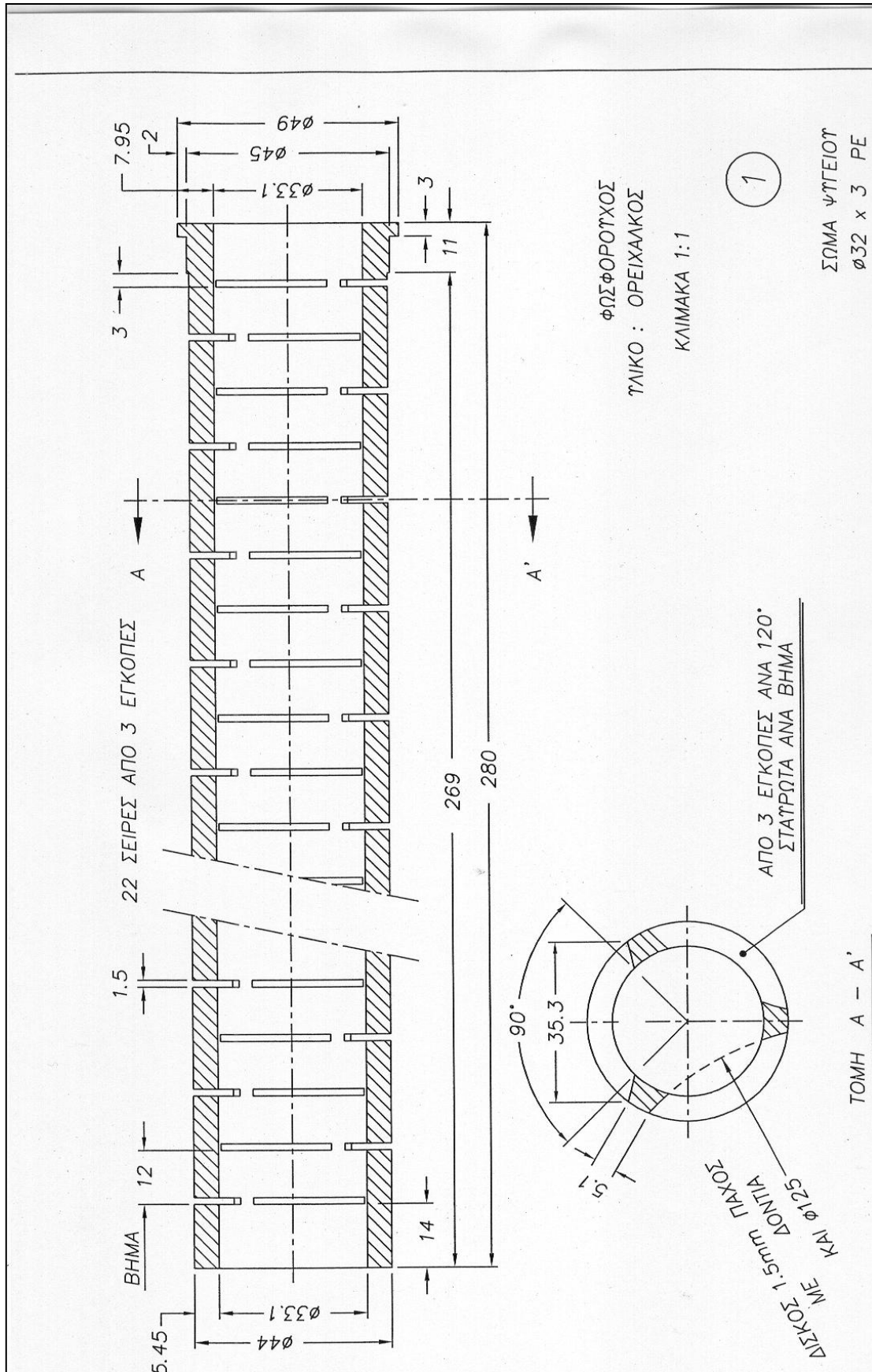


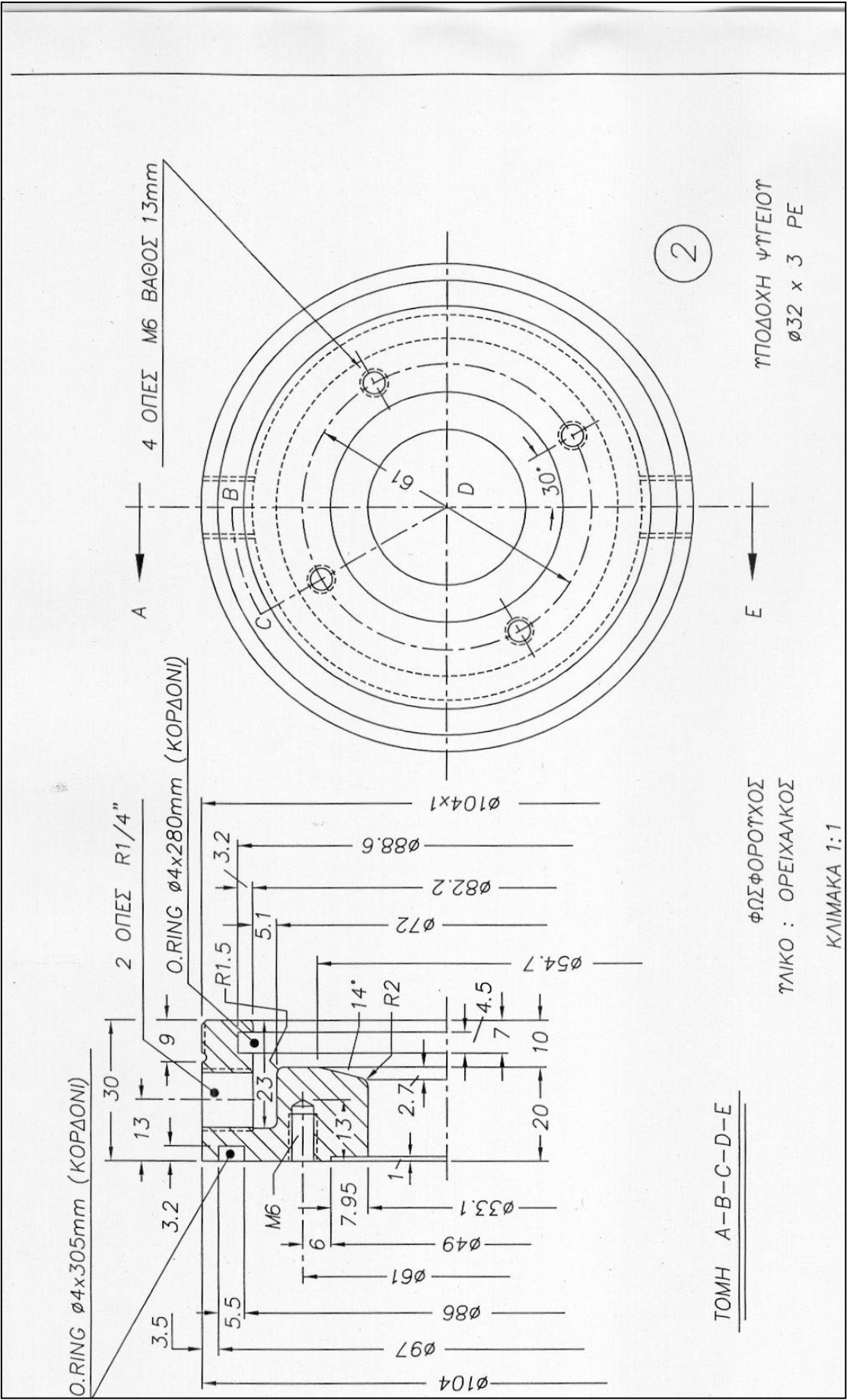


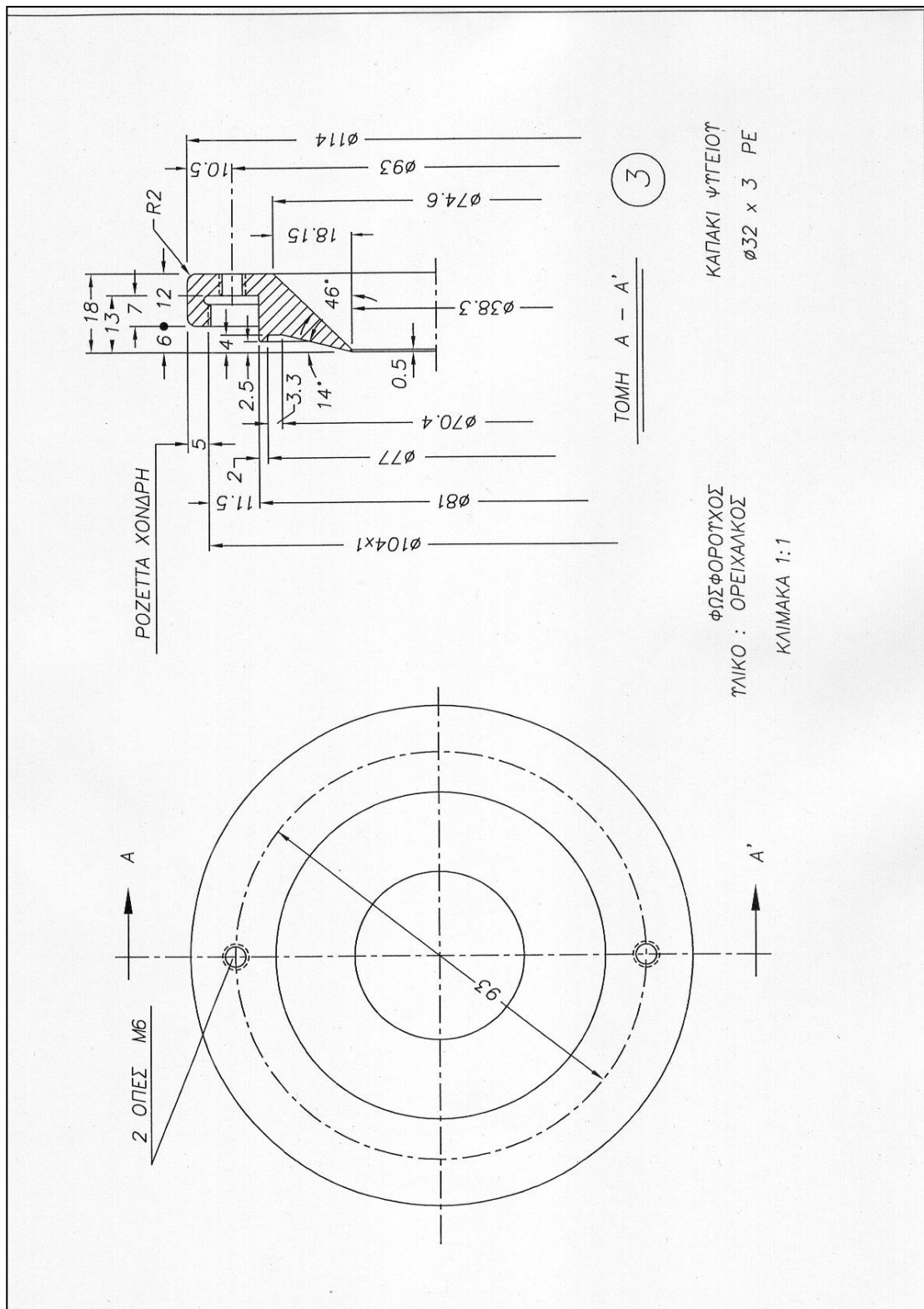


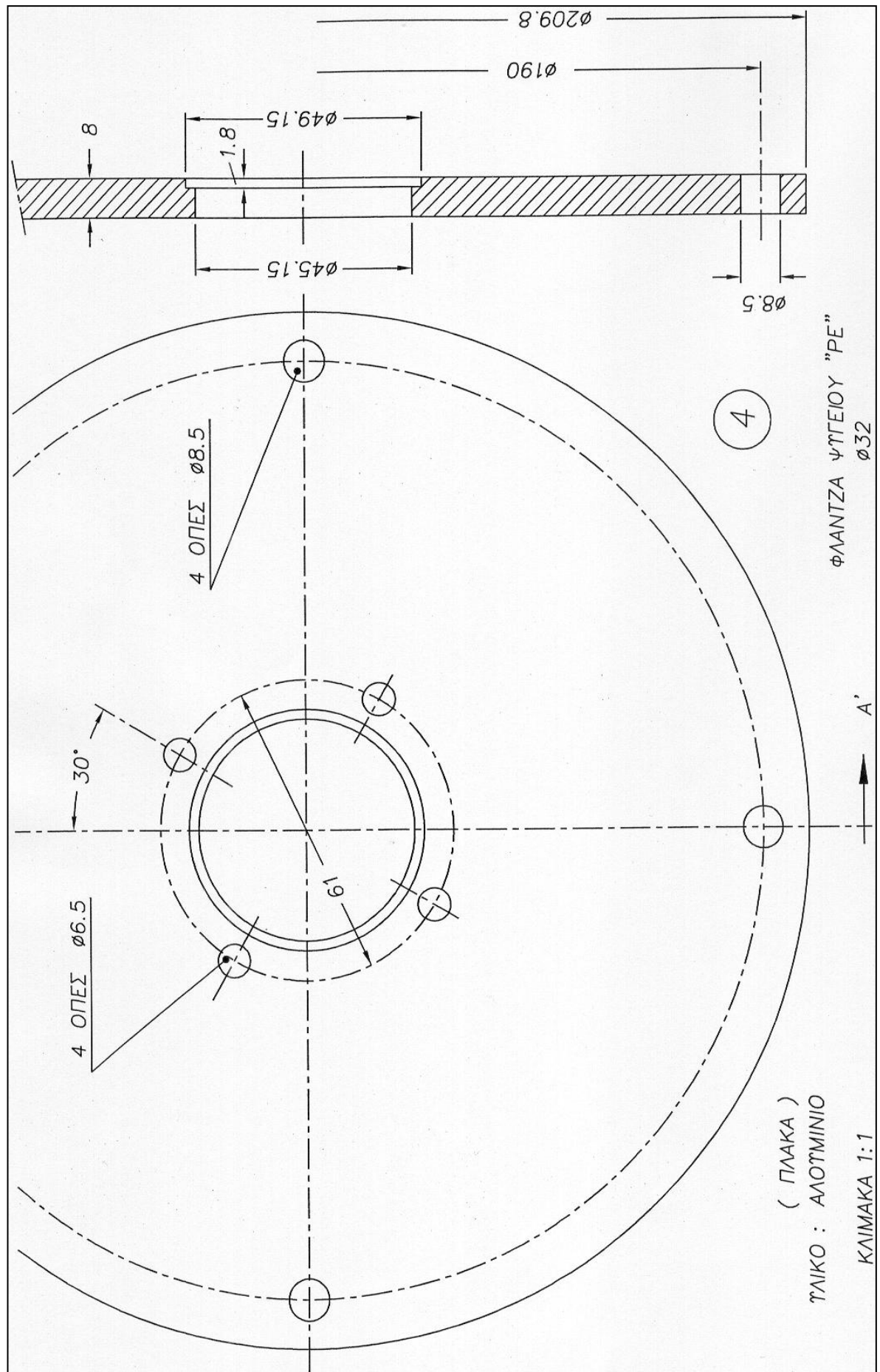
8

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΧΕΔΙΑ ΜΗΤΡΑΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ-ΨΥΞΗΣ









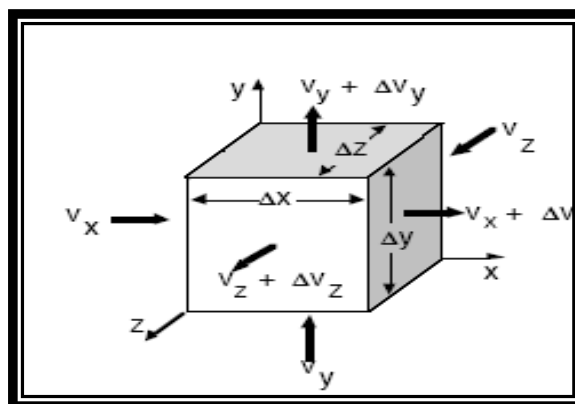
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΤΗΓΜΑΤΩΝ

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Στο μεγαλύτερο μέρος των τεχνικών μορφοποίησης τα πολυμερή βρίσκονται στην κατάσταση τήγματος. Επομένως, γίνεται φανερό ότι για την ανάλυση μιας διεργασίας μορφοποίησης πρέπει να γνωρίζουμε τις βασικές αρχές της ρεολογίας πολυμερικών τηγμάτων. Η ρεολογία περιγράφει την παραμόρφωση ενός στερεού, υγρού, αερίου υπό την επίδραση τάσεων. Τα ιδανικά στερεά παραμορφώνονται ελαστικά, δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωσή τους ανακτάται πλήρως όταν αφαιρούνται οι τάσεις. Τα ιδανικά ρευστά παραμορφώνονται μη αντιστρεπτά, η ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωσή τους μεταπίπτει σε θερμική, μη ανακτήσιμη ενέργεια στο ρευστό. Τα τήγματα των πολυμερών εμφανίζουν τόσο ιξώδη όσο και ελαστική συμπεριφορά (ιξωδοελαστική). Η διεργασία της εκβολής είναι αρκετά σύνθετη και η μοντελοποίησή της είναι μία ιδιαίτερως επίπονη εργασία. Για το λόγο αυτό επιδιώκεται η μαθηματική ανάλυση και η αριθμητική επίλυση με τη χρήση απλοποιημένων προσεγγίσεων και περιορισμών. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατό να γίνει κατανοητό πώς οι διάφορες παράμετροι μιας παραγωγικής διαδικασίας επηρεάζουν την τελική απόδοση της διεργασίας. Όπως όλες οι διεργασίες μορφοποίησης πολυμερών, έτσι και η εκβολή, περιλαμβάνει τη ροή πολυμερικών τηγμάτων υπό την επίδραση βαθμίδας πίεσης και διατμητικών τάσεων. Επειδή, όμως, τα τήγματα πολυμερών είναι μη νευτωνικά ρευστά, είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο μηχανικός την ακριβή σχέση που συνδέει την τάση και την παραμόρφωση για την ανάλυση της ροής. Τέλος, σε γενικές γραμμές, η επίλυση ενός προβλήματος ροής μπορεί να περιγραφεί με τις τρεις εξισώσεις των φαινομένων μεταφοράς, δηλαδή την εξίσωση συνέχειας, κίνησης και ενέργειας που βασίζονται στις αρχές διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, αντίστοιχα.

1. ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ-ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΜΑΖΑΣ

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



Σχήμα 1.1: Στοιχειώδες τμήμα ρευστού

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y,z) η **Αρχή Διατήρησης Μάζας** γράφεται:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) \quad (1.1)$$

Από τη σχέση απόκλισης έχουμε: $div = \delta_x \frac{\partial}{\partial x} + \delta_y \frac{\partial}{\partial y} + \delta_z \frac{\partial}{\partial z}$ (1.2)

Όπου δ_x , δ_y και δ_z οι συνιστώσες του μοναδιαίου διανύσματος.

Επομένως η εξίσωση (1.1) μέσω της (1.2) γράφεται ως:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -div(\rho \vec{v}) \quad (1.3)$$

και με χρήση της ουσιαστικής (υλικής) παραγώγου (substantial derivative) $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot div$, προκύπτει η σχέση:

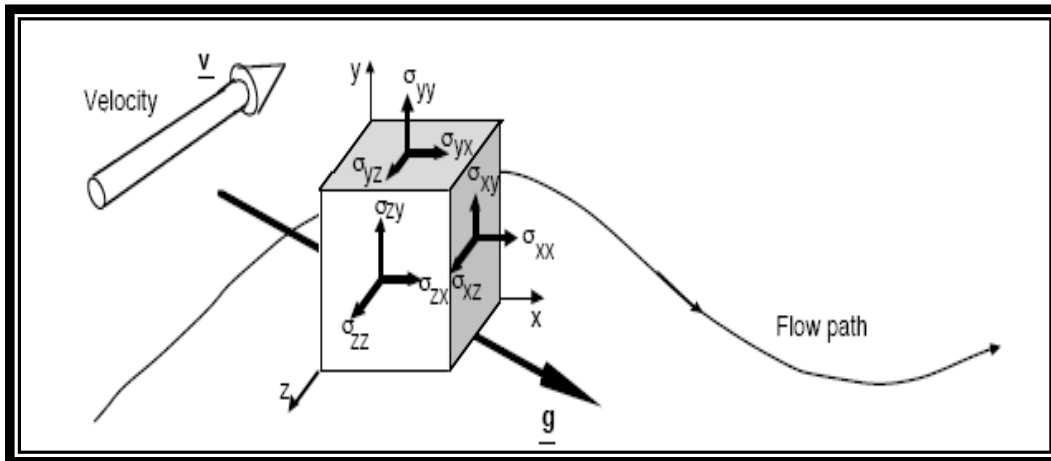
$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \cdot div(\vec{v}) \quad (1.4)$$

Για ασυμπίεστα ρευστά η πυκνότητα ρ είναι ανεξάρτητη από τις συντεταγμένες x,y,z και το χρόνο t και επομένως οι εξισώσεις (1.1) και (1.4) παίρνουν τη μορφή:

$$div(\vec{v}) = 0 \quad (1.5)$$

2. ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ-ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΟΡΜΗΣ

Το γινόμενο της ταχύτητας επί τη μάζα είναι η ορμή. Δεδομένου δε ότι η ταχύτητα αποτελεί διάνυσμα κατά συνέπεια και η ορμή είναι διάνυσμα που διατηρείται σταθερό στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Θεωρείται στοιχειώδης όγκος ελέγχου που κινείται κατά τη φορά του ρευστού.



Σχήμα 1.2: Στοιχειώδης όγκος ελέγχου του ρευστού

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

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{v} dV = - \int_S [\vec{n} \rho \vec{v}] dS - \int_S [\vec{n} \tilde{\pi}] dS + \int_V \rho \vec{g} dV \quad (1.6)$$

Χρησιμοποιώντας το θεώρημα **Gauss** η εξίσωση κίνησης που καλείται και εξίσωση **Cauchy** γράφεται στην εξής μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} = - [\nabla \rho \vec{v}] - [\nabla \tilde{\pi}] + \rho \vec{g} \quad (1.7)$$

όπου \vec{g} είναι το διάνυσμα της τοπικής επιτάχυνσης της βαρύτητας και $\tilde{\pi}$ είναι ο τανυστής των συνολικών τάσεων και ισούται με :

$$\tilde{\pi} = P \tilde{\delta} + \tilde{\tau} \quad (1.8)$$

όπου $\tilde{\tau}$ είναι ο τανυστής των διαμηθικών τάσεων, P οι δυνάμεις πίεσης και $\tilde{\delta}$ ο μοναδιαίος τανυστής που είναι ίσος με.

$$\tilde{\delta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Με χρήση της ουσιαστικής παραγώγου (substantial derivative) η εξίσωση (1.7) γράφεται:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = - [\nabla \tilde{\pi}] + \rho \vec{g} \quad (1.9)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (1.8) στις (1.7) και (1.9) προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) = -[\nabla \rho \vec{v}] - \nabla P - [\nabla \vec{\tau}] + \rho \vec{g} \quad (1.10)$$

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P - [\nabla \vec{\tau}] + \rho \vec{g} \quad (1.11)$$

Επομένως η εξίσωση Κίνησης σε καρτεσιανές συντεταγμένες γράφεται :

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (1.12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} - \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (1.13)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (1.14)$$

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

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) \quad (1.15)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} = \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (1.16)$$

Τέλος για ροή μονής κατεύθυνσης ισχύει:
$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (1.17)$$

Τονίζεται ότι οι δυνάμεις συναγωγής (έρπουσα ροή) καθώς και οι δυνάμεις βαρύτητας θεωρούνται αμελητέες. Επιπλέον, η ροή κυριαρχείται από την ισορροπία δυνάμεων πίεσης και ιξώδους (τάσεων) και η πίεση P θεωρείται βαθμωτό μέγεθος. Οι τάσεις αποτελούν ταυστή με εννέα συνιστώσες.

$$\vec{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix}$$

3. ΕΞΙΣΩΣΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σε μη ισοθερμοκρασιακά προβλήματα η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας. Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας γράφεται:

$$\dot{E}_{acc} + \dot{E}_{conv} = \dot{E}_{cond} + \dot{E}_{diss} \quad (1.18)$$

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

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

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

,όπου C_v η ειδική γραμμομοριακή θερμότητα του ρευστού.

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

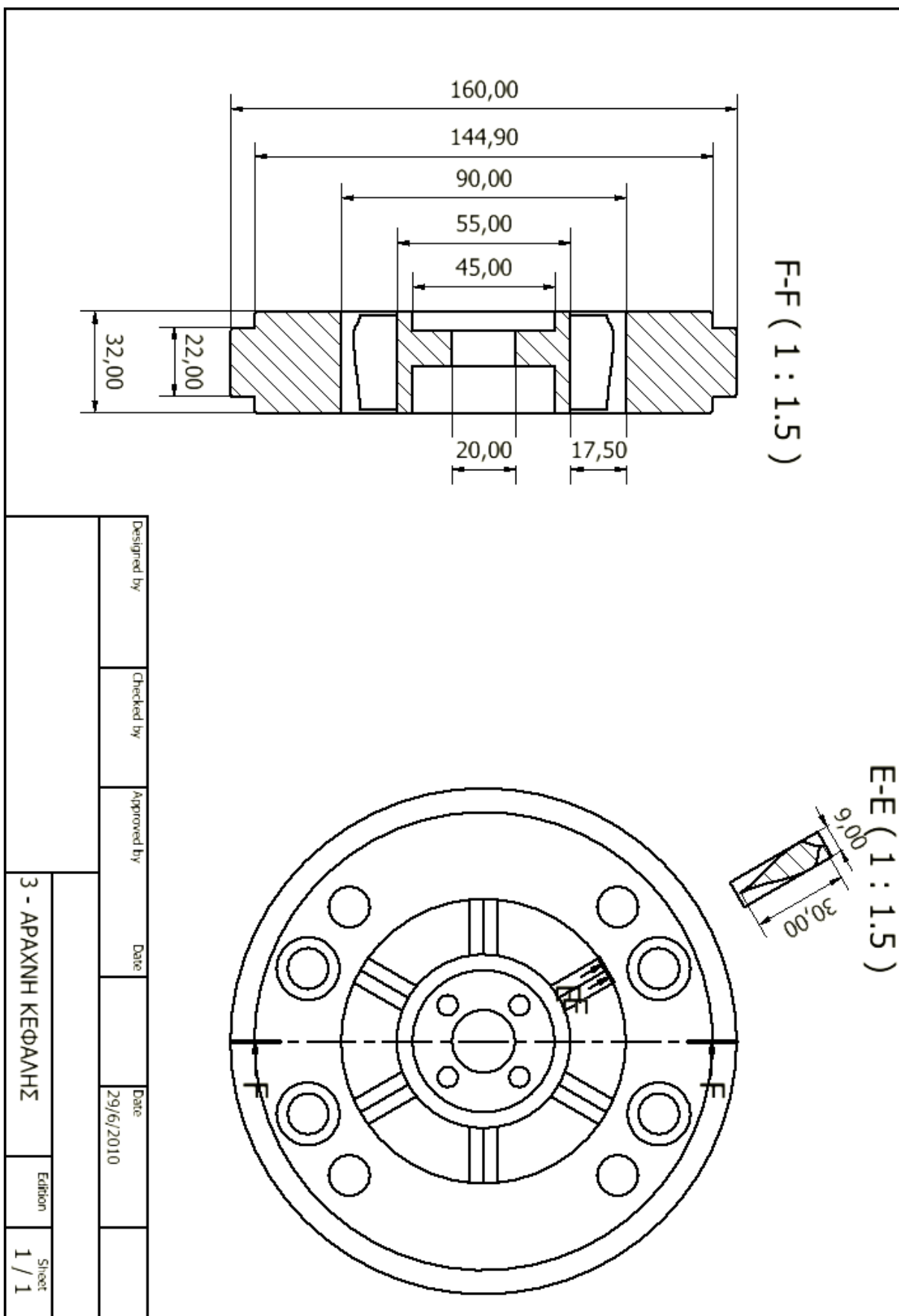
$$\dot{E}_{cond} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

,όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας,

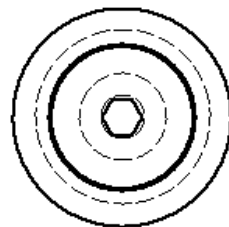
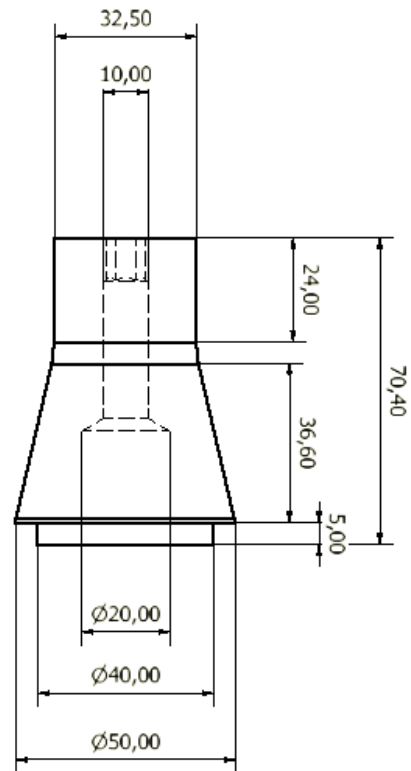
\dot{E}_{diss} είναι ο παράγοντας απωλειών ενέργειας που ισούται με

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

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ



Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date	Edition	Sheet
			29/6/2010		3 - ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΦΑΛΗΣ	1 / 1



Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date
				29/6/2010
8 - ΜΗΤΡΑ ΓΙΑ ΣΩΛΗΝΑ Φ 32 - ΕΣΦ ΤΕΡΜΑ				
ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ				

