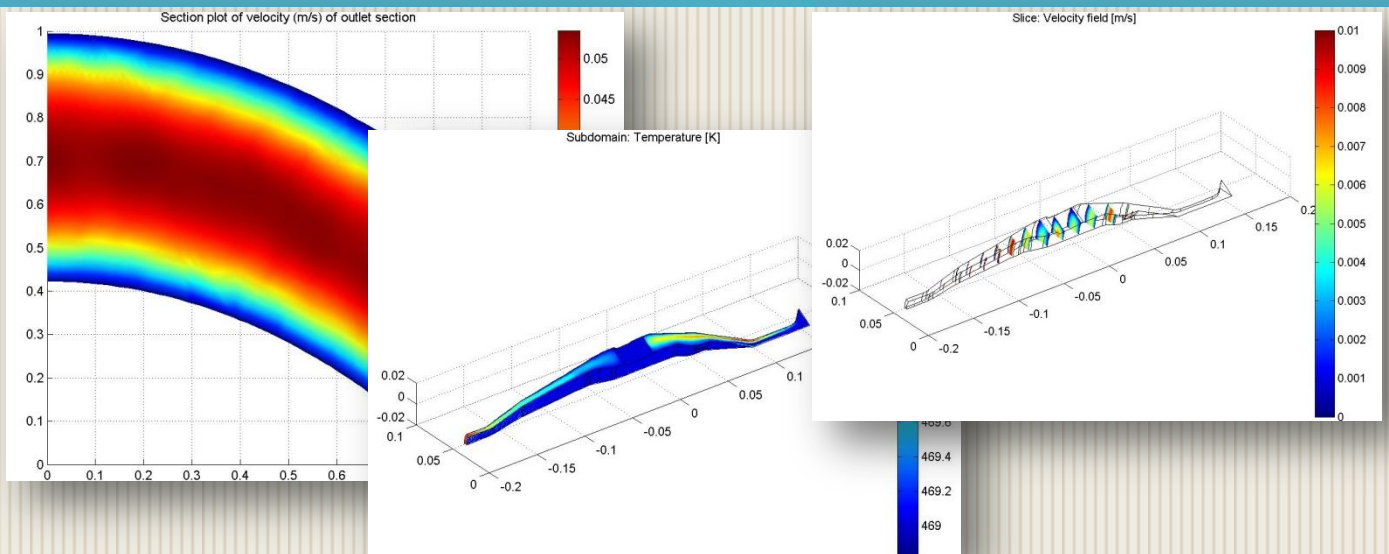




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΔΙΩΝ ΑΡΑΧΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΩΛΗΝΑ



ΔΟΥΛΓΕΡΗΣ ΗΛΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

.....

Ηλίας Δουλιέρης

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον επιβλέποντα για την εργασία καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, αλλά και για την πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γεώργιο Κούζιλο για την επικοινωνιακή συνεργασία κατά την εκπόνησή της. Ευχαριστώ επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αχιλλέα Βορτσέλα για την πολύτιμη βοήθειά του.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Ηλίας Δουλγέρης

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

*« Αφιερώνω αυτή την εργασία στους γονείς μου που με στήριξαν
και με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου »*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση και ο σχεδιασμός μήτρας εκβολής πολυμερούς με αντικειμενική συνάρτηση το λόγο των τετραγώνων της μέσης τιμής προς την τυπική απόκλιση της ταχύτητας και θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο. Επιλέξαμε 5 παραμέτρους βελτιστοποίησης που σχετίζονται με τη γεωμετρία της κεφαλής αράχνης της μήτρας εκβολής. Κυρίως μας ενδιαφέρει η επίδραση των παραμέτρων στην ομοιομορφία της ταχύτητας εξόδου. Διαφορετικές ταχύτητες σε συγκεκριμένη διατομή του ροϊκού σωλήνα οδηγούν στη δημιουργία «γραμμών συγκόλλησης» εντός του τηγμένου πολυμερούς που έχουν δυσμενείς συνέπειες στις τελικές μηχανικές ιδιότητες του πολυμερούς. Επομένως μεγαλύτερη ομοιομορφία στην ταχύτητα εξόδου συνεπάγεται αυξημένη μηχανική αντοχή του στερεοποιημένου πολυμερούς, δηλαδή των πλαστικών σωλήνων που παράγονται.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στα πολυμερή και στο σύστημα εκβολής και τα μέρη από τα οποία αποτελείται. Επίσης, παρουσιάζεται ο η μήτρα εκβολής την οποία προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος Taguchi που χρησιμοποιήσαμε για τη βελτιστοποίηση, η φιλοσοφία και τα βήματα της μεθόδου, ο ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης και η κατάλληλη επιλογή ορθογώνιου πίνακα. Τέλος γίνεται αναφορά στη μέθοδο ανάλυσης της διασποράς (ANOVA) με την οποία υπολογίσαμε της επίδραση των παραγόντων στην ομοιομορφία του ρευστού στην έξοδο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), γίνεται αναφορά στη γένεση πλέγματος, ενώ παρουσιάζονται τα δύο προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν, το SolidWorks και το Comsol.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, προχωρούμε στον προσδιορισμό των παραμέτρων βελτιστοποίησης και εκτελούμε δύο σειρές των 36 πειραμάτων μια σειρά των 9 πειραμάτων δημιουργώντας κατάλληλο επαναληπτικό κώδικα Matlab και λαμβάνουμε τις μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των ταχυτήτων και των θερμοκρασιών στην έξοδο της μήτρας εκβολής, μαζί με τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, συγκεντρώνουμε όλα τα αποτελέσματα, τα οποία αναλύουμε με τη μέθοδο ANOVA και βγάζουμε πολύτιμα συμπεράσματα ως προς την επίδραση των παραμέτρων και τη βέλτιστη τιμή τους. Από την πρώτη σειρά των 36 πειραμάτων υπολογίζουμε τη βέλτιστη τιμή του μήκους ποδιού, από τη δεύτερη σειρά των 36 πειραμάτων υπολογίζουμε τις βέλτιστες τιμές του πάχους του ποδιού και του μεγίστου της καμπύλης spline και τέλος, από τη σειρά των 9 πειραμάτων υπολογίζουμε τις βέλτιστες τιμές των γωνιών εκκίνησης και τερματισμού της καμπύλης spline.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια της μήτρας εκβολής του εργαστηρίου, οι κώδικες Matlab που χρησιμοποιήθηκαν και η βιβλιογραφία της διπλωματικής εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

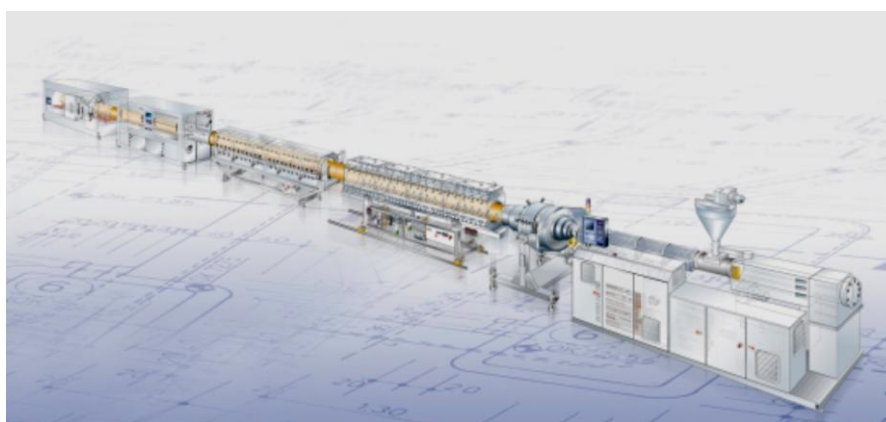
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΚΒΟΛΗ	7
1.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΚΒΟΛΗΣ	7
1.2. ΠΟΛΥΜΕΡΗ	8
1.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΒΟΛΗΣ	11
1.4. ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΜΕ ΚΕΦΑΛΗ ΑΡΑΧΝΗΣ	16
1.5. ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI	25
2.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ TAGUCHI.....	25
2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI.....	27
2.3 ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI	28
2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI	29
2.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI	31
2.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ (ΑΝΟΝΑ).....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	35
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	35
3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	36
3.3 SOLIDWORKS.....	41
3.4 COMSOL	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	43
4.1 ΣΤΟΧΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	43
4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΕΚΒΟΛΕΑ.....	44
4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ.....	45
4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	46
4.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	54
4.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
5.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (ΠΕΝΤΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ).....	71
5.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ.....	73
5.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ).....	75
5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΟΝΑ (5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ).....	80
5.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ).....	82
5.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΟΝΑ (4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ).....	88
5.7 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ).....	90
5.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΟΝΑ (2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ).....	93
5.9 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	97
6.1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ (AUTOCAD).....	97
6.2 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ (INVENTOR).....	106
6.3 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΑΙΝΙΟΥ HDPE	109
6.4 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΚΩΔΙΚΕΣ ΜΑΤΛΑΒ.....	111
6.4.1 ΚΩΔΙΚΑΣ 1: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΜΠΥΛΩΝ SPLINES ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ.....	111
6.4.2 ΚΩΔΙΚΑΣ 2: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ COMSOL [®] with MATLAB [®]	112
6.4.3 ΚΩΔΙΚΑΣ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΝΟΝΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ TAGUCHI L36.....	118
6.5 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	122
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	122
ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΚΒΟΛΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΚΒΟΛΗΣ

Η εκβολή αποτελεί μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές τόσο για τη μορφοποίηση όσο και για την ανάμειξη πολυμερών. Περίπου το 60% των πλαστικών παγκοσμίως μορφοποιούνται με τη μέθοδο της εκβολής. Στα προϊόντα που μορφοποιούνται με εκβολή ανήκουν οι σωλήνες, ράβδοι, προφίλ (όπως πλαίσια σε παράθυρα), φιλμ, ίνες, μονωμένα καλώδια για ηλεκτρικές εφαρμογές και άλλα προϊόντα. Εφαρμόζεται κυρίως για τα θερμοπλαστικά πολυμερή και προσφάτως και για ορισμένα θερμοσκληρυνόμενα και ελαστομερή.



Σχήμα 1.1 Γραμμή παραγωγής προϊόντων πολυμερών με την μέθοδο της εκβολής

Κατά την διεργασία της εκβολής, σφαιρίδια του πολυμερούς και τυχών πρόσθετα μορφοποίησης, τροφοδοτούνται μέσω μιας χοάνης στην μήτρα (extruder), όπου με θέρμανση, πραγματοποιείται ιξώδης ροή του πολυμερούς το οποίο, με χρήση δοσιμετρικού κοχλία, βγαίνει από τη μήτρα πλήρως διαμορφωμένο. Με αυτή την κατεργασία παράγονται συνεχή αντικείμενα με σταθερή διατομή όπως σωλήνες, ράβδοι, φύλλα, ίνες και προφίλ.

1.2. ΠΟΛΥΜΕΡΗ

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

Οι απλές χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των πολυμερών καλούνται *μονομερή*. Για να χρησιμοποιηθεί μια χημική ένωση ως μονομερές θα πρέπει να διαθέτει δύο ή περισσότερες θέσεις από τις οποίες να μπορεί να αντιδράσει. Ο αριθμός των δραστικών θέσεων ενός μονομερούς χαρακτηρίζει τη *δραστικότητα* του. Μονομερή όπως το αιθυλένιο ($CH_2 = CH_2$) ή το αμινοξύ ($H_2N - R - COOH$) είναι διδραστικά ενώ αντίθετα η γλυκερίνη ($CH_2(OH) - CH(OH) - CH_2(OH)$) είναι τριδραστική και το βουταδιένιο ($CH_2 = CH - CH = CH_2$) τετραδραστικό.

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

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

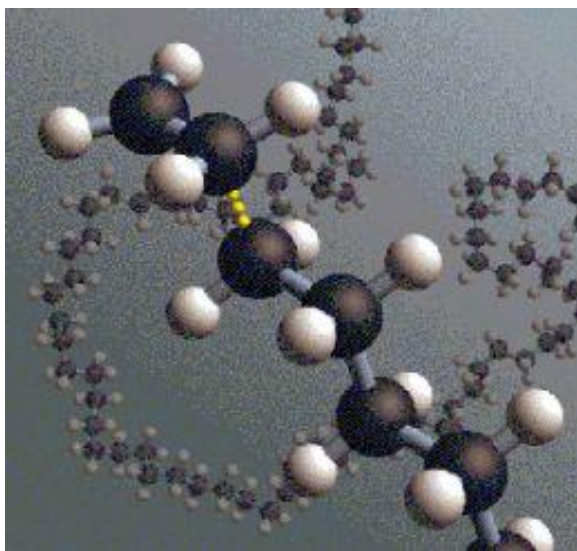
Ο αριθμός n των δομικών μονάδων που συμμετέχουν στη δομή του μορίου του πολυμερούς δηλαδή στην πολυμερική αλυσίδα καλείται *βαθμός πολυμερισμού* DP (degree of polymerization). Επειδή σε ένα δείγμα πολυμερούς τα μήκη των αλυσίδων συνήθως ποικίλουν σε μέγεθος στην πράξη χρησιμοποιείται ο μέσος βαθμός πολυμερισμού \overline{DP} (average degree of polymerization). Ενώσεις με $\overline{DP} < 10$ χαρακτηρίζονται ως ολιγομερή.

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

Αναλυτικότερα:

▪ **Θερμοπλαστικά ή πλαστομερή ή πλαστικά (thermoplastics)**

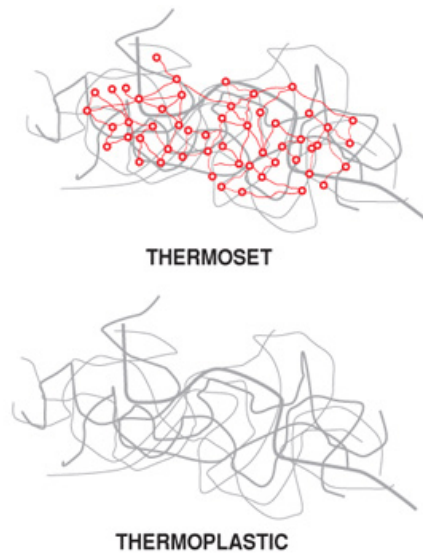
Αποτελούνται συνήθως από γραμμικά μακρομόρια. Με θέρμανση μαλακώνουν και μετατρέπονται σε ρευστά (χαλάρωση των μοριακών δεσμών), διατηρούν δε την κατάσταση αυτή όσο χρόνο διαρκεί η επίδραση της θερμότητας και στη συνέχεια μπορούν εύκολα να μορφοποιηθούν με άσκηση υψηλών πιέσεων. Η ακολουθούσα απόψυξη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



Σχήμα 1.2 Χημικός δεσμός θερμοπλαστικού πολυμερούς (πολυαιθυλένιο)

▪ **Θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά (thermosettings)**

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



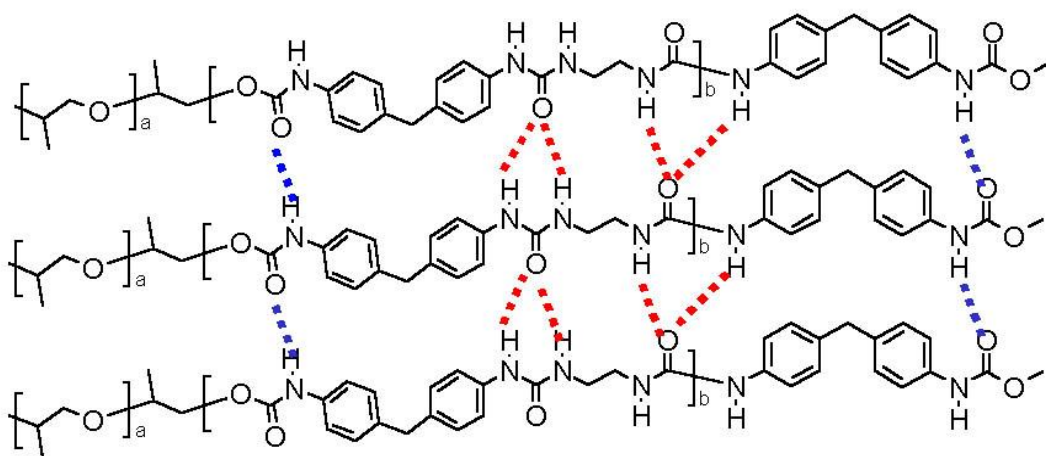
Σχήμα 1.3 Θερμοπλαστικά – θερμοσκληρυνόμενα υλικά

▪ **Τυπικά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή**

Είναι τα φαινολικά πολυμερή (φαινοπλάστες ή βακελίτες), οι ρητίνες, οι βακελίτες κ.α .

▪ **Ελαστομερή ή ελαστικά (elastomers ή rubbers)**

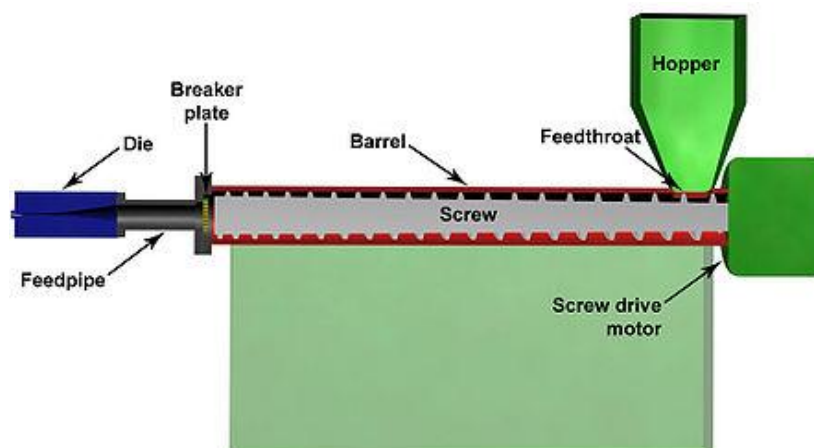
Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες. Εμφανίζουν την ιδιότητα της υπερπλαστικότητας δηλαδή κατά τον εφελκυσμό επιδέχονται πολύ μεγάλη επιμήκυνση και κατά την αποφόρτιση ταχύτατη πλήρη επαναφορά. Σε πολλά ελαστομερή η διατήρηση της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ευρεία γκάμα αλλαγών θερμοκρασίας και συνθηκών περιβάλλοντος. Τυπικά ελαστικά είναι το ελαστικό κόμμι, το συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, το συνθετικό πολυϊσοπροπρένιο, οι σιλικόνες κ.λ.π.



Σχήμα 1.4 Αλυσίδα ελαστομερούς υλικού

1.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΒΟΛΗΣ

Το σύστημα εκβολής αποτελείται από τον εκβολέα, τον κινητήρα, τον πινάκα έλεγχου, το σώμα-κυλινδρό (barrel), τον κοχλία (screw), την πρόσδεση της κεφαλής, το κιβώτιο ταχυτήτων ή τον δίσκο μείωσης της ταχύτητας τροφοδοσίας και την μήτρα (die).

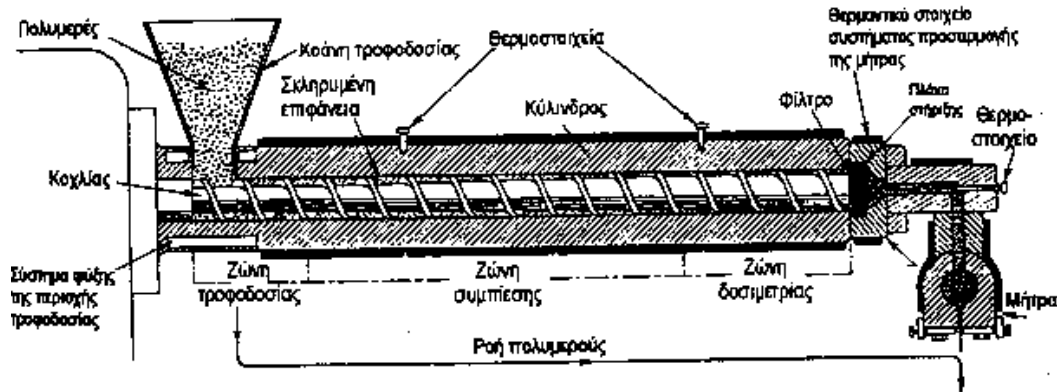


Σχήμα 1.5 Σύστημα εκβολής

▪ Εκβολέας

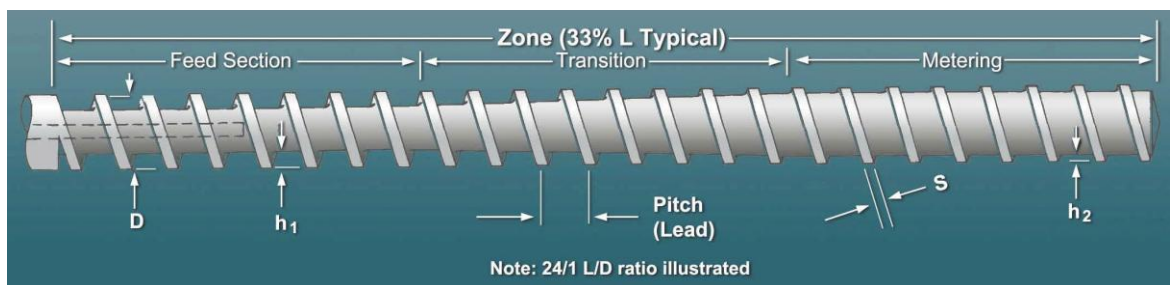
Ο εκβολέας είναι η μονάδα παροχής τήγματος στη διαδικασία της εκβολής. Παρέχει τήγμα του πολυμερούς σε ομοιόμορφη θερμοκρασία και σύσταση με έναν σταθερό και ελεγχόμενο ρυθμό. Οι μηχανές αυτές εξελίχθηκαν, από τις πρώτες διατάξεις που κάποτε μετέτρεψαν τους εκβολείς ελαστικών, στις σύνθετες μονάδες παραγωγής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

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



Σχήμα 1.6 Κύρια τμήματα εκβολέα

Η λειτουργία των περισσότερων εκβολέων γίνεται με την κάθοδο των πολυμερών υπό μορφή κόκκων, σκόνης ή φολιδίων από τη χαάνη 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 προτού εξέλθει και στερεοποιηθεί με ψύξη στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1.7 Κοχλίας εκβολής

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

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

Οι απαιτήσεις σε μηχανική ενέργεια επίσης εξαρτώνται από τον τύπο της πολυμερικής ρητίνης και το σχεδιασμό της μήτρας. Το σύστημα μεταφοράς θερμότητας αποτελείται από θερμαντικά στοιχεία ηλεκτρικής αντίστασης (heating elements), σύστημα ψύξης στην περιοχή της τροφοδοσίας και έναν αριθμό θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία είναι συνδεδεμένα με

τους ρυθμιστές θερμοκρασίας οι οποίοι ενεργοποιούν τα θερμαντικά ή ψυκτικά στοιχεία ώστε να διατηρηθεί το επιθυμητό θερμοκρασιακό προφίλ του εκβολέα. Κατά την περιστροφή του ο κοχλίας δέχεται μια ώθηση από το πολυμερικό τήγμα προς το πίσω μέρος του εκβολέα. Για το λόγο αυτό υπάρχουν τα έδρανα αντίθλιψης (thrust bearing) που λειτουργούν για την απόσβεση αυτής της δράσης. Το κύριο σώμα της διάταξης εκβολής αποτελείται από τον κύλινδρο (barrel) και τον κοχλία (screw).

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

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

Η τήξη συντελείται από τους ακόλουθους μηχανισμούς:

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

▪ Κύλινδρος του εκβολέα

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

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

▪ Κινητήρας

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

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

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

▪ .Κιβώτιο ταχυτήτων (GEARBOX)

Τα κιβώτια ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται στους μονοκόχλιους εκβολείς είναι εδώ και πολλά χρόνια, σχεδόν αποκλειστικά, μονάδες άμεσης μετάδοσης (direct-drive units) παρά μειωτήρες ατέρμονα κοχλία (wormgear reducers). Τα γρανάζια έχουν είτε ελικοειδή οδόντωση, είτε τύπου ψαροκόκαλου (herringbone type) για ελάχιστη φθορά κατά τη μέγιστη μεταφορά ροπής. Τα κιβώτια ταχυτήτων είναι σταθερά ρυθμισμένα καθώς οι εκβολείς λειτουργούν γενικά για βδομάδες χωρίς διακοπή.

Οι σχέσεις μετάδοσης των κιβωτίων κυμαίνονται από 6:1 έως 12:1 ανάλογα και με τη βασική ταχύτητα του κινητήρα και τις απαιτήσεις ροπής για το κατεργαζόμενο πολυμερές. Είναι πάντα πλεονεκτικότερο να χρησιμοποιείται το κιβώτιο ταχυτήτων στην κλίμακα όπου ο κινητήρας λειτουργεί σε υψηλότερες ταχύτητες, τόσο για καλύτερο έλεγχο, όσο και για πιο αποδοτική λειτουργία του κινητήρα.

▪ .Πίνακας ελέγχου εκβολέα (CONTROL CABINET)

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

▪ .Πρόσδεση κεφαλής

Η κεφαλή-έξοδος του εκβολέα είναι το μέρος όπου προσαρμόζονται οι μήτρες εκβολής. Υπάρχουν διάφορες δυνατότητες για την προσαρμογή των κεφαλών στον κύλινδρο. Η απλούστερη διευθέτηση είναι να βιδωθεί η κεφαλή απ' ευθείας στη φλάντζα του κυλίνδρου. Αυτός ο τρόπος απαιτεί προσεκτικό χειρισμό της μήτρας για την ασφαλή απομάκρυνσή της κατά την διάρκεια των εργασιών καθαρισμού.

1.4. ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΜΕ ΚΕΦΑΛΗ ΑΡΑΧΝΗΣ

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

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

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 1.8, Σχήμα 1.9 και Σχήμα 1.10) βλέπουμε λίγα παραδείγματα της ποικιλίας των κεφαλών αράχνης που συναντάμε στην βιομηχανία.



Σχήμα 1.8 Διπλή κεφαλή αράχνης

Σχήμα 1.9 Μονή κεφαλή αράχνης



Σχήμα 1.10 Διάφορα μεγέθη κεφαλών αράχνης

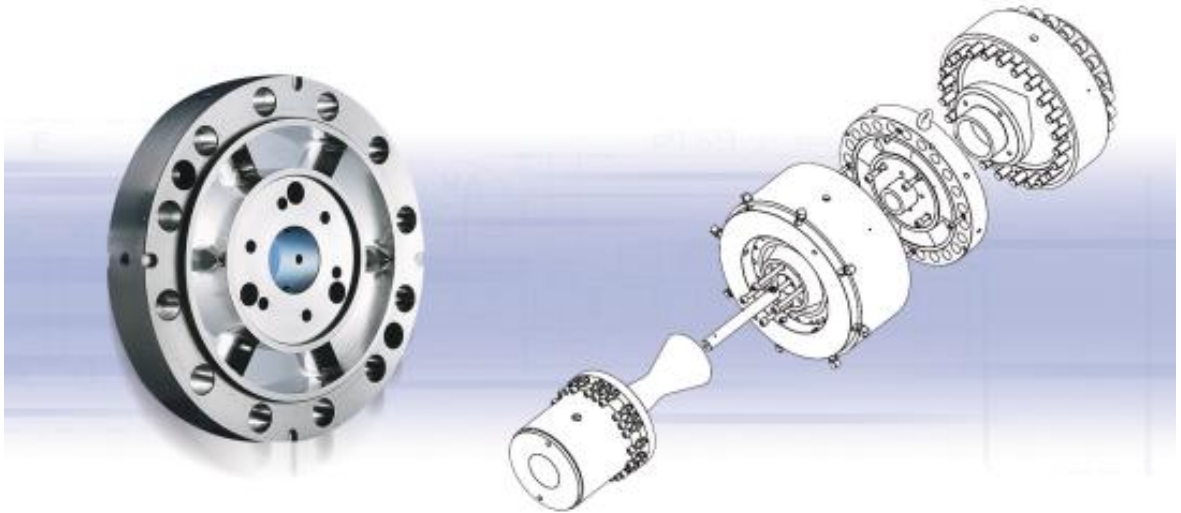
Επίσης, ποικίλουν τα μεγέθη και η γεωμετρία της ίδιας της μήτρας (Σχήμα 1.11 και Σχήμα 1.12).

Αυτό συμβαίνει κυρίως για δύο λόγους:

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

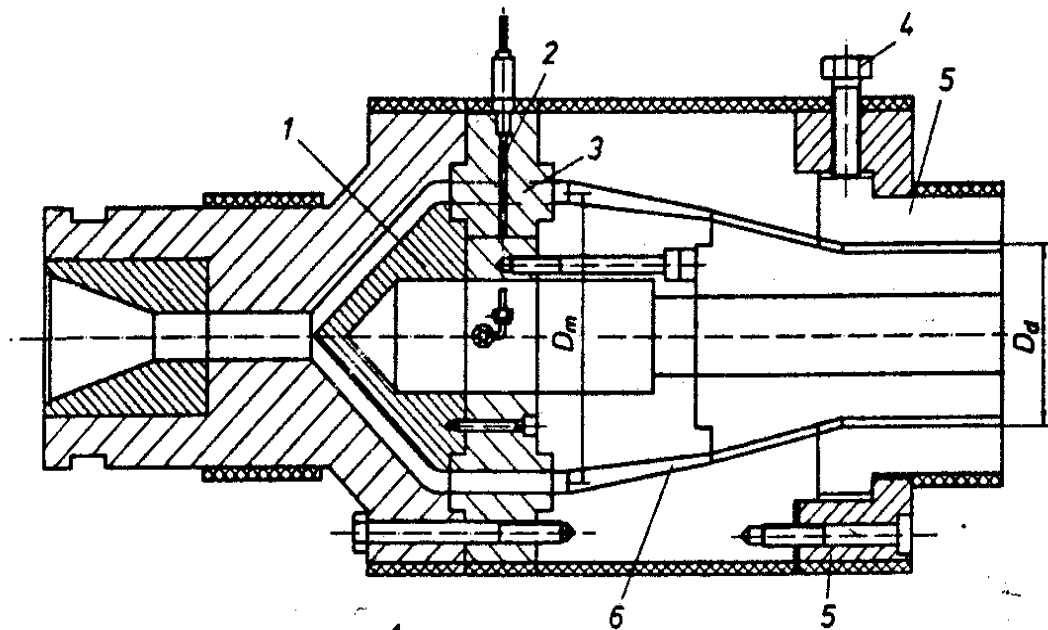


Σχήμα 1.11 Τμήματα μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα με κεφαλή αράχνης



Σχήμα 1.12 Συναρμολόγηση μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα με κεφαλή αράχνης

Στο Σχήμα 1.13 φαίνεται μια κεφαλή κεντρικής τροφοδοσίας με αράχνη και ορισμένα μέρη της.



Σχήμα 1.13 Τομή κεφαλής κεντρικής τροφοδοσίας με αράχνη

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

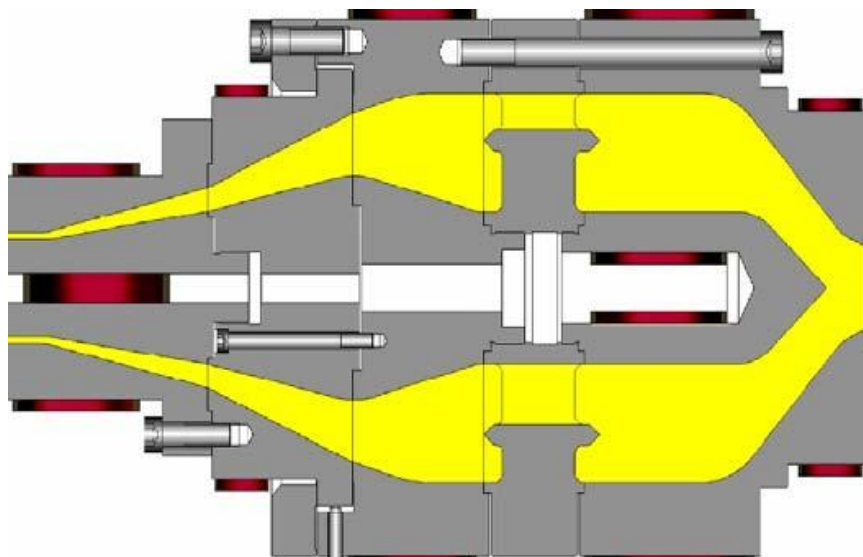
D_m : μέση διάμετρος της αράχνης,

D_a : εξωτερική διάμετρος της μήτρας

➤ Ροή υλικού μέσα από την μήτρα

Το ρεύμα του τήγματος που παρέχει ο εκβολέας σε ένα κυλινδρικό κανάλι ροής, μετασχηματίζεται σε μια δακτυλιοειδή ροή. Το τήγμα εκτρέπεται στη ζώνη της αράχνης σε ξεχωριστά ρεύματα και ρέει γύρω από τα πόδια της αράχνης. Ακολουθεί η συγκλίνουσα περιοχή του πυρήνα στην οποία τα ξεχωριστά ρεύματα ξαναενώνονται. Στο τέλος βρίσκεται η μήτρα με τα παράλληλα τοιχώματα. Ο λόγος της διαμέτρου της αράχνης προς τη διάμετρο εξόδου για κεφαλές σωλήνων είναι συνήθως 1,4 -1,6 για PVC και 2 για PE, ωστόσο αυτές οι τιμές εξαρτώνται και από τη διάμετρο της μήτρας.

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



Σχήμα 1.14 Ροή πολυμερούς σε μήτρα εκβολής πλαστικού σωλήνα με κεφαλή αράχνης

➤ Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

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

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

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

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

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

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

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

➤ Αρχές σχεδιασμού κεφαλής με αράχνη

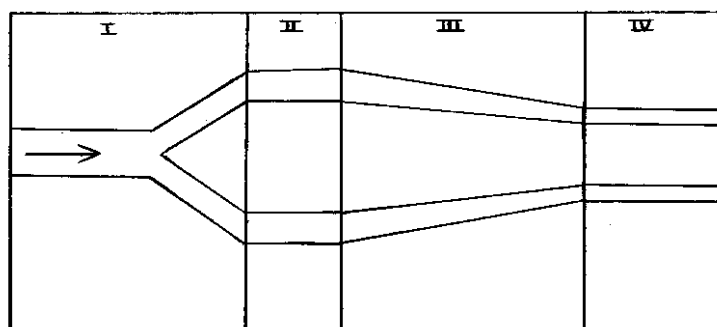
Στις κεφαλές με αράχνη υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές ζώνες οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του καναλιού ροής της κεφαλής και φαίνονται στο Σχήμα 1.15:

α. Η ζώνη εκτροπής (I), στην οποία το τήγμα που εξέρχεται από τον εκβολέα, εκτρέπεται από τον άξονα εκβολής και διανέμεται μέσω σε μια δακτυλιοειδή διατομή.

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

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

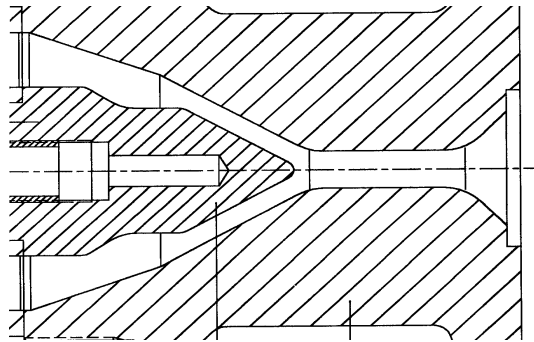
δ. Η παράλληλη ζώνη της μήτρας (IV), όπου το εκβαλλόμενο προϊόν διαμορφώνεται στις επιθυμητές διαστάσεις.



Σχήμα 1.15 Ζώνες του καναλιού ροής της κεφαλής

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

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



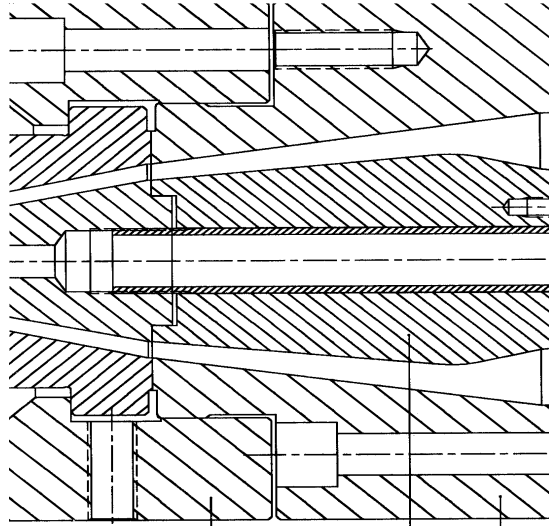
Σχήμα 1.16 Ζώνη εκτροπής του τήγματος

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

Έτσι τα πόδια της αράχνης :

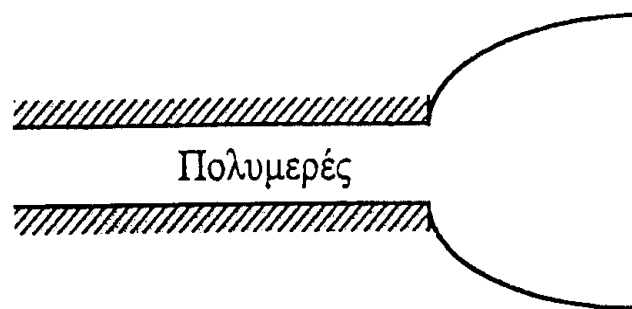
- ✓ Δεν πρέπει να είναι μακρύτερα από 30-80mm,
- ✓ παχύτερα από 9-12mm και
- ✓ αριθμός τους να αυξάνεται περίπου με το τετράγωνο της διαμέτρου.

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



Σχήμα 1.17 Ζώνη χαλάρωσης

- Στην παράλληλη ζώνη της μήτρας το τήγμα του πολυμερούς διογκώνεται εξερχόμενο από τη μήτρα (swelling) κυρίως σε πολυμερή με μεγάλο ιξώδες όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.18.



Σχήμα 1.18 Διόγκωση του πολυμερούς κατά την έξοδο του από τη μήτρα

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

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

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

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

➤ **Τα υλικά για κεφαλές εκβολής πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες απαιτήσεις**

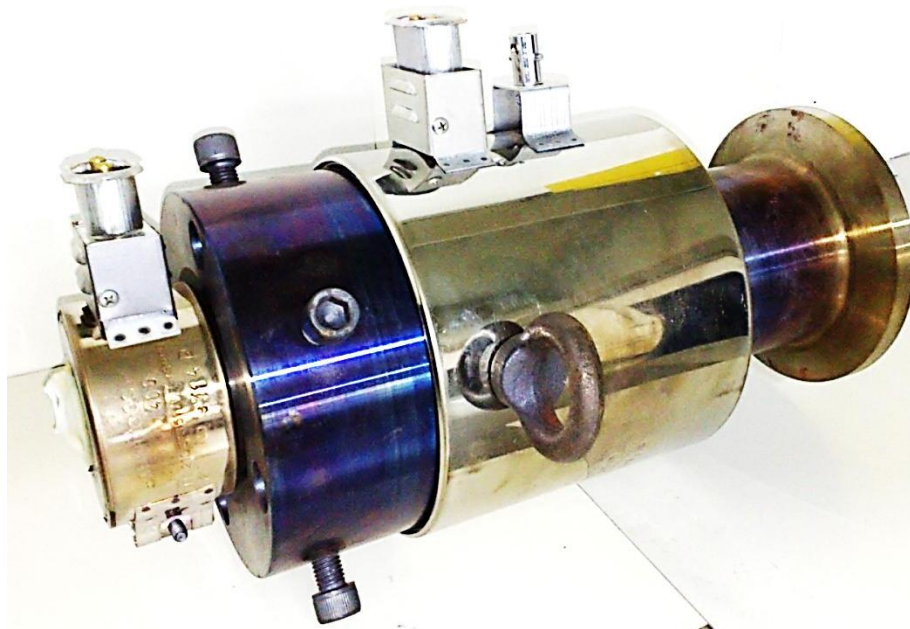
- Να είναι εύκολα κατεργάσιμα
- Να είναι ανθεκτικά σε πίεση, θερμοκρασία και φθορά
- Να έχουν επαρκή αντοχή και στιβαρότητα
- Να έχουν επαρκή επιφανειακή σκληρότητα
- Να μπορούν εύκολα να φινιριστούν σε μια ικανοποιητική επιφάνεια (χωρίς πορώδες)
- Να ανταποκρίνονται επαρκώς σε μια απλή θερμική καταπόνηση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

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

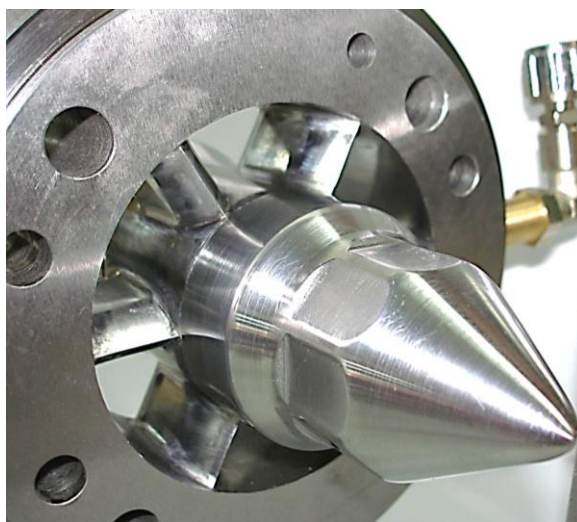
- Το υλικό της κατεργασίας και τον τύπο του πολυμερούς που θα μορφοποιηθεί με εκβολή
 - Τη φύση και το μέγεθος των μηχανικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά την εκβολή του πολυμερούς
 - Τις κατεργασίες που θα πραγματοποιηθούν για την κατασκευή της μήτρας.
 - Τις θερμικές κατεργασίες και καταπονήσεις που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

1.5. ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

Παρακάτω, παρουσιάζουμε τη γενική διάταξη της μήτρας εκβολής του εργαστηρίου του Τομέα των κατεργασιών αποτελούμενη από όλα τα τμήματά της, καθώς και την αράχνη κεφαλής, όπου φαίνεται η γεωμετρία των ποδιών της.



Σχήμα 1.19 Συνολική άποψη μήτρας εκβολής εργαστηρίου



Σχήμα 1.20 Αράχνη κεφαλής και κώνος αρσενικού κεφαλής

Τα κατασκευαστικά σχέδια της μήτρας εκβολής του εργαστηρίου, παρουσιάζονται στο «Παράρτημα Α» σχεδιασμένα με το πρόγραμμα Autodesk AutoCAD μαζί με τις απαραίτητες διαστάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI

2.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ TAGUCHI

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

Τέτοιες μέθοδοι είναι οι εξής:

➤ **Προσέγγιση δοκιμής - λάθους**

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

➤ **Σχεδιασμός πειραμάτων**

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

➤ **Μέθοδος TAGUCHI**

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

2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

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

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

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

2.3 ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ 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 επειδή η δυσαρέσκεια πελατών θα αποθαρρύνει τη μελλοντική εμπιστοσύνη στα προϊόντα του, αυτό το κόστος στον πελάτη και την κοινωνία θα επιστρέψει στον παραγωγό. Η μέθοδος Taguchi καθορίζει την εξίσωση "απώλειας" (I) ως τη διαφορά μεταξύ του βέλτιστου στόχου μιας διαδικασίας (τ) και της μετρούμενης τιμής (y).

$$I(y) = k_c \cdot (y - \tau)^2 \quad (2.1)$$

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

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

Συνήθως είναι δύσκολος ο καθορισμός των παραπάνω σταθερών και στην περίπτωση που στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση της μετρούμενης εξόδου, η εξίσωση (2.1) γίνεται:

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

Στην περίπτωση που στόχος μας είναι η μεγιστοποίηση της μετρούμενης εξόδου, η εξίσωση (2.1) γίνεται:

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

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

2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

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

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

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

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

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

- 3) Με βάση τον αριθμό των παραγόντων ελέγχου και των επιπέδων, επιλέγουμε την κατάλληλη ορθογώνια σειρά. Στη συνέχεια συμπληρώνεται η ορθογώνια σειρά με βάση τις τιμές που έχουμε επιλέξει, ορίζοντας έτσι την εκτέλεση κάθε πειράματος.
- 4) Εκτέλεση των πειραμάτων με βάση τον πίνακα Taguchi που καταρτίσαμε παραπάνω και καταγραφή των απαραίτητων μεγεθών.
- 5) Επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης.
- 6) Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των πειραμάτων τα χρησιμοποιούμε σε περαιτέρω ανάλυση με άλλες μεθόδους, π.χ. ANOVA

Επιλογή ορθογώνιας σειράς:

Ένα βασικό σημείο στην ανάλυση μας είναι η επιλογή σωστής ορθογώνιας σειράς. Αφού επιλέξουμε τις παραμέτρους ελέγχου, στη συνέχεια ορίζουμε τα επίπεδα τιμών. Όσων αφορά τις τιμές θα πάρουμε των επιπέδων, αυτές ελέγχονται από κατασκευαστικούς περιορισμούς. 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. Γενικά, ο αριθμός επιπέδων για όλες τις παραμέτρους στον πειραματικό σχεδιασμό επιλέγεται για να είναι ο ίδιος για να βοηθήσει στην επιλογή της κατάλληλης ορθογώνιας σειράς.

Έτσι, θα έχουμε:

- α: αριθμός παραγόντων ελέγχου και
- β: αριθμός επιπέδου τιμών

Στη παρούσα εργασία επιλέγουμε πέντε (5) παραμέτρους ελέγχου και τρία (3) όμοια κατανεμημένα επίπεδα τιμών. Η ορθογώνια σειρά που χρησιμοποιήσαμε είναι η L36 όπου πραγματοποιούνται 36 πειράματα για διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών των πέντε (5) παραμέτρων. Για περισσότερες πληροφορίες ανατρέξτε στο 4^ο κεφάλαιο.

2.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI

▪ Πλεονεκτήματα

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

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

Παραδείγματος χάριν, μια διαδικασία με 8 μεταβλητές, κάθε μια με 3 επίπεδα τιμών, θα απαιτούσε 6561 πειράματα για να εξετάσει όλες τις μεταβλητές. Εντούτοις χρησιμοποιώντας τις ορθογώνιες σειρές Taguchi, μόνο 18, 27, 36 κτλ πειράματα είναι απαραίτητα, ανάλογα με την ορθογώνια σειρά που επιλέγεται (L18, L27, L36, κτλ).

▪ Μειονεκτήματα

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

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

2.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ (ΑΝΟΒΑ)

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

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

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

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

Παρακάτω, αναλύουμε τα βήματα της μεθόδου ANOVA

Υπολογίζουμε πρώτα το διορθωτικό παράγοντα (ΔΠ) ως εξής:

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

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

$$\text{OAT} = \sum y_i^2 - \Delta\Pi$$

- Για τις κύριες επιδράσεις έχουμε:

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

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

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

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

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

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

$$MAT_A = \frac{AT_A}{\beta\epsilon_A}$$

- Για το υπόλοιπο έχουμε:

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

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

με βαθμούς ελευθερίας υπολοίπου:

$$\beta\epsilon_Y = \beta\epsilon_{ολ} - \beta\epsilon_A - \beta\epsilon_B - \dots$$

όπου:

$$\beta\epsilon_{ολ} = n - 1$$

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

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

όπου:

n είναι ο αριθμός των πειραματικών δοκιμών και

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

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

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

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

$$AT_A' = AT_A - \beta_{ε_A} \cdot MAT_Y$$

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

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

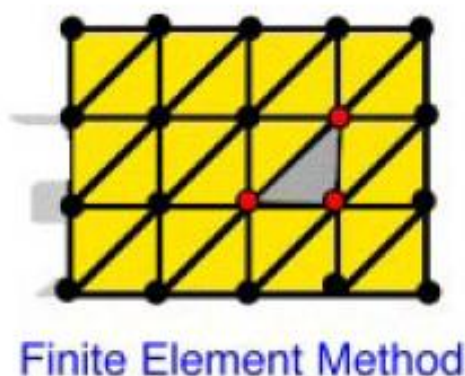
Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων ετών στη Μηχανολογία οφείλεται, χωρίς αμφιβολία, στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους επιμέρους τομείς της. Σε σχέση με τις κατασκευαστικές επιστήμες, η δυνατότητα “απεικόνισης” της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή,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

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

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

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

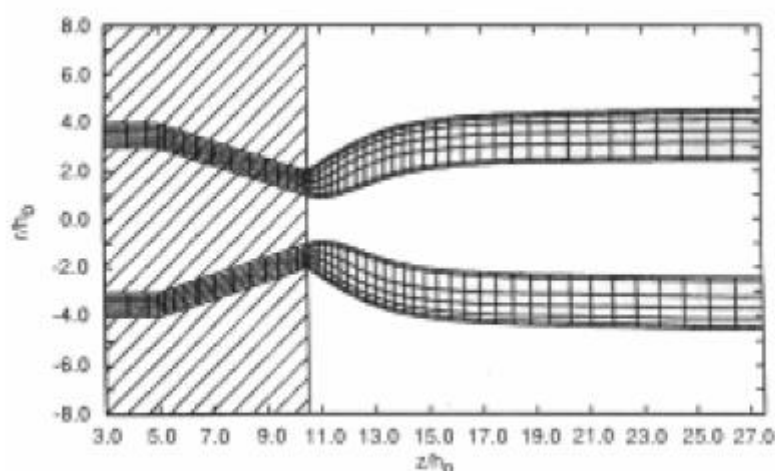
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά νέα τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση των προβλημάτων ροής ρευστών. Έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής στη δεκαετία του '60 μαζί με την εμφάνιση των ψηφιακών υπολογιστών τσέπης, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει γίνει η βάση για τα πιο εμπορικά δομικά δυναμικά προγράμματα και προγράμματα προσομοίωσης ροής ρευστών. Η FEM είναι μια μέθοδος με περιοχές στην οποία ολόκληρη η γεωμετρία που μοντελοποιείται πρέπει να διαχωρίζεται στους κόμβους και τα στοιχεία. Το πλέγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 αντιπροσωπεύει τον διαχωρισμό που απαιτείται ώστε να μοντελοποιηθεί μια δισδιάστατη γεωμετρία με την FEM.



Σχήμα 3.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

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

Εντούτοις, η FEM χρησιμοποιείται εκτενώς κατά τη προσομοίωση διαδικασιών που δεν είναι καθόλου γραμμικές όπως η ροή των ιξωδοελαστικών υλικών. Παραδείγματος χάριν, στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η προβλεφθείσα διόγκωση κατά την εξώθηση του HDPE διαμέσου μιας συγκλίνουσας μήτρας. Ο Mitsoulis πρόβλεψε τη ροή διάφορων υλικών μέσω μητρών διαφορετικής γεωμετρίας χρησιμοποιώντας το μοντέλο K-BKZ. Τα αριθμητικά αποτελέσματά του προέκυψαν δεν αποκλίνουν σημαντικά από τα πειραματικά.



Σχήμα 3.2 Προβλεφθείσα διόγκωση κατά την εξώθηση του HDPE διαμέσου μιας συγκλίνουσας μήτρας.

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

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

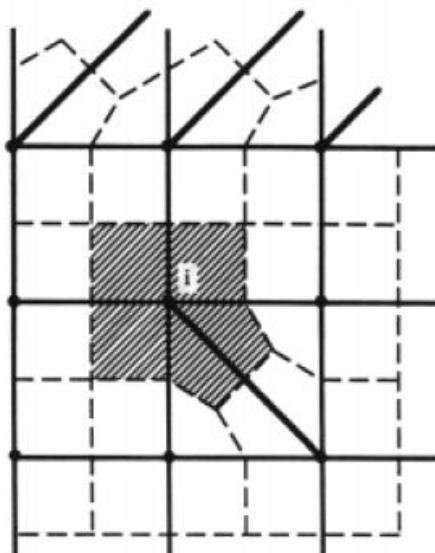
Οι Tadmor, Broyer και Gutfinger χρησιμοποίησαν μια χωρική διαμόρφωση πεπερασμένων διαφορών για να επιλύσουν δισδιάστατα προβλήματα ροής σε γεωμετρικά σύνθετες μορφές. Χρησιμοποιώντας μια Hele-Shaw διατύπωση για να προσομοιώσουν την ροή, η μέθοδος τους είναι εφαρμόσιμη σε ροές σε στενά διάκενα μεταβλητού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

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

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

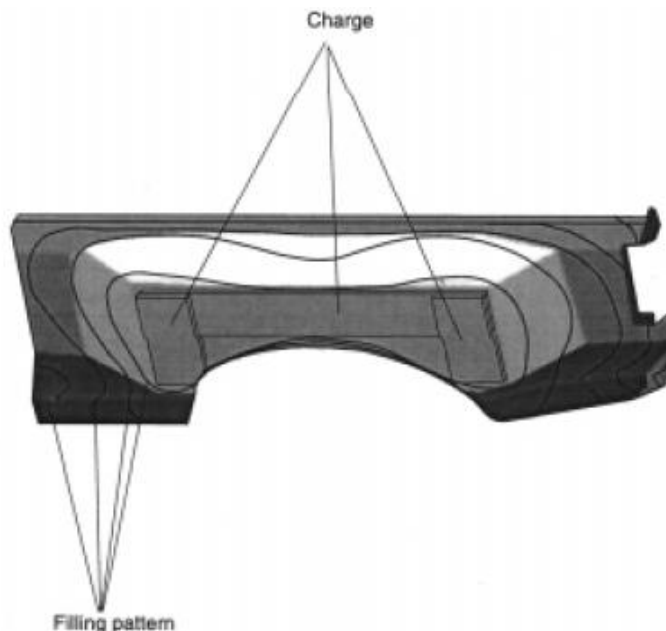
Μια χαρακτηριστική διαμόρφωση των στοιχείων και του κομβικού ελέγχου όγκου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3. Στο σχέδιο οι συνεχόμενες γραμμές δηλώνουν πλευρές στοιχείων και οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα όρια ελέγχου όγκου. Το διαγραμμισμένο τμήμα αναπαριστά τον όγκο ελέγχου για τον κόμβο i . Αυτή η τεχνική παραμένει ο κυρίαρχος τρόπος διαμόρφωσης της μοντελοποίησης διαδικασιών πλήρωσης μητρών όπως η συμπίεση και η έγχυση σε καλούπια.

Τα εμπορικά διαθέσιμα πακέτα λογισμικού χρησιμοποιούν στο σύνολο τους αυτήν την τεχνική για να περιγράψουν τα μέτωπα της ροής κατά τη διάρκεια της πλήρωσης μητρών. Σαν παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4 ένα σχέδιο πλήρωσης μητρών κατά τη πλήρωση με συμπίεση ενός κομματιού SMC που αναπαριστάται με το πλέγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η κατανομή και ο προσανατολισμός των ινών μέσα στο φορμαρισμένο με συμπίεση τμήμα του προφυλακτήρα (φερό) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4 και Σχήμα 3.5.

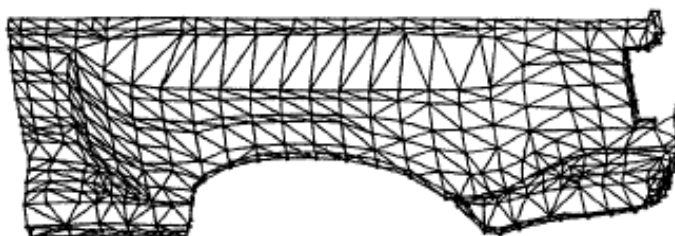


Σχήμα 3.3 Διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων/ όγκου ελέγχου

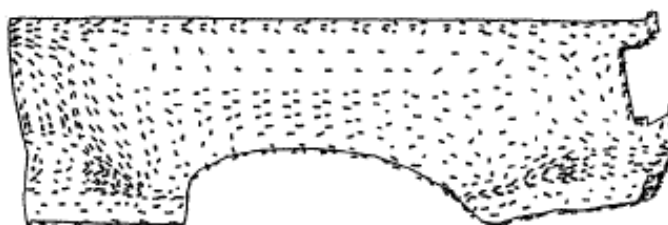
Τα προγράμματα προσομοίωσης πλήρωσης μητρών παρουσιάζουν συμφωνία σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά αποτελέσματα. Απαιτείται ακόμα μεγάλη έρευνα για την πρόβλεψη της πλήρωσης μητρών με έγχυση πολύ λεπτών προϊόντων. Δεδομένου ότι η βιομηχανία μειώνει συνεχώς το πάχος των προϊόντων, αυτό το ζήτημα παραμένει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



Σχήμα 3.4 Προσομοίωση του σχεδίου πλήρωσης με συμπίεση μητρών κατά τη διάρκεια της σχηματοποίησης ενός φτερού SMC αυτοκινήτου



Σχήμα 3.5 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων φτερού αυτοκινήτου

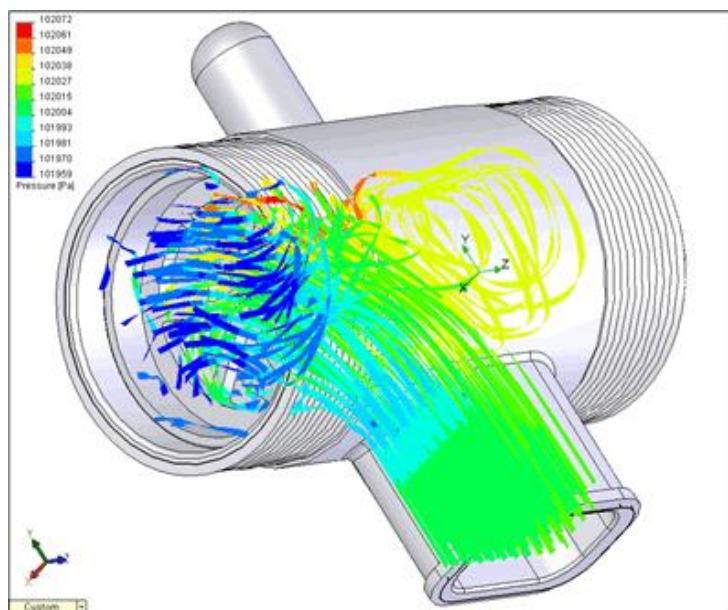


Σχήμα 3.6 Πρόβλεψη προσανατολισμού των ινών κατά την πλήρωση με συμπίεση της μήτρας του φτερού αυτοκινήτου

3.3 SOLIDWORKS

Το λογισμικό SolidWorks είναι ένα **ολοκληρωμένο λογισμικό CAD–CAE–CAM–Flow** το οποίο είναι προσανατολισμένο κυρίως στο τομέα του ολοκληρωμένου σχεδιασμού μηχανημάτων και ενδείκνυται τόσο για **δισδιάστατα** (2D) όσο και για **τριδιάστατα** (3D) σχέδια αλλά και στην εναλλαγή μεταξύ τους. Οι δυνατότητες του λογισμικού είναι πάρα πολλές, μερικές από τις οποίες είναι:

- Μοντελοποίηση εξαρτημάτων και συναρμολογημάτων με αποτελεσματικότητα.
- Αυτόματη δημιουργία κατασκευαστικών σχεδίων.
- Προσομοίωση ρεαλιστικής μετάδοσης κίνησης και μηχανικών αλληλεπιδράσεων.
- **Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων** με το πρόσθετο: CosmosWorks.
- **Προσομοίωση ροής ρευστού** με το πρόσθετο: Flow Simulation.
- Έχει ενσωματωμένα εργαλεία:
 - τυποποιημένων **μηχανολογικών εξαρτημάτων** (ρουλεμάν, τροχοί, κοχλίες κτλ).
 - **συγκολλήσεων** και μεταλλικών κατασκευών.
 - σχεδίασης μεταλλικών επιφανειών (Sheet Metal).
 - σχεδίασης **καλουπιών**.

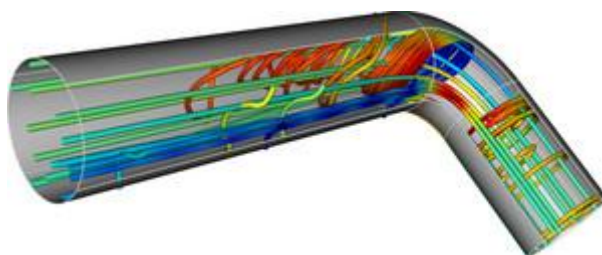


Σχήμα 3.7 Ανάλυση ροής ρευστού με Solidworks Flow Simulation

3.4 COMSOL

Το λογισμικό της Comsol Multiphysics διαθέτει εξειδικευμένα επιπρόσθετα εργαλεία για διάφορους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας όπως είναι τα Φαινόμενα Μεταφοράς που αφορούν στην ανάλυση φαινομένων μεταφοράς και χημικών αντιδράσεων, στη σύζευξη φαινομένων μεταφοράς μάζας, ενέργειας και ορμής. Επιπλέον συνδράμει στη μελέτη γεωφυσικών και περιβαλλοντολογικών προβλημάτων αφού περιλαμβάνονται εξειδικευμένες εξισώσεις για φαινόμενα μεταφοράς σε πορώδη υλικά (**Γεωφυσικές** Επιστήμες , Earth Science Module) καθώς και στην ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, στην προσομοίωση πεδίων, εντάσεων και κυμάτων **Ηλεκτρομαγνητισμός**.

Επίσης παρέχει εξειδικευμένη ανάλυση για την μετάδοση θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Περιλαμβάνονται εξισώσεις για μη ισοθερμική ροή, φαινόμενα μεταφοράς σε λεπτά στρώματα και κελύφη και βιοθερμικά φαινόμενα (**Μετάδοση** Θερμότητας) και τέλος προσφέρει δυνατότητα μοντελοποίησης των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα και μικρο – ροϊκά στοιχεία και συσκευές. Περιλαμβάνει μεταξύ άλλων θερμικά φαινόμενα σε μηχανολογικά συστήματα, συστήματα μικρο-ροής, εφαρμογές σε αισθητήρες και τελικά στοιχεία ελέγχου (**Ηλεκτρομηχανολογικά** συστήματα) ενώ παρέχει εξειδικευμένη δυναμική και στατική ανάλυση κατασκευών και σύζευξη με θερμικά, ροϊκά και άλλα φυσικά φαινόμενα (**Δομική** Μηχανική).



Σχήμα 3.8 Ανάλυση ροής ρευστού σε λυγισμένο σωλήνα με Comsol Multiphysics

Με το Comsol είναι δυνατόν να επιλυθούν προβλήματα φαινομένων μεταφοράς (ρεολογίας - μεταφοράς ορμής, μεταφοράς θερμότητας και μεταφοράς μάζας), προβλήματα ηλεκτρομαγνητισμού και οπτικής, προβλήματα στατικής και δυναμικής των κατασκευών και ακουστικής, προβλήματα χημικού μηχανικού αλλά και σύνθετα προβλήματα αλληλεπίδρασης ρευστών με κατασκευές, ακόμα και προβλήματα που αφορούν μικρο-νανοσυστήματα. Στην ουσία το Comsol επιλύει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν ένα συγκεκριμένο φαινόμενο για τις συγκεκριμένες αρχικές-οριακές συνθήκες που έχουμε θέσει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.1 ΣΤΟΧΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, ένα από τα βασικότερα προβλήματα της παραγωγικής διαδικασίας πλαστικού σωλήνα με μήτρα που φέρει κεφαλή αράχνης, είναι η ύπαρξη ανωμαλιών στην επιφάνεια του τελικού προϊόντος. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη των ποδιών της αράχνης που επιβαρύνει το πεδίο ταχύτητας εξόδου του ρευστού από την μήτρα. Στόχος μας είναι να εντοπίσουμε τον βαθμό επίδρασης της **γεωμετρίας των ποδιών της αράχνης** στην **ταχύτητα εξόδου** του ρευστού και να **βελτιστοποιήσουμε** τις τιμές των παραμέτρων αυτών (γεωμετρία ποδιού αράχνης) έτσι ώστε να λάβουμε την ομαλότερη το δυνατόν ροή εξόδου του πολυμερούς.

Σαν μεταβλητή εξόδου βελτιστοποίησης της ροής, λαμβάνουμε τον λόγο των μέσων τιμών προς τυπικών αποκλίσεων των ταχυτήτων και θερμοκρασιών του πολυμερούς στην έξοδο από την μήτρα, τον οποίο θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε. Περισσότερες πληροφορίες όσων αφορά την ακριβή αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιήσουμε παρουσιάζονται στη παράγραφο 5.2.

Από προηγούμενες μελέτες που έχουν γίνει έχει παρατηρηθεί ότι το μήκος εξόδου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ομαλότητα της ροής και την ποιότητα του ρευστού στην έξοδο. Όπως αναφέρουμε στην παράγραφο 4.4, το μήκος εξόδου θα ληφθεί σταθερό και ίσο με 24 mm.

Επίσης, θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα των πειραμάτων με τη μέθοδο ανάλυσης της διασποράς, ANOVA (παράγραφος 2.8) όπου θα προσδιορίσουμε την επίδραση των παραγόντων στην έξοδό μας.

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

Το πολυμερές το οποίο διαμορφώνεται στην μήτρα επιλέγεται να είναι το πολυαιθυλένιο, λόγω της ευρείας χρήσης του στην βιομηχανία, με ιδιότητες που φαίνονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 4.1):

- **Ιδιότητες πολυαιθυλενίου**

Μη Νευτώνειο ρευστό	
Πυκνότητα (Kg/m ³)	750
Μέγιστο δυναμικό ιξώδες (Pa·s)	565
Ελάχιστο δυναμικό ιξώδες (Pa·s)	364

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες πολυαιθυλενίου

4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΕΚΒΟΛΕΑ

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες της ροής είναι :

- Αρχικές συνθήκες ροής

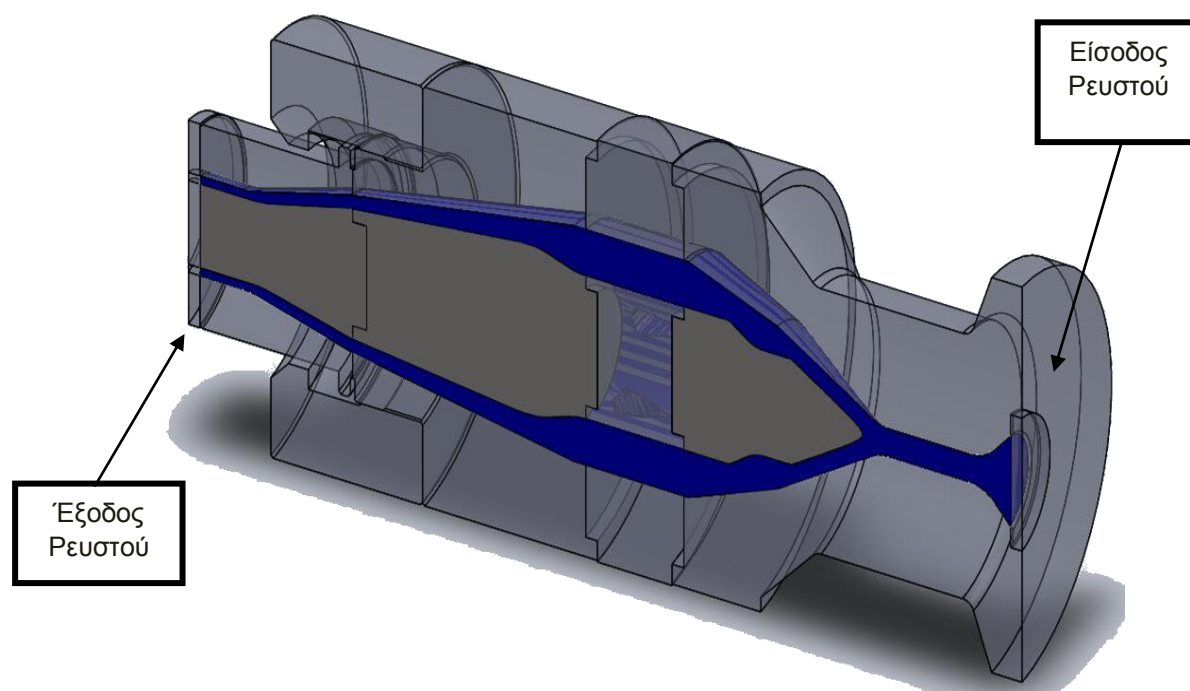
Θερμοκρασία (°C)	196
Πίεση (bar)	1,013 (ατμοσφαιρική)

Πίνακας 4.2 Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης ροής

- Οριακές συνθήκες ροής

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

Πίνακας 4.3 Οριακές συνθήκες προσομοίωσης ροής

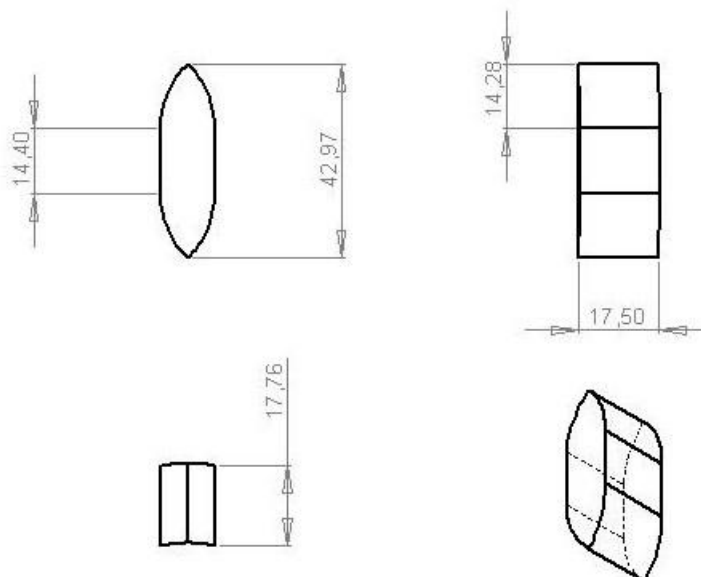


Σχήμα 4.1 Είσοδος –Έξοδος ρευστού από την μήτρα

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

4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ

Η γεωμετρία του ποδιού της αράχνης στην μήτρα εκβολής που θα βελτιστοποιήσουμε φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.2):



Σχήμα 4.2 Πόδι αράχνης

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

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

Ο κώδικας που βρίσκεται στο παράρτημα Γ, (Κώδικας 1) συντάχθηκε με την βοήθεια του λογισμικού Matlab και μας βοηθάει να σχεδιάσουμε καμπύλες spline τρίτου βαθμού εισάγοντας τα παραπάνω δεδομένα της επιλογής μας.

Στη συνέχεια εισάγονται αυτές οι καμπύλες στο λογισμικό SolidWorks και σχεδιάζονται τα πόδια της αράχνης που ακολουθούν την γεωμετρία της spline. Λεπτομερέστερα τα παραπάνω περιγράφονται στην παράγραφο 4.7 του παρόντος κεφαλαίου.

4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Αμέσως παρακάτω παραθέτουμε τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τη διπλωματική εργασία του φοιτητή της σχολής των μηχανολόγων μηχανικών, Δήμου Νικόλαο, με θέμα «Τρισδιάστατη προσομοίωση εκβολής πλαστικού σωλήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)», όπου χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας L27 του Taguchi και στην οποία έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης του μήκους εξόδου της μήτρας εκβολής και της γεωμετρίας του ποδιού της αράχνης (Πίν. 4.4).

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	0,037591	0,015877	470,4897	0,525552	657,1750965
2	0,037617	0,015885	470,49	0,524435	658,218611
3	0,037588	0,01587	470,491	0,524952	660,9626267
4	0,037164	0,015769	470,4402	0,508898	488,5414394
5	0,037203	0,015737	470,4416	0,510385	481,8893013
6	0,037176	0,015738	470,4453	0,508863	512,7032524
7	0,036933	0,015744	470,4279	0,495508	613,4156063
8	0,036898	0,015731	470,4279	0,495588	556,28885
9	0,036872	0,01572	470,4273	0,494146	570,5566958
10	0,029895	0,012831	470,3099	0,469994	596,6195595
11	0,029884	0,012829	470,3098	0,46981	560,5652339
12	0,029876	0,012808	470,3111	0,468383	596,7528409
13	0,029472	0,012736	470,2891	0,460693	609,5130884
14	0,029465	0,012704	470,2886	0,458494	607,7444394
15	0,029392	0,012654	470,2887	0,457186	610,0021959
16	0,029826	0,012745	470,3323	0,474622	575,6504217
17	0,029891	0,012765	470,3283	0,474576	556,8798776
18	0,029862	0,012723	470,337	0,47207	574,5632692
19	0,024163	0,010575	470,1704	0,423828	490,0137508
20	0,024279	0,010562	470,1732	0,421275	523,2554083
21	0,024176	0,010502	470,174	0,420554	464,7613337
22	0,024551	0,010649	470,2192	0,430899	621,6459479
23	0,024663	0,010694	470,2168	0,432634	606,5597464
24	0,024514	0,010644	470,2161	0,434705	590,0427025
25	0,024573	0,0106	470,2021	0,424242	558,0229761
26	0,024591	0,010609	470,2024	0,424209	562,3538691
27	0,024531	0,01059	470,2035	0,424736	512,1524988

Πίνακας 4.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του πίνακα L27

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω πίνακα, θα χρησιμοποιήσουμε την αντικειμενική συνάρτηση που έχουμε επιλέξει στην παρούσα εργασία και περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.2, και ορίσαμε ως βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης την **μέγιστη τιμή**. Έτσι, παίρνουμε τον παρακάτω πίνακα (Πίν. 4.5).

A/A ΔΟΚΙΜΗΣ	SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _U)	SNR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _T)	OPTIMUM SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _{U,opt})	OPTIMUM SNR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _{T,opt})	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ OPT = (0,8 · SNR _{U,opt} + 0,2 · SNR _{T,opt})
1	7,486416	59,03869	1,23084	0,977994	1,180271
2	7,487841	59,05717	1,231074	0,9783	1,180519
3	7,489195	59,04863	1,231297	0,978158	1,180669
4	7,44614	59,31747	1,224218	0,982612	1,175897
5	7,473298	59,29215	1,228683	0,982192	1,179385
6	7,466466	59,31817	1,22756	0,982623	1,178572
7	7,405664	59,54885	1,217563	0,986445	1,17134
8	7,404908	59,54745	1,217439	0,986421	1,171236
9	7,405055	59,57274	1,217463	0,98684	1,171339
10	7,346862	60,00584	1,207896	0,994015	1,165119
11	7,34492	60,00924	1,207576	0,994071	1,164875
12	7,356505	60,03568	1,209481	0,994509	1,166487
13	7,287439	60,17907	1,198126	0,996884	1,157878
14	7,307059	60,22061	1,201352	0,997572	1,160596
15	7,320193	60,24542	1,203511	0,997983	1,162406
16	7,384782	59,92113	1,21413	0,992611	1,169826
17	7,390587	59,92191	1,215084	0,992624	1,170592
18	7,410802	59,96806	1,218408	0,993389	1,173404
19	7,177691	60,90132	1,180082	1,008849	1,145836
20	7,229923	60,95385	1,18867	1,009719	1,15288
21	7,242287	60,96873	1,190703	1,009965	1,154555
22	7,25511	60,75851	1,192811	1,006483	1,155545
23	7,257693	60,72355	1,193236	1,005904	1,155769
24	7,246368	60,68206	1,191373	1,005216	1,154142
25	7,303517	60,89343	1,200769	1,008718	1,162359
26	7,301934	60,8941	1,200509	1,008729	1,162153
27	7,29604	60,88334	1,19954	1,008551	1,161342

Πίνακας 4.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων του πίνακα L27

Οι ακριβείς παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στον αμέσως παρακάτω πίνακα (Πίν. 4.6), ενώ ο αμέσως επόμενος πίνακας (Πίν. 4.7), μας δείχνει τον πίνακα L27 με τις τιμές των παραμέτρων.

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

Πίνακας 4.6 Παράμετροι βελτιστοποίησης

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

Πίνακας 4.7 L27 του πίνακα Taguchi του πειράματος

Μια πρώτη εκτίμηση για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνεται από τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης OPT. Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα (Πίν. 4.8), οι τιμές αυτές είναι:

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΑΧ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ OPT	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ					
		L	Y	X	f	a	b
3	1,180669	24	9	30	0,1	10	10

Πίνακας 4.8 Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων του L27

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ANOVA, υπολογίζουμε τους λόγους συμβολής των παραμέτρων και τους παρουσιάζουμε στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 4.9).

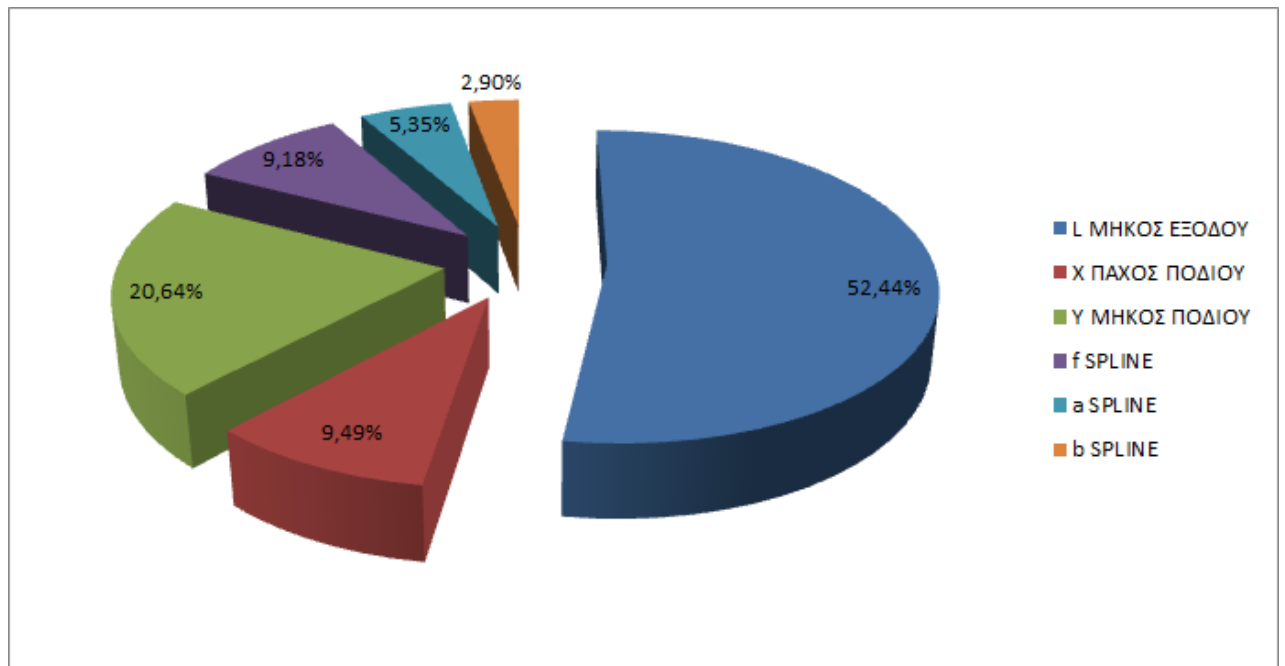
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ	
L	ΜΗΚΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (mm)	52,44%	52,44%
Y	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	9,49%	47,56%
X	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ (mm)	20,64%	
f	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE	9,18%	
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5,35%	
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	2,90%	

Πίνακας 4.9 Λόγοι συμβολής των παραμέτρων

Από τα παραπάνω, παρατηρούμε ότι 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: $L_{OPT} = 24 \text{ mm}$.

Στόχος βελτιστοποίησης της παρούσας μελέτης είναι η γεωμετρία του ποδιού της αράχνης, η οποία μπορεί να αναλυθεί πλήρως από τους πέντε προαναφερθέντες παράγοντες που θα αναλυθούν αμέσως παρακάτω. Σε όλη μας την ανάλυση το μήκος εξόδου της μήτρας εκβολής θα ληφθεί ίσο με **24 mm**.

Παρακάτω παραθέτουμε τα ποσοστά των λόγων συμβολής σε γράφημα Excel, (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Λόγοι συμβολής παραμέτρων σε γράφημα τύπου “πίτας”

Στο κεφάλαιο 1 είδαμε ότι 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, επιλέγουμε τρία όμοια κατανεμημένα επίπεδα τιμών για τις παραμέτρους που θα βελτιστοποιήσουμε. Θα πραγματοποιήσουμε 36 πειράματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

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 4.10 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 4.11 L36 του πίνακα Taguchi για πέντε παραμέτρους

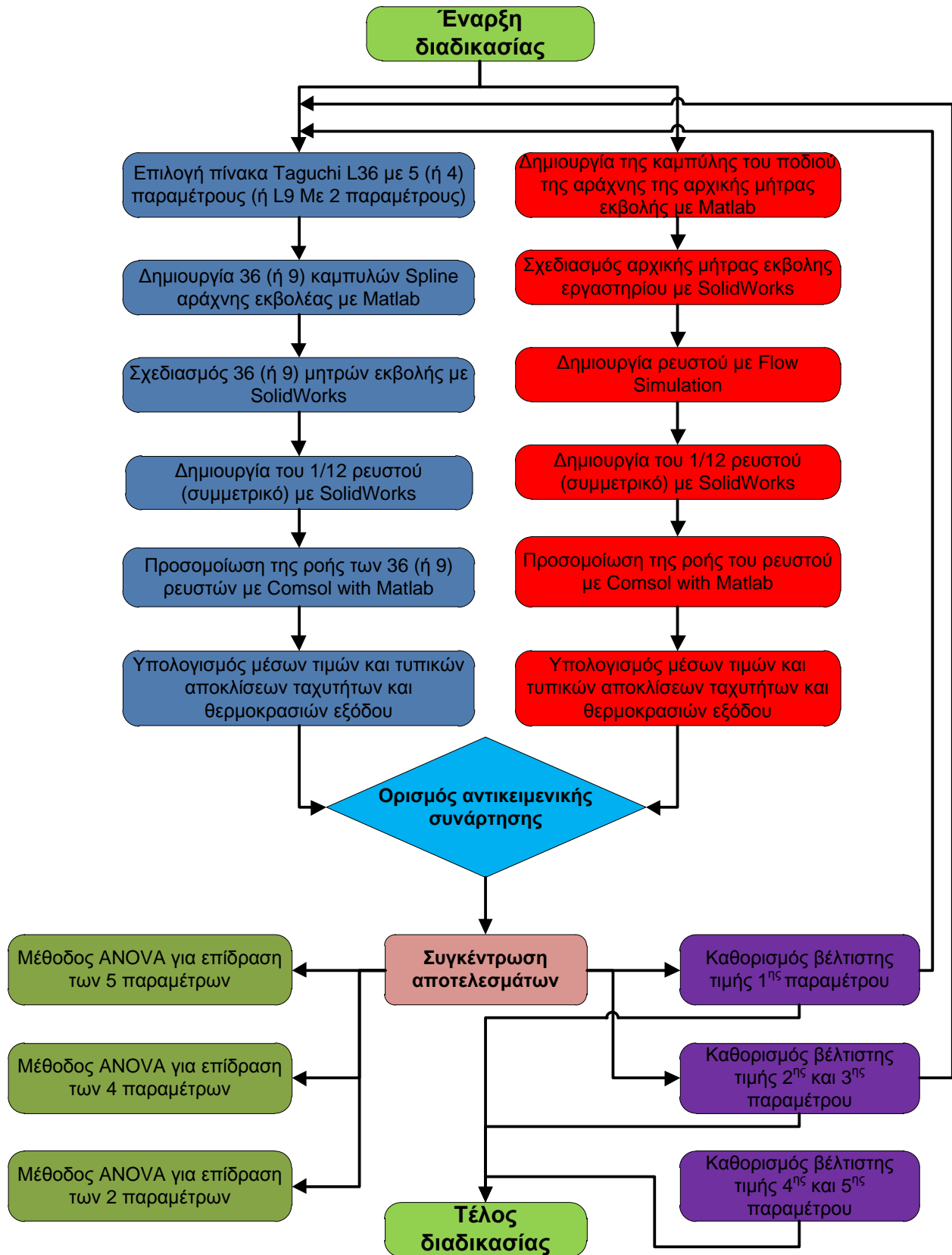
Με αντικατάσταση του πίνακα 4.10 στον πίνακα 4.11 παίρνουμε τις τιμές των 36 πειραμάτων:

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 4.12 L36 του πίνακα Taguchi με τις τιμές των παραμέτρων

Σκοπός μας είναι μετά την εκτέλεση των 36 πειραμάτων, ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης του κάθε πειράματος και η εύρεση της μεγίστης τιμής της, για να μπορέσουμε να ορίσουμε τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.

4.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας

4.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Παρακάτω, θα δείξουμε αναλυτικά την διαδικασία της 1^{ης} προσομοίωσης αναφέροντας τα βήματα εκτέλεσής της:

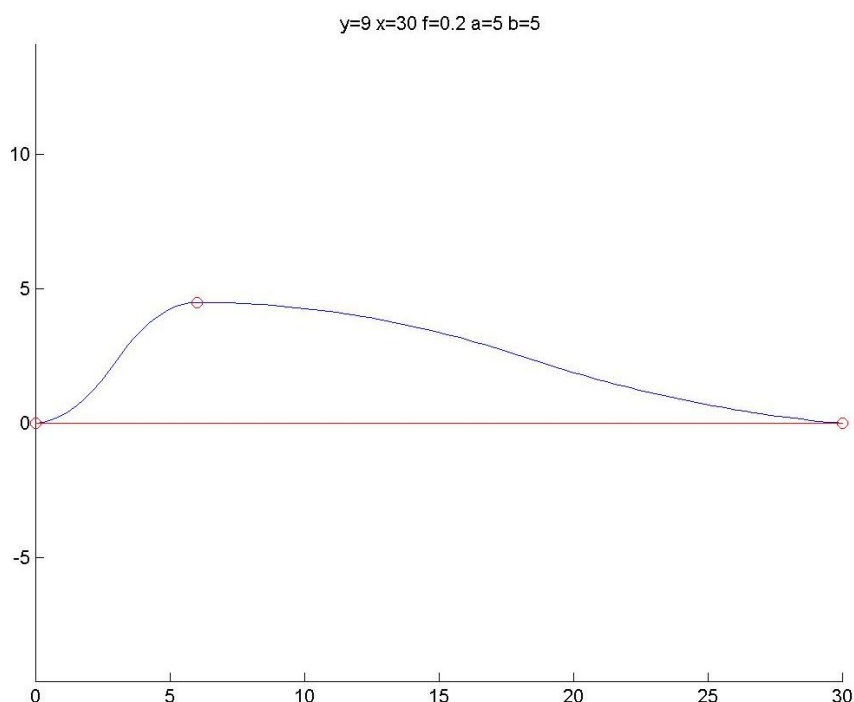
Κατ' αρχήν, ορίζουμε τις τιμές των παραμέτρων της πρώτης προσομοίωσης από την πρώτη γραμμή του πίνακα L36 του Taguchi (Πίν. 4.12). Έτσι, έχουμε:

Υ: Πάχος ποδιού SPIDER (mm)	9
X: Ύψος ποδιού SPIDER (mm)	30
Μέγιστο f καμπύλης SPIDER (%)	0,2
Γωνία εκκίνησης a καμπύλης SPIDER (°)	5
Γωνία τερματισμού b καμπύλης SPIDER (°)	5

Πίνακας 4.13 Τιμές παραμέτρων της 1^{ης} προσομοίωσης

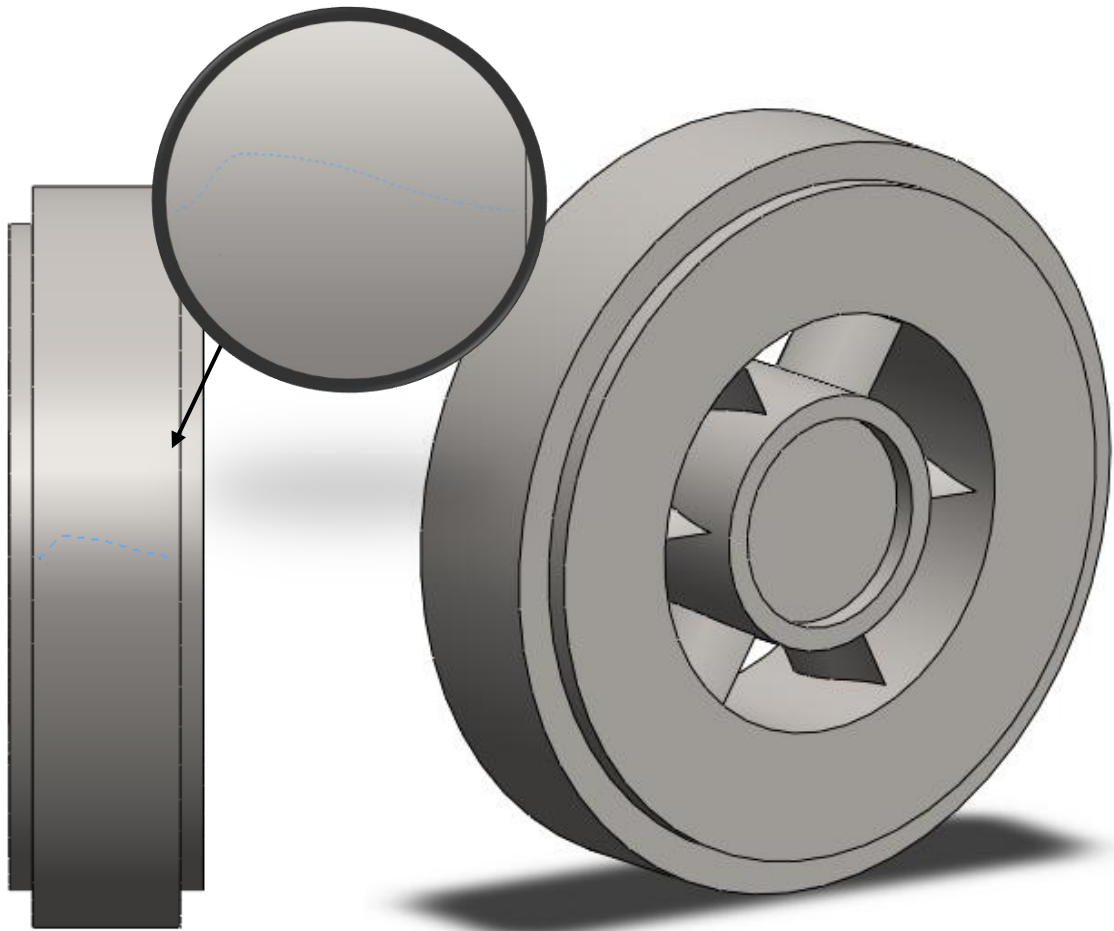
Χρησιμοποιώντας τον κώδικα Matlab του παραρτήματος Δ (κώδικας 1), κατασκευάζουμε την καμπύλη spline της κεφαλής της αράχνης από τις τιμές των πέντε τελευταίων γραμμών του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 4.133) και αποθηκεύουμε τις τιμές της σε αρχείο Excel:

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



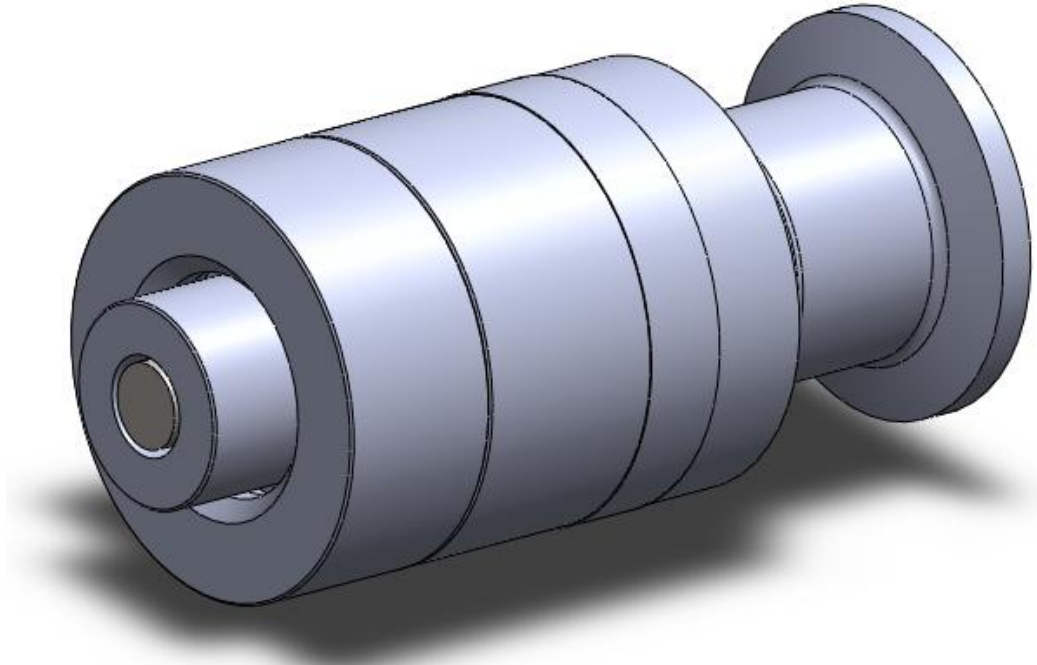
Σχήμα 4.5 Καμπύλη spline της κεφαλής αράχνης της 1^{ης} προσομοίωσης

Με τη βοήθεια του παραρτήματος Α, όπου έχουμε τις πλήρεις διαστάσεις της μήτρας εκβολής του εργαστηρίου, χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks κατασκευάζουμε την κεφαλή της αράχνης, με τη βοήθεια των τιμών της καμπύλης spline. Έτσι, έχουμε:

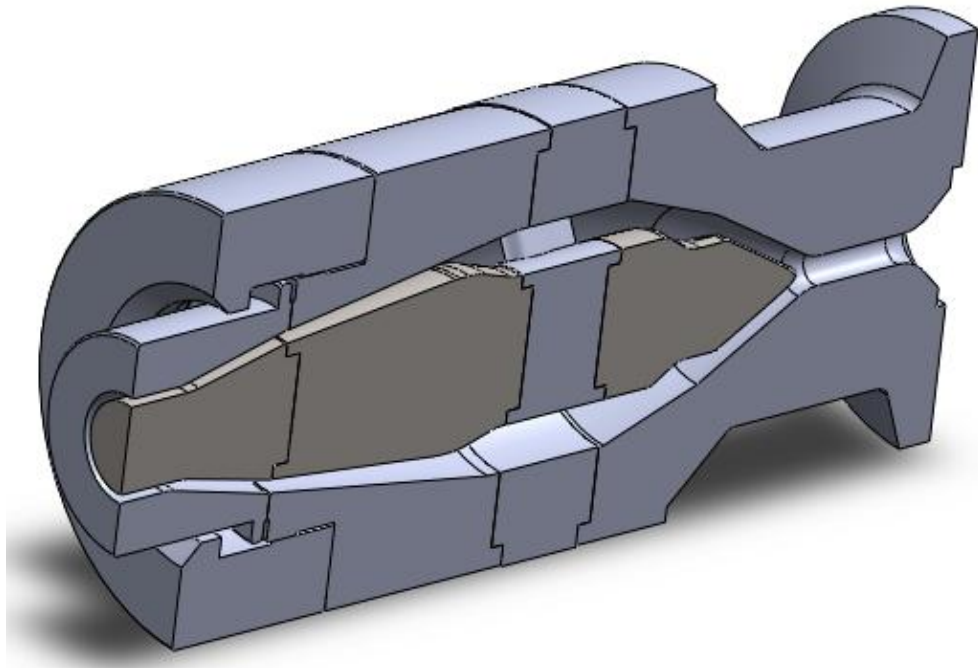


Σχήμα 4.6 Κεφαλής αράχνης της 1^{ης} προσομοίωσης

Στη συνέχεια, κατασκευάζουμε και τα υπόλοιπα μέρη της μήτρας εκβολής, βασιζόμενοι στα κατασκευαστικά σχέδια του παρατήματος Α και τις τιμές των παραμέτρων της 1^{ης} προσομοίωσης (Πίνακας 4.132). Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.7) φαίνεται η μήτρα εκβολής της 1^{ης} προσομοίωσης όπου τα διάφορα μέρη της έχουν συνδεθεί με την βοήθεια της εντολής assembly ενώ στο αμέσως επόμενο (Σχήμα 4.7) φαίνεται η τομή της.

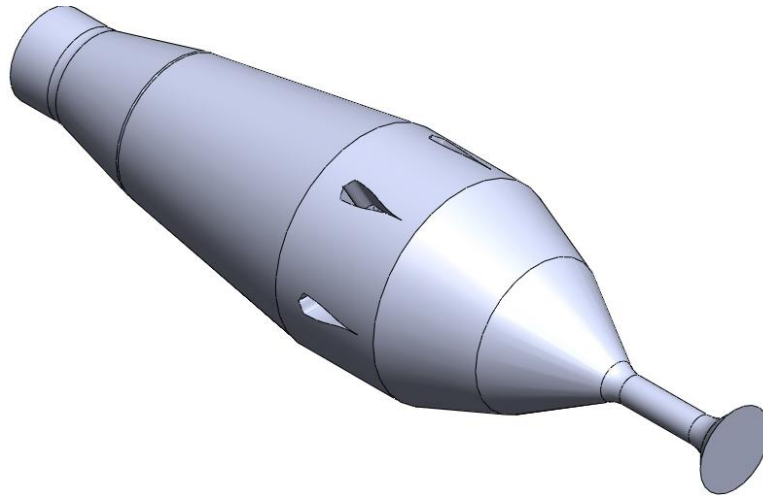


Σχήμα 4.7 Μήτρα εκβολής της 1^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 4.8 Μήτρα εκβολής της 1^{ης} προσομοίωσης σε τομή

Χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks, αλλά και το πρόσθετο Flow Simulation, απομονώνουμε το ρευστό της μήτρας για περαιτέρω μελέτη. Έτσι, έχουμε:



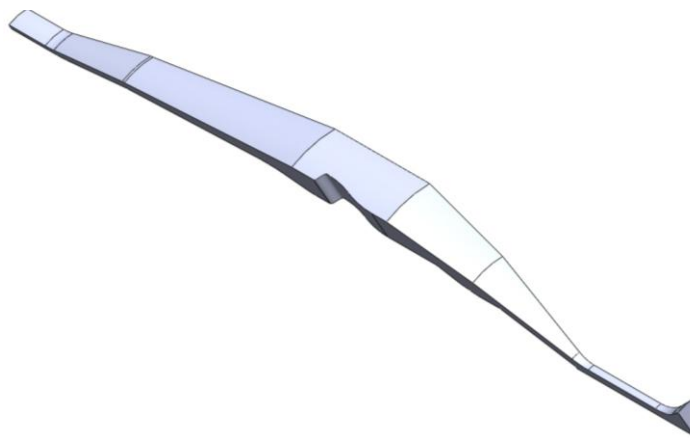
Σχήμα 4.9 Ρευστό της μήτρας εκβολής

Παρατηρούμε ότι στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4.9), ότι τα 6 «πόδια αράχνης» (6 υποστηρίγματα) είναι συμμετρικά τοποθετημένα στον ροϊκό σωλήνα και έχουν συμμετρία στη μορφή.

Άρα, η γωνία συμμετρίας είναι:

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

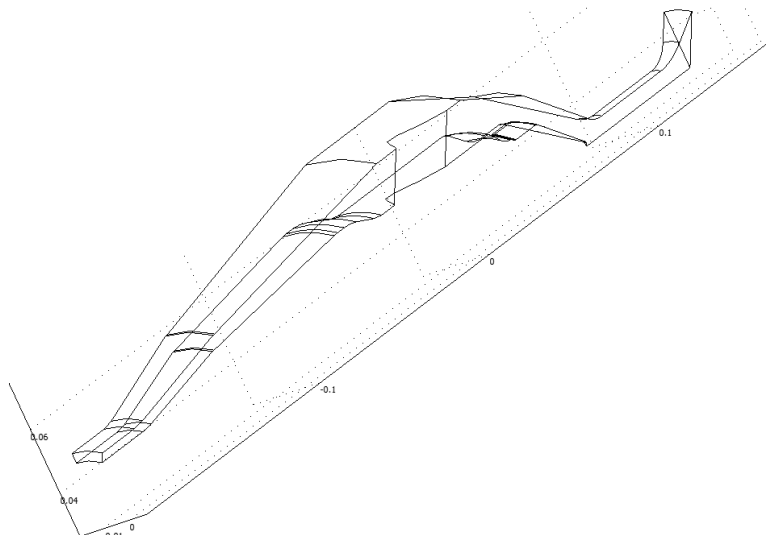
Άρα, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός αυτό και με τη βοήθεια του SolidWorks, να απομονώσουμε το 1/12 του συνολικού κενού χώρου για να συνεχίσουμε την μελέτη του ρευστού.



Σχήμα 4.10 Κενός χώρος της μήτρας εκβολής (ρευστό) “κομμένος” κατά 30°

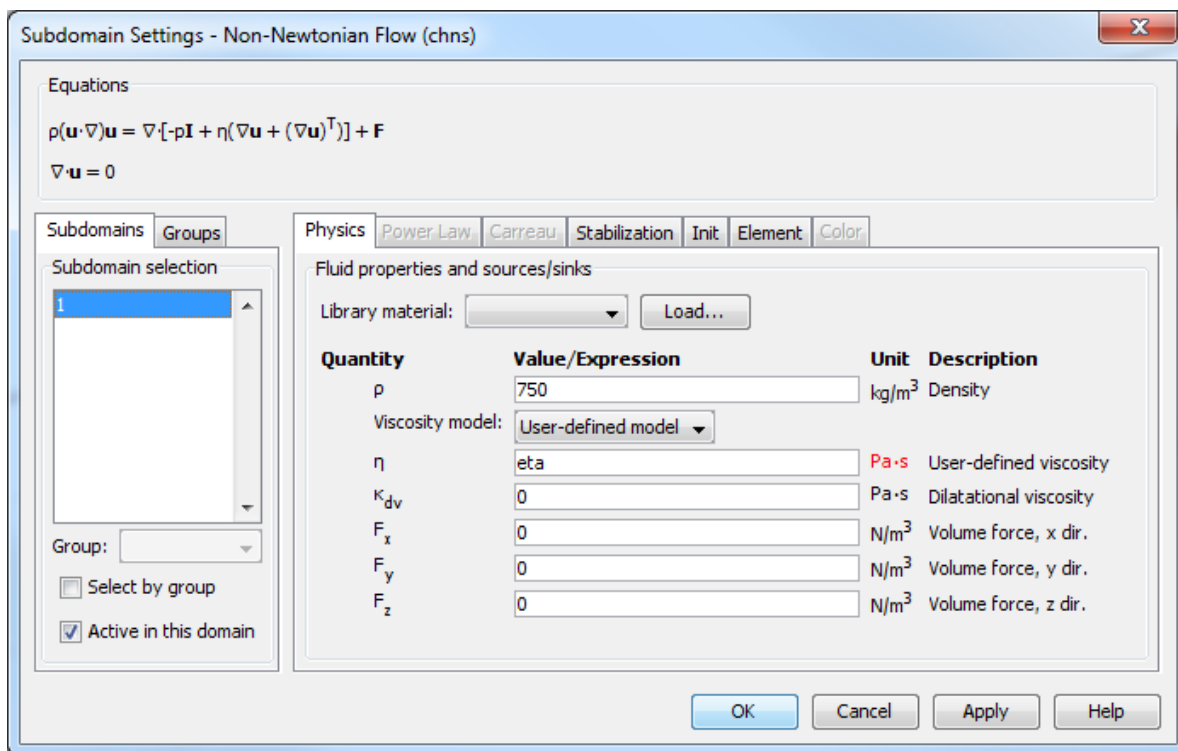
Το μοντέλο αυτό αποθηκεύεται σε μορφή .iges για να εισάγουμε την γεωμετρία του στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Comsol και να το επιλύσουμε.

Στη συνέχεια, εισάγουμε τη γεωμετρία στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Comsol

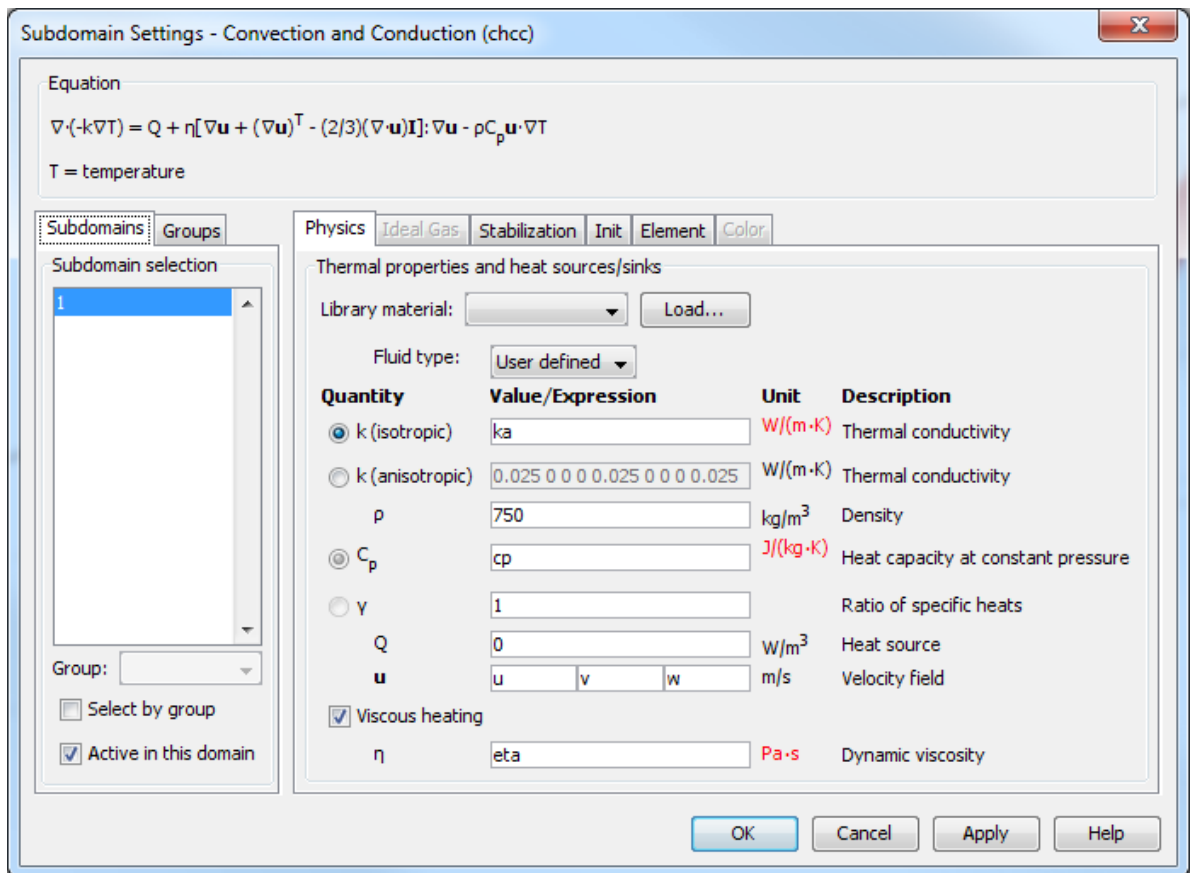


Σχήμα 4.11 Εισαγωγή γεωμετρίας στο Comsol

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

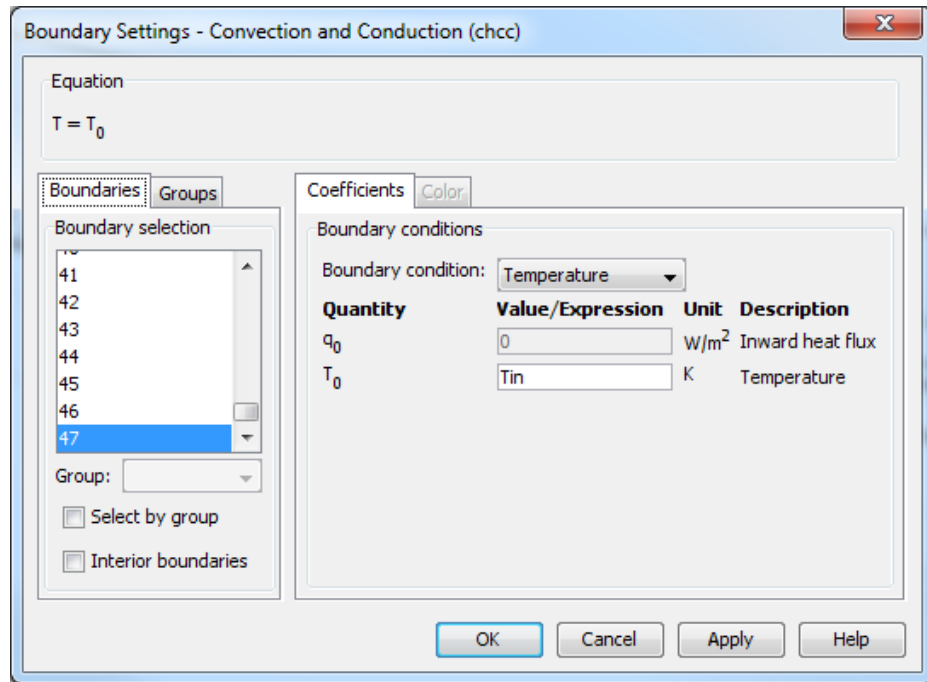


Σχήμα 4.12 Ιδιότητες μη νευτωνικού ρευστού

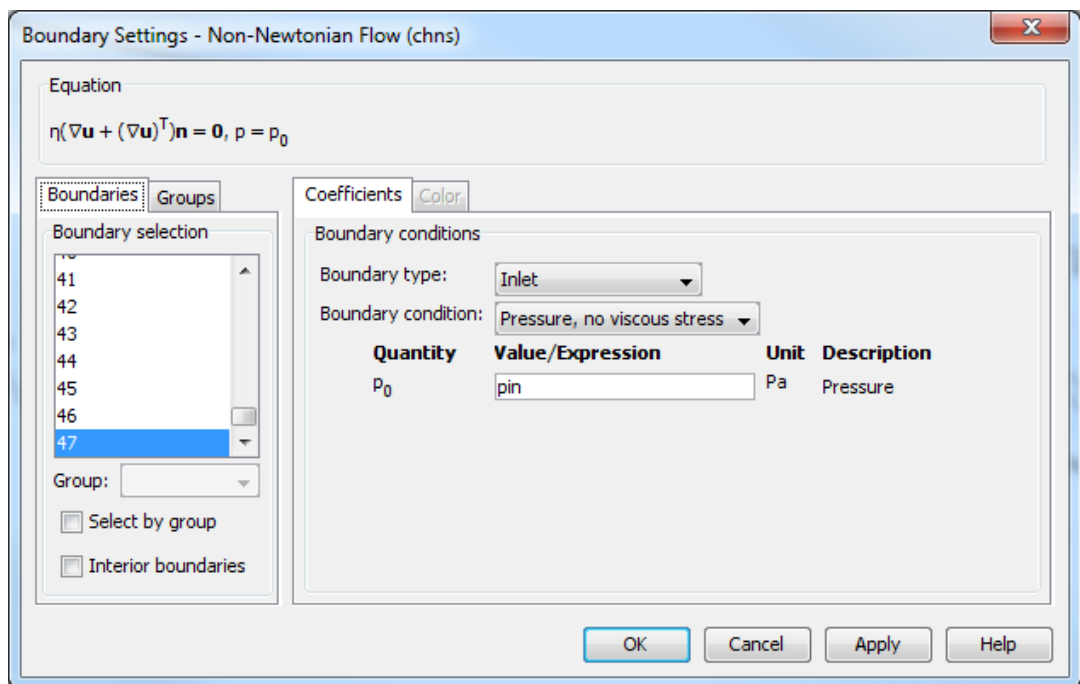


Σχήμα 4.13 Θερμικές ιδιότητες του ρευστού στο πρόβλημα

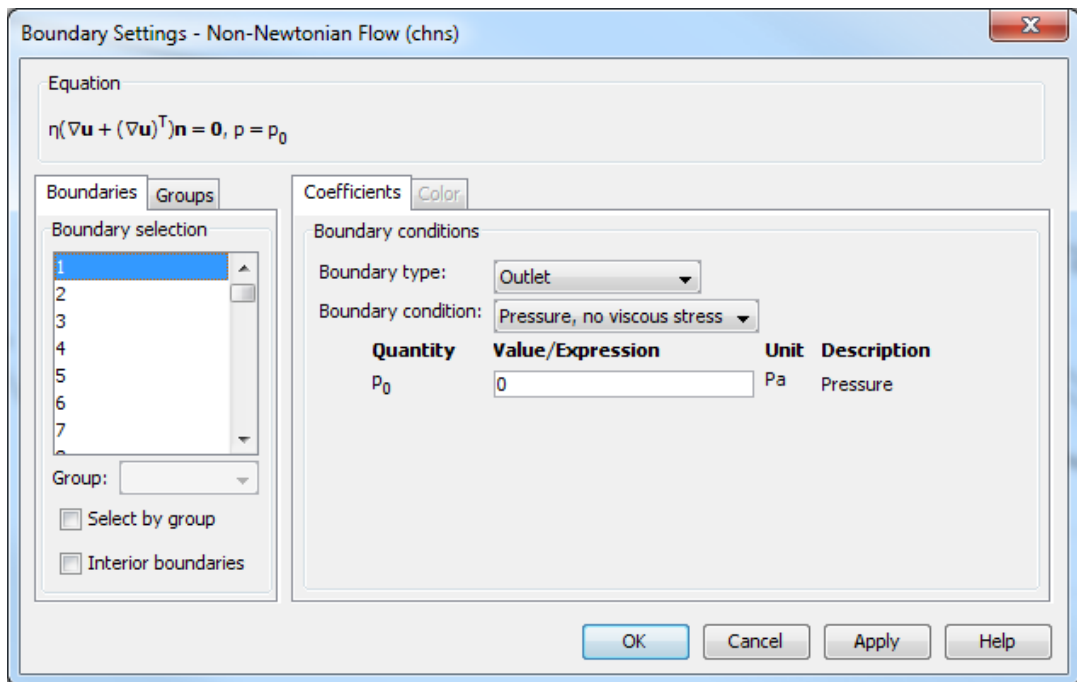
Στη συνέχεια, ορίζουμε τις οριακές συνθήκες στο μοντέλο με παράδειγμα τη θερμοκρασία εισόδου και την πίεση εισόδου και εξόδου. Μια σημαντική οριακή συνθήκη είναι το γεγονός ότι η ταχύτητα ενός ρευστού κοντά σε στερεό τοίχωμα είναι ίση με την ταχύτητα του τοιχώματος. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, επειδή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



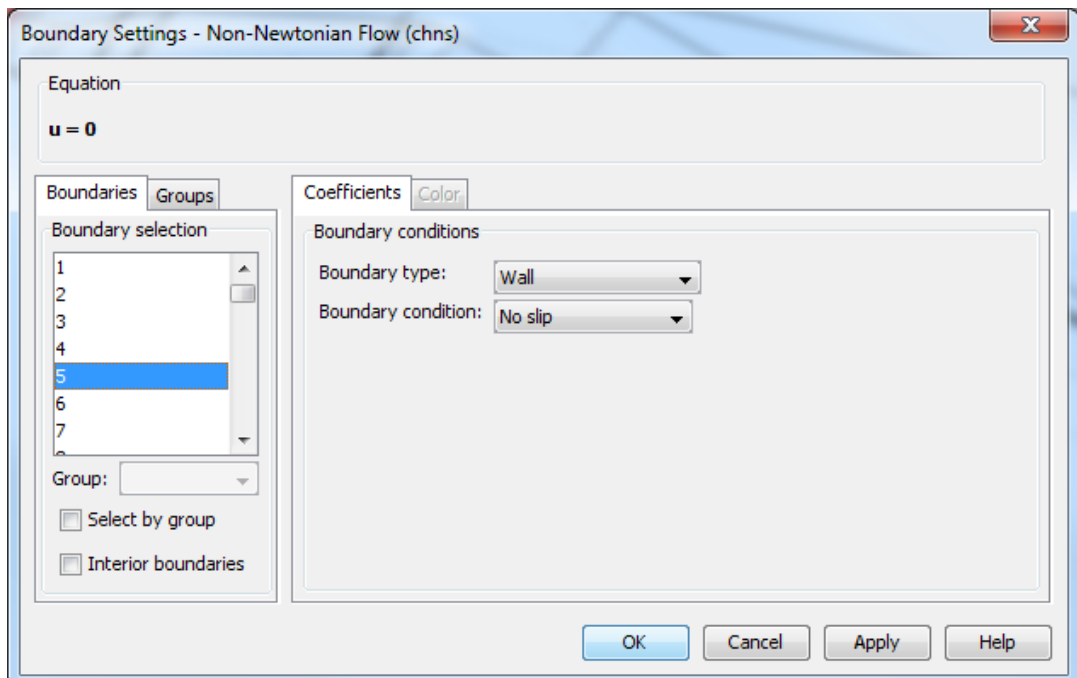
Σχήμα 4.14 Προσδιορισμός θερμοκρασίας εισόδου



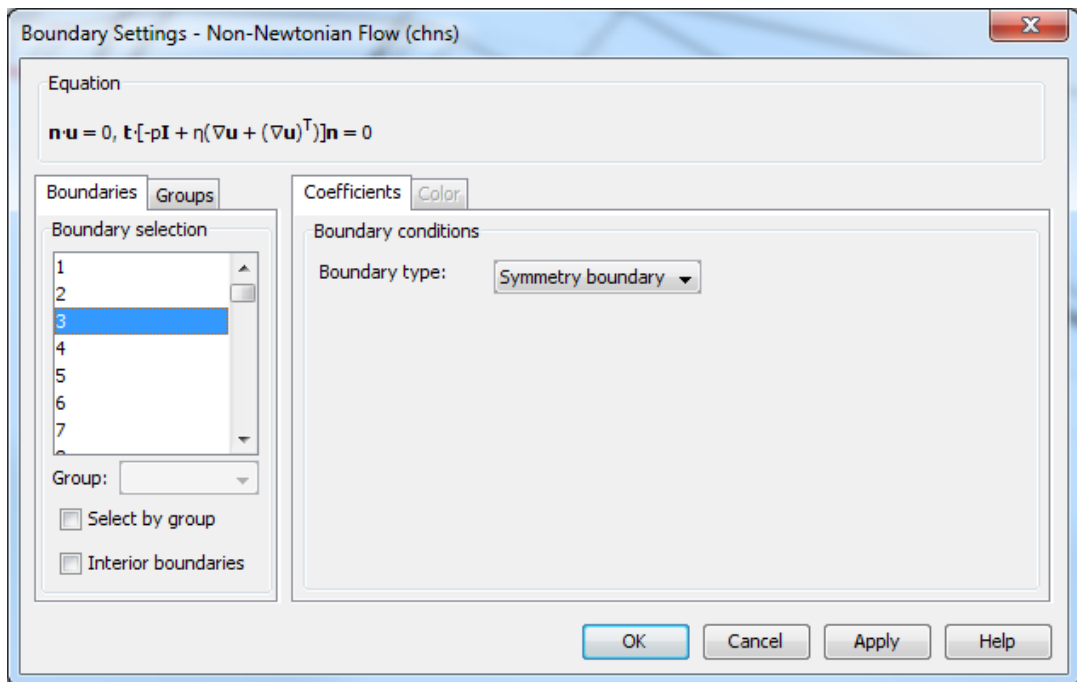
Σχήμα 4.15 Προσδιορισμός πίεσης εισόδου



Σχήμα 4.16 Προσδιορισμός πίεσης εξόδου (μανομετρικές πιέσεις, δηλαδή σχετικές ως προς την ατμοσφαιρική)



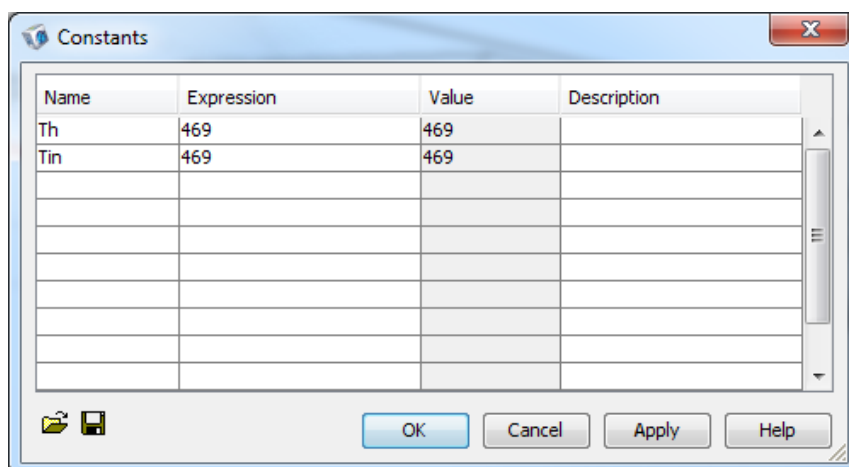
Σχήμα 4.17 Εφαρμογή συνθήκης μη ολίσθησης



Σχήμα 4.18 Εφαρμογή συνθήκης συμμετρίας

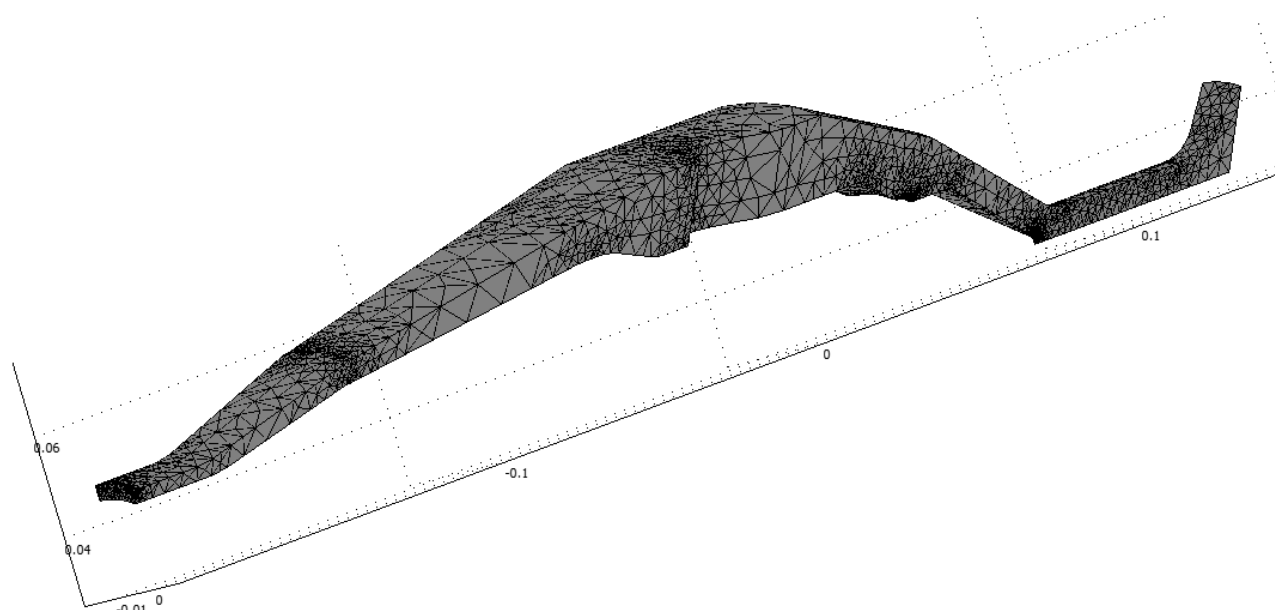
Καθορίζουμε επίσης και ορισμένες σταθερές του προβλήματος, είτε ως αριθμούς, όπως η θερμοκρασία στην είσοδο, είτε με μαθηματικές εκφράσεις που τις περιγράφουν, όπως το ιξώδες ή η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού υπό σταθερή πίεση (c_p) και η ειδική αγωγιμότητα (k_a). Οι δύο τελευταίες θερμοτικές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

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



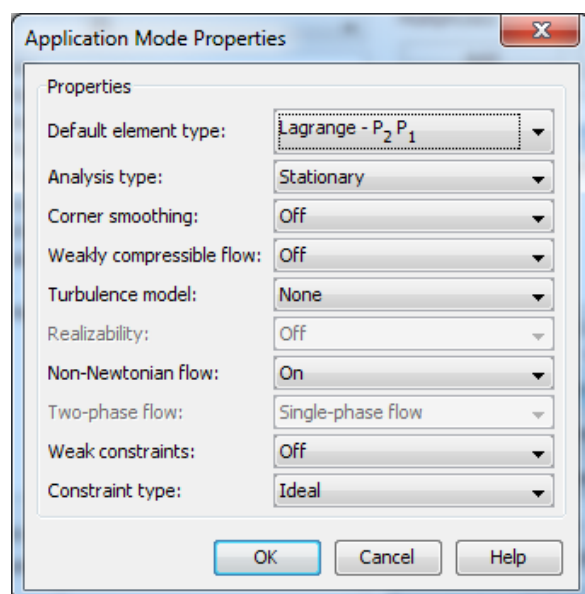
Σχήμα 4.19 Καθορισμός σταθεράς θερμοκρασίας

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

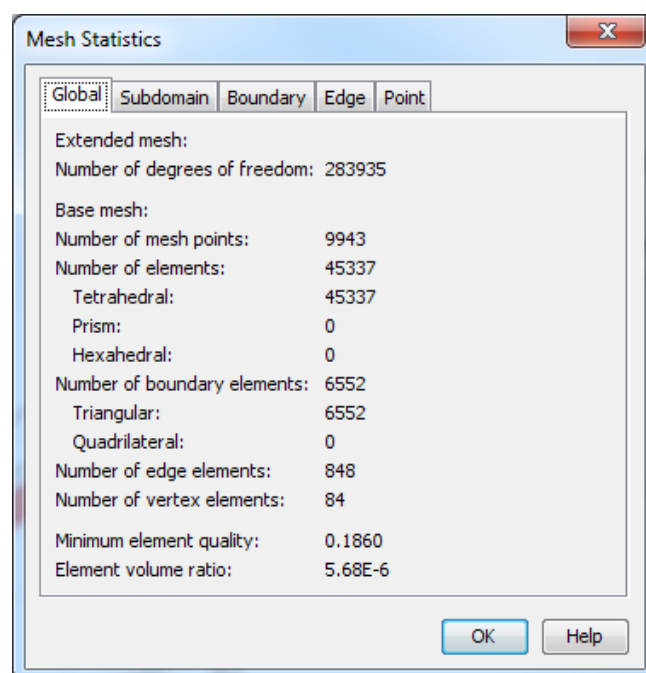


Σχήμα 4.20 Καθορισμός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

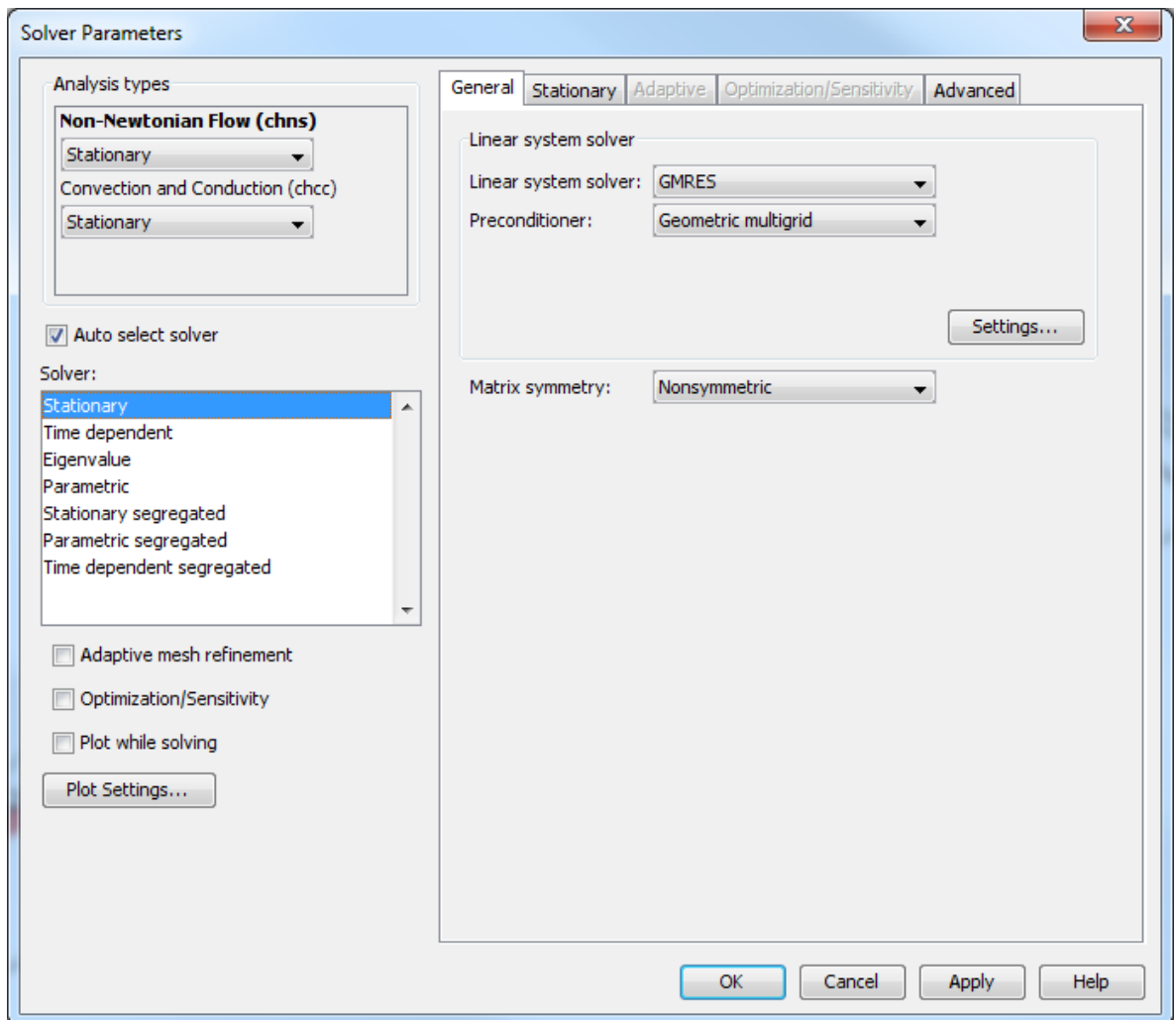
Στις επόμενες εικόνες αναλύεται ο τρόπος ορισμού των πεπερασμένων στοιχείων, το είδος που χρησιμοποιήθηκε (Lagrange - P2 P1, τετραεδρικά) και ο αλγόριθμος (GMRES – επίλυση αραιών μητρώων) που ακολουθήθηκε για την επίλυση των αλγεβρικών συστημάτων που προέκυψαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου των ΠΣ.



Σχήμα 4.21 Ιδιότητες της εφαρμογής

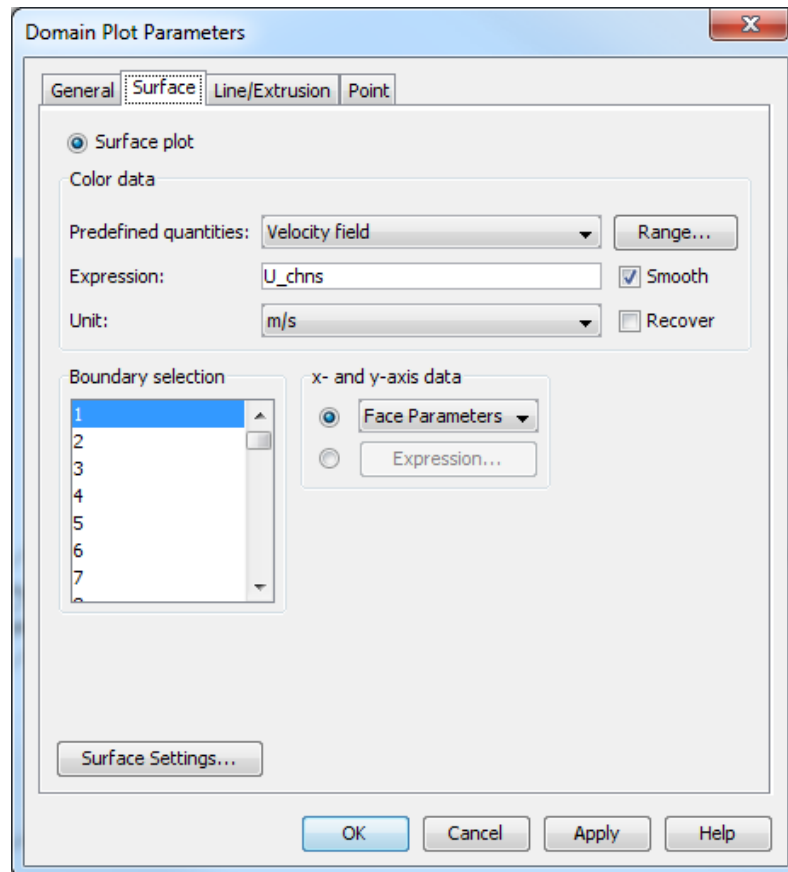


Σχήμα 4.22 Στατιστικά του πλέγματος



Σχήμα 4.23 Καθορισμός παραμέτρων πεπερασμένων στοιχείων

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



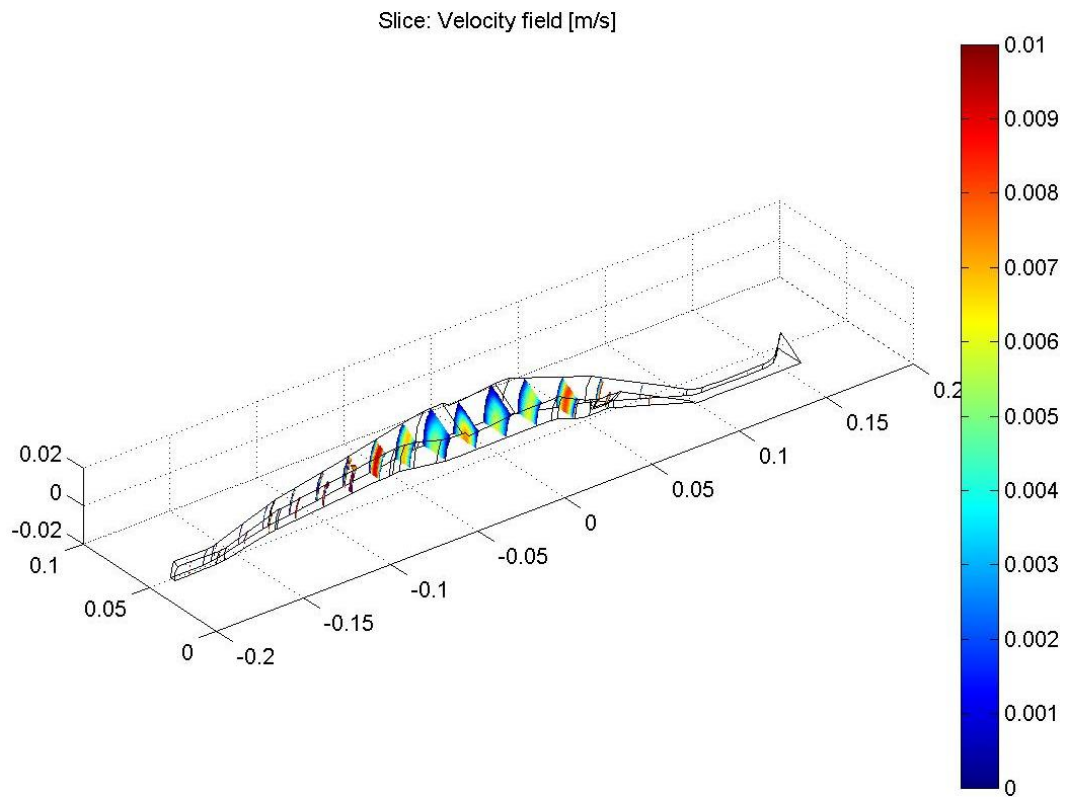
Σχήμα 4.24 Καθορισμός παραμέτρων γραφήματος προφίλ ταχύτητας

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Comsol είναι άμεση πλήρης αλληλεπίδραση με το Matlab. Έτσι, όλα τα παραπάνω βήματα, καταγράφονται και αποθηκεύονται σε μορφή ASCII σε αρχείο .txt και m-file. Εκμεταλλευόμενοι αυτό το γεγονός, δημιουργούμε κώδικα Matlab του παραρτήματος Δ (κώδικας 2), εισαγωγής όλων των γεωμετριών .iges του SolidWorks, και επίλυσης τους.

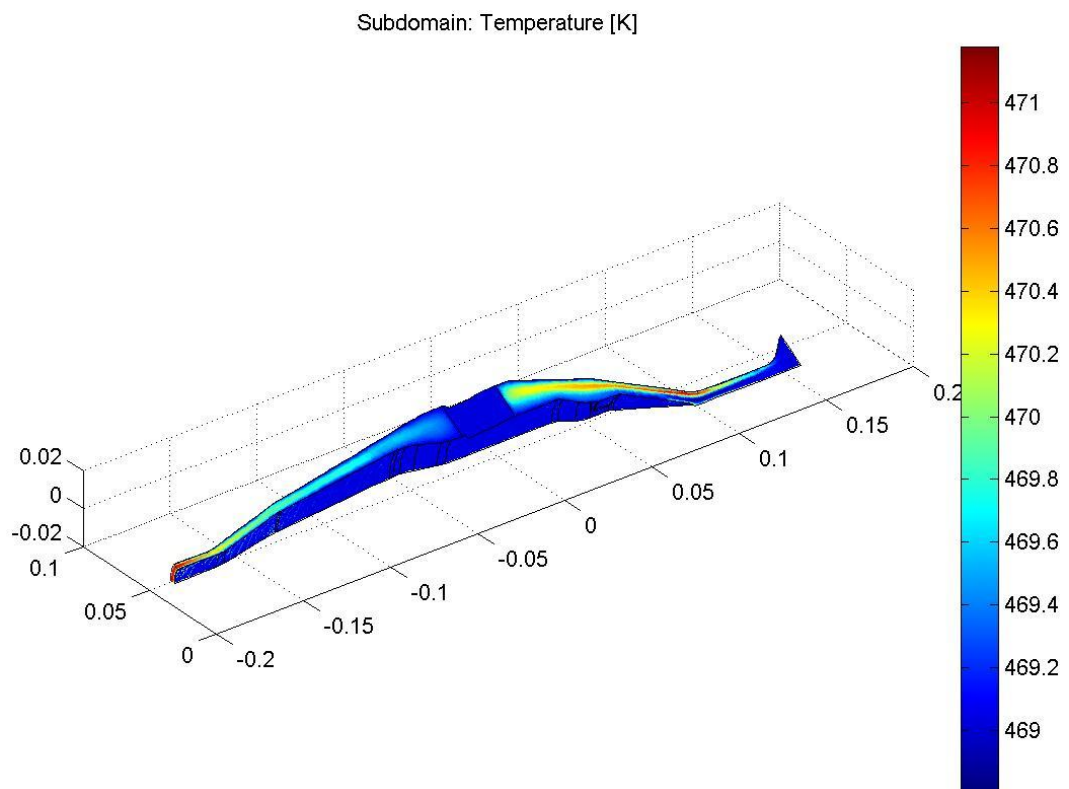
Ο κώδικας ανοίγεται από το πρόσθετο Comsol with Matlab και δίνει τα εξής αποτελέσματα:

- 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

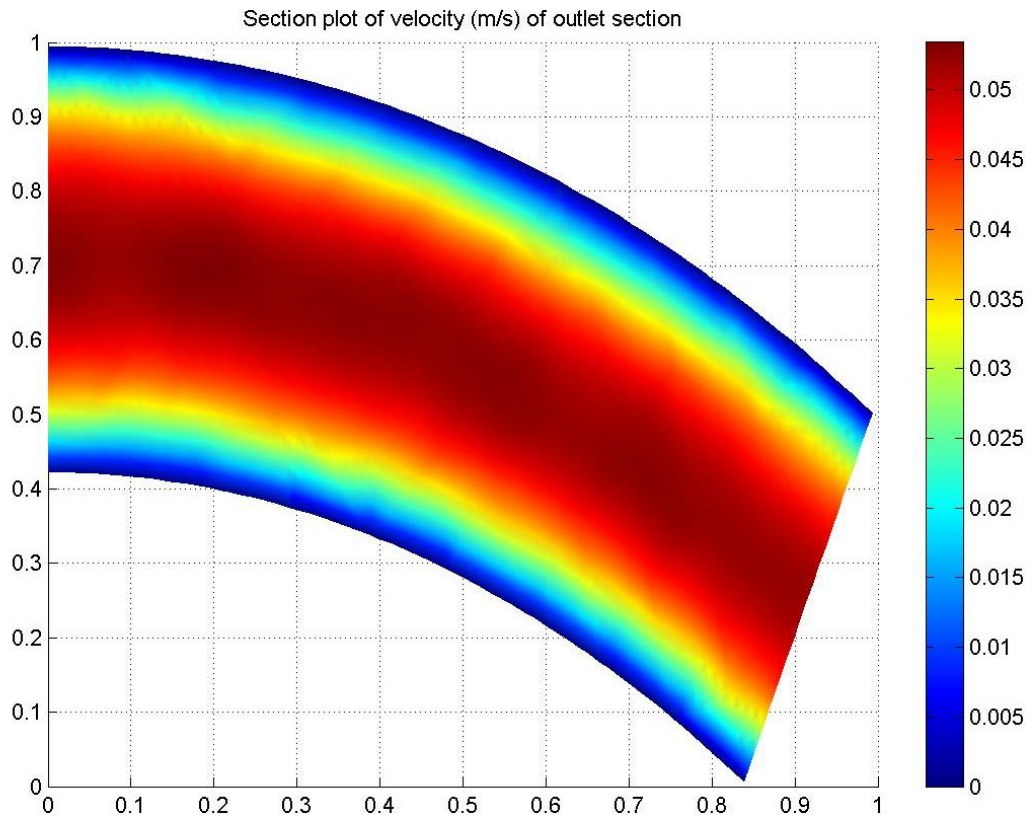
Οι αριθμητικές τιμές που λαμβάνονται συγκεντρώνονται σε αρχείο Excel και παρατίθενται στο κεφάλαιο 5, ενώ τα γραφήματα της πρώτης προσομοίωσης παρατίθενται στη συνέχεια. Έτσι, έχουμε:



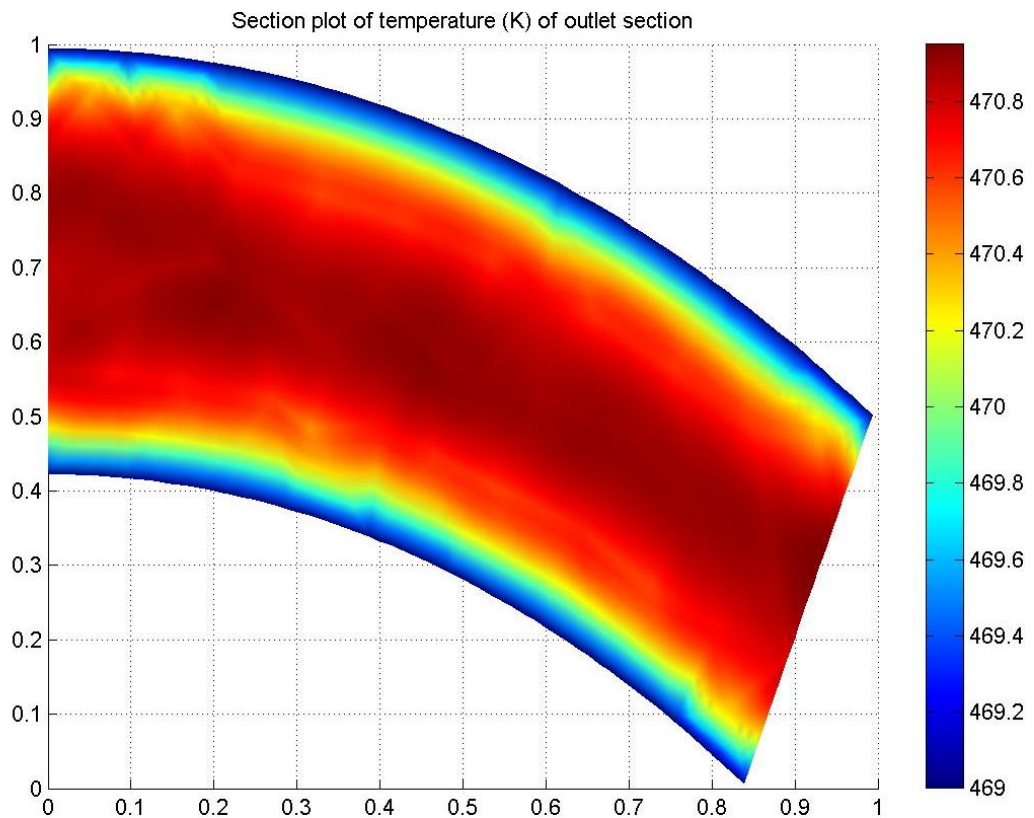
Σχήμα 4.25 Κατανομή ταχυτήτων 1^{ης} προσομοίωσης



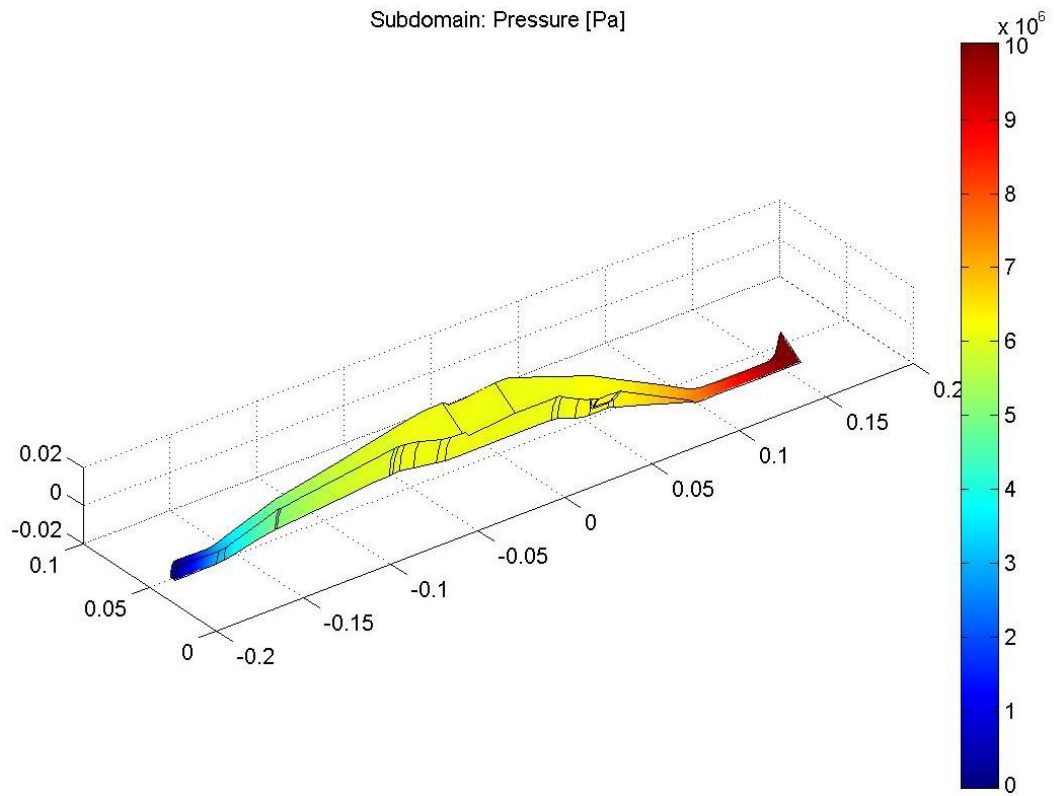
Σχήμα 4.26 Κατανομή θερμοκρασιών 1^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 4.27 Προφίλ ταχύτητας στην έξοδο της 1^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 4.28 Προφίλ θερμοκρασίας στην έξοδο της 1^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 4.29 Πτώση πίεσης 1^{ης} προσομοίωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**5.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (ΠΕΝΤΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ)**

Αφού εκτελέσουμε και τα 36 πειράματα με τις πέντε παραμέτρους, συγκεντρώνουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε έναν πίνακα. Έτσι, έχουμε:

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	0,037532	0,015826	470,4895	0,523393	536,1010736
2	0,037206	0,015757	470,4421	0,509551	439,136015
3	0,036852	0,015715	470,4214	0,49283	428,4282227
4	0,037605	0,015867	470,4913	0,524695	572,9138633
5	0,037186	0,015749	470,442	0,509525	469,3617343
6	0,036876	0,01572	470,4314	0,4957	436,4162024
7	0,037568	0,015862	470,4861	0,523373	471,0564294
8	0,037192	0,01573	470,4467	0,512716	469,6239339
9	0,036868	0,015707	470,428	0,496168	421,7798838
10	0,03762	0,015886	470,4892	0,523988	607,933727
11	0,03717	0,015735	470,4555	0,515394	476,2111472
12	0,036961	0,01577	470,4195	0,491564	464,5795943
13	0,037228	0,015745	470,4462	0,511869	462,3187826
14	0,036961	0,015758	470,4308	0,496038	432,4685373
15	0,037542	0,015857	470,487	0,523855	439,2354174
16	0,037208	0,015747	470,4484	0,513375	461,2832691
17	0,036927	0,015745	470,4257	0,494799	432,2173097
18	0,037544	0,015853	470,4932	0,52626	453,3634664
19	0,037187	0,015727	470,4489	0,512658	469,2521811
20	0,036994	0,015757	470,417	0,491909	432,731917
21	0,03759	0,015868	470,4835	0,523126	552,6928537
22	0,037204	0,015749	470,4443	0,512034	445,7854127
23	0,036954	0,015752	470,4261	0,493529	448,8932397
24	0,037591	0,01587	470,488	0,523645	513,1316922
25	0,03705	0,015807	470,4201	0,491881	488,996321
26	0,037596	0,015864	470,4889	0,523702	558,778129
27	0,037169	0,015721	470,4498	0,513514	507,038294
28	0,036973	0,01576	470,4189	0,491019	424,942178
29	0,037545	0,015866	470,4875	0,523176	615,0499981

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

30	0,037178	0,015724	470,4566	0,516264	517,0129252
31	0,036935	0,015738	470,4227	0,494859	463,9749841
32	0,037585	0,015865	470,4916	0,525022	535,4421846
33	0,037175	0,015723	470,4358	0,508367	482,8700903
34	0,036924	0,015747	470,4338	0,499628	426,8522992
35	0,037582	0,015867	470,4879	0,525018	438,5081743
36	0,037199	0,015732	470,4484	0,512574	475,2239615

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 36 πειραμάτων

5.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Στη συνέχεια, θα περιγράψουμε την αντικειμενική συνάρτηση βάση της οποίας θα υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ποδιού της αράχνης. Από την εκτέλεση των πειραμάτων έχουμε υπολογίσει τα παρακάτω μεγέθη:

- Μέση τιμή ταχύτητας εξόδου (U_m)
- Τυπική απόκλιση ταχύτητας εξόδου (U_s)
- Μέση τιμή θερμοκρασίας εξόδου (T_m)
- Τυπική απόκλιση θερμοκρασίας εξόδου (T_s)

Μετά, θα υπολογίσουμε τα παρακάτω μεγέθη για τις 36 προσομοιώσεις:

- ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) της ταχύτητας εξόδου:

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

- ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) της θερμοκρασίας εξόδου:

$$SNR_T = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T_m^2}{T_s^2} \right)$$

ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) υπολογίζει το αντίστροφο του συντελεστή διασποράς, δηλαδή το λόγο μ/σ , όπου μ είναι ο μέσος της διεργασίας και σ η τυπική απόκλιση της και τον προτείνει ο Δρ. Taguchi.

Το αμέσως επόμενο βήμα μας είναι η εκτέλεση προσομοίωσης της μήτρας του εργαστηρίου, και υπολογισμός των αντίστοιχων μεγεθών που υπολογίστηκαν στα 36 πειράματα του πίνακα L36. Έτσι, τελικά υπολογίζουμε τα μεγέθη:

- $U_{m,αρχ}$: Μέση τιμή ταχύτητας εξόδου της αρχικής μήτρας
- $U_{s,αρχ}$: Τυπική απόκλιση ταχύτητας εξόδου της αρχικής μήτρας
- $T_{m,αρχ}$: Μέση τιμή θερμοκρασίας εξόδου της αρχικής μήτρας
- $T_{s,αρχ}$: Τυπική απόκλιση θερμοκρασίας εξόδου της αρχικής μήτρας
- $SNR_{U,αρχ}$: ο λόγος σήματος προς θόρυβο της ταχύτητας εξόδου της αρχικής μήτρας
- $SNR_{T,αρχ}$: ο λόγος σήματος προς θόρυβο της θερμοκρασίας εξόδου της αρχικής μήτρας

Έπειτα, υπολογίζουμε τις optimum τιμές των λόγων σημάτων για κάθε ένα από τα 36 πειράματα, από τις σχέσεις:

- Για την ταχύτητα έχουμε:

$$\text{SNR}_{U,\text{opt}} = \frac{\text{SNR}_U}{\text{SNR}_{U,\text{αρχ}}}$$

- Για την θερμοκρασία έχουμε:

$$\text{SNR}_{T,\text{opt}} = \frac{\text{SNR}_T}{\text{SNR}_{T,\text{αρχ}}}$$

Επιλογή ως αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης, το μέγεθος:

$$\text{OPT} = 0,8 \cdot \text{SNR}_{U,\text{opt}} + 0,2 \cdot \text{SNR}_{T,\text{opt}}$$

όπου 0,8 και 0,2, συντελεστές βαρύτητας σύμφωνα με τη βιομηχανία.

Τέλος, ορίζουμε ως βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης την μέγιστη τιμή από τα 36 πειράματα που έχουμε εκτελέσει, δίνοντας μας έτσι μια πρώτη εκτίμηση για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.

Πρέπει εδώ να παρατηρήσουμε ότι η αντικειμενική συνάρτηση επιλέχθηκε με βάση τη παραγωγή στη βιομηχανία, όπου απαιτείται καλύτερη ποιότητα όλης της επιφάνειας του ρευστού στην έξοδο από τη μήτρα εκβολής.

5.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ)

Εκτελώντας την προσομοίωση της αρχικής μήτρας του εργαστηρίου, παίρνουμε τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.2) με τη μέση τιμή και τυπική απόκλιση ταχύτητας και θερμοκρασίας, καθώς και τους αντίστοιχους λόγους σήματος προς θόρυβο.

ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΤΡΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ		
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ	$U_{m,αρχ}$	0,022378
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ	$U_{s,αρχ}$	0,01111
SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ	$SNR_{U,αρχ}$	6,082364
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ	$T_{m,αρχ}$	470,1712
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ	$T_{s,αρχ}$	0,450711
SNR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ	$SNR_{T,αρχ}$	60,36716

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης αρχικής μήτρας εργαστηρίου

Από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 5.2) καθώς και τον πίνακα της προηγούμενης παραγράφου (Πίνακας 5.1) υπολογίζουμε τιμές των SNR της ταχύτητας, των SNR της θερμοκρασίας, τις OPTIMUM τιμές τους, αλλά και τις αντίστοιχες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης όπως αυτές ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο..

Έτσι έχουμε τον παρακάτω πίνακα:

A/A ΔΟΚΙΜΗΣ	SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _U)	SNR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _T)	OPTIMUM SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _{U,opt})	OPTIMUM SNR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _{T,opt})	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ OPT = (0,8 · SNR _{U,opt} + 0,2 · SNR _{T,opt})
1	7,500678179	59,07443907	1,233185	0,978586	1,182265
2	7,46264217	59,30636838	1,226931	0,982428	1,17803
3	7,402904256	59,59580575	1,21711	0,987222	1,171132
4	7,494822393	59,05290005	1,232222	0,978229	1,181423
5	7,462576284	59,3068102	1,22692	0,982435	1,178023
6	7,405774268	59,54554932	1,217581	0,98639	1,171343
7	7,488948149	59,07471642	1,231256	0,97859	1,180723
8	7,474415201	59,25266745	1,228867	0,981538	1,179401
9	7,410789354	59,53728102	1,218406	0,986253	1,171975
10	7,488333463	59,06456464	1,231155	0,978422	1,180608
11	7,46675398	59,20758035	1,227607	0,980791	1,178244
12	7,398078018	59,61810625	1,216316	0,987592	1,170571
13	7,474475883	59,26703158	1,228877	0,981776	1,179457
14	7,405023188	59,5396126	1,217458	0,986291	1,171225

15	7,486131814	59,0667344	1,230793	0,978458	1,180326
16	7,46890122	59,24154409	1,22796	0,981354	1,178639
17	7,404040308	59,56124321	1,217296	0,98665	1,171167
18	7,488799713	59,0270582	1,231232	0,977801	1,180546
19	7,475066084	59,25368668	1,228974	0,981555	1,17949
20	7,413083328	59,61197013	1,218783	0,98749	1,172525
21	7,490957465	59,07876001	1,231586	0,978657	1,181001
22	7,466913679	59,26418042	1,227633	0,981729	1,178452
23	7,406613818	59,58358148	1,21772	0,98702	1,17158
24	7,49037626	59,07023443	1,231491	0,978516	1,180896
25	7,399095829	59,61252234	1,216483	0,987499	1,170687
26	7,494495283	59,06930146	1,232168	0,978501	1,181435
27	7,474319772	59,23922556	1,228851	0,981315	1,179344
28	7,406675491	59,62773667	1,21773	0,987751	1,171734
29	7,481722807	59,07800958	1,230068	0,978645	1,179784
30	7,474686636	59,19294961	1,228911	0,980549	1,179239
31	7,409763136	59,56014146	1,218237	0,986632	1,171916
32	7,491746131	59,04747948	1,231716	0,978139	1,181001
33	7,474055577	59,32646293	1,228808	0,982761	1,179598
34	7,402293926	59,47703588	1,217009	0,985255	1,170658
35	7,489590968	59,04749291	1,231362	0,978139	1,180717
36	7,475013595	59,25511158	1,228965	0,981579	1,179488

Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτική ανάλυση αποτελεσμάτων

Μια πρώτη εκτίμηση για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνεται από τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης OPT. Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, οι τιμές αυτές είναι:

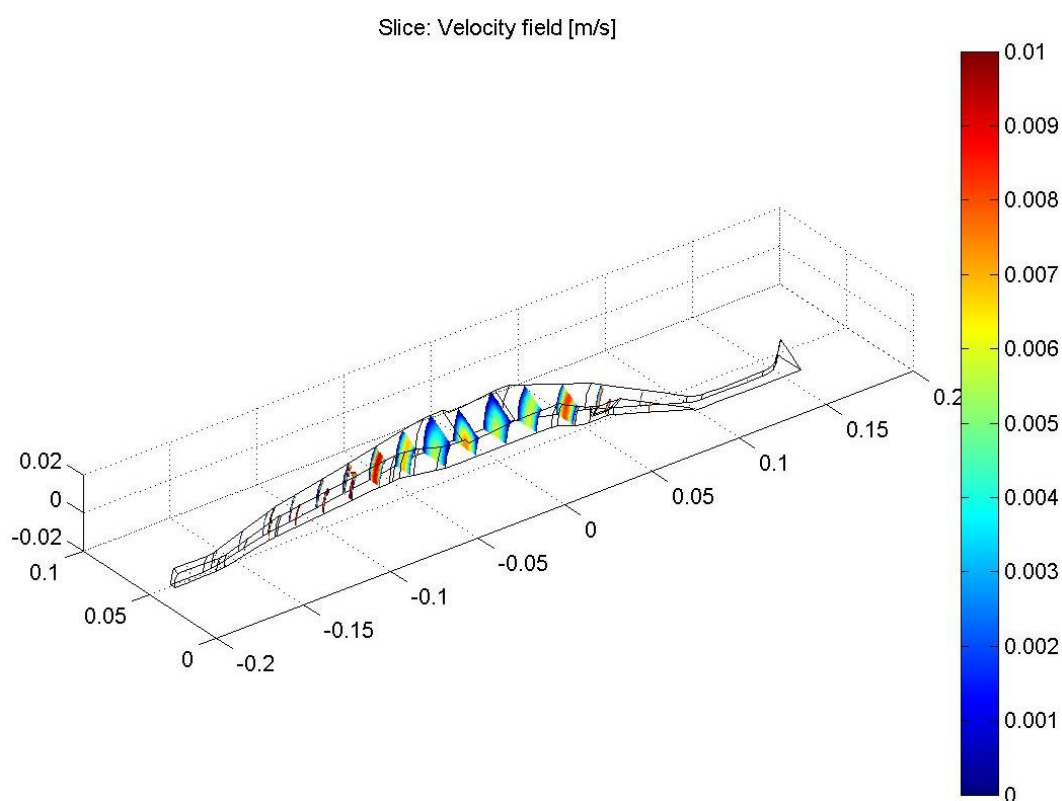
Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΑΧ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ OPT	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ				
		Y	X	f	a	b
1	1,182264837	9	30	0,2	5	5

Πίνακας 5.4 Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων

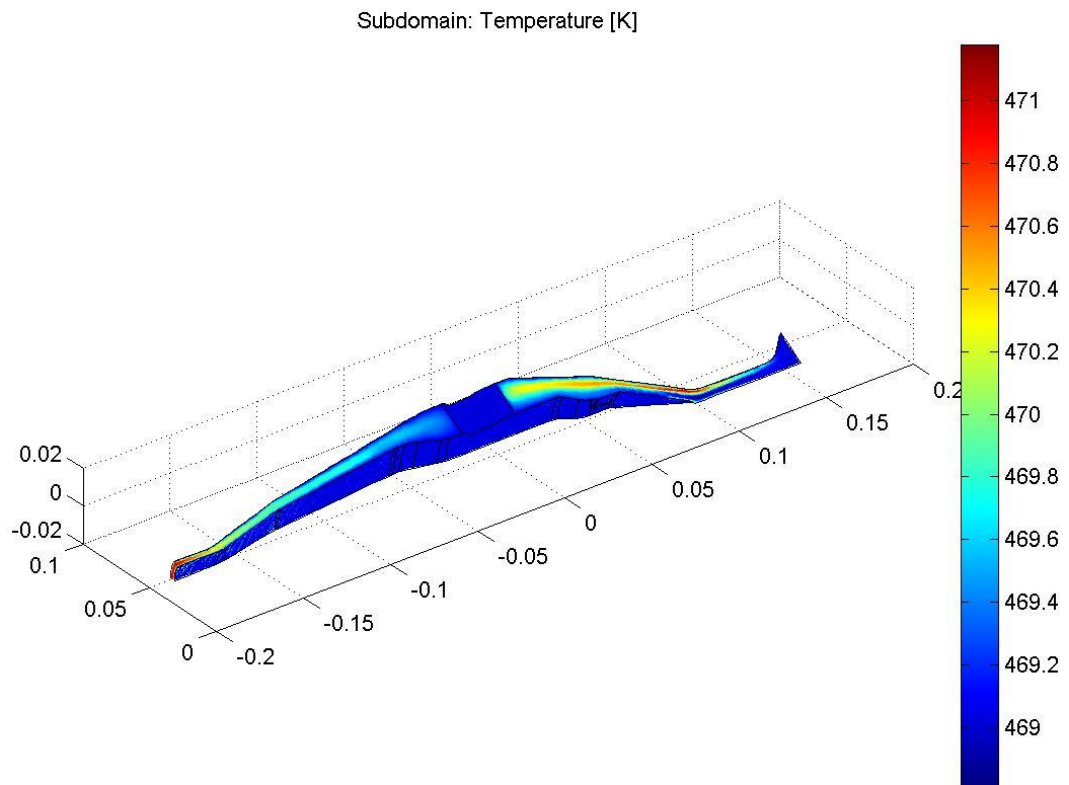
Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τα γραφικά αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης (1) όπου έχουμε την μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που επιλέχθηκε.

Έτσι, έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα:

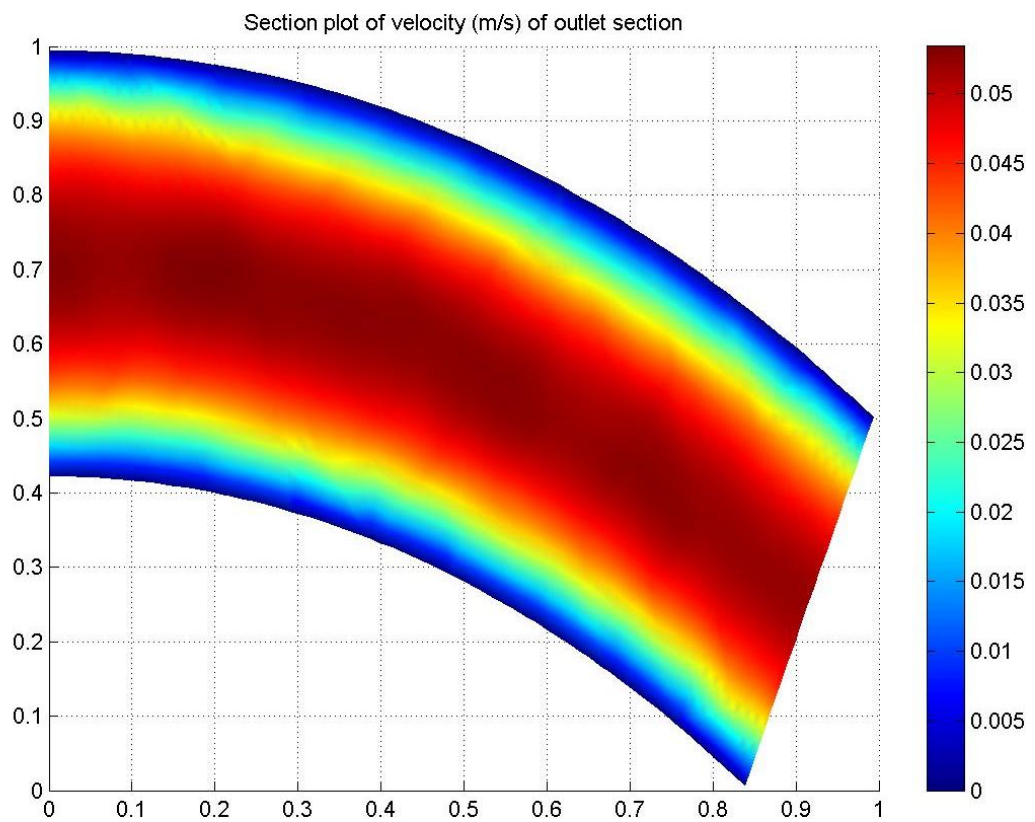
- Γράφημα κατανομής ταχυτήτων κατά το μήκος της μήτρας εκβολής
- Γράφημα κατανομής θερμοκρασιών κατά το μήκος της μήτρας εκβολής
- Γράφημα του προφίλ της ταχύτητας στην έξοδο
- Γράφημα του προφίλ της θερμοκρασίας στην έξοδο
- Γράφημα της πτώσης πίεσης κατά το μήκος της μήτρας εκβολής



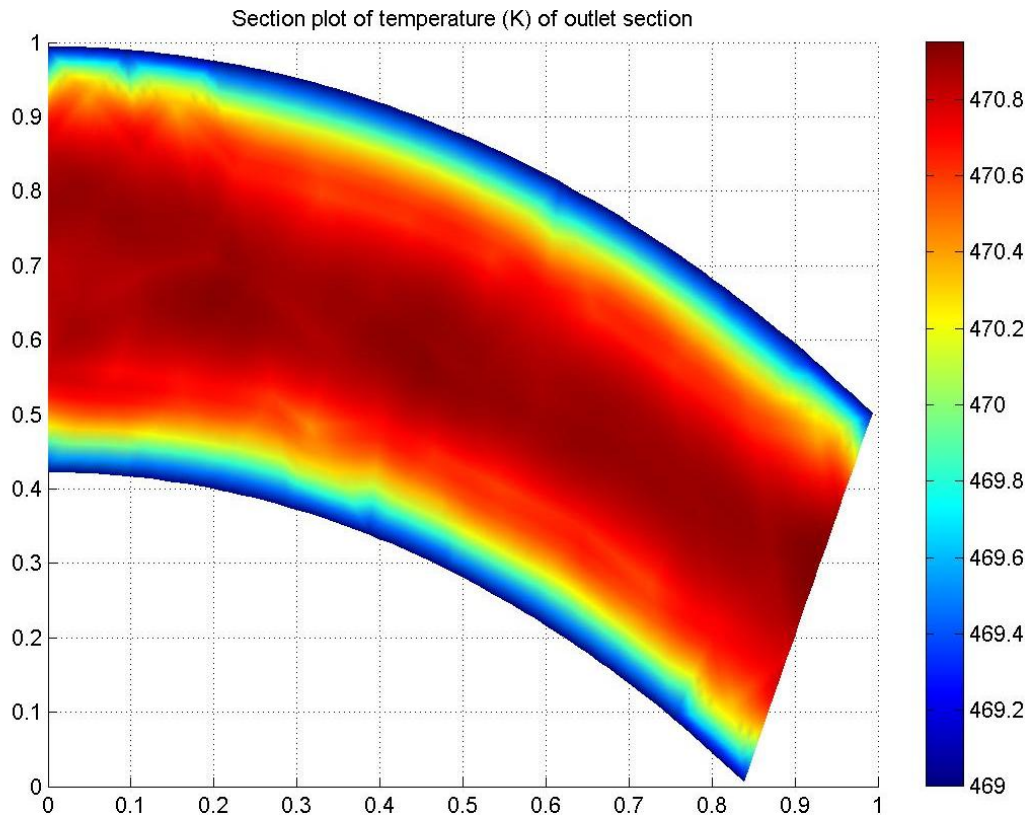
Σχήμα 5.1 Κατανομή ταχυτήτων 1^{ης} προσομοίωσης



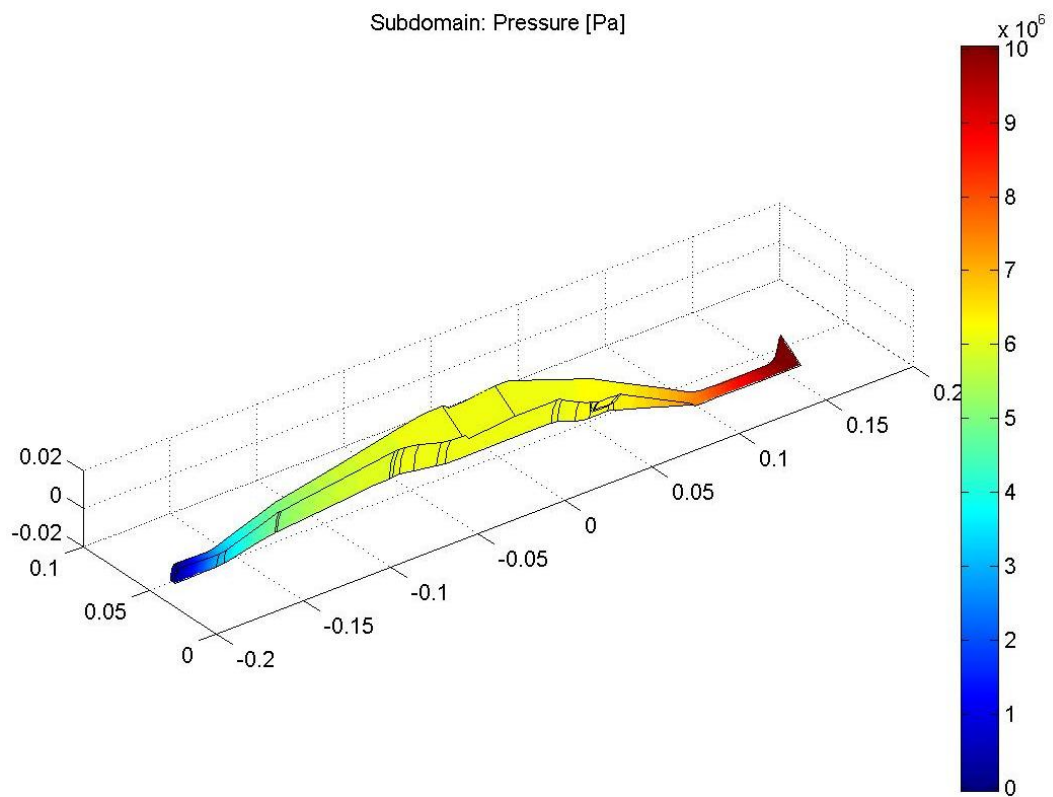
Σχήμα 5.2 Κατανομή θερμοκρασιών 1^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 5.3 Προφίλ ταχύτητας στην έξοδο της 1^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 5.4 Προφίλ θερμοκρασίας στην έξοδο της 1^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 5.5 Πτώση πίεσης 1^{ης} προσομοίωσης

5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΟΝΑ (5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ)

Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο ανάλυσης διασποράς (ΑΝΟΝΑ) για να υπολογίσουμε τους λόγους συμβολής των πέντε (5) παραμέτρων. Η ανάλυση γίνεται με κώδικα Matlab ο οποίος παρατίθεται στο παράρτημα Δ (κώδικας 3) και αφορά τα 36 πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Έτσι, παίρνουμε τον ακόλουθο πίνακα:

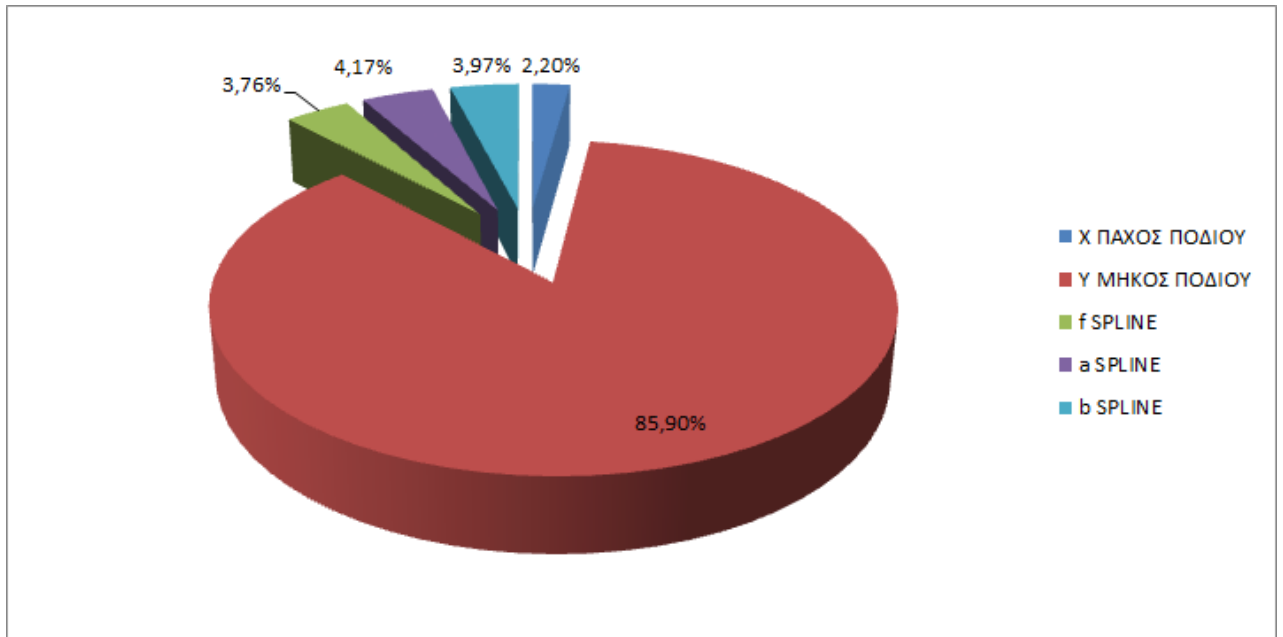
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
Υ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	2,20%
Χ	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	85,90%
f	ΜΕΓΙΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (%)	3,76%
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	4,17%
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	3,97%

Πίνακας 5.5 Λόγοι συμβολής των παραμέτρων

Από τα παραπάνω, παρατηρούμε ότι 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: $X_{OPT} = 30 \text{ mm}$.

Στη συνέχεια, θεωρώντας του μήκος του ποδιού σταθερό και ίσο με 30 mm, προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε του υπόλοιπους τέσσερις παράγοντες της γεωμετρίας του ποδιού της αράχνης.

Παρακάτω παραθέτουμε τα ποσοστά των λόγων συμβολής σε γράφημα Excel, (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6 Λόγοι συμβολής παραμέτρων σε γράφημα τύπου “πίτας”

5.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ)

Αφού εκτελέσουμε και τα 36 πειράματα με τις τέσσερις πλέον παραμέτρους, συγκεντρώνουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε έναν πίνακα. Έτσι, έχουμε:

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	0,037619	0,015883	470,4898	0,524467	629,8836175
2	0,037486	0,015823	470,4843	0,524317	500,3837496
3	0,037563	0,015854	470,4859	0,524113	570,3769971
4	0,03761	0,015866	470,4886	0,524024	566,6170342
5	0,037547	0,015861	470,4851	0,52404	454,1290427
6	0,037565	0,015856	470,4848	0,523717	530,1744284
7	0,037571	0,015868	470,4915	0,525685	570,0713688
8	0,037556	0,015866	470,4845	0,522034	505,1526281
9	0,037526	0,015853	470,4859	0,522498	563,1518021
10	0,037587	0,015853	470,4911	0,525284	561,5362536
11	0,037594	0,015869	470,4863	0,522767	457,6879162
12	0,037582	0,015863	470,4889	0,523704	574,0928201
13	0,037626	0,015873	470,4878	0,523339	468,9029301
14	0,037618	0,015872	470,49	0,524136	571,6898783
15	0,037573	0,015867	470,4891	0,524268	561,7467757
16	0,037585	0,015872	470,4875	0,525481	491,6042561
17	0,037576	0,015865	470,4899	0,524818	537,2428564
18	0,037551	0,015855	470,4872	0,523883	525,7436433
19	0,037617	0,015875	470,4891	0,525298	462,555145
20	0,037576	0,015857	470,489	0,523706	548,2898078
21	0,037586	0,015869	470,4881	0,523729	549,3314147
22	0,037565	0,015865	470,4854	0,523047	470,6487343
23	0,037621	0,01588	470,4894	0,523933	587,3835853
24	0,03759	0,01586	470,4896	0,52416	578,3093606
25	0,037583	0,015887	470,4853	0,522255	555,457761
26	0,03758	0,015854	470,4898	0,524472	578,9847312
27	0,037561	0,0159	470,4937	0,522986	483,7886062
28	0,037632	0,015876	470,4894	0,524073	556,5768058
29	0,037593	0,015868	470,4889	0,524068	545,2825907
30	0,037546	0,015901	470,4926	0,523065	507,0388478
31	0,037621	0,015876	470,489	0,523598	576,7957277
32	0,037614	0,015888	470,4888	0,524029	568,6153707

33	0,037551	0,015871	470,4863	0,522329	474,9110982
34	0,037631	0,015884	470,4891	0,523868	582,4909737
35	0,037568	0,015865	470,488	0,524191	554,1270597
36	0,037559	0,015849	470,4861	0,523345	462,7289624

Πίνακας 5.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 36 πειραμάτων

Από τον παραπάνω πίνακα υπολογίζουμε τιμές των SNR της ταχύτητας, των SNR της θερμοκρασίας, τις OPTIMUM τιμές τους, αλλά και τις αντίστοιχες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης όπως αυτές ορίστηκαν στην παράγραφο 5.2.

Έτσι έχουμε τον παρακάτω πίνακα:

A/A ΔΟΚΙΜΗΣ	SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _U)	SNR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _T)	OPTIMUM SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _{U,opt})	OPTIMUM SNR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR _{T,opt})	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ OPT = (0,8 · SNR _{U,opt} + 0,2 · SNR _{T,opt})
1	7,489430809	59,05664496	1,231335	0,978291	1,180727
2	7,49163595	59,05902333	1,231698	0,97833	1,181024
3	7,492608842	59,06243498	1,231858	0,978387	1,181164
4	7,496884166	59,06396216	1,232561	0,978412	1,181731
5	7,485273808	59,06363096	1,230652	0,978407	1,180203
6	7,492047395	59,06898443	1,231766	0,978495	1,181112
7	7,486768629	59,03652417	1,230898	0,977958	1,18031
8	7,484020859	59,09693765	1,230446	0,978958	1,180148
9	7,48443785	59,08923929	1,230515	0,978831	1,180178
10	7,49850541	59,0431537	1,232827	0,978067	1,181875
11	7,491122606	59,08478209	1,231614	0,978757	1,181042
12	7,492172386	59,06926725	1,231786	0,9785	1,181129
13	7,496340357	59,07530047	1,232471	0,9786	1,181697
14	7,495324087	59,06212297	1,232304	0,978382	1,18152
15	7,487704652	59,05993124	1,231052	0,978345	1,18051
16	7,487374587	59,03982075	1,230997	0,978012	1,1804
17	7,489481554	59,05083441	1,231344	0,978195	1,180714
18	7,488901451	59,06627257	1,231248	0,97845	1,180689
19	7,493522348	59,04287715	1,232008	0,978063	1,181219
20	7,493595289	59,06924419	1,23202	0,9785	1,181316
21	7,48967277	59,06884014	1,231375	0,978493	1,180799
22	7,486938197	59,08011373	1,230926	0,97868	1,180476
23	7,491896631	59,06547575	1,231741	0,978437	1,18108
24	7,495387751	59,06173045	1,232315	0,978375	1,181527
25	7,479101995	59,09326394	1,229637	0,978898	1,179489

26	7,496537701	59,05656514	1,232504	0,97829	1,181661
27	7,466829076	59,08127874	1,227619	0,978699	1,177835
28	7,496026112	59,06316456	1,23242	0,978399	1,181616
29	7,491587385	59,06324005	1,23169	0,9784	1,181032
30	7,46300166	59,07993808	1,22699	0,978677	1,177328
31	7,493573709	59,0710341	1,232017	0,978529	1,181319
32	7,485713483	59,06387549	1,230724	0,978411	1,180262
33	7,480157437	59,09205356	1,229811	0,978878	1,179624
34	7,491595988	59,06655125	1,231691	0,978455	1,181044
35	7,487725735	59,06117777	1,231055	0,978366	1,180517
36	7,494046694	59,07518061	1,232094	0,978598	1,181395

Πίνακας 5.7 Συγκεντρωτική ανάλυση αποτελεσμάτων

Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται από τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης OPT. Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, οι τιμές αυτές είναι:

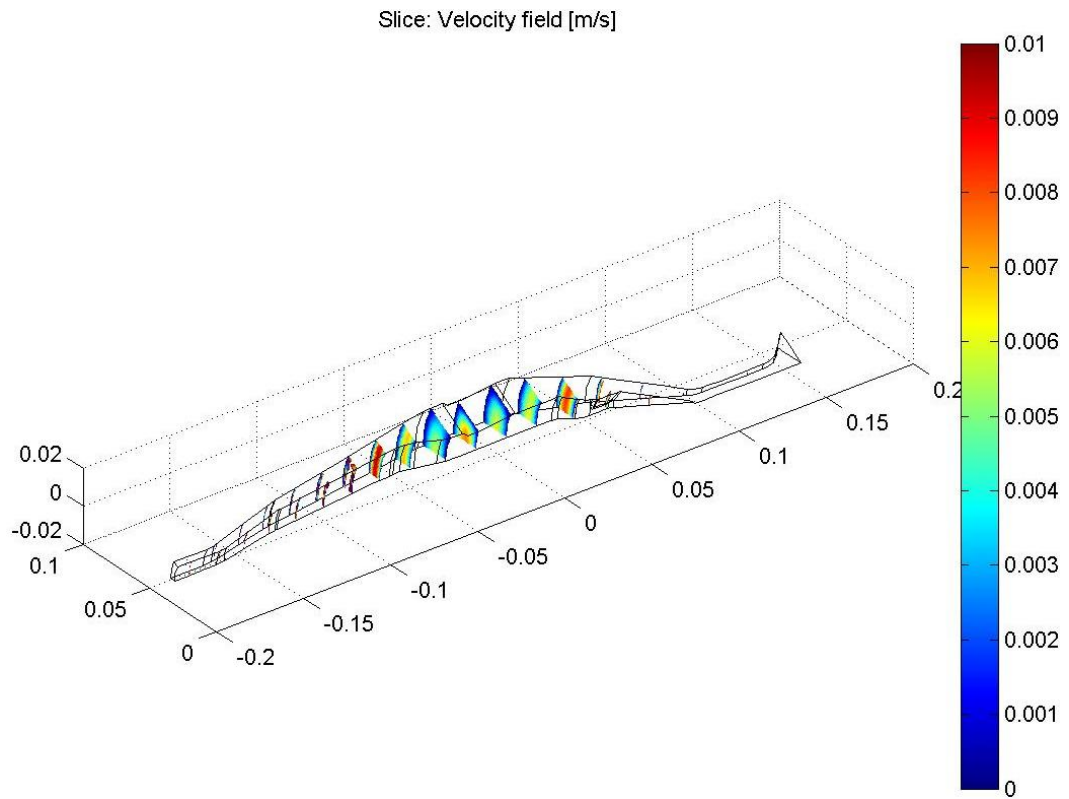
Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΑΧ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ OPT	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ			
		Υ	f	a	b
10	1,181875407	9	0,2	15	10

Πίνακας 5.8 Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων

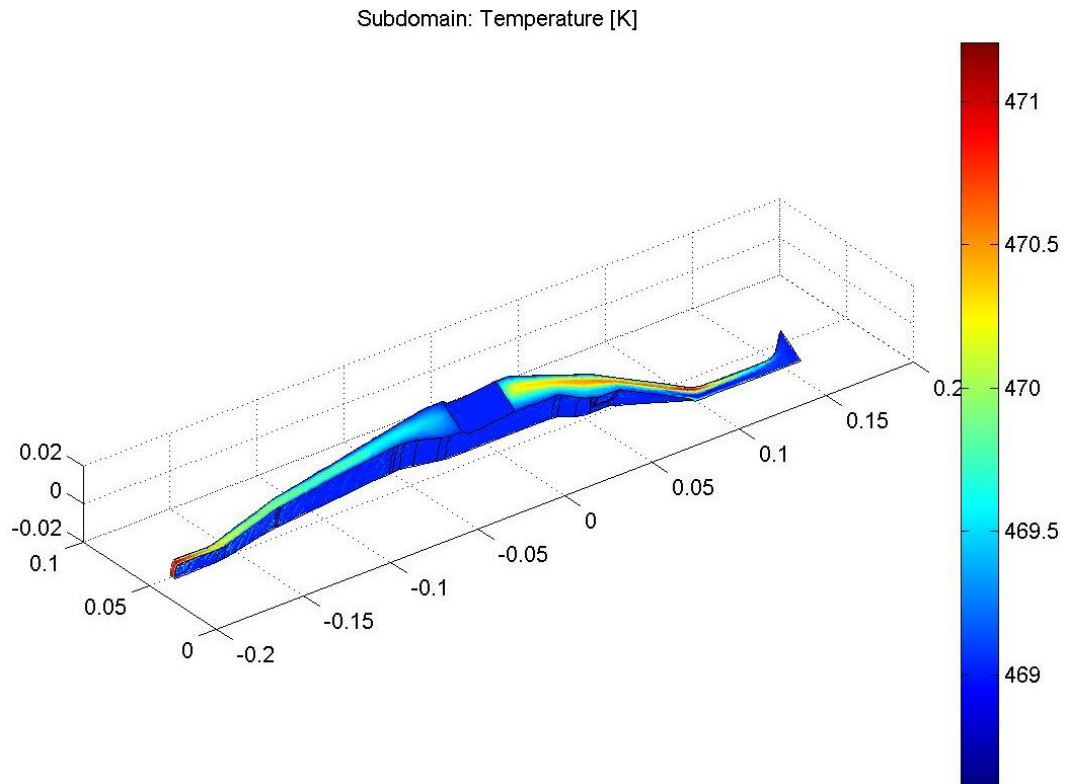
Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τα γραφικά αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης (10) όπου έχουμε την μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που επιλέχθηκε.

Έτσι, έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα:

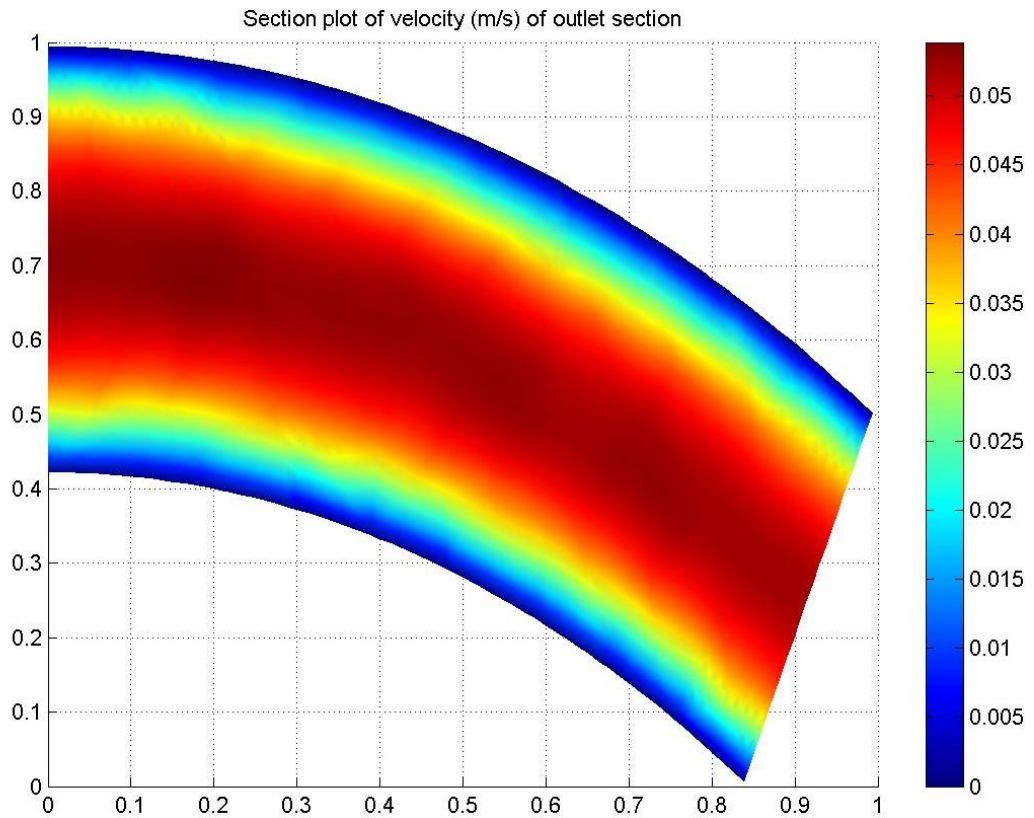
- Γράφημα κατανομής ταχυτήτων κατά το μήκος της μήτρας εκβολής
- Γράφημα κατανομής θερμοκρασιών κατά το μήκος της μήτρας εκβολής
- Γράφημα του προφίλ της ταχύτητας στην έξοδο
- Γράφημα του προφίλ της θερμοκρασίας στην έξοδο
- Γράφημα της πτώσης πίεσης κατά το μήκος της μήτρας εκβολής



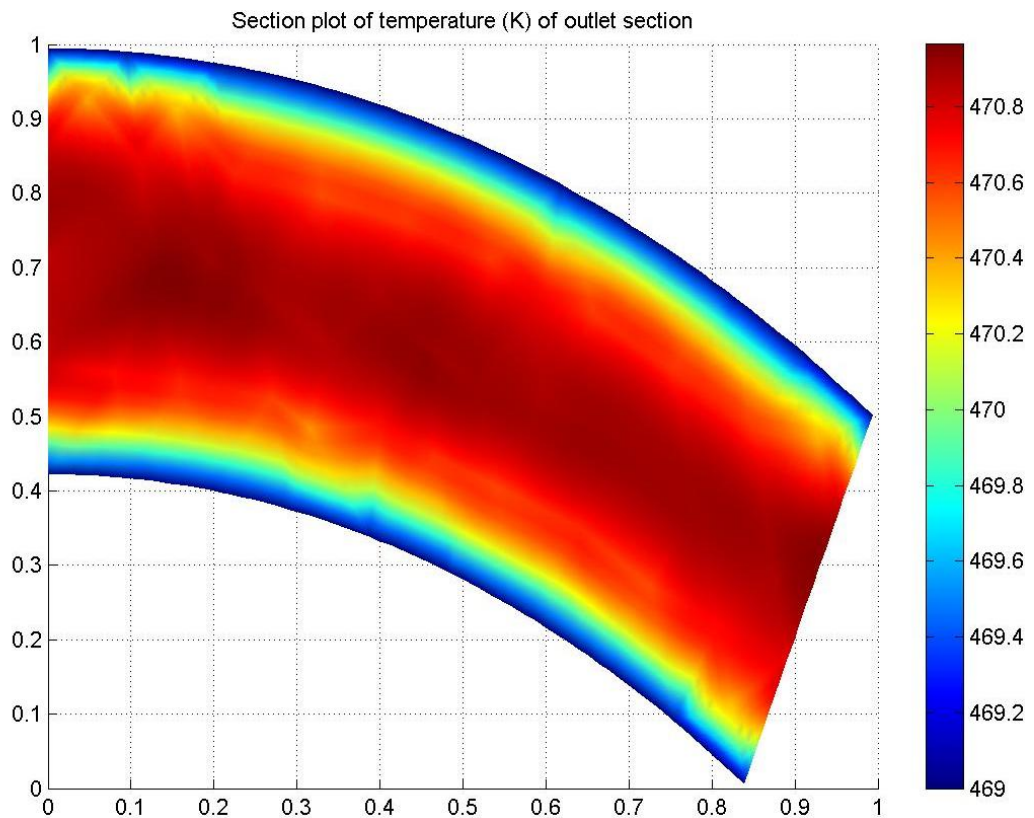
Σχήμα 5.7 Κατανομή ταχυτήτων 10^{15} προσομοίωσης



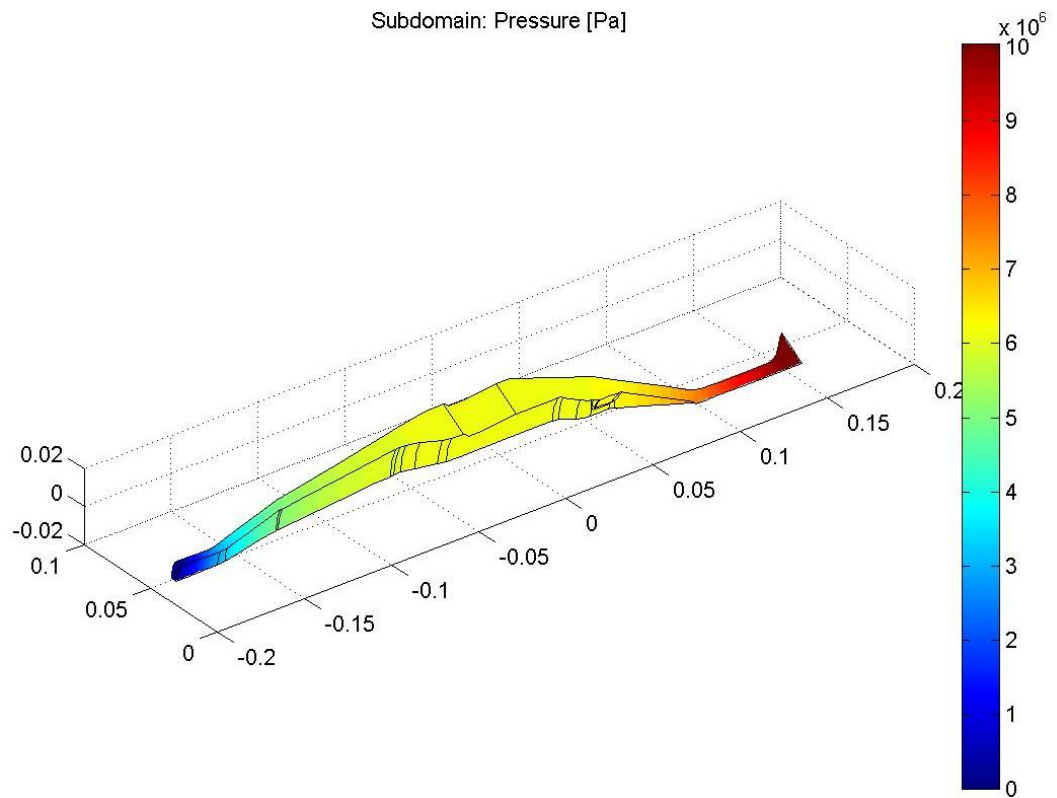
Σχήμα 5.8 Κατανομή θερμοκρασιών 10^{15} προσομοίωσης



Σχήμα 5.9 Προφίλ ταχύτητας στην έξοδο της 10^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 5.10 Προφίλ θερμοκρασίας στην έξοδο της 10^{ης} προσομοίωσης



Σχήμα 5.11 Πτώση πίεσης 10^{15} προσομοίωσης

5.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΟΝΑ (4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ)

Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο ανάλυσης διασποράς (ΑΝΟΝΑ) για να υπολογίσουμε τους λόγους συμβολής των τεσσάρων (4) παραμέτρων. Η ανάλυση γίνεται με κώδικα Matlab ο οποίος παρατίθεται στο παράρτημα Δ (κώδικας 3) και αφορά τα 36 πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Έτσι, παίρνουμε τον ακόλουθο πίνακα:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
Υ	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%

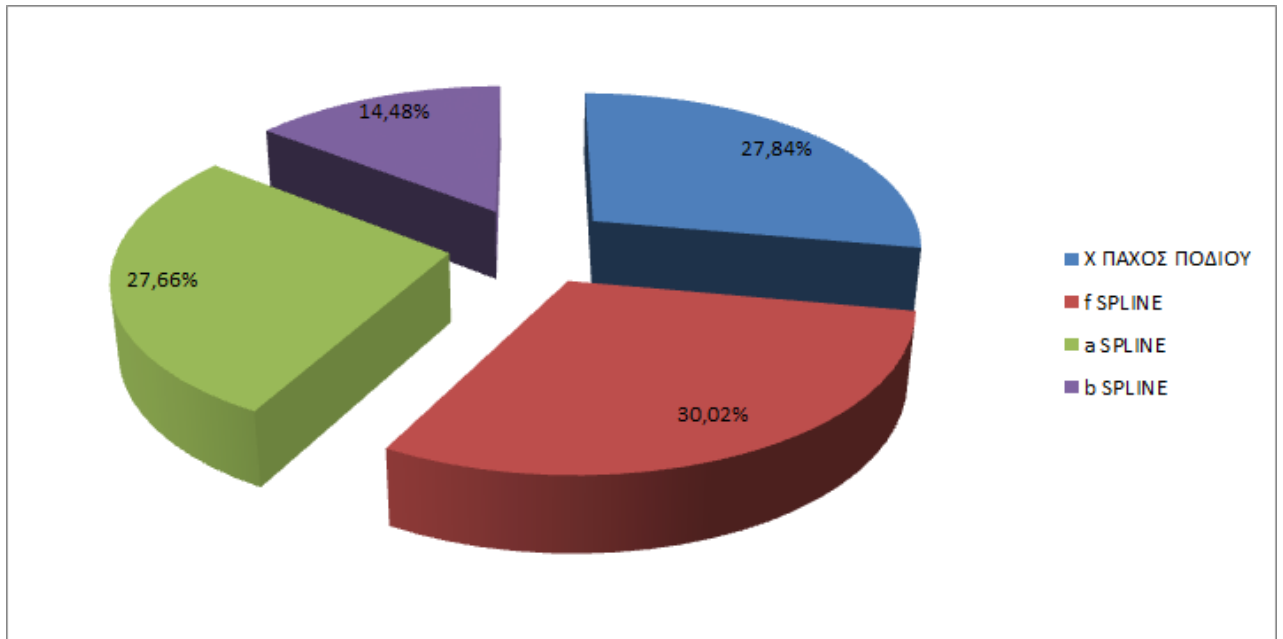
Πίνακας 5.9 Λόγοι συμβολής των παραμέτρων

Από τα παραπάνω, παρατηρούμε ότι και 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 ($Υ$) και το μέγιστο της καμπύλης spline (f), παρατηρούμε ότι οι βέλτιστες τιμές συμπίπτουν με τον πίνακα 5.4 της παραγράφου 5.3 και είναι οι ελάχιστες δυνατές σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $Υ_{OPT} = 9 \text{ mm}$, $f_{OPT} = 0,2$ (20 %).

Στη συνέχεια, θεωρώντας του πάχος του ποδιού σταθερό και ίσο με 9 mm και το μέγιστο της καμπύλης spline σταθερό και ίσο με 20 %, προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε του υπόλοιπους δύο παράγοντες της γεωμετρίας του ποδιού της αράχνης, δηλαδή τις γωνίες εκκίνησης και τερματισμού, οι οποίες είναι οι μόνες που δεν έμειναν σταθερές στις δύο (2) σειρές πειραμάτων.

Παρακάτω παραθέτουμε τα ποσοστά των λόγων συμβολής σε γράφημα Excel, (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.12 Λόγοι συμβολής παραμέτρων σε γράφημα τύπου “πίτας”

5.7 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ)

Τελικά, έχοντας πλέον μόνο δύο (2) παραμέτρους, με τους υπόλοιπους 3 σταθερούς, επιλέγουμε τον πίνακα L9 ο οποίος φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

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 5.10 L9 του πίνακα Taguchi για δύο παραμέτρους

Και με αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων, παίρνουμε τον παρακάτω πίνακα.

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 5.11 L9 του πίνακα Taguchi για με τιμές των παραμέτρων

Αφού εκτελέσουμε και τα 9 πειράματα με τις δύο πλέον παραμέτρους, συγκεντρώνουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε έναν πίνακα. Έτσι, έχουμε:

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	0,037576	0,015846	470,489561	0,524556024	625,5955829
2	0,03757	0,015863	470,489006	0,524598709	589,3941478
3	0,037617	0,015875	470,490065	0,524278248	553,4743597
4	0,03751	0,015832	470,486411	0,525198865	561,3879346
5	0,037604	0,015884	470,487662	0,52505239	552,2362015
6	0,03756	0,015855	470,49236	0,526075282	561,5277019
7	0,037632	0,015884	470,489268	0,524387983	538,923991
8	0,037624	0,015871	470,49013	0,524192637	532,6143407
9	0,037618	0,015878	470,490149	0,524365699	568,5436674

Πίνακας 5.12 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 9 πειραμάτων

Από τον παραπάνω πίνακα υπολογίζουμε τιμές των SNR της ταχύτητας, των SNR της θερμοκρασίας, τις OPTIMUM τιμές τους, αλλά και τις αντίστοιχες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης όπως αυτές ορίστηκαν στην παράγραφο 5.2.

Έτσι έχουμε τον παρακάτω πίνακα:

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR_U)	SNR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ (SNR_T)	OPTIMUM SNR ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ ($SNR_{U,opt}$)	OPTIMUM SNR ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ ($SNR_{T,opt}$)	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ OPT = $(0,8 \cdot SNR_{U,opt} + 0,2 \cdot SNR_{T,opt})$
1	7,499932642	59,05516226	1,233062	0,978266	1,182103
2	7,489049705	59,05444524	1,231273	0,978255	1,180669
3	7,493399095	59,05977234	1,231988	0,978343	1,181259
4	7,492253097	59,0444661	1,231799	0,978089	1,181057
5	7,485271754	59,04691197	1,230652	0,97813	1,180147
6	7,49122383	59,03009358	1,23163	0,977851	1,180874
7	7,491909885	59,05793981	1,231743	0,978312	1,181057
8	7,497166264	59,06119202	1,232607	0,978366	1,181759
9	7,4921105	59,05832521	1,231776	0,978319	1,181085

Πίνακας 5.13 Συγκεντρωτική ανάλυση αποτελεσμάτων

Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται από τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης OPT. Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, οι τιμές αυτές είναι:

Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΑΧ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ OPT	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	
		a	b
1	1,182102913	5	5

Πίνακας 5.14 Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πειραμάτων

Τα γραφικά αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης όπου έχουμε την μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης έχουν παρουσιαστεί στα σχήματα 5.7 – 5.11.

5.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΟΝΑ (2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ)

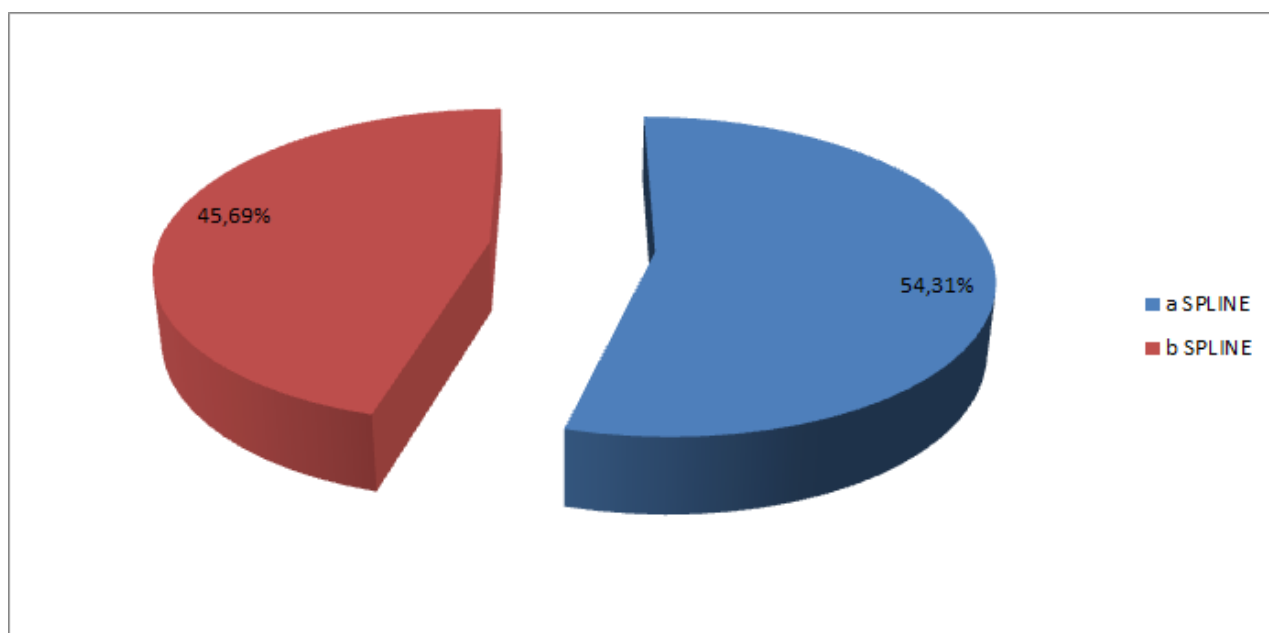
Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο ανάλυσης διασποράς (ΑΝΟΝΑ) για να υπολογίσουμε τους λόγους συμβολής των δύο (2) παραμέτρων. Η ανάλυση γίνεται με κώδικα Matlab ο οποίος παρατίθεται στο παράρτημα Δ (κώδικας 3) και αφορά τα 9 πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Έτσι, παίρνουμε τον ακόλουθο πίνακα:

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

Πίνακας 5.15 Λόγοι συμβολής των παραμέτρων

Από τα παραπάνω, παρατηρούμε ότι οι γωνίες, εκκίνησης και τερματισμού, έχουν σχεδόν την ίδια επίδραση στην ποιότητα του ρευστού στην έξοδο της μήτρας εκβολής και παρατηρούμε ότι οι βέλτιστες τιμές συμπίπτουν με τον πίνακα 5.4 της παραγράφου 5.3 και είναι οι ελάχιστες δυνατές σύμφωνα με τους γεωμετρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς, δηλαδή: $a_{OPT} = 5^\circ$, $b_{OPT} = 5^\circ$

Παρακάτω παραθέτουμε τα ποσοστά των λόγων συμβολής σε γράφημα Excel, (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.13 Λόγοι συμβολής παραμέτρων σε γράφημα τύπου “πίτας”

5.9 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Συνοψίζοντας τις σειρές πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν συγκεντρώνουμε τα εξής αποτελέσματα:

- *1^η σειρά πειραμάτων (L36, 5 παράμετροι)*

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ	ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
Υ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	9	2,20%
Χ	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	30	85,90%
f	ΜΕΓΙΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (%)	20	3,76%
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5	4,17%
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5	3,97%

- *2^η σειρά πειραμάτων (L36, 4 παράμετροι)*

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ	ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
Υ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΔΙΟΥ ΑΡΑΧΝΗΣ (mm)	9	27,84%
f	ΜΕΓΙΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (%)	20	30,02%
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	15	27,66%
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	10	14,48%

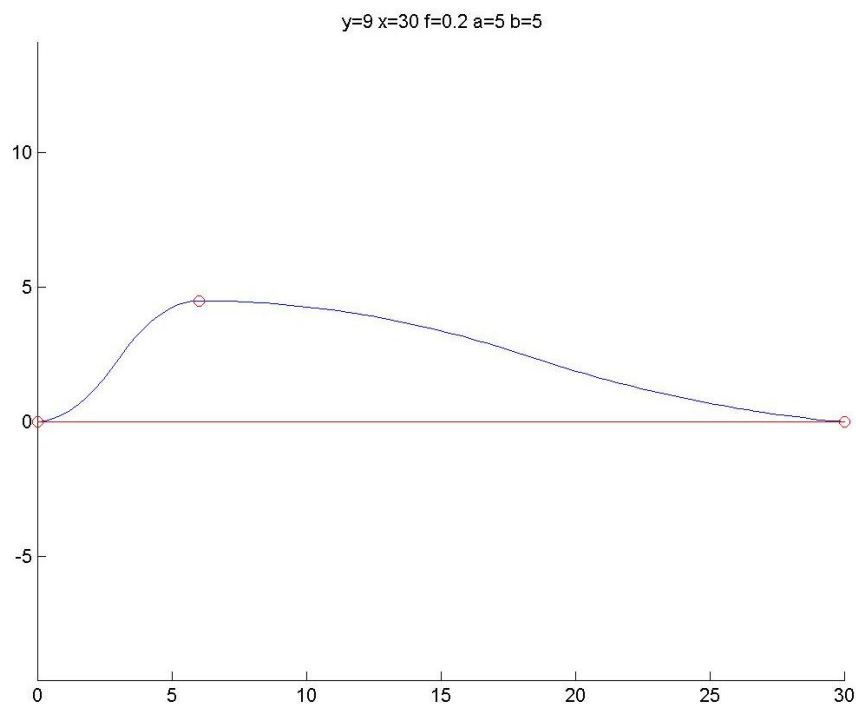
- *3^η σειρά πειραμάτων (L9, 2 παράμετροι)*

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ	ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
a	ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5	54,31%
b	ΓΩΝΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ SPLINE (°)	5	45,69%

Από τις τρεις σειρές πειραμάτων, λαμβάνουμε τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που καθορίζουν τη γεωμετρία του ποδιού της αράχνης και αυτές είναι:

ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ				
Y	X	f	a	b
9	30	0,2	5	5

Τα γραφικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις παραπάνω βέλτιστες τιμές έχουν παρουσιαστεί στα σχήματα 5.7 – 5.11, ενώ η καμπύλη spline του ποδιού είναι η παρακάτω:



Παρατήρηση

Η βελτιστοποιημένη μήτρα διαφέρει από την αρχική μόνο σε 3 μέρη, στην κεφαλή της αράχνης, και στη μήτρα για σωλήνα Φ32 (εσωτερικό και εξωτερικό τμήμα). Τα κατασκευαστικά σχέδια των τριών νέων τμημάτων παρατίθενται στο παράρτημα Β και είναι σχεδιασμένα με το Autodesk Inventor.

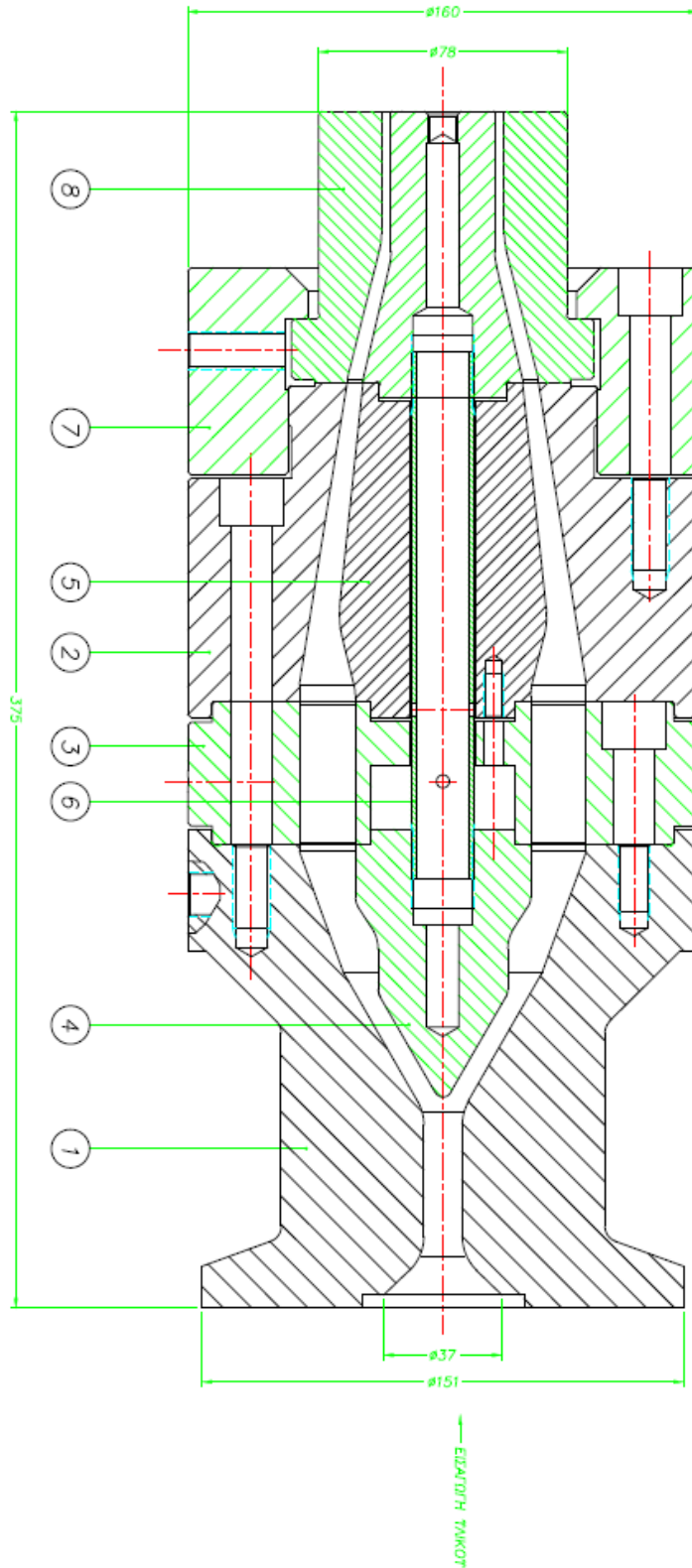
- Ο Η/Υ που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των προσομοιώσεων έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Intel® Core™ 2 Quad CPU Q8800 2.56 GHz
 - 4.00 GB RAM (DDR2-1066)
 - NVIDIA GeForce GTS 250, 1 GB RAM

Οι χρόνοι προσομοιώσεων ενδέχεται να διαφέρουν αν εκτελεστούν από Η/Υ με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

- Παρατηρούμε ότι οι βέλτιστες παράμετροι συμπίπτουν με την πρώτη σειρά L36 που πραγματοποιήθηκε. Εν τούτοις έπρεπε να πραγματοποιηθούν και οι υπόλοιπες σειρές για να έχουμε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα μιας και ορισμένες παράμετροι είχαν μεγάλη επίδραση και ενδεχομένως επηρέαζαν σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα, οπότε και έπρεπε να επαναλάβουμε τα πειράματα χωρίς αυτές.
- Ένα άλλο πολύ ενδιαφέρον θέμα έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει ο έλεγχος σε αντοχή της μήτρας εκβολής, στη πίεση από το ρευστό. Τοποθετώντας τις κατάλληλες στηρίξεις, θα εκτελούσαμε προσομοίωση της μήτρας με κάποιο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων: ANSYS Workbench, Comsol κτλ, για να ελέγξουμε, κατά πόσο το υλικό αντέχει τόσο στην αρχική μήτρα του εργαστηρίου όσο και στη βέλτιστη μήτρα εκβολής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

6.1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ (AUTOCAD)

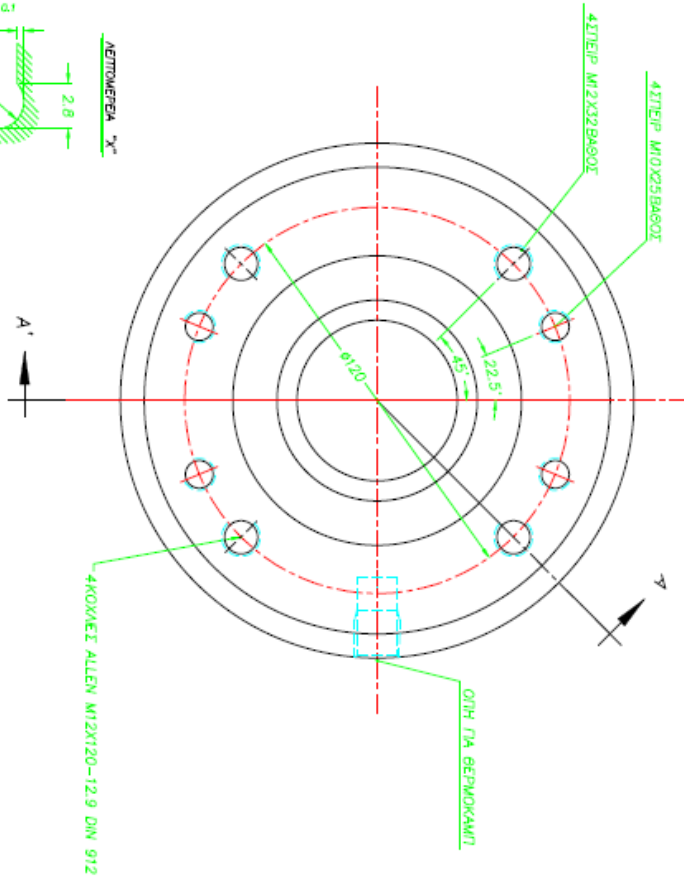
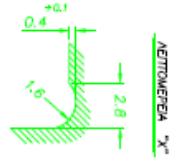
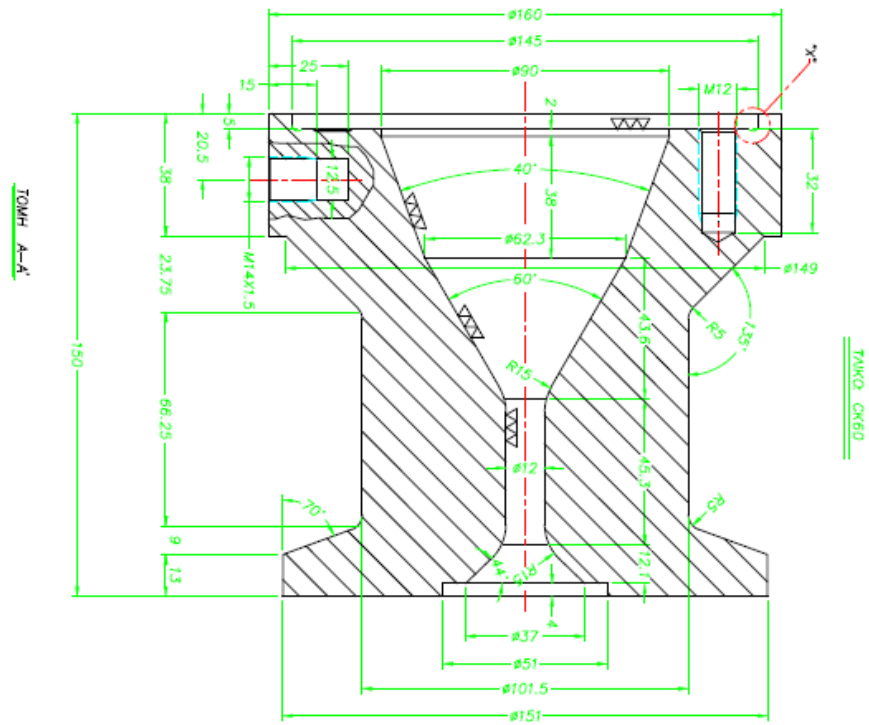


(VVV)
 (VVV)
 ΚΟΤΟ ΒΕ ΣΟΛΙΔ

Ποσ.	Ονομασία	Τύπος	Μέγεθος	Μετ./Τμήμ.	Μετ./Μετ.	Μετ./Μετ.	Μετ./Μετ.	Μετ./Μετ.	Μετ./Μετ.
1	ΜΗΤΡΑ ΓΙΑ ΣΥΛΛΗΨΗ ΚΑΥΣ	51.52	8						
1	ΔΙΑΤΗΛΟΣ ΣΤΡΩΣΤΗΡΙΟΥ ΜΗΤΡΑΣ	51.52	7						
1	ΣΤΡΩΣΤΗ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΜΗΤΡΑΣ	51.52	6						
1	ΠΡΩΤΟΛΟΓΗ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΜΗΤΡΑΣ	51.52	5						
1	ΚΟΝΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ	51.52	4						
1	ΑΡΑΧΝΗ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ	51.52	3						
1	ΣΥΛΛΗΨΗ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ	51.52	2						
1	ΛΑΜΙΝΕΣ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ	51.52	1						

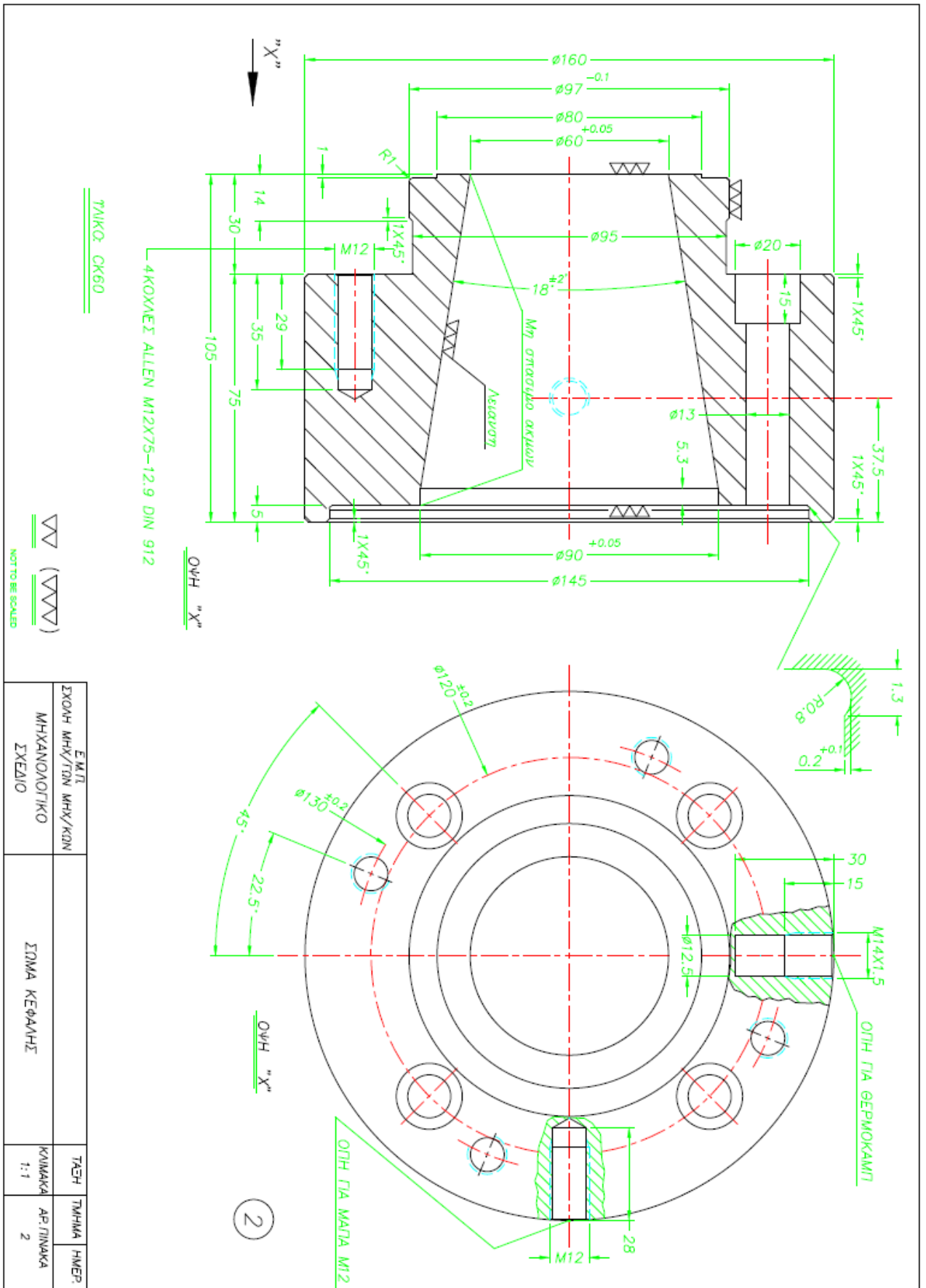
Ε.Μ.Π.
 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
 ΣΧΕΔΙΟ
 ΓΕΝ. ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ ΜΕ ΑΡΑΧΝΗ

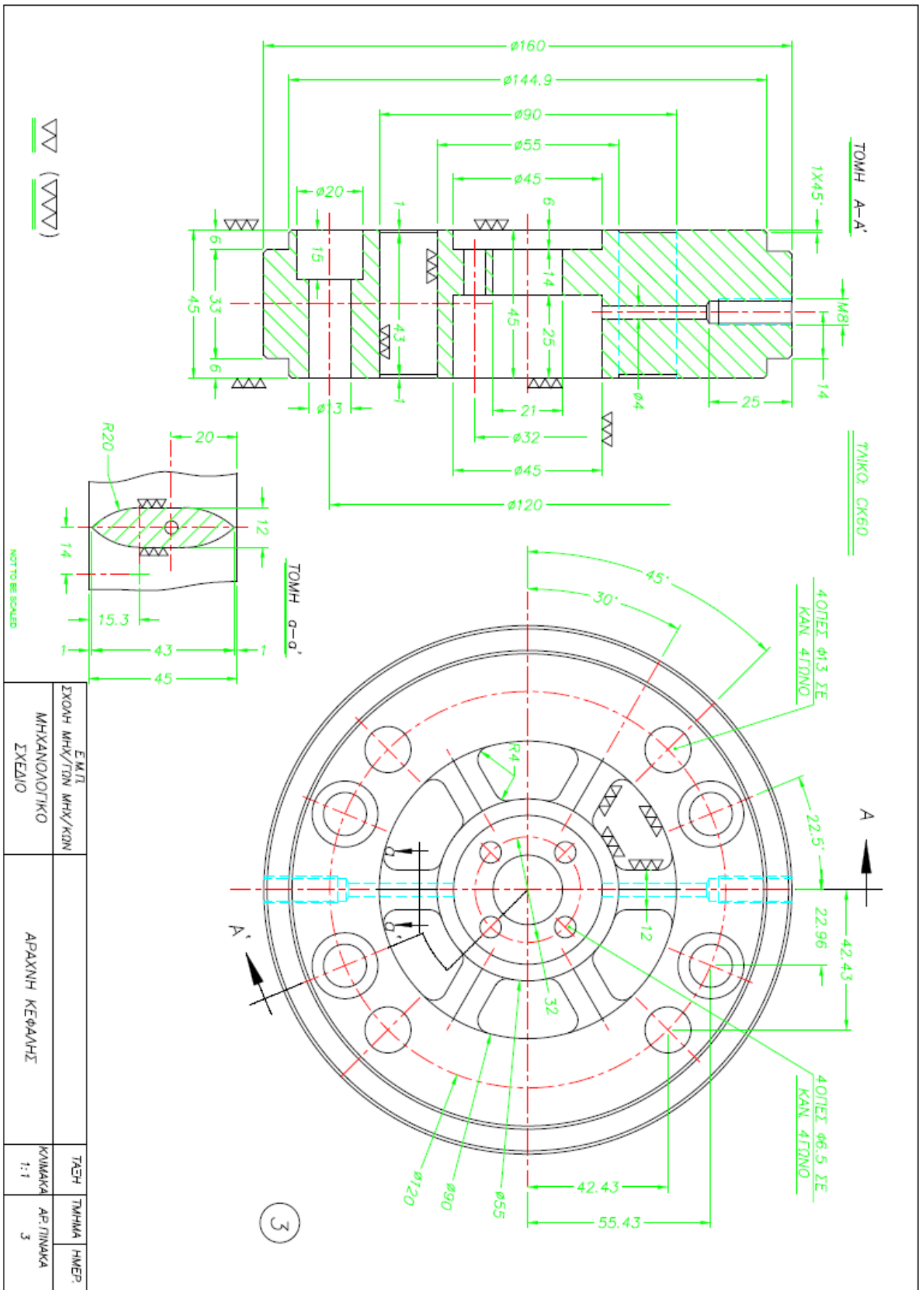
ΤΑΞΗ
 ΤΕΧΝΙΚΑ
 ΑΡΙΘΜΟΣ
 0

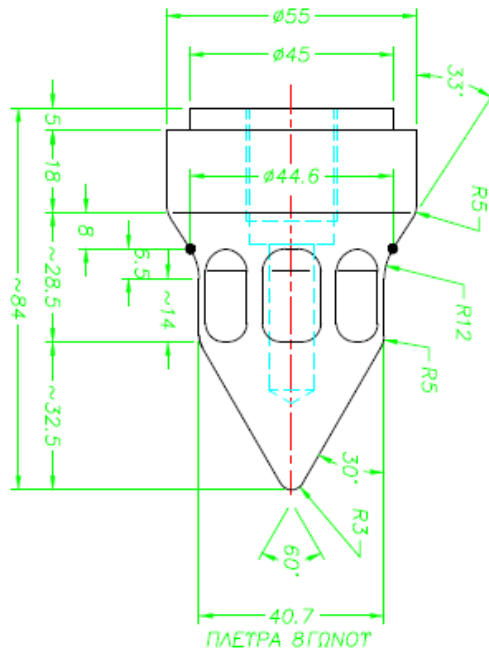
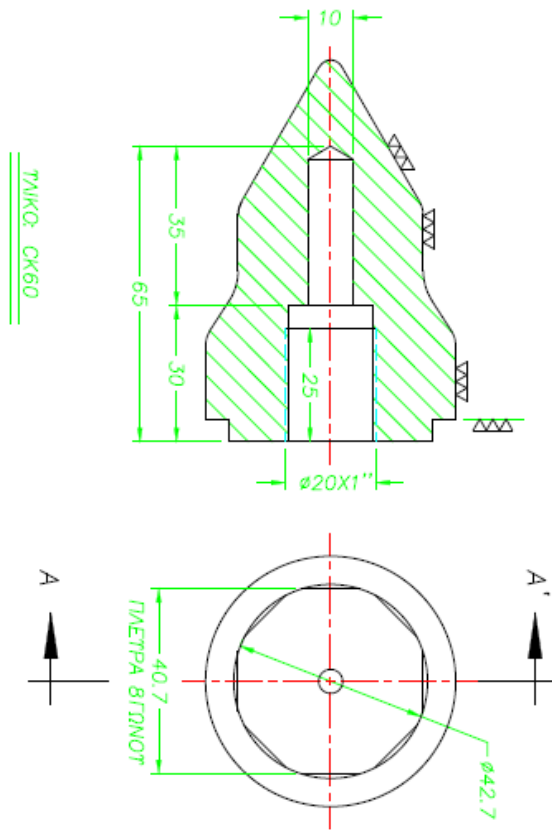


Ε.Μ.Π.	Ε.Μ.Π.
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧ./ΓΩΝ ΜΗΧ./ΚΩΝ	ΤΜΗΜΑ ΤΜΗΜΑ ΗΜΕΡ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ	ΚΟΙΝΩΝΙΑ ΔΕ ΠΡΩΜΑ
ΣΧΕΔΙΟ	1:1
	1

1



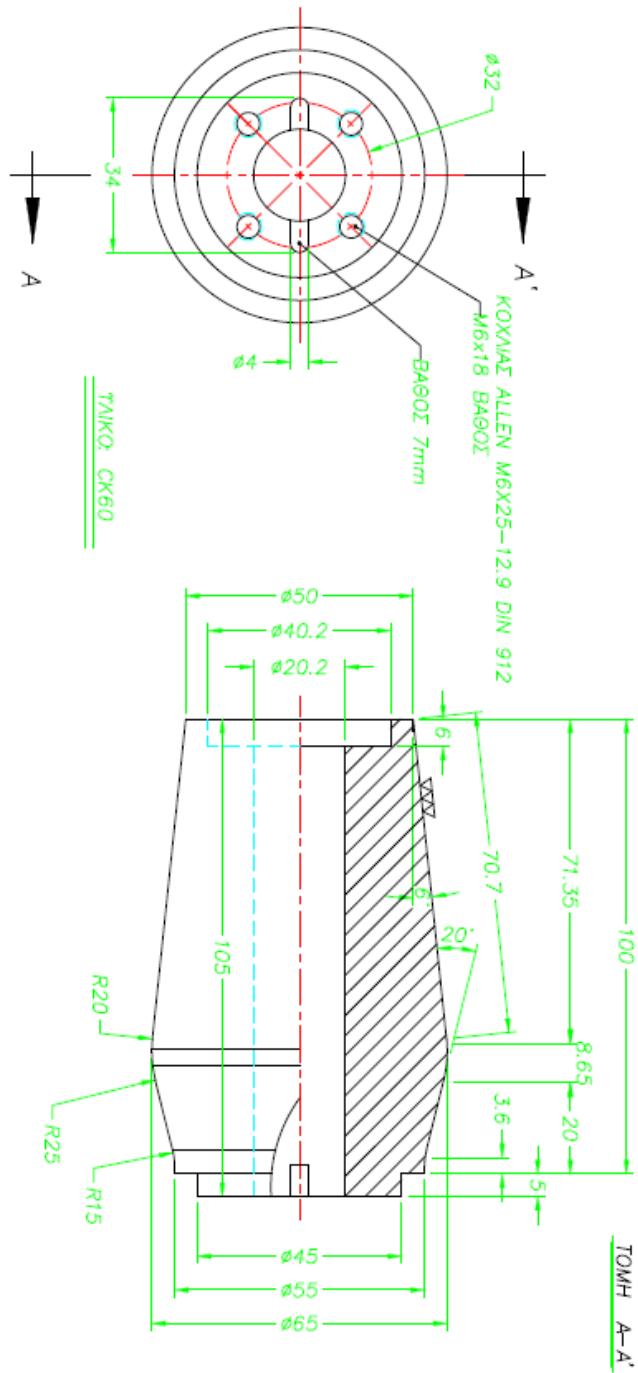




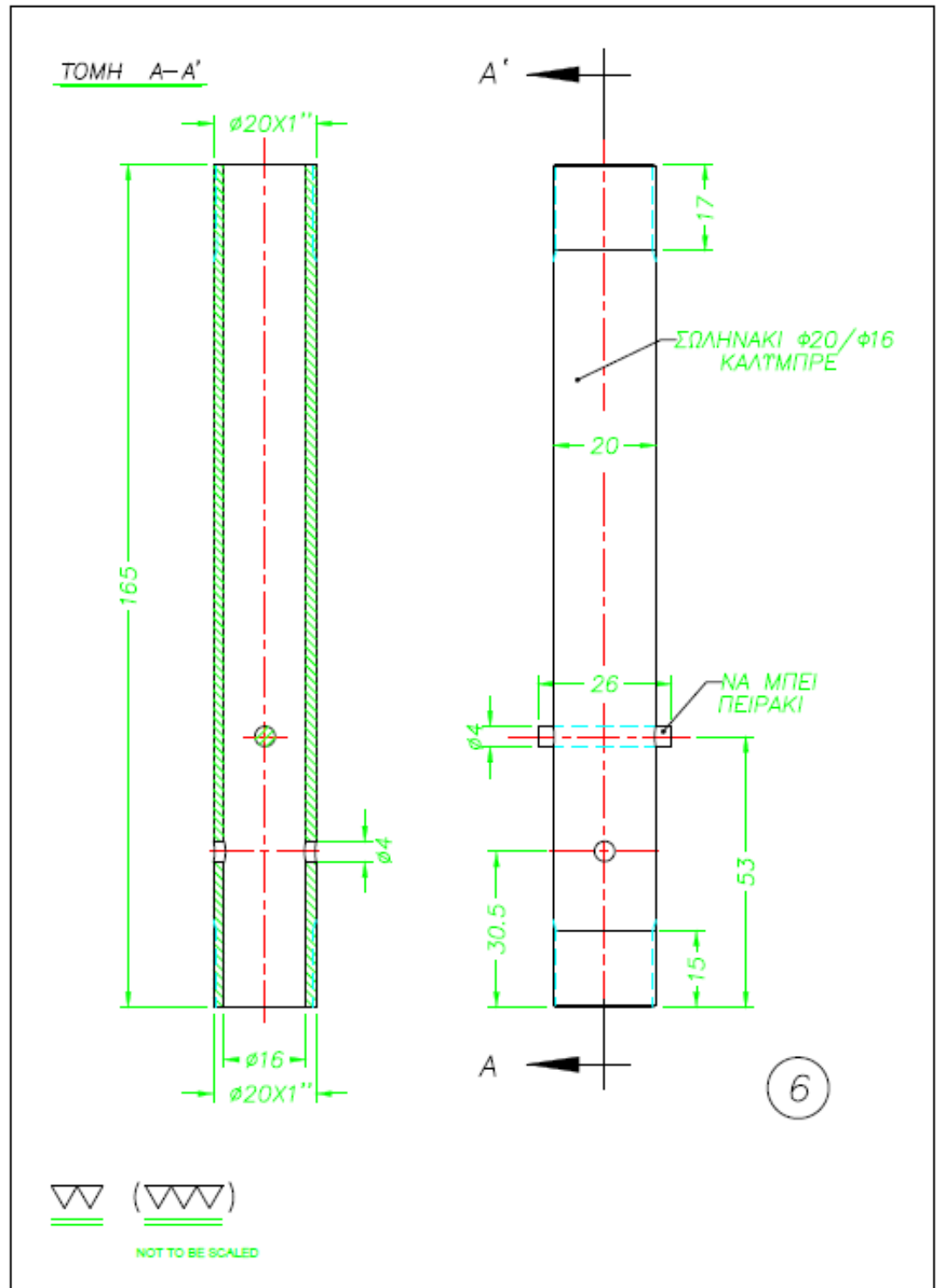
NOT TO BE SCALED

ΕΜ.Π. ΜΗΧ/ΤΕΧΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ	ΣΧΟΛΗ ΜΗΧ/ΤΕΧΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ	ΤΑΞΗ	ΤΜΗΜΑ	ΗΜΕΡ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΚΩΝΟΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΤ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΚΩΜΑΚΑ 1:1	ΑΡ ΠΙΝΑΚΑ 4	

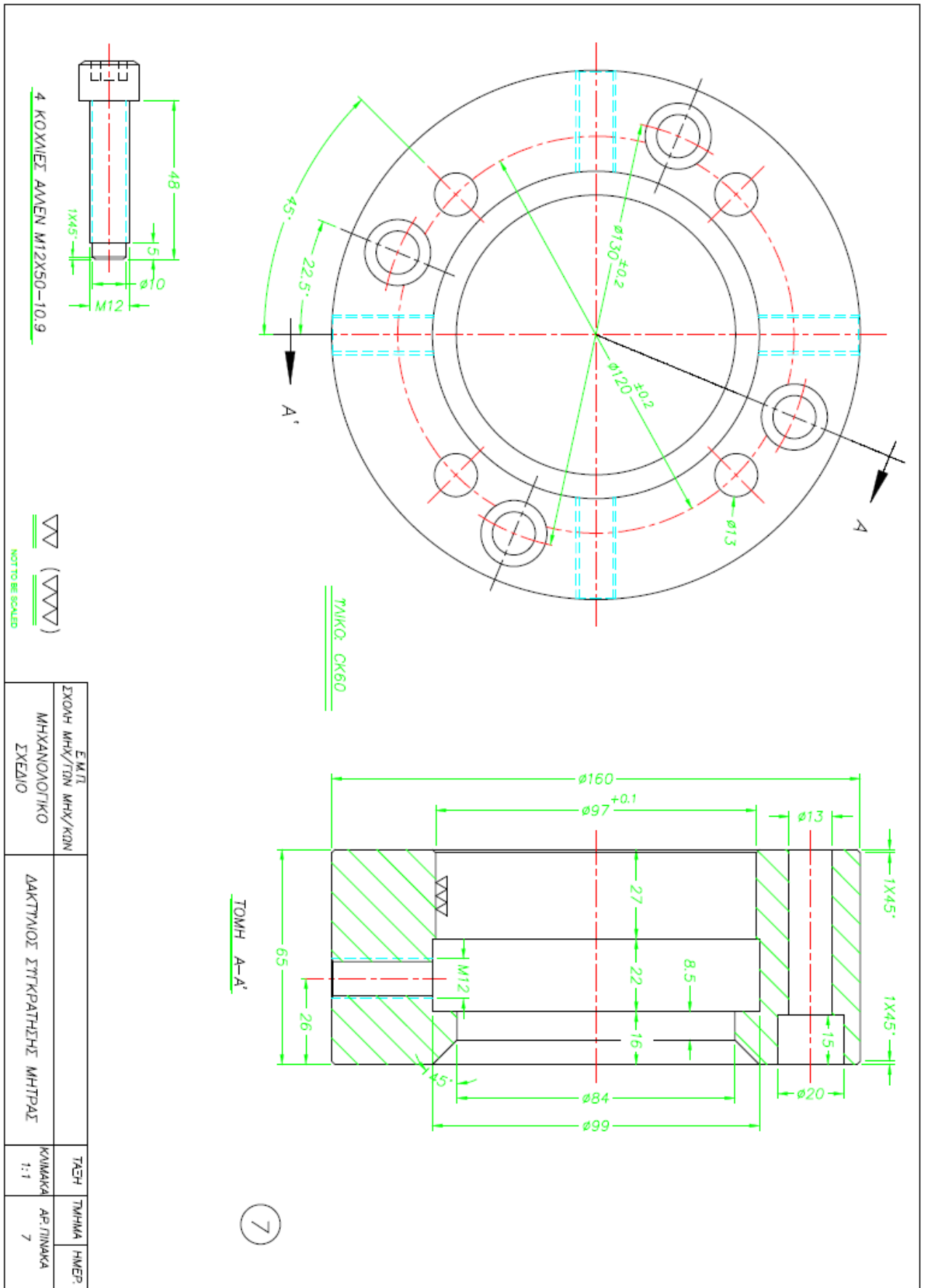
4

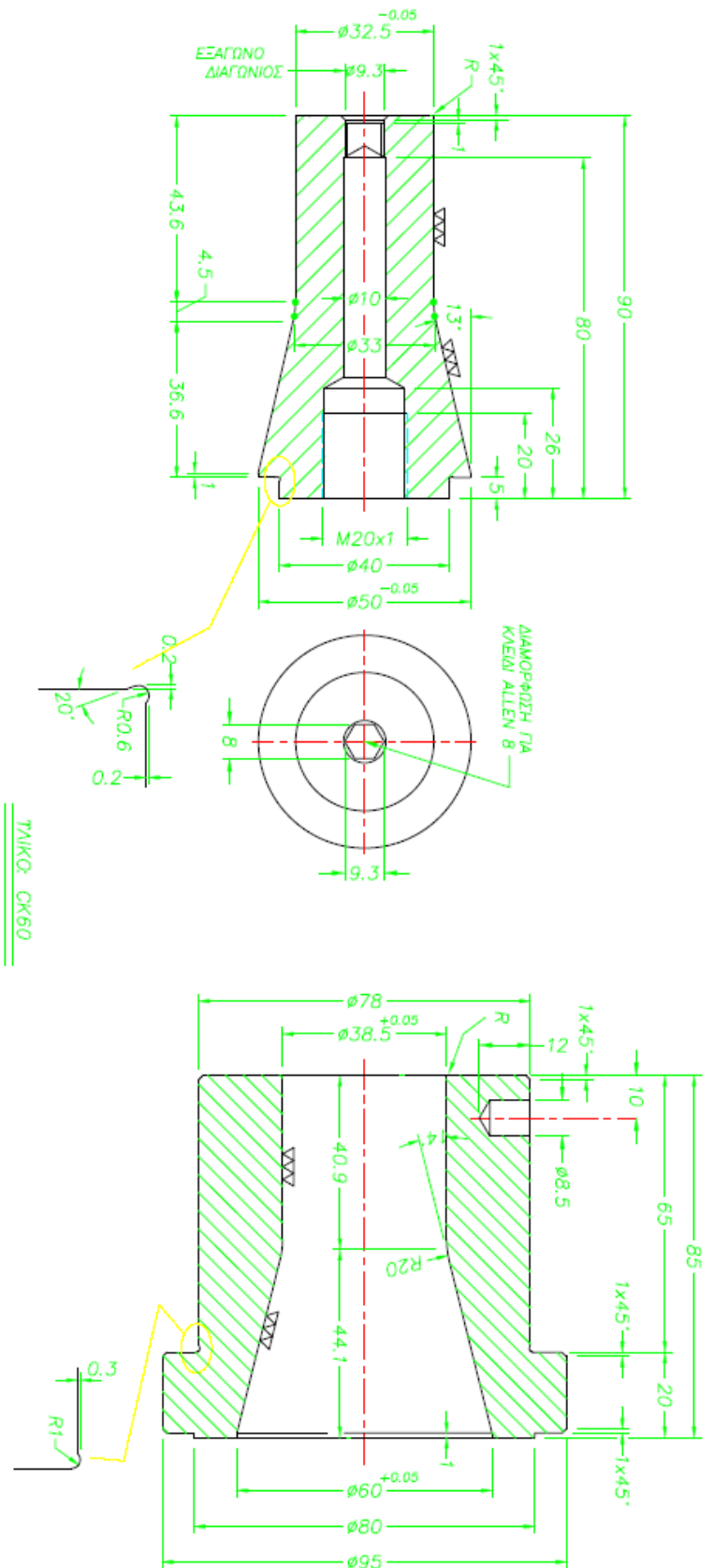


ΕΜΠ.	ΕΜΠ.	ΤΑΞΗ	ΤΜΗΜΑ	ΗΜΕΡ.
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧ/ΤΣΜ ΜΗΧ/ΚΩΝ	ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ	ΚΑΜΑΚΑ	ΑΡ ΠΙΝΑΚΑ	5
ΣΧΕΔΙΟ	ΠΡΟΔΟΧΗ ΑΡΣΕΝΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ	1:1		



Ε.Μ.Π. ΣΧΟΛΗ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ		ΤΑΞΗ 5	ΤΜΗΜΑ ΚΑΤ/ΣΤΟΝ	ΗΜΕΡ. 6
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΣΤΗΡΙΞΗ ΑΡΣΕΝΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ	ΚΛΙΜΑΚΑ 1:1	ΑΡ. ΠΙΝΑΚΑ 6	



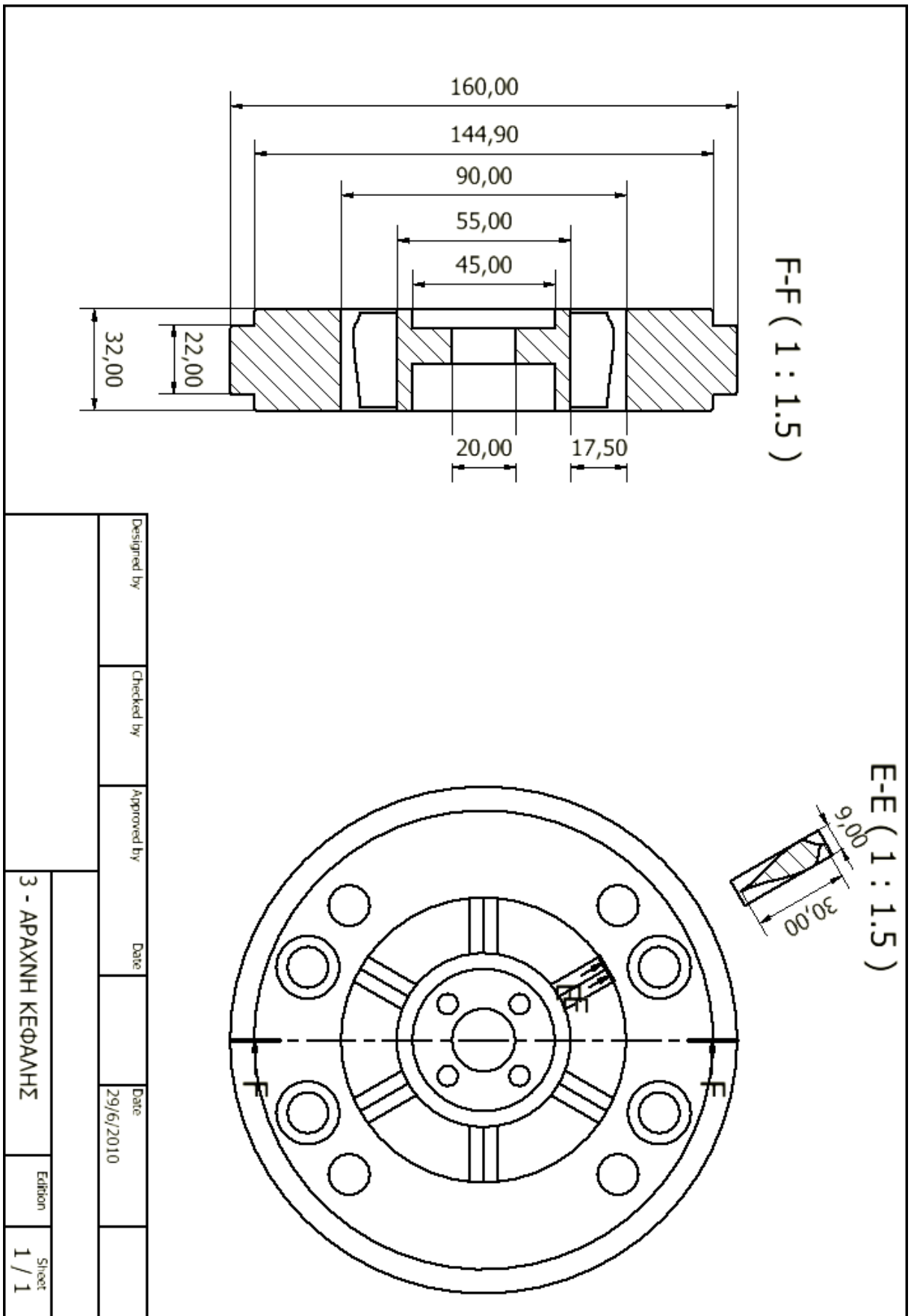


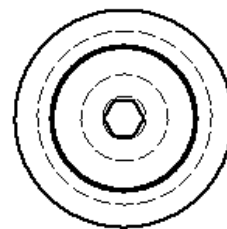
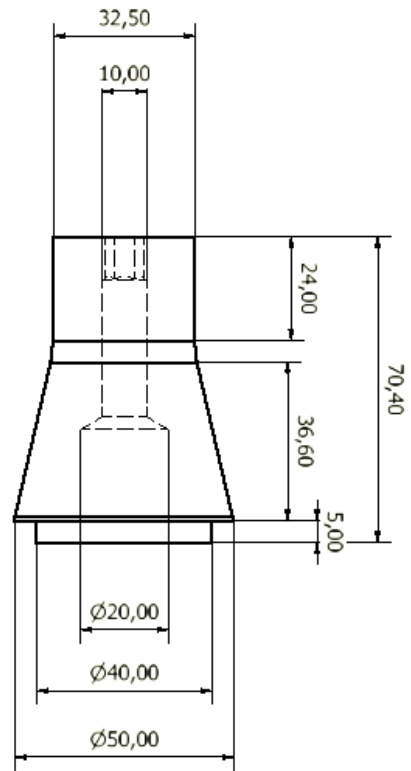
NOT TO BE SCALD

Ε.Μ.Π. ΣΧΟΛΗ ΜΗΧ/ΤΜΜ ΜΗΧ/ΚΩΝ	ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΜΗΤΡΑ ΓΙΑ ΣΩΛΗΝΑ Φ32	ΤΑΣΗ ΚΩΜΑΚΑ 1:1	ΤΜΗΜΑ ΑΡ.ΤΜΗΜΑΤΑ 5	ΗΜΕΡ.
---------------------------------	------------------------	----------------------	-----------------------	--------------------------	-------

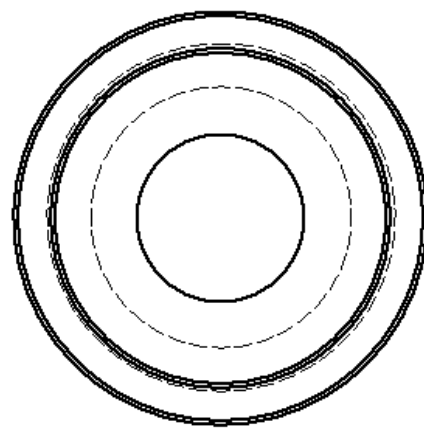
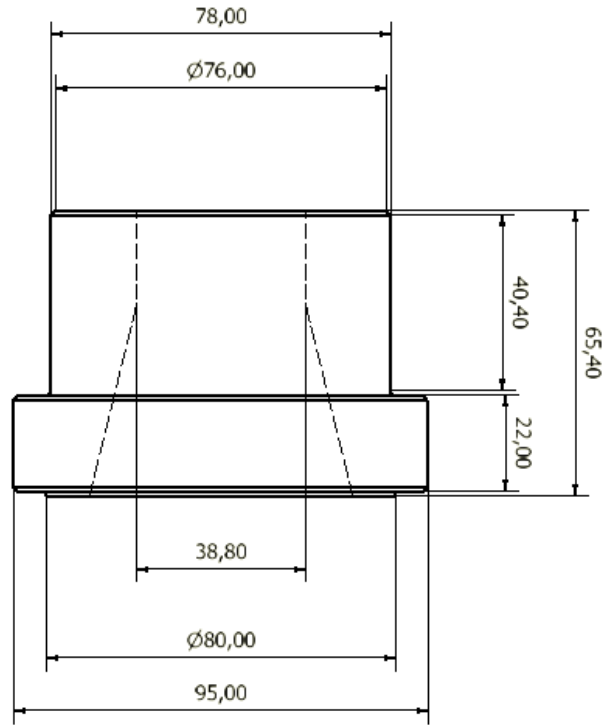
8

6.2 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΚΒΟΛΗΣ (INVENTOR)





Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date
				29/6/2010
8 - ΜΗΤΡΑ ΓΙΑ ΣΩΛΗΝΑ Φ32 - ΕΣΣΟΤΕΡΗ				
ΕΜΦΩΛ. ΕΠΙΧΩΡ. Ο				



Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date
				29/6/2010
9 - ΜΗΤΡΑ ΓΙΑ ΣΩΛΗΝΑ Φ32 - ΕΞΟΓΓΕΥΜΑΤΟ				ΕΚΦΩΣΤΕΡΕΟ

6.3 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΑΙΝΙΟΥ 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	kg/m ³	958	ISO 1183
Mechanical properties			
Tensile test			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	h	13	SABIC method
Thermal properties			
Heat deflection temperature			ISO 75-2
at 1.80 MPa (HDT/A)	°C	48	
at 0.45 MPa (HDT/B)	°C	85	
Vicat softening temperature			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	

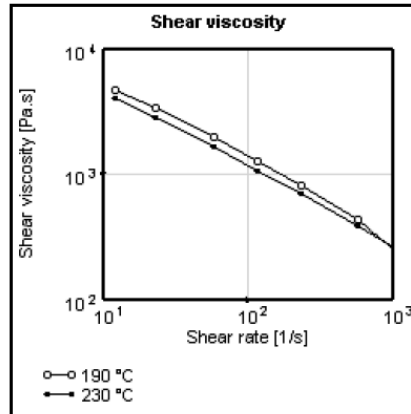
1) Compression moulding of test specimen according to ISO 1872-2
 2) Conditioning of test specimen: temp. 23 °C, relative humidity 50 %, 24 hours
 3) Speed of testing: 50 mm/min
 4) Test specimen according to ISO 527-2 type 1BA, thickness 2 mm
 5) Determined in Rhodacal-DS10 at 75 °C, 3 MPa, thickness 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

6.4 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΚΩΔΙΚΕΣ MATLAB

Παρακάτω παρατίθενται οι κώδικες Matlab που χρησιμοποιήθηκαν κατά τα διάφορα στάδια της εργασίας.

6.4.1 ΚΩΔΙΚΑΣ 1: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΜΠΥΛΩΝ SPLINES ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ ΤΗΣ ΑΡΑΧΝΗΣ

```
% CREATES DIFFERENT SPLINES ACCORDING TO SPECIFIC PARAMETERS
% SAVES SPLINES AS *.SLDCRV FORM TO BE READ BY SOLIDWORKS
%
clear
% Insert Parameters
%
y1=9;      % min curve hight
y3=12;     % max curve hight
x1=30;     % min curve length
x3=80;     % max curve length
f1=0.2;    % min position of curve maximum (as percentage of curve length)
f3=0.9;    % max position of curve maximum (as percentage of curve length)
a1=5;      % min forward attack angle
a3=15;     % max forward attack angle
b1=5;      % min aft attack angle
b3=15;     % max aft attack angle
y2=(y1+y3)/2;
x2=(x1+x3)/2;
f2=(f1+f3)/2;
a2=(a1+a3)/2;
b2=(b1+b3)/2;
ys=[y1 y2 y3];
xs=[x1 x2 x3];
fs=[f1 f2 f3];
as=[a1 a2 a3];
bs=[b1 b2 b3];
L36=[1 1 1 1 1 ; 1 1 1 2 2 ; 1 1 1 3 3 ; 2 2 2 1 1 ; 2 2 2 2 2 ; ...
     2 2 2 3 3 ; 3 3 3 1 1 ; 3 3 3 2 2 ; 3 3 3 3 3 ; 1 2 3 1 2 ; ...
     1 2 3 2 3 ; 1 2 3 3 1 ; 2 3 1 1 2 ; 2 3 1 2 3 ; 2 3 1 3 1 ; ...
     3 1 2 1 2 ; 3 1 2 2 3 ; 3 1 2 3 1 ; 1 3 2 1 3 ; 1 3 2 2 1 ; ...
     1 3 2 3 2 ; 2 1 3 1 3 ; 2 1 3 1 3 ; 2 1 3 3 2 ; 3 2 1 1 3 ; ...
     3 2 1 2 1 ; 3 2 1 3 2];
nsims=size(L36,1);
commonpath='C:\DIPLWMATIKI\L36_1\SPLINE\'; % path for Ilias
for k=1:nsims
    y=ys(L36(k,1));
    x=xs(L36(k,2));
    f=fs(L36(k,3));
    a=as(L36(k,4));
    b=bs(L36(k,5));
    da=tan(a*pi/180);
    db=tan(b*pi/180);
    spline=spapi(3,[0 0 f*x f*x x x],[0 da y/2 0 0 -db]);
    t=linspace(0,x,100);
    vals=fnval(spline,t);
    X(:,1)=t(1,:);
    Y(:,1)=vals(1,:);
    csvwrite([commonpath num2str(k) '\spline' num2str(k) '.sldcrv'],...
            [X,Y,zeros(size(X))]);
end
```

```

figure(k)
hold on
plot(t,vals)
plot([0 f*x x],[0 y/2 0],'or')
plot([0 x],[0 0],'r')
axis equal
hold off
title([' y=' num2str(y) ' x=' num2str(x) ' f=' num2str(f) ...
      ' a=' num2str(a) ' b=' num2str(b)]);
hgsave([commonpath num2str(k) '\figure' num2str(k)]);
figname=[commonpath num2str(k) '\figure' num2str(k)];
print('-djpeg',figname);
end

```

6.4.2 ΚΩΔΙΚΑΣ 2: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ COMSOL® with MATLAB®

```

% RUNS A BATCH OF COMSOL SIMULATIONS BASED ON DIFFERENT IGS GEOMETRY FILES
% POSTPROCESSING FOR VELOCITY AND TEMPERATURE HOMOGENEITY IS INTEGRATED
%
nsims=36; % number of simulations
currentpath=pwd;
commonpath='C:\DIPLWMATIKI\L36_1\EXTRUDER\'; % path for Ilias
% commonpath='G:\DIPLWMATIKI\EXTRUDER\'; % path for lab
postprocessing=zeros(nsims,1); % switch to 1's for postprocessing only
%postprocessing(1:2)=1;
ini=zeros(nsims,1); % all results are column vectors
% load results.mat;
thrustV=ini; Ums=ini; Uss=ini; Tms=ini; Tss=ini; snrUs=ini; snrTs=ini;
homogs=ini; simtimeV=ini;
for k=1:nsims;
% for k=23:23
    %% Control logic cell
    kappa=num2str(k);
    simpath=[commonpath kappa];
    igspath=[simpath '\FLOWSYM' kappa '.IGS'];
    if postprocessing(k)==0 % simulate
        tic
        try
            finersol;
        catch exception
            fem='error';
            disp(['error in sim #' kappa ' Continuing with next Sim'])
            simtime=toc
            continue
        end
        % Save results into .mat file
        cd(simpath);
        simtime=toc
        save(['bakfem' kappa], 'fem', 'simtime');
    else % check if simulation file exists and load it
        try
            cd(simpath);
            load(['bakfem' kappa]);
            disp(['Sim #' kappa ' loaded successfully.'])
        end
    end
end

```

```

        % Extend mesh
        fem.xmesh=meshextend(fem);
    catch exception
        disp(['Sim #' kappa ' does not exist. Continuing with next
Sim'])
        continue
    end
end
end
%-----
-----
%% Postprocessing cell
% Integrate for inlet thrust
thrust=postint(fem,'p', ...
    'unit','N', ...
    'recover','off', ...
    'dl',[36], ...
    'edim',2);
thrustV(k)=thrust;
simtimeV(k)=simtime;
%pinV(k)=pin;
%TinV(k)=Tin;
%% Homogeneities
% Plot in cross-section or along domain in outlet surface
figure(1);
hh1=postcrossplot(fem,2,[1],'surfdata','U_chns','Outtype','postdata');
title('Section plot of velocity (m/s) of outlet section');
hgsave('Usection');
print('-djpeg','Usection');
Ums(k)=mean(hh1.d);
Uss(k)=std(hh1.d);
snrUs(k)=10*log10((Ums(k)/Uss(k))^2);
%
%
% Plot in cross-section or along domain in outlet surface
figure(2);
hh2=postcrossplot(fem,2,[1],'surfdata','T','Outtype','postdata');
title('Section plot of temperature (K) of outlet section');
hgsave('Tsection');
print('-djpeg','Tsection');
Tms(k)=mean(hh2.d);
Tss(k)=std(hh2.d);
snrTs(k)=10*log10((Tms(k)/Tss(k))^2);
%
%
homogs(k)=0.8*snrUs(k)+0.2*snrTs(k);
%
%
%% Plot points of mesh
figure(3);
plot(hh1.p(1,:),hh1.p(2,:), '+');
title('Points of measurement');
hgsave('Pointplot');
print('-djpeg','Pointplot');
%
%% Plot velocity slices
figure(4);
postplot(fem, ...
    'slicedata',{'U_chns','cont','internal','unit','m/s'}, ...
    'slicelim',[0 0.01],...
    'slicexspacing',20, ...
    'sliceyspacing',0, ...

```

```

        'slicezspacing',0, ...
        'slicemap','jet(1024)', ...
        'title','Slice: Velocity field [m/s]', ...
        'grid','on');
hgsave('Uplot');
print('-djpeg','Uplot');
%% Plot pressure subdomain
figure(5);
postplot(fem, ...
    'tetdata',{'p','cont','internal','unit','Pa'}, ...
    'tetmap','jet(1024)', ...
    'tetkeep',1, ...
    'tetkeeptype','random', ...
    'title','Subdomain: Pressure [Pa]', ...
    'grid','on');
hgsave('Pplot');
print('-djpeg','Pplot');
%% Plot temperature subdomain
figure(6);
postplot(fem, ...
    'tetdata',{'T','cont','internal','unit','K'}, ...
    'tetmap','jet(1024)', ...
    'tetkeep',1, ...
    'tetkeeptype','random', ...
    'title','Subdomain: Temperature [K]', ...
    'grid','on');
hgsave('Tplot');
print('-djpeg','Tplot');
cd(currentpath);
%
end
%% save results
save results thrustV Ums Uss Tms Tss snrUs snrTs homogs simtimeV;
xltitles={'Ums' 'Uss' 'Tms' 'Tss' 'snrUs' 'snrTs' 'homogs' 'simtimeV'};
xlldata=[Ums Uss Tms Tss snrUs snrTs homogs simtimeV];
xldatac=num2cell(xlldata);
% xlres={xltitles{:,:}; xldatac{:,:}};
xlswrite('results',xldatac);
%-----EOF-----

% COMSOL MULTIPHYSICS MODEL M-FILE
% GENERATED BY COMSOL 3.5A (COMSOL 3.5.0.603, $DATE: 2010/06/03 17:02:19 $)

flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.5';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 603;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2010/06/03 17:02:19 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
% Import CAD data

```

```

garr = geomimport(igspath, ...
    'sdim',3);
[g1]=deal(garr{:});
g2=cadrepair(g1, ...
    'repairtol',1e-5);

% Geometry
g3=cadconvert(g2);

% Geometry

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g3};
s.name={'CO1'};
s.tags={'g3'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Constants
fem.const = {'Th','469', ...
    'Tin','469'};

% Constants
fem.const = {'Th','469', ...
    'Tin','469'};

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem, ...
    'hauto',3, ...
    'hmaxfac',[1,0.001]);

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'NavierStokes';
appl.module = 'CHEM';
appl.gporder = {4,2};
appl.cporder = {2,1};
appl.sshape = 2;
appl.assignsuffix = '_chns';
clear prop
prop.analysis='static';
prop.nonnewtonian='On';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.p0 = {0,0,'pin',0};
bnd.type = {'walltype','outlet','inlet','sym'};
bnd.intype = {'uv','uv','p','uv'};
bnd.ind = [2,1,4,4,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,4,1,1,1,1,1,1,1,1, ...
    1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.gporder = {{1;1;1;2}};
equ.rho = 750;
equ.cporder = {{1;1;1;2}};

```

```

equ.stabElmType = 'usesELM';
equ.type_visc = 'user';
equ.eta0 = 'eta';
equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'ConvCond';
appl.module = 'CHEM';
appl.sshape = 2;
appl.assignsuffix = '_chcc';
clear prop
prop.analysis='static';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm10'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q0','qc','T','T'};
bnd.T0 = {273.15,273.15,'Tin','Th'};
bnd.ind = [2,4,1,1,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,1,4,4,4,4,4,4,4,4, ...
          4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,3];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.eta = 'eta';
equ.C = 'cp';
equ.QviscOn = 1;
equ.rho = 750;
equ.init = 'Th';
equ.k = 'ka';
equ.stabElmType = 'usesELM';
equ.w = 'w';
equ.v = 'v';
equ.u = 'u';
equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
fem.appl{2} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Subdomain settings
clear equ
equ.ind = [1];
equ.dim = {'u','v','w','p','T'};

% Subdomain expressions
equ.expr = {'ka','-0.228+0.001467*T', ...
           'cp','924.76+3.88*T', ...
           'eta','A*(1+(B*sr_chns)^2)^(0.5*(-1+kat))', ...
           'A','5210*kouz', ...
           'B','0.058*kouz', ...
           'kat',0.28612, ...
           'kouz','exp(3170.459*(-0.002114165+1/T))'};
fem.equ = equ;

```


6.4.3 ΚΩΔΙΚΑΣ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΝΟΝΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ TAGUCHI L36

```

% ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΟΝΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ TAGUCHI L36
% ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ COMSOL%
%
% Εισαγωγή του πίνακα L36 του Taguchi
L36=[1 1 1 1 1 1 ; 1 1 1 1 2 2 ; 1 1 1 1 3 3 ; 1 2 2 2 1 1 ; 1 2 2 2 2 2
;...
1 2 2 2 3 3 ; 1 3 3 3 1 1 ; 1 3 3 3 2 2 ; 1 3 3 3 3 3 ; 2 1 2 3 1 2
;...
2 1 2 3 2 3 ; 2 1 2 3 3 1 ; 2 2 3 1 1 2 ; 2 2 3 1 2 3 ; 2 2 3 1 3 1
;...
2 3 1 2 1 2 ; 2 3 1 2 2 3 ; 2 3 1 2 3 1 ; 3 1 3 2 1 3 ; 3 1 3 2 2 1
;...
3 1 3 2 3 2 ; 3 2 1 3 1 3 ; 3 2 1 3 1 3 ; 3 2 1 3 3 2 ; 3 3 2 1 1 3
;...
3 3 2 1 2 1 ; 3 3 2 1 3 2];
nsims=size(L36,1);
%
% Πλήθος επαναλήψεων
p=3;
% Αριθμός επιπέδων k
k=3;
%
%% Δημιουργία του πίνακα y (36x3) με τις τιμές του COMSOL
load results1.mat;
y=zeros(nsims,p);
y(:,1)=Uss;
y(:,2)=y(:,1);
y(:,3)=y(:,1);
%
%% Ο τύπος της ANOVA για το OAT
%
% Συνολικός αριθμός όλων των αποτελεσμάτων
n=nsims*p;
% Υπολογισμός του τετραγώνου του αθροίσματος των κελιών του πίνακα y (Sy)^2
% Αθροισμα της κάθε στήλης του πίνακα y (1x6)
Sycol=sum(y);
% Ολικό άθροισμα του πίνακα y
Sy=sum(Sycol);
% Αθροισμα του πίνακα y στο τετράγωνο
Sy2b=Sy^2;
%
% Υπολογισμός του πίνακα του αθροίσματος τετραγώνων του πίνακα y: y^2
y2=zeros(nsims,p);
y2=y.^2;
% Αθροισμα της κάθε στήλης του πίνακα y^2 (1x6)
Sy2col=sum(y2);
% Ολικό άθροισμα του πίνακα y^2
Sy2=sum(Sy2col);
%
%
%% Υπολογισμός του διορθωτικού παράγοντα (ΔΠ)
DP=Sy2b/n;
%
% Υπολογισμός του Ολικού Αθροίσματος Τετραγώνων OAT
OAT=Sy2-DP;
%
% Υπολογισμός των ολικών βαθμών ελευθερίας

```

```

beol=n-1;
%
% Ο τύπος της ANOVA για τις κύριες επιδράσεις
%
% Υπολογισμός των αποτελεσμάτων για κάθε παράγοντα m
m=nsims/k*p;
%
% Υπολογισμός του αθροίσματος κάθε γραμμής του πίνακα y
yy=sum(y');
YY=yy';
%
%% Υπολογισμός του αθροίσματος τετραγώνων
%
% Αθροισμα τετραγώνων του παράγοντα A
ATA=( (yy(1,1)+yy(2,1)+yy(3,1)+yy(4,1)+yy(5,1)+yy(6,1)+yy(7,1)+yy(8,1) ...
      +yy(9,1))^2+(yy(10,1)+yy(11,1)+yy(12,1)+yy(13,1)+yy(14,1)+yy(15,1) ...
      +yy(16,1)+yy(17,1)+yy(18,1))^2+(yy(19,1)+yy(20,1)+yy(21,1)+yy(22,1) ...
      +yy(23,1)+yy(24,1)+yy(25,1)+yy(26,1)+yy(27,1))^2)/m-DP;
%
% Αθροισμα τετραγώνων του παράγοντα B
ATB=( (yy(1,1)+yy(2,1)+yy(3,1)+yy(10,1)+yy(11,1)+yy(12,1)+yy(19,1) ...
      +yy(20,1)+yy(21,1))^2+(yy(4,1)+yy(5,1)+yy(6,1)+yy(13,1)+yy(14,1) ...
      +yy(15,1)+yy(22,1)+yy(23,1)+yy(24,1))^2+(yy(7,1)+yy(8,1)+yy(9,1) ...
      +yy(16,1)+yy(17,1)+yy(18,1)+yy(25,1)+yy(26,1)+yy(27,1))^2)/m-DP;
%
% Αθροισμα τετραγώνων του παράγοντα C
ATC=( (yy(1,1)+yy(2,1)+yy(3,1)+yy(16,1)+yy(17,1)+yy(18,1)+yy(22,1) ...
      +yy(23,1)+yy(24,1))^2+(yy(4,1)+yy(5,1)+yy(6,1)+yy(10,1)+yy(11,1) ...
      +yy(12,1)+yy(25,1)+yy(26,1)+yy(27,1))^2+(yy(7,1)+yy(8,1)+yy(9,1) ...
      +yy(13,1)+yy(14,1)+yy(15,1)+yy(19,1)+yy(20,1)+yy(21,1))^2)/m-DP;
%
% Αθροισμα τετραγώνων του παράγοντα D
ATD=( (yy(1,1)+yy(2,1)+yy(3,1)+yy(13,1)+yy(14,1)+yy(15,1)+yy(25,1) ...
      +yy(26,1)+yy(27,1))^2+(yy(4,1)+yy(5,1)+yy(6,1)+yy(16,1)+yy(17,1) ...
      +yy(18,1)+yy(19,1)+yy(20,1)+yy(21,1))^2+(yy(7,1)+yy(8,1)+yy(9,1) ...
      +yy(10,1)+yy(11,1)+yy(12,1)+yy(22,1)+yy(23,1)+yy(24,1))^2)/m-DP;
%
% Αθροισμα τετραγώνων του παράγοντα E
ATE=( (yy(1,1)+yy(4,1)+yy(7,1)+yy(10,1)+yy(13,1)+yy(16,1)+yy(19,1) ...
      +yy(22,1)+yy(25,1))^2+(yy(2,1)+yy(5,1)+yy(8,1)+yy(11,1)+yy(14,1) ...
      +yy(17,1)+yy(20,1)+yy(23,1)+yy(26,1))^2+(yy(3,1)+yy(6,1)+yy(9,1) ...
      +yy(12,1)+yy(15,1)+yy(18,1)+yy(21,1)+yy(24,1)+yy(27,1))^2)/m-DP;
%
% Αθροισμα τετραγώνων του παράγοντα F
ATF=( (yy(1,1)+yy(4,1)+yy(7,1)+yy(12,1)+yy(15,1)+yy(18,1)+yy(20,1) ...
      +yy(23,1)+yy(26,1))^2+(yy(2,1)+yy(5,1)+yy(8,1)+yy(10,1)+yy(13,1) ...
      +yy(16,1)+yy(21,1)+yy(24,1)+yy(27,1))^2+(yy(3,1)+yy(6,1)+yy(9,1) ...
      +yy(11,1)+yy(14,1)+yy(17,1)+yy(19,1)+yy(22,1)+yy(25,1))^2)/m-DP;
%
%% Βαθμοί ελευθερίας των παραγόντων A, B, C, D, E, F
be=k-1;
%
% Μέσο άθροισμα τετραγώνων του παράγοντα A
MATA=ATA/be;
%
% Μέσο άθροισμα τετραγώνων του παράγοντα B
MATB=ATB/be;
%
% Μέσο άθροισμα τετραγώνων του παράγοντα C
MATC=ATC/be;
%

```

```

% Μέσο άθροισμα τετραγώνων του παράγοντα D
MATD=ATD/be;
%
% Μέσο άθροισμα τετραγώνων του παράγοντα E
MATE=ATE/be;
%
% Μέσο άθροισμα τετραγώνων του παράγοντα F
MATF=ATF/be;
%
% Άθροισμα τετραγώνων του υπολοίπου
ATY=OAT-ATA-ATB-ATC-ATD-ATE-ATF;
%
% Βαθμοί ελευθερίας του υπολοίπου
beY=beo1-be-be-be-be-be-be;
%
% Μέσο άθροισμα τετραγώνων του υπολοίπου
MATY=ATY/beY;
%
%% Υπολογισμός του F-Λόγου
%
% Υπολογισμός του F-Λόγου του παράγοντα A
FA=MATA/MATY;
%
% Υπολογισμός του F-Λόγου του παράγοντα B
FB=MATB/MATY;
%
% Υπολογισμός του F-Λόγου του παράγοντα C
FC=MATC/MATY;
%
% Υπολογισμός του F-Λόγου του παράγοντα D
FD=MATD/MATY;
%
% Υπολογισμός του F-Λόγου του παράγοντα E
FE=MATE/MATY;
%
% Υπολογισμός του F-Λόγου του παράγοντα F
FF=MATF/MATY;
%
%% Υπολογισμός της καθαρής διασφοράς
%
% Καθαρή διασφορά του παραγοντα A
AATA=ATA-be*MATY;
%
% Καθαρή διασφορά του παραγοντα B
AATB=ATB-be*MATY;
%
% Καθαρή διασφορά του παραγοντα C
AATC=ATC-be*MATY;
%
% Καθαρή διασφορά του παραγοντα D
AATD=ATD-be*MATY;
%
% Καθαρή διασφορά του παραγοντα E
AATE=ATE-be*MATY;
%
% Καθαρή διασφορά του παραγοντα F
AATF=ATF-be*MATY;
%
%% Υπολογισμός του Λόγου συμβολής ΛΣ
%
% Υπολογισμός του λόγου συμβολής του παράγοντα A

```

$$LSA = (AATA/OAT) * 100$$

%

% Υπολογισμός του λόγου συμβολής του παράγοντα Β

$$LSB = (AATB/OAT) * 100$$

%

% Υπολογισμός του λόγου συμβολής του παράγοντα C

$$LSC = (AATC/OAT) * 100$$

%

% Υπολογισμός του λόγου συμβολής του παράγοντα D

$$LSD = (AATD/OAT) * 100$$

%

% Υπολογισμός του λόγου συμβολής του παράγοντα E

$$LSE = (AATE/OAT) * 100$$

%

% Υπολογισμός του λόγου συμβολής του παράγοντα F

$$LSF = (AATF/OAT) * 100$$

6.5 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.Α. Γ. Μάμαλης, «Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», εκδόσεις «ΦΟΙΒΟΣ», Αθήνα, 1996
- 2.Δ. Πρίγκιπας, «Επίδραση πίεσης και θερμοκρασίας στη παραγωγή πλαστικών σωλήνων», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009
- 3.Ε. Β. Μίσσου, «Αναλυτική και αριθμητική προσομοίωση εκβολής πλαστικών σωλήνων», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2008
- 4.Ι. Σιμιτζής, «Τεχνολογία Πολυμερών», Ε.Μ.Π., 1999
- 5.Κ. Πάσσαρης, «Βελτιστοποίηση μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα με τη μέθοδο Taguchi», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009
- 6.Μ. Καμπούρης, «Επεξεργασία Πολυμερών», Ε.Μ.Π., 1983
- 7.Ν. Ε. Δήμου, «Τρισδιάστατη προσομοίωση εκβολής πλαστικού σωλήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2010
- 8.Ν. Λογοθέτης, «Μάνατζμεντ Ολικής Ποιότητας: Από τον Deming στον Taguchi και το SPC», Εκδόσεις TQM HELLAS INTERBOOKS, 2005
- 9.Π. Κ. Πισινάρας, «Μελέτη της μορφοποίησης πολυμερούς με τη μέθοδο της εκβολής», Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2006

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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