



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΣΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΜΕ ΤΗ
ΒΟΗΘΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Σαπουνάς Φ. Ισίδωρος

Επιβλέπων : Γ.- Χ. Βοσνιάκος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο αλλά και πιο σημαντικό κομμάτι στην εκπαίδευση ενός μηχανικού. Είναι το σημείο που μετατρέπει έναν φοιτητή σε μηχανικό, ο οποίος έχει ακόμα πολλά να μάθει αλλά γνωρίζει πλέον πώς να αντιμετωπίσει τα διάφορα προβλήματα βασιζόμενος στις δυνάμεις του.

Σε αυτό το τελευταίο κομμάτι των σπουδών μου, είχα δίπλα μου τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γ. Βοσνιάκο. Είναι ο πρώτος άνθρωπος που θα ήθελα να ευχαριστήσω για την υπομονή, τον χρόνο που αφιέρωσε σε μένα και για τη δυνατότητα της εκπόνησης της εργασίας μου σε αυτόν τον ενδιαφέροντα τομέα, που μου προσέφερε. Ο τρόπος σκέψης του σύγχρονου μηχανικού στην οργάνωση και μεθόδευση της διαδικασίας σχεδιασμού πειραμάτων ήταν ένα από τα κυριότερα πράγματα που προσπάθησε να μου μεταφέρει. Γενικότερα, η συνεργασία μου μαζί του ήταν ένα ξεχωριστό μάθημα για μένα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία Μπαζίγος για την αναδοχή του θέματος. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Μ. Λάμπρου, συνεργάτη της εταιρίας και οικογενειακό φίλο, που δίχως την στήριξη του δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Τέλος ευχαριστώ όλους τους ανθρώπους, φίλους και συνεργάτες, από τον χώρο της χύτευσης θερμοπλαστικών για την σημαντική βοήθεια που μου προσέφεραν στην κατανόηση του θέματος.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να δώσει χείρα βοήθειας σε εργαζόμενους στον τομέα της χύτευσης των θερμοπλαστικών πολυμερών. Πολλές φορές έχει συμβεί ώστε οι νέοι εργαζόμενοι που απασχολούνται σε εργοστάσια χύτευσης πολυμερών να αποζητούν μια μεθοδολογία σχετικά με τους χειρισμούς που θα κάνουν προκειμένου να επιλύσουν τα ποιοτικά προβλήματα που κατά καιρούς εμφανίζονται.

Το πρόβλημα εντοπίζεται στο ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμες μέθοδοι και οδηγίες που θα μπορούσε κανείς με σχετική ακρίβεια να οργανώσει τα πρώτα βήματα της παραγωγής του προς μελέτη προϊόντος, χωρίς ενδεχόμενες εκπλήξεις και προβλήματα. Ακόμα και σε οργανωμένες παραγωγές μπορεί να συμβεί ότι η αλλαγή μιας μόνο παραμέτρου με σκοπό την βελτίωση της διαδικασίας να οδηγήσει σε χειροτέρευση της ποιότητας. Δεν μπορεί να προϋπάρξει τελικά καμία ένδειξη ότι η αλλαγή μια ρύθμισης θα οδηγήσει σίγουρα σε βελτίωση της διαδικασίας. Ο έμπειρος τεχνικός συνήθως προχωρά ως ακολούθως, ελέγχει μια ρύθμιση την οποία θεωρεί ότι κατέχει και προσπαθεί με αλλαγή συνόλου των παραμέτρων παραγωγής να την βελτιστοποιήσει.

Αντικείμενο της εργασίας είναι να αποδείξει, ότι με το προγραμματισμό και τη προσομοίωση της διαδικασίας έγχυσης, με τη βοήθεια λογισμικών παγκοσμίου φήμης και χρήσης, μπορούν να καθορισθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της έγχυσης, τις οποίες ο χειριστής της μηχανής θα έχει στην διάθεση του, ώστε να επιτύχει μια αποτελεσματική ποιοτικά αλλά και ποσοτικά παραγωγή. Η προσπάθεια αυτή θα γίνει με βάση τα μέχρι σήμερα γνωστά εργαλεία και εμπειρία που συγκεντρώθηκε από την μελέτη ενός συγκεκριμένου προϊόντος και ενός υπάρχοντος καλουπιού. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν όπως το Solidworks και SW/PLASTICS περιέχουν πολλές εμπειρικές σχέσεις και προσεγγίσεις για καλύτερη ανάλυση και σχεδιασμό μητρών χύτευσης.

ABSTRACT

The purpose of this thesis «Simulation-based optimisation of process parameters in injection molding of polymers» is to give a help to people engaged in the injection molding of thermoplastic polymers field. It is usual that young workers employed in injection molding machines are seeking a methodology for handling, which they will apply to resolve quality disadvantages that occasionally appear in the produced object.

The problem is that there are no methods and instructions that someone could with accuracy arrange the first steps of production, without any surprises or problems. Even though in an organized production may happen that a change of a single parameter in order to improve the process can lead to lower quality. Eventually does not exist any indication which can prove that changing a setting would certainly lead to an improvement of the process. A skilled technician usually proceeds as the following steps: controls a regulation which is considered to be kept as standard value and trying to change all the other productions parameters in order to optimize the first one.

In this project we declare that with the planning and simulation of the injection process using software with worldwide use, the optimal values of the injection parameters can be defined painless. Then we can provide them to the machine operator, in order to have at his disposal everything he needs for an effective, a qualitative and a quantitative production. This effort will be based on so far known tools and experience gathered from the study of a particular product and an existing mold. The software which is used such as Solidworks and its add in program SW/PLASTICS contain many empirical formulas and approaches for better analysis and design of molds.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο σχημάτων.....	14
Ευρετήριο πινάκων	15
Ευρετήριο γραφημάτων.....	16
Ευρετήριο εικόνων	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 — ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 — ΧΥΤΕΥΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ ΕΚΧΥΣΗ.....	21
2.1. Βασικές έννοιες και ιδιότητες των πλαστικών.....	21
2.1.1. Η ιστορία των πλαστικών.....	21
2.1.2. Πλαστικό ως πρώτη ύλη	22
2.1.3. Πολυπροπυλένιο.....	24
2.1.4. Συμπεριφορά των πλαστικών σε σχέση με την θερμότητα	24
2.1.5. Πλαστικοποιημένη μάζα.....	25
2.2. Επεξεργασία πλαστικών με την μέθοδο της έγχυσης.....	30
2.2.1. Εισαγωγή.....	30
2.2.2. Ορολογία και βασικά μεγέθη έγχυσης.....	31
2.3. Μηχανή έγχυσης	31
2.3.1. Εισαγωγή.....	31
2.3.2. Βασικά στοιχεία μηχανών έγχυσης	32
2.3.3. Τύπος μηχανής έγχυσης.....	33
2.4. Γενικές αρχές καλουπιών μηχανών έγχυσης	34
2.5. Επεξεργασία των πλαστικών με την μέθοδο της ψύξης.....	39
2.5.1. Γενική έννοια της μεθόδου ψύξης.....	39
2.6. Απομάκρυνση των πλαστικών με την μέθοδο της εξώλκευσης	41
2.6.1. Γενική έννοια της μεθόδου εξώλκευσης	41
2.7. Απαιτήσεις κατά τον σχεδιασμό του υπό μελέτης καλουπιού	42
2.7.1. Εισαγωγή.....	42
2.7.2. Απαιτήσεις διαστασιολόγησης κατά τον σχεδιασμό του υπό μελέτη καλουπιού. 42	
2.7.2.1. Ρεολογικός Υπολογισμός	43
2.7.2.2. Θερμικός Υπολογισμός	46

2.7.2.3.	Μηχανικός Υπολογισμός.....	47
2.7.3.	Ποιοτικές απαιτήσεις πλαστικών προϊόντων	48
2.8.	Γενικά στοιχεία για τη διαδικασία χύτευσης θερμοπλαστικών.....	50
2.8.1.	Εισαγωγή.....	50
2.8.2.	Φάση πλαστικοποίησης θερμοπλαστικών σε μηχανή έκχυσης.....	50
2.8.3.	Φάση έκχυσης θερμοπλαστικών σε μηχανή έκχυσης.....	53
2.8.4.	Φάση τελικής διαμόρφωσης θερμοπλαστικών σε μηχανή έκχυσης.....	55
2.8.5.	Σύνοψη.....	57
2.9.	Ρυθμίσεις διαδικασίας χύτευσης θερμοπλαστικών	58
2.9.1.	Παράμετροι χύτευσης θερμοπλαστικών	58
2.9.2.	Προβλήματα κατά την διαδικασία της χύτευσης.....	60
2.9.2.1.	Λειψό αντικείμενο	62
2.9.2.2.	Ένωση υλικού.....	63
2.9.2.3.	Τυρβώδης ροή	64
2.9.2.4.	Φυσαλίδες	66
2.9.2.5.	Προέκταμα.....	67
2.9.2.6.	Συρρίκνωση-Τράβηγμα.....	68
2.9.2.7.	Παραμόρφωση.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 — ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΚΧΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		74
3.1.	Σχεδιασμός προϊόντος.....	74
3.1.1.	Εισαγωγή.....	74
3.1.2.	Σχεδιαστικές λύσεις	75
3.2.	Σχεδιασμός καλουπιού.....	78
3.2.1.	Περιγραφή καλουπιού.....	78
3.2.2.	Περιγραφή συστήματος διανομής υλικού	82
3.2.2.1.	Μπουκαδούρα	83
3.2.2.2.	Δρομείς	83
3.2.2.3.	Πύλη εισόδου.....	86
3.2.3.	Περιγραφή σχεδιασμού καναλιών ψύξης	87
3.2.4.	Περιγραφή σχεδιασμού συστήματος εξώλκευσης.....	90
3.2.5.	Τελικές μετατροπές στο καλούπι	92
3.3.	Λογισμικό προσομοίωσης.....	94
3.3.1.	Εισαγωγή.....	94

3.3.2.	Πλεγματοποίηση (MESH).....	95
3.3.2.1.	Shell Meshing.....	95
3.3.2.2.	Solid Meshing.....	97
3.3.3.	Εισαγωγή δεδομένων (INPUT).....	98
3.3.3.1.	Επιλογή τύπου πολυμερούς-ψυκτικού μέσου-καλουπιού-μηχανής.....	98
3.3.3.2.	Είσοδος τροφοδοσίας (Injection location).....	98
3.3.3.3.	Ρυθμίσεις φάσης πλήρωσης (Filling settings).....	99
3.3.3.4.	Ρυθμίσεις φάσης ψύξης (Cooling settings).....	99
3.3.3.5.	Ρυθμίσεις φάσης συγκράτησης (Packing settings).....	100
3.3.4.	Εκτέλεση ανάλυσης (RUN).....	100
3.3.4.1.	Πλήρωση (FLOW).....	101
3.3.4.2.	Ψύξη (COOL).....	102
3.3.4.3.	Συγκράτηση (PACK).....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 — ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....		104
4.1.	Αρχικές ενέργειες πειράματος πλήρωσης.....	104
4.2.	Μεταβλητές, σταθεροί παράγοντες και αποτελέσματα πειράματος πλήρωσης.....	106
4.2.1.	Μεταβλητές πειράματος πλήρωσης.....	107
4.2.2.	Σταθερές τιμές πειράματος πλήρωσης.....	108
4.2.3.	Επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα και τοποθέτηση των παραγόντων πειράματος πλήρωσης.....	109
4.2.4.	Αποτελέσματα και επιλογή βέλτιστης περίπτωσης πειράματος πλήρωσης.....	111
4.2.4.1.	Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος πλήρωσης.....	112
4.3.	Συνάρτηση βελτιστοποίησης και επιλογή βέλτιστων τιμών παραμέτρων πειράματος πλήρωσης.....	117
4.4.	Ανάλυση ευαισθησίας πειράματος πλήρωσης.....	119
4.5.	Συζήτηση αποτελεσμάτων πειράματος πλήρωσης.....	120
4.6.	Πειραματική διαδικασία Β' ακολουθίας πειράματος πλήρωσης.....	124
4.6.1.	Επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα και τοποθέτηση των παραγόντων Β' ακολουθίας πειράματος πλήρωσης.....	124
4.6.2.	Πρωτογενή αποτελέσματα Β' ακολουθίας πειράματος πλήρωσης.....	125
4.6.3.	Συνάρτηση βελτιστοποίησης και επιλογή βέλτιστων τιμών παραμέτρων Β' πειράματος πλήρωσης.....	126
4.7.	Συζήτηση αποτελεσμάτων Β' πειράματος πλήρωσης.....	127
4.8.	Αρχικές ενέργειες πειράματος ψύξης.....	129

4.9. Μεταβλητές, σταθεροί παράγοντες και αποτελέσματα ψύξης	131
4.9.1. Σταθερές τιμές πειράματος ψύξης	132
4.9.2. Τύπος ελέγχου πειραματικής ανάλυσης	132
4.9.3. Μεταβλητές πειράματος ψύξης	133
4.9.4. Επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα και τοποθέτηση των παραγόντων πειράματος ψύξης	135
4.9.5. Αποτελέσματα και επιλογή βέλτιστης περίπτωσης φάσης ψύξης.....	138
4.9.5.1. Πρωτογενή αποτελέσματα φάσης ψύξης	138
4.10. Επιλογή βέλτιστων τιμών παραμέτρων.....	139
4.11. Ανάλυση ευαισθησίας	140
4.12. Συζήτηση αποτελεσμάτων πειράματος ψύξης.....	141
4.13. Αρχικές ενέργειες πειράματος συγκράτησης	149
4.14. Μεταβλητές, σταθεροί παράγοντες και αποτελέσματα πειράματος συγκράτησης.....	150
4.14.1. Μεταβλητές πειράματος συγκράτησης.....	150
4.14.2. Σταθερές τιμές πειράματος συγκράτησης.....	151
4.14.3. Επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα και τοποθέτηση των παραγόντων ..	153
4.14.4. Αποτελέσματα και επιλογή βέλτιστης περίπτωσης πειράματος συγκράτησης..	155
4.14.4.1. Πρωτογενή αποτελέσματα	155
4.15. Επιλογή βέλτιστων τιμών παραμέτρων.....	156
4.16. Ανάλυση ευαισθησίας	157
4.17. Συζήτηση αποτελεσμάτων πειράματος συγκράτησης	158
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 — ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	164
5.1. Οδηγίες προς τον χειριστή	164
5.2. Συμπεράσματα για την ρύθμιση της μηχανής.....	166
5.3. Προτάσεις.....	168
Ανασκόπηση βιβλιογραφίας	170

Σχήμα 2.1.5-1: Η κατανομή της ταχύτητας μεταξύ δυο ακίνητων πλακών.	26
Σχήμα 2.1.5-2: Η κατανομή των διατμητικών τάσεων σε μια εγκάρσια διατομή του ρεύματος.	27
Σχήμα 2.1.5-3: Διαφορά του φαινομένου ιξώδους ιδανικού και πραγματικού πλαστικού.	27
Σχήμα 2.1.5-4: Διάγραμμα καμπυλών φαινομένου ιξώδους διαφορετικών τύπων ρευστών.	28
Σχήμα 2.1.5-5: Διάγραμμα εξάρτησης θερμοκρασίας – βισκοελαστικότητας.	28
Σχήμα 2.4-1: Στοιχεία συστήματος διανομής υλικού στο καλούπι.	34
Σχήμα 2.4-2: Διαφορές μεταξύ συμβατού και θερμαινόμενου συστήματος διανομής.	35
Σχήμα 2.4-3: Εύρος γεωμετρικών διαστάσεων εισόδου μορφής αφαλού.	36
Σχήμα 2.4-4: Απομάκρυνση εισόδου μορφής τούνελ.	37
Σχήμα 2.4-5: Διατομή κλειστού καλουπιού δυο πλακών μορφής.	37
Σχήμα 2.5.1-1: Δυνατότητα διάτρησης σπирάλ καναλιών ψύξης σε ένα καλούπι.	39
Σχήμα 2.5.1-2: Πρόκληση κάμψης λόγω ανομοιομορφη ψύξη του καλουπιού.	40
Σχήμα 2.5.1-3: Παραμόρφωση αντικειμένου λόγω κακή γεωμετρίας σχεδιασμού.	40
Σχήμα 2.6.1-1: Παράδειγμα υδραυλικής βαλβίδας εξώλκευσης στην κορυφή του πυρήνα.	41
Σχήμα 2.7.2.1-1: Πρόσδος του μετώπου ροής συναρτήσει της μεταβολής πάχους των τοιχωμάτων.	44
Σχήμα 2.7.2.1-2: Ανταλλαγή δεδομένων CAD- FEM για τη βελτιστοποίηση της θέσης εισόδου.	45
Σχήμα 2.7.2.1-3: Αναπαράσταση πορείας σκέψης.	45
Σχήμα 2.7.2.2-1: Θερμικό ισοζύγιο σε κλειστό καλούπι.	47
Σχήμα 2.7.2.3-1: Μοντελοποίηση τμημάτων καλουπιού με συμπεριφορά ελατηρίων.	48
Σχήμα 2.8.2-1: Φάση πλαστικοποίησης.	50
Σχήμα 2.8.2-2: Διαστασιολόγηση περιστρεφόμενου κοχλία.	52
Σχήμα 2.8.2-3: Κοχλίας τριών ζωνών.	52
Σχήμα 2.8.3-1: Φάση έκχυσης υλικού.	53
Σχήμα 2.8.3-2: Διάγραμμα πιέσεων όλων των μονάδων κατά την χύτευση θερμοπλαστικών.	54
Σχήμα 2.8.4-1: Φάση τελικής μορφοποίησης.	55
Σχήμα 2.8.4-2: Σημείο αλλαγής γεμίσματος μεταγενεστέρας.	56
Σχήμα 2.8.5-1: Οι χρόνοι της κάθε φάσης ενός κύκλου παραγωγής.	57
Σχήμα 2.9.2.2-1: Αναπαράσταση δημιουργίας της ένωσης υλικού.	63
Σχήμα 2.9.2.6-1: Σχηματική παράσταση προσανατολισμού μορίων.	70
Σχήμα 2.9.2.6-2: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας τραβήγματος (βαθουλώματος).	71
Σχήμα 3.2.2.2-1: Διαφορετικοί τύποι τομών runners.	84
Σχήμα 3.2.2.2-2: Διάγραμμα ογκομετρικής ροής συναρτήσει του μήκους δρομέων.	85
Σχήμα 3.2.3-1: Απόσταση καναλιών από επιφάνεια τεμαχίου.	88
Σχήμα 3.2.3-2: Διαφορετικές μορφοποιήσεις σειρών καναλιών ψύξης.	89
Σχήμα 3.2.3-3: Απόσταση καναλιού από κρίσιμες γωνίες.	89
Σχήμα 3.2.4-1: Αριστερά εξωλκείας επιφάνειας /Δεξιά πείροι εξώλκευσης.	91
Σχήμα 3.3.2.1-1: Aspect ratio τριγωνικού στοιχείου.	96
Σχήμα 4.1-1: Διάγραμμα συνάρτησης ταχύτητας χρόνου γεμίσματος.	106
Σχήμα 4.8-1: Συνολικός κύκλος έκχυσης μηχανής injection.	129

Πίνακας 2.1.5-1: Πίνακας στοιχείων πλαστικών πρώτων υλών.	29
Πίνακας 2.7.3-1: Μεγέθη που προσδιορίζουν την ποιότητα προϊόντος.	49
Πίνακας 2.8.5-1: Σημαντικά μεγεθών ανά φάση λειτουργίας της μηχανής.	57
Πίνακας 3.2.1-1: Χαρακτηριστικά της μηχανής.	80
Πίνακας 3.2.1-2: Χαρακτηριστικά υλικού BASF NOVOLEN 1100 L.	81
Πίνακας 4.2.2-1: Συγκεντρωτικός πίνακας μεταβλητών φάσης πλήρωσης και τιμών των επιπέδων.	109
Πίνακας 4.2.3-1: Πίνακας Taguchi πειραμάτων φάσης έκχυσης.	110
Πίνακας 4.2.3-2: Πίνακας Taguchi με τιμές των μεταβλητών.	111
Πίνακας 4.2.4.1-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος φάσης πλήρωσης.	112
Πίνακας 4.3-1: Πίνακας επιπέδων μεταβλητών και τελικού αποτελέσματος πειράματος φάσης πλήρωσης, με επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος.	118
Πίνακας 4.4-1: Πίνακας ANOVA μεταβλητών φάσης πλήρωσης.	119
Πίνακας 4.6.1-1: Πίνακας Taguchi με τιμές των μεταβλητών για Β' ακολουθία φάσης πλήρωσης.	124
Πίνακας 4.6.2-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος φάσης πλήρωσης.	125
Πίνακας 4.6.3-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος Β' ακολουθίας φάσης πλήρωσης.	126
Πίνακας 4.9.3-1: Συγκεντρωτικός πίνακας μεταβλητών φάσης ψύξης και τιμών των επιπέδων.	134
Πίνακας 4.9.4-1: Πίνακας Taguchi πειραμάτων ψύξης.	136
Πίνακας 4.9.4-2: Πίνακας Taguchi με τιμές των μεταβλητών.	137
Πίνακας 4.9.5.1-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος φάσης ψύξης.	138
Πίνακας 4.10-1: Πίνακας επιπέδων μεταβλητών και τελικού αποτελέσματος πειράματος ψύξης, με επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος.	139
Πίνακας 4.11-1: Πίνακας ANOVA μεταβλητών πειράματος ψύξης.	140
Πίνακας 4.12-1: Πίνακας αποτελεσμάτων θερμοκρασίας καλουπιού στο τέλος της ψύξης.	148
Πίνακας 4.14.2-1: Συγκεντρωτικός πίνακας μεταβλητών φάσης συγκράτησης και τιμών των επιπέδων.	152
Πίνακας 4.14.3-1: Πίνακας Taguchi πειραμάτων συγκράτησης.	153
Πίνακας 4.14.3-2: Πίνακας Taguchi με τιμές των μεταβλητών.	154
Πίνακας 4.14.4.1-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος φάσης συγκράτησης.	155
Πίνακας 4.15-1: Πίνακας επιπέδων μεταβλητών και τελικού αποτελέσματος πειράματος συγκράτησης, με επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος.	156
Πίνακας 4.16-1: Πίνακας ANOVA μεταβλητών πειράματος συγκράτησης.	157
Πίνακας 5.1-1: Οδηγίες προς τον χειριστή.	164
Πίνακας 5.2-1: Πίνακας βέλτιστων τιμών φάσεων και τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας.	167

Γράφημα 4.2.4.1-1: Προσομοίωση του ease of fill για την φάση πλήρωσης	113
Γράφημα 4.2.4.1-2: Προσομοίωση κατανομή ροής υλικού, gate fill contribution.....	114
Γράφημα 4.2.4.1-3: Προσομοίωση θερμοκρασίας υλικού, central temperature at End of Fill.	114
Γράφημα 4.2.4.1-4: Προσομοίωση χρόνου πλήρωσης, Fill Time.	115
Γράφημα 4.2.4.1-5: Προσομοίωση ένωσης υλικού, weld lines.	116
Γράφημα 4.5-1: Προσομοίωση αποτελέσματος πίεσης, Pressure at the end of fill.....	121
Γράφημα 4.5-2: Προσομοίωση θερμοκρασία μετώπου ροής, Flow Front Central Temperature.	122
Γράφημα 4.5-3: Προσομοίωση αποτελέσματος τραβήγματος, sink Marks.	123
Γράφημα 4.7-1: Προσομοίωση χρόνου πλήρωσης για την Β' ακολουθία πλήρωσης,	127
Γράφημα 4.7-2: Προσομοίωση αποτελέσματος πίεσης για την Β' ακολουθία πλήρωσης, Pressure at the end of fill.....	127
Γράφημα 4.7-3: Αναπαράσταση sink marks.	128
Γράφημα 4.12-1: Προσομοίωση αποτελέσματος χρόνου ψύξης, Part Cooling Time.....	143
Γράφημα 4.12-2: Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας από τα κανάλια ψύξης προς το καλούπι, Mold Heat Flux.	144
Γράφημα 4.12-3: Κατεύθυνση ροής ψυκτικού μέσου.	145
Γράφημα 4.12-4: Προσομοίωση θερμοκρασίας υλικού στο πέρας της ψύξης, Part Temperature at End of Cooling.....	145
Γράφημα 4.12-5: Προσομοίωση τελικής θερμοκρασίας καλουπιού, Mold Temperature...	147
Γράφημα 4.17-1: Διάγραμμα θερμοκρασίας κόμβων, Node Temperature XY Plot.	159
Γράφημα 4.17-2: Προσομοίωση πίεσης μετά από συγκράτηση, Pressure at End of Packing.	160
Γράφημα 4.17-3: Προσομοίωση αποτελέσματος ψυχρού στρώματος ροής, Frozen Layer Fraction.	161
Γράφημα 4.17-4: Προσομοίωση αποτελέσματος διατμητικών τάσεων, Shear Stress.	162
Γράφημα 4.17-5: Προσομοίωση αποτελέσματος τελικής συρρίκνωσης, Volumetric Shrinkage.	163

Εικόνα 2.1.1-1: Ποικιλία πλαστικών αντικειμένων στο σύγχρονο κόσμο.....	21
Εικόνα 2.3.3-1: Μηχανή έκχυσης οριζοντίου τύπου(injection molding machine).	33
Εικόνα 2.4-1: Τρόπος έκχυσης σημειακής εισόδου στην κοιλότητα.	36
Εικόνα 2.6.1-1: Αποκόλληση παραγόμενου τεμαχίου από το κομμάτι διανομής κατά την εξώλκευση.	41
Εικόνα 2.7.2.1-1: Παράδειγμα ανάπτυξη ροής κατά την πλήρωση.....	44
Εικόνα 2.9.2.3-1: Τυρβώδη ροή τήγματος που εισάγεται με μορφή κορδονιού.	65
Εικόνα 2.9.2.3-2: Ημιτελή αντικείμενα χύτευσης λόγω jetting.	65
Εικόνα 2.9.2.5-1: Αντικείμενο με προέκταμα.	67
Εικόνα 3.1.2-1: Τα clips βρίσκονται περιφερειακά του τεμαχίου.	75
Εικόνα 3.1.2-2: Πλάγια και άνω όψη σχεδίου αντικειμένου.	76
Εικόνα 3.1.2-3:Νεύρα και gussets που ξεχωρίζουν στις επιφάνειες του τεμαχίου.....	77
Εικόνα 3.1.2-4: Αποτύπωμα αντικειμένου από 3D scanner.	78
Εικόνα 3.2.1-1: Ο πυρήνας καλουπιού.	79
Εικόνα 3.2.1-2: Δυο συμμετρικές κοιλότητες.	80
Εικόνα 3.2.1-3: Πολυπροπυλένιο, BASF NOVOLEN 1100 L.	81
Εικόνα 3.2.1-4: Μορφή της κατεργασμένης κινητής πλάκας καλουπιού.....	82
Εικόνα 3.2.2.1-1: Η μπουκαδούρα αριστερά του σταθερού τμήματος του καλουπιού.	83
Εικόνα 3.2.2.2-1: Εξισορροπημένη τροφοδοσία υλικού.....	86
Εικόνα 3.2.2.2-2: Ομαδοποίηση διοχέτευσης υλικού.	86
Εικόνα 3.2.3-1: Τομή καναλιών ψύξης καλουπιού.	90
Εικόνα 3.2.4-1: Αποτυπώματα εξωλκίων στο τελικό τεμάχιο.....	91
Εικόνα 3.2.5-1: Στίγμα καψίματος λόγω κακής εξαέρωσης.	92
Εικόνα 3.2.5-2: Αποτύπωμα πύρου εξαέρωσης στο τεμάχιο.	93
Εικόνα 3.3.2.1-1: Πλεγματοποίηση της μιας κοιλότητας.....	96
Εικόνα 3.3.2.1-2: Περίληψη ποιότητας πεπερασμένων στοιχείων.	97
Εικόνα 3.3.2.2-1: Επιλογή solid mesh καλούπι και κανάλια ψύξης.....	97
Εικόνα 3.3.3.2-1:Προσδιορισμός εισόδων ροής στο λογισμικό.	99
Εικόνα 4.2.2-1: Διάγραμμα προφίλ πλήρωσης και ρύθμιση παραμέτρων λειτουργίας του κοχλίου στο Plastics.....	108
Εικόνα 4.2.2-2: Εισαγωγή τιμών των παραμέτρων πλήρωσης στο Plastics.	109
Εικόνα 4.2.4.1-1: Ενημέρωση επιτυχούς πλήρωσης από result adviser του προγράμματος.	112
Εικόνα 4.8-1: Ρυθμίσεις οριακών συνθηκών καναλιών.....	130
Εικόνα 4.9.3-1: Εισαγωγή τιμών των παραμέτρων ψύξης στο Plastics.	135
Εικόνα 4.14.2-1: Προφίλ συγκράτησης ρύθμιση παραμέτρων λειτουργίας του κοχλίου στο Plastics.	152

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 — ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία απευθύνεται κυρίως σε χειριστές πρεσών χύτευσης που έχουν ήδη εξοικειωθεί με τον τρόπο λειτουργίας των εν λόγω μηχανών αλλά επιθυμούν να βελτιώσουν την επαγγελματική τους κατάρτιση. Για το λόγο αυτό έγινε μια προσπάθεια ώστε η ορολογία που χρησιμοποιείται να είναι κατανοητή χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερες και εξειδικευμένες γνώσεις εκ μέρους των χειριστών. Ωστόσο επιδιώχθηκε να αρμόζει στα όρια της ακαδημαϊκής μορφής γραπτού λόγου μιας διπλωματικής εργασίας.

Στο σημείο αυτό όμως οφείλω να ζητήσω την κατανόηση των αναγνωστών καθότι ορισμένοι όροι δεν είναι εφικτό να αποδοθούν απόλυτα στην ελληνική γλώσσα αφού στον τομέα της χύτευσης πολλοί από αυτούς τους όρους χρησιμοποιούνται με την αγγλική τους μορφή.

Για την ευκολότερη κατανόηση της εργασίας δίδονται στην συνέχεια γενικές κατευθυντήριες αρχές με τρόπο, ώστε να γίνει ευκολότερη η προσέγγιση του προβλήματος που επιχειρεί να λύσει η παρούσα εργασία και που αφορά κυρίως τον έλεγχο των παραμέτρων έγχυσης σε εξάρτηση με το συνολικό σύστημα παραγωγής, έτσι:

- Καθορίζονται οι βασικές έννοιες των πλαστικών, των ιδιοτήτων της πρώτης ύλης.
- Δίδεται μια γενική περιγραφή των μηχανών έγχυσης, των εργαλείων που την συνοδεύουν (καλούπι) και δίνονται στοιχεία για τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Ακολουθεί η ανάλυση και κατανόηση των αρχών και μεθοδολογιών έγχυσης. Επίσης περιγράφεται η διαδικασία έγχυσης και οι παράμετροι που την επηρεάζουν.
- Γίνεται η ανάλυση των στοιχείων του καλουπιού και του τελικού προϊόντος, με την βοήθεια του τρισδιάστατου μοντέλου του, που θα αποτελέσει και την βάση για τον καθορισμό της διαδικασίας προγραμματισμού της έγχυσης.
- Δίδονται οι βασικές αρχές και δυνατότητες των λογισμικών σχεδιασμού και παρουσιάζεται το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ροής.
- Προσδιορίζεται με την ανάλυση του χρησιμοποιούμενου λογισμικού, η διαδικασία προγραμματισμού για να καθοριστούν οι διαθέσιμες επιλογές προσομοίωσης της έγχυσης.

- Προσδιορίζεται η διαδικασία και οι παράμετροι της έγχυσης που θα καθορισθούν με βάση την στατιστική ανάλυση που έχει επιλεγθεί.

- Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός των πειραμάτων των φάσεων γεμίσματος, ψύξης, πίεσης συγκράτησης, με την αντίστοιχη εμφάνιση ελαττωμάτων.

- Θα πραγματοποιηθούν τα πειράματα και θα προσδιορισθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν και θα εφαρμοστεί στατιστική ανάλυση στα αποτελέσματα αυτά με σκοπό την εύρεση συσχετίσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

- Η παρούσα εργασία θα καταλήξει με την καταγραφή και τον εντοπισμό οδηγιών για τους εφαρμοστές μηχανών έγχυσης πλαστικών.

- Τόσο τα αποτελέσματα των πειραμάτων, όσο και τα συμπεράσματα της στατιστικής ανάλυσης μπορεί να αποτελέσουν στοιχεία μιας μελλοντικής εκτεταμένης διερεύνησης των παραμέτρων, με σκοπό τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης πρότασης για την βοήθεια των χειριστών μηχανών έγχυσης.

2.1. Βασικές έννοιες και ιδιότητες των πλαστικών

2.1.1. Η ιστορία των πλαστικών

Το πλαστικό αντιπροσωπεύει την εποχή του μοντέρνου περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη κατηγορία υλικών. Ένα υλικό που χρησιμοποιείται παντού και εξυπηρετεί όλες μας τις ανάγκες. Με αυτό συσκευάζουμε τα τρόφιμα, δημιουργούμε ανθεκτικά αντικείμενα και χάρη σε αυτό έχουν γίνει προσιτά πολλά τεχνολογικά μέσα.

Για να καταλάβουμε την αλλαγή που έφερε η ανακάλυψη και η εξάπλωση των πλαστικών υλικών θα πρέπει να φανταστούμε έναν κόσμο χωρίς αυτά. Η δυνατότητα του πλαστικού να παίρνει οποιαδήποτε μορφή χωρίς κανέναν περιορισμό από το ίδιο το υλικό, καθιστά τα πράγματα γύρω μας ένα θέαμα πλαστικών δυνατοτήτων, βλ. *εικόνα 2.1.1-1*.

Ο όρος πλαστικό είναι κοινή ονομασία που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια ευρεία ποικιλία συνθετικών ή ημισυνθετικών οργανικών στερεών υλικών. Τα πλαστικά είναι σχεδόν αποκλειστικά πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους και που μπορεί να περιέχουν πρόσθετα, οργανικά ή μη, για βελτίωση των ιδιοτήτων τους (μηχανική αντοχή, εμφάνιση, χρώμα κ.λπ.). Το ενδιαφέρον μετατοπίζεται από το αντικείμενο αυτό καθαυτό στη μορφογενετική πολλαπλότητα των μεθόδων παραγωγής πλαστικών. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά υλικά που με το πέρασμα του χρόνου γερνάνε και φθείρονται, οι νέες πλαστικοποιημένες εκδοχές έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μένοντας αναλλοίωτες για πάρα πολλά χρόνια. Η ενίσχυση των πολυμερών με σύνθετα ή φυσικά υλικά και οι προηγμένες μέθοδοι ανακύκλωσης το έχουν καταστήσει ως το πρώτο σε επιλογές υλικό ανάμεσα στα κατασκευαστικά, χρηστικά και επενδυτικά αγαθά.



Εικόνα 2.1.1-1: Ποικιλία πλαστικών αντικειμένων στο σύγχρονο κόσμο.

2.1.2. Πλαστικό ως πρώτη ύλη

Η λέξη πλαστικά συνήθως σημαίνει υλικά: που έχουν χαμηλή αντοχή (*strength*) και σκληρότητα (*stiffness*), περιορισμένη θερμοκρασιακή δυνατότητα (*temperature limitations*) και που υπό την επίδραση δύναμης παραμορφώνονται συνεχώς (*deform continuously*).

Προϊόντα από πλαστικό χαρακτηρίζονται τα συνθετικά οργανικά πολυμερή τα οποία παράγονται από οργανικές ενώσεις π.χ.: αιθυλαίνιο (ethylen), στυρόλιο (styrol), βινυλοχλωρίδιο (vinylchlorid) όπως επίσης και από μακρομοριακές ενώσεις που είναι η βάση για πλαστικά (φυσικό καουτσούκ, κυτταρίνη, πρωτεΐνες). Τα πλαστικά κατέχουν διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες στην κατεργασία τους όπως π.χ. στην έγχυση που επηρεάζουν καθοριστικά και διαφορετικά το τελικό αποτέλεσμα.

Κανείς διακρίνει τρεις ομάδες πλαστικών [1]:

A. Θερμοπλαστικά

Πρόκειται για την σημαντικότερη κατηγορία πλαστικών που χρησιμοποιούνται στην έγχυση. Τα θερμοπλαστικά είναι τα πλέον χρησιμοποιούμενα υλικά για ένα ευρύ φάσμα προϊόντων από καπάκια φιαλών έως και ανταλλακτικά ή εξαρτήματα αυτοκινήτων. Μπορούν να τηχθούν με την παροχή θερμότητας και να στερεοποιηθούν με ψύξη πολλές φορές (PS, PE, PVC, LLDPE, HDPE).

Τα θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα λέγονται συνήθως πλαστικά (*plastics*). Τα θερμοπλαστικά είναι πολυμερή που αποκτούν μεγαλύτερη πλαστικότητα, δηλαδή ευκολία στο να παραμορφωθούν και να αποκτήσουν το σχήμα που επιθυμούμε, κάθε φορά που θερμαίνονται. Μπορούν να τήκονται με θέρμανση, να στερεοποιούνται με ψύξη, και να επανατήκονται. Τα θερμοπλαστικά είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες.

Τυπικά θερμοπλαστικά είναι:

- ❖ Πολυαιθυλένιο (PE),
- ❖ Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC),
- ❖ Πολυπροπυλένιο (PP),
- ❖ Πολυστυρένιο (PS),
- ❖ Πολυμεθακρυλικός μεθυλεστέρας (PMMA),
- ❖ Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE),
- ❖ Πολυαμίδια (Nylon)

B. Ελαστομερή

Τα ελαστομερή είναι τα επονομαζόμενα ελαστικά. Αυτά έχουν διασταυρωμένες δομές (*cross-linked network structures*) με μεγάλη δυνατότητα παραμόρφωσης (*deformability*), δυνατότητα ανάκτησης αρχικής μορφής (*complete recoverability*) που οφείλεται στον υψηλό βαθμό ευκαμψίας (*flexibility*) και πυκνότητας εμπλοκής των μοριακών αλυσίδων (π.χ. φυσικό καουτσούκ, όπου τα μόρια είναι διασταυρωμένα μεταξύ τους με χημικούς δεσμούς). Λόγω του μεγάλου βαθμού ευελιξίας των αλυσίδων έχουν τη δυνατότητα της υπερελαστικότητας, επιδέχονται δηλαδή πολύ μεγάλη παραμόρφωση και κατά την αποφόρτιση, ταχύτατη πλήρη επαναφορά. Τυπικά ελαστομερή είναι:

- ❖ Συνθετικό και φυσικό καουτσούκ,
- ❖ Συνθετικό πολυϊσοπρένιο,
- ❖ Ελαστικό στυρένιο -βουταδιένιο,
- ❖ Σιλικόνες

Γ. Θερμοσκληρούμενα

Τα θερμοσκληρυνόμενα στη ρευστή τους κατάσταση παρουσιάζονται σαν μόρια μακράς αλυσίδας αλλά με δυνατότητα να αντιδρούν και να σκληραίνουν, συνήθως υπό θέρμανση και πίεση, λόγω διασταυρώσεων. Στα θερμοσκληρυνόμενα κατά την πρώτη θέρμανση και ανάμιξη των συστατικών τους προκαλείται πολυμερισμός και σκλήρυνση κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Είναι άμορφα, σκληρά στερεά, άτηκτα και δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία. Τυπικά θερμοσκληρυνόμενα είναι:

- ❖ Ρητίνες Φαινόλης-Φορμαλδεΐδες (φαινολοπλάστες, βακελίτες),
- ❖ Εποξυδικές ρητίνες,
- ❖ Αμινοπλάστες,
- ❖ Πολυεστέρες

2.1.3. Πολυπροπυλένιο

Το **πολυπροπυλένιο (PP)** είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που χρησιμοποιείται σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών συμπεριλαμβανομένης της συσκευασίας, στα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα (π.χ., σχοινιά, χαλιά κ.λπ.), χαρτικά, πλαστικά μέρη και επαναχρησιμοποιούμενα δοχεία διαφόρων τύπων, εργαστηριακό εξοπλισμό και εξαρτήματα αυτοκινήτων. Επιπλέον είναι ένα πολυμερές το οποίο γίνεται από το μονομερές προπυλενίου, είναι τραχύ και ασυνήθιστα ανθεκτικό σε πολλά χημικά διαλυτικά, οξέα και βάσεις.

Το περισσότερο εμπορικά πολυπροπυλένιο, είναι συμμετρικό και έχει ένα ενδιάμεσο επίπεδο διαύγειας, μεταξύ εκείνου του πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE) και υψηλής πυκνότητας (HDPE). Το πολυπροπυλένιο είναι συνήθως σκληρό και ευέλικτο. Αυτό επιτρέπει το πολυπροπυλένιο για να χρησιμοποιηθεί ως ένα πλαστικό μηχανικής, με ανταγωνιστικά υλικά, όπως το ABS. Το πολυπροπυλένιο είναι ένα οικονομικό υλικό, και μπορεί να γίνει διαφανές όταν είναι αχρωμάτιστο, αλλά όχι τόσο διαφανές όσο π.χ. το πολυστυρένιο.

Ο ρυθμός ροής τηγμένου υλικού (*MFR*) είναι ένας έμμεσος τρόπος μέτρησης του μοριακού βάρους του πολυπροπυλενίου. Το μέτρο αυτό βοηθά να καθοριστεί το πόσο εύκολα θα λιώσει η πρώτη ύλη κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Ένα πολυπροπυλένιο με υψηλότερο *MFR* θα γεμίσει το πλαστικό καλούπι πιο εύκολα κατά τη διάρκεια της έγχυσης ή εμφύσησης της παραγωγικής διαδικασίας. Καθώς λιώνει αυξάνει τη ροή του, ωστόσο ορισμένες φυσικές ιδιότητες όπως η αντοχή στην κρούση, θα μειωθούν [2].

2.1.4. Συμπεριφορά των πλαστικών σε σχέση με την θερμότητα

Τα πλαστικά με την επίδραση θερμότητας εμφανίζουν διαφορετικές συμπεριφορές. Αυτό οφείλεται σε διαφορετικούς παράγοντες όπως π.χ. στην χημική μοριακή δομή και στη μορφή των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ μορίων και που συγκρατούν τα στερεά ή τα ρευστά (διαμοριακές δυνάμεις). Η έγχυση είναι μια μέθοδος μορφοποίησης η οποία προϋποθέτει ότι η πρώτη ύλη πρέπει να βρεθεί σε κατάσταση πλαστικοποίησης προκειμένου να μπορεί αυτή στη συνέχεια να γίνει επεξεργάσιμη. Τα πλαστικά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι σε στερεά μορφή (κόκκος ή σκόνη).

Στο σημείο θα κάνουμε μια παρεμβολή για να διευκρινίσουμε μια σημαντική κατάταξη που γίνεται στα πολυμερή βάση της μοριακής τους δομής σε δυο κατηγορίες [3]:

- A.** Τα άμορφα πολυμερή δηλαδή αυτά που διατηρούν την άμορφη μακρομοριακή δομή.
- B.** Τα μερικώς κρυσταλλικά πολυμερή, δηλαδή αυτά που στη μάζα τους εμφανίζουν περιοχές με κρυσταλλική δομή.

Αυτές οι δυο ιδιαιτερότητες των πολυμερών θα τις συναντήσουμε επανειλημμένα στην πορεία καθότι η μοριακή δομή και ο βαθμός της κρυστάλλωσης παίζουν σημαντικό ρόλο στον τρόπο επεξεργασίας των πλαστικών γενικότερα. Τα άμορφα υλικά κατά τη φάση της θέρμανσης περνούν σε ρευστή κατάσταση σταδιακά και σε μεγάλο εύρος θερμικής απορρόφησης με ομαλή αύξηση του όγκου τους. Αντίθετα τα μερικώς κρυσταλλικά υλικά εμφανίζουν μια απότομη και ευδιάκριτη μεταβολή του όγκου τους από τη στερεή στη ρευστή κατάσταση. Ο ίδιος ρυθμός μεταβολής θα λάβει χώρα και κατά τη φάση της ψύξης τους από υγρή σε στερεά μορφή.

Έτσι λοιπόν πρώτες ύλες όπως: *PVC, PS, SB, SAN, ABS, ASA, CA, CP, CAB, PMMA, PC, PPO, PSU, PPSU, PES, PIPA=3-3-T, PETP* που χαρακτηρίζονται ως άμορφες απαιτούν ειδική μεταχείριση κατά την επεξεργασία τους από τι οι άλλες πρώτες ύλες όπως είναι : *LDPE, HDPE, PP, PB, PM, PPS, PA 6, PETPPBTP, FEP, ETFE* που χαρακτηρίζονται ως μερικώς κρυσταλλικές. Ο διαχωρισμός μεταξύ άμορφων και μερικώς κρυσταλλικών πολυμερών υφίσταται μόνον, όταν αυτά βρίσκονται σε στερεή κατάσταση. Σε κατάσταση τήγματος η κρυσταλλική δομή διασπάται με την κίνηση των μακρομορίων και έτσι όλα τα πολυμερή χαρακτηρίζονται ως άμορφα.

Η μακρομοριακή τους δομή χαλαρώνει με την βοήθεια της θερμότητας και μεταπηδά σε κατάσταση ρευστού. Με την υπέρβαση της θερμοκρασίας κρυσταλοποίησης T_g ελαχιστοποιούνται σε τέτοιο βαθμό οι διαμοριακές δυνάμεις, ώστε τα μόρια με την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων (υδραυλική πίεση) να αποδιατάσσονται και να κινούνται ελεύθερα το ένα σε σχέση με το άλλο έτσι ώστε ή να μειώνεται η συνοχή του υλικού και να αυξάνεται η εφελκυσιμότητα.

Στη περίπτωση μιας περαιτέρω αύξησης της θερμοκρασίας οι διαμοριακές δυνάμεις χαλαρώνουν σε τέτοιο βαθμό που το υλικό μεταβαίνει σταδιακά από την θερμοελαστική κατάσταση σε θερμοπλαστική κατάσταση (τήξη). Η μετάβαση αυτή προσδιορίζεται στην περιοχή θερμοκρασίας τήξης T_f . Κατά την παραγωγική διαδικασία με έγχυση το υλικό βρίσκεται πλέον σε κατάσταση πλαστικοποίησης. Στην περιοχή θερμοκρασιών μεγαλύτερες της T_z , το υλικό πλέον αποσυντίθεται.

2.1.5. Πλαστικοποιημένη μάζα

Μπορούμε να θεωρήσουμε το ιξώδες ως μέτρο της αντίστασης ενός υγρού στη ροή του. Η αντίσταση αυτή που παρουσιάζουν τα ρευστά οφείλεται στις εσωτερικές τριβές των μορίων τους από δυνάμεις συνοχής, σε βαθμό που το ίδιο το ιξώδες να αποτελεί μέτρο αντίστασης του ρευστού στη ροή του.

Για στρωτή ροή η διατμητική τάση τ , μεταξύ των ενδιαμέσων στρωμάτων του ρευστού είναι ανάλογη της βαθμίδας ταχύτητας $\frac{\partial u}{\partial y}$, στην κάθετη διεύθυνση ως προς αυτά τα στρώματα, δηλ. της σχετικής κίνησης των στρωμάτων του ρευστού.

Από το νόμο του *Newton* για μονοδιάστατη στρωτή ροή θα είχαμε:

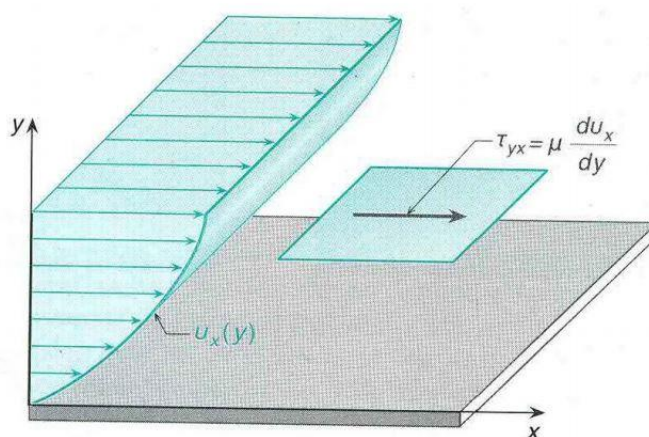
$$\text{Ιξώδες} = \frac{\text{ιξώδης διατμητική τάση}}{\text{ρυθμός γωνιακής παραμόρφωσης}}, \quad (1\alpha)$$

$$\tau = \mu \frac{\theta u}{\theta y}, \quad (1\beta)$$

μ ιξώδες Pa.s, τ διατμητική τάση N/mm², u βαθμίδα ταχύτητας m/s

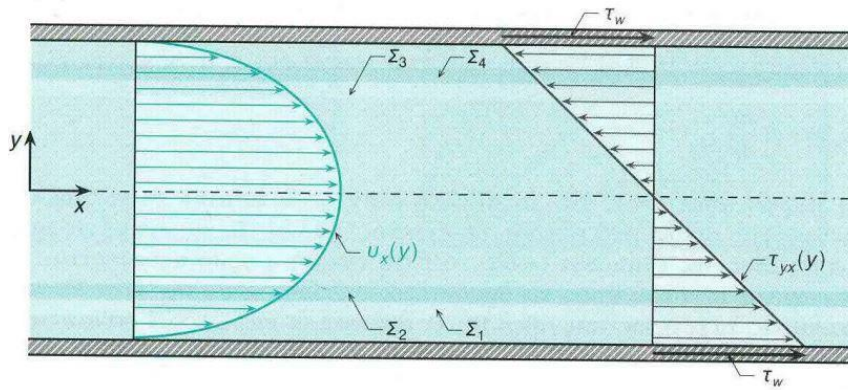
Ο συντελεστής μ ή η , που υπεισέρχεται στον νόμο του Νεύτωνα για το ιξώδες, ονομάζεται συντελεστής ιξώδους ή απλώς ιξώδες.

Απλούστερο παράδειγμα είναι το διάγραμμα ταχυτήτων της ροής ενός ιξώδους ρευστού σε κυλινδρικό σωλήνα. Η ταχύτητα είναι μέγιστη κατά μήκος του άξονα και μηδενική στα τοιχώματα του σωλήνα, όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα του σχήματος 2.1.5-1. Το ρευστό μοιάζει με σύστημα ομοαξονικών τηλεσκοπικών σωλήνων που ολισθαίνουν μεταξύ τους ώστε ο κεντρικός να κινείται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ ο ακραίος ακινητεί.



Σχήμα 2.1.5-1: Η κατανομή της ταχύτητας μεταξύ δυο ακίνητων πλακών.

Παρατηρούμε ότι σε στρωτή ροή ενός ασυμπίεστου Νευτωνικού ρευστού η κατανομή της ταχύτητας μεταξύ δυο ακίνητων πλακών είναι παραβολική.

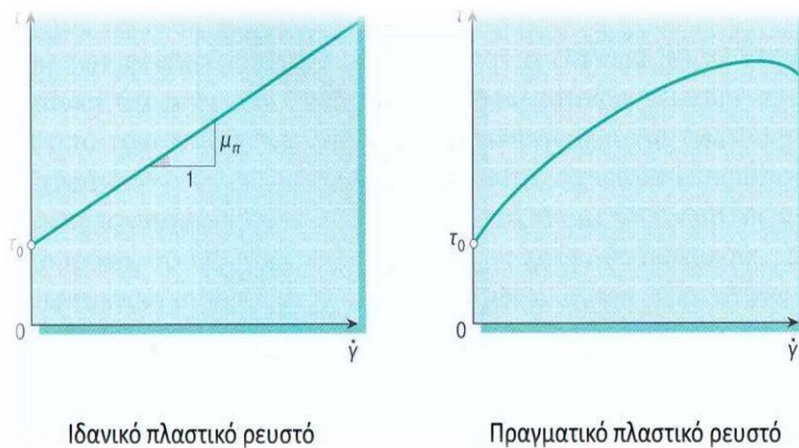


Σχήμα 2.1.5-2: Η κατανομή των διατμητικών τάσεων σε μια εγκάρσια διατομή του ρεύματος.

Ως βαθμίδα ταχύτητας ορίζεται η μεταβολή της ταχύτητας \hat{u} των ολισθαίνουσων στρώσεων σε σχέση με την ακτίνα r . Από το Νόμο του Νεύτωνα προκύπτει η γραμμική σχέση του τανυστή παραμόρφωσης τ με τον τανυστή ρυθμού γωνιακής παραμόρφωσης $\dot{\gamma}$. Για την ολίσθηση αυτή απαιτούνται δυνάμεις οι οποίες αναγόμενες στην ολισθαίνουσα επιφάνεια ορίζονται ως διατμητική δύναμη, βλ. σχήμα 2.1.5-2. Για τα μη Νευτωνικά ρευστά δεν ισχύει αυτή η γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού παραμόρφωσης διότι η καμπύλη $\tau/\dot{\gamma}$ δεν είναι γραμμική. Συνεπώς:

$$\tau \neq \mu \dot{\gamma}, \quad (2a)$$

Το ιξώδες εξαρτάται εκτός των καταστατικών μεγεθών από το ρυθμό διάτμησης, το χρόνο διάτμησης και από τη γεωμετρία [4].



Ιδανικό πλαστικό ρευστό

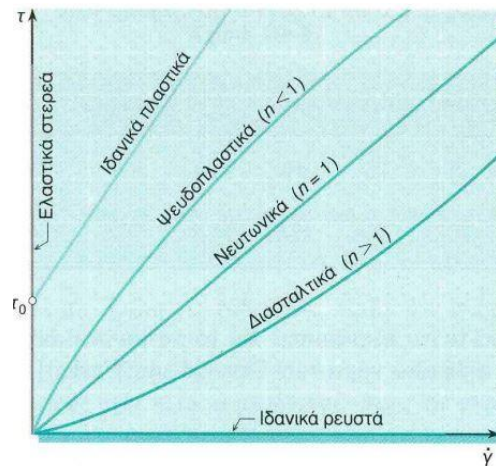
Πραγματικό πλαστικό ρευστό

Σχήμα 2.1.5-3: Διαφορά του φαινομένου ιξώδους ιδανικού και πραγματικού πλαστικού.

Στα ψευδοπλαστικά ρευστά το φαινόμενο ιξώδους μειώνεται με το ρυθμό διάτμησης. Ο νόμος των *Oswald-de Waele* που διέπει αυτά τα ρευστά, έχει την εξής χαρακτηριστική εξίσωση:

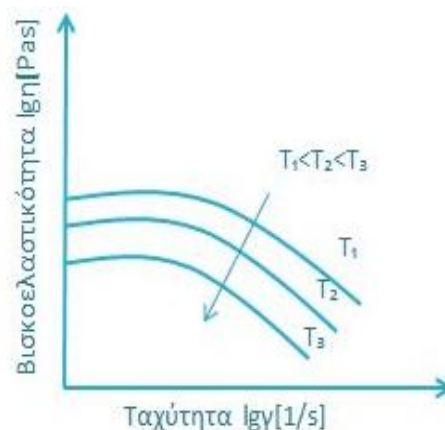
$$\tau = \kappa \dot{\gamma}^n, (2b)$$

Όπου κ ο δείκτης συνοχής και n ο ρεολογικός δείκτης συμπεριφοράς όπου $0 < n < 1$ και $n=1$ για ιδανικό νευτώνειο ρευστό, όπως χαρακτηρίζεται στην καμπύλη του σχήματος 2.1.5-4.



Σχήμα 2.1.5-4: Διάγραμμα καμπυλών φαινομένου ιξώδους διαφορετικών τύπων ρευστών.

Το ιξώδες μια μάζας πλαστικού υλικού δεν μεταβάλλεται μόνο σε σχέση με την διατμητική τάση ή την βαθμίδα ταχύτητας, αλλά και με την αλλαγή της θερμοκρασίας όπως διασαφηνίζεται στο σχήμα 2.1.5-5. Τα πλαστικά υλικά όταν θερμαίνονται βρίσκονται σε ιξώδη κατάσταση. Όταν αυξάνει η θερμοκρασία αυξάνουν και οι μέσες αποστάσεις μεταξύ των μορίων, επομένως μικραίνουν τα μέτρα των διαμοριακών δυνάμεων, και γι' αυτό μικραίνει και το μέτρο της μακροσκοπικής ελκτικής δυνάμεως df . Θερμαίνεται ένα υγρό, τότε χαμηλώνει το ιξώδες δηλαδή αυξάνεται η ταχύτητα ροής κάτω από την επίδραση μιας σταθερά παραμένουσας δύναμης [5].



Σχήμα 2.1.5-5: Διάγραμμα εξάρτησης θερμοκρασίας – βισκοελαστικότητας.

Εκτός από το ιξώδες υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την επεξεργασιμότητα των πλαστικών κατά την διάρκεια της έγχυσης. Στον πίνακα 2.1.5-1 [6] μπορεί να δει κανείς ότι υπάρχουν πλαστικά με ευρύ φάσμα ρευστότητας και επεξεργασιμότητας και άλλα με περιορισμένο. Αυτά είναι κάποια από τα στοιχεία του υλικού, που θα δημιουργήσουν δυσκολία στον χειριστή να καθορίσει με ακρίβεια τις παραμέτρους επεξεργασιμότητας.

Πλήρης Ονομασία Χημικής Ένωσης	Σύμβολο Ένωσης (DIN 7728)	Πυκνότητα [g/cm ³]	Θερμοκρασιακή Επεξεργασιμότητα [°C]	Ρευστότητα		
				1=Υψηλή	2=Μέση	3=Χαμηλή
Πολυστυρένιο	PS	1,05	180-280	1		
Στυρένιο-Βουταδιένιο Συμπολυμερές	S/B	1,05	180-280	1		
Πολυαιθυλένιο	PE	0,81-0,87	180-270 240-300	1	2	3
Πολυαμίδιο	PA	1,04-1,15	230-290	1		
Πολυπροπυλένιο	PP	0,91	240-300		2	3
Πολυοξυμεθυλένιο	POM	1,141	180-230		2	
Πολυβινιχλωρίδιο	PVC	1,38	180-210			3
Οξική Κυτταρίνη	CA	1,31	180-230	1		
Πολυκαρβονίδιο	PC	1,20	280-320			3
Πολυμεθακρυλικός μεθυλεστέρας	PMMA	1,18	170-240		2	

Πίνακας 2.1.5-1: Πίνακας στοιχείων πλαστικών πρώτων υλών.

2.2. Επεξεργασία πλαστικών με την μέθοδο της έγχυσης

2.2.1. Εισαγωγή

Οι διαμορφώσεις των υλικών γίνονται σήμερα με χρήση μηχανών και αυτοματοποιημένων μεθόδων. Η διαδικασία διαμόρφωσης απαιτεί αρκετές φορές περισσότερες μηχανές και αρκετά σύνθετες μεθόδους παραγωγής. Η ποιότητα πλέον εκφράζεται με απόλυτα συγκεκριμένες έννοιες π.χ. διαστάσεις, μηχανικές φυσικές ή χημικές αντοχές, γεωμετρικά σφάλματα, ακρίβεια των παραγόμενων τεμαχίων και ακολουθεί συγκεκριμένους κανονισμούς. Οι διαμορφώσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διαφορετικούς τρόπους, είτε με βάση την τεχνική που χρησιμοποιείται όπως π.χ. χύτευση, έλαση, κοπή, είτε με βάση τις συνθήκες διαμόρφωσης όπως π.χ. θέρμη, ψυχρή ή χημική κατεργασία κ.λπ. Επίσης η φύση του διαμορφωμένου υλικού, όπως μέταλλα, κεραμικά, πλαστικά κ.λπ. είναι επίσης μία μέθοδος κατηγοριοποίησης.

Καθώς η παρούσα εργασία αναφέρεται στην κατεργασία και διαμόρφωση πλαστικών, η χρήση της λέξης διαμόρφωση, θα αναφέρεται στην συνέχεια στη συγκεκριμένη κατηγορία υλικών.

Σύμφωνα με το *DIN 8580* οι μέθοδοι παράγωγης χωρίζονται σε έξι κατηγορίες. Η παράγωγη με έγχυση κατατάσσεται στην κατηγορία 0 εφόσον η πρώτη ύλη μόνο με ένα βήμα κατεργασίας μεταβάλλεται σε έτοιμο προϊόν το οποίο δεν απαιτεί καμία άλλη επεξεργασία ακόμη και για σύνθετα και πολύπλοκα προϊόντα.

Η έγχυση (*injection molding*) ως η σπουδαιότερη μέθοδος επεξεργασίας πολυμερών εφαρμόζεται στην παραγωγή ενός ευρέως φάσματος σε πολυπλοκότητα προϊόντων, από περιορισμένο αριθμό έως και πολύ μεγάλο αριθμό παραγόμενων τεμαχίων, τα οποία πρέπει να εμφανίζουν όμως απόλυτα ταυτόσημα χαρακτηριστικά ποιότητας.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου συνοψίζονται στην απευθείας χύτευση της πρώτης ύλης σε έτοιμο προϊόν με την ελάχιστη έως και μηδενική απαίτηση για μετέπειτα επεξεργασία του προϊόντος, την πλήρη αυτοματοποίηση, την επαναληψιμότητα και το μικρό κόστος παραγωγής για μεγάλο αριθμό παραγόμενων τεμαχίων. Τα προϊόντα με την μέθοδο της εγχύσεως είναι απαίτηση και είναι εφικτό να παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις τους μέχρι και 1/100 mm, σε ειδικές περιπτώσεις ακόμα μεγαλύτερες ακρίβειες όπως π.χ. στους οπτικούς δίσκους με γραμμώσεις.

Η έγχυση ως διαδικασία παραγωγής παρουσιάζει πολυπλοκότητα μέσα από ένα σύνολο παραμέτρων που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα και οφείλονται στην συμμετοχή τριών υποσυστημάτων. Μόνο μέσα από την απόλυτη συνεργασία και συμμετοχή των τριών αυτών μέσων στις φάσεις χύτευσης αποκτά επαναληψιμότητα στα χαρακτηριστικά του το τελικό προϊόν. Ως υποσυστήματα χαρακτηρίζονται και θα μελετηθούν στην συνέχεια: η μηχανή έγχυσης και το καλούπι.

2.2.2. Ορολογία και βασικά μεγέθη έγχυσης

Στην συνέχεια καθορίζονται οι βασικές έννοιες που αφορούν την διαμόρφωση πλαστικών με έγχυση και συγκεκριμένα την διαμόρφωση ενός τεχνικού τεμαχίου από θερμοπλαστικό υλικό:

- **Πλαστικοποίηση:** Η πλαστικοποίηση αποτελεί την φάση προετοιμασίας της πρώτης ύλης. Αποτελεί το στάδιο κατά το οποίο μετατρέπεται η πρώτη ύλη από στερεά σε ρευστή μορφή. Στο τέλος της πλαστικοποίησης λαμβάνεται μια μάζα υλικού σε τέτοια ρευστή κατάσταση ώστε να μπορεί να μεταφερθεί στην επόμενη φάση διαμόρφωσης, Ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας του τεμαχίου, η πλαστικοποίηση εστιάζει κυρίως στην εικόνα των παραμέτρων θερμοκρασιών, πιέσεων, στροφών κοχλία.
- **Πλήρωση:** Η πλήρωση ακολουθεί τη φάση της πλαστικοποίησης και αποτελεί το τελευταίο στάδιο πριν την τελική μορφοποίηση του προϊόντος. Ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας του τεμαχίου, το γέμισμα εστιάζεται κυρίως στην εικόνα της ταχύτητας έγχυσης και πιέσεων.
- **Τελική μορφοποίηση:** Η τελική μορφοποίηση ακολουθεί την φάση του γεμίσματος και ολοκληρώνει την παραγωγή του προϊόντος, στο βαθμό που στο τέλος να προκύπτει ένα προϊόν το έτοιμο προς χρήση. Ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας του τεμαχίου, η μορφοποίηση εστιάζεται στην ψύξη και στην εξώλκευση που θα επηρεάσουν καθοριστικά και τον τελικό χρόνο κύκλου παραγωγής.

2.3. Μηχανή έγχυσης

2.3.1. Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και παράλληλα η αύξηση των απαιτήσεων για την ποιότητα των διαμορφώσεων, ώθησε στην ανάπτυξη μηχανών έγχυσης και αυτοματοποιημένων συστημάτων διαχείρισης. Με τον όρο μηχανές έγχυσης εννοούμε το σύνολο των μηχανών που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση διαμόρφωσης πλαστικών με την μέθοδο του ψεκασμού της πλαστικοποιημένης μάζας σε μια κλειστή μήτρα/καλούπι. Στόχο αποτελεί η παροχή της αναγκαίας ισχύος για την εκτέλεση της διαμόρφωσης και η εξασφάλιση της συγκράτησης του τεμαχίου, η εκτέλεση των σχετικών κινήσεων της μηχανής και του καλουπιού καθώς και ο έλεγχος τους για την ορθή εξέλιξη της διαμόρφωσης.

Γενικώς ισχύει ο κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το τεμάχιο προς παραγωγή τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι και η μηχανή. Ο συγκεκριμένος κανόνας δεν βρίσκει πάντα εφαρμογή στα μικρά τεμάχια, καθόσον είναι πιο παραγωγικό να διαμορφώνονται πολλά μικρά τεμάχια στον ίδιο χρόνο σε μια μεγαλύτερη μηχανή παρά σε μια μικρή [7].

Δύο βασικοί παράγοντες επιλογής της μηχανής είναι ο όγκος του προϊόντος δηλαδή όγκος της προς πλαστικοποίηση μάζας. Όσο μεγαλύτερος ο όγκος του προς παραγωγή τεμαχίου τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η μονάδα πλαστικοποίησης και έγχυσης.

Παράλληλα πρέπει κανείς να λαμβάνει υπό όψη του και τις διαστάσεις του αντικειμένου και συγκεκριμένα κατά την κατεύθυνση κίνησης του κλειστικού την προβαλλόμενη επιφάνεια του τεμαχίου. Κατά την διαδικασία έγχυσης χυτεύεται η πλαστικοποιημένη μάζα στο καλούπι με πιέσεις που μπορεί να είναι και μεγαλύτερες από 2000 bar.

Η δύναμη εφαρμογής επί του κλειστικού του καλουπιού πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πίεση έγχυσης, έτσι ώστε το καλούπι να παραμένει κλειστό κατά την έγχυση για να μην υπάρχει διαρροή υλικού στο επίπεδο διαχωρισμού των επιφανειών του καλουπιού. Κατ' αυτό τον τρόπο το κλειστικό της μηχανής θα πρέπει να εφαρμόζει την ανάλογη δύναμη στο καλούπι. Με αυτό το κριτήριο κατηγοριοποιούνται και οι μηχανές έγχυσης με βάση την δύναμη του κλειστικού τους (120-80000kN).

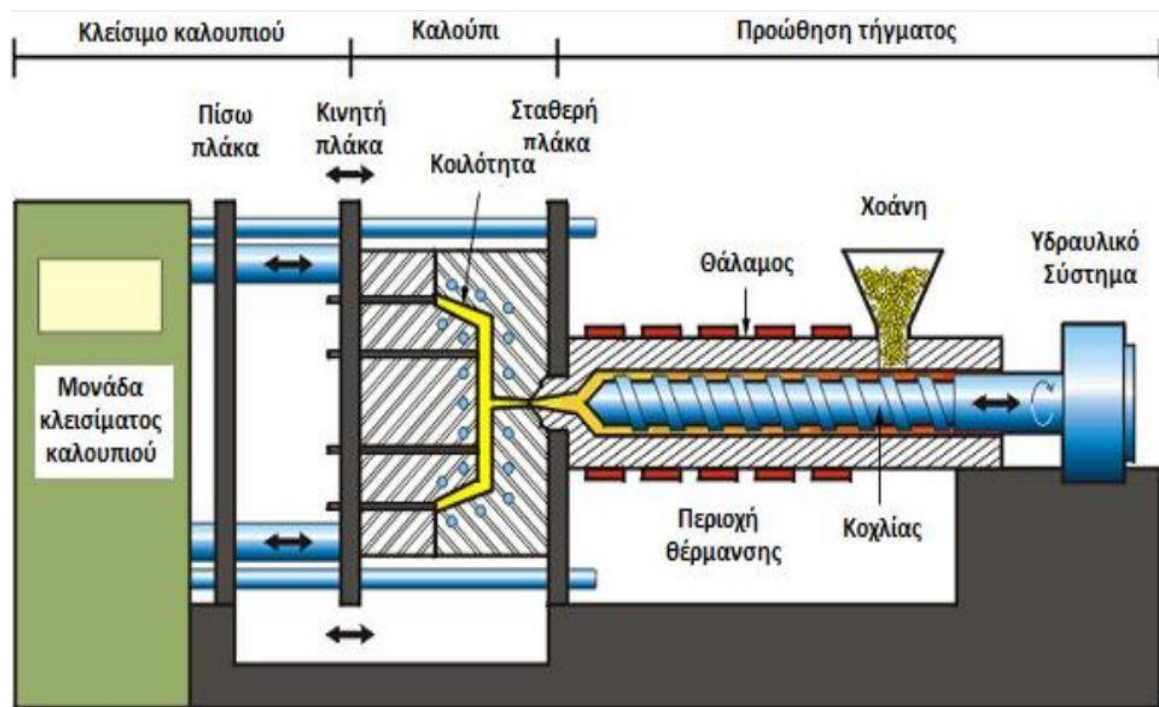
2.3.2. Βασικά στοιχεία μηχανών έγχυσης

Στη διαμόρφωση με έγχυση παράγονται προϊόντα με διαφορετικές διαστάσεις και μορφές. Προκειμένου να παραχθούν τα προϊόντα αυτά κάτω από βέλτιστες συνθήκες παραγωγής χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι εργαλείων και μηχανών σε διαφορετικά μεγέθη και εξοπλισμούς. Τα κύρια συστατικά μέρη μιας μηχανής έγχυσης είναι τυποποιημένα σε:

- **Μονάδα κλεισίματος καλουπιού:** είναι ο μηχανισμός ανοίγματος και κλεισίματος του καλουπιού με υδραυλικό ή μηχανικό τρόπο, ή και με ηλεκτρικό σύστημα κίνησης. Το κλειστικό με την δύναμη εφαρμογής στο καλούπι αλλά και με την επιφάνεια εφαρμογής του χαρακτηρίζει το μέγεθος μιας μηχανής.
- **Μονάδα προώθησης τήγματος:** είναι η διάταξη που πλαστικοποιεί, δοσοποιεί και εγχέει την πρώτη ύλη στο καλούπι. Αποτελείται από τον θάλαμο πλαστικοποίησης, τις διατάξεις θέρμανσης, τον κοχλία και τον υδραυλικό κύλινδρο κίνησης του κοχλία.
- **Μονάδα κίνησης:** είναι υπεύθυνη για την κίνηση όλων των μηχανικών μέρων της μηχανής και του καλουπιού. Αποτελείται είτε από την υδραυλική μονάδα στην υδραυλική κίνηση είτε από τους ηλεκτροκινητήρες για την ηλεκτρική κίνηση με όλες τις βοηθητικές διατάξεις π.χ. υδραυλικούς κυλίνδρους, βαλβίδες, αγωγούς, καλωδιώσεις.
- **Μονάδα χειρισμού:** αφορά το τμήμα εισόδου των παραμέτρων από τον χειριστή και το τμήμα ρύθμισης των κινήσεων της μηχανής π.χ. αισθητήρες, λογισμικό, PLC.

2.3.3. Τύπος μηχανής έγχυσης

Ο πιο διαδεδομένος τύπος μηχανής που διαθέτουν οι εργοστασιακές μονάδες παραγωγής πλαστικών είναι οριζόντιου τύπου μηχανές της εικόνας 2.3.3-1, οι οποίες είναι και οι πιο κατάλληλες και την παραγωγή θερμοπλαστικών. Επειδή το επίπεδο διαχωρισμού του καλουπιού έχει κάθετο προσανατολισμό, τα τεμάχια είναι εύκολα να αποχωρίζονται αμέσως από το καλούπι και να μεταφέρονται είτε με το χέρι είτε με αυτοματισμό στην επόμενη φάση πχ. συσκευασία [8].



Εικόνα 2.3.3-1: Μηχανή έγχυσης οριζοντίου τύπου(injection molding machine).

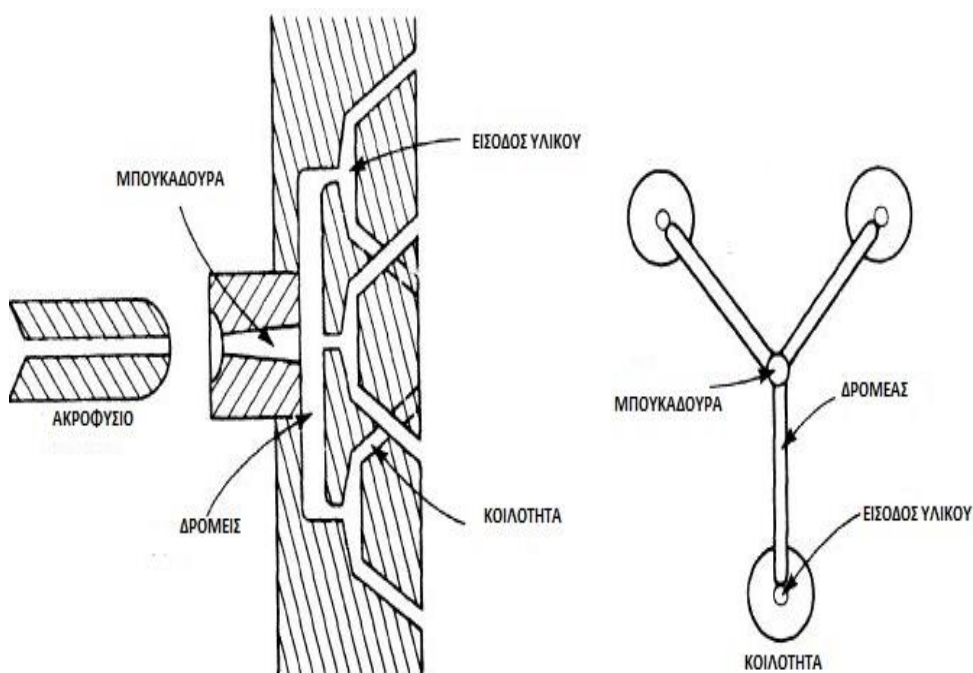
2.4. Γενικές αρχές καλουπιών μηχανών έγχυσης

Για την παραγωγή διαφορετικών προϊόντων με διαφορετικές μορφές και διαστάσεις απαιτούνται κάθε φορά και τα κατάλληλα καλούπια. Το καλούπι δεν αποτελεί μέρος της μηχανής έγχυσης και εξετάζεται πάντα σαν ξεχωριστή μονάδα στην έγχυση.

Η αποστολή ενός καλουπιού είναι παραλαβή της πλαστικοποιημένης μάζας η διανομή της στον εσωτερικό θάλαμο μορφής, η ψύξη του και η εξώλκευση του. Από αυτές τις βάσεις ενέργειες προκύπτουν οι δευτερεύουσες όπως η παραλαβή δυνάμεων η μεταφορά και η οδήγηση κινήσεων των μερών του καλουπιού. Τα μέρη ενός καλουπιού έγχυσης αποτελούνται από τα εξής:

- **Θάλαμος εισόδου πλαστικοποιημένης μάζας**

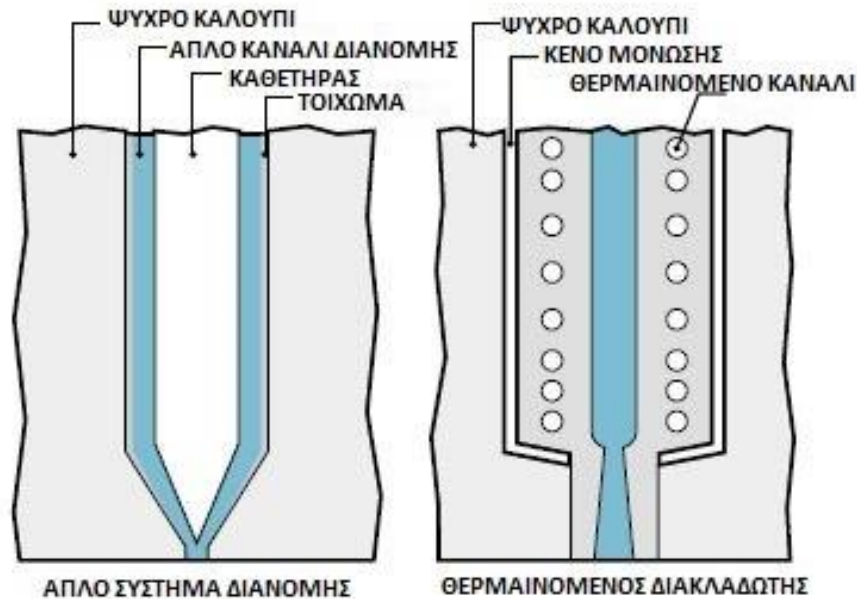
Η είσοδος του υλικού στη κοιλότητα του καλουπιού (cavity) επιτυγχάνεται μέσω της μπουκαδούρας (sprue) και του συστήματος διανομής, όπως αναπτύσσεται στο σχήμα 2.4-1. Το σύστημα διανομής αποτελείται από τους δρομείς (runner) και την είσοδο στην κοιλότητα (gate) βάση αρχής ότι το υλικό θα πρέπει να οδηγηθεί υπό συνθήκες όμοιας κατάστασης και πίεσης σε όλες τις θέσεις του καλουπιού ομοιόμορφα και ταυτόχρονα. Οι διαστάσεις και η θέση της μπουκαδούρας καθορίζονται από την μορφή του προϊόντος.



Σχήμα 2.4-1: Στοιχεία συστήματος διανομής υλικού στο καλούπι.

- **Διακλαδωτής ή δρομέας**

Τα περισσότερα συστήματα διανομής περιλαμβάνουν δρομείς. Σπάνιες είναι οι περιπτώσεις που η έκχυση του υλικού στην κοιλότητα γίνεται απευθείας από την μπουκαδούρα. Οι δρομείς διαχωρίζονται με βάση τις απώλειες θερμότητας του ζεστού υλικού προς τα ψυχρά τοιχώματα του καλουπιού σε συμβατούς (*cold runner*) και θερμαινόμενους (*hot runner*).

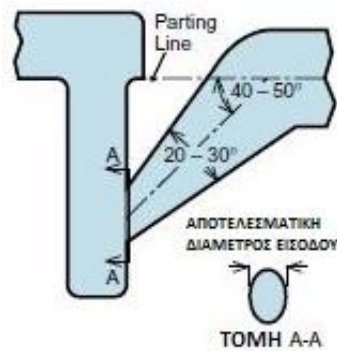


Σχήμα 2.4-2: Διαφορές μεταξύ συμβατού και θερμαινόμενου συστήματος διανομής.

Η δυνατότητα χρήσης θερμαινόμενης μπουκαδούρας και διακλάδωσης συνιστάται από σχεδιαστές καλουπιών όπως εκείνος του σχήματος 2.4-2 την απώλεια θερμότητας του υλικού, καθ' όσον το διατηρεί θερμό καθόλη τη μεταφορά του προς τα *gates* [9]. Επίσης περιορίζεται και η απώλεια υλικού καθόσον με αυτό το σύστημα επιτυγχάνεται η αυτόματη απομάκρυνση του προϊόντος ενώ το υλικό της μπουκαδούρας παραμένει σε κατάσταση τήξης ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον επόμενο κύκλο.

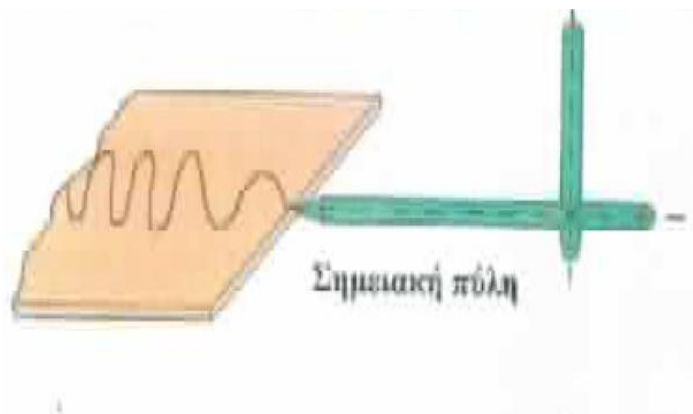
- **Μορφές εισόδου υλικού /gate**

1. Η απλούστερη μορφή είναι η μορφή με συνδεδεμένο τον αφαλό του σχήματος 2.4-3. Βρίσκει συνήθως εφαρμογή σε προϊόντα με μεγάλα πάχη. Το υλικό της μπουκαδούρας ακολουθεί το προϊόν και θα απομακρυνθεί από αυτό αργότερα σε κάποια άλλη φάση της παραγωγής.



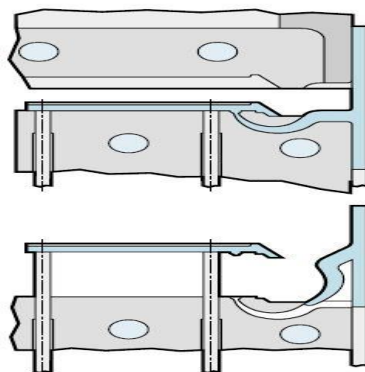
Σχήμα 2.4-3: Εύρος γεωμετρικών διαστάσεων εισόδου μορφής αφαλού.

2. Η σημειακή είσοδος συνδέεται σημειακά με το προϊόν, εκχέει με τρόπο ανάλογο της εικόνας 2.3.4-4. Έτσι απομακρύνεται εύκολα και άμεσα από το προϊόν.



Εικόνα 2.4-1: Τρόπος έκχυσης σημειακής εισόδου στην κοιλότητα.

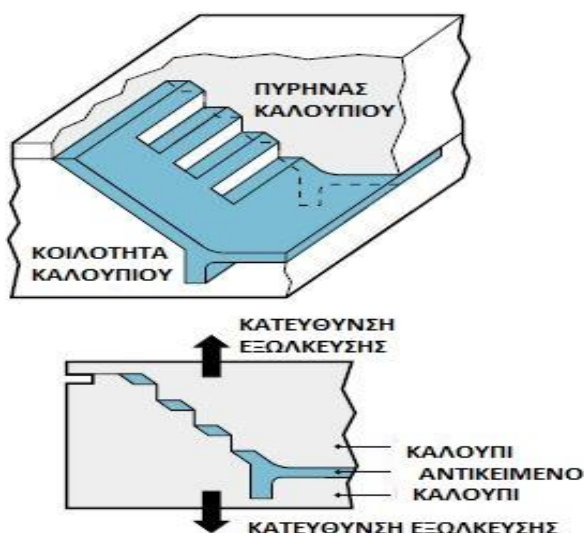
3. Οι είσοδοι μορφής τούνελ μπορούν να πλησιάσουν το κομμάτι και να το πληρώσουν ακόμα και από επιφάνειες που βρίσκονται στην κάτω πλευρά της κοιλότητας, πολλές φορές και σχεδόν παράλληλα με το τεμάχιο όπως απεικονίζεται στο *σχήμα 2.4-4*. Η μορφή τούνελ χρησιμοποιείται κυρίως σε καλούπια με πολλές θέσεις, σε αυτή την περίπτωση το υλικό της μπουκαδούρας απομακρύνεται από το προϊόν άμεσα.



Σχήμα 2.4-4: Απομάκρυνση εισόδου μορφής τούνελ.

- **Θάλαμος έγχυσης προϊόντος**

Είναι ο χώρος (μορφή) που το πλαστικοποιημένο υλικό καταλήγει μέσω της μπουκαδούρας σε ένα κλειστό θάλαμο-κοιλότητα, όπου το προϊόν θα πάρει και την τελική του μορφή. Πρόκειται στην ουσία για το αρνητικό του προϊόντος, που καθορίζεται από το διάκενο του πυρήνα / αρσενική μορφή (*core*) με την κοιλότητα / θηλυκή μορφή (*cavity*). Τα δυο μέρη του καλουπιού διακρίνονται καλύτερα στο *σχήμα 2.4-5*.



Σχήμα 2.4-5: Διατομή κλειστού καλουπιού δυο πλακών μορφής.

Κατά την έκχυση στο θάλαμο του καλουπιού, υπάρχουν τρεις πιέσεις που χαρακτηρίζουν την διεργασία της έκχυσης. Πρόκειται για την πίεση που ασκείται κατά την φάση της ταχύτητας, την πίεση κατά την φάση της συγκράτησης και την πίεση της αντίθλιψης. Δεν θα αναφερθούμε στην πρώτη από αυτές διότι η πίεση ταχύτητας κατά την φάση της έκχυσης καθορίζεται από την ταχύτητα έκχυσης που είναι απαιτούμενη να πληρώσει την κοιλότητα, επομένως δεν επενεργούμε άμεσα σε αυτή αρκεί να επιτύχουμε την επιθυμητή ταχύτητα έκχυσης. Η πίεση της συγκράτησης όμως παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη βελτίωση του προϊόντος.

Πρέπει πρώτα ο χειριστής πρέπει να βεβαιωθεί ότι η πίεση συγκράτησης (ή μεταγενεστέρα ή πίεση σιδερώματος) αρχίζει την κατάλληλη στιγμή). Στις περισσότερες των περιπτώσεων ξεκινάει αμέσως μετά την ολοκλήρωση της πλήρωσης του γεμίσματος. Στα ημικρυσταλλικά υλικά η μεταφορά της πίεσης συγκράτησης παραμένει σταθερή μέχρι που το υλικό φθάνει στο σημείο κρυστάλλωσης οπότε επέρχεται απότομη στερεοποίηση. Ενώ η πίεση στην κοιλότητα πέφτει απότομα λόγω του μεγάλου βαθμού συρρίκνωσης κατά τη κρυστάλλωση [10].

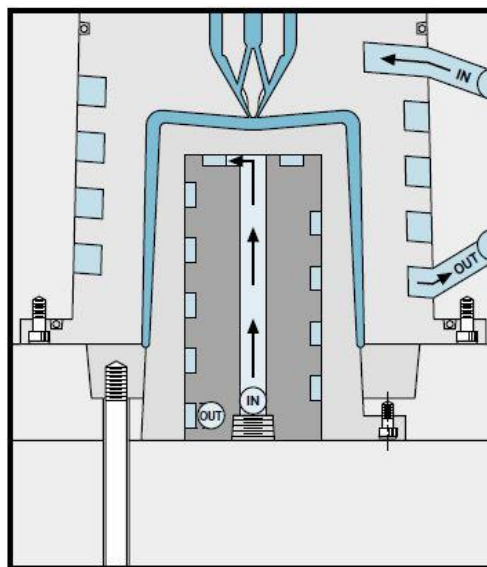
Τέλος η πίεση της αντίθλιψης εφαρμόζεται προκειμένου να συμβάλει στη δημιουργία ενός τήγματος περισσότερο συμπαγούς και ομοιογενούς. Όμως απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην εφαρμογή της, καθώς εφαρμόζεται στον κοχλία και κατά την εφαρμογή της αυξάνονται οι τριβές του κοχλία με το υλικό με αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη θερμική επεξεργασία του τήγματος. Για αυτό το λόγο είναι δυνατόν να συμπορεύεται η πίεση αντίθλιψης με την πίεση της συγκράτησης, εφόσον είναι δυνατόν να αναγνώσουμε τις πιέσεις είτε σαν υδραυλικές είτε σαν πιέσεις τήγματος. Στην πρώτη περίπτωση το όργανο βρίσκεται μπροστά από τον κοχλία ενώ στη δεύτερη στο έμβολο της έκχυσης. Για να καταλάβουμε τη διαφορά των δυο αναγνώσιμων τιμών αρκεί να φανταστούμε ότι υπάρχει μια δύναμη *F_{υδραυλική}* που σπρώχνει το έμβολο του κοχλία κατά την έκχυση. Αν θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχουν τριβές στον κοχλία κατά την κίνηση του τότε μπορούμε να ανάγουμε αυτή τη δύναμη μέσω του βάκτρου στον κοχλία και κατόπιν στο τήγμα που βρίσκεται μπροστά από αυτόν. Έτσι η πίεση τήγματος καθορίζεται από την επιφάνεια του, *A_{κοχλία}* και κατά συνέπεια την διάμετρο του κοχλία. Η μαθηματική αναγωγή της μέγιστης υδραυλικής πίεσης εντέλει σε πίεση τήγματος παίζει καθοριστικό ρόλο για τη διαδικασία αντοχών του υπολογισμού της κατεργασίας των μετάλλων όταν κατασκευάζουμε νέα καλούπια [11]. Για μεγαλύτερη ακρίβεια ανάγνωσης της πίεσης του τήγματος εκτιμούμε την τιμή της μέσα στην κοιλότητα με ειδικά μανόμετρα εκμηδενίζοντας σφάλματα μέτρησης που εγκυμονούνται, όπως είναι οι τριβές ή το ιξώδες του υλικού στο φούρνο.

2.5. Επεξεργασία των πλαστικών με την μέθοδο της ψύξης

2.5.1. Γενική έννοια της μεθόδου ψύξης

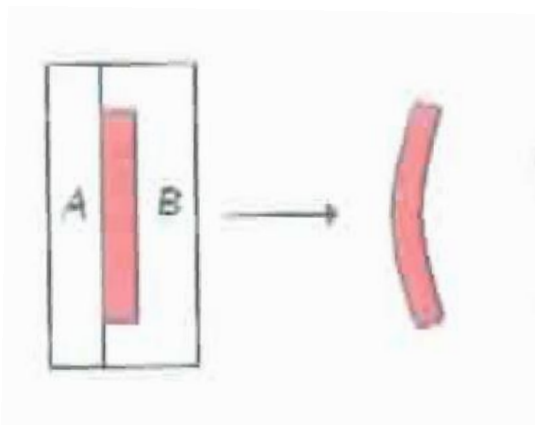
Η θερμότητα που μεταφέρει η πλαστικοποιημένη μάζα του υλικού όταν πλέον έχει εγχυθεί στο καλούπι και προκειμένου αυτή να στερεοποιηθεί θα πρέπει να απαχθεί μέσω ενός ψυκτικού μέσου. Για τα θερμοπλαστικά υλικά σχεδιάζονται στο καλούπι κανάλια ψύξης όσο το δυνατόν πιο κοντά στο προϊόν, μέσα από τα οποία κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο. Τα κανάλια σχεδιάζονται σε ένα πλέγμα, έτσι ώστε να καλύπτονται ομοιόμορφα όλες εκείνες οι περιοχές από τις οποίες πρέπει να υπάγεται θερμότητα. Οι θερμοκρασίες που πρέπει να επιτυγχάνονται κυμαίνονται μεταξύ 30 έως 300 βαθμούς ανάλογα με το υλικό μορφοποίησης.

Ιστορικά, αυτό έχει επιτευχθεί με τη δημιουργία πολλών ευθειών τρυπών στο εσωτερικό του πυρήνα και κοιλότητας αναγκάζοντας το ψυχρό υγρό να κυκλοφορεί και να διεξάγει την πλεονάζουσα θερμότητα μακριά, ώστε το πλαστικό στο τέλος να στερεοποιηθεί και να μπορέσει να εξωλκευτεί. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αυτών των οπών βασίζονται στην συμβατική διαδικασία κατεργασίας *drilling*. Αυτή όμως η απλή τεχνολογία μπορεί να δημιουργήσει μόνο ευθείες τρύπες και έτσι το κύριο πρόβλημα είναι η αδυναμία παραγωγής περίπλοκων γεωμετριών που απαιτούνται από κανάλια σε 3D χώρο όπως του σχήματος 2.5.1-1. Μια εναλλακτική μέθοδος, όπως είναι τα πολυαξονικά κέντρα κατεργασιών παρέχει ένα σύστημα ψύξης που «συμμορφώνεται» προς το σχήμα του τμήματος του πυρήνα και της κοιλότητας.



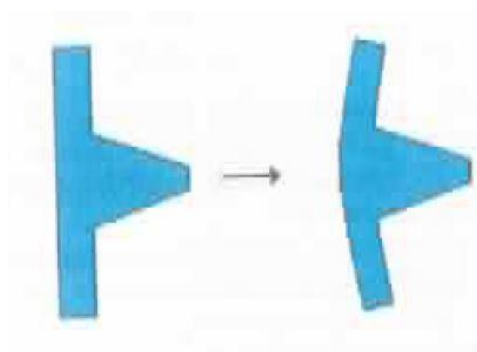
Σχήμα 2.5.1-1: Δυνατότητα διάτρησης σπирάλ καναλιών ψύξης σε ένα καλούπι.

Όπως και στην χύτευση έτσι και εδώ μειώνεται με την πήξη της μάζας ο όγκος του προϊόντος. Όπως σχεδιάζεται το καλούπι στην φόρμα χύτευσης μεγαλύτερο κατά το ποσοστό συρρίκνωσης έτσι και στην έγχυση σχεδιάζεται το καλούπι μεγαλύτερο από τις τελικές διαστάσεις του προϊόντος και για συστολές στα θερμοπλαστικά με μια ποσοστιαία απόκλιση 0,5-4% των αρχικών του διαστάσεων [12].



Σχήμα 2.5.1-2: Πρόκληση κάμψης λόγω ανομοιόμορφη ψύξη του καλουπιού.

Πέραν της συρρίκνωσης ένα ακόμα μέγεθος επηρεάζει τις διαστάσεις του προϊόντος, πρόκειται για την παραμόρφωση. Η παραμόρφωση μπορεί να είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών ταχυτήτων ψύξης του αντικειμένου για διαφορετικού πάχους περιοχές του προϊόντος όπως και λόγω των προσανατολισμών ροής του υλικού κατά την έγχυση. Οι προσανατολισμοί προκύπτουν ως αποτέλεσμα της κατεύθυνση προσανατολισμού των μακρομορίων του υλικού κατά την διαδικασία της έγχυσης. Ένα από τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων, είναι η κάμψη του τελικού τεμαχίου όπως αναπαριστάνεται στο σχήμα 2.5.1-2 . Οι παραμορφώσεις αυτές αντιμετωπίζονται μόνο με τον κατάλληλο σχεδιασμό του καλουπιού (νευρώσεις, σχεδιασμός των επιφανειών σε αντίθετη κατεύθυνση) και αποφυγή επικίνδυνων διατομών , όπως αναγνωρίζεται στο σχήμα 2.5.1-3.



Σχήμα 2.5.1-3: Παραμόρφωση αντικειμένου λόγω κακή γεωμετρίας σχεδιασμού.

2.6. Απομάκρυνση των πλαστικών με την μέθοδο της εξώλκευσης

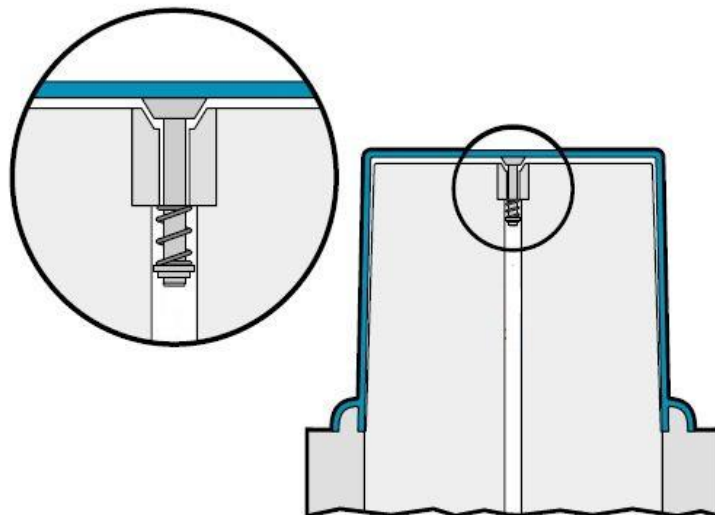
2.6.1. Γενική έννοια της μεθόδου εξώλκευσης

Το σύστημα εξώλκευσης σχεδιάζεται για την απομάκρυνση του τελικού μορφοποιημένου τεμαχίου από το καλούπι. Τον διαχωρισμό του αντικειμένου από το διαμορφωμένο σύστημα διανομής, μπορούν να τον επιτύχουν εξωλκείς ή διατρητές που βρίσκονται συνήθως στην κινητή πλάκα μορφής, όπως διακρίνονται στην *εικόνα 2.5.1-1*.



Εικόνα 2.6.1-1: Αποκόλληση παραγόμενου τεμαχίου από το κομμάτι διανομής κατά την εξώλκευση.

Το σύστημα εξώλκευσης σχεδιάζεται με βάση τα γεωμετρικά στοιχεία του προϊόντος του καλουπιού. Οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν κινούμενα επίπεδα διαχωριζόμενων πλακών, έμβολα και κινούμενα ένθετα.



Σχήμα 2.6.1-1: Παράδειγμα υδραυλικής βαλβίδας εξώλκευσης στην κορυφή του πυρήνα.

2.7. Απαιτήσεις κατά τον σχεδιασμό του υπό μελέτης καλουπιού

2.7.1. Εισαγωγή

Οι απαιτήσεις κατά τον σχεδιασμό ενός καλουπιού είναι:

- Παραλαβή της μάζας
- Διανομή της μάζας
- Μορφοποίηση του προϊόντος
- Ψύξη του προϊόντος
- Εξώλκευση του προϊόντος

Δευτερεύουσες απαιτήσεις αποτελούν:

- Η παραλαβή δυνάμεων
- Παραλαβή κινήσεων
- Οδήγηση του καλουπιού

Η πολυπλοκότητα των απαιτήσεων κατά τον σχεδιασμό του καλουπιού αντιμετωπίζεται σήμερα με την βοήθεια εξειδικευμένων προγραμμάτων όπως τα προγράμματα CAD .Ο σχεδιασμός σε τρισδιάστατη μορφή 3D δεν βοηθά μόνο στην κατασκευή ή στην συναρμολόγηση των μερών του καλουπιού αλλά και μπορεί να συντέλεσει στην εξεύρεση συμπερασμάτων που αφορούν την παραγωγή. Προγράμματα που αφορούν την γεωμετρία του καλουπιού ή τις κατεργασίες όπως τα FEM (finite element method), CAE και CAM (engineering, machining) καθιστούν την ανάπτυξη πολύπλοκων εφαρμογών απλή υπόθεση.

2.7.2. Απαιτήσεις διαστασιολόγησης κατά τον σχεδιασμό του υπό μελέτη καλουπιού

Η διαστασιολόγηση ενός καλουπιού περιλαμβάνει κυρίως την ρεολογική, θερμική και μηχανική αξιολόγηση του. Περιγραφικά παρουσιάζονται τα κυρία στοιχεία, που θα αναλυθούν οι τρεις κατηγορίες υπολογισμού:

❖ Ρεολογική

- Προσδιορισμός της εικόνας γεμίσματος
- Ρεολογικός υπολογισμός της φάσης γεμίσματος και μεταγενέστερης πίεσης (ποσοτικός προσδιορισμός π.χ. των πιέσεων και θερμοκρασιών)
- Προσδιορισμός της θέσης εισόδου γεμίσματος.

❖ Θερμική

- Υπολογισμός του κύκλου ψύξης
- Θερμικό ισοζύγιο του καλουπιού
- Προσδιορισμός συστήματος ψύξης

❖ Μηχανική

- Κινηματική
- Αντοχή του καλουπιού

2.7.2.1. Ρεολογικός Υπολογισμός

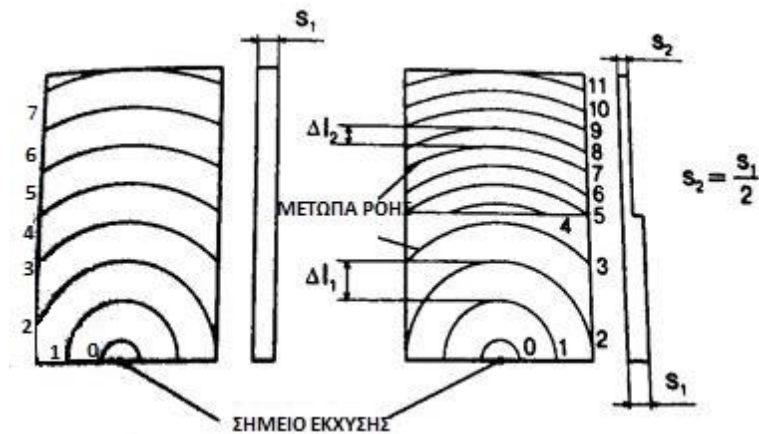
Στην ρεολογική αποτίμηση ενός καλουπιού ελέγχεται η συμπεριφορά γεμίσματος της κοιλότητας, η δόση γεμίσματος αλλά και η φάση της μεταγενέστερας πίεσης. Η φάση γεμίσματος και η φάση συγκράτησης είναι καθοριστικές για τα τελικά χαρακτηριστικά του προϊόντος. Με την βοήθεια της εικόνας γεμίσματος προσδιορίζονται:

1. Πιθανές γραμμές ένωσης των μετώπων ροής
2. Εγκλωβισμός περιοχών αέρα
3. Θέσεις μπουκαδούρας

Η εικόνα ροής υπολογιζόταν από τους έμπειρους τεχνικούς χωρίς την χρήση προγραμμάτων σχεδιαστικά ως ακολούθως. Σε δύο επίπεδες πλάκες μπορεί κανείς να δει την θέση των μετώπων ροής κατά την διάρκεια του χρόνου, με είσοδο του υλικού από το ίδιο σημείο. Τα μέτωπα αναπτύσσονται κυματοειδώς γεμίζοντας τον κενό χώρο, όπως διαγραμματίζονται στο *σχήμα 2.7.2.1-1*. Στην περίπτωση που μειώνεται η διατομή αλλάζει και η εικόνα γεμίσματος. Σε ορθογώνιες διατομές μπορεί κανείς να υπολογίσει με την βοήθεια της εξίσωσης:

$$\frac{\Delta l_1}{\Delta l_2} = \frac{s_1}{s_2}, \text{ (3) όπου:}$$

Δl (mm) είναι η πρόοδος του μετώπου και s (mm) είναι το πάχος του τοιχώματος.



Σχήμα 2.7.2.1-1: Πρόοδος του μετώπου ροής συναρτήσει της μεταβολής πάχους των τοιχωμάτων.

Καθώς μεταβάλλεται το πλάτος του ορθογωνίου κατά το μισό, μειώνεται η απόσταση των μετώπων κατά το μισό. Το οποίο σημαίνει πρακτικά ότι διπλασιάζεται ο χρόνος γεμίσματος. Στην γραφική αυτή παράσταση όμως δεν λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του υλικού οι παράμετροι έγχυσης.

Την ανάπτυξη του γεμίσματος ή αλλιώς εικόνα γεμίσματος ή μελέτη γεμίσματος, μπορεί κανείς να παρακολουθήσει τροφοδοτώντας το καλούπι σταδιακά από μικρότερη δόση υλικού έως το πλήρες γέμισμα του. Τοποθετώντας τα τεμάχια το ένα επάνω στο άλλο με την σειρά παραγωγής τους, έχει κανείς την τελική εικόνα γεμίσματος, σαν το παράδειγμα της εικόνας 2.6.2.1-1.



Εικόνα 2.7.2.1-1: Παράδειγμα ανάπτυξη ροής κατά την πλήρωση.

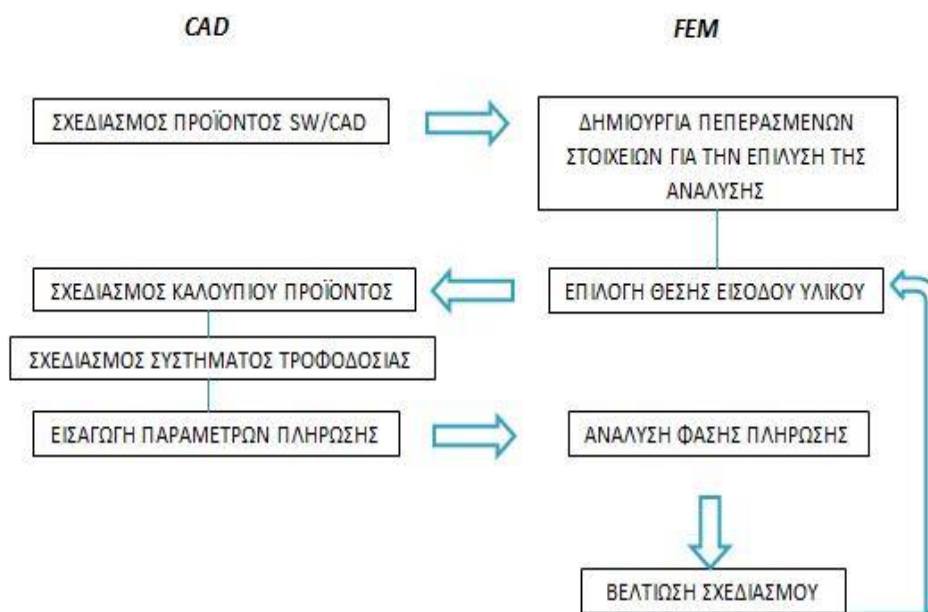
Αντίθετα στην ρεολογικό υπολογισμό μέσω προγραμμάτων λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του υλικού, όπως το *MFI*, ή της παραγωγής όπως η ταχύτητα έγχυσης, η θερμοκρασία έγχυσης όπως και τα υπόλοιπα ρεολογικά χαρακτηριστικά των υλικών.

Έτσι χρειάζεται να υπολογιστούν μόνο :

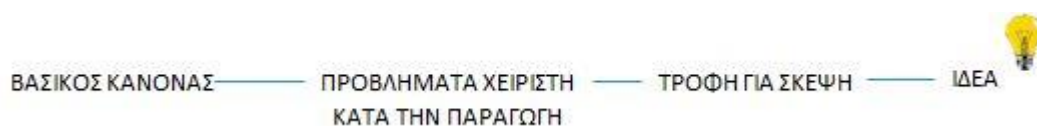
- Οι απαιτήσεις για το ύψος των εφαρμοζόμενων πιέσεων
- Οι θερμοκρασίες τήξης
- Οι ταχύτητες έγχυσης

Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας μελέτης είναι ότι δίδεται η δυνατότητα με βάση μια δεδομένη γεωμετρία να υπολογισθεί με ακρίβεια ο αριθμός, η θέση και η μορφή των εισόδων του υλικού κάτω από διαφορετικές παραμέτρους έγχυσης έτσι ώστε να αποφευχθούν ελαττώματα στην παραγωγή, όπως π.χ. ο εγκλωβισμός αέρα.

Στο παράδειγμα του σχήματος 2.7.2.1-2 φαίνεται το λογικό διάγραμμα υπολογισμού της ρεολογική συμπεριφοράς ενός οποιοδήποτε αντικειμένου που θα μπορούσε να εμφανίζει ελαττώματα εγκλωβισμένου αέρα. Με αλλαγή της θέσης της εισόδου υλικού και παράλληλο ακριβή προσδιορισμό του ύψους των πιέσεων που εφαρμόζονται βελτιώνει το αποτέλεσμα.



Σχήμα 2.7.2.1-2: Ανταλλαγή δεδομένων CAD- FEM για τη βελτιστοποίηση της θέσης εισόδου.



Σχήμα 2.7.2.1-3: Αναπαράσταση πορείας σκέψης.

Τα προγράμματα προσομοίωσης συνδέουν, όπως είδαμε στο παραπάνω παράδειγμα, τις κύριες παραμέτρους της έκχυσης (πχ. απαιτούμενη πίεση πλήρωσης) για να προσδιορίσουν τα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Δίνοντας οι μηχανικοί **βάση γενικού κανόνα (rule of thumb)** προτεραιότητα σε μια παράμετρο της ανάλυσης δίνονται τα τελικά αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας συνάρτηση αυτής.

Εάν χρησιμοποιούσαμε αυτή την δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ CAD και FEM στα διάφορα βήματα θα μπορούσαμε να λαμβάνουμε σημαντικά στοιχεία **όχι μόνο για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού** των χαρακτηριστικών αντικειμένου ή του καλουπιού του, **αλλά για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ίδιας της παραγωγής του**. Έτσι η διαδικασία αλληλεπίδρασης των CAD-FEM θα μπορούσε να αποδειχθεί σωτήρια για το πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο χειριστής κατά τα πρώτα βήματα της παραγωγής. Αυτή είναι και η βασική ιδέα, που πρόεκυψε από πορεία σκέψης, όπως καταγράφεται στο *σχήμα 2.7.2.1-3*. Αυτή η ιδέα θα εκμεταλλευτεί η παρούσα εργασία να αποδείξει στον κόσμο της παραγωγής πλαστικών ότι η σχέση των προγραμμάτων CAD και FEM θα μπορούσε να έχει χρήση στα χρονοβόρα βήματα δοκιμών –αλλαγών τιμών των παραμέτρων για την βελτιστοποίηση του παραγόμενου αντικειμένου.

2.7.2.2. Θερμικός Υπολογισμός

Όσο σημαντική είναι η φάση γεμίσματος τόσο σημαντική είναι επίσης και η φάση ψύξης για την ποιότητα του προϊόντος. Το προϊόν ψύχεται στο καλούπι για τόσο χρονικό διάστημα όσο απαιτείται για να μπορεί να στερεοποιηθεί και να εξωλκευθεί.

Η ψύξη του καλουπιού πρέπει να διαστασιολογηθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να επιτευχθεί η απαγωγή της θερμότητας ομοιόμορφα και σε ελάχιστο χρόνο από το προϊόν. Έτσι δεν επηρεάζεται όλο το αποτέλεσμα της ποιότητας αλλά και η μεγιστοποίηση της παραγωγής μέσω της μείωσης του χρόνου ψύξης. Ο κύκλος παραγωγής θα είναι τόσο μικρότερος όσο και ο χρόνος ψύξης.

Η θερμική εκτίμηση ενός καλουπιού περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

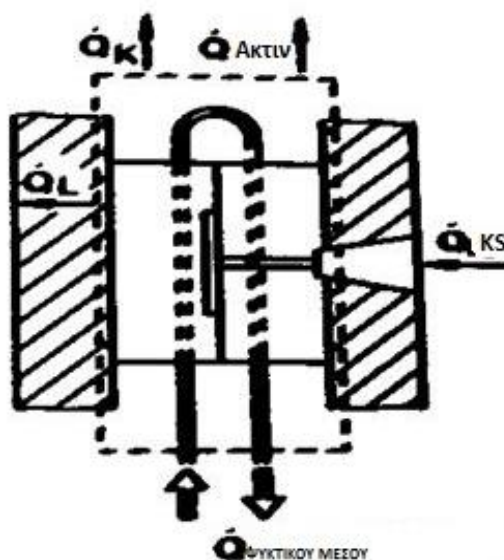
- Υπολογισμός του κύκλου ψύξης
- Ενεργειακό ισοζύγιο
- Καθορισμός του συστήματος ψύξης

Λαμβάνοντας υπόψη την θερμοκρασία της μάζας, την θερμοκρασία των τοιχωμάτων, την θερμοκρασία περιβάλλοντος και την θερμοκρασία εξώλκευσης μπορεί να υπολογισθεί το θερμικό ισοζύγιο.

Ως ισοζυγιακό χώρο ορίζει κανείς τον χώρο που περιλαμβάνει τις διαδικασίες ανταλλαγής θερμότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.2.2-1. Πρόκειται για την είσοδο θερμότητας που φέρει η πλαστικοποιημένη μάζα \dot{Q}_{ks} , ενώ έξοδος είναι η ροή θερμότητας μέσω του ψυκτικού μέσου $\dot{Q}_{\psi\kappa\tau\iota\kappa\omicron\upsilon\gamma}$, η θερμότητα από επαγωγή \dot{Q}_k , η ακτινοβολούμενη θερμότητα στο πε-

ριβάλλον \dot{Q}_{AKTIV} , όπως και η ροή θερμότητας στην κατεύθυνση της μηχανής μέσω του συστήματος πρόσδεσης του καλουπιού στις πλάκες του κλειστικού \dot{Q}_L .

Ο υπολογισμός και καθορισμός του συστήματος ψύξης γίνεται με βασική αρχή την ομοιόμορφη απαγωγή της θερμότητας από την μορφοποιημένη μάζα. Έτσι προσδιορίζεται ο αριθμός, το είδος, οι αποστάσεις των καναλιών, η θερμοκρασία εισόδου ψύξης. Ο συνολικός κύκλος παραγωγής επηρεάζεται ως τελικό αποτέλεσμα, καθόσον ο χρόνος ψύξης είναι κατά γενικό κανόνα το 50 έως 80% του συνολικού κύκλου παραγωγής.



Σχήμα 2.7.2.2-1: Θερμικό ισοζύγιο σε κλειστό καλούπι.

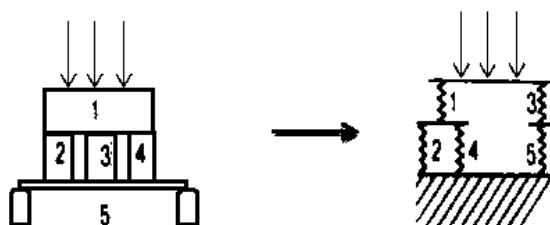
2.7.2.3. Μηχανικός Υπολογισμός

Τα καλούπια έγχυσης είναι από τις πλέον φορτιζόμενες τεχνικές κατασκευές, εφόσον επιβάλλονται σε αυτά δυνάμεις κλειστικού σε χιλιάδες τόνους και εσωτερικές πιέσεις μέχρι και 2000 bar.

Επειδή τα προϊόντα που παράγονται πρέπει να είναι επίσης μεγάλης ακρίβειας, απαιτούνται στην κατασκευή και εφαρμογή τους μεγάλες ακρίβειες και άριστη συμπεριφορά στις παραμορφώσεις.

Τα μέρη ενός καλουπιού συμπεριφέρονται πρακτικά όπως ένα ελατήριο σε φόρτιση και αποφόρτιση, όπως μοντελοποιείται στο σχήμα 2.7.2.3-1. Ο υπολογισμός των παραμορφώσεων ακολουθεί ένα μοντέλο συμπεριφοράς ελατηρίων το οποίο μπορεί να προσομοιώσει άριστα την συμπεριφορά του καλουπιού.

Για πολύπλοκες γεωμετρίες καλουπιών και φορτίσεις είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών λογισμικών [13].



Σχήμα 2.7.2.3-1: Μοντελοποίηση τμημάτων καλουπιού με συμπεριφορά ελατηρίων.

2.7.3. Ποιοτικές απαιτήσεις πλαστικών προϊόντων

Μια ιδιαίτερα χαρακτηριστική απόδοση του όρου «ποιότητα» βρίσκει κανείς στον αγγλοσαξονικό χώρο όπου η λέξη ποιότητα συνδέεται με τον όρο “fitness for use” δηλαδή καταλληλότητα για χρήση.

Το επίπεδο της ποιότητας των προϊόντων που χρησιμοποιούνται σήμερα στον τεχνικό ή κατασκευαστικό τομέα θεωρείται πολύ σημαντικό, ιδιαίτερα σε προϊόντα με απαιτήσεις, όπου οι ανοχές τόσο στις αντοχές όσο και στα χαρακτηριστικά είναι πολύ αυστηρές, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου η αστοχία επηρεάζει τις προοπτικές του τελικού τεχνικού προϊόντος.

Η ακρίβεια των διαστάσεων του προϊόντος από πλαστικό, οι μηχανικές, χημικές και θερμοκρασιακές αντοχές επηρεάζουν την διάρκεια ζωής του. Η στυλνότητα, χρωματισμός, επιφανειακά σημάδια επηρεάζουν την εμφάνιση αυτών. Η ποιότητα είναι ένα μέγεθος που δύσκολα μπορεί κανείς να μετρήσει, εφόσον δεν υπάρχουν ενιαία μέτρα και σταθμά και για αυτό πρέπει για κάθε προϊόν να ορίζεται αυτή κάθε φορά εκ νέου.

Γενικότερα με τον όρο ποιότητα εννοούνται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενός προϊόντος των οποίων οι αποκλίσεις καθορίζονται από τον πελάτη.

Ποιά από αυτά τα μεγέθη είναι πρωτεύουσας σημασίας, αυτό εξαρτάται πάντα από την κάθε εφαρμογή του προϊόντος. Κατά περίπτωση μπορεί να συμβαίνει ότι αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά μεταξύ τους και θα πρέπει να επιλεγεί μια συμβιβαστική λύση, ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός στο προϊόν.

Τα χαρακτηριστικά αυτά για προϊόντα με έγχυση πλαστικού συνοψίζονται στα ακόλουθα, του πίνακα 2.6.3-1:

Χαρακτηριστικά	Μεγέθη ποιότητας
<u>Γεωμετρικά</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Διαστάσεις • Συρρίκνωση • Παραμόρφωση • Επιφανειακή εμφάνιση
<u>Μηχανικά</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Αντοχή σε εφελκυσμό • Αντοχή σε κάμψη • Αντοχή σε κρούση • Μέτρο ελαστικότητας
<u>Εσωτερικά</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Ειδικό βάρος • Προσανατολισμός υλικού
<u>Οπτικά</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Στιλπνότητα • Χρώμα • Διαφάνεια • Ομοιομορφία
<u>Ηλεκτρικά</u>	Διηλεκτρική συμπεριφορά και αντίσταση
<u>Χημικά</u>	Αντοχή σε ρηγμάτωση
<u>Οικονομικά</u>	Κύκλος παραγωγής

Πίνακας 2.7.3-1: Μεγέθη που προσδιορίζουν την ποιότητα προϊόντος.

Αλλά χαρακτηριστικά μπορεί να προκύπτουν από κριτήρια όπως η οργάνωση της παραγωγής:

- ❖ Μικρό ποσοστό απωλειών-κόστη
- ❖ Μικρό ποσοστό ελαττωματικών τεμαχίων
- ❖ Χρόνος παράδοσης
- ❖ Εργοστασιακή ανακύκλωση
- ❖ Ελαχιστοποίηση κόστους παραγωγής

2.8. Γενικά στοιχεία για τη διαδικασία χύτευσης θερμοπλαστικών

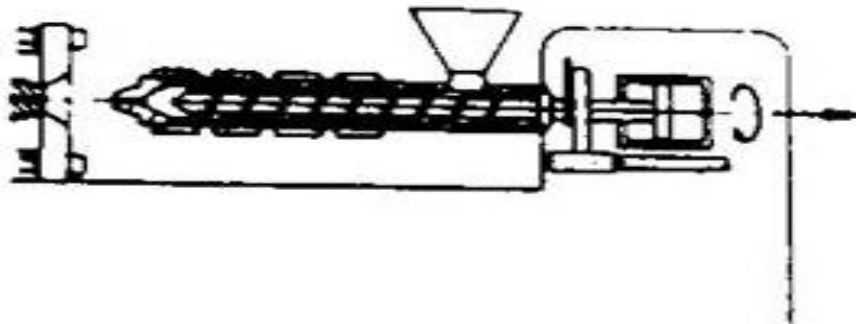
2.8.1. Εισαγωγή

Η διαδικασία χύτευσης αποτελείται από μεμονωμένες φάσεις οι οποίες είναι σε ακολουθία και οι οποίες επικαλύπτονται και επαναλαμβάνονται. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται κύκλος ή και επαναλαμβανόμενος κύκλος. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται και περιγράφονται σε γενικές γραμμές οι διάφορες φάσεις χύτευσης και η σειρά ακολουθίας τους. Με αυτή την ακολουθία φάσεων μπορεί κανείς να προσδιορίσει και τις βασικές παραμέτρους που απαιτούνται για την ρύθμιση της κάθε φάσης.

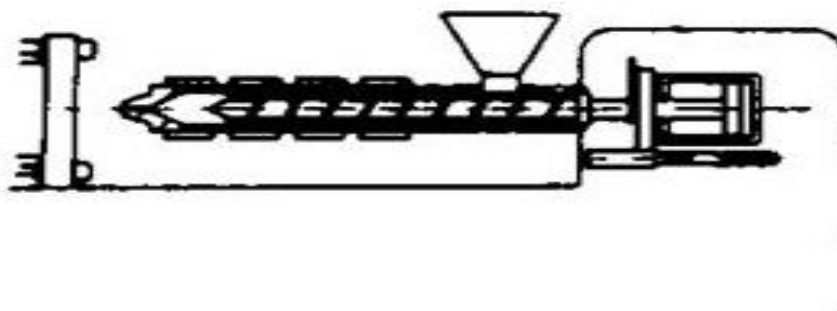
2.8.2. Φάση πλαστικοποίησης θερμοπλαστικών σε μηχανή έκχυσης

Σε πρώτη φάση (Βήμα 1-2) η πρώτη ύλη πλαστικό θερμαίνεται και πλαστικοποιείται από τον περιστρεφόμενο κοχλία, όπως απεικονίζεται από το σχήμα 2.8.2-1.

ΒΗΜΑ 1.: ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ



ΒΗΜΑ 2.: ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ



Σχήμα 2.8.2-1: Φάση πλαστικοποίησης.

Σε αυτή την φάση είναι φρόνιμο να αναφερθούμε στα τρία βασικά στοιχεία που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο κατά την διάρκεια του φαινομένου της πλαστικοποίησης. Αυτά παρατίθενται ακολούθως:

▪ **Μονάδα πλαστικοποίησης και έγχυσης**

Είναι το κύριο σύστημα της παραγωγής με έγχυση. Οι κύριες λειτουργίες αυτού του συστήματος είναι:

- Η τήξη του υλικού
- Η προώθηση της μάζας
- Η αποθήκευση της μάζας
- Η έγχυσης της μάζας
- Η ρύθμιση της μεταγενεστέρως

▪ **Τήξη μάζας**

Ανάλογα με την επιλογή του χρησιμοποιούμενου υλικού επιλέγει κανείς μεταξύ διαφορετικών ποιοτήτων υλικού σε μορφή κοκών 2 έως 3mm. Η μονάδα πλαστικοποίησης είναι εκείνη που θα ομογενοποιήσει το υλικό προκειμένου στην συνέχεια να μπορεί να εκχυθεί στο καλούπι. Προκειμένου να συμβεί αυτό θα πρέπει να θερμανθεί το υλικό μέχρι τήξης.

Αυτό συμβαίνει αφενός μέσω της τριβής των κόκκων όπως αυτά προωθούνται, αφ' ετέρου με την βοήθεια θερμαινόμενων στοιχείων αντιστάσεων τα οποία θερμαίνουν την μονάδα έγχυσης στο βαθμό εκείνο ώστε να είναι έτοιμο για έγχυση. Θα μπορούσε κανείς να περιγράψει την κατάσταση του υλικού όμοια με την κατάσταση ρευστότητας που έχει το μέλι.

▪ **Ομογενοποίηση**

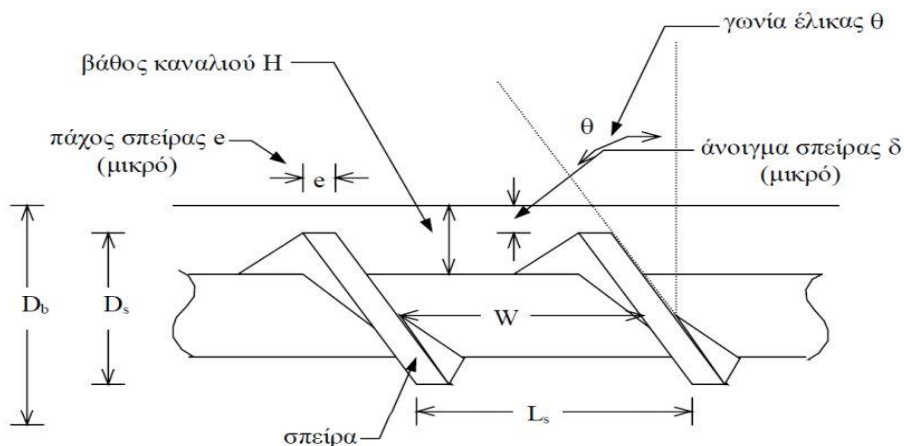
Στην περίπτωση εκείνη που το προϊόν πρέπει να έχει συγκεκριμένες πρόσθετες ιδιότητες π.χ. χρωματισμό ή συμπληρωματικά υλικά ή σταθεροποιητές. Αποστολή της μονάδας είναι να ομογενοποιήσει το μίγμα έτσι ώστε όλα τα συστατικά στοιχεία να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην μάζα.

Κατά την διάρκεια της προώθησης του υλικού στον θάλαμο με την βοήθεια του κοχλία αναπτύσσεται θερμότητα από την τριβή του υλικού.

Η ομογενοποίηση του υλικού επηρεάζεται σημαντικά από την θερμοκρασία του τοιχώματος του κυλίνδρου και από τις στροφές του κοχλία. Οι θερμοκρασίες αυτές για τα θερμοπλαστικά υλικά είναι μεταξύ των 180 και 300 βαθμών κελσίου.

Πέραν τούτου η κίνηση του κοχλία επηρεάζεται από την υδραυλική πίεση της μηχανής την λεγόμενη πίεση ομογενοποίησης η οποία επιδρά αντίθετα προς την κατεύθυνση κίνησης του κοχλία με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται καλύτερη ομογενοποίηση του υλικού.

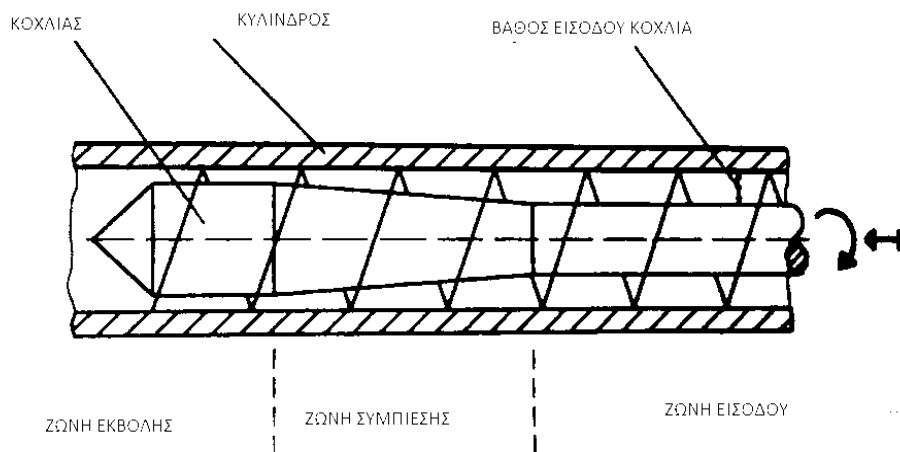
Κάθε κοχλίας έχει μια συγκεκριμένη γεωμετρία, στο σχήμα 2.8.2-2 φαίνεται η γεωμετρία ενός κλασικού κοχλία και οι διαστάσεις του .



Σχήμα 2.8.2-2: Διαστασιολόγηση περιστρεφόμενου κοχλία.

Για μια καλύτερη ομογενοποίηση ο κοχλίας χωρίζεται σε τρεις ζώνες, όπως διακρίνονται και στο σχήμα 2.8.2-3:

- i. Ζώνη Εισόδου
- ii. Ζώνη Συμπίεσης
- iii. Ζώνη Διανομής/ Εκβολής



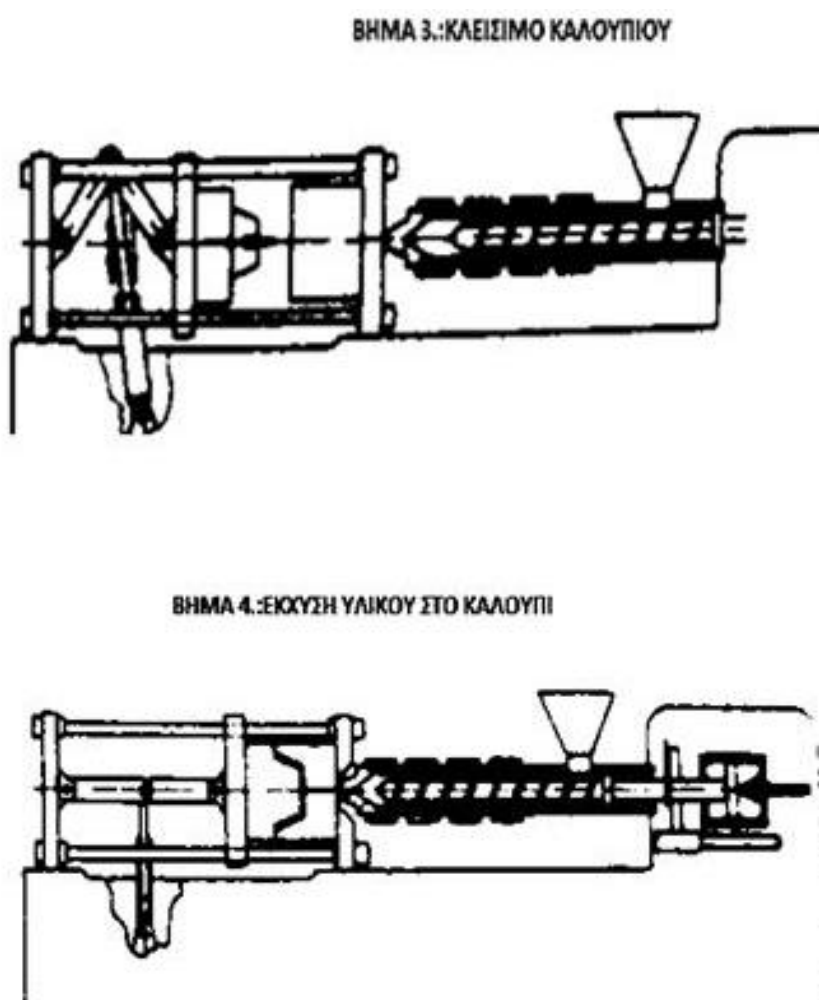
Σχήμα 2.8.2-3: Κοχλίας τριών ζωνών.

2.8.3. Φάση έκχυσης θερμοπλαστικών σε μηχανή έκχυσης

Έπειτα εφαρμόζεται η επενέργεια του κλειστικού (Βήμα 3), όπου η κοιλότητα εισέρχεται στον πυρήνα και στην συνέχεια εγχέεται το υλικό από το ακροφύσιο του κοχλίου στο καλούπι (Βήμα 4), όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.8.3-1.

Η δεύτερη λειτουργία της μονάδος είναι να μεταφέρει το τηγμένο υλικό στο καλούπι. Αυτό πρέπει να συμβεί όσο το δυνατόν ποιο γρήγορα έτσι ώστε το υλικό να μην παγώσει στο καλούπι κατά την διαδικασία της έγχυσης.

Από την στιγμή που θα πρέπει ένα πλαστικό υλικό να γεμίσει πολύπλοκες μορφές καλουπιών είναι σαφές ότι απαιτούνται μεγάλες πιέσεις για να γεμίσει το καλούπι. Αυτό προϋποθέτει ότι ο κοχλίας πρέπει να κινηθεί με μεγάλη ταχύτητα και πίεση ώστε να μπορέσει να εγχυθεί το υλικό.

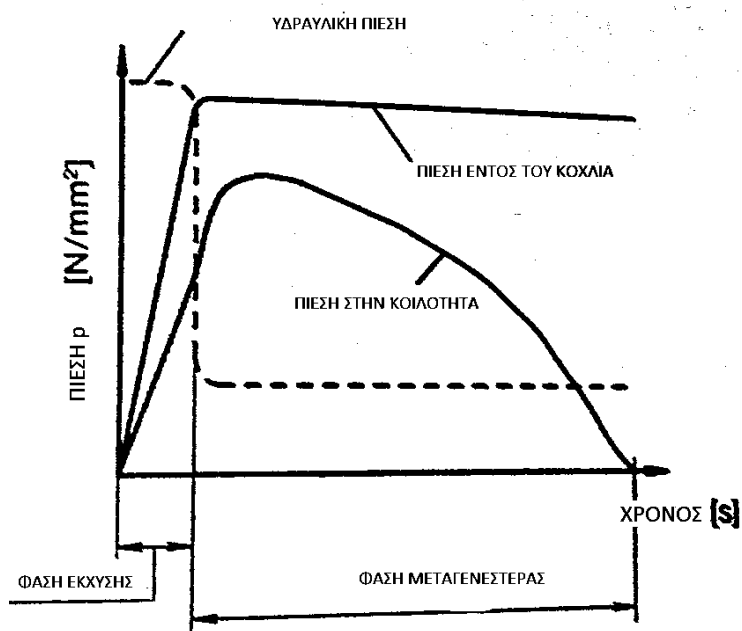


Σχήμα 2.8.3-1: Φάση έκχυσης υλικού.

Αυτές οι ταχύτητες και πιέσεις πρέπει κατ' αρχήν να έχουν καθορισθεί επακριβώς ώστε να μην υπερφορτιστεί η μηχανή και το καλούπι. Οι πιέσεις που απαιτούνται πολλές φορές είναι μέχρι και του επιπέδου των 2000 bar.

Οι πιέσεις αυτές λόγω των αντιστάσεων που προκύπτουν στο «μπεκ» έγχυσης, στην μπουκαδούρα και στο θάλαμο, απομειώνονται κατά την κατεύθυνση της ροής του υλικού. Παρόλα αυτά είναι ακόμη αρκετά υψηλές ώστε να απαιτείται το κλειστικό να έχει την απαιτούμενη δύναμη κρατά το καλούπι κλειστό έναντι στις πιέσεις που αναπτύσσονται στον θάλαμο. Το υψηλότερο επίπεδο πιέσεων λαμβάνεται όταν έχει πλέον εισέλθει όλη η ζητούμενη μάζα υλικού στον θάλαμο, δηλαδή με την ολοκλήρωση της φάσης έγχυσης.

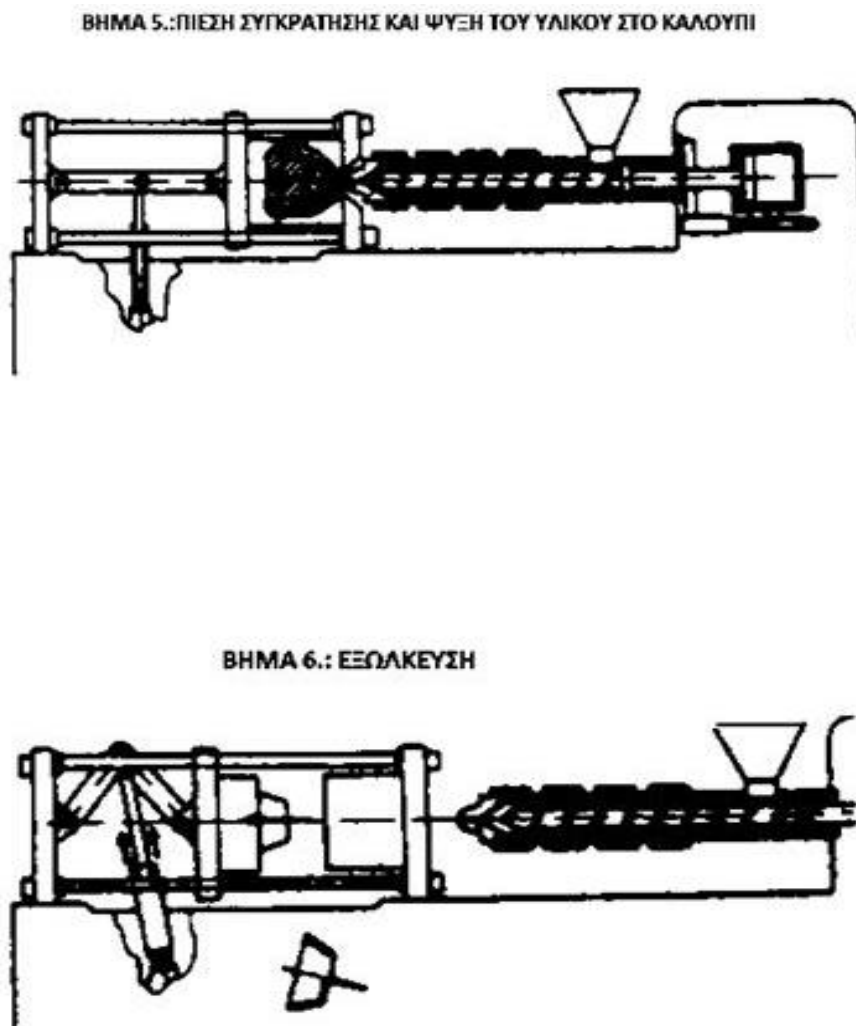
Η υδραυλική πίεση είναι κατά πολύ μικρότερη από ότι φαίνεται στο *σχήμα 2.8.3-2*, καθόσον το τελικό αποτέλεσμα στον κοχλία εξαρτάται από την επιφάνεια και από το μέγεθος του υδραυλικού κυλίνδρου.



Σχήμα 2.8.3-2: Διάγραμμα πιέσεων όλων των μονάδων κατά την χύτευση θερμοπλαστικών.

2.8.4. Φάση τελικής διαμόρφωσης θερμοπλαστικών σε μηχανή έκχυσης

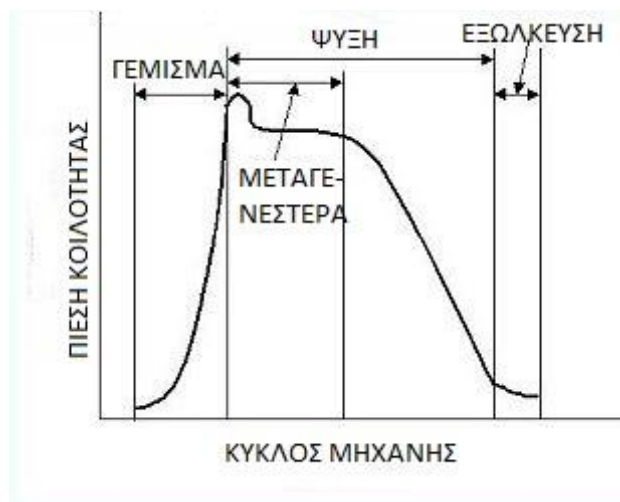
Η πλαστικοποιημένη μάζα συγκρατείται στην κοιλότητα με την εφαρμογή υποπίεσης και παράλληλα ψύχεται ώστε να αποκτήσει την στέρεα μορφή του προϊόντος (Βήμα 5) και εντέλει να μπορεί να απομακρυνθεί από το καλούπι (Βήμα 6), όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.8.4-1



Σχήμα 2.8.4-1: Φάση τελικής μορφοποίησης.

Με την ολοκλήρωση της φάσης έγχυσης είναι απαραίτητη η μεταβολή της πίεσης σε χαμηλότερα επίπεδα (**μεταγενέστερα πίεση**) ώστε να κρατηθεί μεν μια πίεση ικανή για την συγκράτηση του υλικού στο καλούπι μέχρι την εξώλκευση του, χωρίς να επιβαρύνεται το σύστημα με υψηλές πιέσεις.

Το χρονικό αυτό σημείο αλλαγής (*switch off point*) είναι σημαντικό να πρέπει να προσδιορίζεται επακριβώς.



Σχήμα 2.8.4-2: Σημείο αλλαγής γεμίματος μεταγενεστέρας.

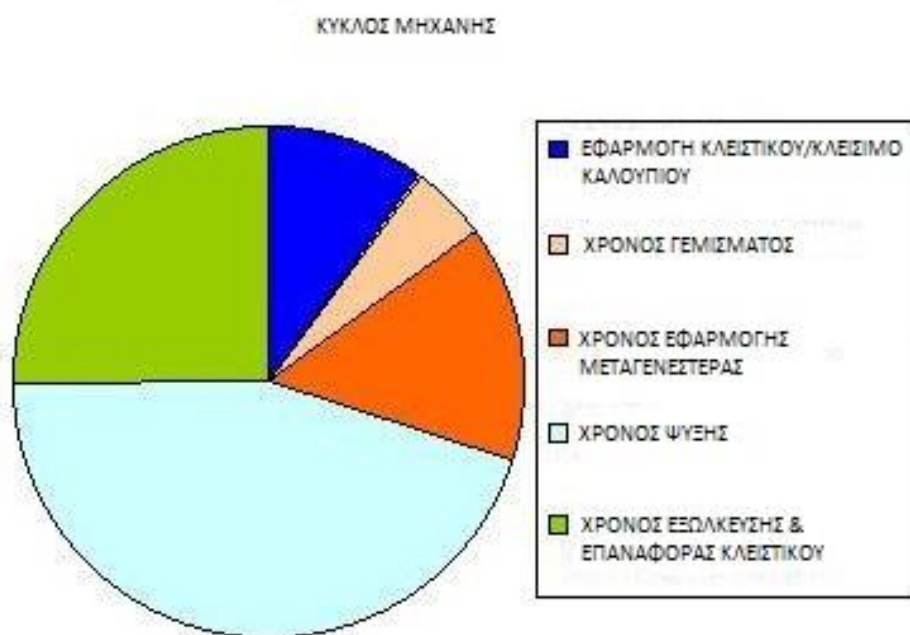
Με το γέμισμα του καλουπιού με την πλαστικοποιημένη μάζα ακολουθεί η ψύξη της, όπως αναλύεται στο διάγραμμα του σχήματος 2.8.4-2 αρχικά ξεκινώντας από τα τοιχώματα του καλουπιού προς το εσωτερικό του. Σε αυτή την φάση η μάζα συρρικνώνεται, εάν στο σημείο αυτό απενεργοποιηθεί η πίεση έγχυσης τότε το προϊόν δεν θα μπορούσε να διατηρήσει τις ζητούμενες διαστάσεις.

Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με την άσκηση μιας πίεσης που θα συμπληρώνει με νέο υλικό ίσο με αυτό που προκύπτει από την συρρίκνωση και θα επενεργεί μέχρι του σημείου που θα εξισορροπηθεί αυτή η συρρίκνωση. Η φάση αυτή ονομάζεται φάση μεταγενεστέρας και διαρκεί μέχρι του σημείου που δεν είναι δυνατόν να εισέλθει άλλο υλικό στο καλούπι.

Η πίεση της μεταγενέστερας πρέπει να είναι μικρότερη από αυτής της έγχυσης, αλλά πάντα σωστά υπολογισμένη ώστε να επιτυγχάνονται οι ποιοτικές απαιτήσεις. Είναι σημαντικό ο χειριστής να γνωρίζει σε ποιο ακριβώς χρονικό σημείο θα πρέπει να ρυθμίζει την είσοδο της μεταγενέστερας. Η είσοδος σχετικά νωρίς θα οδηγήσει σε ποιοτικά υποβαθμισμένο προϊόν, ενώ σχετικά αργά σε βλάβες του καλουπιού και της μηχανής στην διάρκεια του χρόνου [14].

2.8.5. Σύνοψη

Από τις παραπάνω φάσεις καταλήγουμε σε ένα διάγραμμα καταμερισμού λειτουργιών του συνολικού κύκλου παραγωγής του σχήματος 2.8.5-1. Οι χρόνοι αυτοί αλλάζουν από δευτερόλεπτα μέχρι και αρκετά λεπτά, αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου, του καλουπιού, την ποσότητα του υλικού, την δομή της εισόδου και τις δυνατότητες εξώλκευσης.



Σχήμα 2.8.5-1: Οι χρόνοι της κάθε φάσης ενός κύκλου παραγωγής.

Τα σημαντικότερα μεγέθη λοιπόν που θα μας απασχολήσουν αργότερα και χαρακτηρίζουν την κάθε φάση τα συνοψίζουμε και τα καταγράφουμε στον παρακάτω πίνακα 2.7.5-1:

Φάση 1-2	Φάση 3	Φάση 4	Φάση 5	Φάση 6
Θερμοκρασίες	Δύναμη κλειστικού	Πίεση έκχυσης	Μεταγενεστέρα πίεση	Δύναμη κλειστικού
Ταχύτητα κοχλία	Ταχύτητα κλειστικού	Ταχύτητα έκχυσης	Χρόνος συγκράτησης	Ταχύτητα κλειστικού
Πίεση προώθησης			Χρόνος ψύξης	Δύναμη εξωλκείων
Ποσότητα υλικού				Ταχύτητα εξωλκείων

Πίνακας 2.8.5-1: Σημαντικά μεγεθών ανά φάση λειτουργίας της μηχανής.

2.9. Ρυθμίσεις διαδικασίας χύτευσης θερμοπλαστικών

2.9.1. Παράμετροι χύτευσης θερμοπλαστικών

Οι παράμετροι ρύθμισης για την διαδικασία χύτευσης ή αλλιώς «set point» είναι όλες εκείνες οι τιμές που δίδονται από τον χειριστή για την λειτουργία της μηχανής όπως:

- Θερμοκρασίες κοχλία
- Διαδρομές γεμίσματος υλικού
- Διαδρομές πίεσης έγχυσης
- Περιοριστικές πιέσεις
- Χρόνοι έγχυσης
- Χρόνοι μεταγενεστέρας και ψύξης
- Παράμετροι κίνησης του κλειστικού και εξωλκένων
- Πίεση μεταγενέστερας
- Ποσότητα υλικού/ (Μαξιλάρι υλικού)
- Θερμοκρασία καλουπιού

Οι μετρούμενες τιμές «actual values» είναι τιμές οι οποίες συνήθως αποκλίνουν από τις εισαγόμενες. Ο χειριστής κάνει τις απαραίτητες διορθώσεις έτσι ώστε οι δύο οι τιμές να αποκλίνουν όσο το δυνατόν λιγότερο. Ο χειριστής όπως παρατηρήσαμε και καταγράψαμε καλείται να εισάγει τις εξής τιμές για τη λειτουργία της μηχανής:

- **Κοχλία**
 - i. *set up* θερμοκρασιών στις έξι θέσεις του κυλίνδρου
 - ii. *set up* θερμοκρασιών στις θέση 0 του κυλίνδρου είσοδος του καλουπιού
- **Καλούπι**
 - i. *set up* διαδρομών κινήσεων καλουπιού
 - ii. *set up* ταχυτήτων κινήσεων καλουπιού
 - iii. *set up* δυνάμεων κινήσεων καλουπιού

- **Κύλινδρο**
 - i. *set up* διαδρομών κινήσεων κυλίνδρου
 - ii. *set up* ταχυτήτων κινήσεων κυλίνδρου
 - iii. *set up* δυνάμεων κινήσεων κυλίνδρου

- **Θάλαμο έκχυσης**
 - i. *set up* ταχυτήτων έκχυσης
 - ii. *set up* ποσότητα έκχυσης
 - iii. *set up* πίεσης έκχυσης
 - iv. *set up* χρόνου ψύξης

- **Μεταγενεστέρα**
 - i. *set up* πίεση συγκράτησης
 - ii. *set up* χρόνοι πίεσης

- **Δοσομετρία**
 - i. *set up* παροχής υλικού
 - ii. *set up* ταχύτητα δοσομέτρησης
 - iii. *set up* συνολικός όγκος

- **Κύκλο μηχανής**
 - i. *set up* αριθμός παραγόμενων τεμαχίων
 - ii. *set up* στοιχεία υλικού

2.9.2. Προβλήματα κατά την διαδικασία της χύτευσης

Η ποιότητα ενός προϊόντος, η εικόνα του, η λειτουργικότητα, η διάρκεια ζωής επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους όπως από την μορφή του προϊόντος, την κατασκευή του καλουπιού, τις ρυθμίσεις της μηχανής και του χρησιμοποιούμενου υλικού. Τα προβλήματα που μπορεί να εμφανισθούν με την διαδικασία έγχυσης περιγραφικά είναι:

- Τράβηγμα ρούφηγμα
- Ένωση υλικού
- Τυρβώδης ροή
- Φυσαλίδες
- Δισκοειδής αυλακώσεις
- Ασπρίλες ή ρωγμές λόγω δυναμικών καταπονήσεων
- Λειψό αντικείμενο
- Καψίματα λόγω κακής εξαέρωσης
- Μαύρα στίγματα
- Διαφορά στην στιλπνότητα
- Ψυχρή μάζα
- Παραμόρφωση
- Προέκτασμα

Οι αιτίες του σφάλματος που συχνά μπορεί να συμβαίνει μπορεί να είναι περισσότερες από μία. Οι αιτίες αυτές μπορεί να οφείλονται στην κατασκευή του καλουπιού, στο σχέδιο του αντικειμένου, ή στη ρύθμιση των παραμέτρων.

Επειδή η παρέμβαση και διόρθωση του καλουπιού είναι μια διαδικασία που απαιτεί χρόνο και υψηλά κόστη. Πρέπει πρώτα να γίνεται προσπάθεια να βελτιωθούν τα σφάλματα με την βοήθεια των ρυθμίσεων και η διόρθωση του καλουπιού να ακολουθήσει σε ένα μεταγενέστερο χρόνο.

Συγκεκριμένα στις ρυθμίσεις της μηχανής θα πρέπει να:

- Καθορίζονται προσεκτικά οι θερμοκρασίες σε συνάρτηση με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται λόγω της τριβής του υλικού στον κοχλία.
- Υψηλές ταχύτητες έγχυσης σε σχέση με μικρό «μπεκ» έγχυσης οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας της μάζας. Πάντα πρέπει όμως κανείς να λαμβάνει υπόψη του την γεωμετρία και το υλικό του προϊόντος.
- Η μεταγενέστερα και ο χρόνος επίδρασης της να έχουν ρυθμιστεί έτσι ώστε η συρρίκνωση κατά την ψύξη να ισοσταθμίζεται.

Οι παράμετροι ρύθμισης καθορίζονται σημαντικά από τις ιδιότητες του υλικού και για αυτό τον λόγο οι πληροφορίες από τον προμηθευτή για την προετοιμασία του υλικού μπορεί να είναι καθοριστικές, όπως:

- Φυσικές ιδιότητες
- Θερμοκρασίες κοχλία και καλουπιού
- Πιέσεις, χρόνοι έγχυσης, μεταγενέστερα
- Ταχύτητα έγχυσης και στροφές κοχλία
- Χρόνος παραμονής στον κοχλία, διαδρομή δοσομετρίας
- Αναμενόμενη συρρίκνωση και προετοιμασία υλικού πχ, αποθήκευση ξήρανση

Εφόσον όλα τα παραπάνω τηρούνται μπορεί να αποφεύγονται πολλά ελαττώματα του πίνακα. Ασφαλώς οι ενέργειες που θα γίνουν σε περίπτωση ελαττωματικών αντικειμένων συμβαδίζουν πολλές φορές με τις υποδείξεις και τις συμβουλές εμπειρων τεχνικών. Όμως και σε αυτήν τη περίπτωση δεν πρέπει να περιοριζόμαστε στην επίλυση του σφάλματος άλλα στην αιτία του προβλήματος.

Στα επόμενα κεφάλαια παρατίθενται κάποια από τη σημαντικότερα και συχνότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ένα χειριστής στην παραγωγή αντικειμένων πολυπροπυλενίου, σχετικά μικρού πάχους και βάρους.

2.9.2.1. Λειψό αντικείμενο

Πρόκειται για αντικείμενα, τα οποία έχουν παραχθεί υπό τέτοιες συνθήκες ώστε η κοιλότητα του καλουπιού δεν έχει γεμίσει πλήρως με το πολυμερές. Συνήθως η έλλειψη υλικού εμφανίζεται μακριά από το σημείο τροφοδοσίας ή στα τοιχώματα εκείνα, όπου το πάχος του αντικείμενου είναι πολύ λεπτό. Οι αιτίες που οδηγούν στην παραγωγή λειψών αντικειμένων, είναι πολλές και δεν αποκλείεται η επίλυση του προβλήματος να απαιτεί όχι μόνο μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας της μηχανής αλλά και μηχανουργικές επεμβάσεις στο ίδιο το καλούπι.

Για να διασφαλίσουμε πλήρες γέμισμα της κοιλότητας του καλουπιού, θα πρέπει πρώτα να επιλέξουμε τη μηχανή με το κατάλληλο σύστημα έκχυσης, καθότι αυτό είναι που θα μας δώσει την απαιτούμενη ποσότητα τηγμένου υλικού. Ασφαλώς υπάρχουν περιπτώσεις που η μέγιστη ποσότητα τήγματος, η οποία παρέχεται από ένα σύστημα έκχυσης με ένα εμβολισμό δεν είναι επαρκής να γεμίσει την κοιλότητα του καλουπιού. Σ' αυτή την περίπτωση το πρόγραμμα που διαθέτει η πλειοψηφία των μηχανών «*intrusion*», δίνει μια αξιόλογη λύση στο πρόβλημά μας. Για εκείνους που δεν θέλουν να εμπλακούν στα γρανάζια της πολυπλοκότητας, αλλά θέλουν λύσεις απλές έστω και αν αυτές είναι πιο ακριβές τότε καθίσταται αναγκαία η σωστή επιλογή του συστήματος έκχυσης. Για ένα ομοιογενές και ομόθερμο τήγμα προτείνεται να μην εξαντλούμε τη διαδρομή πλαστικοποίησης. Η διαδρομή αυτή καλό θα είναι να μην ξεπερνά τα 3D(mm) του κοχλίου, ανάλογα με την περίπτωση, με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο μπορεί κανείς να υπολογίσει το βάρος του τήγματος που θα πάρει κατά προσέγγιση από ένα σύστημα έκχυσης [15]:

$$B = V \times E \times \eta = \pi \times r^2 \times L \times E \times \eta \text{ [gr]}, \text{ (4) όπου:}$$

B- Το βάρος του εξωθούμενο υλικού σε ελεύθερη έκχυση [gr]

V- Ο όγκος του εξωθούμενο υλικού [cm³]

E- Το ειδικό βάρος του εκάστοτε πολυμερούς/ E{PP}=0,905 [g/cm³] στους 23°C

η- Συντελεστής πλαστικοποίησης/ η{PP}=0,73

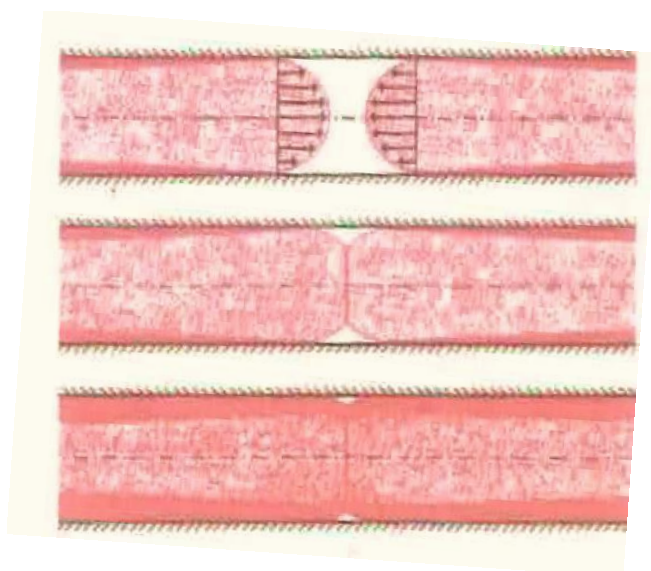
r- Η ακτίνα της εσωτερικής διαμέτρου του φούρνου [cm³]

L- Η διαδρομή του κοχλίου [cm³]

2.9.2.2. Ένωση υλικού

Εάν, κατά τη φάση της έκχυσης το μέτωπο ροής του υλικού που ρέει μέσα στην κοιλότητα, συναντήσει κάποιο εμπόδιο ή διαφορετικές διατομές στη γεωμετρία της κοιλότητας τότε το μέτωπο αυτό είναι δυνατόν να χωριστεί σε δυο ή περισσότερα μέτωπα. Αφού ξεπεραστεί το εμπόδιο, τα μέτωπα ροής που συνέρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις συγκρούονται και ενώνονται. Η ίδια διαδικασία θα λάβει χώρα και στην περίπτωση που το καλούπι διαθέτει δύο ή περισσότερες πύλες τροφοδοσίας.

Η επιφάνεια του εκάστοτε μετώπου ροής πριν ακόμη αυτό συγκρουστεί με κάποιο άλλο μέτωπο είναι κυρτή. Μετά τη σύγκρουση όμως οι επιφάνειες γίνονται επίπεδες. Αν οι συνθήκες που χαρακτηρίζουν την έκχυση (θερμοκρασίες, πιέσεις, ταχύτητα κλπ) δεν είναι κατάλληλες τότε οι αιχμές από τα μέτωπα ροής παραμένουν κυρτές. Έτσι, μετά το ξεκαλούπωμα θα παρατηρήσουμε στην επιφάνεια του αντικειμένου ένα ίχνος που μοιάζει με χαρακιά. Ανάλογα με την περίπτωση η χαρακιά μπορεί να έχει σχήμα ευθείας ή καμπύλης γραμμής.



Σχήμα 2.9.2.2-1: Αναπαράσταση δημιουργίας της ένωσης υλικού.

Στη παράσταση της εικόνας 2.8.2.2-1 παρουσιάζονται δυο μέτωπα ροής πριν ακουμπήσουν μεταξύ τους. Αφού τα μέτωπα έχουν ακουμπήσει, αλλά η κοιλότητα εξακολουθεί να πληρούται. Τέλος η ροή έχει πλέον διακοπεί. Το υλικό έχει παγώσει και δεν λαμβάνει χώρα περαιτέρω πλήρωση της κοιλότητας .

Ανάλογα με την αιτία που προκάλεσε το φαινόμενο, το ίχνος αυτό μπορεί να έχει σαν κατεύθυνση την ίδια κατεύθυνση, που έχει και η ροή του ρευστού ή καθετή προς αυτήν , όπως στην περίπτωση που το καλούπι διαθέτει περισσότερες από μια πύλες .Το είδος αυτό του ελαττώματος ονομάζεται «ένωση ή συγκόλληση υλικού» (*welding lines*).

Στις περισσότερες περιπτώσεις η ένωση υλικού είναι αναπόφευκτη. Η δημιουργία της δεν εξαρτάται μόνο από τις ελεγχόμενες συνθήκες έκχυσης αλλά είναι διαπιστωμένο πως η ροή του υλικού μέσα στην κοιλότητα επιφέρει αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες του ρευστού που εντατικοποιούν το φαινόμενο της ένωσης [16]. Παραδείγματος χάρη, με την πάροδο του χρόνου μεγαλώνει το ιξώδες στα εξωτερικά στρώματα του ρευστού, που απαρτίζει το μέτωπο ροής με αποτέλεσμα όταν τα μέτωπα ροής συνέρχονται να είναι δύσκολο να επιτευχθεί πλήρης συγχώνευση. Στην πραγματικότητα η ένωση υλικού μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ανεπαρκής πλήρωση της κοιλότητας με υλικού

Στο σημείο που τα δύο μέτωπα ροής συνέρχονται συνήθως παρατηρείται μειωμένη μηχανική αντοχή του αντικείμενου, ενώ είναι δυνατόν να αντιμετωπίσουμε και το φαινόμενο της διαφοροποίησης στη στιλπνότητα της επιφάνειας. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί και αλλαγή στη απόχρωση, ειδικά όταν στις πρώτες ύλες χρησιμοποιούμε πρόσθετες χρωστικές ουσίες.

Για αυτό και σε ορισμένες περιπτώσεις η ένωση υλικού δεν είναι παρά ένα οπτικό σφάλμα μόνο επειδή το φαινόμενο περιορίζεται στην επιφάνεια του αντικείμενου ή σε πολύ μικρό βάθος του τοιχώματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, φαινομενικά η ένωση μπορεί να μην αποτελεί αντικείμενο προς διερεύνηση, όμως σε αντικείμενα που χαρακτηρίζονται σαν κρίσιμα οφείλουμε να γνωρίζουμε το βάθος που επεκτείνεται το ελάττωμα κάνοντας μικροτομές κάθετα προς την ένωση.

2.9.2.3. Τυρβώδης ροή

Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις κατά τις οποίες στην επιφάνεια των χυτευμένων προϊόντων παρατηρείται ένα ίχνος, συνήθως ελικοειδούς μορφής (*jetting*) στο οποίο η στιλπνότητα και το χρώμα διαφέρουν από αυτό της υπόλοιπης επιφάνειας του αντικείμενου. Ενδέχεται δε στα όρια της τραχείας αυτής επιφάνειας να παρατηρηθούν αυλακώσεις, οι οποίες μοιάζουν με ένωση υλικού. Ας δούμε, ποια είναι η αιτία που προκαλεί αυτά τα ποιοτικά προβλήματα.

Υπό φυσιολογικές συνθήκες, κατά τη φάση της έκχυσης και καθώς ο κοχλίας προωθείται, στέλνει όλο και περισσότερο υλικό μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού. Έτσι, από το σημείο της πύλης η μάζα του πολυμερούς αυξάνεται προοδευτικά. Με τη συσσώρευση τήγματος αναπτύσσεται ένα μέτωπο ροής, το οποίο κατευθύνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η κοιλότητα πληρούται σταδιακά [17].

Το τήγμα προσκολλάται στα τοιχώματα και πληρεί ομοιόμορφα την κοιλότητα. Είναι, όμως, δυνατόν από το σημείο της τροφοδοσίας να μην αναπτυχθεί αμέσως ένα ομοιογενές μέτωπο ροής, αλλά, πριν από αυτό να κάνει την εμφάνισή του ένα είδος ροής υπό μορφή κορδονιού, που συνήθως παίρνει την μορφή σερπαντίνας, όπως στην *εικόνα 2.8.2.3-1*.



Εικόνα 2.9.2.3-1: Τυρβώδη ροή τήγματος που εισάγεται με μορφή κορδονιού.

Η σερπαντίνα αυτή εφάπτεται με τα τοιχώματα του καλουπιού, αλλά μόνο σε ορισμένα σημεία. Στην πορεία και αφού δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις κάνει την εμφάνιση του το κύριο μέτωπο ροής. Είναι όμως αργά για να μπορέσουν οι δυο μάζες να συγχωνευθούν πλήρως, δεδομένου ότι η μάζα της σερπαντίνας έχει πλέον μεγαλύτερο ιξώδες από αυτό του ρευστού που απαρτίζει το μέτωπο ροής.

Με την ολοκλήρωση του κύκλου της έκχυσης θα λάβουμε ένα ελαττωματικό προϊόν, όπου τα όρια των δυο συγχωνευμένων μαζών παρατηρούνται σημάδια ένωσης υλικού, αλλά και έντονη διαφορά στη στιλπνότητα.



Εικόνα 2.9.2.3-2: Ημιτελή αντικείμενα χύτευσης λόγω jetting.

Στην εικόνα 2.8.2.3-2 στα τρία πρώτα έχει εμφανιστεί το φαινόμενο της τυρβώδους ροής. Στο τέταρτο το μέτωπο ροής εξελίσσεται χωρίς προβλήματα.

2.9.2.4. Φυσαλίδες

Είναι απαραίτητο εδώ να διευκρινιστεί ότι πρόκειται για φυσαλίδες που προέρχονται από εγκλωβισμένο αέρα. Φυσαλίδες από αέρα που εγκλωβίζεται στη μάζα του υλικού κατά τη φάση της πλαστικοποίησης ή της αναρρόφησης. Πολλές φορές οι φυσαλίδες οφείλονται στην κακή γεωμετρία του καλουπιού. Το υλικό καθώς εισχωρεί στο καλούπι είναι δυνατόν να εγκλωβίσει μέρος του αέρα που βρίσκεται στην κοιλότητα.

Συνήθως το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο όταν τα σημεία εξαέρωσης δεν επαρκούν για την απομάκρυνση του αέρα ή όταν τα σημεία αυτά δεν έχουν προβλεφτεί ώστε να βρίσκονται στην κατάλληλη θέση. Πολλές φορές συμβαίνει τα σημεία εξαέρωσης να φράζουν πολύ νωρίς. Σε αυτήν την περίπτωση η κοιλότητα συνεχίζει να πληρούται ενώ παραμένει εγκλωβισμένος αέρας. Τρία είναι τα επακόλουθα αυτής της διαδικασίας [18]:

- Ο εγκλωβισμένος αέρας διασπείρεται στο διάστημα μεταξύ του μετάλλου και της επιφάνειας του αντικειμένου, δημιουργώντας έντονη κηλίδα.
- Λόγω της δυναμικής, που προσδίδει η γεωμετρία στην κοιλότητα, ο αέρας μετακομίζει στο εσωτερικό της μάζας του τοιχώματος, όπου το τήγμα είναι πιο μαλακό, δημιουργώντας φυσαλίδα που μοιάζει με σπήλαιο.
- Ο αέρας παραμένει εγκλωβισμένος στο ίδιο σημείο με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το φαινόμενο της καύσης. Είναι πιθανόν να μην επέλθει καθόλου καύση εάν οι συνθήκες δεν είναι κατάλληλες για κάτι τέτοιο. Τότε ίσως απλώς εμφανιστεί έλλειψη υλικού στο συγκεκριμένο σημείο, αφού η παρουσία αέρα εμποδίζει την απόλυτη πλήρωση της κοιλότητας

Ο έλεγχος για την παρουσία φυσαλίδων πρέπει να είναι τακτικός και λεπτομερής, διότι η παρουσία φυσαλίδων καθιστά το αντικείμενο ευαίσθητο σε δυναμικές καταπονήσεις, αφού μειώνει αισθητά τη μηχανική του αντοχή. Πέραν τούτου αποτελεί και ένα οπτικό ελάττωμα, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για διαφανή αντικείμενα.

2.9.2.5. Προέκταμα

Το προέκταμα (*flash*) δημιουργείται λόγω περίσσιας χυτευμένου πολυμερούς πέραν εκείνου που μια κοιλότητα μπορεί να δεχτεί μέσα στα όρια που καθορίζει η γεωμετρία της. Έτσι το περίσσιο υλικό θα βρεθεί εκτός κοιλότητας αλλά προσκολλημένο στο κυρίως αντικείμενο, όπως στην *εικόνα 2.8.2.5-1*. Το προέκταμα συνήθως εμφανίζεται περιφερειακά του αντικείμενου, στα σημεία που τα δυο ήμισυ του καλουπιού εφάπτονται (*parting line*), αλλά είναι πολύ πιθανόν να το συναντήσουμε και σε άλλα σημεία όπου το πολυμερές βρίσκεται διάκενα στα οποία μπορεί να εισχωρήσει όπως είναι εκείνα που αφήνουν οι βελόνες του εξωλκέα ή η κακή εφαρμογή των κινητών και σταθερών μερών που συνθέτουν την κοιλότητα.



Εικόνα 2.9.2.5-1: Αντικείμενο με προέκταμα.

Οι αιτίες που προκαλούν το προέκταμα πρέπει να αναζητηθούν [19]:

- Στις συνθήκες της έκχυσης
- Στη δύναμη του κλειστικού
- Στη σωστή εφαρμογή των εξαρτημάτων της κοιλότητας και των κινητών μερών που τυχών υπάρχουν

Η παρουσία του προεκτάματος σαν ποιοτικό ελάττωμα δεν είναι μόνο μια οπτική ή λειτουργική επιβάρυνση καθώς είναι πολύ πιθανό να προκαλέσει μεγαλύτερη ζημία στο καλούπι. Για παράδειγμα μπορεί να μην επιτρέψει την απομάκρυνση του αντικείμενου κατά την εξώλκευση. Έτσι στον επόμενο κύκλο το αντικείμενο θα παραμείνει στην κοιλότητα, αλλά θα πραγματοποιηθεί η διαδικασία. Η κατάσταση έπειτα κρίνεται κρίσιμη αφού είναι πιθανόν να δημιουργηθούν βλάβες στα πρόσωπα του καλουπιού ή στην κοιλότητα.

2.9.2.6. Συρρίκνωση-Τράβηγμα

Το τράβηγμα (*sink marks*) είναι αποτέλεσμα δυναμικών τάσεων οι οποίες προκαλούν την συρρίκνωση στα εσωτερικά στρώματα του πολυμερούς. Πρόκειται για μια φυσιολογική ιδιότητα των πολυμερών της οποίας όμως η δράση μπορεί να έχει επιπτώσεις και στην εξωτερική επιφάνεια του αντικειμένου. Το τράβηγμα δεν αποτελεί μόνο ένα απλό οπτικό ελάττωμα αλλά συνάμα μειώνει και τη μηχανική αντοχή των χυτευόμενων προϊόντων.

Γενικότερα η ιδιότητα των ρευστών πολυμερών να συρρικνώνονται καθόσον αυτά ψύχονται είναι ένα φαινόμενο που έχει εξελιχθεί σε μεγάλο πονοκέφαλο τόσο των σχεδιαστών όσο και των κατασκευαστών των καλουπιών αφού οι άνθρωποι αυτοί είναι επιφορτισμένοι να υπολογίσουν το βαθμό συρρίκνωσης του εκάστοτε πολυμερούς και να δώσουν τελικό προϊόν με τις επιθυμητές διαστάσεις. Ασφαλώς το ίδιο φαινόμενο απασχολεί και τους παραγωγούς καθότι ο βαθμός συρρίκνωσης εξαρτάται και από τις συνθήκες παραγωγής.

Στην παρούσα συγγραφή θα εξετάσουμε μια ιδιαίτερη περίπτωση όπου το πλαστικό εμφανίζει μια μη προσδιορίσιμη τάση για συρρίκνωση στα εσωτερικά στρώματα, αφού στα στρώματα αυτά η πτώση της θερμοκρασίας παρατείνεται ανάλογα με το πάχος του τοιχώματος του αντικειμένου.

Γιατί όμως τα ρευστά θερμοπλαστικά συρρικνώνονται με την πτώση της θερμοκρασίας;

Τα πλαστικά ως ρευστά δεν ανταποκρίνονται όπως τα κλασσικά Νευτώνεια μη συμπιεστά υγρά που γνωρίζουμε. Αντίθετα χαρακτηρίζονται ως συμπιεστά, μη Νευτώνεια και μάλιστα, ψευδοπλαστικά ρευστά. Όλοι αυτοί οι χαρακτηρισμοί ανάγουν σε πολύπλοκους μαθηματικούς τύπους της ρεολογίας για τους οποίους δεν είναι του παρόντος να γίνει μνεία, άλλα μας βοηθούν α αποδείξουμε την πολυπλοκότητα της συμπεριφοράς των ρευστών αυτών, ειδικότερα δε όταν μεταβάλλονται ορισμένες παράμετροι όπως είναι η πίεση ο χρόνος η θερμοκρασία κ.λπ. Η μελέτη των ρευστών αυτών περιπλέκεται ακόμη περισσότερο όταν φανταστεί κανείς το πλήθος των πολυμερών ουσιών οι οποίες έχουν παρασκευαστεί και στις οποίες αντιστοιχεί και το ανάλογο πλήθος μοριακών τύπων. Εμείς θα παραμείνουμε σε μια βασική ιδιότητα των πολυμερών, δηλαδή στο γεγονός ότι ο όγκος των ουσιών αυτών αυξάνεται κατά την μετάβαση από τη στερεή στην υγρή κατάσταση και μειώνεται αντίστοιχα, όταν το πολυμερές περνάει από την υγρή στην στερεή κατάσταση.

Προσδίδοντας θερμική ενέργεια και αφού η θερμοκρασία φτάσει σε κάποιο επίπεδο τα μακρομόρια αποκτούν κινητική ενέργεια. Έτσι με την αύξηση της θερμοκρασίας μακρομοριακοί τομείς ταλαντεύονται και περιστρέφονται όλο και περισσότερο περί τη θέση τους. Ταυτόχρονα εξασθενούν οι διαμοριακοί δεσμοί γνωστοί ως δεσμοί Van der Waals. Τα μακρομόρια απομακρύνονται μεταξύ τους και έτσι καταλαμβάνουν όλο και μεγαλύτερο χώρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ειδικός όγκος του πολυμερούς.[20]

Με λίγα λόγια τα πολυμερή διαστέλλονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η διαστολή που υφίστανται μπορεί να είναι από 2 έως και 10 φορές μεγαλύτερη από αυτήν, που υφίστανται το ατσάλι. Το θερμοκρασιακό επίπεδο, από το οποίο τα μόρια με την κινητική τους ενέργεια διασπούν τη στερεά δομή, ονομάζεται σημείο υαλώδους μετάπτωσης (*glass transition temperature*). Είναι το σημείο εκείνο που το υλικό περνά από ψαθυρή μορφή σε ρευστή. Στα διαγράμματα των υλικών το συναντάμε με το σύμβολο **T_g**.

Όταν ένα μερικώς κρυσταλλικό πολυμερές στερεοποιείται η διάταξη των μακρομορίων, που είναι κανονική επιβάλλει, ώστε τα μόρια να βρίσκονται πολύ κοντά το ένα με το άλλο λόγω των ισχυρών δυνάμεων συνοχής. Κατά συνέπεια με την αύξηση του βαθμού κρυστάλλωσης αυξάνεται και η πυκνότητα των υλικών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα μερικώς κρυσταλλικά υλικά να υφίστανται μεγαλύτερη συρρίκνωση από ότι τα άμορφα αφού η κρυσταλλική δομή καταλαμβάνει μικρότερο χώρο. Οι αυξημένες διαμοριακές δυνάμεις καθιστούν τα μερικώς κρυσταλλικά υλικά περισσότερο δύσκαμπτα, αυξάνουν την αντοχή σε τάνυση, μειώνουν όμως την αντοχή σε κρούση.

Καθώς τα μόρια στα κρυσταλλικά υλικά περισσότερο είναι συνεκτικά καθιστούν τα υλικά αυτά περισσότερο συμπαγή και περισσότερο ανθεκτικά στην προσβολή από αέρια ή ατμούς. Παράλληλα όμως η κρυσταλλική δομή αυξάνει τον κίνδυνο για παρουσία ρωγμών λόγω εσωτερικών τάσεων καθώς και την παραμόρφωση των αντικειμένων αφού η κρυσταλλική δομή δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη τη μάζα του υλικού. Ο διαφορετικός βαθμός κρυστάλλωσης από περιοχή σε περιοχή καθώς και η παρουσία τομέων με άμορφη δομή οδηγούν σε διαφορετικές πυκνότητες και διαφορετικό βαθμό συρρίκνωσης.

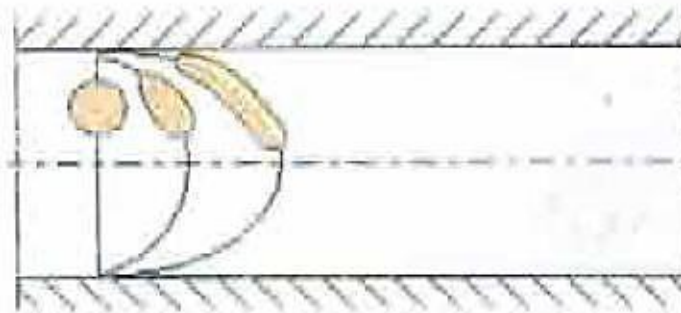
Το φαινόμενο αυτό επιδεινώνεται κατά τη διαδικασία της χύτευσης. Καθώς για την δημιουργία των κρυσταλλινών απαιτείται χαλάρωση των μακρομορίων κάτι που δεν είναι εφικτό να γίνει σε όλη τη μάζα ομοιογενώς. Καθώς το πολυμερές εισχωρεί στο κρύο καλούπι το εξωτερικό του στρώμα που ακουμπάει στα κρύα τοιχώματα δημιουργεί ένα λεπτό στερεό φλοιό, το πάχος του οποίου μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου.

Αφού αναφερθήκαμε στην χύτευση των πολυμερών και στη διαδικασία ψύξης μέσα στο καλούπι ας δούμε λίγο και το φαινόμενο του προσανατολισμού των μακρομορίων που αποτελεί το δεύτερο βασικό παράγοντα συρρίκνωσης. Ας αφήσουμε τη φαντασία μας να προβλέψει τι θα συμβεί αν προσπαθήσουμε να περάσουμε μια ποσότητα μακαρονάδας από το στόμιο ενός χωνιού. Τα μακαρόνια θα αρχίσουν να προσανατολίζονται στην κατεύθυνση ροής της μάζας.

Το ίδιο συμβαίνει και κατά τη χύτευση των πολυμερών ουσιών όταν αυτές περνάνε από στενά στόμια όπως είναι το ακροφύσιο και ακόμη περισσότερο η πύλη. Τα μόρια προσανατολίζονται έντονα στην κατεύθυνση ροής. Καθώς το τήγμα ακουμπάει στα κρύα τοιχώματα του καλουπιού δημιουργείται ο εξωτερικός στερεός φλοιός για τον οποίο αναφερθήκαμε παραπάνω. Έτσι λαμβάνουν χώρα σημαντικές διαφορές ταχύτητας στη μάζα του ρευστού όπου στο στερεοποιημένο εξωτερικό φλοιό η ταχύτητα είναι μηδενική ενώ στο κέντρο του μετώπου ροής είναι η μέγιστη. Η διαδικασία αυτή επιφέρει σημαντικές παραμορφώσεις στα μακρομόρια του πολυμερούς αφού αυτά αναγκάζονται να επιμηκύνονται κατά τη φορά της ροής του ρευστού.

Για να καταλάβει κανείς αυτή τη διαδικασία αρκεί να φανταστεί ότι το ένα άκρο του μακρομορίου αγκυλώνεται στο στερεοποιημένο φλοιό ενώ το άλλο παρασύρεται από το ρευστό. Στην πορεία όμως και μετά το πέρας της διαδικασίας της χύτευσης τα μακρομόρια τείνουν να επανακτήσουν την αρχική τους μορφή.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται χαλάρωση και λαμβάνει χώρα για θερμοκρασίες πάνω από το σημείο υαλώδους μετάπτωσης, όπου τα μόρια μπορούν και κινούνται. Στην προκειμένη περίπτωση η συρρίκνωση θα είναι εντονότερη στα εσωτερικά στρώματα του χυτού αντικειμένου και θα παραταθεί χρονικά στα πιο χοντρά τοιχώματα του. Στα τοιχώματα αυτά στερεοποιούνται κατά προτεραιότητα τα εξωτερικά στρώματα.

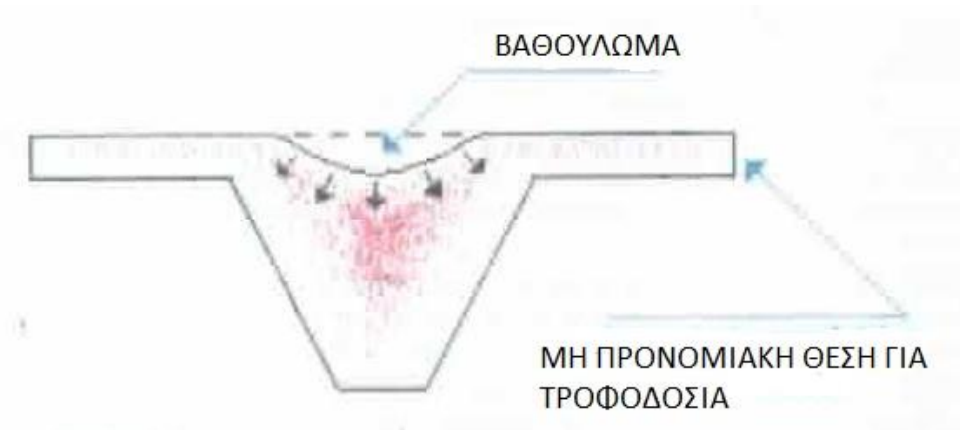


Σχήμα 2.9.2.6-1: Σχηματική παράσταση προσανατολισμού μορίων.

Όπως εξηγείται από την αναπαράσταση του σχήματος 2.9.2.6-1 ένας κυκλικός τομέας παραμορφώνεται λόγω της ροής του πολυμερούς με αποτέλεσμα να επιμηκύνεται η μοριακή αλυσίδα κατά τη φορά της.

Καθώς τα πλαστικά είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας τα εξωτερικά στρώματα λειτουργούν στην πορεία σαν μονωτικό με αποτέλεσμα το φαινόμενο της χαλάρωσης και συνεπώς η συρρίκνωση να εξακολουθεί να υφίσταται στα εσωτερικά στρώματα. Καθώς τα μόρια είναι προσανατολισμένα στην κατεύθυνση της ροής έτσι και η συρρίκνωση θα είναι εντονότερη ως προς αυτήν την κατεύθυνση.

Η διαδικασία αυτή συντελεί και στην δημιουργία τάσεων διάτμησης στη μάζα του υλικού. Εάν θεωρήσουμε ότι η κοιλότητα του καλούπιού γέμισε με πολυμερές και διακόψουμε τη φάση της συγκράτησης και της ψύξης πρόωρα, τότε οι εσωτερικές τάσεις συρρίκνωσης ρουφούν προς τα μέσα το εξωτερικό στερεοποιημένο στρώμα, που είναι ακόμη λεπτό και έτσι εμφανίζεται το σφάλμα του ρουφήγματος, όπως αναπαριστάται στο σχήμα 2.9.2.6-2.



Σχήμα 2.9.2.6-2: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας τραβήγματος (βαθουλώματος).

Γι' αυτό όταν χυτεύουμε ένα πολυμερές δεν πρέπει να το αφήσουμε να χαλαρώσει ανεξέλεγκτα όταν αυτό βρίσκεται μέσα στο καλούπι διότι με την μείωση της θερμοκρασίας θα επέλθει συρρίκνωση. Αντίθετα κατά τη διαδικασία της έκχυσης και αφού ολοκληρωθεί η πρώτη φάση της ταχύτητας επέρχεται η φάση της πίεσης (συγκράτηση-σιδέρωμα) κατά την οποία το χυτευμένο πολυμερές εξακολουθούμε να το συμπιέζουμε όσο αυτό είναι ακόμη σε κατάσταση τήγματος. Στην πραγματικότητα κατά την φάση της πίεσης ο κοχλίας συμπληρώνει στην κοιλότητα του καλούπιού τόση ποσότητα από υλικό όση είναι η μείωση του όγκου λόγω συρρίκνωσης.

2.9.2.7. Παραμόρφωση

Ως παραμόρφωση εννοείται η απόκλιση της μορφής του πλαστικού αντικειμένου σε σύγκριση με αυτήν που καθορίζεται από τη γεωμετρία της κοιλότητας του καλουπιού. Συνήθως πρόκειται για σκεύρωση, κάμψη ή απόκλιση του μεγέθους των γωνιών.

Δύο είναι οι αιτίες που οδηγούν συνήθως σε τέτοιου είδους αποκλίσεις

- A. Εξωτερικές δυνάμεις
- B. Εσωτερικές τάσεις

Η πρώτη περίπτωση αποτελεί ιδιαίτερο αντικείμενο μελέτης καθότι η παραμόρφωση του πλαστικού μπορεί να οφείλεται στον τρόπο εξώλκευσης του ή στους δικούς μας χειρισμούς μετά το ξεκαλούπωμα και στον τρόπο αποθήκευσης του. Στο παρόν κεφάλαιο πρόκειται να αναφερθούμε στην ανεπιθύμητη παραμόρφωση του αντικειμένου, η οποία είναι αποτέλεσμα των εσωτερικών τάσεων, όπως αυτές εξελίσσονται στη μάζα του πολυμερούς.

Στο υποκεφάλαιο περί τραβήγματος είδαμε ότι η συρρίκνωση είναι ο βασικός παράγων που επηρεάζει την απόκλιση των διαστάσεων του αντικειμένου σε σύγκριση με αυτές που προδιαγράφονται από την γεωμετρία του καλουπιού. Η συρρίκνωση είναι ένα φαινόμενο που εκφράζεται σε ποσοστιαίες μονάδες και πάντα αναφέρεται για μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτό συμβαίνει γιατί στην πρακτική λόγω των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν οι συνθήκες λειτουργίας αλλά και η γεωμετρία του καλουπιού είναι δύσκολο να επιτευχθεί ομοιόμορφη και ισοτροπική συρρίκνωση. Έτσι στη μάζα του αντικειμένου εμφανίζονται ανεξάρτητες ως προς το σημείο και ως προς την κατεύθυνση συρρικνώσεις. Οι λόγοι που οδηγούν σε τέτοιου είδους ανισότροπη συρρίκνωση είναι πολλοί:

- Ο σχεδιασμός της κοιλότητας του καλουπιού
- Τοπικές διαφορές συρρίκνωσης λόγω ανομοιόμορφης ψύξης
- Ανισορροπίες ιδιότητες της πρώτης ύλης
- Διαφορές στο βαθμό κρυσταλλικότητας σε διαφορετικά και ανεξάρτητα μεταξύ τους σημεία της μάζας.

Τι σημαίνει όμως ανισότροπη συρρίκνωση;

Ας φανταστούμε ένα αντικείμενο όπως αυτό του σχήματος 2.5.1.2 Για διάφορους λόγους είναι δυνατόν η επιφάνεια A του καλουπιού να έχει καλύτερη ψύξη από ότι η επιφάνεια B . Κατά τη χύτευση τα εξωτερικά στρώματα του αντικειμένου που εφάπτονται με την επιφάνεια A, ψύχονται γρήγορα. Αυτό σημαίνει ότι μετά το ξεκαλούπωμα η πλευρά A τείνει να διατηρήσει τις διαστάσεις της παρά το γεγονός ότι τα μακρομόρια είναι έντονα προσανατολισμένα.

Αντίθετα στην πλευρά Β τα μακρομόρια που είναι ακόμη ζεστά καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο και τείνουν να βρουν μια ισορροπία. Κατά συνέπεια τα μόρια αυτά εξακολουθούν να χαλαρώνουν και να συρρικνώνονται. Ο βαθμός συρρίκνωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία του υλικού, ο βαθμός κρυσταλλικότητας το περιεχόμενο σε ενισχύεται κλπ. Ανάλογα με το βαθμό συρρίκνωσης το αντικείμενο θα εμφανίσει και την ανάλογη κάμψη, όπου η κοίλη πλευρά θα είναι αυτή που εφάπτονται στο ζεστό τοίχωμα του καλουπιού

Ακόμη και στην περίπτωση που τα τοιχώματα του καλουπιού έχουν την ίδια θερμοκρασία δεν είναι απίθανο να δούμε ένα παραμορφωμένο αντικείμενο ένα η γεωμετρία του δεν είναι κατάλληλη, ώστε να επιτρέπει ομοιόμορφη ψύξη του αντικειμένου. Στην εικόνα 2.5.1.3 βλέπουμε ένα αντικείμενο το οποίο από τη μια πλευρά είναι επίπεδο ενώ από την άλλη φέρει εξόγκωμα. Μετά το ξεκαλούπωμα το αντικείμενο εμφανίζει παρατεταμένη συρρίκνωση στο κέντρο του εξογκώματος το οποίο δεν πρόλαβε να παγώσει κατά την φάση της ψύξης. Όπως στο προηγούμενο παράδειγμα έτσι και εδώ ο διαφορετικός συρρίκνωση προκαλεί την κάμψη του αντικειμένου.

Ο εκάστοτε χειριστής πρέπει να συνειδητοποιήσει ότι στην περίπτωση παραμορφωμένων αντικειμένων το ξεκαλούπωμα δεν πρέπει να πραγματοποιηθεί αν προηγουμένως δεν λάβει χώρα ισορροπία των τάσεων στην μάζα του αντικειμένου. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί η παραγωγή να επιφορτιστεί με ένα παραπάνω κόστος τον χρόνο.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου ένα αντικείμενο φαινομενικά διατηρεί τις διαστάσεις και τη μορφή του μετά το ξεκαλούπωμα. Οι ιδιαιτερότητες της χύτευσης όμως εγκλωβίζουν τάσεις στη μάζα του αντικειμένου οι οποίες με την πάροδο του χρόνου είναι δυνατόν να εκδηλωθούν και να οδηγήσουν σε παραμόρφωση του αντικειμένου.

Η κατάσταση επιδεινώνεται με την μεταβολή και ορισμένων παραμέτρων όπως είναι η εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων αλλά κυρίως η αύξηση της θερμοκρασίας. Με τη αύξηση της θερμοκρασίας προσανατολισμένοι μακρομοριακοί τομείς τείνουν να χαλαρώσουν και επομένως οδηγούν σε παραμορφωτική συρρίκνωση. Σε πολλές εφαρμογές η παραπάνω ιδιότητα των πολυμερών είναι αξιόπιστη. Τέτοιες εφαρμογές είναι αυτή του συρρικνωμένου φιλμ συσκευασίας το συρρικνωμένο κάλυμμα καλωδίων κλπ.[21].

3.1. Σχεδιασμός προϊόντος

3.1.1. Εισαγωγή

Καθώς οι μηχανικοί χρειάζονται όλους και περισσότερους κανόνες σχεδιασμού σε διφορούμενες εφαρμογές, υπάρχουν βασικά στοιχεία που είναι συνήθη στον σχεδιασμό πλαστικών προϊόντων. Τέτοια στοιχεία είναι τα νεύρα, το πάχος των τοιχωμάτων, κλίση, καμπύλες επιφάνειες και όγκοι. Αυτό το κεφάλαιο ασχολείται με γενικά θέματα σχεδιασμού που ένας μηχανικός θα πρέπει να γνωρίζει για το σχεδιασμό θερμοπλαστικών προϊόντων.

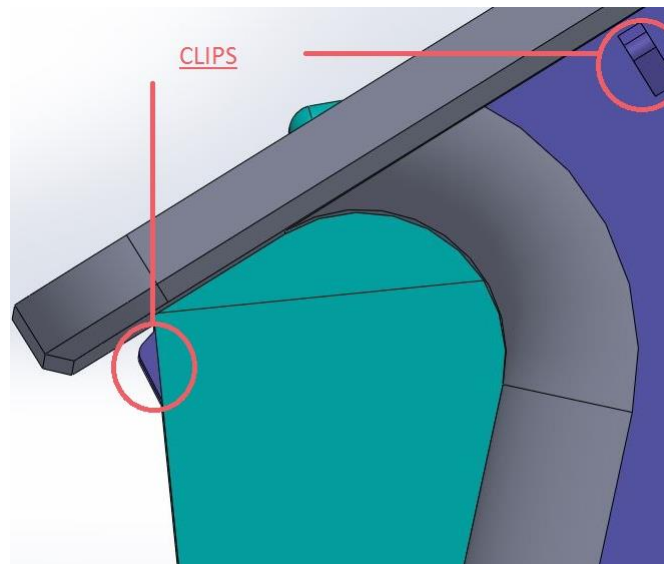
Λόγω των πνευματικών δικαιωμάτων που κατέχει η εταιρεία για το εν λόγω αντικείμενο, η οποιαδήποτε δημοσιοποίηση στοιχείων που καθιστά εύκολη την αντιγραφή του προϊόντος και την παραγωγή του είναι **δια του νόμου**, απαγορευμένη. Για αυτό το λόγο δεν δίνονται σχέδια με διαστάσεις, και οι αναφορές των διαστάσεων στην πορεία της εργασίας γίνονται με προσοχή ώστε να προστατεύονται τα πνευματικά δικαιώματα του αντικειμένου.

Το τεμάχιο μας αποτελεί εξάρτημα λαβής για στερεοφωνικά ηχεία. Τοποθετείται εσωτερικά στις πλευρικές εσοχές του ηχείου που χρησιμεύουν ως λαβές για την μεταφορά του. Είναι πλαστικές κυρίως λόγω κόστους και ευκολίας στην κατασκευή τους. Η τελική χρήση του αντικειμένου εστιάζει σε σημαντικές απαιτήσεις ως προς την ακριβή τελική του γεωμετρία, διότι αποτελεί στοιχείο συναρμογής. Σφάλματα σχεδιασμού και στην παραγωγής μπορεί να οδηγήσουν σε λάθος σχέση συναρμογής, ελεύθερης ή σφιχτής προκαλώντας προβλήματα στην εγκατάσταση. Άλλη απαίτηση είναι η αντοχή του στις αντίστοιχες καταπονήσεις του κατά την χρήση του, οι οποίες είναι η κάμψη και διάτμηση από δυνάμεις ολίσθησης που εμφανίζονται στις πλευρικές του επιφάνειες. Εξαρχής λοιπόν καθορίζονται λύσεις και τρόποι σχεδιασμού από τις ανάγκες χρήσης του.

3.1.2. Σχεδιαστικές λύσεις

Ως προς το είδος της συναρμογής αναγνωρίζονται ανάγκες για δύο βασικά χαρακτηριστικά στο αντικείμενο:

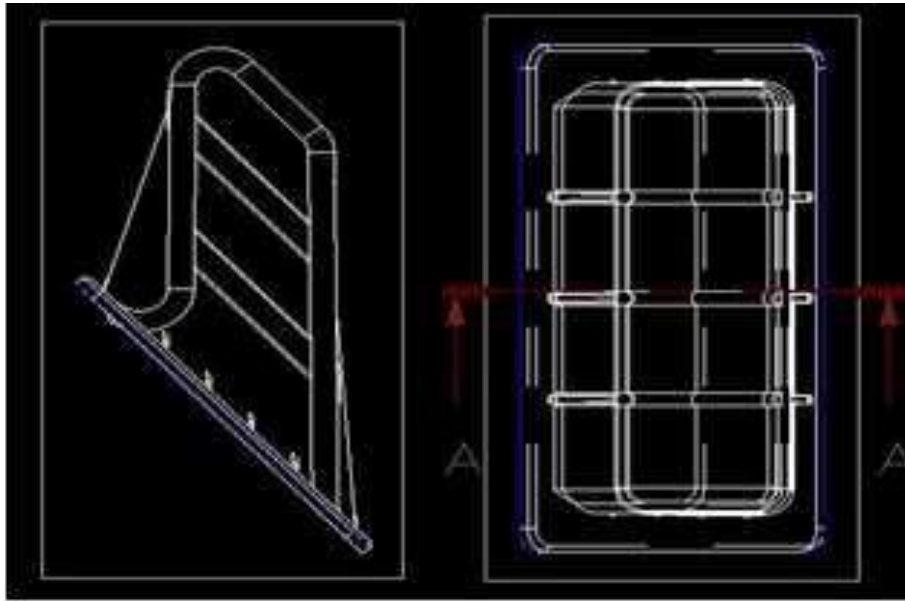
- Το σχήμα του αντικειμένου, το οποίο για λόγους εργονομίας και ευχρηστίας πρέπει να είναι διαστασιολογικά όσο πιο μικρό όμως ικανό να τοποθετηθούν και τα τέσσερα δάκτυλα της παλάμης. Καταλληλότερο σχήμα που επιλέγεται είναι ορθογώνιο κέλυφος (shell), όπως διακρίνεται στην εικόνα 3.1.2-2.
- Τα *clips* τα οποία θα μπορούσε να διαθέτει πλευρικά ώστε να αποτρέπει την αντίθετη μετατόπιση προς τα έξω. Αποφασίζεται να τοποθετηθούν πίσω από το εξωτερικό χείλος της λαβής, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.2-1, κρίσιμο σημείο για να «κουμπώνει» η λαβή σε μια θέση, απαγορεύοντας οποιαδήποτε άλλη μετακίνηση σε x,y,z άξονες.



Εικόνα 3.1.2-1: Τα clips βρίσκονται περιφερειακά του τεμαχίου.

Μέσα στις παραμέτρους του καλού design βρίσκεται η τεχνική της πρακτικής κατασκευής καλουπιού κοιτώντας για ευκαιρίες να μειωθεί ο αριθμός των αναγκαίων συναρμογών. Στην προκειμένη περίπτωση για μια λαβή θα χρειαζόμασταν για την πάκτωση του αντικειμένου περισσότερες από δυο βίδες. Αυτός ο συνδυασμός δεν θα ήταν σε καμία περίπτωση εύχρηστος.

Για αυτό το λόγο το έξυπνο design συχνά περιορίζει ή εξαλείφει την ανάγκη για επιπλέον συνδέσμους. Τους αντικαθιστά με την τεχνική της ενσωματοποίησης (consolidation). Δηλαδή δύο ή περισσότερα λειτουργικά μικρά κομμάτια ενωμένα με το κύριο σώμα. Αυτή η τεχνική εξυπηρετεί στην μείωση του κόστους καθώς χρησιμοποιούνται λιγότερα υλικά.



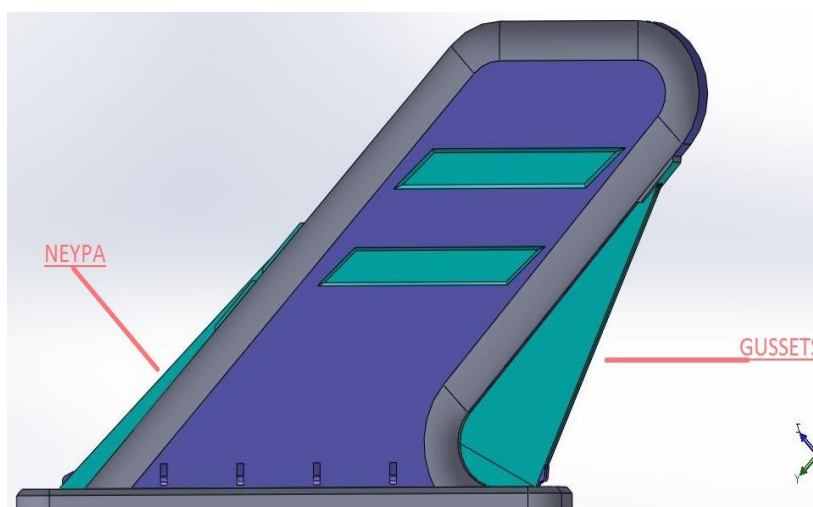
Εικόνα 3.1.2-2: Πλάγια και άνω όψη σχεδίου αντικειμένου.

Ως προς τις απαιτήσεις του τεμαχίου για την αντοχή του στις παραμορφώσεις αναγνωρίζονται οι εξής ανάγκες :

- Κατά την καταπόνηση της κάμψης υφίσταται συγκεντρωμένο φορτίο καθόλο το μήκος του ομοιόμορφα. Η καταπόνηση αυτή γίνεται στην ελαστική περιοχή για αυτό το τεμάχιο επανέρχεται μετά την αποφόρτιση στην αρχική του κατάσταση. Με βάση την παραπάνω παραδοχή μας ενδιαφέρουν δύο στοιχεία:
 - Η διατήρηση της επιπεδότητας στην επιφάνεια που δέχεται τις εγκάρσια κατανεμημένα φορτία. Συνεπώς επιλέγουμε η μια πλευρά του αντικειμένου να μην έχει κλίση να λειτουργεί όσο το δυνατό ως ουδέτερη επιφάνεια.
 - Το τεμάχιο να αποτελείται από ανεξάρτητα στοιχεία που παραλαμβάνουν αυτές τις φορτίσεις ή ενισχύουν στην αντοχή δημιουργώντας μια ανένδοτη επιφάνεια. Κρίσιμα σημεία είναι λόγω μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας το άνω χείλος που θεωρητικά θα δέχεται την μεγαλύτερη ροπή όπως και το κάτω χείλος που η επιφάνεια στην οποία εφάπτεται σχεδιάζεται με κλίση.

Συνεπώς αυτή είναι η καμπτόμενη περιοχή που χρήζει ενίσχυση όχι μόνο όμως έναντι συστροφής αλλά και θερμικών καταπονήσεων καθώς τα ράδια (fillet) ανήκουν στις επιρρεπείς περιοχές για συρρίκνωση και παραμόρφωση. Τα νεύρα είναι μια εκδοχή. Τα νευρά παρέχουν μιας μεγάλης σημασίας οικονομική ενίσχυση της δυσκαμψίας και την αντοχή ένα κομματιού, χωρίς να χρειάζεται να αυξήσουμε το πάχος του υλικού[22].

Εξαιτίας της γεωμετρίας του αντικειμένου χρησιμοποιούμε *gusset* που είναι ένα είδος νεύρου και υποστηρίζει την κατασκευή του αντικειμένου ως αντιστήριξη. Σε σχέση με το πάχος του αντικειμένου τα νεύρα μπορούν να υπολογιστούν συνήθως από 1/2 στα 2/3 του συνολικού πάχους. Αναμενόμενα προβλήματα που θα εμφανιστούν είναι τα *sink marks* στην αρνητική-εσωτερική τους περιοχή. Επίσης για την κατεργασία τους χρησιμοποιείται η μέθοδος *EDM* με την θερμική διάβρωση δημιουργούνται τα νεύρα μέσα στο καλούπι όμως προστίθενται προβλήματα στην εξώλκευσή τους. Για αυτό το λόγο πάντα σχεδιάζονται τα νεύρα με μια κλίση 0,5-2°(*draft*) ώστε να εξωλκεύονται πιο εύκολα από το καλούπι. Το εύρος fillet του νεύρου κυμαίνεται από 1/4 στα 3/4 [23].



Εικόνα 3.1.2-3:Νεύρα και gussets που ξεχωρίζουν στις επιφάνειες του τεμαχίου.

Τέλος προβλήματα όπως η εξαέρωση είναι συνήθη κοντά στα νεύρα για αυτό μετά την φάση του *racking* περιμένουν συγκέντρωση αέρα στην περιοχή ο οποίος με δυσκολία θα φύγει εάν δεν ανοίξουμε τρύπες διαφυγής.

- Το πάχος των τοιχωμάτων επηρεάζει ισχυρά κατά πολύ τα βασικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου όπως την δυσκαμψία και αντοχή, την εμφάνιση, την ευχρηστία για την λειτουργική άνεση κίνησης στο εσωτερικό του τεμαχίου, και το κόστος. Το βέλτιστο πάχος ισορροπεί μεταξύ της αντίστροφης σχέσης αντοχής και βάρους. Για αυτό το λόγο το πάχος είναι ένας παράγοντας σχεδιασμού που δίνεται πολύ προσοχή και ένα βήμα για την αποφυγή υψηλών κοστών ή δύσκολων μετατροπών στο καλούπι. Στην πράξη σε επίπεδα τοιχώματα κάθε 10% της αύξησης του πάχους δίνει 33% στην αύξηση της ακαμψίας του [24]. Από την άλλη όμως η αύξηση του πάχους προσθέτει βάρος, περισσότερους κύκλους στην μηχανή και κόστος υλικού. Η απόφαση μεταξύ αυτής της αντίστροφης σχέσης βάρους και αντοχής διευκολύνεται με τα εργαλεία των νεύρων, καμπύλων που αυξάνουν την ακαμψία και δίνουν την επαρκή αντοχή στο αντικείμενο.

- Κατά της ολίσθησης συνεισφέρουν οι γραμμές-όγκοι (*blocks*) αντιολίσθησης, πρόκειται για παράλληλα μπλοκ με μια συγκεκριμένη πυκνότητα που αντιτίθενται στην σχετική μετατόπιση. Αυτές οι λεπτές σειρές, παράλληλες γραμμές σχεδιάζονται σε ένα επίπεδο που μετρά γωνία που σχηματίζει με το επίπεδο ολίσθησης χάρη στο σχεδιαζόμενο *draft* που προσθέτουμε στο αντικείμενο. Αυτοί οι όγκοι διατηρούν τέτοιες αποστάσεις μεταξύ τους ώστε να απαιτούνται μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις για ολίσθηση. Οι μικρότερες αποστάσεις μεταξύ τους απαιτούν μεγαλύτερες τάσεις.



Εικόνα 3.1.2-4: Αποτύπωμα αντικειμένου από 3D scanner.

3.2. Σχεδιασμός καλουπιού

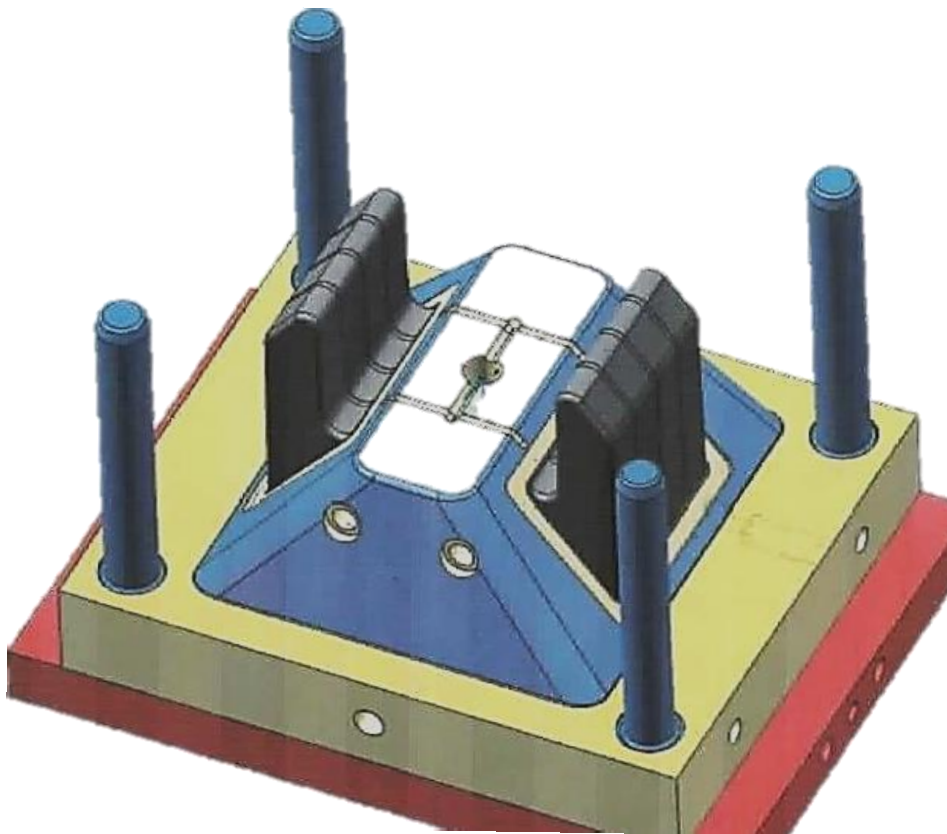
3.2.1. Περιγραφή καλουπιού

Ο σχεδιασμός ενός καλουπιού χύτευσης για μηχανές πρεσών είναι μια χρονοβόρα και δύσκολη διαδικασία. Η περιπλοκότητα της εργασίας οφείλεται στο ότι εμπλέκεται πλήθος παραγόντων οι οποίοι δημιουργούν μια λίστα απαιτήσεων τις οποίες ένας σχεδιαστής καλείται να τις αναλύσει εις βάθος μία προς μία, βρίσκοντας την κατάλληλη λύση για αυτές. “Για ποία χρήση προορίζεται το αντικείμενο;” “Ποία θα είναι η συναρμογή του;” “Σε τι καταπονήσεις υπόκειται το εξάρτημα;”. Επιπρόσθετα σε λειτουργικά και κατασκευαστικά θέματα, θέματα δηλαδή που αφορούν την χύτευση κυρίως κατά την φάση της διαδικασίας, παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό ενός καλουπιού. Από πού και πώς εισέρχεται το υλικό, πώς γεμίζει την κοιλότητα μορφής του αντικειμένου και πώς ψύχεται είναι απαιτήσεις που συνδέουν στενά την μορφή του αντικειμένου με τα χαρακτηριστικά του καλουπιού που θα παραχθεί.

Σαφέστατα οι περισσότεροι σχεδιαστές καλουπιών χρησιμοποιούν βασικούς κανόνες για να χτίσουν με λογικό τρόπο ένα μοντέλο με στόχο τον ταχύτερο τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής του. Όμως καθώς το μοντέλο αναπτύσσεται συναντώνται περισσότερα προβλήματα, για τα οποία μόνος του ο σχεδιαστής οφείλει να εφεύρει ενδελεχώς αντίστοιχες λύσεις. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται το καλούπι του αντικείμενου μας όπως αποφασίστηκε να κατασκευαστεί από τους σχεδιαστές της εταιρείας παραγωγής.

Πρόκειται για ένα καλούπι χάλυβα S420 διαστάσεων 453mmx348mmx365mm δύο πλακών. Είναι το πιο συνηθισμένο είδος καλουπιού για θερμοπλαστικά χαμηλής διάβρωσης(weak corrosion) όπως το PP,PC,PMA,PA. Διακρίνεται σε κινητή πλάκα μορφής κοιλότητας (θηλυκό μέρος καλουπιού), σταθερή πλάκα μορφής πυρήνα (αρσενικό μέρος καλουπιού) και το *parting line* (η διαφορά των επιφανειών των δύο πλακών που αποτελεί το παραγόμενο προϊόν).

Το *parting line* του υπό μελέτη καλουπιού επαφίεται σε υπό κλίση επιφάνεια, με άνω επιφάνεια το χείλος του αντικείμενου όπως είναι ευδιάκριτο στην *εικόνα 3.2.1-1*, δηλαδή η πρόσψη του αντικείμενου κατά τη χρήση του. Ο κεντρικός άξονας του αντικείμενου διατηρεί αυστηρή γεωμετρική σχέση παραλληλίας με τον κατακόρυφο νοητό άξονα του καλουπιού όπως γίνεται αντιληπτό από την *εικόνα 3.2.1-2*.

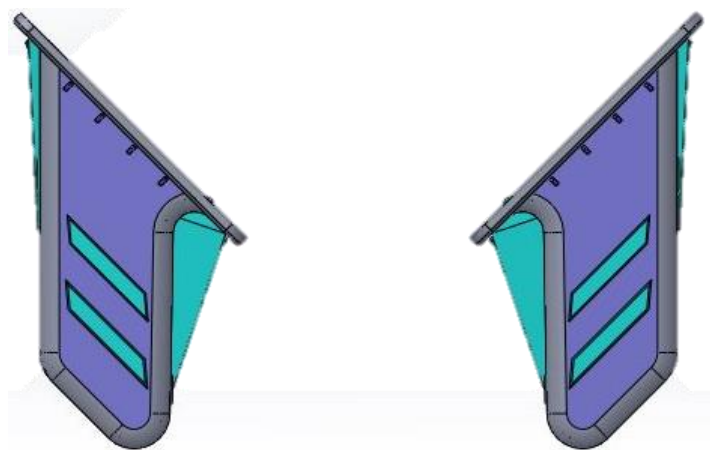


Εικόνα 3.2.1-1: Ο πυρήνας καλουπιού.

Η προσαρμογή αυτή διευκολύνει **i)** την κατεργασία του καλουπιού ως προς την κοπή και την συμμετρική διάτρηση καναλιών ψύξης **ii)** την εξώλκευση του αντικειμένου. Παρατηρούμε δύο συμμετρικές κοιλοότητες. Η συμμετρία των δυο parting line διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην φάση της πλήρωσης και ψύξης του καλουπιού. Συνεπώς σε κάθε κύκλο της μηχανής, χτύπημα εξέρχονται δύο αντικείμενα , ίδιας μορφής.

Η απόφαση για τον αριθμό των κοιλοτήτων προέρχεται από τρεις παράγοντες:

- Την ποσότητα της παραγωγής, καθορίζεται από την δεδομένη παραγγελία του πελάτη, σε χρονική βάση ημέρας, εβδομάδας, μήνα είτε χρόνου.
- Το εμβαδόν του αντικειμένου, που οριοθετεί τις λειτουργικές διαστάσεις της άνω και κάτω πλάκα μορφής.
- Το τονάζ των μηχανών injection που διαθέτει η μονάδα παραγωγής. Τη χωρητικότητα δηλαδή σε ολική μεταφορική ικανότητα του φορτίου σε βάρος.



Εικόνα 3.2.1-2: Δυο συμμετρικές κοιλοότητες.

Η μηχανή χύτευσης που διαθέτει η μονάδα και παράγει το προϊόν είναι η **Battenfeld Hydraulic series HM 150 t 1500-1000(D60)** με αντίστοιχα μεγέθη που παρατίθενται στο **πίνακα 3.2.1-1**:

Μεγέθη	
Διάμετρος του κοχλίου	60[mm]
Μέγιστη δοσομετρία ανά κύκλο	594[cm ³]
Μέγιστο όριο πίεσης	167[Mpa]
Μέγιστος ρυθμός ροής	273 [cc/s]

Πίνακας 3.2.1-1: Χαρακτηριστικά της μηχανής.

Με γνωστό τον αριθμό των κοιλοτήτων και το «τονάζ» (*tonnage*) της μηχανής καταλήγουμε στο καθαρό βάρος του αντικειμένου. Από τον πίνακα των εμπορικών πλαστικών της συνεργάτιδας εταιρείας παραγωγής πρώτων υλών **BASF** επιλέγεται πολυμερές που η κατά μέσο όρο πυκνότητά του μας δίνει το επιθυμητό βάρος του αντικειμένου το οποίο είναι 104 gr, από την *εξίσωση 4* (βλ. κεφάλαιο 2.9.2.1) . Σε περίπτωση που υπόκειται το αντικείμενο σε έκθεση ακτινοβολίας χρειαζόμαστε υλικό προστασίας UV. Επιλέχθηκε υλικό, όπως φαίνεται στην *εικόνα 3.2.1-2*, **πολυπροπυλένιο PP** της εταιρείας **BASF** τύπου **NOVOLEN 1100 L**, με τα εξής χαρακτηριστικά του *πίνακα 3.2.1-2*:

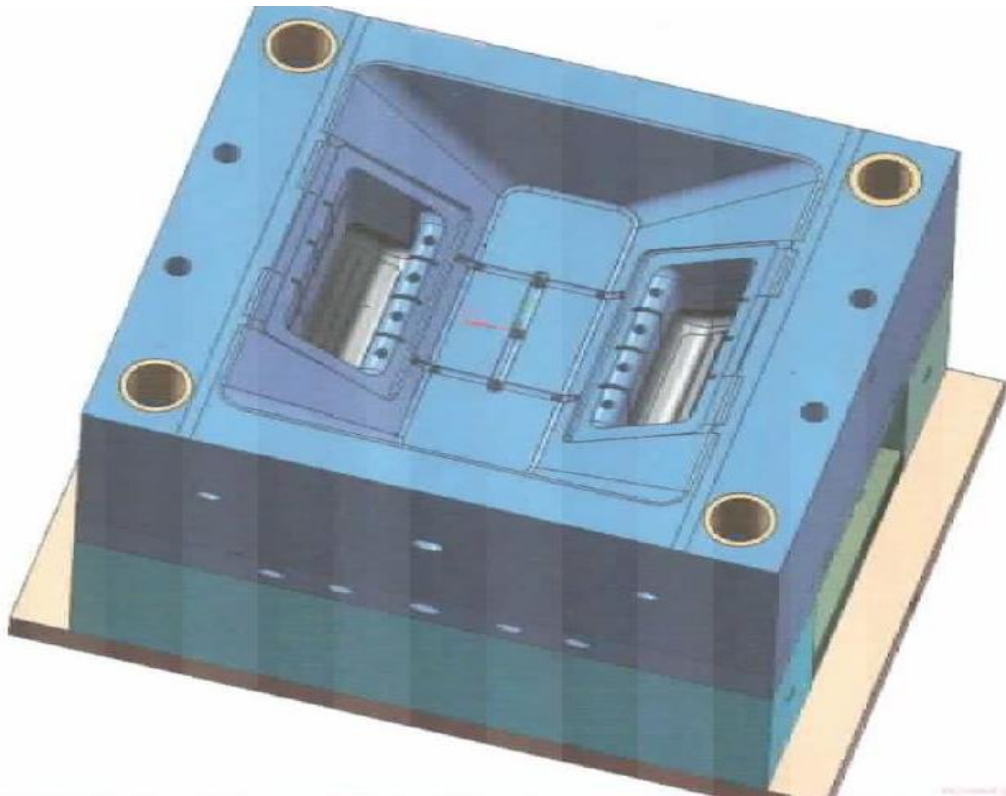


Εικόνα 3.2.1-3: Πολυπροπυλένιο, **BASF NOVOLEN 1100 L**.

Μεγέθη		Κανονισμός
Πυκνότητα	1,45 [g/cm ³]	ASTM D1505
Σημείο υαλώδους κατάστασης	150 [°C]	ASTM D-570
Γραμμική ισοτροπική συρρίκνωση	1,2-2%	ASTM D-955
Melt Flow Index	8 [g/10 min]	ASTM D1238
Χαρακτηριστικά δυσκαμψίας	Σκληρό	
Φυσική δομή	Ημικρυσταλλικό	

Πίνακας 3.2.1-2: Χαρακτηριστικά υλικού **BASF NOVOLEN 1100 L**.

Αναλόγως της επιλογής υλικού καθορίζεται και η ποιότητα επιφανείας της εσωτερικής κοιλότητας θηλυκού και αρσενικού μέρους του καλουπιού. Τέλος από το πάχος που θέλουμε να επιτύχουμε σε μία χύτευση προβλέπονται οι κατάλληλες ανοχές ακριβείας που θα επιδιώξουμε κατά την διάρκεια της φάσης κατεργασίας. Η κοπή της μήτρας, *εικόνα 3.2.1-4*, σχεδιάστηκε σε πρόγραμμα **CAM-PowerMILL** της εταιρείας **DELCAM** και η κατεργασία του πραγματοποιήθηκε σε μηχανή CNC **HAAS VF-5/50 4th-axis**.



Εικόνα 3.2.1-4: Μορφή της κατεργασμένης κινητής πλάκας καλουπιού.

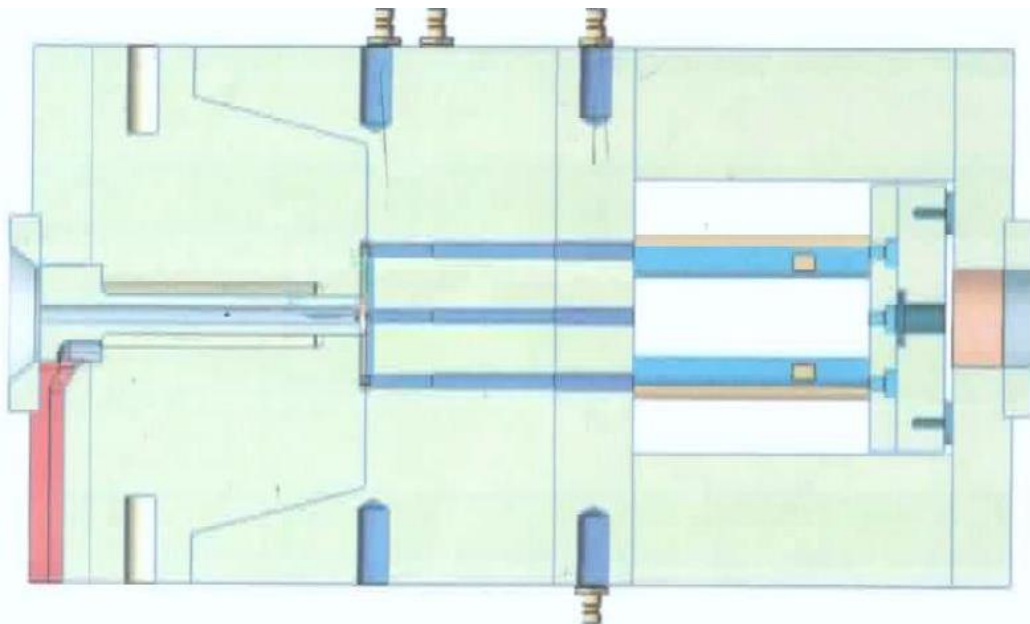
3.2.2. Περιγραφή συστήματος διανομής υλικού

Οι συνήθεις οριζόντιες πρέσες χύτευσης παραδίδουν το τετηγμένο υλικό στο καλούπι μέσα από μια τρύπα στο κέντρο της σταθερής τύπου πλάκας κοιλοτήτων. Αυτό το σύστημα διοχέτευσης υλικού όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.4 συνήθως αποτελείται την μπουκαδούρα (*sprue*) τον διακλαδωτή (*runner*) και την είσοδο (*gate*). Αυτά τα στοιχεία του συστήματος υλικού παράδοσης συζητούνται σε αυτό το τμήμα.

Ο σχεδιασμός του συστήματος διανομής στο καλούπι παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην ελάχιστη συρρίκνωση που θα λάβει το προϊόν. Ο σχεδιαστής πρέπει να αποφύγει την δημιουργία σημείων που θα δημιουργηθούν συσσωρεύσεις. Τέτοια σημεία είναι σημεία τομής πολλών τοιχωμάτων.

3.2.2.1. Μπουκαδούρα

Η μπουκαδούρα-χοάνη (sprue), όπως διακρίνεται στην εικόνα 3.2.2.1-1 προσανατολισμένη παράλληλα προς τον άξονα του τεμαχίου έγχυσης, παραδίδει το τήγμα από την σταθερή πλάκα προς την επιθυμητό βάθος μέσα στο καλούπι, που βρίσκεται και η *parting line*. Οι διαστάσεις της χοάνης είναι διάμετρος στομίου και διάμετρος σημείου ένωσης με το διακλαδωτή 6mm, κυλινδρική λόγω του σχετικά μικρού μεγέθους του καλουπιού προς μελέτη .



Εικόνα 3.2.2.1-1: Η μπουκαδούρα αριστερά του σταθερού τμήματος του καλουπιού.

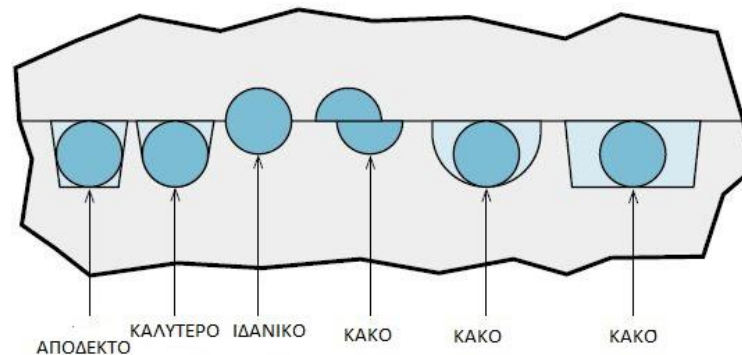
Ο σχεδιασμός της μπουκαδούρας μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της χύτευσης και την ευκολία της διαδικασίας. Σε πολλά καλούπια, ο μεγαλύτερος περιορισμός της ροής υλικού συμβαίνει στην άκρη του ακροφύσιου και στο στόμιο της χοάνης μπουκαδούρας. Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται το υψηλότερο ποσοστό ογκομετρικής ροής σε ολόκληρο το σύστημα. Μια υπερβολικά μικρής διαμέτρου μπουκαδούρα μπορεί να προκαλέσει υψηλές διατμήσεις και να οδηγήσει το υλικό σε υποβάθμιση, προβλήματα εμφάνισης, και οπωσδήποτε ανάγκη για αυξημένη πίεση πλήρωσης [25]. Η διάμετρος της μπουκαδούρας αποφασίζεται στα 6mm καθώς είναι κυλινδρικής διατομής. Οι διαστάσεις του καλουπιού είναι μικρές και όγκος πλήρωσης χαμηλού μεγέθους μια ικανοποιητική ροή επιτυγχάνεται όταν εξασφαλίσουμε στο *cold runner system* στα μέσα τροφοδοσίας ομοκεντρικότητα και κυλινδρικότητα σε όλες τις σήραγγες. Συνεπώς το συνολικό μήκος του μπεκ του ακροφυσίου (*nozzle edge*) εφάπτεται στην μπουκαδούρα και το συνολικό μήκος της είναι 100 mm. Ο ρυθμός της ογκομετρικής ροής, ταχύτητα που καθώς και οι ιδιότητες του υλικού ροής που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια πλήρωσης, σε μεγάλο βαθμό καθορίζουν το σωστό μέγεθος της μπουκαδούρας. Παράλληλα η θέση της μπουκαδούρας και ο τύπος της μορφής της, δεν θα πρέπει να αφήνουν ορατό το αποτύπωμα επί του προϊόντος, όπως επίσης να μην διανέμει το υλικό μέσα από διαδρομές που επιβαρύνουν την άμεση ροή του σε όλα τα σημεία του θαλάμου.

3.2.2.2. Δρομείς

Σε αντίθεση με την χοάνη , η οποία παρέχει το υλικό σε διεύθυνση βάθους μέσα στο κέντρο των πλακών, οι διακλαδωτές (*runners*) μεταφέρουν το υλικό μέσω των κατεργασμένων καναλιών στη *parting line*. Τα συστήματα των διακλαδωτών διακρίνονται σε απλούς διακλαδωτές (*cold runner systems*) και θερμαινόμενους (*hot runner systems*). Στο υπό μελέτη καλούπι χρησιμοποιήθηκε απλό σύστημα διακλαδωτή, με σκοπό την πιο οικονομική διαδικασία αλλά και την απλότητα του σχεδιασμού του. Ο σκοπός της απλότητας του σχεδιασμού σε σύγκριση με την πολυπλοκότητα ενός θερμαινόμενου διακλαδωτή υπερσχύει στην περίπτωση μας. Παράλληλα τα κόστη αφορούν κυρίως τις χαμηλού επιπέδου ανάγκες τόσο για ένα σχεδιαστή να δομήσει ένα τέτοιο σύστημα όσο και για ένα χειριστή να το λειτουργήσει .

Ο σχεδιασμός των *runner* έχει επιρροές στην ποιότητα του τεμαχίου και εν μέρει στην αποδοτικότητα της χύτευση. Υπερβολικά παχύς διακλαδωτές επιμηκύνουν το χρόνο του κύκλου της μηχανής άσκοπα και ταυτόχρονα επιφέρουν αύξηση του κόστους που συνδέεται άμεσα με ζημία της παραγωγής. Αντίθετα, λεπτή διακλαδωτές μπορούν να προκαλέσουν υπερβολικές πιέσεις πλήρωσης. Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός διακλαδωτή απαιτεί μια ισορροπία μεταξύ της ευκολίας στην πλήρωση, τον σχεδιασμό των υπολοίπων χαρακτηριστικών του συστήματος μεταφοράς υλικού λόγω χάρη *sprue* και *gate* και τον όγκο του διακλαδωτή.

Οι κυλινδρικοί διακλαδωτές επιτυγχάνουν την πιο αποδοτική ροή στο σύστημα μεταφοράς Το συγκεκριμένο σύστημα μεταφοράς λειτουργεί με διακλαδωτές διατομής κυλίνδρου διαμέτρου 6mm ,διάμετρος συναφής με την διάμετρο της χοάνης. Κρίνεται ιδανικότερη σε σύγκριση με άλλες επιλογές διατομών όπως παριστάνεται στην *εικόνα 3.2.2.2-1* .

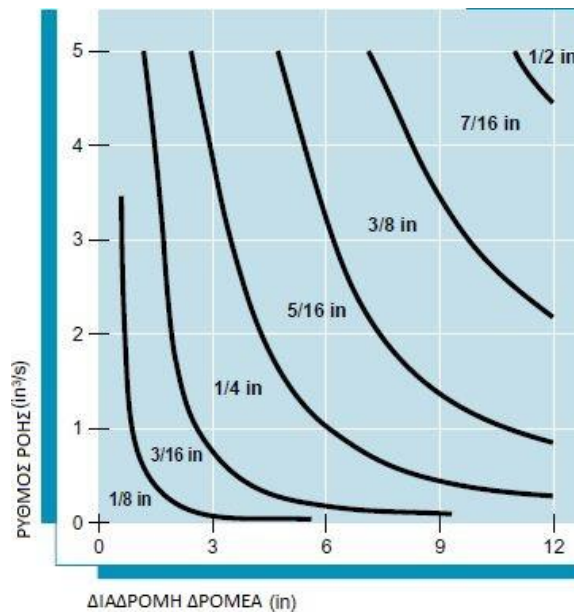


Σχήμα 3.2.2.2-1: Διαφορετικοί τύποι τομών runners.

Η βέλτιστη διάμετρος ενός runner καθορίζεται από μια ποικιλία παραγόντων συμπεριλαμβανομένου του όγκου και πάχους του τεμαχίου, την ταχύτητα και πίεση της πλήρωσης στην χύτευση, το μήκος του runner και την βισκοελαστικότητα του υλικού όπως επιλέγεται από το

διάγραμμα του σχήματος 3.2.2.2-2. Τρεις βασικοί κανόνες που πρέπει να λάβει υπόψη του ένας σχεδιαστής:

- i. Για επαρκές *racking*, δημιουργούμε τα *runners* με διάμετρο τουλάχιστον όσο είναι η διάμετρος του πάχους του τεμαχίου.
- ii. Αυξάνεται η διάμετρος τους εάν χρησιμοποιούμε άμορφα πλαστικά σε αντίθεση με τις χαμηλές απαιτήσεις διαμέτρου όταν έχουμε ημικρυσταλλικά.
- iii. Αυξάνεται η διάμετρος τους, όταν χρησιμοποιούνται μεγάλα σε μήκος *runners* ή *runners* που υπόκεινται σε υψηλού βαθμού ογκομετρική ροή.

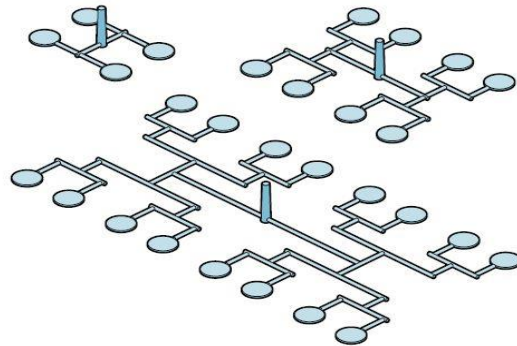


Σχήμα 3.2.2.2-2: Διάγραμμα ογκομετρικής ροής συναρτήση του μήκους δρομέων.

Καλούπια περισσότερων κοιλοτήτων (*multicavity*) απαιτούν ειδική προσοχή. Για καλούπια με πολλές κοιλότητες ενδέχεται η πλήρωση να μη γίνεται ταυτόχρονα. Για αυτό όταν γεμίσει και η τελευταία κοιλότητα, το υλικό που βρίσκεται στην πρώτη από αυτές θα έχει διαφορετικό ιξώδες από εκείνο που γέμισε την τελευταία. Έτσι η μεγάλη διαφορά ιξώδους δεν θα επιτρέψει την ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης με αποτέλεσμα να παρατηρήσουμε τραβήγματα [26]. Λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνουν τα *runners* για καλούπια οικογένειας τεμαχίων, δηλαδή καλούπια που παράγουν ίδια μέρη ενός συγκροτήματος κοιλοτήτων.

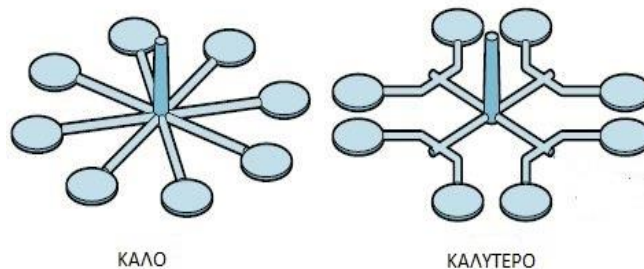
Διακλαδωτές, όπως διαγράφονται στην εικόνα 3.2.2.2-2, είναι σχεδιασμένοι με τον κατάλληλο ρεολογικό υπολογισμό έτσι ώστε για όλα τα μέρη να τελειώνει η πλήρωση την ίδια στιγμή.

Αυτό μειώνει την πίεση συγκράτησης (*overpacking*) ή και το σχηματισμό προεκτάματος στις κοιλότητες που γεμίζουν πρώτα, οδηγώντας σε λιγότερη παραλλαγή της συρρίκνωσης.



Εικόνα 3.2.2.2-1: Εξισορροπημένη τροφοδοσία υλικού.

Μια φυσική ισορροπία μεταξύ διοχέτευσης του υλικού πετυχαίνεται καλύτερα όταν τα *runners* διακλαδώνονται σε σειρές. Έτσι πετυχαίνεται μια βέλτιστη απόσταση για την ροή μεταξύ των δύο κοιλότητων ώστε να φτάνει το υλικό εξίσου στους ίδιους χρόνους και ποσότητα στην άκρη της κάθε εισόδου (*nozzle to gate*). Σε περίπτωση που είχαμε μεγαλύτερο πλήθος κοιλότητων θα ήταν σημαντικό να αποφύγουμε τεχνικές προσανατολισμού σε κυκλικές αποστάσεις αντιθέτων σε τάξεις σειρών όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2.2.2-3. Δυαδικές ακόμα και τετραδικές σειρές ωφελούν με τις επιμέρους διακλαδώσεις παρέχοντας την πιο ισορροπημένη τροφοδοσία στην είσοδο της κοιλότητας. Η μορφή της μπουκαδούρας παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην αποφυγή μεταφοράς παγωμένου υλικού μέσα στην κοιλότητα. Στο καλούπι μας έχουμε διακλάδωση σειράς δύο τάξεων και οι αποστάσεις είναι ίσες μεταξύ τους κατά μήκος.



Εικόνα 3.2.2.2-2: Ομαδοποίηση διοχέτευσης υλικού.

3.2.2.3. Πύλη εισόδου

Εκτός από ορισμένα συστήματα που αποτελούν εξαιρέσεις, η είσοδος (*gate*) αποτελεί το τελευταίο μέρος του συστήματος μεταφοράς υλικού στην κοιλότητα. Η είσοδος ενώνει ουσιαστικά το διακλαδωτή με τη *parting line* του τεμαχίου. Για αυτό το λόγο οι εισοδοί παρουσιάζουν αρκετές λειτουργίες. Η πιο σημαντική εμφανίζεται κατά την φάση συγκράτησης του υλικού. Οι εισοδοί με τον κατάλληλο σχεδιασμό εξασφαλίζουν την παραμονή του υλικού στην κοιλότητα, καθώς λόγω της γεωμετρίας τους αποτρέπουν την επιστροφή του υλικού προς τα πίσω. Αυτό πετυχαίνεται με την αύξηση της πίεσης στην είσοδο, που λειτουργεί ως τελικό ακροφύσιο και έτσι αποφεύγεται να εισέρχεται παγωμένο υλικό στην κοιλότητα.

Δεύτερον η γεωμετρία της εισόδου με μικρού πάχους ή διάμετρο διευκολύνει τον διαχωρισμό του τελικού τεμαχίου από το στερεοποιημένο πια κομμάτι του διακλαδωτή. Συνεπώς επιδιώκουμε να μην κατασκευάσουμε μια είσοδο δύσκαμπτη, ώστε να μπορεί να σπάει εύκολα στο πέρας της παραγωγής από τα χέρια του χειριστή ή κατά την εξώλκευση του αντικειμένου. Για αυτό το λόγο τοποθετούμε τους εξωλκείς πάντα σε ακτίνα απόστασης μια διαμέτρου του διακλαδωτή από την είσοδο [27]. Ο τρόπος κατεργασίας των *gates* έγινε με την μέθοδο ηλεκτροδιάβρωσης *EDM*.

Η γεωμετρία μιας εισόδου μπορεί να είναι είτε οβάλ, κωνική είτε ημικυκλική όταν έχουμε να κάνουμε με πύλη αφαλού όπως στο καλούπι μας. Όταν είναι υπό κλίση, την επιθυμητή γωνία την επιλέγουμε ανάμεσα σε 40-50° από τον οριζόντιο άξονα του *parting line* (βλ. εικόνα 2.4.4-3). Η αιτία είναι ότι κάτω από τέτοια γωνία συνήθως εξασφαλίζουμε την δυνατότητα για λιγότερη απώλεια πίεσης. Για αυτό ως βέλτιστη γωνία επιλέχθηκε εξαρχής η 45°. Μετά από αρκετές δοκιμές οι σχεδιαστές της εταιρείας κατέληξαν στην διάνοιξη μεγαλύτερης εισόδου σε ακτίνα 2mm, τραπεζοειδούς διατομής, κυλινδρικού πάτου, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ευκολία αλλά και τις επιθυμητές πιέσεις για την σωστή πλήρωση του καλουπιού καθώς όταν η πύλη είναι πολύ μικρή τότε αναμένεται οι ταχύτητες έκχυσης να είναι πολύ μεγάλες που επηρεάζει κατά πολύ τα επιθυμητά όρια πίεσης.

Μικρότερη διάμετρος πύλης θα δημιουργούσε επίσης προβλήματα *jetting*. Το σημείο εισόδου επιλέγεται να βρίσκεται όσο το δυνατόν σε επίπεδη επιφάνεια και στην πλευρά του άνω χείλους, όπως το βλέπουμε κατά την εφαρμογή του. Η αιτία είναι ότι ένας έξυπνος τρόπος να αποφευχθεί το *jetting* είναι να επιλεγεί η θέση του σημείου εισόδου απέναντι από τοίχωμα, ώστε να μην δημιουργηθεί το λεγόμενο κορδόνι [28], όπως έγινε λόγος για αυτό στο κεφάλαιο 2.9.2.3. Επίσης αποφεύγουμε να εγχέουμε σε περιοχές χαμηλού πάχους γιατί μετά το πάγωμα της εισόδου εμφανίζονται πάντα *sink marks* σε περιοχές λεπτών τοιχωμάτων. Τα πολύ λεπτά τοιχώματα δεν είναι κατάλληλα διότι το υλικό παγώνει γρήγορα με αποτέλεσμα να μην επενεργούν σωστά οι πιέσεις προς το χυτευόμενο υλικό της υπόλοιπης κοιλότητας του καλουπιού. Όσο πιο μικρή είναι η διάμετρος τόσο πιο επικίνδυνο είναι παγώσει πρόωρα το πολυμερές και να διακόψει το επαρκές γέμισμα της κοιλότητας. Τέλος ο πελάτης επιλέγει για ποια θα είναι τα κρυφά σημεία ή σημεία που δεν θα ενοχλούν την ευπαρουσίαση εικόνα του αντικείμενου. Κάτω από αυτούς τους περιορισμούς επιλέγεται και το τελικό σημείο εισόδου.

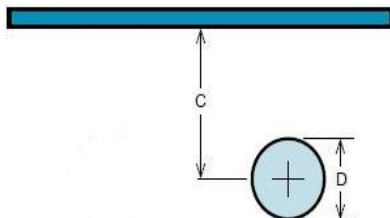
3.2.3. Περιγραφή σχεδιασμού καναλιών ψύξης

Στα θερμοπλαστικά, το καλούπια χύτευσης όπως έχει αναφερθεί σχεδιάζονται για τρεις βασικές φάσεις: την διαμόρφωση του τετηγμένου υλικού, την μείωση της θερμοκρασίας του για την στερεοποίηση του και την έξοδο του στερεού προϊόντος. Η ψύξη του καλουπιού καταλαμβάνει το μεγαλύτερο χρόνο σε όλη την διαδικασία και έχει άμεσο αποτέλεσμα στην ποιότητα του προϊόντος. Παρόλα αυτά ο σχεδιασμός των καναλιών της ψύξης πραγματοποιείται πάντα τελευταίος εφόσον έχει προηγηθεί ο σχεδιασμός της κοιλότητας και του πυρήνα του αντικειμένου, το σύστημα τροφοδοσίας του υλικού και το σύστημα εξώλκευσης. Για αυτό το λόγο ο σχεδιασμός των καναλιών συμμορφώνεται στον ήδη εναπομείναντα χώρο. Ο σχεδιαστής εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της ψύξης εστιάζοντας σε έξυπνους τρόπους που μπορεί να ψύξει καλύτερα το προϊόν του. Συνεπώς οι κύριοι κανόνες σχεδιασμού που αναλύονται έχουν ως βάση τον χώρο ανάπτυξης σχεδιασμού, πάρα τις θερμοδυναμικές ανάγκες του προϊόντος.

Ο καλός σχεδιασμός ενός συστήματος ψύξης διατηρεί την απαιτούμενη θερμοκρασία του καλουπιού, στηρίζεται σε συμμετρικά κανάλια και πετυχαίνει τους μικρότερους δυνατών χρόνους ψύξης. Ο βέλτιστος σχεδιασμός συστημάτων ψύξης αποφέρει οικονομικά οφέλη και άριστη ποιότητα του προϊόντος παραγωγής. Αντιθέτως ο μη κατάλληλος σχεδιασμός μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα συρρίκνωσης και έντονες παραμορφώσεις (σκεύρωση, κάμψη ή απόκλιση του μεγέθους γωνιών). Επίσης η λανθασμένη θερμοκρασία του καλουπιού δημιουργεί πολλά διαφορετικά προβλήματα επιφάνειας σε όλο τη διάρκεια της παραγωγής. Και αυτό είναι κάτι που ο χειριστής μπορεί να το αντιληφθεί άμεσα, όταν διαπιστώνει διαφορετική επιφάνεια για το κάθε παραγόμενο. Καλούπια με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα όπως χάλυβας στην μελέτη μας απαιτούν λεπτομερή ανάπτυξη καναλιών πλευρικά όλων των επιφανειών της κοιλότητας.

Ο σχεδιαστής συγκεκριμένα πρέπει να λάβει υπόψη του, ότι [29]:

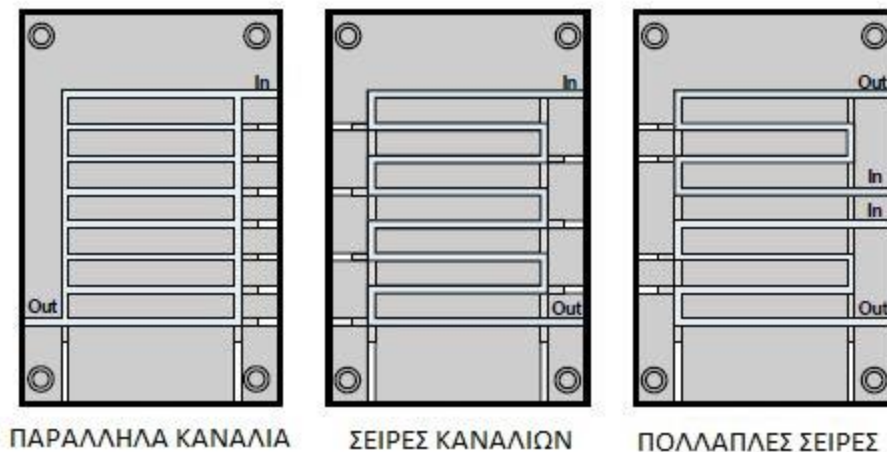
- 1) Η απόσταση των καναλιών κατέχει σημαντικό ρόλο, καθώς η πολύ κοντινή τους θέση στις επιφάνειες των κοιλότητων, επηρεάζει αρνητικά με δημιουργία ψυχρών σημείων, “κρύα μάζα” ενώ η μακρινή του απόσταση έχει ανεπαρκή αποτελέσματα ψύξης. Κατά εμπειρικό κανόνα η ικανοποιητική απόσταση που πρέπει να έχουν τα κανάλια από την επιφάνεια του τεμαχίου είναι από 0,5-3,5 φορές την διάμετρο του καναλιού ($C=0,5\sim 3,5\cdot D$) στην κατεύθυνση του σχήματος 3.2.3-1.



Σχήμα 3.2.3-1: Απόσταση καναλιών από επιφάνεια τεμαχίου.

Συνήθως οι σχεδιαστές παίρνουν ως δεδομένη πάντα την απόσταση επί 2,5 φορές την διάμετρο του καναλιού, αλλά πάντα πρέπει να έχουμε υπόψη τις ανάγκες τις κάθε επιφάνειας για ψύξη π.χ. κρίσιμα χαρακτηριστικά όπως λεπτά νεύρα.

- 2) Το πλήθος των σειρών των καναλιών και ο αριθμός περιστροφών που κάνουν γύρω από το αντικείμενο, βλ. *σχήμα 3.2.3-2*. Είναι ίσως το πιο σημαντικό αντικείμενο ανάλυσης που κάνει ο σχεδιαστής. Θα έλεγε κανείς ότι πρόκειται για ένα συμβιβασμό μεταξύ διατήρησης της πίεσης και της αποτελεσματικής ψύξης. Μια σειρά πολλών καναλιών είναι προτιμότερη διότι καταφέρνει συμμετρικά να ψύξει το τεμάχιο και το διατηρεί ταυτόχρονα εξολοκλήρου στην επιθυμητή θερμοκρασία. Από την άλλη όψη το μεγάλο πλήθος καναλιών μπορεί να ρίξει κατά μεγάλο ποσοστό την πίεση[30]. Συνήθως το πλήθος αυξάνεται στο κέντρο του καλουπιού και εκεί που το υλικό είναι πολύ ζεστό, δηλαδή επιφάνειες που γεμίζονται πρώτες.



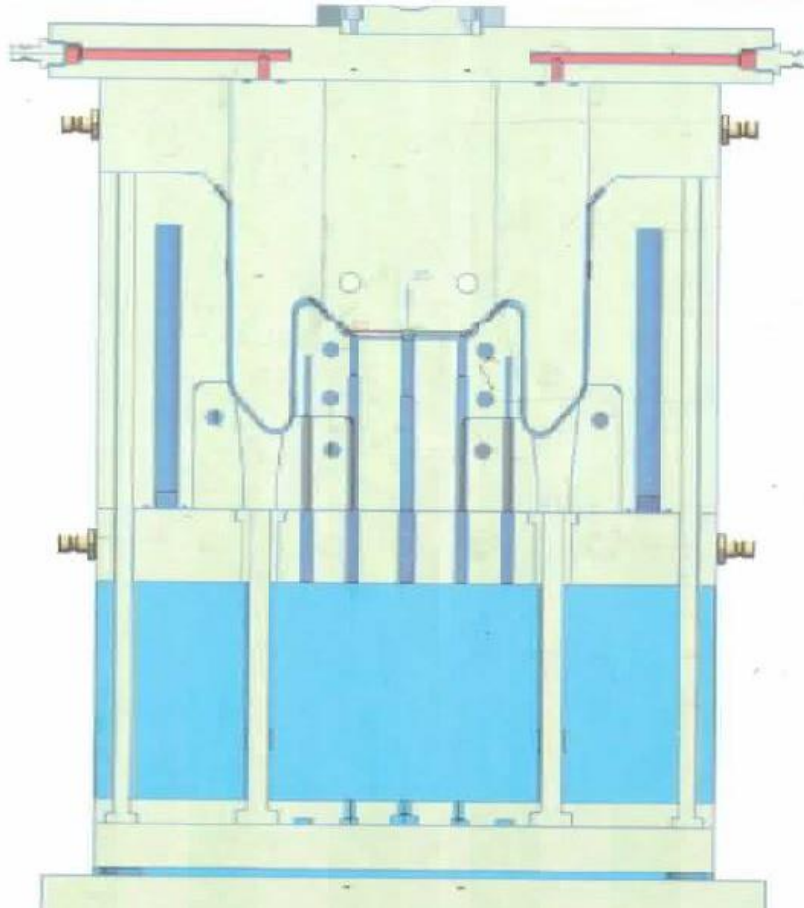
Σχήμα 3.2.3-2: Διαφορετικές μορφοποιήσεις σειρών καναλιών ψύξης.

- 3) Η αλλαγή της διεύθυνσης γίνεται υποχρεωτικά όπου υπάρχουν γωνίες στο αντικείμενο, ακολουθώντας την γεωμετρία του αντικειμένου. Καθώς οι γωνίες είναι σημεία που μαζεύουν κατά την χύτευση τα μεγαλύτερα ποσοστά εσωτερικών τάσεων. Για αυτό το λόγο σε γωνίες προτιμούμε η απόσταση των καναλιών να είναι σχετικά κοντινή, όπως εξηγείται από το *σχήμα 3.2.3-3*.



Σχήμα 3.2.3-3: Απόσταση καναλιού από κρίσιμες γωνίες.

Το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό νερό και παρέχεται από αερόψυκτο ψύκτη νερού τύπου **ACN Epsi**. Παρακάτω στην εικόνα 3.2.3-4 παρατίθεται η τομή του καλούπιου, όπου είναι εμφανής ο σχεδιασμός των καναλιών νερού στο καλούπι διπλής κοιλότητας.

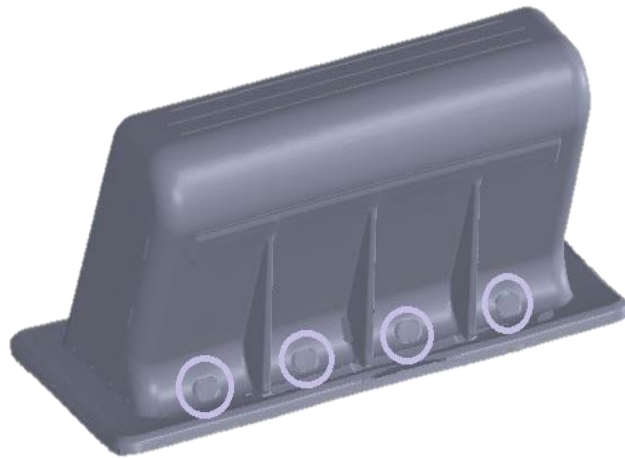


Εικόνα 3.2.3-1: Τομή καναλιών ψύξης καλούπιού.

3.2.4. Περιγραφή σχεδιασμού συστήματος εξώλκευσης

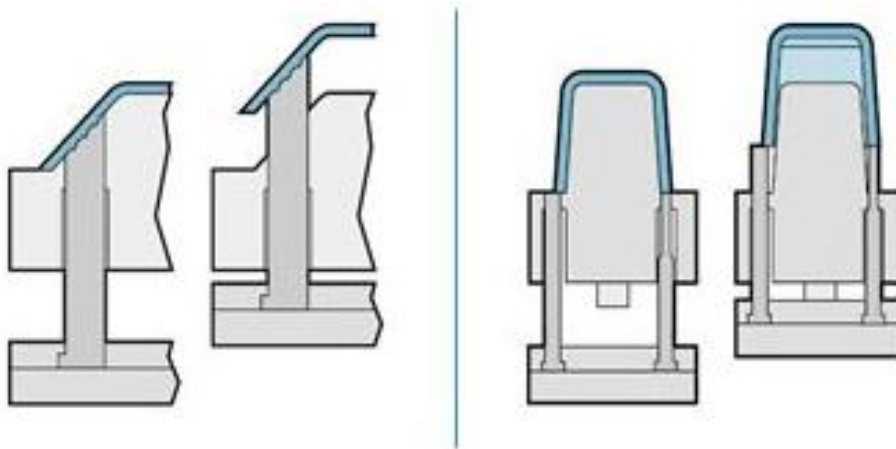
Συνήθως, τα καλούπια έχουν συστήματα εξώλκευσης ενσωματωμένα στη κινούμενη πλάκα. Η μονάδα εξώλκευσης αποτελείται από δυο πλάκες την άνω και την κάτω πλάκα εξωλκείων, ή διαφορετικά μονάδα εκτίναξης και μονάδα επαναφοράς. Η μονάδα επαναφοράς είναι συνδεδεμένη με το κινητό πλατό. Στην μονάδα εκτίναξης πείροι που συνδέουν το μηχανισμό τύπου εκτίναξης και πλάκα κοιλότητας στο καλούπι ενεργοποιούνται από ελεγκτή (**controller**) που ελέγχει χρόνο, ταχύτητα, και μήκος της διαδρομής εξώλκευσης. Τα καλούπια με αντίστροφη εξώλκευση έχουν τα αντίστοιχα τμήματα στη σταθερή πλάκα του καλούπιου. Μέσω ανεξάρτητων μηχανισμών εξώλκευσης λειτουργούν οι πείροι με ελατήρια ή υπό τη βοήθεια υδραυλικών κυλίνδρων. Αυτή η διαμόρφωση διευκολύνει την άμεση εξώλκευση σε ή εσωτερική ή οπίσθια θέση της επιφάνεια του τεμαχίου, ελαττώνοντας τα προβλήματα εμφάνισης σημαδιών των εξωλκείων.

Η προστιθέμενη πολυπλοκότητα της αντίστροφης εξώλκευσης αυξάνει το κόστος του καλούπιού, για αυτό και επιλέχθηκε ο συμβατικός τρόπος εξώλκευσης. Στο τελικό τεμάχιο της εικόνας 3.2.4-1 διαγράφονται σημάδια των εξωλκείων κατά μήκος του χείλους



Εικόνα 3.2.4-1: Αποτυπώματα εξωλκείων στο τελικό τεμάχιο.

Οι τρόποι εξοστρακισμού του τεμαχίου ποικίλλουν και συνάδουν με την πολυπλοκότητα της επιφάνειας του τεμαχίου. Στο υπό μελέτη καλούπι χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις πείροι εξώλκευσης, ΚΟ (*knock out pins*) καθώς και τμήμα εξωλκεία-συρτάρι προσώπου (*ejector surface*), ο οποίος είναι απαραίτητος για την αύξηση της πίεσης επιφάνειας για τον εξοστρακισμό του αντικείμενου από την κάτω πλευρά, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.4-1. Ο εξωλκείας συρτάρι χρησιμοποιείται κατά κόρον όταν θέλουμε να ενισχύσουμε την τοπική πίεση επιφάνειας αντί να προσθέτουμε πολλούς λεπτούς πείρους, που με ευκολία μπορεί να σπάσουν ή να αποκλίνουν. Επίσης όταν πρόκειται για επιφάνεια υπό κλίση όπως είναι η κάτωθεν πλευρά του τεμαχίου, συνιστάται πάντα ο συρταρωτός εξωλκείας γιατί έτσι αποφεύγεται η στρέψη του αντικείμενου κατά την εξώλκευση, που θα είχαμε με απλούς πείρους.



Σχήμα 3.2.4-1: Αριστερά εξωλκείας επιφάνειας /Δεξιά πείροι εξώλκευσης.

3.2.5. Τελικές μετατροπές στο καλούπι

Προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια της έγχυσης με αποτέλεσμα μετατροπές στο ήδη υπάρχων καλούπι εξετάστηκαν σε πρώιμο στάδιο ελέγχου του καλουπιού, πάνω στην μηχανή injection. Παρατηρήθηκε ότι καθώς το τήγμα εισχωρεί στην κοιλότητα του καλουπιού, θα πρέπει να εκτοπίσει τον αέρα που βρίσκεται μέσα σε αυτήν. Σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνει χώρα ένας βασικός νόμος της φυσικής δηλαδή όταν κάποιο αέριο συμπιεστεί αυτό ζεσταίνεται. Αν η συμπίεση επέλθει απότομα και με υψηλές πιέσεις ελκύεται μεγάλη θερμότητα σε μικρή επιφάνεια. Ο συνδυασμός άνθρακα και υδρογόνου που αποτελούν βασικά στοιχεία του πολυμερούς καθώς και η παρουσία του οξυγόνου προκαλούν σπινθήρα. Η χημική αντίδραση, καύση που λαμβάνει χώρα δημιουργείται ως φαινόμενο μόνο επιφανειακά. Αυτό εντοπίζεται σε μικρή έκταση και είναι πολύ έντονο [31]. Συνήθως στο σημείο της καύσης το μέταλλο παίρνει τέτοια απόχρωση σαν να είχαμε υπερθερμάνει την επιφάνεια με ένα φλόγιστρο όπως φαίνεται στην *εικόνα 3.2.5-1*. Σε ορισμένες περιπτώσεις και παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχουν εξαερώσεις το αντικείμενο δεν εμφανίζει πρόβλημα καψίματος. Συνήθως αυτό συμβαίνει όταν:

- A. Η γεωμετρία της κοιλότητας είναι τέτοια ώστε ο εγκλωβισμένος αέρας δεν περιορίζεται σε συγκεκριμένο χώρο αλλά διαχέεται
- B. Οι πιέσεις της έγχυσης δεν είναι τόσο υψηλές για να προκαλέσουν καύση.
- Γ. Ο εγκλωβισμένος αέρας ενδέχεται να μεταναστεύσει μέσα στην ίδια μάζα του αντικειμένου και να εμφανιστεί στο πλησιέστερο σημείο, όπου το τοίχωμα είναι πιο χοντρό και το τήγμα αργεί να παγώσει. Τότε η κατάσταση είναι πλέον κρίσιμη, αφού στο σημείο μειώνεται η μηχανική αντοχή του αντικειμένου, ενώ παράλληλα μας βάζει σε σκέψεις με την προέλευση της φυσαλίδας. Η φυσαλίδα αυτή μοιάζει με κενό αέρος, όπως αυτό που δημιουργείται στην περίπτωση του τραβήγματος (*void*)

Τα σημεία στα οποία θα γίνουν οι εξαερώσεις πρέπει να επιλέγουν με προσοχή, ώστε να αποτρέπουν πλήρως τον εγκλωβισμό του αέρα. Τέτοια σημεία είναι εκείνα στα οποία καταλήγει το εκάστοτε μέτωπο ροής, δηλαδή, τα σημεία που γεμίζουν τελευταία με τήγμα. όταν δεν υπάρχουν εξαερώσεις ή αυτές δεν είναι τοποθετημένες στις κατάλληλες θέσεις τότε ο αέρας δεν μπορεί να διαφύγει με αποτέλεσμα να παραμένει στην κοιλότητα όπου και συμπιέζεται από το επερχόμενο ρευστό. Συνήθως στα σημεία που εγκλωβίζεται ο αέρας παρατηρείται ελλειπές γέμισμα του αντικειμένου ή και το κάψιμο του πολυμερούς [32].



Εικόνα 3.2.5-1: Στίγμα καψίματος λόγω κακής εξαέρωσης.

Ενέργειες για την βελτίωση του σφάλματος:

- Δημιουργήσαμε εξαερώσεις, εφόσον δεν υπήρχαν. Το φαινόμενο έγινε αντιληπτό δια οφθαλμού και τοπικά έγινε στο μέγεθος και θέση του καψίματος αντίστοιχη διάτρηση και εφαρμογή πύρου εξαέρωσης. Σε περίπτωση που επαναληφθεί το φαινόμενο στην ίδια ή άλλη θέση τότε:
- Μειώνουμε την ταχύτητα έκχυσης ώστε να προλάβει να διαφύγει ο εγκλωβισμένος αέρας
- Μειώνουμε την θερμοκρασία του τήγματος
- Αλλάζουμε το προφίλ της ροής του υλικού, έτσι ώστε το τέλος διαδρομής του μετώπου ροής να ταυτιστεί με το σημείο που κάναμε την διάτρηση, δηλαδή στο σημείο που η εξαέρωση γίνεται ή το κάψιμο δεν είναι πια ορατό.

Η παρέμβαση που έγινε στο καλούπι με τον πείρο εξαέρωσης μπορεί εν μέρει να αφήνει εμφανή σημάδια στο τελικό αντικείμενο, όπως αναγιγνώσκεται από την εικόνα 3.2.5-2 αλλά δε αποτελεί κρυφό σημείο κατά την εφαρμογή του. Ο λόγος αυτών των σημαδιών είναι το προέκταμα που δημιουργείται από το διάκενο του πείρου εξαέρωσης και της κοιλότητας. Αιτίες που το προκαλούν είναι η μη σωστή εφαρμογή του πείρου στο τερματισμό του στην επιφάνεια της κοιλότητας κατά το κλείσιμο του καλουπιού. Είτε μηχανική βλάβη στο σύστημα κίνησης του είτε παραμόρφωση της επιφάνειάς του, προτείνουμε στο τεχνικό τμήμα κατασκευής καλουπιών αντικατάσταση του πείρου.



Εικόνα 3.2.5-2: Αποτύπωμα πύρου εξαέρωσης στο τεμάχιο.

3.3. Λογισμικό προσομοίωσης

3.3.1. Εισαγωγή

Η τεχνολογία προσομοίωσης του φαινομένου της έκχυσης γίνεται μέσω του υποπεριβάλλοντος του **Solidworks SW/PLASTICS**. Η επιτυχία της επιλογής του προγράμματος βασίζεται σε πλεονεκτήματα όπως μια σειρά έξυπνων εργαλείων και ρυθμίσεων πολύ κοντά στις πραγματικές συνθήκες χειρισμού της μηχανής και απαιτήσεις του φαινομένου της έκχυσης.

Οι μοναδικές λεπτομέρειες, animation, καθώς και φωτο-ρεαλιστικές αποδόσεις που παρουσιάζονται τα μοντέλα κατά την διάρκεια της έκχυσης υπερτερούν από άλλα προγράμματα ανάλυσης. Τέλος η αποτελεσματική αλληλεπίδραση των δύο ανωτέρω προγραμμάτων. Η δημιουργία του πρωτοτύπου στο λογισμικό CAD αποτελεί την κύρια κοιλότητα του καλουπιού (*cavity lay out*). Συνεπώς η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ CAD και FEM επικυρώνεται από τον αλληλοσχετισμό των κύριων παραμέτρων της τελικής γεωμετρίας και των διάφορων φάσεων ανάλυσης του προγράμματος *Plastics*. Ουσιαστικά δοκιμάζεται το ίδιο το σχέδιο σε πραγματικές συνθήκες. Καθώς οι αλλαγές στην πορεία που θα υπάρξουν σε προγενέστερα στάδια της διαδικασίας ελέγχονται απευθείας από το *Simulation* ως τελικές συνθήκες του φαινομένου.

Το *Plastics* είναι ένα απαραίτητο υποπεριβάλλον χρήσιμο για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του τεμαχίου και καλουπιού προς παραγωγή. Αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο ελέγχου για την κατασκευασιμότητα του προϊόντος μας. Ειδικότερα:

- Αναγνωρίζει και αποφεύγει χαρακτηριστικά σχεδιασμού τα οποία θα επιφέρουν μελλοντικά προβλήματα στην παραγωγή
- Ελέγχει την ευκολία της παραγωγής του εκάστοτε προϊόντος προς σχεδίαση
- Γρήγορα και αποτελεσματικά επικοινωνεί ανταλλάσσοντας άμεσα πληροφορίες με άλλα μέλη του σχεδιαστικού τμήματος.

Ο απαιτούμενος χρόνος που χρειάστηκε για την εκμάθηση του προγράμματος ήταν συνολικά 2 & ½ ημέρες. Οι προαπαιτούμενες για την εκμάθηση αυτού του προγράμματος ήταν καθοριστικά οι εξής:

- Εμπειρία μηχανολογικού σχεδιασμού
- Βασικές γνώσεις για τις πλαστικές ύλες, σχεδιασμό πλαστικών προϊόντων και καλουπιών για injection
- Ολοκληρωμένη γνώση χειρισμού του προγράμματος Solidworks Essentials
- Εμπειρία με το λειτουργικό σύστημα Windows TM.

Η προσομοίωση του Solidworks Plastics όπως και όλες οι περισσότερες προσομοιώσεις διαχωρίζονται σε παρόμοιες φάσεις:

- I. Πλεγματοποίησης του στερεού με πεπερασμένα στοιχεία 2D ή 3D (*preprocessing*)
- II. Ανάλυσης (*analysis*)
- III. παρουσίασης των αποτελεσμάτων σε διάφορες μορφές όπως διαγράμματα, γραφήματα, φωτορεαλιστικά, αναφορές (*post-processing*)

Το περιβάλλον του Plastics λαμβάνει πληροφορίες και αλληλεπιδρά με τέσσερις κύριες ομάδες εντολών

1. **MESH**
2. **INPUT**
3. **RUN**
4. **RESULTS**

Όλες οι μονάδες που εισάγονται ρυθμίζονται να είναι σε μετρητικό σύστημα **SI**.

3.3.2. Πλεγματοποίηση (MESH)

Τα πεπερασμένα στοιχεία που δημιουργούν το πλέγμα του στερεού αντικειμένου είναι είτε μορφής **Shell** είτε **Solid**. Ο τύπος στοιχείων *shell* καλύπτει τις επιφάνειες του στερεού ενώ τα στοιχεία τύπου *solid* γεμίζουν τον όγκο του στερεού. Αυτός είναι και ο πιο βασικός κανόνας για να αποφασίσουμε τι τύπο στοιχείο θα χρησιμοποιήσουμε.

Πιο αναλυτικά τα στοιχεία τύπου *shell* είναι χρήσιμα για τεμάχια μορφής κελύφους ή για τεμάχια πολύ λεπτού πάχους. Παρέχουν την καλύτερη ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και απαιτούμενου χρόνου επίλυσης. Αντιθέτως τα στοιχεία τύπου *solid* παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια για τεμάχια μεγάλου πάχους και συμπαγής μορφής χωρίς πολλές εγκοπές ή κοιλότητες. Ο απαιτούμενος χρόνος για την επίλυση αυτών των πεπερασμένων στοιχείων είναι ίσως μεγαλύτερος από ότι αυτός των στοιχείων *shell* και λόγος είναι ότι επιλύουν με την μέγιστη ακρίβεια και περιπλοκότητα την γεωμετρία του στερεού [34]. Στην περίπτωση μας έχουμε να κάνουμε με ένα αντικείμενο που έχει κοιλότητα είναι δηλαδή μορφής κελύφους και έχει χαρακτηριστικά λεπτού πάχους.

3.3.2.1. Shell Meshing

Στα στοιχεία τύπου *shell* προσδιορίζουμε το μέγεθος των τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων και μέσω του αριθμού στοιχείων και κόμβων αποφασίζουμε τον αριθμό των συνολικών

στοιχείων. Χρησιμοποιήσαμε για μήκος στοιχείου 1mm, με τελικό αποτέλεσμα να δημιουργηθούν 259.270 τριγωνικά στοιχεία συνολικά. Προφανώς ο αριθμός των στοιχείων συνδέεται άμεσα με την απόδοση καλύτερων αποτελεσμάτων για τις τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των στοιχείων. Επιδιώκουμε να καλύψουμε την επιφάνεια του στερεού με ισορροπία μεταξύ του μεγαλύτερου αριθμού στοιχείων και του απαιτούμενου αριθμού στοιχείων, όπως διακρίνεται στην εικόνα 3.3.2.1-1. Παρατηρούμε ότι οι χρόνοι αυξάνονται αρκετά με κάθε εκατοστή χιλιάδα στοιχεία. Δηλαδή αισθητή διαφορά χρόνου παρατηρείται κυρίως από 100.000 με σημαντικές διαφορές χρόνου.



Εικόνα 3.3.2.1-1: Πλεγματοποίηση της μιας κοιλότητας.

Στο τέλος το *Plastics* μας δίνεται μια αναφορά ποιότητας στοιχείων. Η αναφορά μας δείχνει περιεκτικότητα σε 0.13% κακά στοιχεία και πολύ κακά 0%. Το αποτέλεσμα κρίνεται από το **Aspect Ratio** σε κάθε στοιχείο. Το *aspect ratio* ενός στοιχείου περιγράφεται ως λόγος της μεγαλύτερης πλευράς σε σχέση με το ύψος κάθετο σε αυτή την πλευρά, όπως φαίνεται στην *σχήμα 3.3.2.1-1*. Για τα τριγωνικά το μέγιστο AP που κρίνεται αποτελεσματικό από το πρόγραμμα είναι για κάτω από 20:1 ενώ για τα τετραεδρικά 50:1 είναι αρκετά ικανοποιητικό για την αποτελεσματικότητα της πλεγματοποίησης. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιούμε *Max AP* γύρω στο 14.



Σχήμα 3.3.2.1-1: Aspect ratio τριγωνικού στοιχείου.

Τα στοιχεία *Waterproof* (στοιχεία που μπορεί να «διαφύγει νερό») ελέγχουν εάν υπάρχουν επιφάνειες που δεν έχουν καλυφθεί. Η πυκνότητα του πλέγματος στα κρίσιμα σημεία παίζει σημαντικό ρόλο. Προσπαθούμε να έχουμε μια ανάλογη διαβάθμιση (*gradation*) πλέγματος σε

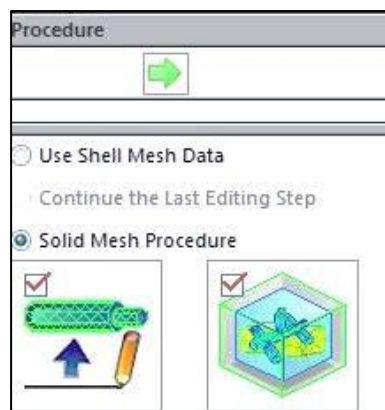
όλες τις επιφάνειες της κοιλότητας. Στο τέλος της πλεγματοποίησης το πρόγραμμα μας ενημερώνει για το αποτέλεσμα της με περιεχόμενο της εικόνας 3.3.2.1-2

Summary
✓
Waterproof
Yes
Number of Mesh Group
2
Element Intersections
72
Non-manifold
0
Bad Elements
0.13%
Very Bad Elements
0.00%
Max Aspect Ratio
14.88
Unmatched Elements
0

Εικόνα 3.3.2.1-2: Περίληψη ποιότητας πεπερασμένων στοιχείων.

3.3.2.2. Solid Meshing

Τα στοιχεία *solid* απευθύνεται για πολλούς τύπους αντικειμένων των οποίων το σχήματος του ενδείκνυται για την πλήρωση στερεού-συμπαγούς όγκου και όχι κελύφους σε μια κοιλότητα. Αυτός ο τύπος πεπερασμένων στοιχείων παράγει πλέγμα για στοιχεία υψηλού πάχους, θεωρητικά πάνω από 4mm μπορεί και έχει νόημα να εφαρμοστεί. Το στοιχεία *solid* λειτουργούν όπως και τα *shell* μόνο που εκμεταλλεύονται όγκο και όχι επιφάνειες. Αυτό το πετυχαίνουν με τετραεδρικά στοιχεία, πρίσματα, ή σχήματος πυραμίδας με τα οποία γεμίζουν έναν όγκο. Χρησιμοποιούμε για το εικονικό καλούπι στο πρόγραμμα (*virtual mold*) *solid mesh* καθώς και όπως είναι επιλεγμένα στην εικόνα 3.3.2.2-1 για τα κανάλια ψύξης πλεγματοποίηση τετραεδρική (*tetrahedral mesh*) και έπειτα υβριδική.



Εικόνα 3.3.2.2-1: Επιλογή *solid mesh* καλούπι και κανάλια ψύξης.

Με την εντολή *Hybrid* όπως αναφέρθηκε προηγουμένως λαμβάνονται τα δεδομένα του *shell mesh* και τα μεταμορφώνονται από 2D σε 3D μέχρι να γεμίσει τους υπολειπόμενους όγκους. Ο

λόγος που χρησιμοποιούμε υβριδική πλεγματοποίηση είναι ότι παραμετρικά με το τεμάχιο γίνεται και η πλεγματοποίηση των υπολοίπων στοιχείων του καλουπιού, με σκοπό την καλύτερη ανάλυση.

3.3.3. Εισαγωγή δεδομένων (INPUT)

Με την εντολή αυτή μπορούμε να έχουμε πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων που περιέχει χιλιάδες τύπους πλαστικών υλικών, υλικών καλουπιού, τύπων ψυκτικού, μηχανών *injection* αλλά και τις απαραίτητες παραμέτρους για την διαδικασία της έγχυσης.

3.3.3.1. Επιλογή τύπου πολυμερούς-ψυκτικού μέσου-καλουπιού-μηχανής

Με την βάση δεδομένων που μας προσφέρει η εντολή *Polymer* επιλέγουμε το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυση μας. Η ταξινόμηση των υλικών γίνεται κατά οίκο προέλευσης, οικογένειας υλικών ή παρόμοιων απαιτούμενων χαρακτηριστικών. Επιλέγουμε PP πολυμερές, εταιρείας *BASF* τύπος *PP/NOVOLEN 1000 L*.

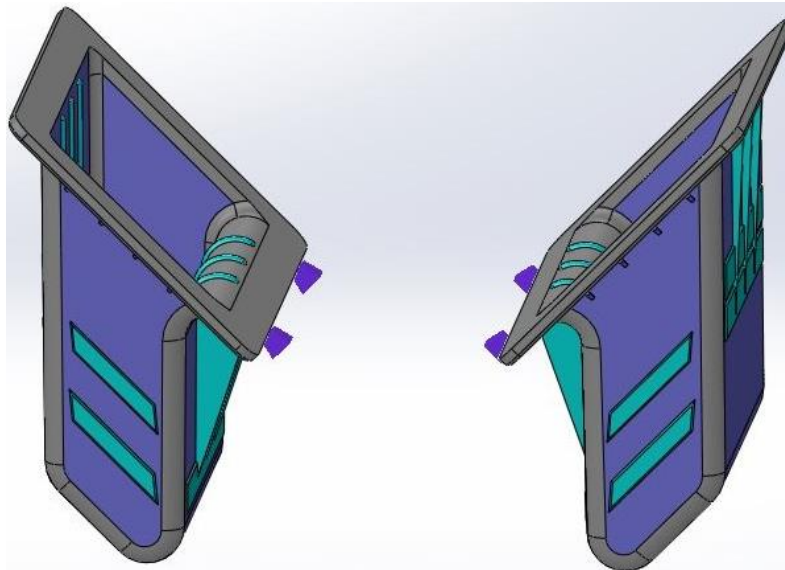
Ως τύπο μηχανής έχουμε την δυνατότητα από τη βάση δεδομένων *Machine database* στην εντολή *Advanced filling settings* να επιλέξουμε τον τύπο της μηχανής που θέλουμε να ελέγξουμε για την ανάλυση ροής. Αυτή η λίστα περιλαμβάνει όλους τους τύπους μηχανών *injection* και με αναφορά στα χαρακτηριστικά από το εγχειρίδιο χρήσης μηχανής του κατασκευαστή, λαμβάνει πληροφορίες σημαντικές για όλη την διαδικασία της έγχυσης και ελέγχει εάν συμβαδίζουμε με τις μέγιστες κρίσιμες τιμές λειτουργίας της μηχανής.

Τα χαρακτηριστικά που λαμβάνει υπόψη του το πρόγραμμα από την μηχανή είναι η διάμετρος του κοχλία, λειτουργικό εύρος ρυθμού ροής, μέγιστη πίεση ταχύτητας και μεταγενεστέρας, μέγιστος δυνατός όγκος που μπορεί να γεμίσει σε ένα κύκλο, ρυθμός πλαστικοποίησης, μέγιστο βάρος τεμαχίου που μπορεί να παράξει, μέγιστη ταχύτητα κοχλία. Επιλέγουμε τέλος τον τύπο της υπάρχουσας μηχανής *Battefeld* με τον σειριακό της αριθμό και για όλες τις παραπάνω τιμές μας ενημερώνει στα *results*, εάν έχουμε πλησιάσει επικίνδυνα κάποια όρια.

Για υλικό καλουπιού διαλέγουμε *Steel 402 SS* από την εντολή *Mold*. Τέλος για την απαραίτητη ψύξη προσδιορίζεται τύπος ψυκτικού που θα χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχη βάση δεδομένων με τις προηγούμενες από την επιλογή *Coolant*. Το ψυκτικό μας μέσο είναι νερό, όπως χρησιμοποιείται και στην πραγματική ψύξη του καλουπιού.

3.3.3.2. Είσοδος τροφοδοσίας (Injection location)

Τοποθετούμε την είσοδο του υλικού εκεί που ακριβώς βρίσκεται η είσοδος ροής του υλικού στην κοιλότητα από το σύστημα διακλαδωτή. Σχεδιάζουμε και τις δύο εισόδους ροής επιλέγουμε το ακριβές σημείο εισόδου μόνο που στο πρόγραμμα μας εμφανίζεται ως κωνικός δείκτης και τοποθετείται όχι πάνω σε κάποιο στοιχείο ή κόμβο γιατί αυτό θα επηρέαζε την επιτυχία της έγχυσης, αλλά θα λέγαμε ότι το υπολογίζει με βάση έναν κρυφό κόμβο στο κέντρο συνήθως του τριγωνικού στοιχείου. Τοποθετούμε την επιθυμητή διάμετρο της εισόδους ροής που είναι 2mm και για τις τέσσερις εισόδους, όπως φαίνονται στην *εικόνα 3.3.3.2-1*.



Εικόνα 3.3.3.2-1: Προσδιορισμός εισόδων ροής στο λογισμικό.

3.3.3.3. Ρυθμίσεις φάσης πλήρωσης (Filling settings)

Έχουμε την δυνατότητα να επιλέξουμε με ποιο παράγοντα το πρόγραμμα θα κάνει την ανάλυση μεταξύ χρόνου πλήρωσης και ταχύτητα ροής. Και οι δυο παράγοντες σχετίζονται με βάση τις εξισώσεις παροχής και με εμπειρικούς τύπους το πρόγραμμα αυτόματα δηλώνει δίνοντας τη μια μεταβλητή την άλλη. Έπειτα ζητείται να δοθούν τιμές για τη θερμοκρασία τήξης, θερμοκρασία καλουπιού, το ύψος της πίεσης έκχυσης, ταχύτητα έκχυσης, το σημείο αλλαγής φάσης από πίεση ταχύτητας σε πίεση συγκράτησης, το προφίλ της ροής, διάμετρο του κοιλία και αυτομάτως καθορίζεται από το πρόγραμμα πάλι εμπειρικά ο ρυθμός ροής. Το ρυθμό ροής και τον χρόνο έκχυσης του δίνουμε σαν αποτέλεσμα στον χειριστή για κάθε δοκιμή που τον απαιτεί να ελέγξει άμεσα από το πρόγραμμα χωρίς να τον αναγκάζουμε να ασχολείται με τύπους δοσομετρίας του κοιλία και παροχών του υλικού στην κοιλότητα.

3.3.3.4. Ρυθμίσεις φάσης ψύξης (Cooling settings)

Αφού έχουμε σχεδιάσει τα κανάλια ψύξης μέσω του προγράμματος CAD Solidworks, τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε το πλέγμα τους μέσω του *Virtual Mold* και να ρυθμίσουμε τι τύπο καναλιού έχουμε. Επιλέγουμε το γενικό τύπο καναλιού, οι άλλοι τύποι είναι οι *baffle* και *bubbler*. Η διαφοροποίηση τους βρίσκεται στα σημεία εισόδου και εξόδου και ο αριθμός διαμέτρων που έχουν. Το *bubbler* καθορίζεται από εξωτερική αλλά και από εσωτερική διάμετρο. Το *baffle* έχει μόνο μια διπλή είσοδο-έξοδο. Τα στοιχεία που ζητάει το πρόγραμμα είναι η θερμοκρασία εισόδου του τηγμένου υλικού, η ελάχιστη θερμοκρασία που λειτουργεί το ψυκτικό μέσο και ο ρυθμός ροής του στα κανάλια ψύξης. Τέλος λαμβάνει υπόψη, καθώς η ψύξη γίνεται διμερώς τόσο από το καλούπι, προς το υλικό, όσο και από το ψυκτικό μέσο προς το καλούπι τον χρόνο που παραμένει το καλούπι ανοικτό μέχρι να εξωλκεύσει το τεμάχιο αλλά και την θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος. Η προσομοίωση της ψύξης ολοκληρώνεται με την επιλογή ποιάς παραμέτρου θα τη λάβει το πρόγραμμα ανάλυσης υπόψη ως σταθερή. Αυτή μπορεί να είναι είτε η θερμοκρασία εξόδου του αντικειμένου ή ο χρόνος ψύξης. Τέλος ορίζονται οι οριακές συνθήκες με την οποία θα λειτουργούν τα κανάλια ψύξης. Σε αυτές εισάγονται τα σημεία εισόδου και εξόδου του ψυκτικού μέσου, η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου με την οποία εισέρχεται από αυτά το ρευστό απόψυξης και ο ρυθμός ροής του υγρού καθώς που κυκλοφορεί στο καλούπι. Αυτές οι ρυθμίσεις είναι ξεχωριστές από το πάνελ ρυθμίσεων της *injection* και ρυθμίζονται απευθείας στον ψύκτη.

3.3.3.5. Ρυθμίσεις φάσης συγκράτησης (Packing settings)

Έχουμε την δυνατότητα να επιλέξουμε τις βασικές ρυθμίσεις της φάσης συγκράτησης. Τέτοιες είναι οι κύριες παράμετροι του φαινομένου όπως είναι ο χρόνος συγκράτησης (*Pressure Holding Time*) και η μεταγενέστερα (*Holding Pressure*). Και οι δυο παράγοντες σχετίζονται με βάση τις εξισώσεις παροχής συμπλήρωσης υλικού και με εμπειρικούς τύπους. Η συγκεκριμένη φάση χρειάζεται να προσδιοριστεί μόνο από αυτές τις δυο παραμέτρους καθώς είναι στην ουσία συνέχεια του φαινομένου της πλήρωσης, δηλαδή διατηρεί τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές και καλείται να συμπληρώσει υλικό ή να διατηρήσει κατάσταση συγκράτησης του υλικού στην κοιλότητα με εφαρμογή υποπίεσης.

3.3.4. Εκτέλεση ανάλυσης (RUN)

Η διαφορετικά φάση ανάλυσης, που στην πραγματικότητα προσομοιάζει σε πραγματικές συνθήκες έγχυσης του τεμάχιο μας, διαλέγοντας κάθε φορά ξεχωριστά την κάθε φάση ανάλυσης για να λαμβάνουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς κάθε ανάλυση προσδιορίζεται με τις αντίστοιχες και απαραίτητες ρυθμίσεις που χρειάζονται για την εκτέλεση της κάθε φάσης. Διαφορετικά μας προειδοποιεί για ελλιπή στοιχεία και ανικανότητα εκτέλεσης της προσομοίωσης.

Έτσι ξεχωρίζουμε τις φάσεις ανάλυσης με την σειρά *FLOW, COOL, FLOW+PACK*. Η σειρά είναι καθορισμένη και βασισμένη όχι μόνο με την σειρά που γίνεται το θερμοδυναμικό φαινόμενο αλλά και το τι χρειάζεται η κάθε φάση να προϋπάρχει στην λίστα αποτελεσμάτων από την οποία παίρνει τιμές που θα χρησιμοποιηθούν στην τρέχουσα εκτέλεση.

3.3.4.1. Πλήρωση (FLOW)

Προσομοιάζει την φάση πλήρωσης και τον κύριο κύκλο που χρειάζεται να γεμίσει την κοιλότητα η μηχανή. Η ανάλυση ολοκληρώνεται σε 24 λεπτά σε ένα υπολογιστή 64bit με 8GB RAM. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται τμηματικά ανά 10% μέχρι το 100% της ανάλυσης του μοντέλου. Τα *Flow Results*, που λαμβάνουμε σημαντικές πληροφορίες κατά την διάρκεια του *filling* είναι:

- **Fill Time:** απεικονίζεται με ένα φωτορεαλιστικό διάγραμμα που κάνει ορατό πως διαχέεται το τηγμένο υλικό μέσα στην κοιλότητα στο συγκεκριμένο χρόνο που ορίσαμε στις ρυθμίσεις του *filling*.
- **Welding Lines:** γραμμές ασυνέχειας σχηματίζονται όταν δύο μέτωπα ροής έρχονται ταυτόχρονα συνήθως προκαλούνται όταν χρησιμοποιούμε δυο ή περισσότερες εισόδους ροής. Οι γραμμές ασυνέχειας εντοπίζονται ορατά από το διάγραμμα *Fill Time* και αποτελούν τόσο αισθητικό πρόβλημα όσο και αντοχής.
- **Pressure at the end of fill:** Παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πίεσης που απαιτούνται για να πληρώσουν ολόκληρο το καλούπι περιλαμβάνοντας και την μπουκαδούρα, το διακλαδωτή και την είσοδο. Το διάγραμμα της πίεσης στο τέλος του γεμίσματος σχετίζει την τελική πίεση με την παράμετρο της μέγιστης πίεσης που ρυθμίζουμε την μηχανή (*Filling Settings*). Συνιστάται από την βιβλιογραφία [45] οι πιέσεις που δουλεύουμε να είναι κάτω από το 70% του μεγίστου που δουλεύει η μηχανή. Η απώλειες τριβών στον κοχλία αποτελούν το 10% της συνολικής πίεσης που θα ρυθμίζεται το όριο της μηχανής
- **Central Temperature at the end of fill:** Απεικονίζει την κατανομή της θερμοκρασίας σε όλα τα σημεία του αντικειμένου στο τέλος της έκχυσης
- **Flow Front Central Temperature:** Μετράει την θερμοκρασία του μετώπου ροής καθώς αυτό διαχέεται στην κοιλότητα. Σημαντικές πληροφορίες που λαμβάνουμε είναι εάν το λιωμένο πλαστικό ψύχεται πριν γεμίσει το καλούπι.
- **Sink Marks:** παριστάνονται χρωματικά οι περιοχές που εμφανίζονται λόγω εσωτερικών συρρικνώσεων, βαθουλώματα, ρουφήγματα.
- **Gate Filling Contribution:** μας πληροφορεί για τον τρόπο ροής του υλικού μέσω των πυλών στην κοιλότητα και την επιτυχία της ισορροπημένης τροφοδοσίας σε περίπτωση που έχουμε καλούπι δυο κοιλοτήτων
- **Ease of Fill:** πληροφορούμαστε για την ευκολία του γεμίσματος της κοιλότητας. Εάν είναι πράσινη ένδειξη γνωρίζουμε ότι το κομμάτι αυτής της γεωμετρίας, υλικού, θέσης μπουκαδούρας και σε αυτούς του χρόνους πληρώνεται σε όλες τις διαστάσεις του. Δηλαδή δεν έχουμε λειψό αντικείμενο και βρισκόμαστε κάτω από το προσδιοριζόμενο όριο πίεσης. Αντίστοιχα η κίτρινη ότι είμαστε στην επικίνδυνη ζώνη των πιέσεων αλλά η πλήρωση επιτυγχάνεται ενώ η κόκκινη ότι έχουμε λειψό αντικείμενο, δηλαδή δεν επαρκεί η ταχύτητα, ο χρόνος ή η πίεση για να το πληρώσει επιτυχώς.

- ❖ **Results Adviser:** παρέχει μια ένδειξη της κατασκευασιμότητας και παραξιμότητας του τεμαχίου, βάση της γεωμετρίας, επιλογής υλικού, συστήματος διοχέτευσης υλικού, παραγόντων έγχυσης και γενικότερα ευκολία ή δυσκολία γεμίσματος της κοιλότητας. Χρησιμοποιεί ένα σύμβολο που δηλώνει κατά πόσο η διαδικασία έγινε με επιτυχία, πράσινο για αποδεκτό, κόκκινο για αδυναμία παραγωγής του προϊόντος και κίτρινο ως ένδειξη ανάγκης ορισμένων μετατροπών για να βγαίνει το τεμάχιο με επιτυχία. Στην ουσία βασιζόμενοι σε αυτόν τον διάλογο με το πρόγραμμα προσανατολιζόμαστε ήδη σε εύρος τιμών που το τεμάχιο μας βγαίνει με επιτυχία τόσο σε χρόνους γεμίσματος και ψύξης όσο και στις πιέσεις που λειτουργούμε την μηχανή.

Δεδομένα σημαντικά που λαμβάνουμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι χρήσιμα για να υπολογιστεί η πίεση που εφαρμόζεται στο τέλος της έγχυσης-πλήρωσης αλλά και ο βαθμός συρρίκνωσης των τραβηγμάτων που είναι αποτέλεσμα των δυναμικών τάσεων που ασκούνται στα εσωτερικά στρώματα του πολυμερούς. Παρουσιάζονται με υψηλή φωτορεαλιστική ανάλυση τα μέτωπα ροή καθώς διασχίζουν την κοιλότητα στους δεδομένους χρόνους της κάθε δοκιμής

3.3.4.2. Ψύξη (COOL)

Πρόκειται για την προσομοίωση της φάσης απόψυξης του καλουπιού μέσω των σχεδιασμένων καναλιών. Η ανάλυση ολοκληρώνεται σε 40 λεπτά σε ένα υπολογιστή 64bit με 8GB RAM. Με τις απαιτούμενες ρυθμίσεις το πρόγραμμα υπολογίζει τον απαιτούμενο χρόνο ψύξης του πλαστικού καθώς και το ενεργειακό ισοζύγιο με τα τοιχώματα του καλουπιού. Αποτελέσματα, στα *Cool Results* που λαμβάνουμε είναι:

- **Part Cooling Time:** παρουσιάζεται σε διάρκεια χρόνου πώς ψύχεται το τεμάχιο, εμφανίζονται με χρωματική διαφοροποίηση τα σημεία που ψύχονται πρώτα και αυτά που καταφέρνουν να ψυχθούν τελευταία. Ως τελικό χρόνος ψύξης λαμβάνεται το χρονικό σημείο που και το τελευταίο σημείο πάνω στο τεμάχιο θα έχει αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου.
- **Temperature at End of Cooling:** παριστάνεται φωτορεαλιστικά ποια θα είναι η θερμοκρασία του κάθε σημείου στο τέλος της ψύξης. Το πρόγραμμα θέτει ως όριο την θερμοκρασία που έχει οριστεί από τον τύπο ελέγχου
- **Mold Heat Flux:** αφορά το ενεργειακό ισοζύγιο εναλλαγής θερμοκρασίας μεταξύ καλουπιού και καναλιών ($J/s.cm^2$). Στην πραγματικότητα βλέπουμε τις θερμοκρασιακές απώλειες των κανάλια ψύξης που διαφεύγουν και εκλύονται στο καλούπι.
- **Mold Temperature:** αφορά την θερμοκρασία που έχει το καλούπι μετά το τέλος της ψύξης. Η αρχική του θερμοκρασία ενημερώνεται από τον φάκελο ανάλυσης του *FLOW* και προβλέπει την τελική του θερμοκρασία με το πέρας της ψύξης του, συμπεριλαμβανομένου και το χρόνου εξώλκευσης.

3.3.4.3. Συγκράτηση (PACK)

Πρόκειται για την φάση του σταδίου που εφαρμόζεται η πίεση συγκράτησης. Η χρήση της εντολή *FLOW+PACK* είναι μοναδική καθώς δεν μπορεί να υπάρξει racking χωρίς *filling*. Το *Pack Settings* επιτρέπει την προσομοίωση του φαινομένου που συμβαίνει μετά το *filling* και πριν την εξώλκευση και κατά ένα μεγάλο κομμάτι της ψύξης. Η ανάλυση ολοκληρώνεται σε 35 λεπτά σε ένα υπολογιστή 64bit με 8GB RAM. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται τμηματικά ανά 10% μέχρι το 100% της ανάλυσης του μοντέλου

Σημαντικά αποτελέσματα *Pack Results* που θα μας απασχολήσουν στην μελέτη μας είναι:

- ***Pressure at End of Packing***: παρουσιάζει την πίεση της μεταγενεστέρας και η μέτρηση της γίνεται στο τέλος του *racking*.
- ***Temperature at End of Packing***: εμφανίζονται ποιές περιοχές του μοντέλου δεν είναι στερεοποιημένες μετά το τέλος του *racking*. Εάν παρατηρείται κενό μεταξύ gate και μοντέλου τότε έχουμε παγωμένο υλικό στην είσοδο.
- ***Shear Stress at End of Packing***: εμφανίζονται γραφικά οι διατμητικές τάσεις που επέρχονται στο τέλος της πίεσης συγκράτησης στα εσωτερικά στρώματα του υλικού.
- ***Volumetric Shrinkage at End of Packing***: εκθέτει ποσοστιαία τα αποτελέσματα της συρρίκνωσης-απώλειας του όγκου του μοντέλου. Μας βοηθάει να δούμε και που θα sink marks θα υπάρξουν. Υψηλά ποσοστά συρρίκνωσης σημαίνει αυξάνουμε τους χρόνους *racking*. Μεγαλύτεροι χρόνοι *racking* επιτρέπουν την είσοδο περισσότερου υλικού και ελαχιστοποίηση της συρρίκνωσης αλλά θα προκαλούσε μεγαλύτερα προβλήματα στην εξώλκευση πράγμα, που συνάδει με μεγαλύτερη δύναμη εξώλκευσης.

4.1. Αρχικές ενέργειες πειράματος πλήρωσης

Πριν το σχεδιασμό και τον προγραμματισμό των πειραμάτων, ήταν αναγκαία η πρακτική εξοικείωση με το λογισμικό σχεδιασμού, καθώς και η εξοικείωση με τη διαδικασία προσομοίωσης ροής. Αφού το τεμάχιο εισήχθη στο *Solidworks Plastics* και καθορίστηκαν οι βασικές παράμετροι ανάλυσης (πεπερασμένων στοιχείων, μηχανής, ορίων μηχανής, υλικού, καλουπιού, ψυκτικών μέσων, καναλιών και σύστημα διανομής) ξεκίνησαν οι προκαταρκτικές δοκιμές. Έγιναν πολυάριθμες δοκιμές, ενώ εισήχθησαν σχεδόν όλες οι μεταβλητές που ήταν λειτουργικές στη συγκεκριμένη διαδικασία. Στα αποτελέσματα της κάθε φάσης παίρνουμε μια μεταβλητή που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για την πειραματική διαδικασία της επόμενης φάσης. Βασικοί στόχοι ήταν ο καθορισμός των μεταβαλλόμενων παραγόντων κατά τη διάρκεια του φαινομένου, με βάση τις παρατηρήσεις των κινήσεων του χειριστή μηχανής. Επίσης, απαραίτητος ήταν ο καθορισμός και των μη μεταβαλλόμενων παραγόντων.

Αρκετοί από αυτούς ήταν απαραίτητο να καθοριστούν διαφορετικά από τη default τιμή τους, καθώς αυτή οδηγούσε σε σφάλμα το πείραμα. Ακόμα, όταν αποφασίστηκε ποιοι θα ήταν αυτοί, δοκιμάστηκαν οι παράγοντες που θα μεταβάλλονταν κατά το πείραμα, ώστε να εξεταστεί η δυνατότητα εκτέλεσης του πειράματος στο εύρος τιμών που θα έπαιρναν. Για παράδειγμα, εξετάστηκε/επαληθεύτηκε η ορθότητα της επιλογής των μέγιστων θερμοκρασιών κάθε φάσης, όπως αυτές προσδιορίζονται από τα χαρακτηριστικά των υλικών.

Τέλος αποφασίστηκε ο συσχετισμός μιας κύριας μεταβλητής που θα αλληλοσυνδέει όλες τις πειραματικές διαδικασίες και θα έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά στο αποτέλεσμα. Έτσι λάβαμε υπόψη την αστάθεια της για ρύθμιση σε πραγματικές συνθήκες του φαινομένου.

Αξιοσημείωτο είναι ότι, λόγω του έντονου θερμοδυναμικού φαινομένου στην περιοχή του κοχλία, οι ρυθμιζόμενες τιμές θερμοκρασίας των ζωνών αντιστάσεων διαφέρουν με απόκλιση κατά 5 βαθμούς από τις πραγματικές στις οποίες λειτουργεί η μηχανή. Δυστυχώς στην περιοχή του κοχλία, λόγω των τριβών του υλικού στο εσωτερικό του, η θερμοκρασία δεν μπορεί να παραμείνει σταθερή κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Αναγκάζεται δηλαδή ο χειριστής συνεχώς να επιστρέφει τις τιμές λειτουργίας στις επιθυμητές.

Η λογική να απομονώσουμε το φαινόμενο στις ζώνες αντιστάσεων του κοχλία και να θέσουμε σε κάθε πειραματική διαδικασία ως βασική παράμετρο την θερμοκρασία μας, στηρίζεται στο να αποδεσμεύσουμε τον χειριστή από την ανάγκη συνεχούς ρύθμισης και να αφήσουμε ελεύθερη την θερμοκρασία να αποκλίνει στο εύρος του επιθυμητού αποτελέσματος χωρίς να επεμβαίνουμε τακτικά τόσο στην ρύθμιση της όσο και των άλλων συσχετιζόμενων παραγόντων της κάθε φάσης.

Η πρώτη ενέργεια που κάνει ο χειριστής κατά την ρύθμιση της μηχανής είναι η εύρεση του χρόνου πλήρωσης. Η μικρή σημασία, παραδοχή που γίνεται αφορά την ταύτιση των δυο ταχυτήτων στο ακροφύσιο, τελικό σημείο-στομίου του μπεκ (*nozzle*) και στην ένωση με το σύστημα διανομής, αρχή της μπουκαδούρας. Η διαφορά των διαμέτρων είναι ελάχιστη, καθόσον το μπεκ εφαρμόζεται με απόλυτη ομοκεντρικότητα και κυλινδρικήτητα στην μπουκαδούρα έτσι ώστε να μην δημιουργείται φαινόμενο ακροφυσίου. Συνεπώς εξαλείφεται ο λόγος διατομών καθόσον έχουμε επαπτόμενες και ομοκεντρικές σήραγγες προκειμένου να μην δημιουργηθεί φραγμός στην ροή το τήγματος. Η ταχύτητα έκχυσης λοιπόν ταυτίζεται με την ταχύτητα του κοχλίου που ωθεί το υλικό στην μπουκαδούρα. Συνεπώς ο χρόνος πλήρωσης $T(s)$ της κοιλότητας προκύπτει γρήγορα από τις εξισώσεις:

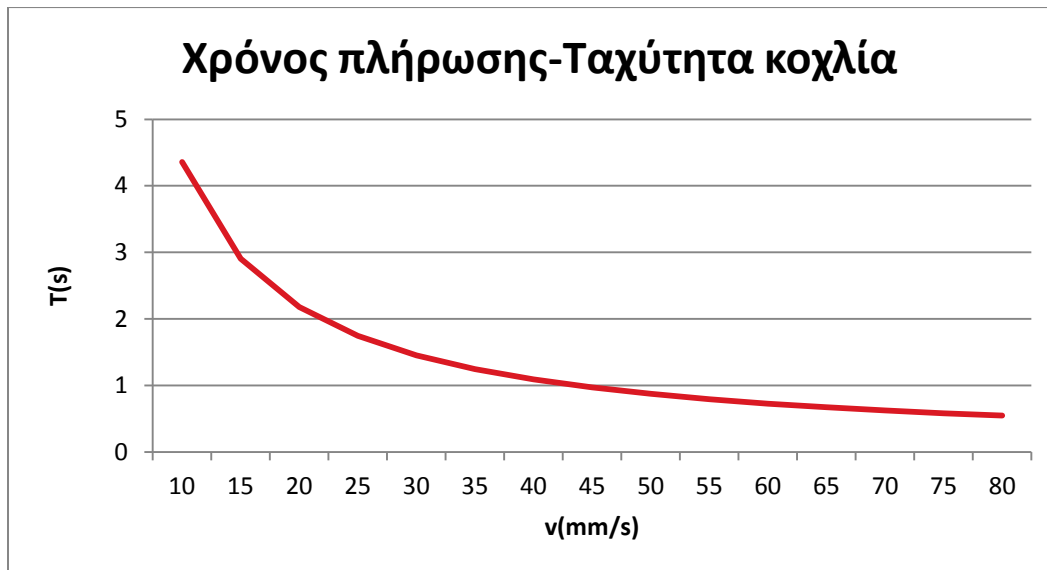
$$Q = \frac{\text{Screw Surface Speed}}{10} \times A, \quad (5\alpha)$$

$$Q = \frac{C}{T}, \quad (5\beta)$$

Όπου *screw surface speed* ή V (mm/s) η ταχύτητα του κοχλίου ή ώθησης του υλικού στην κοιλότητα προς πλήρωση C (cm³), η κοιλότητα είναι 118 cm³ και τα *runner* 5 cm³ συνολικά γεμίζουμε 123 cm³, A (cm²) η διατομή του κοχλίου, για διάμετρο κοχλίου $\delta = 60$ mm και Q (cm³/s) ο ρυθμός ροής. Υπολογίζουμε το *screw rotation* σε *rpm* και την αρχική θέση εκκίνησης του κοχλίου συναρτήσει V (mm/s), T (s)

$$\text{Screw Rotation} = \frac{\text{Screw Surface Speed}}{\pi \times \delta} \times 60, \quad (5\gamma)$$

Το πρόγραμμα διαθέτει την δυνατότητα να επαληθεύει με ενσωματωμένες τις παραπάνω εξισώσεις για την δεδομένη τιμή ταχύτητας του κοχλίου, τον αναμενόμενο χρόνο πλήρωσης, καθώς τον παρουσιάζει με default τιμή. Καταλήγουμε έτσι στο διάγραμμα του *γραφήματος 4.1-1* για την ταχύτητα και τον χρόνο γεμίσματος από το οποίο ο χειριστής μπορεί κατευθείαν να επιλέγει το εύρος του χρόνου που εξυπηρετεί ένα βελτιωμένο κύκλο και έτσι θα λαμβάνει τις αντίστοιχες τιμές για την ταχύτητα.



Σχήμα 4.1-1: Διάγραμμα συνάρτησης ταχύτητας χρόνου γεμίματος.

4.2. Μεταβλητές, σταθεροί παράγοντες και αποτελέσματα πειράματος πλήρωσης

Από την προκαταρκτική παρατήρηση των κινήσεων του χειριστή καταγράφηκαν ποιες παράμετροι τον απασχολούν και φαίνονται να επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα της πλήρωσης. Βεβαίως, δεν μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι με την επιλογή των μεταβλητών εξαντλούνται όλοι οι παράγοντες που επιδρούν στο αποτέλεσμα, αλλά η ορθή επιλογή των μεταβλητών μπορεί να επιβεβαιωθεί μετά τη διεξαγωγή από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης. Οι υπόλοιποι παράγοντες τέθηκαν σε σταθερές-αποδεκτές τιμές.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν και το εύρος τιμών τους, καθώς και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Ειδικά για τη φάση της πλήρωσης, καθώς είναι η πρώτη φάση του φαινομένου, παρουσιάζονται και οι τιμές (ή τα εύρη τιμών) των βασικών μεταβλητών και σταθερών παραγόντων, ως προς τον τρόπο «ρύθμισής» τους. Κάποιες από αυτές τις σταθερές παραμέτρους παραμένουν και στις επόμενες φάσεις σταθερές και δεν πρόκειται να αποτελέσουν μεταβλητές των πειραμάτων. Εφόσον σκοπός της εργασίας είναι η εξέταση των μεταβλητών παραγόντων δεν κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιάζονται οι τιμές των σταθερών παραγόντων σε κάθε φάση της διαδικασίας.

4.2.1. Μεταβλητές πειράματος πλήρωσης

Οι παράμετροι που θα εισαχθούν ως μεταβλητές υπό έλεγχο είναι οι επόμενοι:

❖ **Θερμοκρασία τήξης υλικού**

Η θερμοκρασία τήγματος (*Melt Temperature*) βρέθηκε να επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα στην φάση του γεμίματος και αποτελεί τον κύριο παράγοντα «πιλότο» πάνω στον οποίο βασιζόμαστε για τα επόμενα αποτελέσματα, επομένως η θερμοκρασία αυτή κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί συστηματικά. Το εύρος θερμοκρασιών τήξης για το υλικό του πολυπροπυλενίου είναι 180-300°C. Το χρησιμοποιούμενο εύρος τιμών είναι από 200-240°C ενώ σύμφωνα με την εμπειρία του χειριστή, η προβλεπόμενη βέλτιστη τιμή τήξης είναι οι 240°C (*reference value*). Οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι: 200, 220 και 240, έτσι ώστε να αυξάνονται αναλογικά. Στο εύρος επιλεγμένων τιμών περιλαμβάνεται ταυτόχρονα η βέλτιστη προβλεπόμενη τιμή τήξης του υλικού. Στις αρχικές οριακές σειρές βρίσκονται οι *minimum melt temperature*, οι οποίες κατεβαίνουν μέχρι και τους 200°C. Θεωρείται ορθότερο να γίνει ο έλεγχος στην περιοχή αυτή, καθόσον φαινόμενα όπως κηλίδες μαύρα στίγματα ή φαινόμενο diesel και προέκταμα οφείλονται στα υψηλό θερμοκρασιακά επίπεδα του ρευστού πολυμερούς, που χαρακτηρίζεται ευπαθές όταν είναι υπερθερμαινόμενο [35]. Η υπερθέρμανση συνεπεί στην καταστροφή των μοριακών αλυσίδων στη μάζα του υλικού.

❖ **Θερμοκρασία καλουπιού**

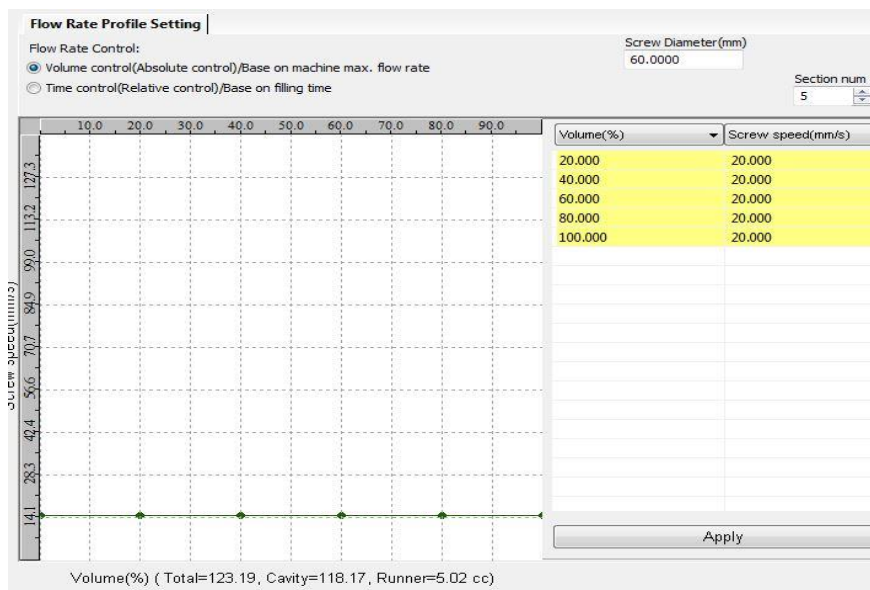
Η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του καλουπιού (*mold temperature*) αποτελεί οριακή συνθήκη για την πίεση έγχυσης. Οι επιλεγόμενες τιμές είναι 40-50-60°C. Από τον πίνακα των υλικών έχουμε ως δεδομένη τιμή λειτουργίας 50°C (*reference value*). Προτείνεται να ερευνησουμε την παράμετρο θερμοκρασίας σε μια κλίμακα των 10°C και προς τις δύο κατευθύνσεις. Επιθυμητή είναι και μια ανώτερη θερμοκρασία καλουπιού (όπως οι 60°). Υψηλότερο θερμοκρασιακό περιβάλλον μειώνει το ιξώδες, βελτιώνοντας την ρευστότητα του πολυμερούς και ελαττώνοντας τις απαιτήσεις υψηλών πιέσεων, τις οποίες θέλουμε να αποφύγουμε. Η λογική της επιλογής της θερμοκρασίας από 40-60°C αποσαφηνίζεται καλύτερα στην φάση της ψύξης, καθώς υπάρχει συσχέτιση με την θερμοκρασία εξόδου του υλικού που κρίνεται επιθυμητή στο ίδιο εύρος τιμών θερμοκρασιών. Συνεπώς θερμοκρασία καλουπιού και εξόδου τεμαχίου πρέπει να συνάδουν αλλά όχι απαραίτητα και να ταυτίζονται. Είναι προφανές ότι η παράμετρος θερμοκρασίας καλουπιού δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία του ψυκτικού που διέρχεται στα κανάλια του καλουπιού και από τον χρόνο απόψυξης του προηγούμενου κύκλου, διότι στο ενδιάμεσο υπάρχει η δυνατότητα επαναφοράς του στο επιθυμητό θερμοκρασιακό επίπεδο από θερμικούς εναλλάκτες. Η μέτρηση της πραγματικής τιμής γίνεται με αισθητήρες στο καλούπι και ρυθμίζεται από τον θερμοστάτη ως προς την επιθυμητή θερμοκρασία ψύξης που θα επικρατεί στο κάθε κύκλο στη φάση της έκχυσης.

❖ **Ταχύτητα κοχλία**

Για την παράμετρο ταχύτητα του κοχλίου screw speed παρατηρήθηκε ότι επηρεάζει τα αποτελέσματα και θα συμπεριελήφθη επομένως στις μεταβλητές προς έλεγχο. Από τον πίνακα του υλικού δεν υπήρχε κάποιο συγκεκριμένο όριο στον καθορισμό της. Έτσι το εύρος επιλέχθηκε με τρόπο εμπειρικό από τις συνήθεις ρυθμίσεις που κάνει ο χειριστής σε συνδυασμό με το επιθυμητό χρόνο γεμίσματος. Επισημάνεται ότι η πλήρωση της μήτρας λαμβάνει χώρα σε μικρούς σχετικά χρόνους συγκρινόμενη με τον ολικό χρόνο του κύκλου παραγωγής του προς χύτευση αντικείμενου. Επιλέγεται προς έλεγχο η ταχύτητα να πάρει τιμές, με κατανομή, 20 -30- 40 mm/s. Οι χαμηλές τιμές της ταχύτητας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο αφού αυξημένες ταχύτητες επιβαρύνουν λόγω τριβών το τήγμα θερμοκρασιακά, δημιουργώντας έτσι προβλήματα στην διαδικασία[36]. Μια μειωμένη ταχύτητα οδηγεί σε λειψό αντικείμενο. Η ταχύτητα του κοχλίου πρέπει να επιλεγθεί προσεκτικά καθώς αυτή εξαρτάται από τη μορφή και το μέγεθος του κοχλίου. Ο χειριστής συνήθιζε να λειτουργεί τη μηχανή σε ταχύτητα 25 mm/s.

4.2.2. Σταθερές τιμές πειράματος πλήρωσης

Με σταθερές τιμή διατηρείται στη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών το όριο της πίεσης της μηχανής, το οποίο θέτουμε ως *alarm* στην μηχανή που μας ενημερώνει στο πάνελ χειρισμού για το ποσοστό της μέγιστης πίεσης, όταν βρίσκεται για πάνω από 70% του συνολικού ορίου [37]. Το οριακό σημείο αλλαγής φάσης από πλήρωση σε υποπίεση γίνεται στο 100% της αρχικής φάσης. Το προφίλ γεμίσματος της κοιλότητας με τηγμένο υλικό διαμορφώνεται ως προφίλ σταθερής παροχής όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.2-1. Οι τιμές των μεταβλητών καταγράφονται και εισάγονται στον πίνακα 4.2.2-1 μαζί και με τις μεταβλητές χρόνου και ρυθμού ροής οι οποίες όπως αποδεικνύεται από τις εξισώσεις (5α) ,(5β) εξαρτώνται από την ταχύτητα του κοχλίου.



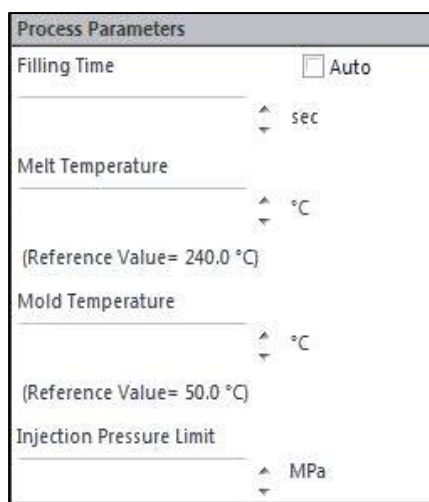
Εικόνα 4.2.2-1: Διάγραμμα προφίλ πλήρωσης και ρύθμιση παραμέτρων λειτουργίας του κοχλίου στο Plastics.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας 4.2.2-1 των μεταβλητών:

Μεταβλητές Φάσης Πλήρωσης	0	1	2
Melt Temperature(°C)	200	220	240
Mold Temperature(°C)	40	50	60
Screw Speed(mm/s)	20	30	40
Filling Time(sec) Συνάρτηση του Screw Speed	2,18	1,45	1,08
Flow Rate(cc/s)	56,5	84,8	113

Πίνακας 4.2.2-1: Συγκεντρωτικός πίνακας μεταβλητών φάσης πλήρωσης και τιμών των επιπέδων.

Από την παραπάνω επιλογή τιμών εισάγουμε σε κάθε δοκιμή τις απαραίτητες τιμές στο λογισμικό ,για την διεξαγωγή της προσομοίωσης της φάσης έκχυσης, σε παράθυρο μορφής αυτό της εικόνας 4.2.2-2 .



Εικόνα 4.2.2-2: Εισαγωγή τιμών των παραμέτρων πλήρωσης στο Plastics.

4.2.3. Επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα και τοποθέτηση των παραγόντων πειράματος πλήρωσης

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων, πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της κλασματικής παραγοντοποίησης και συγκεκριμένα η μέθοδος των ορθογωνίων πινάκων *Taguchi*. Για την επιλογή του κατάλληλου πίνακα, πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι ως μεταβλητές συμμετέχουν τρεις παράμετροι, τριών επιπέδων η καθεμία. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το μέγεθος δύο μεταβλητών (T_{wall}, T_{inlet}) είναι εξαρτημένο από τις θερμοδυναμικές οριακές συνθήκες στην εξίσωση της διατήρησης της ορμής. Επομένως, θεωρείται αναγκαίο να ελεγχθούν (έστω και χωρίς περαιτέρω ανάλυση) οι πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Με ενδιαφέρον αναμένεται η αλληλεπίδραση μεταξύ του ρυθμού ροής και της θερμοκρασίας εισόδου του υλικού. Οι πιθανοί διαθέσιμοι πίνακες Taguchi είναι: ο L9, ο L18 και ο L27, ενώ υπάρχει και ο L81, ο οποίος αντιστοιχεί και σε ένα πλήρως παραγοντοποιημένο πρόβλημα (όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί). Επιλέγεται ο L18, καθώς θα μας επιτρέψει την εξέταση αλληλεπιδράσεων, ενώ ταυτόχρονα θα έχει και ικανοποιητική ανάλυση. Τοποθετούμε τις παραμέτρους στις κατάλληλες στήλες (σύμφωνα με τα γραμμικά διαγράμματα) και προκύπτει ο πίνακας 4.2.3-1:

No.	Melt Temp.	Screw Speed	Mold Temp.	AB	A2B	AC	A2C	E1
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	1	1	1
3	0	1	2	1	1	2	2	2
4	0	1	0	1	1	0	0	1
5	0	2	1	2	2	1	1	2
6	0	2	2	2	2	2	2	0
7	1	0	1	1	2	2	0	0
8	1	0	2	1	2	0	1	1
9	1	1	0	2	0	1	2	2
10	1	1	2	2	0	0	1	2
11	1	2	0	0	1	1	2	0
12	1	2	1	0	1	2	0	1
13	2	0	1	2	1	0	2	2
14	2	0	2	2	1	1	0	0
15	2	1	0	0	2	2	1	1
16	2	1	2	0	2	1	0	1
17	2	2	0	1	0	2	1	2
18	2	2	1	1	0	0	2	0

Πίνακας 4.2.3-1: Πίνακας Taguchi πειραμάτων φάσης έκχυσης.

Όπως φαίνεται παραπάνω, επιλέξαμε και μία στήλη, η οποία να μην συσχετίζεται με κάποια φαινομενικά ισχυρή αλληλεπίδραση, ως στήλη σφάλματος για την ανάλυση ANOVA.

Καθώς οι παράγοντες είναι τριών επιπέδων, κάθε αλληλεπίδραση αναλύεται σε δύο συνιστώσες και καταλαμβάνει δυο στήλες. Οι αλληλεπιδράσεις αναλύονται ως εξής:

• $A\chi B$

- $AB = \chi\alpha + \chi\beta = 0, 1, 2 \pmod{3}$

Και

- $A2B = 2\chi\alpha + \chi\beta = 0, 1, 2 \pmod{3}$,

Με $\chi\alpha$, $\chi\beta$ το αντίστοιχο επίπεδο των παραγόντων A, B.

Αντίστοιχα:

• $A\chi C$

- $AC = \chi\alpha + \chi\gamma = 0, 1, 2 \pmod{3}$

- $A2C = 2\chi\alpha + \chi\gamma = 0, 1, 2 \pmod{3}$

Παρακάτω παρουσιάζεται ξανά ο πίνακας 4.2.3-2, με τις μεταβλητές να έχουν τις πραγματικές τιμές τους, ανάλογα με το επίπεδό τους:

No.	Melt Temp.	Injection Speed	Mold Temp.	AB	A2B	AC	A2C	E1
1	200	20	40	0	0	0	0	0
2	200	20	50	0	0	1	1	1
3	200	30	60	1	1	2	2	2
4	200	30	40	1	1	0	0	1
5	200	40	50	2	2	1	1	2
6	200	40	60	2	2	2	2	0
7	220	20	50	1	2	2	0	0
8	220	20	60	1	2	0	1	1
9	220	30	40	2	0	1	2	2
10	220	30	60	2	0	0	1	2
11	220	40	40	0	1	1	2	0
12	220	40	50	0	1	2	0	1
13	240	20	50	2	1	0	2	2
14	240	20	60	2	1	1	0	0
15	240	30	40	0	2	2	1	1
16	240	30	60	0	2	1	0	1
17	240	40	40	1	0	2	1	2
18	240	40	50	1	0	0	2	0

Πίνακας 4.2.3-2: Πίνακας Taguchi με τιμές των μεταβλητών.

Στη συνέχεια πραγματοποιούνται τα πειράματα, τα αποτελέσματα, καθώς και η στατιστική ανάλυσή τους, παρουσιάζονται ακολούθως.

4.2.4. Αποτελέσματα και επιλογή βέλτιστης περίπτωσης πειράματος πλήρωσης


4.2.4.1. Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος πλήρωσης

Τα πρωτογενή αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.4.1-1 παρακάτω:

Αριθμός Επανάληψης	Πίεση (Μpa)	Sink Marks(μm)
1	37,14	47,2
2	35,74	47,554
3	35,06	47,056
4	39,29	47,156
5	42,48	48,6
6	39,98	48,8
7	33,11	48,6
8	30,93	49,8
9	34,99	48,978
10	34,77	49,904
11	36,77	49,5
12	35,81	50,545
13	30,29	50,521
14	29,22	50,849
15	31,07	50,735
16	30,06	50,687
17	33,08	51,016
18	32,99	51,667

Πίνακας 4.2.4.1-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος φάσης πλήρωσης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα 4.2.4.1-1, μπορούμε να έχουμε μία πρώτη εικόνα της ανάλυσης των πειραμάτων. Οι διαφορές στις πιέσεις είναι εμφανείς, καθώς κυμαίνονται σε ένα εύρος από 292 bar μέχρι και 424 bar, ενώ στα sink marks δεν είναι τόσο μεγάλες και κυμαίνονται σε εύρος 47-52 μικρά. Στην περίπτωση μας είμαστε σε όλες τις δοκιμές κάτω από το 70% του ορίου πίεσης που ορίζεται ως κρίσιμο για την ανάλυση, η πλήρωση του τεμαχίου γίνεται με επιτυχία όπως μας εξηγεί το *results adviser* στην εικόνα 4.2.4.1-1 και μας το καταδεικνύει με πράσινη σήμανση σε κάθε δοκιμή.

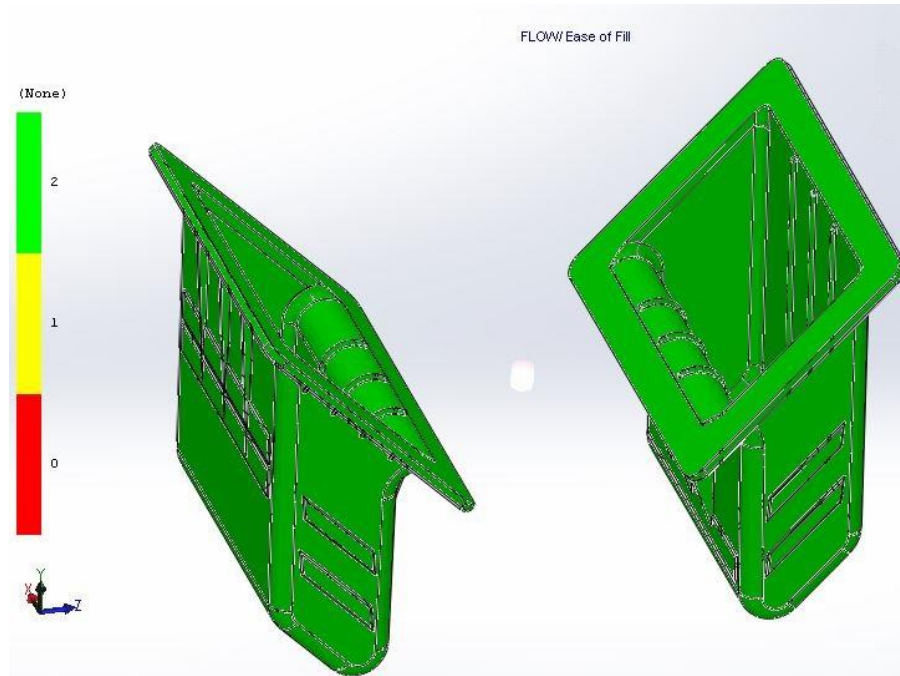
Adviser: 

This part can be successfully filled with an injection pressure of 30.1 MPa (4368.43 psi).
The injection pressure required to fill is less than 66% of the maximum injection pressure limit specified for this analysis, which means you are well under your specified limit.

Εικόνα 4.2.4.1-1: Ενημέρωση επιτυχούς πλήρωσης από result adviser του προγράμματος.

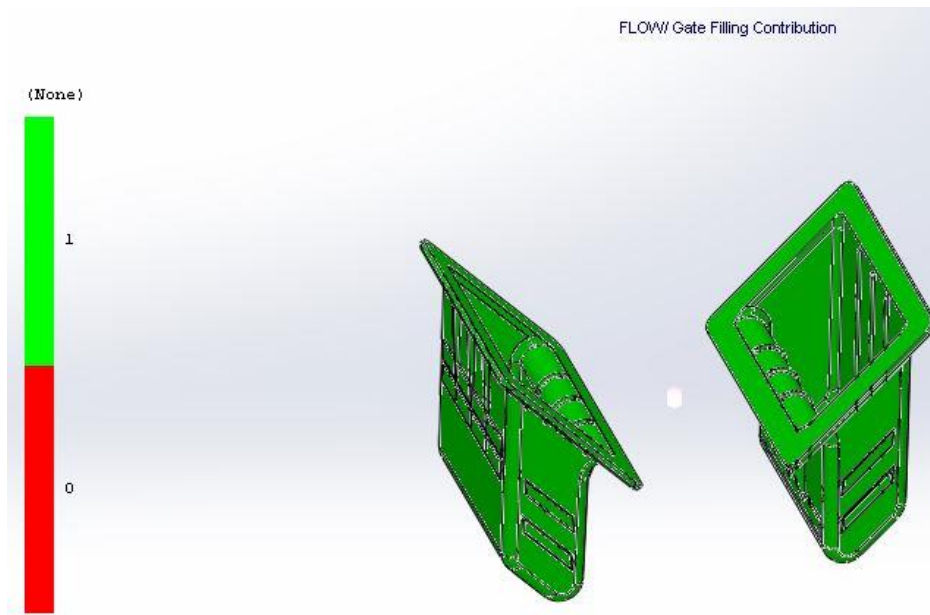
Σε όλη την διάρκεια των πειραμάτων, δεν εμφανιστήκαν προβλήματα λειψού αντικειμένου. Το *ease of fill*, δηλαδή η ικανότητα πλήρωσης της κοιλότητας ήταν πάντα εφικτή. Η τελική επιλογή των τιμών έγινε με επιτυχία χάρη στις πρώτες δοκιμές αλλά και χάρη στις ε-

μπειρικές τιμές που ρυθμίζει ο χειριστής. Όλες οι περιπτώσεις έδιναν ικανοποιητικά αποτελέσματα, στο επιλεγμένο όριο πίεσης, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του γραφήματος 4.2.4.1-1 .



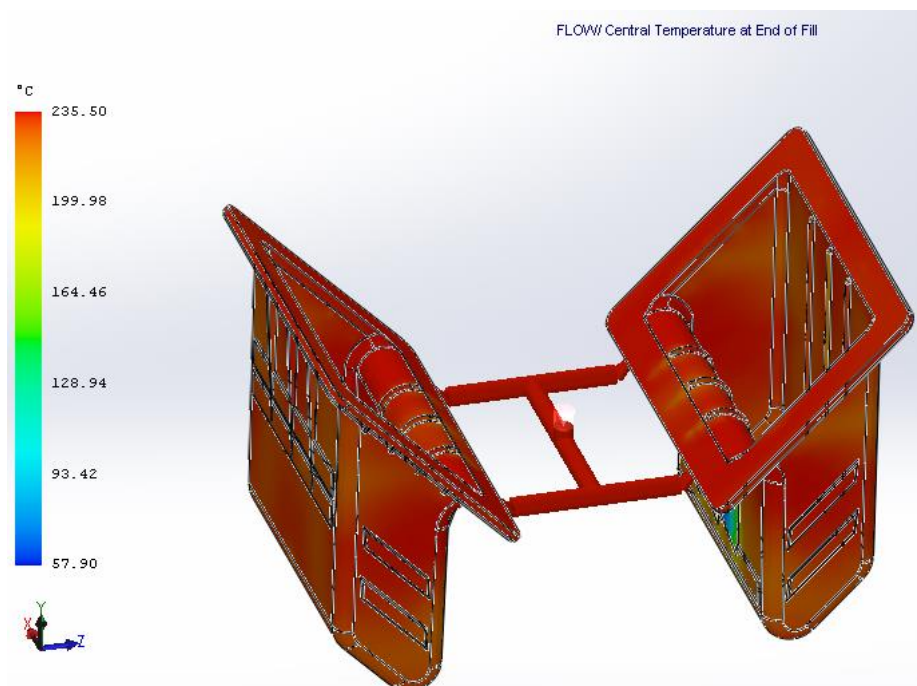
Γράφημα 4.2.4.1-1: Προσομοίωση του ease of fill για την φάση πλήρωσης

Η πράσινη ένδειξη αντιστοιχεί σε πλήρη έκχυση της μάζας υλικού και στις δυο κοιλότητες, με επιλεγμένη πίεση κάτω του 66% της μέγιστης πίεσης που δύναται να παρέχει η μηχανή, (βλ. κεφάλαιο 3.3.4.1 Αποτελέσματα *Flow/Ease of fill*). Η κατανομή της ροής υλικού ήταν άψογα ισορροπημένη και στις δυο κοιλότητες εξίσου, όπως παρουσιάζεται στο *γράφημα 4.2.4.1-2*



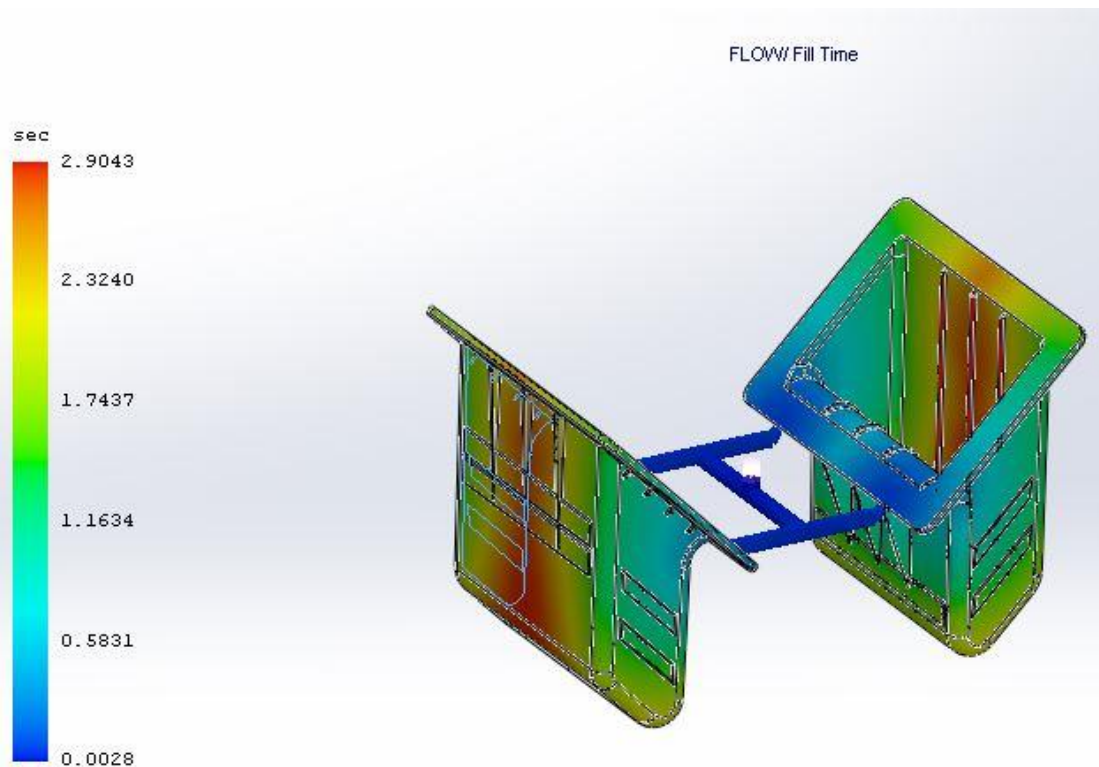
Γράφημα 4.2.4.1-2: Προσομοίωση κατανομή ροής υλικού, gate fill contribution.

Σε όλες τις πειραματικές δοκιμές, η θερμοκρασία στο σημείο της εισόδου διατηρεί με το πέρας της έκχυσης την επιλεγμένη θερμοκρασία τήγματος (γράφημα 4.2.4.1-3). Η σημασία του καλού σχεδιασμού του συστήματος διανομής είναι αυταπόδεικτη, καθόσον αποφεύχθηκαν προβλήματα παγώματος του υλικού στην είσοδο (*gate freeze*) χάρη στο σωστό μέγεθος των διαδρομών των σηράγγων και της πύλης εισόδου.



Γράφημα 4.2.4.1-3: Προσομοίωση θερμοκρασίας υλικού, central temperature at End of Fill.

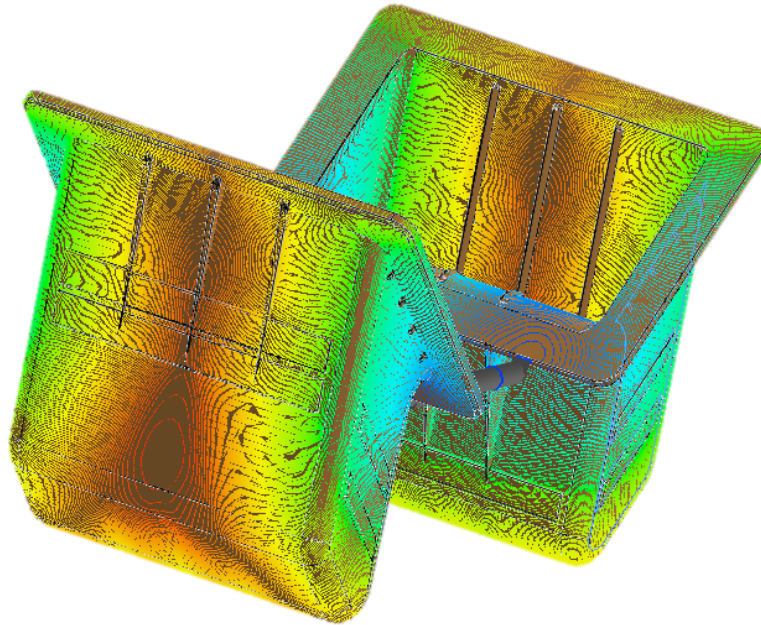
Στο παρακάτω γράφημα 4.2.4.1.-4 αποτυπώνεται ο χρόνος γεμίσματος του καλουπιού (*fill time*). Πιο συγκεκριμένα τα σημεία με κόκκινο χρωματισμό αντιστοιχούν στα σημεία που γεμίζουν τελευταία, δηλαδή σε αυτά ολοκληρώνεται η πλήρωση. Τα σημεία, με μπλε χρωματισμό αντιστοιχούν σε εκείνα, από τα οποία διέρχεται πρώτα το υλικό κατά την κατεύθυνση ροής του. Οι ενδιάμεσες διαβαθμίσεις απεικονίζουν την πορεία του υλικού σε συνάρτηση χρόνου.



Γράφημα 4.2.4.1-4: Προσομοίωση χρόνου πλήρωσης, Fill Time.

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι λόγω της γεωμετρίας του κελύφους το υλικό χωρίζεται σε δυο μέτωπα ροής. Αυτή η ένδειξη μας επισημάνει πιθανά προβλήματα ένωσης υλικού. Το φαινόμενο *racetracking* που περιγράφεται παρακάτω, λαμβάνει χώρα και συντελεί στην εμφάνιση ένωσης υλικού (βλ. γράφημα 4.2.4.1-5). Το σημείο στο οποίο ενώνονται τα δύο μέτωπα ροής είναι και το πιο πιθανό σημείο που θα εγκλωβιστεί ο αέρας (*air trap*). Τα μαύρα στίγματα που προκαλούνται από τον εγκλωβισμένο αέρα γίνονται αντιληπτά κατά την πρώτη φάση ανάλυσης, του πειράματος πλήρωσης.

Όταν το τηγμένο υλικό εγχέεται στο καλούπι, πάντα ακολουθεί τη διαδρομή της χαμηλότερης αντίστασης. Προσδιορίζεται πολύ γενικά ως η πορεία από την είσοδο προς τα τοιχώματα του τεμαχίου με το μεγαλύτερο πάχος.



Γράφημα 4.2.4.1-5: Προσομοίωση ένωσης υλικού, weld lines.

Όταν ένα μη διαμορφωμένο ακόμα ζεστό υλικό εισέρχεται σε μια κοιλότητα αναζητά τις περιοχές με μεγαλύτερο πάχος, αφήνοντας ως τελευταίες τις περιοχές, από τις οποίες θα διέλθει, τις περιοχές λεπτού πάχους [38]. Αυτό το φαινόμενο «*racetracking*» γίνεται αντιληπτό μέσω της εικόνας ροής και συνδέεται άμεσα με προβλήματα όπως το φαινόμενο Diesel.

Από την εικόνα ροής ελέγχουμε πάντα εάν στο τελευταίο ορατό σημείο που ολοκληρώνεται η πλήρωση εμφανίζονται προβλήματα *racetracking*, (*fill time result*). Εάν όντως κάτι τέτοιο συμβαίνει, ο σχεδιασμός της εξαέρωσης σε αυτό το σημείο πάνω στο καλούπι είναι βασική προϋπόθεση.

4.3. Συνάρτηση βελτιστοποίησης και επιλογή βέλτιστων τιμών παραμέτρων πειράματος πλήρωσης

Εάν ακόμα τα πρωτογενή αποτελέσματα έδιναν οπτικά σαφή συμπεράσματα, θα ήταν αρκετά πιθανό οι βέλτιστες τιμές πίεσης και *sink marks* να προέκυπταν από διαφορετικές τιμές μεταβλητών. Επομένως είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας συνάρτησης βελτιστοποίησης του αποτελέσματος, με βάση την οποία θα επιλεγούν οι βέλτιστες τιμές παραμέτρων για τη φάση της έκχυσης.

Για την έκχυση, η πιο βασική παράμετρος είναι η πίεση πλήρωσης, σαφώς έχει και η βελτίωση των *sink marks* σημασία (όσο λιγότερα τόσο καλύτερα). Όμως μία ρύθμιση, με την οποία θα αφαιρεθούν περισσότερα τραβήγματα, μπορεί και να αυξήσει αρκετά την πίεση, κάτι που ίσως να είναι περισσότερο επιζήμιο, παρά διορθωτική κίνηση για καλύτερο αποτέλεσμα.

Η ποιότητα της επιφανείας του προϊόντος δεν μας ενδιαφέρει σε πρώτη γραμμή, γιατί το αντικείμενο από την φάση σχεδιασμού του δεν έθεσε υψηλές απαιτήσεις αισθητικής. Επίσης παρατηρούνται ελάχιστες αποκλίσεις μεταξύ των τιμών των αποτελεσμάτων των *sink marks*, σε μια κλίμακα των 3 μμ.

Με αυτόν τον τρόπο προτιμούμε να αποφύγουμε τα ακραία όρια συνθηκών στην πίεση και να διατηρήσουμε την όλη διαδικασία κάτω του 70% της πίεσης μηχανής, ώστε να αποφευχθούν κίνδυνοι εμφάνισης προβλημάτων στις επόμενες φάσεις της ψύξης και υποπίεσης.

Η συνάρτηση βελτιστοποίησης στηρίζεται στη λογική «*the smaller the better*», όπου σε αυτή τη συνάρτηση ποιότητας το κριτήριο προτεραιότητας τιμών είναι απολύτως σχετικό. Δηλαδή, οι τιμές κρίνονται με βάση ένα μέγιστο παρατηρήσιμο και όλοι οι παράγοντες θα κανονικοποιηθούν από την συνάρτηση βάση αυτού του μεγίστου. Εάν κριθούν με βάση μιας επιθυμητής τιμής, τότε καταρρίπτεται η λογική «*the smaller the better*» και αλλάζει τύπο σε συνάρτηση ποιότητας «*desired-value*». Μία λογική προσέγγιση είναι να ανάγουμε τον συντελεστή πολλαπλασιασμού του κάθε παράγοντα της συνάρτησης με τον αριθμό αλλαγών που κάνει ο χειριστής σε πραγματικές συνθήκες.

Για παράδειγμα, έστω ότι ο χειριστής επεμβαίνει σε δέκα περιπτώσεις. Τότε σε τρεις περιπτώσεις θα προσπαθήσει να βελτιώσει προβλήματα ρουφηγμάτων και σε επτά θα επικεντρωθεί στον έλεγχο της τιμής της πίεση έκχυσης για τυχόν αποκλίσεις. Καθώς σε όλες τις δοκιμές δεν υπήρξε κάποιο μη αποδεκτό αποτέλεσμα στη φάση της πλήρωσης εισάγουμε με βεβαιότητα δυο παράγοντες στην συνάρτηση βελτιστοποίησης, οι οποίοι θα είναι η πίεση και τα *sink marks*. Επιπλέον όταν ελέγχουμε δυο μεταβλητές σε μια συνάρτηση ποιότητας πρέπει να έχουν και οι δυο μεταβλητές το ίδιο εύρος τιμών. Συνεπώς οι μετρήσεις γίνονται σε μονάδα *Mpa* για τη μέτρηση της πίεσης και μικρά (μμ) για τα *sink marks*. Με βάση τα παραπάνω, η συνάρτηση βελτιστοποίησης προκύπτει ως εξής:

$$f(x) = 0,75 \times \frac{Max.Pressure}{42,28} \times 100 + 0,25 \times \frac{Sink Marks}{50,67} \times 100, \quad (6)$$

όπου 42,48 *Mpa* η μέγιστη πίεση και 50,67 μμ η μέγιστη δημιουργία ρουφήγματος.

Τα τελικά αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 4.3-1:

Melt Temp.	Injection Speed	Mold Temp.	AB	A2B	AC	A2C	E1	Πίεση (Μpa)	Sink Marks(μm)	f(x)
200	40	50	2	2	1	1	2	42,48	48,6	98,86939
200	40	60	2	2	2	2	0	39,98	48,8	94,53144
200	30	40	1	1	0	0	1	39,29	47,156	92,51202
220	40	40	0	1	1	2	0	36,77	49,5	89,17594
200	20	40	0	0	0	0	0	37,14	47,2	88,71945
220	40	50	0	1	2	0	1	35,81	50,545	87,97862
200	20	50	0	0	1	1	1	35,74	47,554	86,40729
220	30	60	2	0	0	1	2	34,77	49,904	85,82364
220	30	40	2	0	1	2	2	34,99	48,978	85,76586
200	30	60	1	1	2	2	2	35,06	47,056	84,96009
240	40	50	1	0	0	2	0	32,99	51,667	83,51913
240	40	40	1	0	2	1	2	33,08	51,016	83,3638
220	20	50	1	2	2	0	0	33,11	48,6	82,24806
240	30	40	0	2	2	1	1	31,07	50,735	79,66232
220	20	60	1	2	0	1	1	30,93	49,8	78,96159
240	20	50	2	1	0	2	2	30,29	50,521	78,17515
240	30	60	0	2	1	0	1	30,06	50,687	77,84747
240	20	60	2	1	1	0	0	29,22	50,849	76,43579

Πίνακας 4.3-1: Πίνακας επιπέδων μεταβλητών και τελικού αποτελέσματος πειράματος φάσης πλήρωσης, με επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος.

4.4. Ανάλυση ευαισθησίας πειράματος πλήρωσης

Για να δούμε τη συμμετοχή του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα, πραγματοποιούμε την στατιστική ανάλυση ANOVA. Παρακάτω παρουσιάζεται ο συμπληρωμένος πίνακας 4.4-1, ANOVA:

ANOVA	Y	Df	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	Fx	Sx	p%
A	545,9996727	2	374,7603233	no			187,3802		42,57712	365,95841	45,943076
	509,9537024										
	479,0036446										
B	490,9473104	2	186,5717756	no			93,28589		21,19672	177,76986	22,317547
	506,5713962										
	537,4383132										
C	519,1993885	2	43,18622647	no			21,59311		4,906456	34,384308	4,3166678
	517,1976258										
	498,5600055										
AB		4	95,9048682	no			23,97622		5,447953	78,301032	9,8300522
AXB	525,0756083	2	87,44616713								
	493,6623902										
	516,2190212										
A2XB	505,8976305	2	8,458701074								
	515,2635837										
	513,7958055										
AC		4	78,52043826	no			19,63011		4,460416	60,916602	7,6475796
AXC	520,7428487	2	21,08254971								
	505,9803042										
	508,2338668										
A2XC	525,9606803	2	57,43788855								
	508,8302838										
	500,1660557										
<u>E1</u>											
	514,6297964	2	17,6038364	yes	2	17,60384	8,801918	8,801918			
	503,3693071										
	516,9579161										
<u>SUM</u>			796,5474682		2			4,400959			90,054922

Πίνακας 4.4-1: Πίνακας ANOVA μεταβλητών φάσης πλήρωσης.

Για τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι τύποι τριών επιπέδων. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω, για μεταβλητές τριών επιπέδων:

$$Sx = \left[\frac{(Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2)}{n/2} \right] - \left[\frac{r^2}{n} \right], (7\alpha)$$

$$Vx = \frac{Sx}{dFx}, (7\beta)$$

$$Ve = \frac{Se}{dFe}, (7\gamma)$$

$$Vetott = \frac{\sum Se}{\sum dFe}, (7\delta)$$

$$Fx = \frac{Vx}{Vetot}, (7\epsilon)$$

$$S'x = Sx - (dFx \times Vetot), (7\zeta)$$

$$\rho_x = \frac{S'x}{\sum S_x} \times 100\%, (7\eta)$$

όπου, n =18 , dFx=2 ,dFe=2 , ΣdFe=2

4.5. Συζήτηση αποτελεσμάτων πειράματος πλήρωσης

Όλοι οι επιλεγμένοι παράγοντες επηρεάζουν το αποτέλεσμα (δεν είναι pooled έτσι ώστε η επίδρασή τους να θεωρείται τυχαία). Αυτό εν μέρει ήταν αναμενόμενο, καθώς από την ισοθερμοκρασιακή μη μόνιμης νευτωνική ροής, οι βασικοί παράγοντες μετέχουν όλοι στις εξισώσεις διατήρησης ορμής. Οι παράγοντες που επηρεάζουν εν τέλει το αποτέλεσμα συμμετέχουν συνολικά κατά 90,05% στην επίδραση. Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή των παραγόντων έγινε με επιτυχία και ένα μικρό μέρος της επίδρασης στο αποτέλεσμα δεν ελέγχεται από τους παράγοντες που επιλέξαμε.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η θερμοκρασία εισόδου του υλικού, με συμμετοχή στην επίδραση 45,94%. Αυτό είναι πολύ λογικό, εφόσον αύξηση της πίεσης και των σημείων που έχουμε ρουφήγματα σχετίζονται άμεσα με την θερμοκρασία εισόδου. Παρατηρείται μια μεγάλη κλίμακα αλλαγής της πίεσης για κάθε επίπεδο αλλαγής της θερμοκρασίας εισόδου. Σημαντικοί παράγοντες είναι η ταχύτητα της ροής που σχετίζεται άμεσα με την μεταβολή της πίεσης αλλά και της θερμοκρασία του καλουπιού. Η συμμετοχή τους στο αποτέλεσμα είναι 22,31% και 4,31% αντίστοιχα.

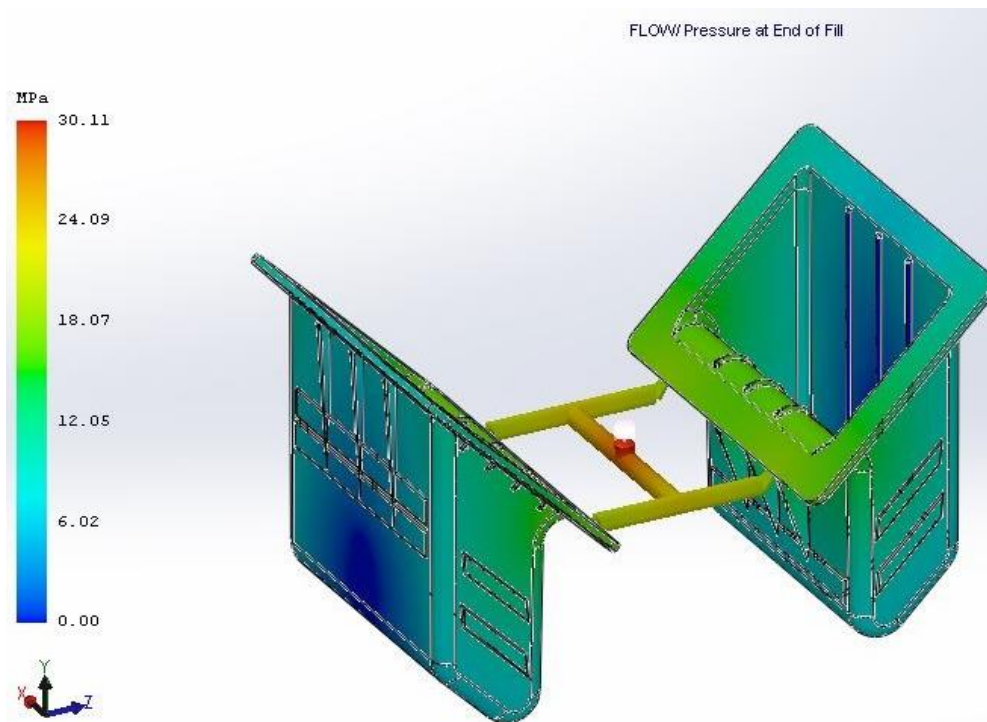
Υπάρχει όντως αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων θερμοκρασία εισόδου-τοιχωμάτων καλουπιού, με σχετικά μικρή όμως επίδραση στο αποτέλεσμα (περίπου 8% η καθεμιά). Η σχετικά χαμηλή τιμή της αλληλεπίδρασης καταδεικνύει μία ομαλότητα στη σχέση τους, δηλαδή στο τρόπο επίδρασης (π.χ. μείωση της θερμοκρασίας εισόδου ισούται με αύξηση της πίεσης). Οι βέλτιστες τιμές που λαμβάνουμε από τα διαγράμματα μεταβολής παραγόντων για τους τρεις παράγοντες, είναι για την θερμοκρασία εισόδου 240°C, ταχύτητα ροής υλικού 20 mm/s, θερμοκρασία καλουπιού 60°C. Οι πιέσεις που εξάγονται από αυτόν τον συνδυασμό είναι οι βέλτιστες με 29,22 Mpa (4238psi).

Το αποτέλεσμα για τέτοια πίεση είναι άκρως λογικό για να μην έχουμε υψηλές απαιτήσεις για πιέσεις:

- i. για ένα τόσο χαμηλό όγκο πλήρωσης
- ii. για ένα αντικείμενο χαμηλού βάρους, (118gr). Η μηχανή που χρησιμοποιούμε χαρακτηρίζεται από μέγιστο λειτουργίας πίεσης στα 1670 bar. Από τον κατασκευαστή της προορίζεται για παραγωγή θερμοπλαστικών μεγίστου βάρους 1,5 kg.
- iii. για ένα σχετικά μεγάλο *gate* χωρίς αισθητικό περιορισμό για μικρής διαμέτρου είσοδο.
- iv. για μια αρκετά εύκολη πρόσβαση του υλικού στην κοιλότητα, καθώς οι διαδρομές δεν είναι πολύπλοκες.

Παρατηρείται μία συνεχής αύξηση της πίεσης, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κοχλίου. Η ταχύτητα είναι μια μεταβλητή που επηρεάζει την πίεση δραστικά. Αντίθετα η πίεση ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, κατά την έγχυση. Η δε θερμοκρασία καλουπιού επηρεάζει αντιστρόφως την διακύμανση της πίεσης από την θερμοκρασία εισόδου, κάτι που ήταν προφανές καθώς η έντονη θερμοκρασιακή διαφορά των τοιχωμάτων του υλικού αυξάνει τις θερμοδυναμικές απαιτήσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες παραμέτρους κατά την έγχυση.

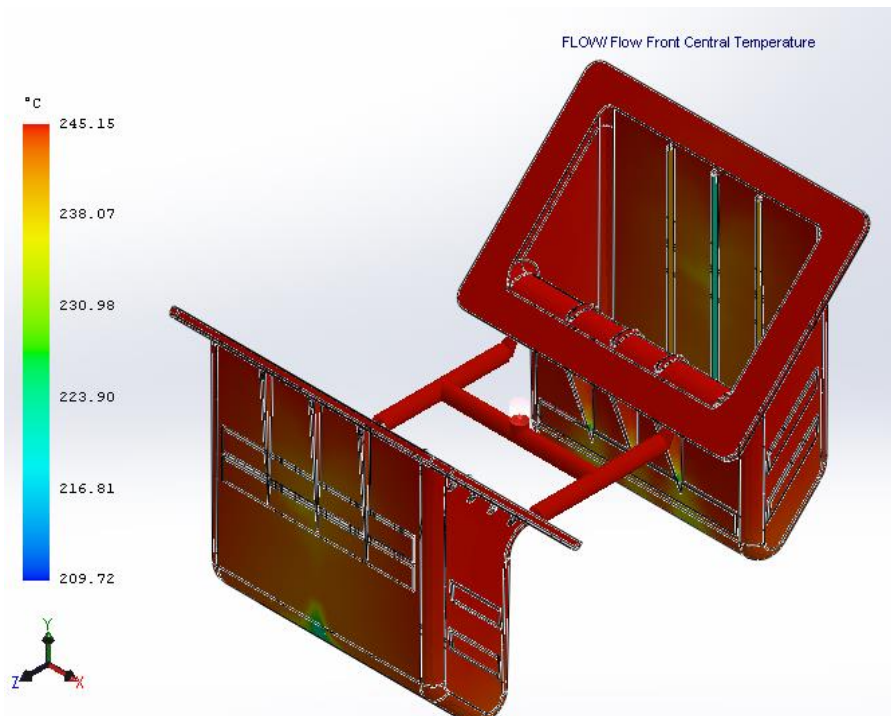
Αυτό σημαίνει ότι με την μείωση την θερμοκρασιακής κατάστασης του καλουπιού αυξάνουμε τις απαιτήσεις για μεγαλύτερη πίεση έκχυσης κατά τη φάση πλήρωσης. Η ομοιομορφία στην κατανομή της πίεσης όπως παριστάνεται στο γράφημα 4.5-1 είναι αποτέλεσμα του κατάλληλο σχεδιασμού ροής. Η ελάχιστη πίεση γίνεται αντιληπτή με την εφαρμογή των *air traps*.



Γράφημα 4.5-1: Προσομοίωση αποτελέσματος πίεσης, Pressure at the end of fill.

Στο διάγραμμα του *flow front temperature* (βλ. γράφημα 4.5-2) η θερμοκρασία μετώπου ροής στα εξωτερικά στρώματα παραμένει +/- 10° C σε σχέση με την αρχική θερμοκρασία τήξης και επηρεάζεται από την επαφή του υλικού στα τοιχώματα του καλουπιού. Συνεπώς δεν υπάρχει μεγάλο ρίσκο για υποβάθμιση της ποιότητας του υλικού. Η ελάχιστη θερμοκρασία μετώπου ροής είναι μικρότερη από την ρυθμιζόμενη θερμοκρασία εισόδου τουλάχιστον 10° C.

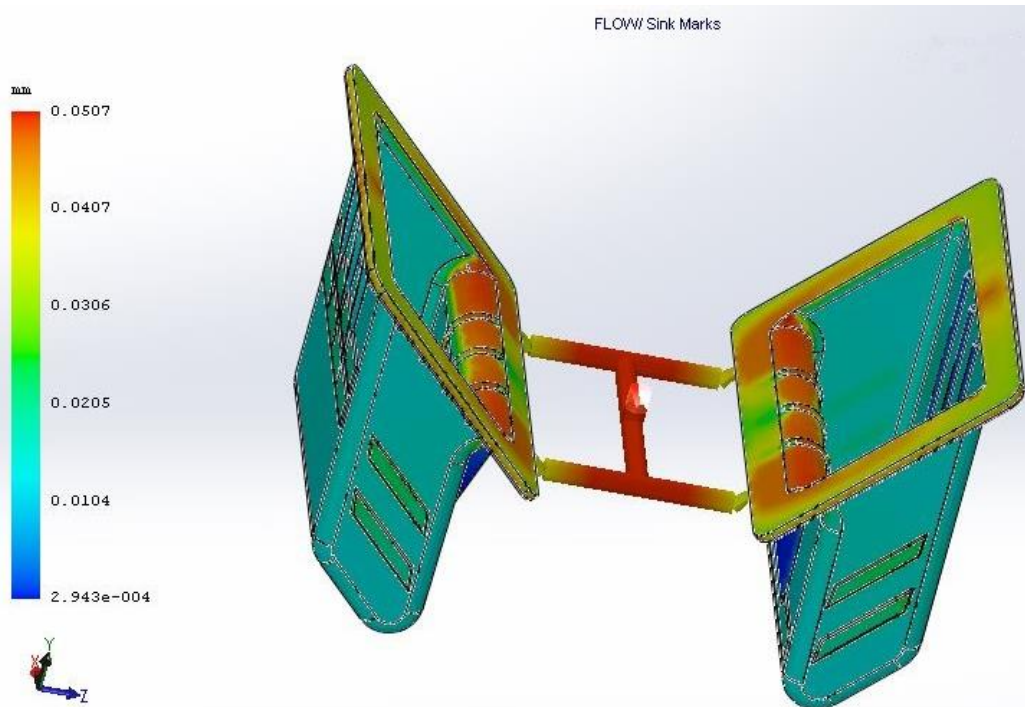
Αυτό μπορεί να έχει επιπτώσεις στην φάση της απόψυξης και της πίεσης αντίθλιψης, κάτι που θα απαιτήσει την αύξηση της πίεσης στο θάλαμο έκχυσης και θα επιφέρει προβλήματα συνολικά στο τεμάχιο. Πιθανά προβλήματα που θα απασχολήσουν τον χειριστή είναι οι γραμμές ένωσης ροής στα σημεία αυτά. Επιδιώκουμε να έχουμε λοιπόν υψηλότερες θερμοκρασίες για να μειώσουμε τις απαιτήσεις πιέσεων και καλύτερους χρόνους γεμίσματος που θα οδηγήσει σε καλύτερη ένωση γραμμών ροής, (*weld lines*) αλλά και σε βέλτιστο παραγόμενο προϊόν .



Γράφημα 4.5-2: Προσομοίωση θερμοκρασία μετώπου ροής, Flow Front Central Temperature.

Παρατηρείται ότι κατά την φάση της έκχυσης το υλικό που μεταφέρεται σε απομακρυσμένα σημεία της κοιλότητας, φθάνει έως εκεί αφού η θερμοκρασία του έχει πέσει αρκετά σε σύγκριση με την θερμοκρασία του τήγματος. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μη μεταδίδονται επαρκώς οι πιέσεις της έκχυσης στο υλικό αυτό και κατά συνέπεια να εμφανίζονται φαινόμενα τραβήγματος. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα δείχνουν την επιρροή της θερμοκρασίας εισόδου.

Ιδιαίτερα σε sink marks που εμφανίζονται σε χοντρά τοιχώματα και σε σημεία κοντά στην τροφοδοσία του προϊόντος. Τα σημεία που εμφανίζονται τα sink marks είναι τα κρίσιμα σημεία των ράδιων του άνου χείλους και στους όγκους αντιολίσθησης όπως περιγράφετε στο κεφάλαιο 3.2.2. Για την βέλτιστη περίπτωση το τράβηγμα μεταφέρεται κοντά στην πύλη στα τοιχώματα με το μεγαλύτερο πάχος (βλ. γράφημα 4.5-3). Η μείωση της θερμοκρασίας επιφέρει θετικά αποτελέσματα στην μείωση τους. Η μεταβολή της ταχύτητας της έγχυσης σε μια τέτοια περίπτωση δεν είναι αρκετή για να επιφέρει αλλαγές.



Γράφημα 4.5-3: Προσομοίωση αποτελέσματος τραβήγματος, sink Marks.

Αυτό που μπορεί να πραγματοποιηθεί μετέπειτα είναι με μια φωλιασμένη ακολουθία πειραματικών δοκιμών με το να μεταφέρουμε στους νέους πίνακες το βέλτιστο εύρος τιμών των δυο σημαντικών παραγόντων της Α' ακολουθίας. Στην επόμενη ακολουθία Β' γίνεται Taguchi με σκοπό να βγάλουμε διαγράμματα μεταβολής S/N για τους δυο παράγοντες υπό έλεγχο, ενώ η στατική ανάλυση είναι δευτερεύουσα σημασίας, αναμένοντας να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα με την ακολουθία Α'.

Συνεπώς επιλέγουμε ένα εύρος τιμών διαφοράς 5°C γύρω από τους 240° C (235-245°) και ένα εύρος 15-24 mm/s (15-20-24) στοχεύοντας να εντοπίσουμε την ταχύτητα με τους καλύτερους χρόνους γεμίσματος αλλά και την χαμηλότερη πίεση. Η μεταβλητή της θερμοκρασίας του καλουπιού δεν θα αναλυθεί και παραμένει με την βέλτιστη τιμή της στους 60°C για τις επόμενες δοκιμές.

Με την παρούσα ανάλυση ANOVA και τον περιορισμένο αριθμό δοκιμών μπορεί να γίνει επιπρόσθετη ανάλυση των επιμέρους παραγόντων της υψηλής σχετικά βαρύτητας. Κάτι τέτοιο, έτσι κι αλλιώς θεωρείται σκόπιμο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας να αναλύσουμε τα αποτελέσματα του «χονδρόκοκκου» Taguchi. Δόθηκε μια αρχική εικόνα των αλληλεπιδράσεων, αυτό όμως που μας ενδιαφέρει είναι η εμβάθυνση και η περαιτέρω αναζήτηση της περιοχής θερμοκρασιών με τη βέλτιστη δυνατή τιμή. Για ευνόητους λόγους επιδιώκουμε να επιτύχουμε με την θερμοκρασία, παρόλο της ακούσιες αποκλίσεις στον προθάλαμο κατά την επόμενη φάση έκχυσης, την σωστή λειτουργία της καλουπιού. Η ταχύτητα είναι ένας παράγοντας που μας ενδιαφέρει και τον εισάγουμε σε νέο Taguchi, επειδή αυτή συνδέεται άμεσα τόσο με τους χρόνους πλήρωσης όσο και τις λειτουργικές απαιτήσεις για πιέσεις.

Δίνοντας περισσότερο σημασία στην θερμοκρασία πετυχαίνουμε χαμηλότερες πιέσεις. Η διάρκεια γεμίματος της κοιλότητας δεν έχει τόσο μεγάλη σημασία για τον χειριστή και όπως προκύπτει και από την ανάλυση Ανονα δεν έχει ούτε τόσο μεγάλη συνεισφορά στο αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά μας ενδιαφέρει η επίδραση της στο να καθορίσουμε τους χρόνους γεμίματος κάτι που αποτελεί βάση για τους επόμενους χρόνους εργασίας αλλά και την αποφυγή weld lines.

Όλα τα παραπάνω, καθώς και οι ανάλυση ANOVA, ισχύουν με βάση τη συνάρτηση βελτιστοποίησης που καθορίσαμε. Αν και η προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί αρκετά σωστή και αντικειμενική, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα-συμπεράσματα αναφέρονται μόνο στη συγκεκριμένη συνάρτηση.

4.6. Πειραματική διαδικασία Β' ακολουθίας πειράματος πλήρωσης

4.6.1. Επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πινάκα και τοποθέτηση των παραγόντων Β' ακολουθίας πειράματος πλήρωσης

Για την κατασκευή των πειραμάτων, πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ορθογώνιος πίνακας Taguchi. Για την επιλογή του κατάλληλου πίνακα, πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι ως μεταβλητές συμμετέχουν δυο παράμετροι, τριών επιπέδων η καθεμία. Επιλέγεται ο L9 πίνακας Taguchi, καθώς θα μας επιτρέψει την εξέταση των παραμέτρων με ικανοποιητική ανάλυση όλων των πιθανών συνδυασμών.

No.	Melt Temp.	Injection Speed	E1	E2
1	235	15	0	0
2	235	20	1	1
3	235	24	2	2
4	240	15	1	2
5	240	20	2	1
6	240	24	0	0
7	245	15	2	1
8	245	20	1	2
9	245	24	0	0

Πίνακας 4.6.1-1: Πίνακας Taguchi με τιμές των μεταβλητών για Β' ακολουθία φάσης πλήρωσης.

Όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν μας ενδιαφέρει ο έλεγχος αλληλεπιδράσεων σε αυτή την φάση πειράματος. Για αυτό το λόγο, στον πίνακα 4.6.1-1 επιλέγουμε στο μικρό αριθμό δοκιμών που θα πραγματοποιηθούν και δυο στήλες, οι οποίες θα αποδοθούν για έλεγχο σφάλματος. Ο στόχος αυτής της ακολουθίας αποτελεί η διεύρυνση της εικόνας βέλτιστων τιμών στο επιλεγμένα θερμοκρασιακά επίπεδα.

4.6.2. Πρωτογενή αποτελέσματα Β' ακολουθίας πειράματος πλήρωσης

Τοποθετούμε τις παραμέτρους στις κατάλληλες στήλες (σύμφωνα με τα γραμμικά διαγράμματα) και προκύπτει ο παρακάτω πίνακας με τα αντίστοιχα πρωτογενή αποτελέσματα:

No.	Melt Temp.	Injection Speed	Πίεση (Μρα)	Sink Marks(μμ)
1	235	15	28,99	48,58
2	235	20	29,45	49,89
3	235	24	30,18	50,35
4	240	15	28,11	49,394
5	240	20	29,22	50,849
6	240	24	30,09	50,587
7	245	15	27,4	48,97
8	245	20	28,29	50,03
9	245	24	29,4	49,83

Πίνακας 4.6.2-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος φάσης πλήρωσης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα 4.6.2-1 μπορούμε να έχουμε μία πρώτη εικόνα της ανάλυσης των πειραμάτων. Οι διαφορές στις πιέσεις είναι μηδαμινές για μέγιστο εύρος 2 Μρα. Το ίδιο ισχύει και για τη μεταβολή των sink marks ανάλογα με τις επιλεγμένες τιμές της ταχύτητας του κοιλία και της θερμοκρασίας εισόδου. Μπορεί να εξαχθεί με βεβαιότητα το συμπέρασμα ότι βρισκόμαστε στην κατάλληλη περιοχή που οι μεταβολές στα αποτελέσματα δεν είναι έντονες, ή πρόκειται για το σημείο βέλτιστης λειτουργίας συναρτήσεως των μεταβλητών θερμοκρασίας και ταχύτητας.

Τα αποτελέσματα των πινάκων αποδεικνύουν ότι το θερμοδυναμικό φαινόμενο δεν ακολουθεί κανόνες. Σταθερές μεταβολές παραγόντων δεν εξασφαλίζουν απαραίτητα και βέλτιστη αντιμετώπιση των προβλημάτων, τα οποία εμφανίζονται. Παρατηρούμε δηλαδή ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας πετυχαίνουμε μια σταθερή μείωση της πίεσης, όμως δε προκαλεί παράλληλα αύξηση στα sink marks. Ακόμα και σε διαφορετική περίπτωση σταθερή αύξηση της ταχύτητας δεν οδηγεί απαραίτητα και σε μια αντίστοιχη σταθερή μεταβολή αποτελεσμάτων. Τοιούτοτρόπως καταλήγουμε στο ότι μια έκδοση σε μορφή διαγραμμάτων καμπυλών μεταβολής των παραγόντων δεν είναι εφικτή. Η μελέτη γίνεται κυρίως γύρω από διακριτές τιμές, συνεπώς η όποια υπόθεση για αντιστοίχιση των ενδιάμεσων αυτών τιμών είναι εσφαλμένη. Για αυτό το λόγο δίνονται μόνο κατευθύνσεις προς στο χειριστή και περιοχές τιμών στις οποίες περιγράφονται ποια προβλήματα θα εμφανιστούν και πως θα αντιμετωπιστούν.

4.6.3. Συνάρτηση βελτιστοποίησης και επιλογή βέλτιστων τιμών παραμέτρων Β' πειράματος πλήρωσης

Ακόμα και εάν τα πρωτογενή αποτελέσματα έδιναν οπτικά σαφή συμπεράσματα, θα ήταν αρκετά πιθανό οι βέλτιστες τιμές πίεσης και sink marks να προέκυπταν από διαφορετικές τιμές μεταβλητών. Επομένως είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας συνάρτησης βελτιστοποίησης του αποτελέσματος, με βάση την οποία θα επιλεγούν οι βέλτιστες τιμές παραμέτρων για τη φάση της έκχυσης πάνω στην λογική της κανονικοποίησης μεγίστου παρατηρήσιμου. Από τα αποτελέσματα λαμβάνουμε για 30,18 Μpa τη μέγιστη πίεση και 50,849 μm για τη μέγιστη δημιουργία ρουφήγματος.

$$f(x) = 0,75 \times \frac{Max.Pressure}{30,18} \times 100 + 0,25 \times \frac{Sink Marks}{50,849} \times 100, (8)$$

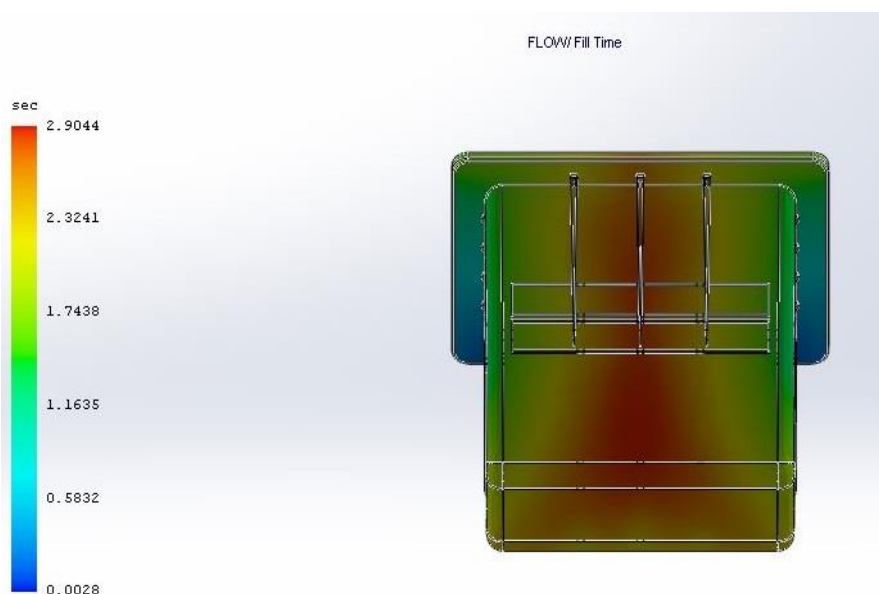
Τα τελικά αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 4.6.3-1 που έχει ταξινομηθεί κατά βέλτιστη τιμή:

Melt Temp.	Injection Speed	Πίεση (Μpa)	Sink Marks(μm)	f(x)
235	24	30,18	50,35	99,75466578
240	24	30,09	50,587	99,64752919
235	20	29,45	49,89	97,71439066
240	20	29,22	50,849	97,61431412
245	24	29,4	49,83	97,56063708
235	15	28,99	48,58	95,92718571
245	20	28,29	50,03	94,90051813
240	15	28,11	49,394	94,14051151
245	15	27,4	48,97	92,16763765

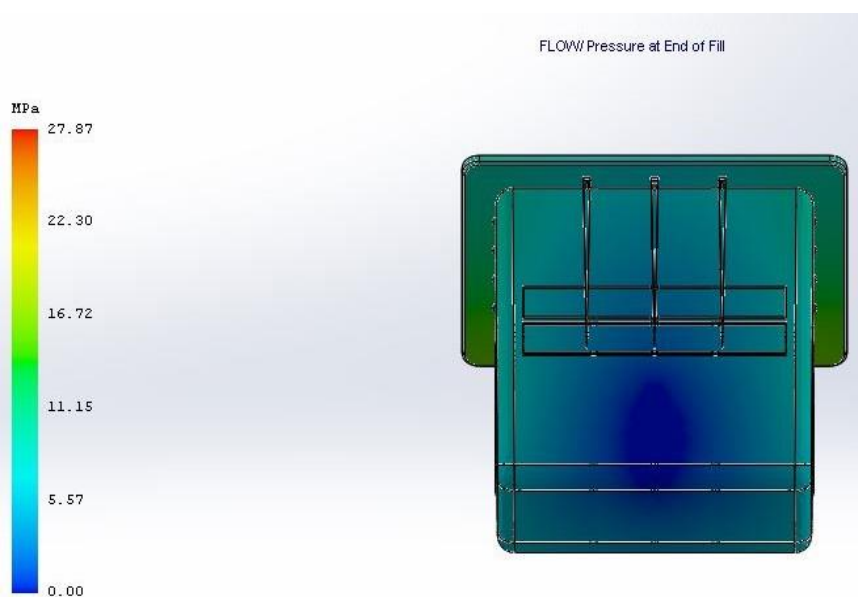
Πίνακας 4.6.3-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος Β' ακολουθίας φάσης πλήρωσης.

4.7. Συζήτηση αποτελεσμάτων Β' πειράματος πλήρωσης

Οι βέλτιστες τιμές που λαμβάνουμε από τα διαγράμματα μεταβολής παραγόντων και για τους δύο παράγοντες είναι για την θερμοκρασία εισόδου 245°C, ταχύτητα ροής υλικού 15 mm/s. Αναλυτικότερα ρυθμίζουμε τον χρόνο γεμίσματος στα 2,9 sec, τον ρυθμό ροής υλικού στην κοιλότητα με 42,12 cc/s και κρατάμε την θερμοκρασία καλουπιού 60°C κατά την φάση πλήρωσης. Οι πιέσεις που εξάγονται από αυτόν τον συνδυασμό είναι οι βέλτιστες με 27,4 Mpa (3979psi). Το *air trap* λειτουργεί άψογα σε εκείνη την περιοχή καθώς οπτικά παρατηρούμε ότι η πλήρωση του καλουπιού ολοκληρώνεται στο σημείο που έχουμε την εξαέρωση (γράφημα 4.6.4-1) ενώ η πίεση εκεί στο τέλος του γεμίσματος είναι απειροελάχιστη (γράφημα 4.6.4-2), το οποίο σημαίνει ότι η εκτόνωση στο σημείο που έγινε η διάτρηση γίνεται με πλήρη επιτυχία και δεν υπάρχει περίπτωση να αναπτυχθεί φαινόμενο diesel κατά την έκχυση.

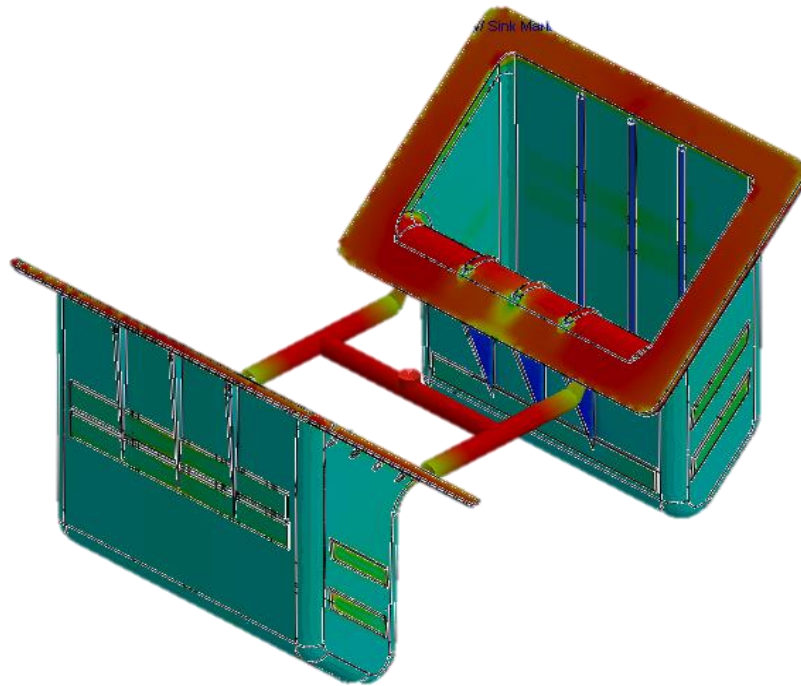


Γράφημα 4.7-1: Προσομοίωση χρόνου πλήρωσης για την Β' ακολουθία πλήρωσης, Fill Time.



Γράφημα 4.7-2: Προσομοίωση αποτελέσματος πίεσης για την Β' ακολουθία πλήρωσης, Pressure at the end of fill.

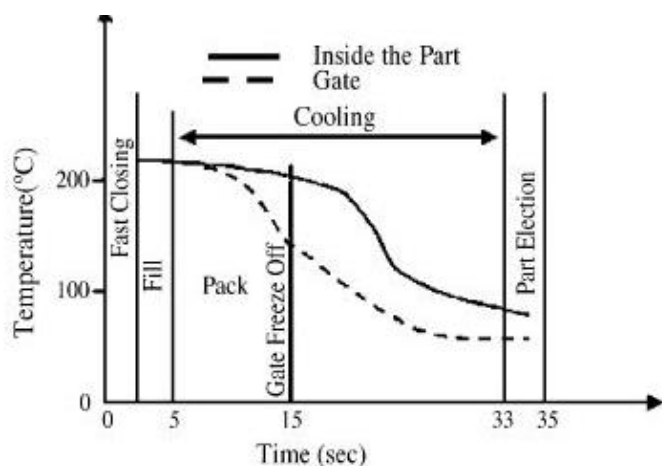
Το τράβηγμα εμφανίζεται στα χοντρά τοιχώματα του αντικειμένου και σε σημεία κοντά στην τροφοδοσία, τα οποία με την μείωση της θερμοκρασίας ελαττώνονται ουσιαστικά. Επίσης κάτι ανάλογο ισχύει και την ταχύτητα. Συνεπώς για τραβήγματα κοντά στην πύλη και σε τοιχώματα μεγάλου πάχους όπως είναι το χείλος του αντικειμένου απαιτείται μείωση της ταχύτητας.



Γράφημα 4.7-3: Αναπαράσταση sink marks.

4.8. Αρχικές ενέργειες πειράματος ψύξης

Στο πρόγραμμα η εντολή *COOL* αντλεί πληροφορίες από το φάκελο αποτελεσμάτων της ανάλυσης *FLOW "filename.FT,"*. Στο φάκελο αυτό καταγράφεται η τελική θερμοκρασία του κάθε σημείου μετά τη φάση του γεμίσματος. Για την ανάλυση του *COOL* αρχικοποιούνται όλες οι τιμές θερμοκρασιών του κάθε κόμβου ξεχωριστά. Βάση αυτής της ανταλλαγής δεδομένων και διαδικασίας αρχικοποίησης μεταξύ των *Flow results* και *Cool analysis*, θα υπολογίσει ο *solver* τον απαιτούμενο χρόνο ψύξης. Είναι αυτονόητο ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης *FLOW* πρέπει να προϋπάρχουν. Ο *solver* όριζει μια σταθερή τιμή θερμοκρασίας εισόδου, την *default melt temperature* που προτείνεται από τον πίνακα υλικών, για όλα τα σημεία κόμβους του αντικειμένου, κάτι που δεν συνάδει απολύτως με το πραγματικό φαινόμενο. Βάση αυτής της λογικής ακολουθίας, *FLOW-COOL* και όχι *FLOW-PACK-COOL*, καθορίζεται τελικά ο προγραμματισμός της διαδικασίας. Η πραγματική ακολουθία των φάσεων στην μηχανή ορίζει ως τρίτο στάδιο της τελικής διαμόρφωσης, την ταυτόχρονη εκκίνηση λειτουργιών συγκράτησης και ψύξης, όπως περιγράφεται σχήμα 4.8-1.



Σχήμα 4.8-1: Συνολικός κύκλος έκχυσης μηχανής injection.

Κατά την εφαρμογή της πίεσης συγκράτησης υπάρχει ένας τμήμα του χρόνου ψύξης που χαρακτηρίζεται ως «καθαρός χρόνος ψύξης» (*Pure Cooling Time*). Πρόκειται για το χρονικό διάστημα επίδρασης της ψύξης για την κρυσταλλοποίηση του υλικού. Για αυτό το χρόνο γίνεται λόγος στο επόμενο κεφάλαιο καθώς αφορά χρόνο ψύξης εντός της φάσης συγκράτησης, *racking*. Εφόσον έχουν κατασκευαστεί στο πρόγραμμα τα κανάλια ψύξης και έχει επιλεγθεί ο τύπος ψυκτικού μέσου, ρυθμίζονται οι οριακές συνθήκες για την ανάλυση *COOL* με εντολή μορφής της εικόνας 4.8-1.

Cool Pipe						
Pipe	Inlet	Outlet	Coolant	Inlet Temperature	Control Type	Value
1	31806	31807	Water	0.0 °C	Flow rate	0.0000 cc/s
2	31808	31805	Water	0.0 °C	Flow rate	0.0000 cc/s
3	31811	31810	Water	0.0 °C	Flow rate	0.0000 cc/s
4	31819	31814	Water	0.0 °C	Flow rate	0.0000 cc/s
5	31827	31823	Water	0.0 °C	Flow rate	0.0000 cc/s

Εικόνα 4.8-1: Ρυθμίσεις οριακών συνθηκών καναλιών.

Η απόψυξη του υλικού αποτελεί τη φάση επαναφοράς του από τη ρευστή σε στερεά κατάσταση. Εξαιτίας της ροής ψυκτικού υγρού εντός του καλουπιού, χαμηλής θερμοκρασίας για το συνολικό φαινόμενο και της θερμικής αγωγιμότητας, που παρέχουν τα κανάλια χαλκοσωλήνων, απορροφούνται ποσά θερμικής ενέργειας από τον θάλαμο έκχυσης, που παραλαμβάνονται και διαχέονται στη συνέχεια στο υπόλοιπο σύστημα. Συνεπώς από την μια πλευρά, διατηρείται στα τοιχώματα του καλουπιού χαμηλή θερμοκρασία περίπου 60°C, όπως ορίστηκε ως σταθερή τιμή για τις επόμενες φάσεις από την προηγούμενη πειραματική διαδικασία και από την άλλη το ψυκτικό μέσο προσπαθεί να δημιουργήσει «θερμικό σοκ» στη κοιλότητα ώστε να επιτευχθεί η τελική διαμόρφωση του υλικού. Η απόψυξη, λοιπόν δεν αποτελεί μεμονωμένη επίδραση προς το υλικό αλλά και προς το καλούπι. Συνεπώς στο τέλος της ψύξης ο χειριστής να καλείται να το επαναφέρει στην αρχική του θερμική κατάσταση.

Αυτό επιτυγχάνεται με θερμικούς εναλλάκτες, οι οποίοι στην διάρκεια της όλης διαδικασίας ανακυκλώνουν το θερμό νερό για την επαναφορά της θερμοκρασίας του καλουπιού. Η λειτουργία των θερμικών εναλλακτών δεν απασχολεί τον χειριστή. Η ρύθμιση για επαναφορά στην επιθυμητή θερμοκρασία γίνεται κατά την διάρκεια της εξώλκευσης και προετοιμασίας του καλουπιού για ώθηση υλικού από τον φούρνο. Η διαδικασία της ψύξης καταλαμβάνει αρκετό χρόνο και είναι αναγκαίο να βελτιστοποιηθεί, εκτός των περιπτώσεων λεπτότοιχων αντικείμενων ή εκείνων μεγάλου πάχους για τα οποία οι χρόνοι ψύξης είναι εκτός του συνηθισμένου εύρους ψύξης 10-1000 sec [39]. Η ανάγκη για επαρκή ψύξη με καλύτερα αποτελέσματα αλλά και η πίεση που ασκείται στον χειριστή κατά τη διάρκεια μιας παραγωγής να ανταπεξέλθει στους χρόνους παράδοσης, τον ωθεί να αντισταθμίσει τον παράγοντα αποτελεσματικότητας με εκείνο του χρόνου ψύξης. Τα κόστη για μεγάλους κύκλους μπορεί να είναι άκρως ζημιογόνα για την πορεία της παραγωγής. Το κόστος και ο κύκλος παραγωγής βρίσκονται σε αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τη μείωση του χρόνου της ψύξης που δεν προϋποθέτει απαραίτητως και την καλύτερη ποιότητα.

4.9. Μεταβλητές, σταθεροί παράγοντες και αποτελέσματα ψύξης

Στην πειραματική αυτή φάση ήταν απαραίτητο να καθοριστούν αρκετοί παράγοντες, χαρακτηριστικά μεγέθη της ψύξης, για τα οποία κατά ένα μεγάλο ποσοστό δεν αντλούνται δεδομένα από πίνακες, λίστες ή εμπειρικούς κανόνες.

Αρχικά συλλέχθηκαν όλα τα χρήσιμα στοιχεία λειτουργίας του ψύκτη και του καλουπιού. Έπειτα εισήχθησαν για αυτά οι τιμές που αντιστοιχούν στις οριακές συνθήκες λειτουργίας των συστημάτων τους και διερευνήσαμε τις τιμές, που θα αποδοθούν στις υπόλοιπες παραμέτρους, για τις οποίες δεν λαμβάνουμε εξαρχής από κάποια πηγή δεδομένων πληροφορίες. Τέλος επιλέχθηκε ο τύπος ελέγχου για την ανάλυση μας όπως και στο πείραμα πλήρωσης επιλέχθηκε αντιστοίχως ως τύπος ελέγχου της ανάλυσης, να καθορίζει η ταχύτητα έκχυσης τον χρόνο έκχυσης.

Η ορθότητα της επιλογής τιμών των παραμέτρων επαφίεται στην εμπειρία του χειριστή, την οποία θα εξετάσουμε εν συνεχεία, ελέγχοντας εάν οδηγείτε σε κάποιο σφάλμα. Στην πραγματικότητα οι ενσωματωμένες εξισώσεις που διαθέτει το λογισμικό προσομοίωσης προδιαθέτουν τον σχεδιαστή για μια εις βάθος ανάλυση της φάσεως ψύξης. Η απόψυξη καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό χρονικής διάρκειας στο κύκλο παραγωγής και αυτό αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία δοκιμών για τον χειριστή. Στην πειραματική διαδικασία της απόψυξης συναντήσαμε τον μεγαλύτερο αριθμό μεταβλητών σε όλη την εκπόνηση των πειραματικών φάσεων, στοιχείο που αποδεικνύει την έντονη επίδραση της σε όλες τις εξισώσεις μεταφορά θερμότητας.

Η λογική που ακολουθείτε στην εργασία είναι με την χρήση σε κάθε πειραματική δοκιμασία ως οδηγό πιλότο μεταβλητών, την θερμοκρασία τήξης. Όπως αναλύθηκε και αποφασίστηκε από την Α' ακολουθία πειράματος πλήρωσης αυτή είναι η πλέον αστάθμητη μεταβλητή, που θα έλεγε κανείς ότι ένας χειριστής την συναντά συνεχώς μπροστά του σε όλες τις φάσεις χύτευσης. Όπως είναι αναμενόμενο είναι πρώτη σε σειρά προτεραιότητας έναντι των άλλων μεταβλητών και θα εισαχθεί στον πίνακα πειραματικών δοκιμών με εύρος τιμών το βέλτιστο που επιλέχθηκε προς έλεγχο από την Β' ακολουθία πλήρωσης.

Από την προκαταρκτική παρατήρηση των κινήσεων του χειριστή καταγράφηκαν ποιες παράμετροι απασχολούν τον χειριστή και φαίνονταν να επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα της ψύξης. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν και το εύρος τιμών τους, καθώς και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Ειδικά για τη φάση της ψύξης, καθώς ολοκληρώνεται αυτή ως τρίτη φάση του φαινομένου, παρουσιάζονται οι τιμές (ή τα εύρη τιμών) των βασικών μεταβλητών και σταθερών παραγόντων, σαν μία παρουσίαση του τρόπου «ρύθμισής» τους.

4.9.1. Σταθερές τιμές πειράματος ψύξης

Οι σταθεροί παράμετροι της Α΄ ακολουθίας παραμένουν και σε αυτή τη φάση σταθερές ενώ δεν πρόκειται να αποτελέσουν μεταβλητές του πειράματος ψύξης. Η ταχύτητα έκχυσης, για αυτήν τη φάση, διατηρεί τη βέλτιστη τιμή της ακολουθίας Β΄, δηλαδή 15 m/s, ο χρόνος πλήρωσης παραμένει στα 2,9 sec, ενώ η θερμοκρασία του καλουπιού διατηρείται σταθερή ήδη από την Α΄ ακολουθία στους 60°C. Εφόσον σκοπός της εργασίας είναι η εξέταση των μεταβλητών παραγόντων, δεν κρίνεται σκόπιμο να αναλύονται εις βάθος οι τιμές των σταθερών παραγόντων σε κάθε φάση της διαδικασίας. Τα υπόλοιπα στοιχεία παραμένουν με σταθερές τιμές όπως προέκυψαν από την Β΄ ακολουθία καθώς δεν επιδρούν σε αυτή τη φάση (πχ. όριο πίεσης μηχανής). Επανεξάγεται η ανάλυση *FLOW* με βάση τις νέες σταθερές ώστε προβούμε στις επόμενες προσομοιώσεις της ανάλυσης *COOL*. Για την ψύξη λαμβάνουμε την θερμοκρασία αέρα-περιβάλλοντος 30°C (*air temperature*) και ρυθμό ροής ψυκτικού μέσου 150 cc/s (*coolant flow rate*).

4.9.2. Τύπος ελέγχου πειραματικής ανάλυσης

Η πρώτη ενέργεια που καλούμαστε να εκτελέσουμε είναι να εξετάσουμε με ποίο τύπο ελέγχου θα διεξαχθεί η πειραματική ανάλυση. Οι επιλογές μας από το πρόγραμμα είναι περιορισμένες και είναι η επιλογή χρόνου ψύξης και η επιλογή θερμοκρασίας εξόδου. Ο *solver* διατηρεί μια από τις δυο παραπάνω επιλογές σταθερές και επιλύει τις καταστατικές εξισώσεις ενέργειας, με τελικό αποτέλεσμα την δεύτερη παράμετρο. Η παροχή του νερού μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο του Reynolds:

$$Re = \frac{3,16 \times Q}{D \times \eta}, \quad (9)$$

όπου *Q* η παροχή του ψυκτικού μέσου σε gallons/min, *D* η διάμετρος του καναλιού και *η* η κινηματική βισκοελαστικότητα του ρευστού που εξαρτάται από την θερμοκρασία και το είδος ροής, για νερό το είναι 0,001(pa.s).

Η επιλογή τύπου ελέγχου συνδέεται άμεσα με την υποκειμενική αντίληψη του χειριστή για το τι τον εξυπηρετεί να διατηρεί σταθερό στην μηχανή.

Κλίνουμε στο ότι η πιο εύκολη μέθοδος ελέγχου του αποτελέσματος της ψύξης έγκειται στη πρακτική ελέγχου της θερμοκρασίας κατά την έξοδο. Με ένα όργανο θερμομέτρησης ο χειριστής ελέγχει τη θερμοκρασία του αντικειμένου και αναλόγως ρυθμίζει τους χρόνους ψύξης που δίνονται σε μορφή λίστας στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

Η αντίθετη μέθοδος ελέγχου, δηλαδή να ελέγχεται πρώτα ο χρόνος ψύξης, είναι χρονοβόρα και επίφοβη για την αξιοπιστία του αποτελέσματος. Επομένως η επιλογή της ελλοχεύει κινδύνους αδυναμίας ελέγχου του αποτελέσματος.

4.9.3. Μεταβλητές πειράματος ψύξης

Παρακάτω παρατίθενται οι μεταβλητές του πειράματος:

- **Θερμοκρασία τήξης υλικού**

Η θερμοκρασία τήγματος (*inlet melt temperature*) κρίνεται ότι θα επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα στην φάση της ψύξης και αποτελεί τον κύριο παράγοντα πιλότου από τον οποίο καθοδηγούνται και τα επόμενα αποτελέσματα. Το εύρος θερμοκρασιών τήξης για το υλικό θα πάρει ξανά τις βέλτιστες τιμές της ακολουθίας Α'. Το χρησιμοποιούμενο εύρος τιμών είναι από 235-245°C. Η ήδη βέλτιστη τιμή τήξης 245°C δεν αναμένεται να είναι η ίδια και για την φάση της πήξης. Προφανώς η σχέση της θερμοκρασιακής διαφορά $\Delta T(T_{out}, T_{in})$ είναι αντίστροφως ανάλογη με την απαίτηση βέλτιστου χρόνου. Όσο μικρότερη είναι τόσο λιγότερες ενεργειακές απαιτήσεις και μεταβολές προκύπτουν και επομένως μικρότεροι χρόνοι ψύξης.

- **Χρόνος ανοίγματος καλουπιού**

Η παράμετρος θερμοκρασίας καλουπιού (*mold temperature*) θα μπορούσε να επηρεάζεται και από τον χρόνο στον οποίο το καλούπι παραμένει ανοικτό (*open time mold*). Είναι ο χρόνος που το καλούπι παραμένει ανοικτό πριν επανέρθει στην αρχική του θερμοκρασιακή κατάσταση (ρυθμιζόμενη θερμοκρασία καλουπιού). Εάν αυτός ο χρόνος είναι πολύ μικρός το καλούπι δεν προλαβαίνει να ψυχθεί και να πάρει την επιθυμητή θερμοκρασία, συνεπώς έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας στην κοιλότητα. Ο επιπλέον χρόνος, όπως έχει προαναφερθεί μεταφράζεται σε κόστος και δεν μπορούμε να αφιερώσουμε για μια “φυσική” ψύξη του καλουπιού περισσότερο από 10sec, τα οποία τα δανειζόμαστε στην ουσία από την εξώλκευση του αντικειμένου και τα καταναλώνουμε από τον επόμενο κύκλο. Ο χειριστής επιδιώκει σχετικά μικρούς χρόνους αδράνειας της μηχανής. Η θερμική επαναφορά του καλουπιού δεν θα μπορούσε να είναι δραματική σε αυτούς τους περιορισμένους χρόνους. Επιλέγονται ως χρόνοι ανοικτού καλουπιού τα 2,6,10 sec ενώ την τελική τιμή τι κρίνει ο χειριστής. Αρχική τιμή είναι η οριακή τιμή να προλάβει να εξωλκευθεί το τεμάχιο.

- **Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου**

Πρόκειται για μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που απασχολούν τον χειριστή, καθώς από αυτήν (*min.coolant temperature*) καθορίζεται η κατάσταση της θερμοκρασίας του καλουπιού και τα καλά αποτελέσματα ψύξης. Η ρύθμιση της γίνεται απευθείας στον ψύκτη της μηχανής και όχι από το πάνελ χειρισμού της μηχανή. Επιλέγεται το εύρος θερμοκρασιών ψυκτικού μέσου από 12-22°C, ισόποσα καταμερισμένο με τελική τιμή πολύ κοντά στην ανώτερη τιμή λειτουργίας του ψύκτη (όπως καταγράφεται στα κατασκευαστικά σχέδια του αερόψυκτη Epsi). Το εύρος επιλέγεται εμπειρικά απαιτείται για μια καλή απόψυξη, χωρίς όμως να αυξάνουμε τις ενεργειακές καταναλώσεις του ψύκτη.

- **Θερμοκρασία εξόδου**

Αυτή η παράμετρος (*eject temperature*) λαμβάνεται από την επιλογή τύπου ελέγχου ως μεταβλητή. Η απλότητα του πρακτικού ελέγχου της στο τέλος κάθε κύκλου μας προδιαθέτει για μια αξιόπιστη πειραματική δοκιμασία. Μέχρι πρότινος ο χειριστής ήλεγχε το εξαγόμενο προϊόν με θερμομέτρο σε μια τυπική θερμοκρασία των 40°C. Σε αυτή την δοκιμασία θα κάνουμε μια διερεύνηση και σε ανώτερες θερμοκρασίες με την προοπτική ότι θα λάβουμε καλύτερους χρόνους ψύξης.

Οι κίνδυνοι που ελλοχεύουν, θα προκύψουν με την επιλογή μιας πολύ υψηλής θερμοκρασία εξόδου, θεωρητικά πάνω από 70 °C. Σε αυτή την περίπτωση θα εξάγει κανείς προϊόντα χαμηλής ποιότητας, με στρεβλώσεις, σημάδια στο προϊόν κατά την εξώλκευση, μιας και η θερμοκρασιακή διαφορά με το περιβάλλον επιφέρει απότομη συρρίκνωση [40]. Εάν είχαμε ένα προϊόν λεπτού πάχους, αρκετά λεπτά χαρακτηριστικά όπως λεπτά νευρά ή εγκοπές θα ήταν τότε απαραίτητο να κάναμε μια διερεύνηση της θερμοκρασίας εξόδου προς τα κάτω.

Όμως γνωρίζοντας τη μορφή του προϊόντος και τις απαιτήσεις ποιότητας προσπαθούμε να μειώσουμε τους χρόνους ψύξης. Για να το επιτύχουμε αυτό, ότι θα πρέπει να ελαττώσουμε την θερμοκρασιακή διαφορά ΔT (T_{eject}, T_{inlet}). Επομένως θεωρείται ικανοποιητική η επιλογή ανώτερης τιμής εύρους η 60°C. Η ενδιάμεση μέση τιμή, 50°C επιλέγεται ως τελική οριακή τιμή του παράγοντα. Δεν επιθυμούμε χαμηλότερη θερμοκρασία των 40°C γιατί μια χαμηλή θερμοκρασία εξόδου οδηγεί το καλούπι σε οριακές συνθήκες λειτουργίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας 4.9.3-1 των μεταβλητών:

Μεταβλητές Φάσης Ψύξης	0	1	2
Inlet Melt Temperature(°C)	235	240	245
Eject Temperature(°C)	40	50	60
Open Mold Time(sec)	2	6	10
Min. Coolant Temperature(°C)	12	17	22
Air Temperature(°C)	30	30	30
Coolant Flow Rate(cc/s)	150	150	150

Πίνακας 4.9.3-1: Συγκεντρωτικός πίνακας μεταβλητών φάσης ψύξης και τιμών των επιπέδων.

Από την άνωθεν επιλογή τιμών εισάγουμε σε κάθε δοκιμή τις απαραίτητες τιμές για την διεξαγωγή της προσομοίωσης στα *cooling settings* στο αντίστοιχο παράθυρο εντολής του λογισμικού, όπως φαίνεται στην *εικόνα 4.9.3-1*.

The image shows a software window titled "Process Parameters". It contains several input fields, each with up and down arrows for adjustment. The fields are: "Inlet melt temperature" (°C), "Min. Coolant temperature" (°C), "Air temperature" (°C), "Mold open time" (sec), "Average coolant flow rate" (cc/s), "Control type" (radio buttons for "Eject temperature" and "Cooling time"), a temperature input field (°C) next to "Cooling time", and a "Profile" checkbox. An "Auto" button is also visible.

Εικόνα 4.9.3-1: Εισαγωγή τιμών των παραμέτρων ψύξης στο *Plastics*.

4.9.4. Επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα και τοποθέτηση των παραγόντων πειράματος ψύξης

Για την κατασκευή των πειραμάτων, πρόκειται να επιλέξουμε κατάλληλο πίνακα, ο οποίος περιέχει τέσσερις παραμέτρους ως μεταβλητές, τριών επιπέδων η καθεμία. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το μέγεθος δύο μεταβλητών (T_{eject}, T_{inlet}) είναι εξαρτημένο από τις θερμοδυναμικές εξισώσεις. Παρόλο αυτά, θεωρείται επιθυμητό να ελεγχθούν (έστω και χωρίς περαιτέρω ανάλυση) οι πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Με ενδιαφέρον αναμένεται η συνεισφορά τις αλληλεπιδράσεις των θερμότητας του ψυκτικού μέσου με τις άλλες θερμοκρασίες που μετέχουν στο πρόβλημα. Ο παράγοντας του χρόνου ανοιγμένου καλουπιού δεν προκαλεί μεγάλο ενδιαφέρον ούτε θα μπορούσε να επιδράσει ουσιαστικά με τις θερμοκρασίες εισόδου, εξόδου και μέσου στο αποτέλεσμα. Για $3^4=81$ επαναλήψεις η χρήση του L27, πίνακα 4.9.4-1, κρίνεται ικανοποιητική για την ανάλυση και θα μας επιτρέψει να εξετάσουμε τρεις αλληλεπιδράσεις αφήνοντας ελεύθερες τρεις στήλες που δεν σχετίζονται με κάποια φαινομενική αλληλεπίδραση για στατιστική ανάλυση σφαλμάτων από Ανονα.

No.	Melt Temp	Eject Temp	Min Coolant	Mold Open Time	AB	A2B	AC	A2C	BC	B2C	E1	E2	E3
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	2
3	0	0	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2	1
4	0	1	0	1	1	1	0	0	1	2	1	2	1
5	0	1	1	2	1	1	1	1	2	0	2	0	0
6	0	1	2	0	1	1	2	2	0	1	0	1	2
7	0	2	0	2	2	2	0	0	2	1	2	1	2
8	0	2	1	0	2	2	1	1	0	2	0	2	1
9	0	2	2	1	2	2	2	2	1	0	1	0	0
10	1	0	0	1	1	2	1	2	0	0	2	1	1
11	1	0	1	2	1	2	2	0	1	1	0	2	0
12	1	0	2	0	1	2	0	1	2	2	1	0	2
13	1	1	0	2	2	0	1	2	1	2	0	0	2
14	1	1	1	0	2	0	2	0	2	0	1	1	1
15	1	1	2	1	2	0	0	1	0	1	2	2	0
16	1	2	0	0	0	1	1	2	2	1	1	2	0
17	1	2	1	1	0	1	2	0	0	2	2	0	2
18	1	2	2	2	0	1	0	1	1	0	0	1	1
19	2	0	0	2	2	1	2	1	0	0	1	2	2
20	2	0	1	0	2	1	0	2	1	1	2	0	1
21	2	0	2	1	2	1	1	0	2	2	0	1	0
22	2	1	0	0	0	2	2	1	1	2	2	1	0
23	2	1	1	1	0	2	0	2	2	0	0	2	2
24	2	1	2	2	0	2	1	0	0	1	1	0	1
25	2	2	0	1	1	0	2	1	2	1	0	0	1
26	2	2	1	2	1	0	0	2	0	2	1	1	0
27	2	2	2	0	1	0	1	0	1	0	2	2	2

Πίνακας 4.9.4-1: Πίνακας Taguchi πειραμάτων ψύξης.

Παρακάτω παρουσιάζεται ξανά ο πίνακας 4.9.4-2, με τις μεταβλητές να έχουν τις πραγματικές τιμές τους, ανάλογα με το επίπεδό τους:

No.	Melt Temp	Eject Temp	Min Coolant	Mold Open Time	AB	A2B	AC	A2C	BC	B2C	E1	E2	E3
1	235	40	12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	235	40	17	6	0	0	1	1	1	1	1	1	2
3	235	40	22	10	0	0	2	2	2	2	2	2	1
4	235	50	12	6	1	1	0	0	1	2	1	2	1
5	235	50	17	10	1	1	1	1	2	0	2	0	0
6	235	50	22	2	1	1	2	2	0	1	0	1	2
7	235	60	12	10	2	2	0	0	2	1	2	1	2
8	235	60	17	2	2	2	1	1	0	2	0	2	1
9	235	60	22	6	2	2	2	2	1	0	1	0	0
10	240	40	12	6	1	2	1	2	0	0	2	1	1
11	240	40	17	10	1	2	2	0	1	1	0	2	0
12	240	40	22	2	1	2	0	1	2	2	1	0	2
13	240	50	12	10	2	0	1	2	1	2	0	0	2
14	240	50	17	2	2	0	2	0	2	0	1	1	1
15	240	50	22	6	2	0	0	1	0	1	2	2	0
16	240	60	12	2	0	1	1	2	2	1	1	2	0
17	240	60	17	6	0	1	2	0	0	2	2	0	2
18	240	60	22	10	0	1	0	1	1	0	0	1	1
19	245	40	12	10	2	1	2	1	0	0	1	2	2
20	245	40	17	2	2	1	0	2	1	1	2	0	1
21	245	40	22	6	2	1	1	0	2	2	0	1	0
22	245	50	12	2	0	2	2	1	1	2	2	1	0
23	245	50	17	6	0	2	0	2	2	0	0	2	2
24	245	50	22	10	0	2	1	0	0	1	1	0	1
25	245	60	12	6	1	0	2	1	2	1	0	0	1
26	245	60	17	10	1	0	0	2	0	2	1	1	0
27	245	60	22	2	1	0	1	0	1	0	2	2	2

Πίνακας 4.9.4-2: Πίνακας Taguchi με τιμές των μεταβλητών.

Στη συνέχεια πραγματοποιούνται τα πειράματα. Τα αποτελέσματα, καθώς και η στατιστική ανάλυσή τους, παρουσιάζονται ακολούθως.

4.9.5. Αποτελέσματα και επιλογή βέλτιστης περίπτωσης φάσης ψύξης

4.9.5.1. Πρωτογενή αποτελέσματα φάσης ψύξης

Τα πρωτογενή αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 4.9.5.1-1:

No.	Cooling Time(sec)
1	60,8958
2	63,1636
3	73,6419
4	46,6418
5	63,1476
6	54,5339
7	37,693
8	39,7314
9	41,3559
10	60,7769
11	64,5729
12	75,1808
13	46,4107
15	52,5451
16	39,6061
17	39,4007
18	41,2072
19	60,8563
20	65,1152
21	74,9475
22	48,3289
23	48,9587
24	52,2268
25	39,3372
26	39,3388
27	42,9667

Πίνακας 4.9.5.1-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος φάσης ψύξης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα 4.9.5.1-1 μπορούμε να έχουμε μία πρώτη εικόνα της ανάλυσης των πειραμάτων. Οι χρόνοι ψύξης κυμαίνονται στα πλαίσια της εμπειρικής ρύθμισης του χειριστή, καθώς ο ίδιος επιλέγει χρόνο 60 sec. Βεβαίως παρατηρούνται χρόνοι που κρίνονται ως βέλτιστοι σχεδόν στο ήμισυ της εμπειρικής ρύθμισης. Παρόλο αυτά, το 1/3 των αποτελεσμάτων είναι για $T_{\text{eject}}=60^{\circ}\text{C}$, που σημαίνει ότι ο χειριστής δουλεύει με αρκετή επιφυλακτικότητα και έχει ακόμα περιθώρια να βελτιώσει τον χρόνο ψύξης του καλουπιού.

4.10. Επιλογή βέλτιστων τιμών παραμέτρων

Από τα πρωτογενή αποτελέσματα, ταξινομούμε τον πίνακα 4.10-1 κατά βέλτιστο ελάχιστο χρόνο ψύξης ενώ είναι προφανές ποιοι παράγοντες συνεισφέρουν κατά το μέγιστο στο αποτέλεσμα. Χωρίς να γίνουν τα διαγράμματα μεταβολής παραγόντων και η στατική ανάλυση είναι ξεκάθαρο ότι ο παράγοντας της θερμοκρασίας εξόδου συμβαδίζει με την βελτιστοποίηση του χρόνου από επίπεδο σε επίπεδο.

No.	Melt Temp	Eject Temp	Min Coolant	Mold Open Time	AB	A2B	AC	A2C	BC	B2C	E1	E2	E3	Cooling Time(sec)
12	240	40	22	2	0	1	1	1	2	0	1	0	2	75,1808
21	245	40	22	6	2	2	0	2	2	0	0	1	0	74,9475
3	235	40	22	10	0	0	2	0	2	0	2	2	1	73,6419
20	245	40	17	2	1	2	1	0	0	1	2	0	1	65,1152
11	240	40	17	10	2	1	2	2	0	1	0	2	0	64,5729
2	235	40	17	6	0	0	0	1	0	1	1	1	2	63,1636
5	235	50	17	10	2	1	0	1	1	0	2	0	0	63,1476
1	235	40	12	2	2	0	1	2	1	2	0	0	0	60,8958
19	245	40	12	10	1	2	2	1	1	2	1	2	2	60,8563
10	240	40	12	6	0	1	0	0	1	2	2	1	1	60,7769
6	235	50	22	2	2	1	2	0	0	2	0	1	2	54,5339
15	240	50	22	6	1	2	1	1	0	2	2	2	0	52,5451
24	245	50	22	10	2	0	0	2	0	2	1	0	1	52,2268
14	240	50	17	2	1	2	2	2	1	0	1	1	1	50,1275
23	245	50	17	6	1	0	1	0	1	0	0	2	2	48,9587
22	245	50	12	2	0	0	2	1	2	1	2	1	0	48,3289
4	235	50	12	6	2	1	1	2	2	1	1	2	1	46,6418
13	240	50	12	10	2	2	0	0	2	1	0	0	2	46,4107
27	245	60	22	2	1	1	0	2	1	1	2	2	2	42,9667
9	235	60	22	6	0	2	2	0	1	1	1	0	0	41,3559
18	240	60	22	10	1	0	1	1	1	1	0	1	1	41,2072
8	235	60	17	2	0	2	0	1	2	2	0	2	1	39,7314
16	240	60	12	2	0	0	0	0	0	0	1	2	0	39,6061
17	240	60	17	6	2	0	2	2	2	2	2	0	2	39,4007
26	245	60	17	10	2	1	1	0	2	2	1	1	0	39,3388
25	245	60	12	6	1	1	2	1	0	0	0	0	1	39,3372
7	235	60	12	10	0	2	1	2	0	0	2	1	2	37,693

Πίνακας 4.10-1: Πίνακας επιπέδων μεταβλητών και τελικού αποτελέσματος πειράματος ψύξης, με επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος.

4.11. Ανάλυση ευαισθησίας

Για να δούμε τη συμμετοχή του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα, πραγματοποιούμε την στατιστική ανάλυση ANOVA. Παρακάτω παρουσιάζεται ο συμπληρωμένος πίνακας 4.11-1 ANOVA:

ANOVA	Y	Df	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	Fx	Sx	ρ%
A	480,8049	2	7,471885	yes	2	7,471885	3,735942	3,735942			
	469,8279										
	472,0761										
B	599,1509	2	3181,833	no			1590,916		508,2956	3175,573	85,23937
	462,921										
	360,637										
C	440,5467	2	257,4127	no			128,7063		41,1215	251,1529	6,741496
	473,5564										
	508,6058										
D	476,4863	2	8,800874	yes	2	8,800874	4,400437	4,400437			
	467,1274										
	479,0952										
AB		4	46,14438	no			11,53609		3,685767	33,62476	0,902563
AXB	467,4297	2	25,15418	no							
	486,4966										
	468,7826										
A2XB	468,4273	2	20,9902	no							
	485,4563										
	468,8253										
AC		4	28,19966	no			7,049915		2,252438	15,68005	0,420887
AXC	467,5764	2	13,89893	yes							
	482,9773										
	472,1552										
A2XC	469,4727	2	14,30074	yes							
	483,4981										
	469,7381										
BC		4	149,2892	no			37,32229		11,92442	136,7695	3,671196
BXC	460,3057	2	134,4809	no							
	459,7629										
	502,6403										
B2XC	470,2926	2	14,80826	yes							
	468,7938										
	483,6225										
E1		2	14,90759	yes	2	14,90759	7,453796	7,453796			
	470,5953										
	468,4976										
	483,616										
E2		2	13,02753	yes	2	13,02753	6,513766	6,513766			
	483,0707										
	470,1173										
	469,5209										
E3		2	18,39019	yes	2	18,39019	9,195096	9,195096			
	484,7386										
	468,8059										
	469,1644										
SUM			3725,477		10		1806,83	3,129904			96,97551

Πίνακας 4.11-1: Πίνακας ANOVA μεταβλητών πειράματος ψύξης.

Για τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι τύποι τριών επιπέδων. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω ξανά, για μεταβλητές τριών επιπέδων:

$$Sx = \left[\frac{(Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2)}{n/2} \right] - \left[\frac{r^2}{n} \right], (10\alpha)$$

$$Vx = \frac{Sx}{dFx}, (10\beta)$$

$$Ve = \frac{Se}{dFe}, (10\gamma)$$

$$Vetott = \frac{\sum Se}{\sum dFe}, (10\delta)$$

$$Fx = \frac{Vx}{Vetot}, (10\epsilon)$$

$$S'x = Sx - (dFx \times Vetot), (10\zeta)$$

$$\rho_x = \frac{S'x}{\sum S_x} \times 100\%, (10\eta)$$

, με $n=27$, $dFx=2$, $dFe=2$, $\sum dFe=10$

4.12. Συζήτηση αποτελεσμάτων πειράματος ψύξης

Παρατηρούμε ότι οι επιλεγμένοι παράγοντες δεν επηρεάζουν όλοι το αποτέλεσμα, παρά μόνο οι δύο από τους τέσσερις. Αυτό εν μέρει οφείλεται στο ότι το εύρος θερμοκρασίας εισόδου του υλικού είναι σχετικά περιορισμένου μεγέθους. Οι τιμές μεταβάλλονται κατά 5°C και δεν μπορούν να επηρεάσουν δραστικά το αποτέλεσμα. Ίσως εάν είχαμε ένα εύρος τιμών μεγαλύτερης διαφοράς θα αναμέναμε να μετείχε ο παράγοντας αυτός με ένα μικρό ποσοστό, διότι ο χρόνος ψύξης συνδέεται άμεσα με το τελικό αποτέλεσμα, το οποίο είναι “πότε σταματώ να ψύχω και όχι από πού ξεκινώ”. Η απάντηση λοιπόν είναι ότι η ψύξη ολοκληρώνεται όταν το αντικείμενο φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου. Και για αυτό το λόγο ο παράγοντας αυτός μετέχει με 85% στο τελικό αποτέλεσμα .

Η αιτιολόγηση για το χαμηλό ποσοστό της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου είναι ταυτόσημη με εκείνη του «rooled» παράγοντα της θερμοκρασίας εισόδου. Το εύρος των διαφορετικών τιμών που καθορίζεται από τις δυνατότητες του ψύκτη δεν είναι ικανό να επηρεάσει σημαντικά στο αποτέλεσμα.

Ο παράγοντας «χρόνος ανοικτού καλουπιού» δεν συνεισφέρει στο αποτέλεσμα και συμβαδίζει με την πραγματικότητα καθώς ο χειριστής δεν βασίζεται στην φάση ανοίγματος του καλουπιού αλλά χρησιμοποιεί θερμικούς εναλλάκτες για να το επαναφέρει στην επιθυμητή θερμοκρασιακή κατάσταση. Τα χρονικά όρια ανοίγματος δεν συνεισφέρουν σε μια αποτελεσματική ψύξη, καθώς χρειάζεται περισσότερος χρόνος καθόσον το ψυκτικό μέσο έχει προσδώσει όλη τη θερμική ενέργεια στη διάρκεια του κύκλου στο τεμάχιο και το ρευστό καθώς κυκλοφορεί στα κανάλια είναι αρκετά θερμό για να επιφέρει μια ολική ψύξη στο καλούπι.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τελικά το αποτέλεσμα συμμετέχουν συνολικά κατά 97% σε επίδραση. Οι παράγοντες είναι στατιστικά σημαντικοί, με σημαντικότητα 95% και αντίστοιχη τιμή ορίου 4,10 ,με βαθμούς ελευθερίας αριθμητή 2 και παρονομαστή 10 όπως προκύπτει από το σχετικό πίνακα του F-test. Το γεγονός αυτό κάνει τα αποτελέσματα στατιστικά αξιόπιστα άρα και αξιοποιήσιμα. Αν οι τιμές αυτές ήταν κάτω από το όριο δεν θα μπορούσαμε να εμπιστευτούμε το αποτέλεσμα της στατιστικής ανάλυσης καθώς αυτό θα είχε μειωμένη αξιοπιστία.

Ο παράγοντας θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου και οι λοιπές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων εμφανίζεται να έχουν μικρή στατιστική ισχύ. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές είναι στατιστικά σημαντικές, για σημαντικότητα 95%, στο F-test με τιμή- όριο 3,48 εκτός από την αλληλεπίδραση θερμοκρασίας εισόδου-ψυκτικού μέσου που είναι στο όριο, η οποία αντιστοιχεί σε σημαντικότητα λίγο κάτω από 90%. Έτσι κι αλλιώς η επίδραση της παραμέτρου εμφανίζεται πολύ μικρή. Επομένως για τους κύριους παράγοντες επίδρασης, η στατιστική ανάλυση μπορεί να θεωρηθεί στατιστικά αξιόπιστη.

Γενικά δυο είναι οι βασικοί προβληματισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της ανάλυσης των αποτελεσμάτων της ψύξης [41].

- I. Η διατήρηση μια ομοιομορφίας του χρόνου ψύξης σε όλο το μήκος των επιφανειών της γεωμετρίας του αντικειμένου
- II. Διατήρηση μια ομοιομορφίας στην κατανομή θερμοκρασιών γύρω από την κοιλότητα και τον πυρήνα του καλουπιού.

Αναφορικά με τη γεωμετρία του πλαστικού τεμαχίου, η ομοιόμορφη ψύξη σε όλη την επιφάνεια του τμήματος οδηγεί σε περισσότερο ομοιόμορφα φαρμαρισμένο προϊόν με λιγότερες κατανομές παραμορφώσεων, καθώς και πιο ομοιόμορφη ογκομετρική κατανομή συρρίκνωσης. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συνδυάζονται για να οδηγήσουν σε ένα χυτευμένο τμήμα που θα είναι λιγότερο πιθανό να παραμορφωθεί λόγω της ανομοιόμορφης ψύξεως , με διατμητικές τάσεις ή συρρίκνωση [42].

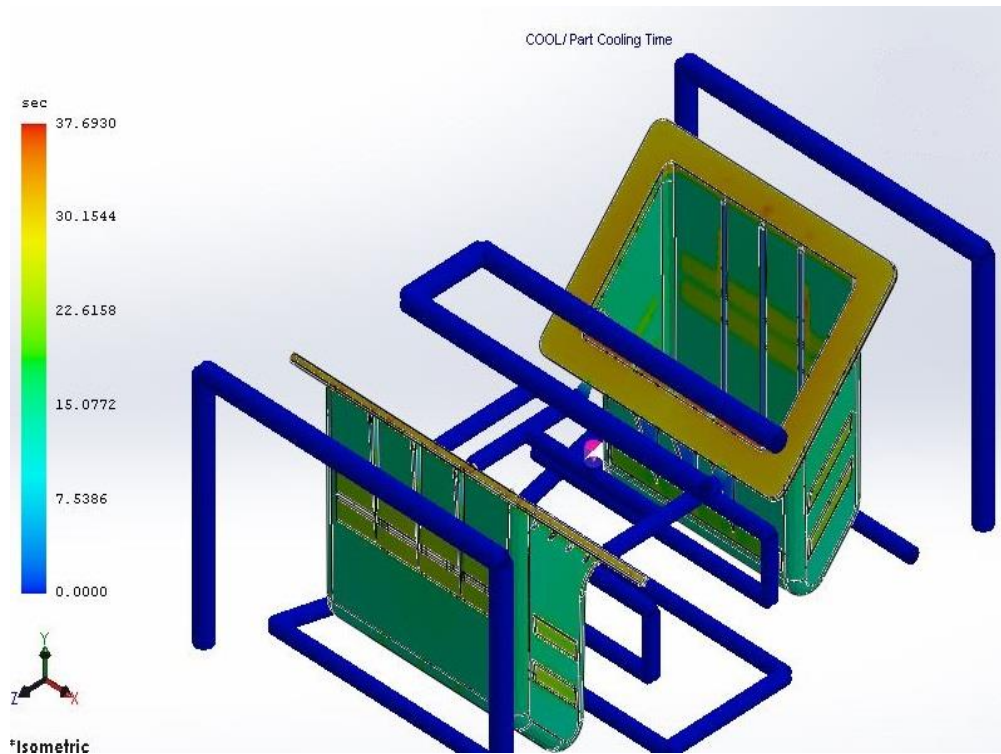
Το ίδιο αφορά και το καλούπι έγχυσης, εδώ είναι γενικά επιθυμητό να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος των επιφανειών των πυρήνων και κοιλοτήτων του καλουπιού.

Ο σχεδιασμός και οι διαδρομές των καναλιών επιβεβαιώνουν την αποτελεσματική και γρήγορη ψύξη καθώς με τη κυκλοφορία του ρευστού, όπως φαίνονται στο *γράφημα 4.12.-1*, δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη περιοχή που ψύχεται με μεγάλη καθυστέρηση. Από τα αποτελέσματα του χρόνου ψύξης παρατηρούμε ότι ισόμορφα ψύχεται το τεμάχιο και στις δυο κοιλοότητες. Στη διάρκεια της ψύξης επικρατεί ένα χαρακτηριστικό προφίλ ,όπου πρώτα ολοκληρώνεται η ψύξη στα λεπτότοιχα σημεία και τελευταία ψύχονται τα σημεία με μεγαλύτερο πάχους ή μεγαλύτερη επιφάνεια, όπως το χείλος, τα νεύρα και οι όγκοι.

Από την ανάλυση του *γραφήματος 4.12.-1* επιβεβαιώνεται ότι ο χρόνος ψύξης εξαρτάται από την γεωμετρία του αντικειμένου. Για τις περιοχές μεγάλου πλάτους τα παράλληλα κανάλια είναι επαρκή, όπως και οι σειρές για την περιοχή του συρταρωτού εξωλκέα (πατούρα) και τα σπιδράλ στο ύψος των νεύρων και της μπουκαδούρας.

Ο κατάλληλος σχεδιασμός των καναλιών πετυχαίνει μια ταυτόχρονη ψύξη όλων των παραπάνω κρίσιμων περιοχών και όπως απεικονίζεται γραφικά θα λέγαμε ότι όλες έχουν το ίδιο χρονικό αποτέλεσμα ψύξης ή ότι ψύχονται ταυτόχρονα.

Όμως παρατηρείται ανομοιομορφία στο προφίλ ψύξης τους, στα παχύτερα τοιχώματα με τις υπόλοιπες περιοχές του τεμαχίου που προϋποθέτει για μια αυξημένη θερμοκρασία στο τέλος της ψύξης πέρα από το μέσο όρο που ζητάμε. Η αιτία πιθανής συρρίκνωση, είναι ότι το προφίλ της συρρίκνωσης, είναι παρόμοιο με το προφίλ της ψύξης.

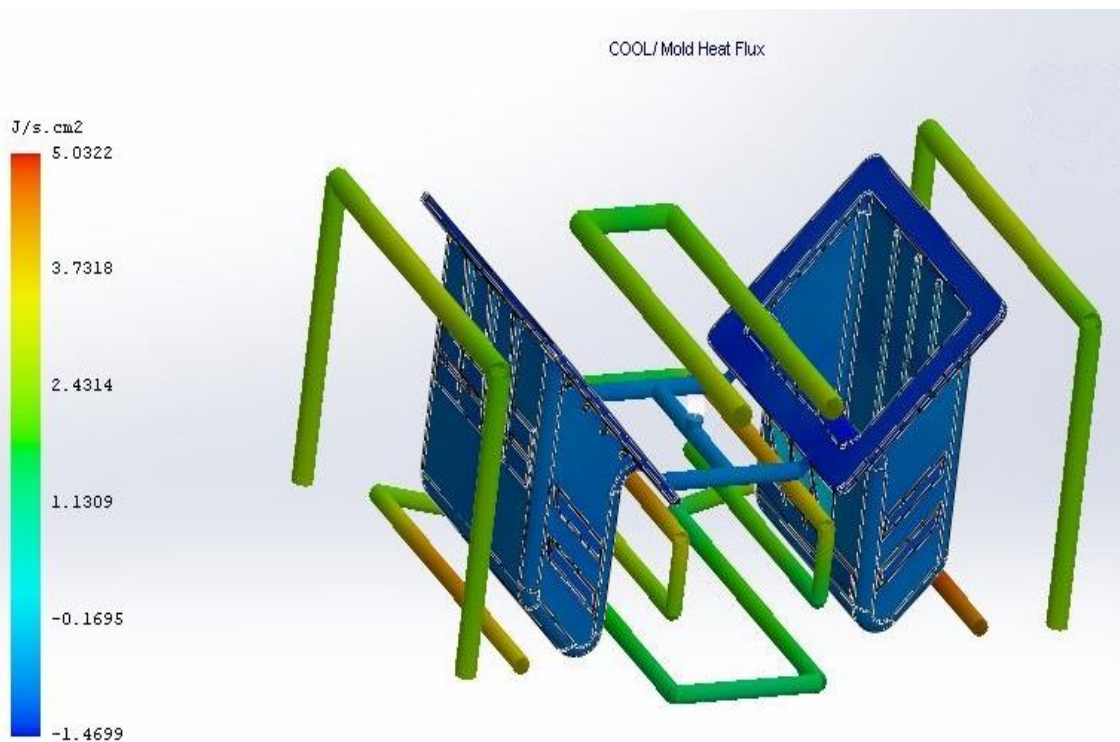


Γράφημα 4.12-1: Προσομοίωση αποτελέσματος χρόνου ψύξης, Part Cooling Time.

Για την εμβάθυνση στην ανάλυση της ποιότητας του σχεδιασμού των καναλιών χρησιμεύει το διάγραμμα αποτελεσμάτων ροής της θερμότητας των καναλιών προς το καλούπι. Η έκλυση θερμότητας Q_i από τα τοιχώματα δεν ξεπερνά τα $5 \mu W/cm^2$. Το αποτέλεσμα αξιολογεί την απόσταση των καναλιών από το τεμάχιο με κριτήριο τις λιγότερες απώλειες από το καλούπι.

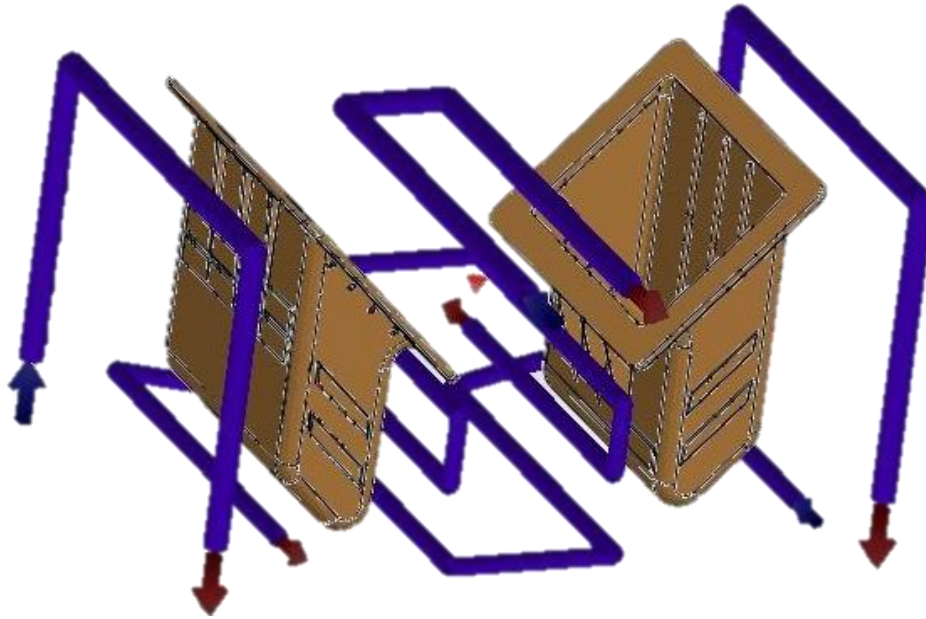
Η ομοιομορφία στο τρόπο μεταφοράς θερμότητας διακρίνεται κατά μήκος όλων των καναλιών του *γραφήματος 4.12.-2* καθώς δεν έχουμε μεγάλες διαδρομές, αφού οι σειρές διακλαδίζονται εκεί που θα ήταν επικίνδυνη η απομάκρυνση από το τεμάχιο και με συνέπεια την έκλυση θερμότητας από το καλούπι. Η πιο μεγάλη διαδρομή εντοπίζεται στην τελευταία σειρά καναλιών σπирάλ όπου παρόλο το κρίσιμο του σημείου, οι απώλειες ενέργειας είναι μηδαμινές ενώ όσες εμφανίζονται χαρακτηρίζονται από ομοιομορφία.

Παρατηρείται διαφορά απωλειών στις θέσεις εισόδου και εξόδου των καναλιών, καθώς το ψυχρό ρευστό στην αρχή είναι έτοιμο να προσφέρει την ενέργεια του σε όλο το σύστημα. Χάρη όμως στις μικρές διαμέτρους και τον κατάλληλο ρυθμό ροής το αποτέλεσμα της κατάσταση εξόδου ταυτίζεται με εκείνο της εισόδου.



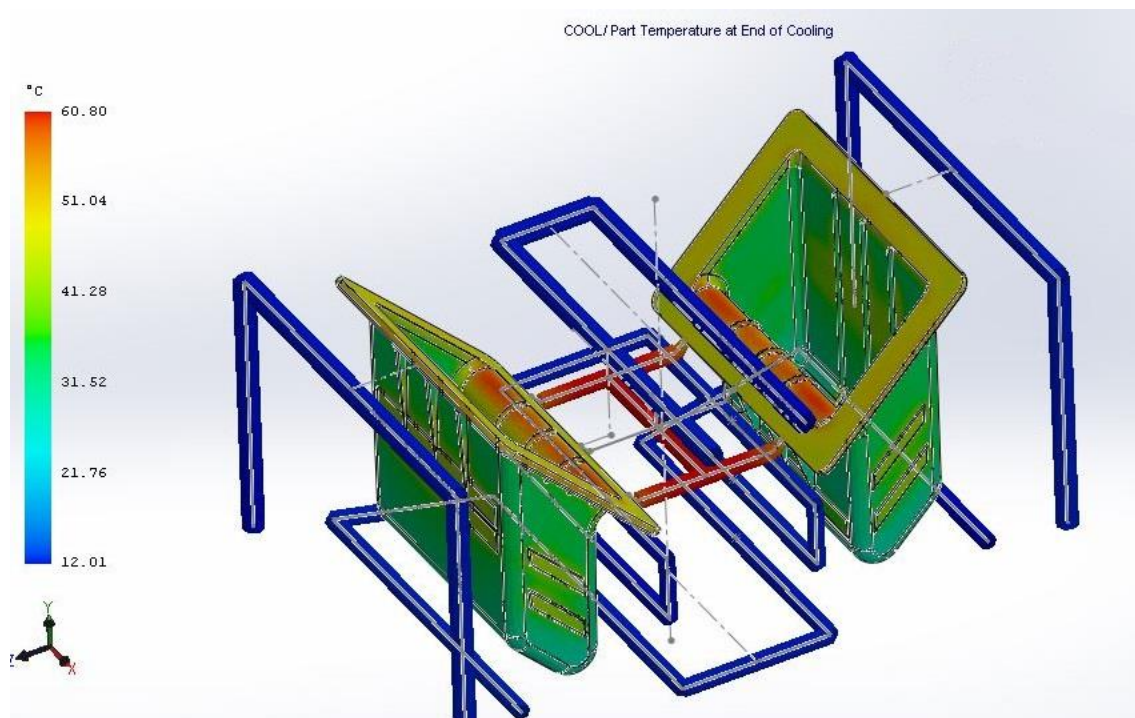
Γράφημα 4.12-2: Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας από τα κανάλια ψύξης προς το καλούπι, *Mold Heat Flux*.

Παρακάτω στο *γράφημα 4.12-3* βλέπουμε τα σημεία εισόδου και εξόδου του κάθε καναλιού ώστε να μπορούμε να τα συγκρίνουμε με το παραπάνω οπτικό αποτέλεσμα του *γραφήματος 4.12.-2*.



Γράφημα 4.12-3: Κατεύθυνση ροής ψυκτικού μέσου.

Από το γραφικό διάγραμμα 4.12.-4 της θερμοκρασίας κατά το τέλος της ψύξης λαμβάνουμε τα πιο σημαντικά συμπεράσματα για την παραμόρφωση του τεμαχίου και τα ενδεχόμενα σημάδια που θα προκύψουν στο αντικείμενο μετά την εξώλκευση του. Παρατηρείται με μέγιστο γραφικό αποτέλεσμα να ψύχεται δυσκολότερα το ράδιο του άνου χείλους. Η επιπλέον ψύξη του μπορεί να επιτευχθεί μόνο με αύξηση του χρόνου ψύξης του καθώς είναι γεωμετρικά δύσκολο να μετατοπίσουμε τα καναλιά προς εκείνη την περιοχή. Έτσι αναμένονται κατά την εξώλκευση του τεμαχίου σημάδια από τους εξωλκείς.



Γράφημα 4.12-4: Προσομοίωση θερμοκρασίας υλικού στο πέρας της ψύξης, Part Temperature at End of Cooling.

Οι 60 °C θεωρούνται ως μια ικανοποιητική θερμοκρασία εξόδου για το επιθυμητό αποτέλεσμα εφόσον κατά μέσο όρο, το τεμάχιο έχει μικρότερη θερμοκρασία από 60°C. Το σημείο της μπουκαδούρας παραμένει θερμό και όπως αναμέναμε στο σχεδιασμό των διαμέτρων των καναλιών διατηρεί υψηλές θερμοκρασίες μέχρι και το τέλος του κύκλου.

Έτσι δεν προλαβαίνει να δημιουργηθεί ψυχρή μάζα που θα οδηγούσε σε ελαττωματικό τεμάχιο μιας και η μπουκαδούρα θα κρύωνε και θα στερεοποιούταν πιο γρήγορα από ότι το όλο αντικείμενο. Επίσης κατά την εξώλκευση θα είναι πιο εύκολη η αποκόλληση του συστήματος διανομής και ο διαχωρισμός του από τα συγγενή αντικείμενα.

Όπως φαίνεται στο τελικό προϊόν που έχουμε στην *εικόνα 3.2.4-1*, υπάρχουν τα προβλεπόμενα αποτυπώματα εξωλκείων στο τεμάχιο, ακριβώς στις περιοχές που είναι παρουσιάζονται στο *διάγραμμα 4.12.3-4*.

Η έκχυση ενός υλικού σε μονάδα παραγωγής είναι ένα επαναλαμβανόμενο φαινόμενο. Η μελέτη μας και τα στοιχεία που δίνουμε στον τεχνικό είναι ένα σύνολο όχι μόνο ενός μεμονωμένου φαινομένου αλλά επάλληλων κύκλων λειτουργίας. Θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη τι επηρεάζει τον επόμενο κύκλο και πως μπορεί ο χειριστής να επέμβει ώστε να ισχύουν οι ίδιες συνθήκες και στις επόμενες φάσεις.

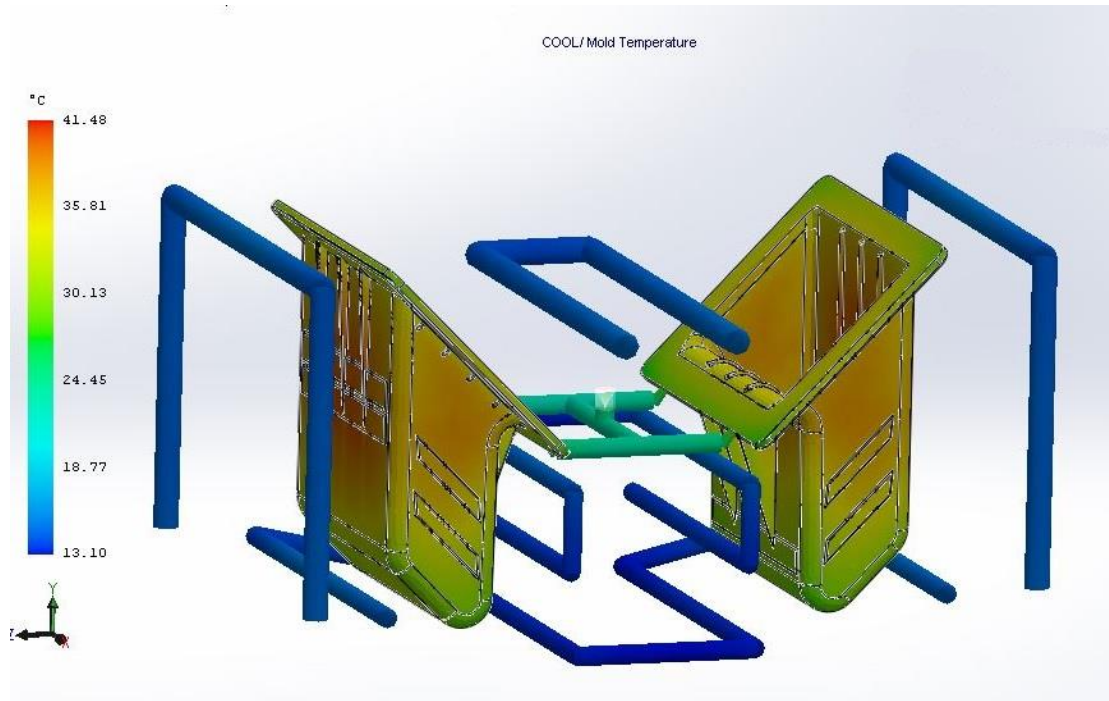
Όπως έχει διαπιστωθεί, η διαδικασία της ψύξης είναι αμφίρροπη στην πορεία της εργασίας μας. Θερμικά ποσά απορροφούνται από το υλικό αλλά και από το καλούπι. Η θερμοκρασία του καλουπιού αποτελεί βασικό παράγοντα της μοντελοποίησης της προσομοίωσης για την ανάλυση της έκχυσης. Από την πρώτη ακολουθία είχε επιλεγεί ως βέλτιστη η θερμοκρασία αυτή των 60°C. Κατά την έκχυση προφανώς η θερμοκρασία του καλουπιού αυξάνεται με την ροή θερμού υλικού. Αντιστρόφως με την είσοδο ψυχρού ρευστού γύρω από τις κοιλότητες θα παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας.

Ο παράγοντας που καθορίζει πότε σταματάει η ψύξη, είναι η θερμοκρασία εξόδου. Όμως καλούπι και πλαστικό διαφέρουν σε θερμική αγωγιμότητα. Ουσιαστικά ο χάλυβας είναι πιο εύκολο να ψύχεται από ότι η πρώτη ύλη, διότι ο χάλυβας διαθέτει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από το πολυπροπυλένιο.

Σίγουρα δεν μπορεί αυτό να γίνεται σε όλη την έκταση του καλουπιού καθώς τα κανάλια είναι σχετικά μικρής διαμέτρου και οι διαδρομές τους σχεδιασμένες στις περιοχές της κοιλότητας και όχι σε όλη την έκταση του καλουπιού. Θερμικά μονωτικά δακτυλίδια συνοδεύουν τους σωλήνες χαλκού μέχρι την κοιλότητα.

Όμως είναι απαραίτητο να ελέγξουμε τι θερμοκρασία έχει το καλούπι στο τέλος της ψύξης. Για μικρούς χρόνους ψύξης είναι πιθανό να μην επαρκεί η ψύξη του αντικειμένου για την επαναφορά του καλουπιού στους 60°C. Επειδή όμως ως θερμοκρασία εξόδου επιλέγουμε τους 60°C είναι σχεδόν απίθανο να είναι η θερμοκρασία του καλουπιού ανώτερη. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο τότε η ενέργεια είναι η αύξηση του χρόνου ψύξης ή διόρθωση του σχεδιασμού των καναλιών απομακρύνοντας τα το τεμάχιο [43].

Χάρη στην πλεγματοποίηση του καλουπιού το πρόγραμμα μας δίνει αποτελέσματα και για το τι συμβαίνει στα τοιχώματα της κοιλότητας του καλουπιού. Από το *γράφημα 4.8.3-5* παρατηρείται ότι η θερμοκρασία καλουπιού είναι κάτω από τους 60°C και βρίσκεται γύρω στους 40°C. Χρήσιμη είναι η δημιουργία ενός πίνακα αποτελεσμάτων του cooling και της θερμοκρασίας του καλουπιού.



Γράφημα 4.12-5: Προσομοίωση τελικής θερμοκρασίας καλουπιού, Mold Temperature.

Η θερμοκρασία του καλουπιού επαναφέρεται με θερμικούς εναλλάκτες πάντα στην επιθυμητή θερμοκρασία από την μηχανή για να ξεκινήσει η επόμενη φάση πλήρωσης. Εμείς όμως κρίνουμε σωστό να ενημερώσουμε τον χειριστή για αυτήν την αλλαγή μιας και εύκολα το πρόγραμμα μας δίνει αυτή τη δυνατότητα, (*πίνακα 4.12-1*), έτσι ώστε να έχει μια εικόνα ποιές ρυθμίσεις να κάνει στους εναλλάκτες.

Η θερμοκρασία του καλουπιού ήταν μεταβλητή ήδη από την Α' φάση έκχυσης και οι τιμές που επιλέχθηκαν ήταν στο εύρος 40-60°C. Όπως είχαμε αναφέρει η θερμοκρασία εξόδου και καλουπιού συνάδουν, αυτό δεν σημαίνει ότι πρέπει και να ταυτίζονται. Συνεπώς δεν την εισάγουμε στην συνάρτηση βελτιστοποίησης, διότι μόνο ο χρόνος ψύξης που μας απασχολεί εν τέλει για την βελτίωση της συνολικής διαδικασίας.

Melt Temp(°C)	Eject Temp(°C)	Min Coolant Temp(°C)	Mold Open Time(sec)	Cooling Time(sec)	Mold Temperature(°C)
240	40	22	2	75,1808	37
245	40	22	6	74,9475	37
235	40	22	10	73,6419	37
245	40	17	2	65,1152	37
240	40	17	10	64,5729	35
235	40	17	6	63,1636	36
235	50	17	10	63,1476	46
235	40	12	2	60,8958	35
245	40	12	10	60,8563	33
240	40	12	6	60,7769	34
235	50	22	2	54,5339	42
240	50	22	6	52,5451	42
245	50	22	10	52,2268	42
240	50	17	2	50,1275	41
245	50	17	6	48,9587	41
245	50	12	2	48,3289	39
235	50	12	6	46,6418	46
240	50	12	10	46,4107	35
245	60	22	2	42,9667	46
235	60	22	6	41,3559	45
240	60	22	10	41,2072	45
235	60	17	2	39,7314	44
240	60	12	2	39,6061	41
240	60	17	6	39,4007	43
245	60	17	10	39,3388	42
245	60	12	6	39,3372	41
235	60	12	10	37,693	34

Πίνακας 4.12-1: Πίνακας αποτελεσμάτων θερμοκρασίας καλουπιού στο τέλος της ψύξης.

Παρατηρούμε ότι για τους βέλτιστους χρόνους ψύξης του κάθε επιπέδου του παράγοντα θερμοκρασίας εξόδου τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας του καλουπιού είναι πάντα γύρω στο 34-35°C, που σημαίνει ότι στις βέλτιστες λύσεις το φαινόμενο είναι τόσο έντονο με αποτέλεσμα να ελαττώνεται κατά πολύ η θερμοκρασία του καλουπιού. Αντιθέτως οι υπόλοιποι παράγοντες είναι πολύ κοντά στα πλαίσια του κάθε επιπέδου με απόκλιση 5°C, εκτός από εκείνου των 60°C, και τελικά κινείται στην περιοχή 40 με 45°C. Θα έλεγε κανείς ότι το καλούπι δεν φτάνει σε ακραίες οριακές συνθήκες ώστε να το επαναφέρουμε όποτε η απόκλιση των 5-15°C από την αρχική τιμή είναι αποδεκτή.

Οι βέλτιστες τιμές που λαμβάνουμε από τα διαγράμματα μεταβολής παραγόντων και για τους τρεις παράγοντες είναι: για την θερμοκρασία εισόδου 240°C, θερμοκρασία εξόδου 60°C, θερμοκρασία ψυκτικού μέσου 12°C ενώ χρόνος που το καλούπι παραμένει ανοικτό 6 sec. Ο προβλεπόμενος βέλτιστος χρόνος ψύξης είναι 37,6 sec.

4.13. Αρχικές ενέργειες πειράματος συγκράτησης

Το πρόγραμμα με την εντολή *FLOW-PACK* εκτελεί σε σειρά την προσομοίωση πλήρωση-συγκράτησης. Δεν υπάρχει εντολή που εκτελεί μόνο το *PACK*, εφόσον δεν μπορεί να υφίσταται συγκράτηση δίχως πλήρωση. Τα στοιχεία από τα οποία αντλούμε πληροφορίες από την καρτέλα αποτελεσμάτων της ανάλυσης *PACK*, είναι στην ουσία μια συνέχεια του φαινομένου της πλήρωσης, οπότε πολλά διαγράμματα προκύπτουν ίδια από την Β' ακολουθία γεμίσματος.

Από τα υπάρχοντα διαγράμματα αποτελεσμάτων της πλήρωσης έγινε εμφανές ότι προβλήματα λειψού αντικειμένου δεν υπάρχουν. Ο σχεδιασμός του καλουπιού είναι άψογος, τόσο στην γεωμετρία του αντικειμένου, όσο και στο σύστημα διανομής αλλά και στις εξαερώσεις του. Επομένως η πίεση συγκράτησης δεν θα έχει ως στόχο να γεμίσει ολοκληρωτικά την κοιλότητα. Εάν παρατηρούταν κάτι τέτοιο στην μελέτη μας θα περιλαμβανόταν στη φάση της συγκράτησης χρονικό τμήμα που θα αντιστοιχούσε για επιπλέον συμπλήρωση υλικού.

Η ανάγκη της εφαρμογής της μεταγενεστέρας πίεσης είναι λοιπόν σε αυτή τη περίπτωση μελέτης επιτακτική για την μείωση των παραμορφώσεων και των συρρικνώσεων. Διασαφηνίζεται ότι παραμορφώσεις και συρρικνώσεις έχουν συναφή αιτίες και αποτελέσματα. Οπότε η διερεύνηση για τις συρρικνώσεις είναι ταυτόσημη με εκείνη των παραμορφώσεων (διατμητικών τάσεων). Η δυσκολία ανάγνωσης των οπτικών αποτελεσμάτων για τις παραμορφώσεις κρύβει ένα κίνδυνο για την απόδοση τιμών σε συνάρτηση παραγόντων.

Η λογική της αποδοχής αποτελεσμάτων της πίεσης συγκράτησης ξεκινά ήδη από την φάση του σχεδιασμού, όπου το καλούπι σχεδιάζεται για αποκλίσεις 2-3,5% της αρχικών του διαστάσεων. Με την μεγαλύτερη απόκλιση στα τοιχώματα μεγάλου πάχους και την μικρότερη απόκλιση σε χαρακτηριστικές όπως είναι τα νεύρα και τα gussets.

4.14. Μεταβλητές, σταθεροί παράγοντες και αποτελέσματα πειράματος συγκράτησης

4.14.1. Μεταβλητές πειράματος συγκράτησης

Παρακάτω παρατίθενται οι μεταβλητές του πειράματος:

- **Χρόνος πίεσης συγκράτησης**

Ο χρόνος συγκράτησης είναι πάντα στην κρίση του χειριστή. Ιδιαίτερα οι αυξομειώσεις του χρόνου συγκράτησης μπορούν να βελτιώσουν ή να χειροτερέψουν κατά πολύ την ποιότητα του αντικειμένου όπως π.χ το εύρος σφαλμάτων συρρίκνωσης και παραμορφώσεων μέχρι και την εντατικοποίηση των sink marks. Ένας μικρός χρόνος συγκράτησης δεν μπορεί να λύσει ουσιαστικά τα προβλήματα της συρρίκνωσης. Ειδικά όταν ακόμα και με την αύξηση πίεσης δεν παρατηρούμε θετικά αποτελέσματα ο χρόνος καλείται να επέμβει δραστικά. Από την άλλη πλευρά ένας μεγάλος χρόνος συγκράτησης επιβαρύνει τον κύκλο της μηχανής. Αν κρίνει κανείς ότι στο σημείο τροφοδοσίας το υλικό κάποια στιγμή παγώνει και στερεοποιείται είναι ανώφελος ο παρατεταμένος χρόνος συγκράτησης [44]. Τυπικά λαμβάνουμε ως οριακή συνθήκη τα 9 και μια ανώτερη τιμή στα 13 sec, με την λογική ότι ο χρόνος συγκράτησης πρέπει να είναι πολλαπλάσιος του χρόνου γεμίματος καθώς στην έκχυση η ροή δεν συναντά αντίσταση χαμηλού ιξώδους ενώ στην συγκράτηση η αντίσταση της ροής λόγω του συμπληρωμένου υλικού είναι μεγαλύτερη. Δίνουμε τυπικά μια τιμή τριπλάσιου και τετραπλάσιου χρόνου συγκράτησης. Επειδή ο χρόνος συγκράτησης είναι αποτελεσματικότερος όταν είναι μεγαλύτερος αλλά όχι και παρατεταμένος, επιλέγουμε τα 17sec σαν μια maximum τιμή, ώστε να εντοπίσουμε γύρω από ποια τιμή εμφανίζεται η συρρίκνωση να είναι χαμηλότερη. Τονίζουμε ότι ο χρόνος συγκράτησης και τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων είναι στην κρίση του κάθε χειριστή σε σχέση με τη ποιότητα υλικού επιθυμεί. Εμείς σε αυτή τη πειραματική δοκιμασία προσπαθούμε να δώσουμε μια συνολική εικόνα για το ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την συρρίκνωση και από ποια τιμή και πάνω τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά.

- **Πίεση συγκράτησης ή Μεταγενεστέρα**

Ανατρέχουμε στην βιβλιογραφία [45] και διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη πίεση συγκράτησης εισάγεται ποσοστιαία αναλόγως με την πίεση έκχυσης. Τα ποσοστά έχουν ως ανώτατα όρια τα 80% και χαμηλότερα τα 60%. Αυτό που πρέπει να ελέγξουμε είναι ότι σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να ξεπερνάμε το όριο της μηχανής. Η πίεση συγκράτησης είναι ένας παράγοντας που καθορίζει την αλλαγή προβλημάτων όπως είναι η ένωση υλικού και η τυρβώδης ροή. Μεταγενεστέρα με υψηλές τιμές συμβάλλει στη επιδείνωση και στη δημιουργία εσωτερικών τάσεων. Επίσης προβλήματα όπως το προέκταμα μπορεί να οφείλονται στην υψηλή πίεση μεταγενεστέρας. Το προφίλ της πίεσης, όπως φαίνεται στην *εικόνα 4.14.2-1* είναι σταθερής παροχής για ημικρυσταλλικά πλαστικά.

- **Θερμοκρασία υλικού**

Η λογική που ακολουθείτε στην εργασία βασίζεται στην χρήση σε κάθε πειραματική δοκιμασία στον οδηγό πιλότο μεταβλητών, που είναι η θερμοκρασία τήξης. Όπως αναλύθηκε και αποφασίστηκε, αυτή αποτελεί τον πλέον αστάθμητο παράγοντα για τον χειριστή, που τον οδηγεί να αλλάζει όλες τις άλλες ρυθμίσεις στην μηχανή, με βάση τις μεταβολές που έχει στις θερμοκρασίες ζωνών του κοχλία. Όπως είναι αναμενόμενο, θα είναι πρώτη σε σειρά προτεραιότητας έναντι των άλλων μεταβλητών και θα εισαχθεί στον πίνακα πειραματικών δοκιμών με εύρος τιμών που επιλέχθηκε προς έλεγχο από την Β' ακολουθία πλήρωσης μεταξύ 235-240-245°C. Το εύρος της θερμοκρασίας όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα κόμβου θερμοκρασιών δεν επηρεάζει το *pure cooling time*. Όμως σίγουρα η θερμοκρασία σε συνδυασμό με την πίεση επηρεάζουν αποτελέσματα χρόνου και ποιότητας. Ένας συνδυασμός αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραπάνω με την θερμοκρασία θα είχε ενδιαφέρον ως προς τα αποτελέσματα.

4.14.2. Σταθερές τιμές πειράματος συγκράτησης

Παρακάτω παρατίθενται οι μεταβλητές του πειράματος:

- **Σημείο αλλαγής φάσης έκχυσης- εφαρμογής συγκράτησης**

Όπως είναι γνωστό, ο χρόνος ψύξης και ο χρόνος πίεσης συγκράτησης ξεκινάει με το πέρας της πλήρωσης. Όπως το επιλέξαμε από την φάση της έκχυσης το σημείο αλλαγής έκχυσης-συγκράτησης (*switch off point*) είναι στο 100% της φάσης. Άρα πίεση συγκράτησης και η ψύξη εναρμονίζονται με σκοπό την στερεοποίηση του υλικού.

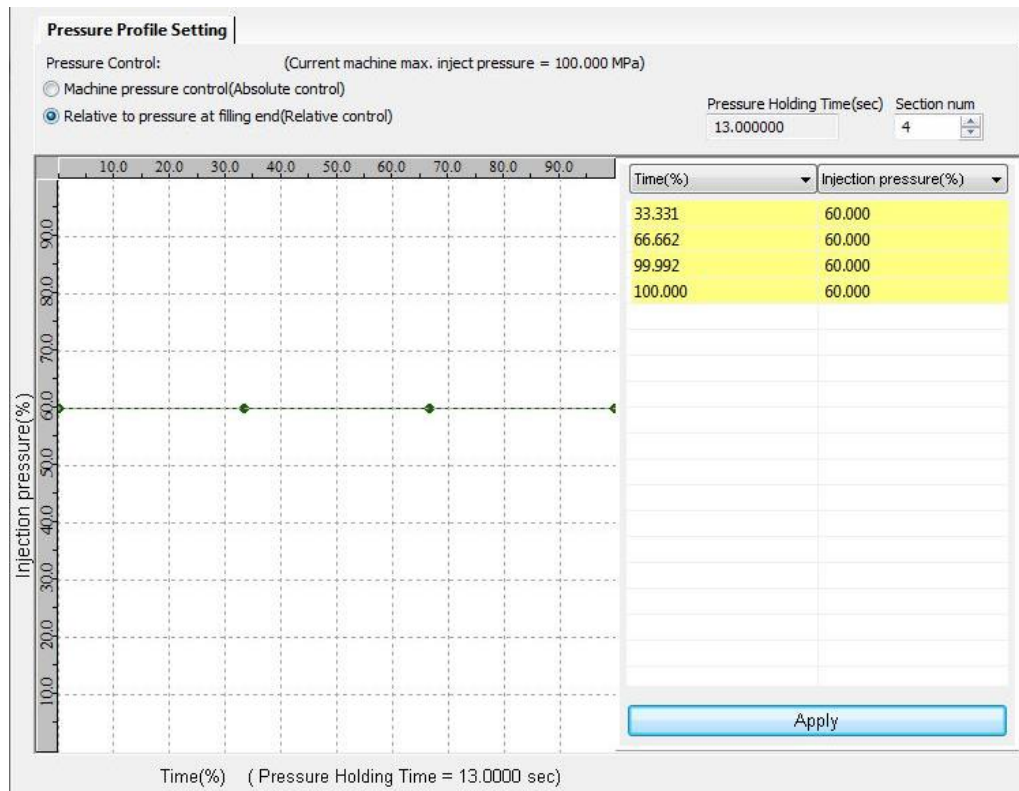
- **Καθαρός χρόνος ψύξης**

Ένα τμήμα του χρόνου ψύξης που ονομάζεται «καθαρού χρόνου ψύξης» (*Pure Cooling Time*) είναι υπεύθυνο για το σημείο της πλαστικοποίησης του υλικού. Αυτός ο χρόνος καθορίζεται από το σημείο κρυστάλλωσης της πύλης του αντικειμένου (*gate freeze off*). Είναι προφανές θερμοκρασίες και σημεία κρυστάλλωσης σε κάθε σημείο είναι διαφορετικές. Ο χειριστής ρυθμίζει το χρόνο της πίεσης συγκράτησης, που εφαρμόζεται σε όλο αντικείμενο. Η τιμή του καθαρού χρόνου ψύξης για το κάθε κόμβο ελέγχεται από το πρόγραμμα αυτόματα μέσα από τα διαγράμματα κόμβων-θερμοκρασιών και για αυτό αφήνουμε στην πειραματική διαδικασία αυτή την τιμή ως αυτομάτως σταθερή, επιτρέποντας τον χρόνο συγκράτησης να λειτουργήσει ως μεταβλητή. Είναι επιλογή τύπου ελέγχου της διαδικασίας και γίνεται από το χειριστή μέσω του χρόνου πίεσης συγκράτησης

Στον πίνακα 4.14.2-1, παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι μεταβλητές του πειράματος:

Μεταβλητές Α΄ Φάσης Πλήρωσης	0	1	2
Inlet Melt Temperature(°C)	235	240	245
Holding Pressure (% Mpa)	60	70	80
Holding Pressure Time(sec)	9	13	17

Πίνακας 4.14.2-1: Συγκεντρωτικός πίνακας μεταβλητών φάσης συγκράτησης και τιμών των επιπέδων



Εικόνα 4.14.2-1: Προφίλ συγκράτησης ρύθμιση παραμέτρων λειτουργίας του κοχλία στο Plastics.

Σταθερές διατηρούνται όλες οι παράμετροι της έκχυσης, (εκτός της θερμοκρασίας εισόδου, που θα εξεταστεί) με τις βέλτιστες τιμές, όπως προέκυψαν στην Β΄ ακολουθία του πειράματος έκχυσης.

4.14.3. Επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα και τοποθέτηση των παραγόντων

Για την κατασκευή των πειραμάτων, θα επιλέξουμε ορθογώνιο πίνακα Taguchi, ο οποίος να περιέχει τρεις παραμέτρους ως μεταβλητές, τριών επιπέδων η καθεμία. Με ενδιαφέρον αναμένονται οι αλληλεπιδράσεις των θερμοκρασιών τήγματος με τον χρόνο και την πίεση της μεταγενεστέρας. Δεν κρίνεται σκόπιμο να ελέγξουμε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεταγενεστέρας και χρόνου αφού γνωρίζουμε ότι δεν υπάρχει καμία επίδραση στο αποτέλεσμα της δεύτερης. Η αλληλεπίδραση τους θα είναι αυξητικής μεταβολής προς το βέλτιστο αποτέλεσμα. Δεν αναμένουμε κάποια άλλη αλλαγή. Για $3^3=27$ επαναλήψεις η χρήση του L18 (πίνακας 4.14.3-1), κρίνεται ικανοποιητική για την ανάλυση και θα μας επιτρέψει να εξετάσουμε δυο αλληλεπιδράσεις αφήνοντας μια στήλη που δεν σχετίζεται με κάποια φαινομενική αλληλεπίδραση για στατιστική ανάλυση σφάλματος από Ανονα.

No.	Melt Temp	Holding Pressure	Packing Holding Time	AB	A2B	AC	A2C	E1
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	1	1	1
3	0	1	2	1	1	2	2	2
4	0	1	0	1	1	0	0	1
5	0	2	1	2	2	1	1	2
6	0	2	2	2	2	2	2	0
7	1	0	1	1	2	2	0	0
8	1	0	2	1	2	0	1	1
9	1	1	0	2	0	1	2	2
10	1	1	2	2	0	0	1	2
11	1	2	0	0	1	1	2	0
12	1	2	1	0	1	2	0	1
13	2	0	1	2	1	0	2	2
14	2	0	2	2	1	1	0	0
15	2	1	0	0	2	2	1	1
16	2	1	2	0	2	1	0	1
17	2	2	0	1	0	2	1	2
18	2	2	1	1	0	0	2	0

Πίνακας 4.14.3-1: Πίνακας Taguchi πειραμάτων συγκράτησης.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 4.14.3-2, με τις μεταβλητές να έχουν τις πραγματικές τιμές τους, ανάλογα με το επίπεδό τους:

No.	Melt Temp	Holding Pressure	Packing Holding Time	AB	A2B	AC	A2C	E1
1	235	60	9	0	0	0	0	0
2	235	60	13	0	0	1	1	1
3	235	70	17	1	1	2	2	2
4	235	70	9	1	1	0	0	1
5	235	80	13	2	2	1	1	2
6	235	80	17	2	2	2	2	0
7	240	60	13	1	2	2	0	0
8	240	60	17	1	2	0	1	1
9	240	70	9	2	0	1	2	2
10	240	70	17	2	0	0	1	2
11	240	80	9	0	1	1	2	0
12	240	80	13	0	1	2	0	1
13	245	60	13	2	1	0	2	2
14	245	60	17	2	1	1	0	0
15	245	70	9	0	2	2	1	1
16	245	70	17	0	2	1	0	1
17	245	80	9	1	0	2	1	2
18	245	80	13	1	0	0	2	0

Πίνακας 4.14.3-2: Πίνακας Taguchi με τιμές των μεταβλητών.

Στη συνέχεια πραγματοποιούνται τα πειράματα. Τα αποτελέσματα, καθώς και η στατιστική ανάλυσή τους, παρουσιάζονται ακολούθως.

4.14.4. Αποτελέσματα και επιλογή βέλτιστης περίπτωσης πειράματος συγκράτησης

4.14.4.1. Πρωτογενή αποτελέσματα

Τα πρωτογενή αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται παρακάτω:

No.	Srinkage(%)
1	4,1448
2	2,0433
3	2,9677
4	4,0262
5	3,3013
6	2,9402
7	3,9316
8	3,386
9	4,408
10	3,1886
11	4,0945
12	3,5025
13	3,7684
14	3,2834
15	4,9619
16	3,2506
17	4,4053
18	3,2767

Πίνακας 4.14.4.1-1: Πρωτογενή αποτελέσματα πειράματος φάσης συγκράτησης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα 4.14.4.1-1 μπορούμε να έχουμε μία πρώτη εικόνα της ανάλυσης των πειραμάτων. Δεν είναι όλες οι τιμές στον προβλεπόμενο σχεδιασμό, περίπου το 50% των αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητικά και ανεκτά οριακά. Προφανώς δεν έχουμε κάποια ένδειξη υπερβολικής συρρίκνωσης ή τάσεων, καθώς τα 4-5% είναι όρια μη επιθυμητά αλλά δείχνουν τάση βελτίωσης στα αποδεκτά όρια με ορισμένες διορθωτικές κινήσεις.

4.15. Επιλογή βέλτιστων τιμών παραμέτρων

Από τα πρωτογενή αποτελέσματα, ταξινομούμε τον πίνακα 4.15-1 κατά βέλτιστο ελάχιστο ποσοστό συρρίκνωσης αφού είναι προφανές ποιοι παράγοντες συνεισφέρουν κατά το μέγιστο στο αποτέλεσμα.

Χωρίς να γίνουν τα διαγράμματα μεταβολής παραγόντων και η στατική ανάλυση είναι ξεκάθαρο ότι ο παράγοντας του χρόνου μεταγενεστερά συμβαδίζει με την βελτιστοποίηση του συρρίκνωσης από επίπεδο σε επίπεδο, με απαγορευτικές τις τιμές των 9 sec, αφού είναι προφανές ότι αυτό θα δημιουργούσε αποκλίσεις από μια καλή ποιότητα.

No.	Melt Temp	Holding Pressure	Packing Holding Time	AB	A2B	AC	A2C	E1	Srinkage(%)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	4,96
2	0	0	1	0	0	1	1	1	4,41
3	0	1	2	1	1	2	2	2	4,41
4	0	1	0	1	1	0	0	1	4,14
5	0	2	1	2	2	1	1	2	4,09
6	0	2	2	2	2	2	2	0	4,03
7	1	0	1	1	2	2	0	0	3,93
8	1	0	2	1	2	0	1	1	3,77
9	1	1	0	2	0	1	2	2	3,50
10	1	1	2	2	0	0	1	2	3,39
11	1	2	0	0	1	1	2	0	3,30
12	1	2	1	0	1	2	0	1	3,28
13	2	0	1	2	1	0	2	2	3,27
14	2	0	2	2	1	1	0	0	3,25
15	2	1	0	0	2	2	1	1	3,18
16	2	1	2	0	2	1	0	1	2,96
17	2	2	0	1	0	2	1	2	2,94
18	2	2	1	1	0	0	2	0	2,04

Πίνακας 4.15-1: Πίνακας επιπέδων μεταβλητών και τελικού αποτελέσματος πειράματος συγκράτησης, με επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος.

4.16. Ανάλυση ευαισθησίας

Για να δούμε τη συμμετοχή του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα, πραγματοποιούμε την στατιστική ανάλυση ANOVA. Παρακάτω παρουσιάζεται ο συμπληρωμένος πίνακας ANOVA:

ANOVA	Y	Df	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	Fx	Sx	ρ%
A	19,4235	2	1,230	no			0,614815		38,796	1,198	16,386
	22,5112										
	22,9463										
B	20,5575	2	0,423	no			0,211512		13,347	0,391	5,353
	22,803										
	21,5205										
C	26,0407	2	4,924	no			2,462249		155,373	4,893	66,928
	19,8238										
	19,0165										
AB		4	0,144	no			0,03591		2,266	0,080	1,098
AXB	21,9976	2	0,136								
	21,9935										
	20,8899										
A2XB	21,4667	2	0,008								
	21,6427										
	21,7716										
AC		4	0,526	no			0,131579		8,303	0,463	6,332
AXC	21,7907	2	0,458								
	20,3811										
	22,7092										
A2XC	22,1391	2	0,068								
	21,2864										
	21,4555										
E1	21,6712	2	0,063	yes	2	0,063	0,031695	0,031695			
	21,1705										
	22,0393										
SUM			7,310		2			0,015847			96,09804

Πίνακας 4.16-1: Πίνακας ANOVA μεταβλητών πειράματος συγκράτησης.

Για τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι τύποι τριών επιπέδων. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω:

$$Sx = \left[\frac{(Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2)}{n/2} \right] - \left[\frac{r^2}{n} \right], (11\alpha)$$

$$Vx = \frac{Sx}{dFx}, (11\beta)$$

$$Ve = \frac{Se}{dFe}, (11\gamma)$$

$$Vetott = \frac{\sum Se}{\sum dFe}, (11\delta)$$

$$Fx = \frac{Vx}{Vetot}, (11\epsilon)$$

$$S'x = Sx - (dFx \times Vetot), (11\zeta)$$

$$\rho_X = \frac{S'x}{\sum Sx} \times 100\%, (11\eta)$$

, με n =18, dFx=2 ,dFe=2 , ΣdFe=2

4.17. Συζήτηση αποτελεσμάτων πειράματος συγκράτησης

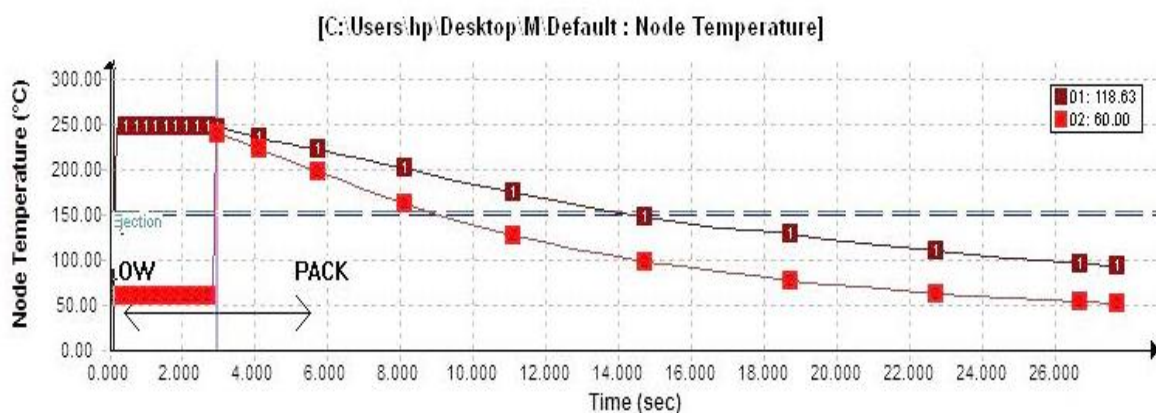
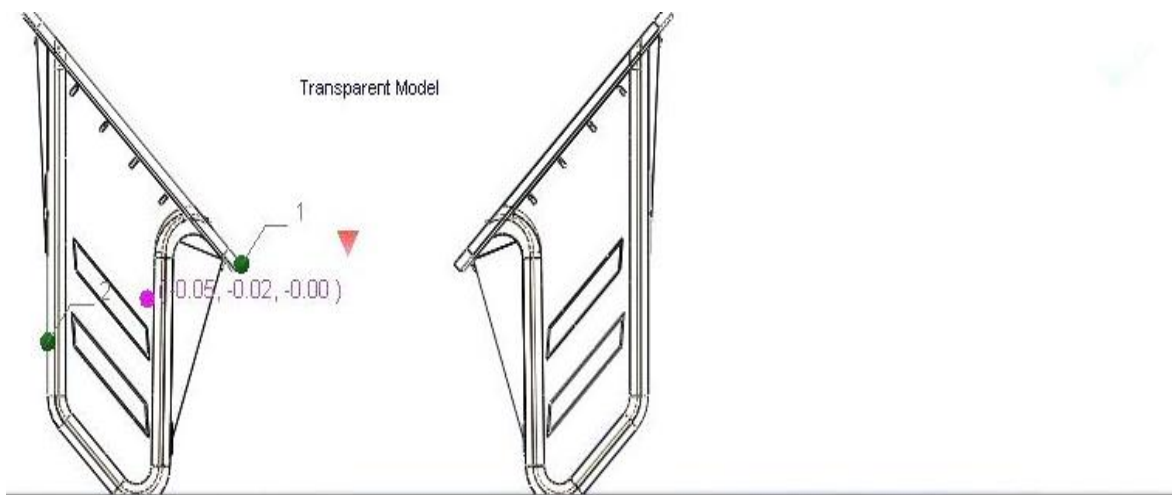
Παρατηρούμε ότι όλοι οι επιλεγμένοι παράγοντες επηρεάζουν το αποτέλεσμα της συγκράτησης. Αυτό είναι μια ένδειξη καλής επιλογής παραγόντων. Αφού ήταν αναμενόμενο καθώς χρησιμοποιήσαμε όλο το εύρος δυνατοτήτων, που μας παρείχε το πρόγραμμα.

Οι παράγοντες συμμετέχουν συνολικά κατά 96% στο αποτέλεσμα που είναι ένα ικανοποιητικό ποσοστό επιτυχίας της πειραματικής δοκιμασίας. Ο παράγοντας θερμοκρασία εισόδου και η αλληλεπίδραση θερμοκρασίας χρόνου συγκράτησης είναι στατιστικά σημαντικός για σημαντικότητα 95% (με τιμή ορίου 19.00/ 6.94 αντίστοιχα), ο παράγοντας χρόνος συγκράτησης για σημαντικότητα 99% (με τιμή ορίου 99.00) και για σημαντικότητα κάτω του 90% είναι ο παράγοντας της μεταγενεστέρας και της αλληλεπίδρασης της με την θερμοκρασία εισόδου (με τιμή ορίου 9 και 4.32 αντίστοιχως). Άλλωστε το ποσοστό επίδρασης αυτού του παράγοντα και της αλληλεπίδρασης στο αποτέλεσμα είναι χαμηλό. Το γεγονός αυτό κάνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης στατιστικά αξιόπιστα άρα και αξιοποιήσιμα.

Αυτό σημαίνει ότι το υψηλότερο ποσοστό κατά 66% που το λαμβάνει ο παράγοντας χρόνου συγκράτησης με μεγάλη στατιστική ισχύ μπορούμε να το εμπιστευτούμε. Ο παράγοντας θερμοκρασίας εισόδου καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση κατά 16% στην μεταβολή του αποτελέσματος. Ενώ ο παράγοντας της μεταγενεστέρας μετέχει με τη χαμηλότερη ισχύ του 5%.

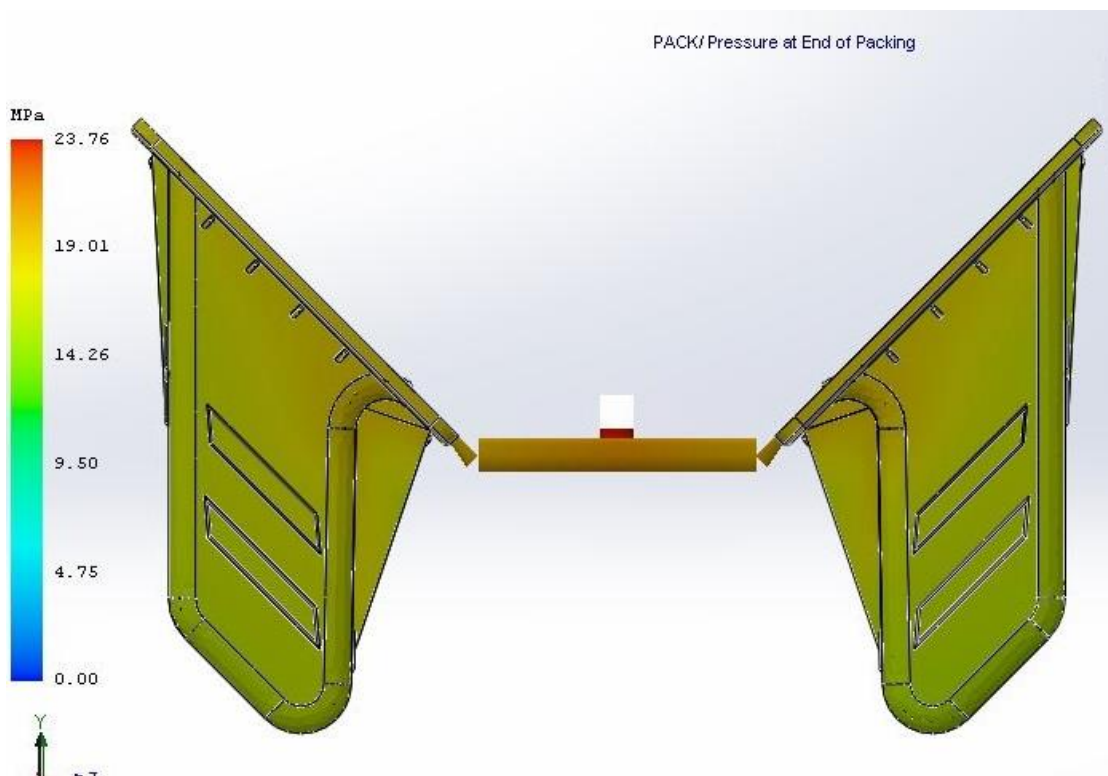
Η μεταγενεστέρα σε μια κοιλότητα κατά την διάρκεια της συγκράτησης ελέγχεται από τον περιστρεφόμενο κοχλία. Η ταχύτητα με την οποία εκχέει το υλικό ο κοχλίας επηρεάζει τα αποτελέσματα. Η σωστή διάχυση του υλικού σε όλη την κοιλότητα και η βέλτιστη πτώση πίεσης προκύπτει όταν χρησιμοποιήσουμε το τήγμα σε χαμηλές ταχύτητες. Έτσι μπορούμε με χαμηλή ταχύτητα σταθερού προφίλ να ελέγχουμε την έκχυση αλλά και την συγκράτηση με αποτέλεσμα στο τέλος του σιδερώματος να παρατηρούμε σταθερή πίεση σε όλο το αντικείμενο. Αυτή η ομοιομορφία δηλώνει την επιτυχία στην επιλογή της πίεσης καθώς η ομοιογενοποίηση εξαρτάται από τις διαφορές πιέσεων που επικρατούν στο υλικό. Αυτή η πτώση πίεσης είναι συνάρτηση του μήκους της ροής του πάχους των τοιχωμάτων και της βισκοελαστικότητας του υλικού. Συνήθως στα λεπτότοιχα τοιχώματα απαιτούνται υψηλές πιέσεις, ώστε η αντίσταση της ροής να είναι μεγαλύτερη στις λεπτές διατομές. Εάν η πίεση είναι πάρα πολύ υψηλή μπορεί αυτό να δημιουργήσει προβλήματα επιφανειακών ατελειών. Εάν η πίεση είναι πολύ χαμηλή προκαλεί αδυναμία κάλυψης εσωτερικών κενών [46].

Ας δούμε χαρακτηριστικά τη διαφορά που υπάρχει στο τελευταίο σημείο που γίνεται η πλήρωση με το σημείο της εισόδου :



Γράφημα 4.17-1:Διάγραμμα θερμοκρασίας κόμβων, Node Temperature XY Plot.

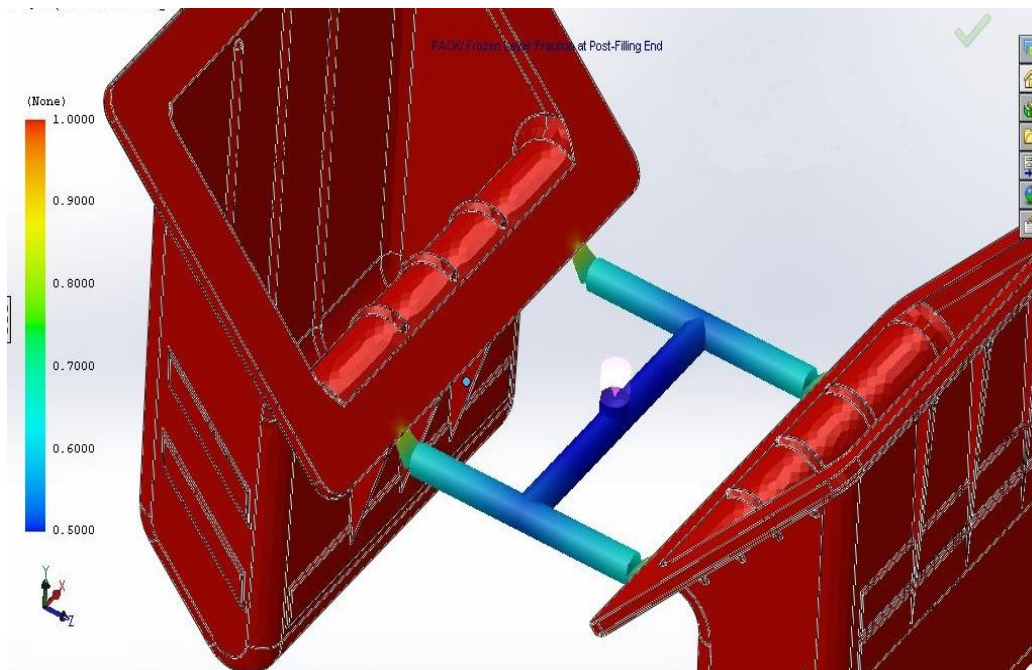
Όπως είναι προφανές στο *γράφημα 4.17-1* για το σημείο τελική πλήρωσης, ο χρόνος που απαιτείται για να κρυσταλλωθεί είναι μικρότερος εκείνου της πύλης. Σε 14 sec η θερμοκρασία του υλικού ταυτίζεται με τη θερμοκρασία T_g του πολυπροπυλενίου στη θέση της πύλης. Το να παγώνει τελευταία η πύλη αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του ρεολογικού υπολογισμού καθώς και του σχεδιασμού του καλουπιού. Οι χρόνοι των 9 sec δεν παρέχουν επαρκή συγκράτηση σε αντίθεση με τους χρόνους από 13 sec και άνω, εφόσον τότε έχει προλάβει να στερεοποιηθεί το υλικό και στη θέση της πύλης. Όσο παγώνει το υλικό τελευταίο στην είσοδο θα παρατηρούνται μεγαλύτερες συρρικνώσεις μόνο στην μπουκαδούρα κάτι που δεν μας ενοχλεί εφόσον αυτή αποτελεί φύρα στην παραγωγή. Ως βέλτιστο χρόνο θα δίνουμε στον χειριστή τα 17 sec.



Γράφημα 4.17-2: Προσομοίωση πίεσης μετά από συγκράτηση, Pressure at End of Packing.

Η πίεση συγκράτησης γίνεται με επιτυχία. Το προφίλ της χαρακτηρίζεται από ομοιομορφία και στις δύο κοιλοότητες, όπως αυτό φαίνεται στο *γράφημα 4.17-2* και η πίεση είναι παντού η ίδια σε όλο το τεμάχιο. Η διαφορά πίεσης από το αποτέλεσμα του filling είναι ελάχιστη. Αυτό σημαίνει ότι χάρη στην σχετικά μεγάλη διάμετρο και στην βέλτιστη ταχύτητα, η έκχυση πληρώνει το υλικό σε όλες τις κοιλοότητες ενώ δεν υπάρχουν απαιτήσεις για συγκράτηση ή για επέκταση του υλικού, για αυτό προκύπτει το χαμηλό ποσοστό της πίεσης.

Όταν το πλαστικό τήγμα έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα της μήτρας, ένα λεπτό στρώμα του τήγματος παγώνει αμέσως κατά μήκος του τοιχώματος της κοιλότητας. Αυτό το στρώμα του στερεοποιημένου πλαστικού ονομάζεται «κατεψυγμένο στρώμα». Η μέτρηση του στο *διάγραμμα 4.17-3* γίνεται με ένα κλάσμα, διότι η πλειοψηφία του πλαστικού που βρίσκεται στον κεντρικό πυρήνα του τμήματος τοιχώματος παραμένει τετηγμένο. Τη στιγμή που η κοιλότητα γεμίζει πλήρως, κυρίως το παγωμένο στρώμα πιο κοντά στο τέλος της θέσης της πύλης θα είναι παχύτερο από το παγωμένο στρώμα στην περιοχή γύρω από το τέλος του γεμίσματος. Αυτό συμβαίνει επειδή το παγωμένο στρώμα που είναι κοντά στο τέλος της πύλης έχει έρθει σε επαφή με το κρύο τοίχωμα του καλουπιού για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι το παγωμένο στρώμα γύρω από το τέλος του γεμίσματος. Το μεγαλύτερο μέρος του τμήματος θα πρέπει εμφανίζεται με κόκκινο. Οι τιμές που δίνονται για το «κατεψυγμένο στρώμα» στη συγκράτηση δείχνουν το ποσοστό του τμήματος του αντικειμένου που έχει στερεοποιηθεί τα τμήματα στο τέλος του γεμίσματος, τα οποία μπορεί να είναι κατά 80 % στερεοποιημένα.



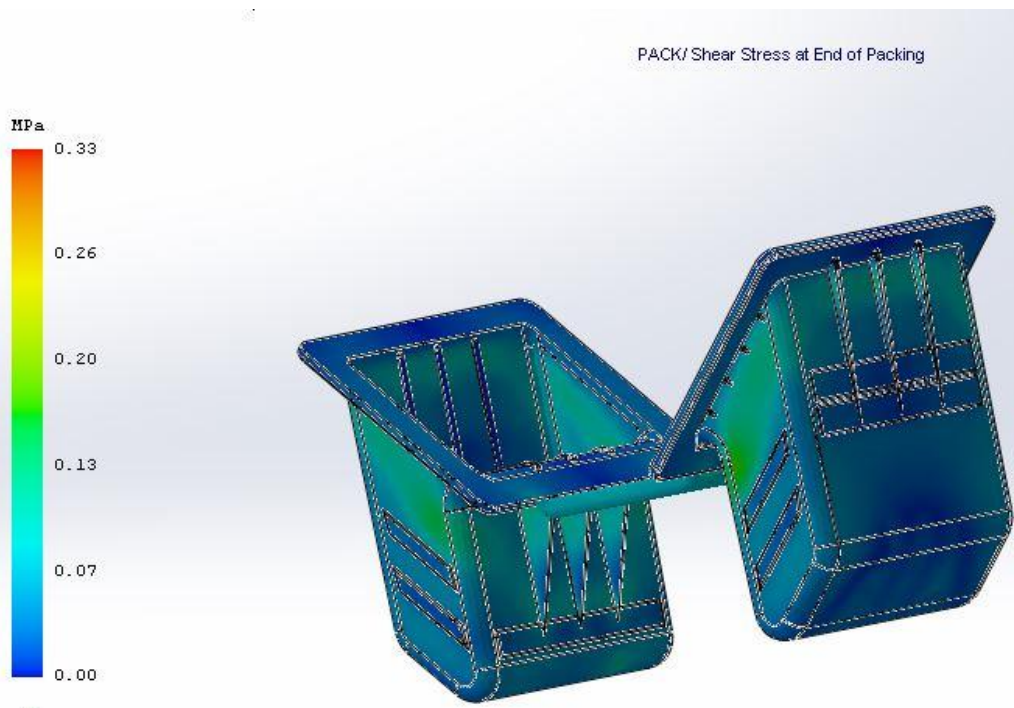
Γράφημα 4.17-3: Προσομοίωση αποτελέσματος ψυχρού στρώματος ροής, Frozen Layer Fraction.

Το σημείο φραγμού εξαρτάται καθαρά από την θερμοκρασία του τήγματος, κάθε θερμοκρασία έχει τη δική της καμπύλη κρυστάλλωσης. Τα σημεία κρυστάλλωσης διαφοροποιούνται για το κάθε σημείο, για κάθε διαφορετικό χρόνο εφαρμογής της πίεσης. Επειδή οι διαφορές των χρόνων δεν ήταν μεγάλου εύρους, οι καμπύλες αυτές δεν ήταν κατά πολύ μετατοπισμένες. Παρόλο αυτά το υψηλότερο κλάσμα στερεοποίησης το έχει η μικρότερη θερμοκρασία. Δεν αναμένουμε μετέπειτα συρρίκνωση από την ψύξη, εφόσον όλο είναι ήδη στερεοποιημένο από το packing.

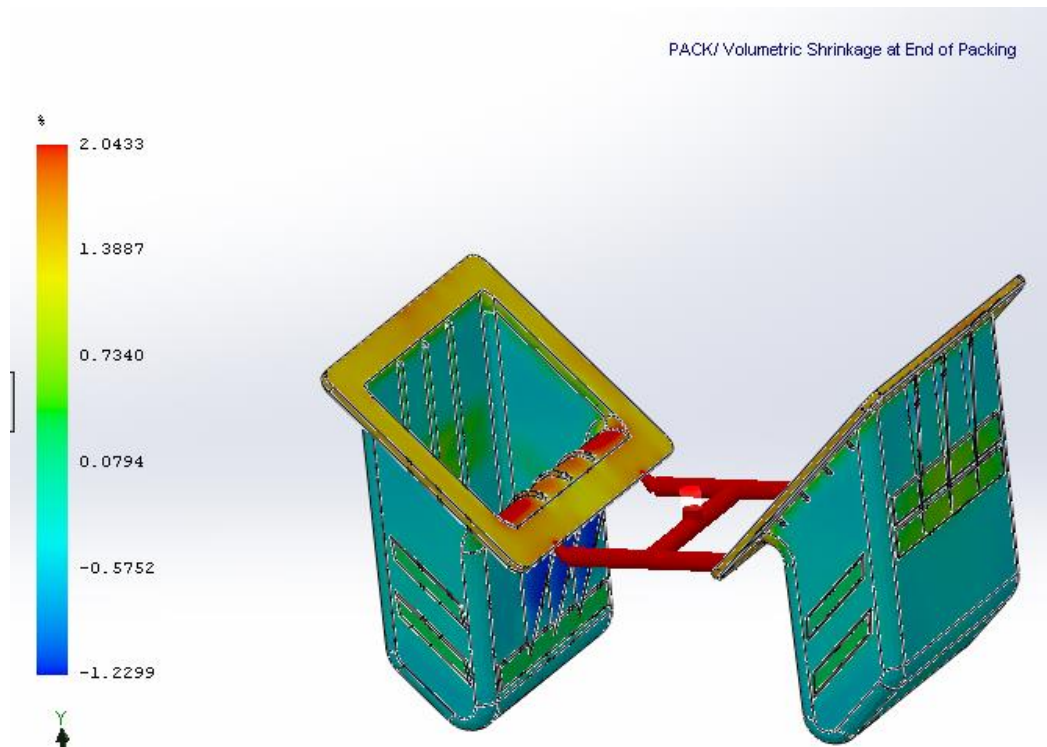
Ως διατμητική τάση ορίζουμε το μέτρο της διατμητικής δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας. Η κατεύθυνση της δύναμης διάτμησης είναι παράλληλη προς το επίπεδο του τοιχώματος κοιλότητας και μπορεί να θεωρηθεί ως η δύναμη που χρησιμοποιεί το τήγμα για να ωθήσει το τοίχωμα της κοιλότητας προς την κατεύθυνση της ροής.

Το γράφημα 4.17.-4 υπολογίζει ένα «κινούμενο τοίχωμα» σε σχέση με ένα «ακίνητο ρευστό». Δεδομένου ότι οι κινήσεις των τοιχωμάτων, ωθούν το ρευστό, τότε το κινούμενο τοίχωμα εφαρμόζει περισσότερες διατμητικές τάσεις στο ρευστό που είναι σε επαφή και εφαρμόζει την ελάχιστη τάση διατμήσεως προς το ρευστό, που βρίσκεται μακρύτερα σε επαφή από το σταθερό μέτωπο. Αυτό το παράδειγμα είναι σε αντίθεση με τη πλαστική ροή διαμέσου μιας κοιλότητας. Το τοίχωμα δεν μετατοπίζεται, αλλά το πλαστικό τήγμα κατά μήκος του τοιχώματος κοιλότητας. Σκεφτείτε τώρα ένα ακίνητο τοίχωμα στο κέντρο της ροής μιας κοιλότητας. Το υλικό στο κέντρο της ροής κινείται με τη μικρότερη αντίσταση, ενώ το υλικό κατά μήκος του τοιχώματος της κοιλότητας δεν κινείται λόγω της μεγαλύτερης αντίστασης ροής. Πάρτε μια διατομή του τήγματος, και φανταστείτε ότι η επιπλέον δύναμη που απαιτείται να ρέει κατά μήκος του τοιχώματος της κοιλότητας σχετίζεται με τις υψηλότερες καταπονήσεις διατμήσεως. Το υλικό στο κέντρο των εκθεμάτων ροής εμφανίζει μικρότερη διατμητική τάση, καθόσον υπάρχει λιγότερη αντίσταση στη ροή. Συνεπώς οι μέγιστες παραμορφώσεις που προκύπτουν στο διάγραμμα είναι οι εξωτερικές.

Η αναφερόμενη τιμή παραμορφώσεων είναι πολύ μικρή ως και απειροελάχιστη σε σύγκριση με την μέγιστη διατμητική τάση του υλικού. Οι μεγάλες διατμητικές τάσεις εμφανίζονται πάντα στην πύλη εισόδου. Για αυτό αποφασίζουμε να μεγαλώσουμε τις πύλες κατά μισό χιλιοστό προσφέροντας μέχρι και 10% ελάττωση των παραμορφώσεων.



Γράφημα 4.17-4: Προσομοίωση αποτελέσματος διατμητικών τάσεων, Shear Stress.



Γράφημα 4.17-5: Προσομοίωση αποτελέσματος τελικής συρρίκνωσης, Volumetric Shrinkage.

Τα μεγαλύτερα ποσοστά συρρίκνωσης εμφανίζονται στην μπουκαδούρα κάτι που είναι άκρως λογικό αφού ακόμα δεν έχει προλάβει να στερεοποιηθεί το υλικό και είναι ακόμα χαλαρό. Τα ράδια είναι τα σημεία που ήδη μας έχουν προβληματίσει τόσο από την υψηλή συγκέντρωση ζεστού υλικού όσο και από την θερμοκρασία εξόδου του. Ανήκουν στις επικίνδυνες διατομές όπως και εκείνα που έχουμε αλλαγή κατεύθυνσης. Τα νεύρα είναι κατάλληλα σχεδιασμένα που εμφανίζουν την ελάχιστη συρρίκνωση 0,07. Τα *gussets* εμφανίζουν αρνητική συρρίκνωση που σημαίνει ότι έχουν διόγκωση αλλά σε λογικά πλαίσια του *draft* 1,22%. Η μεγαλύτερη συρρίκνωση εμφανίζεται στο πάνω χείλος που μετράμε 1,4%. Προφανώς δεν δημιουργείται ισοτροπική συρρίκνωση, λόγω της πολυπλοκότητας του σχεδίου, την απόδοση διαφορετικών *drafts* αλλά και αποκλίσεων συρρίκνωσης. Τα ποσοστά είναι ικανοποιητικά και μέσα στον κατάλληλο σχεδιασμό.

5.1. Οδηγίες προς τον χειριστή

Έχοντας τον χειριστή στο κέντρο του σκοπού αυτής της εργασίας, επιδιώκουμε να διευκολύνουμε την εργασία του, παρέχοντας του πληροφορίες με οποιοδήποτε μέσο. Μια λίστα από κατευθυντήριες οδηγίες θα ήταν ένα σημαντικό βοήθημα για εκείνον και την παραγωγή του. Έτσι καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα 5.1-1 οι σημαντικότερες οδηγίες προς τον χειριστή. Η συλλογή των πληροφοριών σε όλο το μήκος της εργασίας, που προέκυψαν από τις πρώτες δοκιμές ανίχνευσης μέχρι και τα τελικά αποτελέσματα, διαμορφώνεται σε ένα πίνακα χειρισμών σε συνάρτηση της βελτίωσης του αποτελέσματος για τα συχνότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο χειριστής :

Βελτίωση Αποτελέσματος	Θερμοκρασία Τήγματος	Θερμοκρασία Καλουπιού	Ταχύτητα Κοχλία	Πίεση Συγκράτησης	Χρόνος Ψύξης	Χρόνος Συγκράτησης	Μεταφορά Switch off Point
Τράβηγμα	↓		↓	↑		↑ □	
Ένωση Υλικού	↑	↑		↑			
Jetting	↑		↓	↑			
Φυσαλίδες			↓				
Λειψό Αντικείμενο	↑	↑	↓			↑ □	↓ □
Κάψιμο	↓ □		↓				
Συρρίκνωση	↑	↑		↑	↑	↑	
Προέκταμα	↓	↓	↓	↓			↓ □

Πίνακας 5.1-1:Οδηγίες προς τον χειριστή.

Όπου το σύμβολο ↓ δηλώνει μείωση τιμής της παραμέτρου, ↑ αύξηση της τιμής της παραμέτρου και □ ότι ο χειριστής επεμβαίνει με την εν λόγω ρύθμιση παραμέτρου μόνο όταν παρατηρεί ότι οι αλλαγές των υπολοίπων δεν φέρουν επιπλέον βελτίωση στο αποτέλεσμα. Στον πίνακα 5.1.-1 εισάγονται μόνο οι τιμές που μπορούν να ρυθμιστούν από τον χειριστή στην μηχανή. Παρακάτω περιγράφονται πιο αναλυτικά οι σημαντικότερες οδηγίες και προτάσεις προς τον χειριστή , λαμβάνοντας υπόψη τον/την:

➤ **Θερμοκρασία ρευστού σε σχέση με θέση ενδεχόμενου τραβήγματος**

Στην περίπτωση που το τράβηγμα εμφανίζεται μακριά από το σημείο τροφοδοσίας ή σε λεπτά τοιχώματα όπως είναι τα νεύρα ή τα gussets θα πρέπει να αυξηθεί ο χειριστής τη θερμοκρασία του ρευστού ή και τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων του καλουπιού. Εάν όμως το τράβηγμα εμφανίζεται σε χοντρά τοιχώματα όπως είναι το χείλος ή σε σημεία κοντά στην τροφοδοσία, τότε πρέπει να μειώσουμε την θερμοκρασία τήγματος.

➤ **Αλληλεπίδραση ταχύτητα κοχλία με θερμοκρασία τήγματος για επίλυση ενδεχόμενου τραβήγματος**

Όσον αφορά την ταχύτητα του κοχλία, όταν αυτή είναι αυξημένη επιβαρύνει θερμοκρασιακά το τήγμα λόγω του έντονου φαινομένου της διάτμησης. Για παράδειγμα στη ζώνη συμπίεσης σε συνθήκες αυξημένης ταχύτητας θα εμφανιστούν αυξημένα ποσοστά θερμότητας, καθώς η δυναμική ενέργεια του κοχλία μετατρέπεται σε θερμική λόγω των έντονων διατμητικών τάσεων. **Προειδοποιούμε τον χειριστή για αστάθεια θερμοκρασιακού επιπέδου του τήγματος για αυξημένη ταχύτητα κοχλία.** Ένας εύκολος τρόπος να καταλάβουμε αν ορίσαμε την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής του κοχλία είναι να παρατηρήσουμε τον τρόπο πλήρωσης της κοιλότητας, στους πρώτους κύκλους. Σε περίπτωση λειψού αντικειμένου πρέπει να αυξήσουμε τη θερμοκρασία του φούρνου και να μειώσουμε την ταχύτητα περιστροφής του κοχλία.

➤ **Αλληλεπίδραση θερμοκρασίας και χρόνου συγκράτησης ως προς τη συρρίκνωση**

Ο χειριστής καλείται να δώσει βαρύτητα στο αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης θερμοκρασίας σε σχέση με χρόνο συγκράτησης. Η μείωση της θερμοκρασίας και η παράλληλη αύξηση του χρόνου συγκράτησης δεν φέρει επιθυμητά αποτελέσματα.

➤ **Παραμορφώσεις λόγω χρόνου ψύξης**

Αύξηση του χρόνου ψύξης σε περίπτωση που το προϊόν υφίσταται παραμορφώσεις. Πάντα υπό την επίδραση εσωτερικών τάσεων ο χρόνος ψύξης μπορεί να βελτιώσει την κατάσταση των παραμορφώσεων. Είναι προφανές ότι εάν στην πορεία του κύκλου ο χειριστής παρατηρεί παρατεταμένη συρρίκνωση αυτό οφείλεται στο πρόβλημα που διαπιστώθηκε, ότι σε υψηλή θερμοκρασία εξόδου έχουμε πιο ανομοιόμορφη ψύξη. Ανώτερη θερμοκρασία από τους 60°C εξόδου δεν συνιστάται.

➤ **Επίλυση σημαδιών εξώλκευσης**

Σημάδια εξωλκέων εμφανίζονται στους 60°C και εάν είναι έντονα θα πρέπει να αυξήσει τους χρόνους ψύξης, ή να μειώσει την απαιτούμενη θερμοκρασία εξόδου. Η αντίστροφη ανάλογη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας εξόδου και βέλτιστων χρόνων ψύξης επηρεάζουν την ποιότητα επιφανείας στην περιοχή των ραδιών και είναι μια από τις περιπτώσεις που θα πρέπει να αποφασίζει ο χειριστής πως θα κινηθεί.

➤ **Χρόνοι εξώλκευσης**

Η διόγκωση των εσωτερικών στρωμάτων θα έχει επέλθει στην μπουκαδούρα και δεν θα έχει προλάβει να συμπιεστεί αρκετά σε σχέση με το υπόλοιπο κομμάτι κατά την ψύξη. Το πρώιμο ξεκαλούπωμα κάτω των 6 sec μπορεί να οδηγήσει σε τήξη των εξωτερικών στρωμάτων με αποτέλεσμα την παραμόρφωση της επιφάνειας, αφού επέρχεται διόγκωση και ροή πλαστικού.

5.2. Συμπεράσματα για την ρύθμιση της μηχανής

Σε συνδυασμό πάντα με την στατιστική τους ισχύ αλλά και λαμβάνοντας ένα δείκτη ασφαλείας παραγωγής ποιοτικών τεμαχίων αποφασίζεται να διατηρηθεί σταθερή και βέλτιστη η τιμή του/της:

1. Ταχύτητας του κοχλία

Η ταχύτητα του περιστρεφόμενου κοχλία αποφασίζεται να διατηρηθεί όσο πιο χαμηλή γίνεται. Όπως αναλύθηκε η χαμηλή ταχύτητα πληρεί επαρκώς την κοιλότητα και επιφέρει ελάχιστες παραμορφώσεις κατά την έκχυση, ενώ δημιουργεί ομοιόμορφη κατανομημένη πίεση στο προϊόν, πράγμα που θα επιφέρει περιορισμένες συρρικνώσεις με το πέρας της εφαρμογής πίεσης συγκράτησης. Η βέλτιστη τιμή που προκύπτει είναι 15 mm/s, που αντιστοιχεί σε χρόνο πλήρωσης 2,9 sec και ρυθμό ροής 42 cc/s. Η γεωμετρία του παρόντος τεμαχίου και οι διαστάσεις του συστήματος διανομής δεν απαιτούν υψηλότερες ταχύτητες που θα δημιουργούσαν υψηλότερες πιέσεις.

2. Θερμοκρασίας Καλουπιού

Η θερμοκρασία του καλουπιού δεν έχει σημαντική στατική ισχύ στο αποτέλεσμα της έκχυσης. Από τα διαγράμματα μεταβολής τιμών S/N λαμβάνουμε ως βέλτιστη τιμή τους 60°C ενώ επιθυμούμε το καλούπι να ρυθμίζεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη ή ίση της θερμοκρασίας εξόδου του υλικού, η οποία κυμαίνεται από 40-60°C.

3. Χρόνος παραμονής ανοικτού καλούπιού

Ο χρόνος που θα παραμείνει ανοικτό το καλούπι μετά το τέλος της ψύξης δεν διαδραματίζει κανένα απολύτως ρόλο. Προτείνουμε στον χειριστή να ενεργήσει με γνώμονα τον επιθυμητό χρόνο εξώλκευσης με βέλτιστη τιμή τα 6 sec χωρίς να επιβαρύνει το κύκλο παραγωγής.

Στον πίνακα 5.2-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά οι τιμές των παραγόντων που συμμετείχαν ως είσοδοι-μεταβλητές στο αντίστοιχο πείραμα, καθώς και τα αποτελέσματα (επιμέρους και τελικά) της διαδικασίας. Στην στήλη της συρρίκνωσης από τις 18 δοκιμές απορρίφθηκαν όσες θα οδηγούσαν σε συρρίκνωση εκτός των ορίων του προβλεπόμενου σχεδιασμού και επιλέχθηκαν ως αποδεκτές τιμές για συνολική συρρίκνωση κάτω του 3,5%.

Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Πίεση Έκχυσης (Μρα)	Sink Marks (μμ)	Θερμοκρασία εξόδου (°C)	Θερμοκρασία Ψυκτικού (°C)	Χρόνος ψύξης (sec)	Πίεση Συγκράτησης (% Πίεση Έκχυσης) (%Μρα)	Χρόνος Συγκράτησης (sec)	Συρρίκνωση (%)
235	28,99	48,58	40	12	60,9	60	13	2,04
				17	63,2			
				22	73,6			
			50	12	46,6	70	17	2,96
				17	63,1			
				22	54,5			
			60	12	37,7	80	17	2,94
				17	39,7			
				22	41,4			
240	28,11	49,39	40	12	60,7	60	17	3,38
				17	64,6			
				22	75,2			
			50	17	50,1	70	17	3,18
				12	46,4			
				22	52,5			
			60	12	39,6	80	13	3,5
				17	39,4			
				22	41,2			
245	27,44	48,97	40	12	60,8	60	17	3,28
				17	65,1			
				22	74,9			
			50	12	48,3	70	17	3,25
				17	48,9			
				22	52,2			
			60	12	39,3	80	13	3,27
				17	39,3			
				22	42,9			

Πίνακας 5.2-1: Πίνακας βέλτιστων τιμών φάσεων και τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας.

Ο χειριστής είναι σε θέση να υπολογίσει ανά πάσα στιγμή τον συνολικό χρόνο κύκλου της μηχανής:

Συνολικός Χρόνος= Χρόνος γεμίματος[2,9]+Χρόνος συγκράτησης[...]+ Χρόνος Ψύξης[...]+ Χρόνος Ανοίγματος Καλουπιού[6] , (10)

Όπως παρατηρεί κανείς δεν θα μπορούσαμε να ορίσουμε μια βέλτιστη περιοχή τιμών σε ένα διάγραμμα, γιατί ανάλογα με το ποια φάση εντοπίζεται ένα πρόβλημα λειτουργικότητας, κλίνει η βελτιστοποίηση της κάθε ρύθμισης προς μια άλλη τιμή από αυτές των υπολοίπων φάσεων . Αυτό ακριβώς συμβαίνει στην πραγματικότητα, καθλώνοντας τον χειριστή, με μεταβολές ρυθμίσεων στην διάρκεια λειτουργίας της μηχανής.

5.3. Προτάσεις

Προτείνονται οι εξής προτάσεις για περαιτέρω ερευνά βάση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας

➤ **Περαιτέρω διερεύνηση παραγόντων**

Η περαιτέρω διερεύνηση των παραγόντων χύτευσης μπορούν να κινηθούν σε τρεις άξονες:

1. Ο πρώτος περιλαμβάνει την πραγματοποίηση πειραμάτων στο ίδιο τεμάχιο με χρήση των ίδιων, ή και επιπλέον παραγόντων (π.χ. διαφοροποίηση του προφίλ ταχυτήτων - επιλογή διαφορετικών ταχυτήτων - ώστε να βρεθεί τυχόν επίδρασή τους στην αποτελεσματική πλήρωση και στον χρόνο πλήρωσης). Προτείνεται να δοκιμαστούν διαφορετικά εύρη τιμών σε ορισμένους παράγοντες, οι οποίοι είτε προέκυψαν ασήμαντοι, είτε με το δεδομένο εύρος τιμών είχαν πολύ σημαντική επίδραση και στην ουσία πιθανώς μείωσαν τη βαρύτητα άλλων παραγόντων κατά τη στατιστική ανάλυση (π.χ. παράγοντας θερμοκρασία εξόδου στην φάση ψύξης). Επίσης, μπορούν να δοθούν επιπλέον επίπεδα στους παράγοντες, ώστε να εξεταστεί λεπτομερώς η επίδρασή τους στο αποτέλεσμα της χύτευσης.

Τέλος, θεωρείται απαραίτητο για τα επόμενα πειράματα να επιλεγεί καλύτερη ανάλυση μέσω της επιλογής των πινάκων *Taguchi* (π.χ. L81), έτσι ώστε να προκύψουν ακόμα πιο συγκεκριμένα και αξιόπιστα αποτελέσματα, από τα οποία θα μπορούν να εξαχθούν και πιο λεπτομερή συμπεράσματα από τη στατιστική τους ανάλυση. Βέβαια και εδώ, το χρονοβόρο κομμάτι για επαρκείς δοκιμές, στατιστική ανάλυση, όσο και για επίλυση με χρήση λογισμικών δεν θα πρέπει να είναι δυσανάλογο με το ζητούμενο της εργασίας, δηλαδή να αφαιρέσουμε φόρτο εργασίας δοκιμών του χειριστή αλλά να το μεταφέρουμε στον σχεδιασμό πειραμάτων. Για αυτό είναι προτιμότερη η βελτιστοποίηση της στατιστικής ανάλυσης με την εισαγωγή όλο κα περισσότερων παραγόντων του φαινομένου προς εξέταση, παρά την αύξηση των δοκιμών.

2. Ο δεύτερος άξονας επικεντρώνεται στο υλικό του τεμαχίου, με το οποίο διεξήχθη η πειραματική διαδικασία της εργασίας. Άλλο πολυμερές ή το ίδιο με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεγέθη (όπως θερμική αγωγιμότητα ή *Melt Flow Index*) θα εξέταζαν εις βάθος την σχέση της δομής του πολυμερούς και της συμπεριφοράς του κατά τη χύτευση. Προτείνεται επί της παρούσας εργασίας η εναλλαγή του *MFI* με διαφορετικά δεδομένα. Η αλλαγή του ιξώδους θα επηρέαζε κατά πολύ σε όλο το μήκος των δοκιμών τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.
3. Ο τρίτος άξονας αφορά στη διεξαγωγή αντίστοιχων πειραμάτων με αυτά της εργασίας σε ένα τεμάχιο διαφορετικής γεωμετρίας. Εφόσον τα συμπεράσματα προκύψουν παρόμοια με αυτά του πειράματος, θα επιβεβαιωθεί η επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων και θα μπορούν να αποτελέσουν ακόμα πιο αξιόπιστη βάση για κάθε χύτευση.

➤ **Πλήρης παραμετροποίηση της διαδικασίας για διαφορετικά τεμάχια**

Με τα πειράματα της εργασίας έγινε ανάλυση των παραγόντων και βελτιστοποίηση για το συγκεκριμένο τεμάχιο. Δηλαδή, για τα δεδομένα κατασκευαστικά στοιχεία του καλουπιού (διάμετροι, διαδρομές καναλιών, γωνίες εισόδου υλικού κλπ), προσεγγίστηκε το ανεκτό εύρος τιμών των παραγόντων χύτευσης, βρέθηκε η συσχέτισή τους με το αποτέλεσμα και επιλέχθηκαν οι βέλτιστες τιμές, από αυτές που εξετάστηκαν. Το ζήτημα είναι ότι, αν δοθεί κάποιο καλούπι με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, οι βέλτιστες τιμές της εργασίας μπορεί να μην εφαρμόζονται ή να μην οδηγούν σε εξίσου καλό αποτέλεσμα. Αν επιλυθεί το παραπάνω, τότε μπορεί να δημιουργηθεί μια καθολική μεθοδολογία επιλογής των παραμέτρων για τη χύτευση των καλουπιών, η οποία θα είναι εξαιρετικά χρήσιμη λόγω του εύρους εφαρμογής της. Για να γίνει αυτό, αρχικά πρέπει να πραγματοποιηθούν αντίστοιχα πειράματα και βελτιστοποιήσεις σε ένα πολύ μεγάλο εύρος καλουπιών. Εφόσον συγκεντρωθούν αρκετά δεδομένα, δηλαδή το συνολικό πείραμα αποκτήσει την απαιτούμενη ανάλυση, τότε μπορεί να γίνει επεξεργασία των αποτελεσμάτων με πιο σύνθετα στατιστικά εργαλεία. Το τελικό ζητούμενο είναι να εκφραστούν όλοι οι κρίσιμοι παράγοντες της χύτευσης σε σχέση με την παραγωγή ενός ή περισσότερων τεμαχίων. Έτσι, για οποιοδήποτε τεμάχιο, ο χειριστής θα χρησιμοποιεί τα στοιχεία της προβλεπόμενης βέλτιστης παραγωγής του τεμαχίου ως είσοδο και θα λαμβάνει ως αποτέλεσμα τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της χύτευσης.

- [1] Αλέξης Στασινόπουλος, Συσκευασία, Ερμηνευτικό λεξικό υλικών και μεθόδων, 1991, p.11.
- [2] A.V. Shenoy , D.R. Saini, Melt Flow Index: More than a quality control parameter. Part I. Advances in Polymer Technology.,1986,p.733-735
- [3] T. Alfrey , E.F. Gurnee, Organic Polymers, Prentice-Hall, New York, 1967, p.51
- [4] J.P. Holman, Heat Treansfer,4th Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1976,p.274
- [5] J.L Throne, Polymer Properties, in M. Bakker, Ed., Encyclopedia of Packaging Technology, John Wiley & Sons, New York, 1986
- [6] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig, Technologie des Spritzgießens, Lern und Arbeitsbuch, Hanser, München, 2009, p.39.
- [7] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig, Technologie des Spritzgießens, Lern und Arbeitsbuch, Hanser, München 2009, p. 16.
- [8] J. Frados, Ed., Plastics Engineering Handbook, 4th Ed., Van Nostrand Reinhold Co., New York,1976, p.274
- [9] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig, Technologie des Spritzgießens, Lern und Arbeitsbuch, Hanser, München 2009,p. 29.
- [10] R.D Deanin, Polymer Structure, Properties and Applications, Cahners Books, Boston 1972
- [11] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig, Technologie des Spritzgießens, Lern und Arbeitsbuch, Hanser, München 2009,p. 17.
- [12]. W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig, Technologie des Spritzgießens, Lern und Arbeitsbuch, Hanser, München 2009,p. 40.
- [13] Y.K. Shen, S.L. Yeh, S.H. Chen, Three-dimensional non-newtonian computations of micro-injection molding with the finite element method, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 2002,p. 643.
- [14] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig, Technologie des Spritzgießens, Lern und Arbeitsbuch, Hanser, München 2009,p. 42.
- [15] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig, Technologie des Spritzgießens, Lern und Arbeitsbuch, Hanser, München 2009,p.45.
- [16] Christoph Jaroschek, Spritzgießen für Praktiker, Hanser, München, 2013,p. 31-33.
- [17]] G. Menges, W. Michaeli, P Mohren, Spritzgießwerkzeuge, Auslegung- Bau- Anwendung, Hanser, München, 2007,p. 125.
- [18] L.W. Seow, Y.C. Lam, Optimizing flow in plastic injection molding, J. Mater. Process. Technol.,1997,p. 333–341.

- [19] D.M. Bryce, Plastic Injection Moulding, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1996.
- [20] J.A Brydson, Plastic Materials, Iliffe, London, 1966, p. 34.
- [21] G. Menges, W. Michaeli, P Mohren, Spritzgießwerkzeuge, Auslegung- Bau- Anwendung, Hanser, München, 2007,p. 135.
- [22] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig, Technologie des Spritzgießens, Lern und Arbeitsbuch, Hanser, München, 2009, p.64.
- [23] G. Menges, W. Michaeli, P Mohren, Spritzgießwerkzeuge, Auslegung- Bau- Anwendung, Hanser, München, 2007,p. 179.
- [24] I. Pandelidis, Q. Zou, Optimization of injection molding design. PartI. Gate location optimization, Polym. Eng. Sci. ,1990, p. 873–882.
- [25] G. Menges, W. Michaeli, P Mohren, Spritzgießwerkzeuge, Auslegung- Bau- Anwendung, Hanser, München, 2007,p. 233.
- [26] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig, Technologie des Spritzgießens, Lern und Arbeitsbuch, Hanser, München, 2009, p.69.
- [27] R.A. Malloy, Plastic Part Design for Injection Molding, Carl Hanser, New York, 1994.
- [28] G. Menges, W. Michaeli, P Mohren, Spritzgießwerkzeuge, Auslegung- Bau- Anwendung, Hanser, München, 2007, p. 525.
- [29] S.D. El Wakil, Processes and Design for Manufacturing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1998, p. 291–294. ISBN 0-534-95165-1
- [30] G. Menges, W. Michaeli, P Mohren, Spritzgießwerkzeuge, Auslegung- Bau- Anwendung, Hanser, München, 2007, p. 607.
- [31] W. Hoffmanns, Präzise Maße und Temperaturen, Plastverarbeiter 53,2002,p. 51-56.
- [32] N.N. :Katalog der Euromold, Messe Frankfurt, 1-4.12.2004
- [33] J. Shen, Design and Molding Simulation of a Plastic Part,Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford Connecticut, 2010, p. 12.
- [34] G. Menges, W. Michaeli, P Mohren, Spritzgießwerkzeuge, Auslegung- Bau- Anwendung, Hanser, München, 2007, p. 714.
- [35] Solidworks Co., Solidworks Plastics Manual,2014, p. 64.
- [36] L.E. Nielsen, Mechanical Properties of Polymers, Reinhold, New York, 1962, p. 244.
- [37] Solidworks Co., Solidworks plastics insight, Solidworks White Paper,2014.
<http://www.solidworks.com>.

- [38] Y.K. Shen, S.L. Yeh, S.H. Chen, Three-dimensional non-newtonian computations of micro-injection molding with the finite element method, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 2002, p.652.
- [39] G. Menges, W. Michaeli, P Mohren, *Spritzgießwerkzeuge, Auslegung- Bau- Anwendung*, Hanser, München, 2007, p. 695.
- [40] O. Zollner, Optimised mould temperature control, *Appl. Technol. Inform.*,1997, p. 1104.
- [41] D.G. Yao, B. Kim, Increasing flow length in thin wall injection molding using a rapidly heated mold, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, 2002, p. 819–832.
- [42] J.P. Qu, H.X. Huang, S.Y. Wu, *Handbook of Plastic Industry*, Chemical Industry Press, Beijing, 2001.
- [43] J. Zhao, R.H. Mayes, G. Chen, Effects of process parameters on micro molding process, *Polym. Eng. Sci.*,2003, p. 1542–1554.
- [44] Solidworks Co., *Solidworks Plastics Manual*, 2014, p.170.
- [45] G. Menges, W. Michaeli, P Mohren, *Spritzgießwerkzeuge, Auslegung- Bau- Anwendung*, Hanser, München, 2007, p.163.
- [46] KT. Chiang, FP. Chang, Analysis of shrinkage and warpage in an injection molded part with a thin shell feature using the response surface methodology. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, p.468.