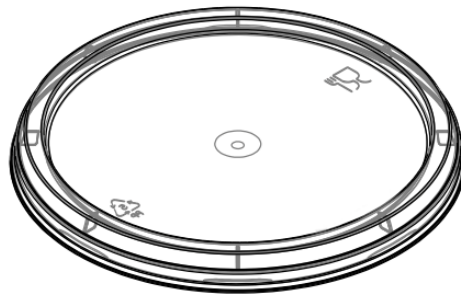




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(ΔΠΜΣ): ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Μεταπτυχιακή εργασία



Μελέτη κατεργασίας χύτευσης με έγχυση πολυμερούς για
κάλυμμα δοχείου συσκευασίας τροφίμων με χρήση
προσομοίωσης

Μέγκαν Ασένοβα

Επιβλέπων Καθηγητής : Γεώργιος – Χριστόφορος Βοσνιάκος

Αθήνα, 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η ανάλυση της κατασκευαστικής διαδικασίας χύτευσης με έγχυση μέσω προσομοίωσης. Εντός των ορίων εκπόνησης της εργασίας υπήρξε ευρεία συνεργασία με βιομηχανική εταιρεία, για τη μελέτη περίπτωσης ενός εκ των προϊόντων της. Πρόκειται για ένα καταναλωτικό προϊόν το οποίο αποτελεί κάλυμμα δοχείου συσκευασίας τροφίμων. Σε πρώτη φάση, μελετήθηκε το συγκεκριμένο προϊόν έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D, όπου μέσω ενός κύκλου πειραμάτων έγινε μια επαλήθευση ως προς τις κατασκευαστικές ατέλειες που παρουσιάζει το πραγματικό τελικό προϊόν. Σε δεύτερη φάση, διερευνήθηκε ο βαθμός επίδρασης της κάθε υπολογιστικής και κατασκευαστικής παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα. Ακολούθως, αξιοποιήθηκε εργαλείο σχεδιασμού πειραμάτων (Design of Experiments) που εφαρμόζει τη μέθοδο Taguchi. Έτσι, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή των παραπάνω πειραμάτων που στόχο είχαν την επίτευξη του επιθυμητού βάρους τεμαχίου και την ελάχιστη δύναμη σύσφιξης. Τέλος, εξάχθηκαν συμπεράσματα για τον βέλτιστο συνδυασμό των βασικών παραμέτρων της κατεργασίας, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα αποτελέσματα αλληλεπίδρασης των παραμέτρων ελέγχου για την επίτευξη του στόχου.

ABSTRACT

In this master's thesis, the analysis of the manufacturing process of injection molding through simulation is presented. Within the scope of the work, there was broad collaboration with a manufacturing company, for the case study of one of its injection molded products, namely a food packaging container cover. Firstly, the specific injection product was studied in Moldex3D software, where through a cycle of experiments a verification was made regarding the manufacturing defects presented by the actual final product. Secondly, the degree of influence of each calculation and construction parameter on the final result was investigated. Next, a design of experiments software tool, specifically applying the Taguchi method. Thus, the analysis of the results obtained from the application of the above experiments aimed at achieving the desired piece weight and the minimum clamping force. Finally, conclusions were drawn on the optimal combination of the main processing parameters, taking into account all the interaction effects of the control parameters to achieve the goal.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται το ταξίδι των μεταπτυχιακών σπουδών μου. Σε αυτό το σημείο εκφράζω ένα βαθύ ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο – Χριστόφορο Βοσνιάκο για την ευκαιρία που μου προσέφερε να πραγματοποιήσω τον στόχο μου ως νέα μηχανικός και να εκπονήσω την εργασία μου σε συνεργασία με βιομηχανική εταιρεία. Χωρίς την απλόχερη βοήθειά και αστείρευτη επιστημονική καθοδήγησή του, το παρόν έργο δεν θα είχε ολοκληρωθεί επιτυχώς.

Στην συνέχεια, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην βιομηχανική εταιρεία «Μπαζίγος ABEE» για την αναδοχή του θέματος εργασίας και την ευχάριστη συνεργασία. Πιο συγκεκριμένα, ευχαριστώ τον κ. Μάνο Μπαζίγο για την θερμή υποδοχή και την ξενάγηση στον χώρο της εταιρείας. Έπειτα, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους νέους μηχανικούς της εταιρείας, Γιάννη και Λίνα, για την πολύτιμη βοήθεια και υπομονή τους καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Ύστερα, ευχαριστώ θερμά την συνάδελφο και φίλη Βασιλική Ηλιοπούλου, η οποία αποτέλεσε σημαντική στήριξη σε κάθε δύσκολη πτυχή και εμπόδιο της πορείας της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένειά μου η οποία ήταν αναπόσπαστα δίπλα μου καθ' όλο το διάστημα της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ (INJECTION MOLDING)	2
2.1. Η διαδικασία της χύτευσης με έγχυση πολυμερών	2
2.1.1. Πολυμερή υλικά	3
2.1.2. Επιλογή υλικού χύτευσης	4
2.1.3. Εξοπλισμός μηχανής χύτευσης	4
2.2. Στάδια και παράμετροι διεργασίας χύτευσης με έγχυση	9
2.3. Προβλήματα και ελαττώματα χύτευσης με έγχυση	12
2.4. Μελέτη της χύτευσης με έγχυση μέσω προσομοίωσης	23
3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	25
3.1. ΒΑΖΙΓΟΣ S.A – Περιγραφή Προϊόντος	25
3.2. Το λογισμικό Moldex3D	26
3.3. Προ- επεξεργασία	28
3.3.1. Εισαγωγή και προετοιμασία μοντέλου	28
3.3.2. Πλέγμα και έλεγχος	28
3.4. Διεργασία	31
3.4.1. Ρύθμιση κατασκευαστικής διαδικασίας	32
3.4.2. Ρύθμιση υπολογιστικής διαδικασίας	35
3.5. Μετα-επεξεργασία	36
3.5.1. Αποτελέσματα Πλήρωσης	37
3.5.2. Αποτελέσματα Συμπίεσης	45
4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	53
4.1. Η μέθοδος Taguchi	53
4.1.1. Αναλογία S/N (Signal-to-Noise ratio)	54
4.1.2. Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)	56
4.2. Σχεδιασμός πειραμάτων (DOE)	58
4.2.1. Πρωταρχικός σχεδιασμός Taguchi	58
4.2.2. Τελικός σχεδιασμός Taguchi	63

4.3. Αποτελέσματα πειραμάτων (DOE results)	69
4.3.1. Αποτελέσματα πρωταρχικού σχεδιασμού Taguchi	69
4.3.2. Αποτελέσματα τελικού σχεδιασμού Taguchi	71
4.3.3. Βέλτιστος σχεδιασμός	74
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	79
5.1. Συμπεράσματα	79
5.2. Μελλοντική εργασία	80
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1:	Μηχανή μορφοποίησης με έγχυση.....	5
Σχήμα 2.2:	Ο κύκλος έγχυσης μηχανής τύπου παλινδρομούντος κοχλία.....	6
Σχήμα 2.3:	Μηχανή έγχυσης τύπου εμβόλου.....	7
Σχήμα 2.4:	Σχηματικό διάγραμμα καλουπιού δύο τμημάτων.....	8
Σχήμα 2.5:	Κύκλος έγχυσης.....	10
Σχήμα 2.6:	Περίπτωση ελλιπούς πλήρωσης (short shot) σε τελικό τεμάχιο.....	13
Σχήμα 2.7:	Περίπτωση βαθουλωμάτων (sink marks) σε τελικό τεμάχιο.....	14
Σχήμα 2.8:	Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με γραμμή συγκόλλησης (weld line).....	15
Σχήμα 2.9:	Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με ελάττωμα στρέβλωσης (warpage).....	16
Σχήμα 2.10:	Περίπτωση τελικού προϊόντος χύτευσης με ελάττωμα γραμμών ροής (flow lines).....	17
Σχήμα 2.11:	Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με προέκτασμα (Flash).....	18
Σχήμα 2.12:	Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με σημάδια καύσης (Burn mark).....	19
Σχήμα 2.13:	Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με ελάττωμα αποκόλλησης (delamination)....	20
Σχήμα 2.14:	Περίπτωση τελικών προϊόντων έγχυσης με ελάττωμα κενών (voids).....	21
Σχήμα 2.15:	Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με ελάττωμα εκτόξευσης (Jetting)(πάνω), σκαρίφημα της ανάπτυξης του φαινομένου εκτόξευσης και έπειτα της εξάλειψής του (κάτω).....	22
Σχήμα 3.1:	Το εξεταζόμενο καπάκι διαμέτρου 97.6mm και βάρους 4.2gr. Αποτελεί ευγενική χορηγία της εταιρείας «Bazigos S.A.».....	25
Σχήμα 3.2:	Γενικά βήματα προσομοίωσης στο Moldex3D.....	27
Σχήμα 3.3:	Δημιουργία νέου Project στο Moldex3D.....	28
Σχήμα 3.4:	Καθορισμός πύλης εισόδου.....	29
Σχήμα 3.5:	Εισαγωγή του καλουπιού μέσω του «Moldbase Wizard».....	30
Σχήμα 3.6:	Εισαγωγή βέλτιστου συστήματος ψύξης μέσω του «Cooling Channel Wizard».....	30
Σχήμα 3.7:	Δημιουργία πλέγματος (Generated mesh).....	31
Σχήμα 3.8:	Χαρακτηριστικά πολυμερές υλικού καταργασίας χύτευσης με έγχυση.....	32
Σχήμα 3.9:	Παράμετροι κατασκευαστικής διαδικασίας.....	33
Σχήμα 3.10:	Προφίλ ταχύτητας ροής τήγματος.....	34
Σχήμα 3.11:	Προφίλ πίεσης έγχυσης.....	34
Σχήμα 3.12:	Προφίλ πίεσης συμπίεσης.....	35
Σχήμα 3.13:	Παράμετροι υπολογιστικής διαδικασίας.....	36
Σχήμα 3.14:	Συνοπτικές πληροφορίες προσομοίωσης.....	37
Σχήμα 3.15:	Μέτωπο ροής πολυμερούς τήγματος φάσης πλήρωσης (Filling Melt Front Time).....	38
Σχήμα 3.16:	Ισοπαραμετρικές καμπύλες χρόνου-μετώπου ροής υλικού.....	39
Σχήμα 3.17:	Εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα στο τεμάχιο μορφοποίησης (Air traps).....	39
Σχήμα 3.18:	Πίεση κατά την φάση έγχυσης (Filling Pressure).....	40
Σχήμα 3.19:	Θερμοκρασία έγχυσης (Filling Temperature).....	41
Σχήμα 3.20:	Θερμοκρασία μετώπου ροής (Melt Front Temperature).....	42
Σχήμα 3.21:	Διατμητική τάση (Shear Stress).....	43
Σχήμα 3.22:	Πίεση στο κάθετο κανάλι (Sprue Pressure).....	44
Σχήμα 3.23:	Δύναμη σύσφιξης (Clamping force) του καλουπιού.....	44
Σχήμα 3.24:	Ταχύτητα ροής του πολυμερούς τήγματος στο κάθετο κανάλι «Flow Rate».....	45

Σχήμα 3.25:	Πίεση συμπίεσης (Packing Pressure) κοιλότητας μορφοποίησης στο τέλος της φάσης συμπίεσης	46
Σχήμα 3.26:	Κατανομή θερμοκρασίας (Temperature) στην κοιλότητα μορφοποίησης στο τέλος της φάσης συμπίεσης.....	47
Σχήμα 3.27:	Ποσοστιαία ογκομετρική συρρίκνωση (Volumetric Shrinkage) μορφοποιημένου τεμαχίου στο τέλος της φάσης συμπίεσης.....	48
Σχήμα 3.28:	Όγκος του στερεοποιημένου πολυμερούς (Frozen Layer Ratio) στο τέλος της φάσης συμπίεσης	49
Σχήμα 3.29:	Δείκτης αξιολόγησης της απόδοσης της συμπίεσης του πολυμερούς εντός της κοιλότητας μορφοποίησης	50
Σχήμα 3.30:	Διάγραμμα πίεσης – χρόνου (Packing-Sprue pressure) στην φάση συμπίεσης	51
Σχήμα 3.31:	Διάγραμμα δύναμης σύσφιξης – χρόνου (Packing-Clamping Force) στην φάση συμπίεσης	52
Σχήμα 4.1:	Διάγραμμα ιξώδους συναρτήσει ρυθμού διάτμησης για πολυπροπυλένιο με MFI 45..	69
Σχήμα 4.2:	Διάγραμμα ιξώδους συναρτήσει ρυθμού διάτμησης για πολυπροπυλένιο με MFI 100	70
Σχήμα 4.3:	Ποσοτικά διαγράμματα για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου»	72
Σχήμα 4.4:	Ποσοτικά διαγράμματα για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη Σύσφιξης».....	73
Σχήμα 4.5:	Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (αριστερά) και αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (δεξιά) για τον παράγοντα “Packing- Volumetric Shrinkage ” ο οποίος βελτιώθηκε τελικώς κατά 36,9%.	75
Σχήμα 4.6:	Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (πάνω) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (κάτω) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing - Total Weight ” ο οποίος αυξήθηκε κατά 0,43gr.	76
Σχήμα 4.7:	Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (πάνω) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (κάτω) για τον παράγοντα “Packing-Sprue Pressure ” ο οποίος μειώθηκε τελικώς κατά 60 MPa.....	77
Σχήμα 4.8:	Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (πάνω) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (κάτω) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing-Clamping Force ” ο οποίος μειώθηκε τελικώς κατά 6.8 Ton.	78

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τρόπος μεταβολής παραμέτρων για την εξάλειψη των ελαττωμάτων στην χύτευση με έγχυση	23
Πίνακας 2: Παράγοντες ελέγχου πρωταρχικού σχεδιασμού Taguchi.....	59
Πίνακας 3: Παράγοντες ποιότητας πρωταρχικού σχεδιασμού Taguchi.....	59
Πίνακας 4: Πίνακας L8-Σχεδιασμός πρωταρχικού Taguchi	60
Πίνακας 5: Απόκριση ποιοτικών παραγόντων του πρωταρχικού σχεδιασμού Taguchi	60
Πίνακας 6: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου».....	61
Πίνακας 7: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου».....	61
Πίνακας 8: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη Σύσφιξης»	62
Πίνακας 9: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη Σύσφιξης»	62
Πίνακας 10: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Χρόνος κύκλου»	63
Πίνακας 11: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Χρόνος κύκλου»	63
Πίνακας 12: Παράγοντες ελέγχου τελικού σχεδιασμού Taguchi.....	64
Πίνακας 13: Παράγοντες ποιότητας τελικού σχεδιασμού Taguchi	64
Πίνακας 14: Πίνακας L27-Σχεδιασμός τελικού Taguchi	65
Πίνακας 15: Απόκριση ποιοτικών παραγόντων του τελικού σχεδιασμού Taguchi	66
Πίνακας 16: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου».....	67
Πίνακας 17: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου».....	67
Πίνακας 18: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη σύσφιξης»	68
Πίνακας 19: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη σύσφιξης»	68
Πίνακας 20: Optimized solution for Total weight.....	72
Πίνακας 21: Optimized solution for Clamping Force	74

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διεργασία χύτευσης με έγχυση πολυμερικών τηγμάτων χρησιμοποιείται στη βιομηχανία πλαστικών για την παραγωγή παντός είδους αντικειμένων μαζικής παραγωγής που παλαιότερα γίνονταν με μέταλλα. Πρόκειται για διαδικασία με προϊόντα υψηλής ακρίβειας, σταθερής ποιότητας και περίπλοκης γεωμετρίας. Επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό των προϊόντων είναι η ελκυστική εμφάνιση επειδή αποτελεί τη βάση για τις αποφάσεις των καταναλωτών σχετικά με την ποιότητα και τη λειτουργικότητα των προϊόντων. Επομένως, οι κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται σε προϊόντα συσκευασίας τροφίμων τα οποία παράγονται μέσω χύτευσης με έγχυση (injection molding) πρέπει να προβλέπονται πριν την κατασκευή του καλουπιού.

Έτσι, κρίνεται αναγκαίο να χρησιμοποιείται εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης ροής έγχυσης το οποίο έχει την ικανότητα να προβλέπει ευρύ φάσμα των κοινών ατελειών όπως είναι οι γραμμές συγκόλλησης, οι αεροπαγίδες, η στρέβλωση κ.ο.κ. που προκύπτουν συχνά σε τέτοιου είδους κατεργασίες. Επιπλέον, διαθέτει ευρεία γκάμα πραγματικών πολυμερών υλικών, υπολογιστικών και κατασκευαστικών παραμέτρων με τα οποία ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιεί έλεγχο των αποτελεσμάτων με τον συνδυασμό παραμέτρων που επιθυμεί να εξετάσει. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης ξεφεύγει από την παραδοσιακή μέθοδο δοκιμής-σφάλματος και είναι σε θέση να προβλέψει και να αποτρέψει σφάλματα κατά την παραγωγή πολυμερικών προϊόντων, τα οποία εκτός από χρονοβόρα μπορεί να αποβούν και ιδιαίτερα κοστοβόρα.

Στην παρούσα εργασία θα αξιοποιηθεί το εργαλείο «Moldex3D», για τη μελέτη περίπτωσης συγκεκριμένου βιομηχανικού προϊόντος. Θα διερευνηθούν σχεδιαστικές παράμετροι (σύστημα τροφοδοσίας και συμπίεσης) καθώς και παράμετροι παραγωγής (θερμοκρασία, πίεση, χρόνος των φάσεων της κατεργασίας) ώστε να βρεθεί η επίδραση τους στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η διερεύνηση των αποτελεσμάτων θα γίνει αξιοποιώντας το εργαλείο σχεδιασμού πειραμάτων που διαθέτει το λογισμικό (Minitab) με την μέθοδο Taguchi. Συγκεκριμένα θα γίνει ο έλεγχος της αναλογίας σήμα-θορύβου (Signal to Noise Ratio) και η ανάλυση της διακύμανσης (Analysis of Variance) με σκοπό την εύρεση της συνεισφοράς της εκάστοτε παραμέτρου ελέγχου.

2. Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ (INJECTION MOLDING)

Η χύτευση με έγχυση είναι μια αποτελεσματική διαδικασία υψηλής ακρίβειας, κατασκευής εξαρτημάτων μαζικής παραγωγής με περίπλοκη γεωμετρία, σταθερή ποιότητα και ελκυστική εμφάνιση[1]. Με την αυξανόμενη εξάρτηση των αποφάσεων των καταναλωτών από την αισθητική και σχεδιαστική έλξη των προϊόντων, η βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας ήταν ένας από τους κύριους τομείς για έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών χύτευσης με έγχυση [2].

Η εμφάνιση είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των προϊόντων επειδή αποτελεί τη βάση για τις αποφάσεις των καταναλωτών σχετικά με την ποιότητα και τη λειτουργικότητα των προϊόντων. Ειδικά, η εμφάνιση της επιφάνειας διέπει την αντιληπτή ποιότητα. Αυτό οδηγεί στην απόρριψη προϊόντων με οπτικά σημάδια επιφάνειας, παρόλο που οι ατέλειες αυτές δεν έχουν αντίκτυπο στην επιδιωκόμενη λειτουργικότητα των προϊόντων.

Πολλά εξαρτήματα που χυτεύονται με έγχυση προορίζονται για σκοπούς εμφάνισης και για εξωτερικά προϊόντα. Για παράδειγμα, τα εξωτερικά και εσωτερικά εξαρτήματα αυτοκινήτων, τα περιβλήματα οικιακών συσκευών και οι κινητές συσκευές είναι πλαστικά μέρη χύτευσης με έγχυση. Λόγω των απαιτήσεων υψηλής ποιότητας επιφάνειας και αποτελεσματικής επεξεργασίας πολυμερών, παράγονται περισσότερα προϊόντα καθαρού σχήματος χωρίς περαιτέρω επιφανειακό φινίρισμα, όπως βαφή ή επίστρωση.

2.1. Η διαδικασία της χύτευσης με έγχυση πολυμερών

Μεταξύ των διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας και μορφοποίησης πολυμερών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υλικών που έχουν συγκεκριμένα επιθυμητό μέγεθος και σχήμα, η χύτευση με έγχυση προτιμάται ιδιαίτερα για συστήματα μαζικής παραγωγής και έχει χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια στη βιομηχανία πολυμερών [3]. Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα περιζήτητη για βιομηχανικές εφαρμογές λόγω: του χαμηλού κόστους κατασκευής πολυμερών εξαρτημάτων ειδικά για μεγάλες ποσότητες. Η τεχνολογία αυτή εξασφαλίζει ευέλικτα σχήματα υψηλής διαστατικής ακρίβειας, σύντομους χρόνους κύκλου διεργασίας, απλό αυτοματισμό λειτουργίας καθώς και δυνατότητα ταυτόχρονης διαμόρφωσης δομών όγκου και επιφάνειας [4].

Επί του παρόντος, το 32% των πρώτων υλών μεταποιούνται σε διάφορα προϊόντα μέσω χύτευσης με έγχυση. Στην περίπτωση των προϊόντων χύτευσης με έγχυση, η δομή πολλαπλών κλιμάκων και οι τελικές ιδιότητες (μηχανικές ιδιότητες και θερμικές ιδιότητες) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες επεξεργασίας. Στη βιομηχανική παραγωγή, χρησιμοποιείται μια λειτουργία δοκιμής και σφάλματος για την προσαρμογή των παραμέτρων επεξεργασίας, συμπεριλαμβανομένου του ρυθμού έγχυσης, της θερμοκρασίας του καλουπιού και της πίεσης

συσκευασίας κ.λπ., για την απόκτηση προϊόντων χύτευσης με έγχυση με την επιθυμητή απόδοση [5].

2.1.1. Πολυμερή υλικά

Τα πολυμερή ή πολυμερικά υλικά αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία υλικών με εξαιρετικές ιδιότητες. Πρώτο ανακαλύφθηκαν και παράχθηκαν περίπου 100 χρόνια πριν. Ο όρος polymer, όπως και συναντάται στην διεθνή βιβλιογραφία, προέρχεται από την ελληνική σύνθετη λέξη πολυμερές (πολλά + μέρος) και πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τον Σουηδό χημικό J. J. Berzelius. Τα πολυμερή αποτελούν την βάση για πολλά και σημαντικά αγαθά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν όλα τα πλαστικά τα οποία υπάρχουν γύρω μας. Τα πολυμερή πολλές φορές λανθασμένα συγχέονται με τα πλαστικά. Η κύρια διαφορά των δύο αυτών υλικών είναι ότι τα πολυμερή αποτελούν καθαρές χημικές ενώσεις, ενώ τα πλαστικά αποτελούν μίγματα πολυμερών με άλλα υλικά [6].

Τα πολυμερή αποτελούν ένα σύνολο μεγάλων μορίων με την μορφή αλυσίδων, τα οποία έχουν ως βάση των άνθρακα και παρασκευάζονται με την επανάληψη μικρών δομικών μονάδων. Οι δομικές μονάδες ενώνονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς. Ανάλογα με το αν ο αριθμός των δομικών μονάδων που αποτελούν το εκάστοτε μακρομόριο ξεπερνάει τις 10 ή όχι, τότε το μεγάλο αυτό μόριο χαρακτηρίζεται ως πολυμερές ή ολιγομερές αντίστοιχα. Ο αριθμός τους προκύπτει από το πηλίκο του μοριακού βάρους του πολυμερούς προς το μοριακό βάρος της δομικής μονάδας του. Το αποτέλεσμα ονομάζεται βαθμός πολυμερισμού του πολυμερούς και συμβολίζεται με κεφαλαίο X [7], [8].

Τα πολυμερή ταξινομούνται σε δύο μεγάλες οικογένειες, τα φυσικά πολυμερή όπως η πρωτεΐνες, η κυτταρίνη κ.α. και τα συνθετικά πολυμερή όπως το πολυστυρένιο (PS), το πολυπροπυλένιο (PP) και πολλά άλλα. Τα συνθετικά πολυμερή, τα οποία αποτελούν βάση ενασχόλησης στην παρούσα εργασία, ταξινομούνται σε διάφορες υποκατηγορίες ανάλογα με την χημική τους δομή, την συμπεριφορά τους κατά την θέρμανση και την κύρια ιδιότητα που κυριαρχεί στην χρήση τους.

Έχει μελετηθεί ένα ευρύ φάσμα πολυμερών υλικών, συμπεριλαμβανομένων θερμοπλαστικών πολυμερών όπως πολυστυρένιο (PS), κυκλικό συμπολυμερές ολεφινών (COC), μεθακρυλικός πολυμεθυλεστέρας (PMMA), πολυπροπυλένιο (PP), πολυσουλφόνη (PSU), πολυοξυμεθυλένιο (POM), πολυαιθυλένιο (PE), πολυαμίδιο (PA), κετόνη πολυαιθέρα (PEEK), πολυανθρακικό (PC), πολυμερές υγρών κρυστάλλων (LCP), τερεφθαλικό πολυβουτυλένιο (PBT), ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS), πολυφαινυλαιθέρας (PPE) και καουτσούκ υγρής σιλικόνης (LSR) ως πολυμερές υλικό διασύνδεσης. Τέλος, μόνο λίγες μελέτες έχουν διεξαχθεί σε ελαστικά υλικά.

2.1.2. Επιλογή υλικού χύτευσης

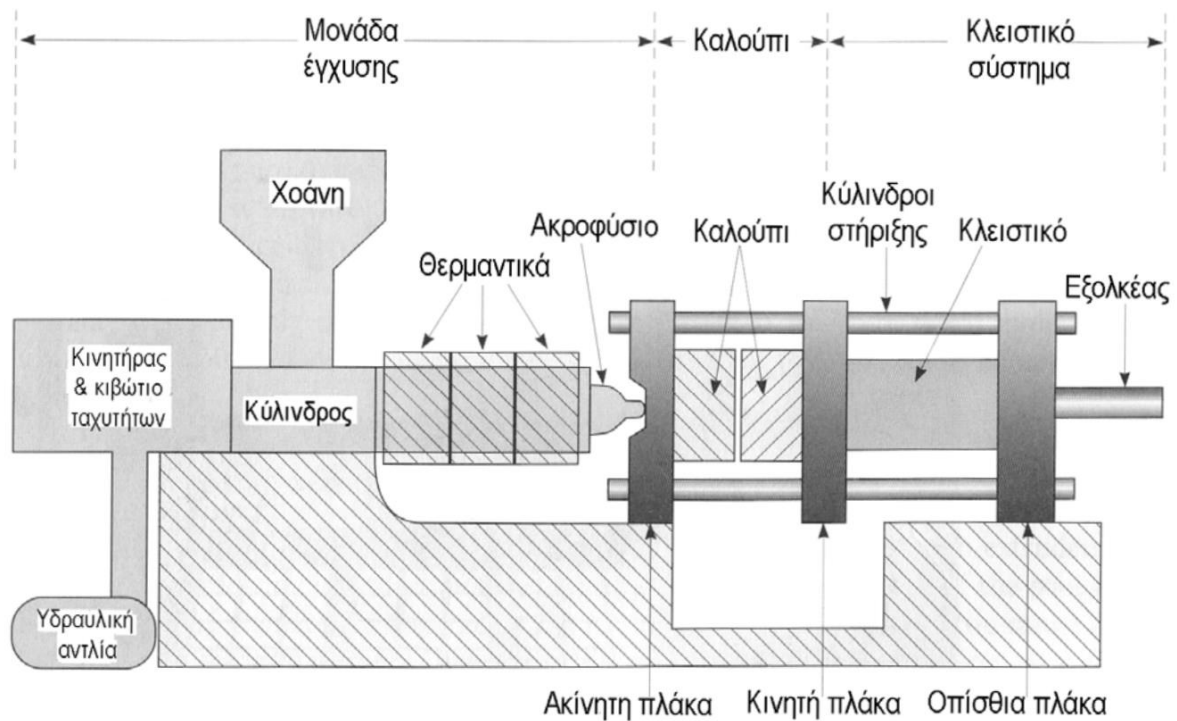
Η χύτευση με έγχυση είναι ένα τόσο ευρύ πεδίο με πολυάριθμες επιλογές υλικών, όπου μερικές φορές ίσως είναι συντριπτικές, ακόμη και για επαγγελματίες μορφοποίησης προϊόντων. Ως εκ τούτου, ένας σύντομος οδηγός κατατόπισης του κατάλληλου υλικού περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- i. Σκληρότητα υλικού: Η σκληρότητα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που δεν μπορεί να τεθεί σε συμβιβασμούς τις περισσότερες περιπτώσεις. Τα είδη νάιλον αποδίδουν καλά σε εφαρμογές που σχετίζονται με τη σκληρότητα. Για πολύ υψηλή απόδοση, η θερμοπλαστική πολουρεθάνη (TPU) είναι ένας ισχυρός υποψήφιος, αν και το ίδιο το υλικό και η χύτευση με έγχυση είναι δαπανηρή.
- ii. Ευελιξία: Μια δέσμη υλικών χύτευσης με έγχυση είναι εύκαμπτη. Έτσι, το θερμοπλαστικό ελαστομερές και το πολυπροπυλένιο είναι αρκετά κατάλληλα για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις ευελιξίας. Το TPE συνήθως προτιμάται όσον αφορά την αντοχή στην κόπωση και την υψηλή θερμοκρασία, αλλά το PP είναι ανακυκλώσιμο και ασφαλέστερο στη χρήση.
- iii. Κόστος: Όσον αφορά το κόστος υλικών, το PP και το PS είναι ίσως οι καλύτερες επιλογές. Καθώς και τα δύο είναι φθηνά και άμεσα διαθέσιμα.
- iv. Αντοχή στη θερμοκρασία: Το νάιλον και το ABS είναι εξαιρετικά στη διατήρηση του σχήματος και των ιδιοτήτων του υλικού τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Το POM είναι πολύ σταθερό σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν.
- v. Εφαρμογές: Εφόσον όλα καταλήγουν στην προβλεπόμενη εφαρμογή στο τέλος, το υλικό που θα επιλεγεί θα πρέπει να είναι ισχυρό υποψήφιο για τις εφαρμογές τελικού χρήστη.

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε το πολυπροπυλένιο ως μοντέλο έρευνας, ένα από τα τυπικά θερμοπλαστικά πολυμερή εμπορευμάτων με σημαντικές εφαρμογές όπως συσκευασίες τροφίμων, ανταλλακτικά αυτοκινήτων και ηλεκτρονικά.

2.1.3. Εξοπλισμός μηχανής χύτευσης

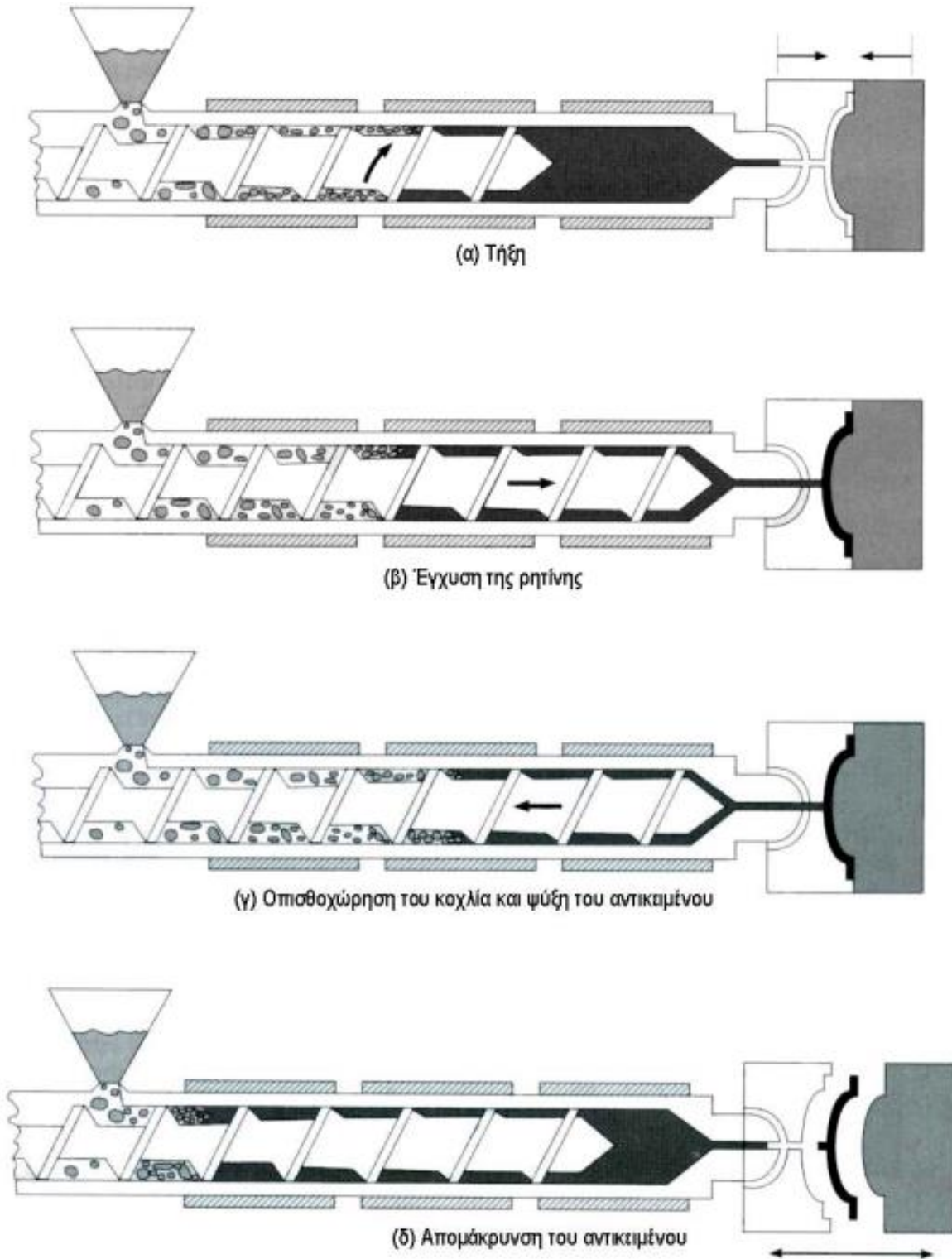
Ο εξοπλισμός μιας μονάδας έγχυσης περιλαμβάνει τρεις κύριες λειτουργίες, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1 i) τη μονάδα έγχυσης ii) το καλούπι μορφοποίησης iii) το κλειστικό σύστημα



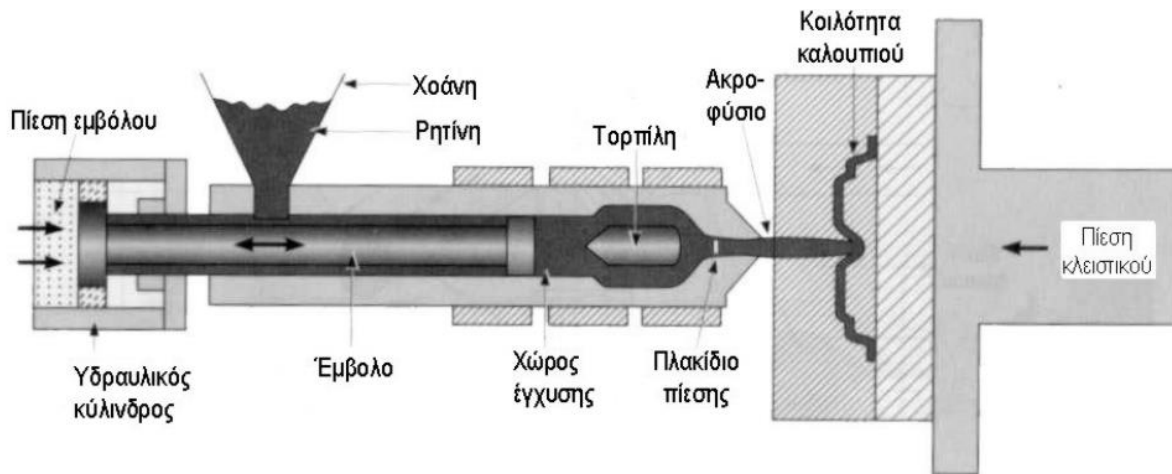
Σχήμα 2.1: Μηχανή μορφοποίησης με έγχυση

1. Μονάδα έγχυσης

Ο ρόλος της μονάδας έγχυσης είναι να μετατρέψει το στερεό πολυμερές σε τήγμα, και στη συνέχεια να γίνει η έγχυση στο καλούπι. Η πολυμερική ρητίνη, σε μορφή πελλετών ή σκόνης, τροφοδοτείται στη μηχανή έγχυσης μέσω της χοάνης τροφοδοσίας. Από διαφορετικές χοάνες μπορούν να τροφοδοτηθούν ταυτόχρονα μέσα ενίσχυσης, χρώματα και άλλα πρόσθετα. Στην περίπτωση αυτή η μηχανή έγχυσης λειτουργεί και ως εξοπλισμός ανάμειξης. Λόγω όμως του περιορισμένου μεγέθους (μικρό μήκος του κυλίνδρου πλαστικοποίησης) των περισσότερων μηχανών έγχυσης, η ικανότητα ανάμειξης είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό πληρωτικά υλικά και άλλα πρόσθετα γίνονται μίγμα σε ξεχωριστή διαδικασία, με τη χρήση εκβολέα ανάμειξης. Δύο είναι τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την τήξη και την έγχυση της ρητίνης σε μονάδες έγχυσης. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη είναι η μηχανή τύπου παλινδρομούντος κοχλία, Σχήμα 2.2 (reciprocating screw). Ο άλλος τύπος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, είναι η μηχανή έγχυσης τύπου εμβόλου (ram ή plunger).



Σχήμα 2.2: Ο κύκλος έγχυσης μηχανής τύπου παλινδρομούντος κοχλία



Σχήμα 2.3: Μηχανή έγχυσης τύπου εμβόλου

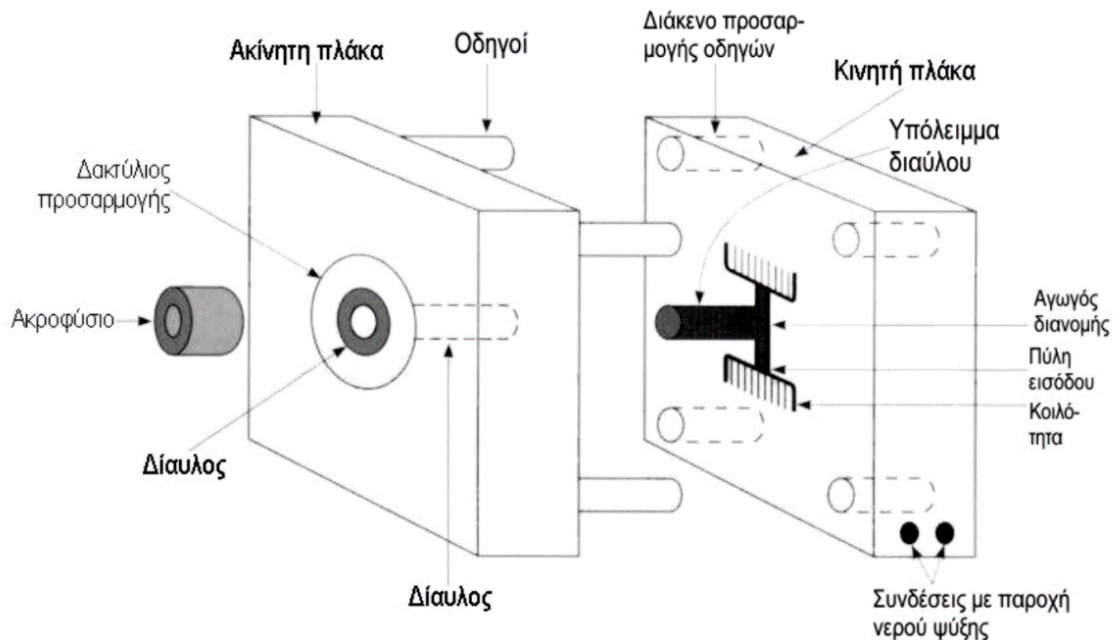
Συγκρίνοντας τα δύο συστήματα, τα πλεονεκτήματα της μηχανής τύπου παλινδρομούντος κοχλία (reciprocating screw) είναι τα ακόλουθα:

- πιο ομοιόμορφη τήξη
- αποτελεσματικότερη ανάμειξη και διασπορά των προσθέτων στη ρητίνη
- χαμηλότερες πιέσεις έγχυσης
- λιγότερες εσωτερικές τάσεις στα μορφοποιημένα αντικείμενα
- συντομότερους κύκλους μορφοποίησης
- μεγαλύτερο εύρος στην ποσότητα έγχυσης σε σχέση με τη δυναμικότητα έγχυσης

2. Καλούπι μορφοποίησης

Το καλούπι μορφοποίησης στο Σχήμα 2.4 αποτελείται από δύο βασικά μέρη, το κινητό και το ακίνητο, πάνω στα οποία είναι αποτυπωμένη η μορφή του προς μορφοποίηση αντικειμένου ως μια κοιλότητα (cavity). Τα μέρη αυτά είναι στερεωμένα πάνω στην κινητή και ακίνητη πλάκα αντίστοιχα, της μηχανής έγχυσης. Το μέγεθος του καλουπιού δεν πρέπει να έχει μεγαλύτερη επιφάνεια από αυτή που επιτρέπουν οι ράβδοι στήριξης της μηχανής. Η σύνδεση της μονάδας έγχυσης με το καλούπι γίνεται μέσω του ακροφυσίου (nozzle) το οποίο βρίσκεται στο τέλος της μονάδας έγχυσης, και εισχωρεί μέσω οπής στην ακίνητη πλάκα του καλουπιού. Η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού και το ακροφύσιο επικοινωνούν μέσω του διαύλου (sprue). Ο διάυλος έχει συνήθως μορφή κόλουρου κώνου με τη μεγαλύτερη βάση προς το μέρος του καλουπιού. Προσοχή πρέπει να δίνεται κατά την τοποθέτηση του καλουπιού, ώστε να υπάρχει πλήρης ευθυγράμμιση μεταξύ του ακροφυσίου και του διαύλου. Στην ευθυγράμμιση αυτή βοηθά ο δακτύλιος προσαρμογής. Από το διάυλο το τήγμα διοχετεύεται μέσω των αγωγών διανομής (runners) στις κοιλότητες. Το ακροφύσιο θερμαίνεται από τον κύλινδρο και αποτελεί το σημείο από όπου το τήγμα διαχωρίζεται από το στερεοποιημένο πολυμερές στο διάυλο, λόγω της ψύξης του καλουπιού.

Η ψύξη του καλουπιού γίνεται με κυκλοφορία ψυχρού μέσου, συνήθως νερού, μέσα από ειδικά κανάλια. Το περίγραμμα των καναλιών αυτών είναι πολύ σημαντικό γιατί προσδιορίζει τον τρόπο ψύξης και κατά συνέπεια τη θερμική συστολή και το ρυθμό κρυστάλλωσης του μορφοποιημένου αντικειμένου.



Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα καλουπιού δύο τμημάτων

3. Κλειστικό σύστημα

Η λειτουργία του κλειστικού συστήματος (clamping unit) είναι να ασκεί την απαραίτητη πίεση ώστε να αποφεύγονται οι διαρροές του τήγματος από την επιφάνεια επαφής των ξεχωριστών τμημάτων που απαρτίζουν το καλούπι μορφοποίησης, μετά την έγχυση της ρητίνης και κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Η απαιτούμενη δύναμη του κλειστικού (F) συνδέεται με την πίεση έγχυσης (P) και την επιφάνεια των κοιλότητων του καλουπιού (A) με την ακόλουθη σχέση:

$$F = P \times A$$

Δύναμη κλειστικού = (Πίεση έγχυσης) x (Συνολική εγκάρσια επιφάνεια των κοιλότητων)

Από τον ορισμό αυτό φαίνεται ότι οποιαδήποτε αύξηση στην πίεση έγχυσης ή στην εγκάρσια επιφάνεια των κοιλότητων μορφοποίησης θα επιφέρει αύξηση στη δύναμη του κλειστικού ώστε να διατηρηθεί το καλούπι κλειστό. Η δύναμη του κλειστικού αποτελεί το μέγεθος για την κατάταξη των μηχανών έγχυσης.

Η πίεση έγχυσης εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως :

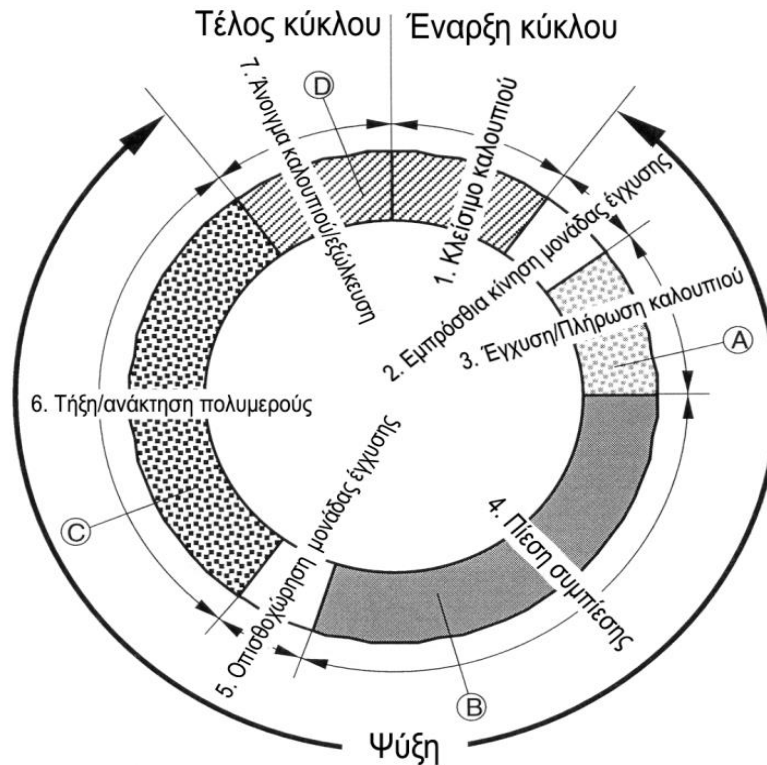
- Το ιξώδες της ρητίνης που πρόκειται να εγχυθεί
- Τη θερμοκρασία
- Το μέγεθος, το μήκος και το είδος (θερμαινόμενοι ή όχι) των αγωγών διανομής
- Ο τύπος και το μέγεθος της πύλης εισόδου
- Το βάθος των κοιλοτήτων μορφοποίησης του καλουπιού

2.2. Στάδια και παράμετροι διεργασίας χύτευσης με έγχυση

Η χύτευση με έγχυση απαρτίζεται από διάφορες φάσεις οι οποίες αποτελούν τον κύκλο χύτευσης. Ο κύκλος όπου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 ξεκινάει με το κλείσιμο του καλουπιού και έπεται η έγχυση του πολυμερούς τήγματος. Όταν ολοκληρωθεί πλήρωση της κοιλοτήτας, ακολουθεί η συμπίεση όπου ασκείται για κάποιο χρόνο πίεση με σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου της συρρίκνωσης του τεμαχίου κατά το στάδιο της ψύξης. Έπειτα, ο κοχλίας οπισθοχωρεί και περιστρέφεται για να τροφοδοτήσει τη δεξαμενή τήγματος στο χώρο που βρίσκεται εμπρός του κοχλίου. Ύστερα, αφού ψυχθεί το αντικείμενο, το καλούπι ανοίγει και γίνεται η εξόλευση του αντικειμένου.

Ο συνολικός χρόνος του κύκλου έγχυσης περιγράφεται από τη σχέση:

$$t_{\text{κύκλου}} = t_{\text{κλειστό καλούπι}} + t_{\text{ψύξης}} + t_{\text{εξόλκευσης}}$$



Σχήμα 2.5: Κύκλος έγχυσης

Μόλις τα τεμάχια εξολκευθούν από το καλούπι, έπεται επιθεώρηση για αξιολόγηση της ποιότητας [9]. Επιπλέον, στη διαδικασία χύτευσης, δεν μπορεί να προβλεφθεί ότι όλα τα καλούπια είναι απαλλαγμένα από ελαττώματα. Τα ελαττώματα όπως το short shot, η στρέβλωση, η συρρίκνωση κ.λπ. εξαρτώνται από χαρακτηριστικά παραμέτρων κατεργασίας, όπως η θερμοκρασία των θερμαινόμενων στοιχείων, οι χρόνοι έγχυσης και πίεσης συγκράτησης, η θερμοκρασία των καναλιών ψύξης κ.λπ.

Πολλές μελέτες αναφέρουν ότι η επιλογή της πρώτης ύλης παίζει σημαντικό ρόλο καθώς βοηθά στον καθορισμό των παραμέτρων μηχανικής κατεργασίας. Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι η θερμοκρασία του βαρελιού, η πίεση έγχυσης και ο χρονισμός έγχυσης [10]. Οι παράμετροι κατεργασίας, αν δεν ταιριάζουν στο υλικό προς έγχυση, οδηγούν περαιτέρω σε ελαττώματα όπως short shot, καύση και συρρίκνωση κ.λπ. Οι προηγούμενες διαθέσιμες μελέτες αναφέρουν ότι τα ελαττώματα εμφανίστηκαν στα καλούπια με έγχυση λόγω των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαδικασία χύτευσης [11]. Για παράδειγμα, μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας έγχυσης μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στο ιξώδες του τήγματος και τελικά να προκαλέσει αλλαγή στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Από την άλλη, εάν η θερμοκρασία ψύξης δεν είναι κατάλληλη, μπορεί να επηρεάσει τη χύτευση και να προκαλέσει το ελάττωμα της συρρίκνωσης.

2.2.1. Βασικές παράμετροι για την χύτευση με έγχυση

1. **Θερμοκρασία τήγματος (melt temperature):** Είναι η θερμοκρασία στην οποία τα πολυμερή υλικά τήκονται ώστε να ρέει ομαλά το υλικό και να εγχέεται στο καλούπι. Η τήξη του υλικού γίνεται μέσα στο βαρέλι μέσω των ηλεκτρικών θερμαντήρων. Τα θερμοστοιχεία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της συνεχούς θερμοκρασίας τήξης στο βαρέλι. Για να επιταχυνθεί η λειτουργία τήξης, σε λιγότερες περιπτώσεις η προθέρμανση του υλικού γίνεται με στεγνωτήρια.
2. **Θερμοκρασία καλουπιού (mold temperature):** Η θερμοκρασία του καλουπιού διατηρείται χαμηλή σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του βαρελιού για να αφήσει το πλαστικό να κρυώσει. Είναι απαραίτητο να διατηρηθεί η κατάλληλη θερμοκρασία και να κατανεμηθεί ομοιόμορφα μέσα στο καλούπι για να αποφευχθούν τα ελαττώματα όπως συρρίκνωση, στρέβλωση κ.λπ. Επίσης, η θερμοκρασία του καλουπιού πρέπει να ελέγχεται για τη ρύθμιση του ρυθμού ψύξης του πολυμερούς υλικού.
3. **Πίεση έγχυσης (Injection pressure):** Η πίεση που εφαρμόζεται στο καλούπι για να παραμείνει κλειστό μέχρι να εγχυθεί το τηγμένο υλικό στο καλούπι. Η πίεση έγχυσης είναι πολύ κρίσιμη για την πλήρωση του καλουπιού και εξαρτάται επίσης από παράγοντες όπως το υλικό που πρόκειται να εγχυθεί, η κατάσταση του τήγματος (μεγάλο ή μικρό ιξώδες), κοιλότητες που δεν πρέπει να πληρωθούν σε ένα καλούπι κ.λπ.
4. **Ταχύτητα έγχυσης (Injection Speed):** Είναι η ταχύτητα με την οποία το τήγμα εγχέεται από το ακροφύσιο έγχυσης στην κοιλότητα του καλουπιού. Το υλικό περνά πρώτα μέσα από διάυλο (sprue), στη συνέχεια μέσω θερμών ή ψυχρών αγωγών διανομής (hot or cool runners) και τέλος μέσω της πύλης εισόδου διοχετεύεται στην κοιλότητα μορφοποίησης. Επίσης, η ταχύτητα έγχυσης παίζει σημαντικό ρόλο για την αποφυγή κάθε είδους ελαττωματικής παραγωγής. Γενικά, η ταχύτητα έγχυσης διατηρείται μέτρια επειδή έχει την εξάρτηση τόσο από τα χαρακτηριστικά του υλικού όσο και από τις παραμέτρους της μηχανής χύτευσης. Η υψηλότερη ταχύτητα έγχυσης μπορεί να γεμίσει με πλεονάζον υλικό τις κοιλότητες μορφοποίησης, ενώ η αργή ταχύτητα μπορεί να προκαλέσει ελλιπή πλήρωση στα καλούπια.
5. **Πίεση συγκράτησης (Packing pressure):** Διατηρείται περίπου στο ήμισυ της πίεσης έγχυσης ώστε να παγώσουν οι πύλες εισόδου του καλουπιού. Κανονικά, ρυθμίζεται κάτω από 5 λεπτά και εξαρτάται από τις γεωμετρικές προδιαγραφές του καλουπιού, όπως το μέγεθος της πύλης, το μήκος του αγωγού διανομής, τον διάυλο κ.λπ. Ο στόχος του καθορισμού αυτής της πίεσης συγκράτησης είναι να διασφαλιστεί ότι το υλικό γεμίζει στις κοιλότητες και οι πύλες είναι παγωμένες για να αποφευχθεί οποιαδήποτε ενέργεια απόσυρσης υλικού λόγω της αντίστροφης ροής (backflow).
6. **Χρόνος συγκράτησης (Packing time):** Είναι ο χρόνος που απαιτείται από τις μηχανές για την πλήρωση του καλουπιού με λιωμένο υλικό μέσω της πίεσης έγχυσης.

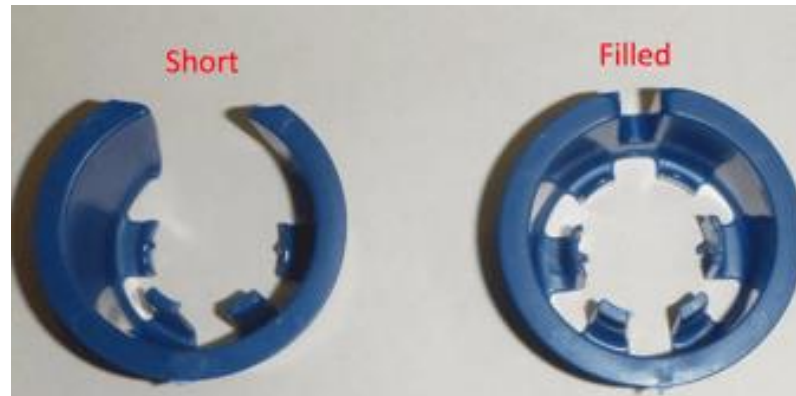
Γενικά, σε μια αυτόματη μηχανή χύτευσης με έγχυση, ο διακόπτης ορίου ή τα σήματα κατασκευής πίεσης δίνονται στον κοχλία έγχυσης για να ωθήσει προς τα εμπρός και να εγχύσει το λιωμένο πλαστικό σε ένα κλειστό καλούπι. Ο χρόνος συγκράτησης ελέγχεται από ένα χρονοδιακόπτη και βασίζεται σε χαρακτηριστικά όπως το σχήμα και το μέγεθος του καλουπιού, ο αριθμός των κοιλοτήτων που πρέπει να πληρωθούν, το υλικό και η πίεση έγχυσης κ.λπ.

- 7. Χρόνος ψύξης (Cooling time):** Ο στόχος της ψύξης είναι να μειώσει τη θερμοκρασία του πολυμερούς υλικού που βρίσκεται μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης μέχρι τη στερεοποίησή του. Ο χρόνος που απαιτείται για τη στερεοποίηση αυτή ονομάζεται χρόνος ψύξης. Ακόμη, αυτό το επιπλέον χρονικό διάστημα επιτρέπει στα καλούπια να γίνουν αρκετά άκαμπτα για να αντέξουν τη διαδικασία εξώλκευσης. Συνήθως, χρησιμοποιείται μια υδρόψυκτη διάταξη εγκατεστημένη μέσα στο καλούπι για το σκοπό αυτό. Ο χρόνος ψύξης εξαρτάται κυρίως από το υλικό που πρόκειται να μορφοποιηθεί, το σχεδιασμό και τις προδιαγραφές χύτευσης κ.λπ. Κανονικά διατηρείται περίπου στο 40-60 % του συνολικού χρόνου κύκλου.

2.3. Προβλήματα και ελαττώματα χύτευσης με έγχυση

Παρά την καλή ποιότητα των προϊόντων που προκύπτουν από την κατεργασία χύτευσης με έγχυση, υπάρχουν πολλά είδη ελαττωμάτων που παρατηρούνται στα τεμάχια. Πολλές παράμετροι μπορούν να συνυπάρξουν στην δημιουργία προβλημάτων, όπως είναι η μορφή του προϊόντος, η κατασκευή του καλουπιού, οι ρυθμίσεις της μηχανής ακόμη και το χρησιμοποιούμενο υλικό. Μερικά κοινά ελαττώματα που παρατηρούνται στα τεμάχια είναι τα εξής:

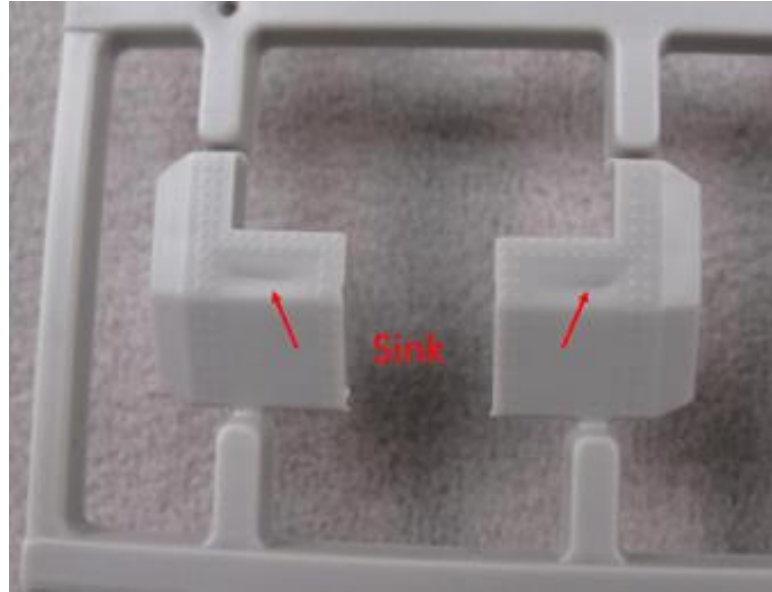
- 1. Short-shot (Ελλιπής πλήρωση):** Το short-shot είναι το φαινόμενο του ημιτελούς τεμαχίου που παράγεται βλ. Σχήμα 2.6. Γενικά, εάν η κοιλότητα του καλουπιού δεν γεμίσει για οποιονδήποτε λόγο ονομάζεται ελλιπή πλήρωση. Συνήθως, αυτή η έλλειψη υλικού συναντάται μακριά από το σημείο τροφοδοσίας ή στα τοιχώματα εκείνα όπου το πάχος του αντικειμένου είναι πολύ λεπτό. Η ροή του υλικού στα καλούπια είναι αυτή που προκαλεί την προκύπτουσα ελλιπή πλήρωση. Η ροή του υλικού εξαρτάται από παραμέτρους της διεργασίας, όπως η θερμοκρασία τήγματος, η πίεση έγχυσης, ο χρόνος έγχυσης κ.λπ. Ακόμη, έχει αναφερθεί από σχετική βιβλιογραφία ότι ο ρυθμός ροής σε χαμηλή θερμοκρασία τήξης και χύτευσης προκαλεί την ανάπτυξη των αεραγωγών και οδηγεί σε ελλιπή πλήρωση [12]. Το ελάττωμα αυτό μπορεί επίσης να παρατηρηθεί σε καλούπια με στενή/μπλοκαρισμένη πύλη εισόδου.



Σχήμα 2.6: Περίπτωση ελλιπούς πλήρωσης (short shot) σε τελικό τεμάχιο

Για την εξάλειψη αυτού του ελαττώματος, η αύξηση της πίεσης έγχυσης και της ταχύτητας έγχυσης θα οδηγήσει σε πλήρη πλήρωση. Ακόμη, οι αυξήσεις της θερμοκρασίας του καλουπιού συμβάλλουν επίσης σημαντικά στη μείωση του ελαττώματος.

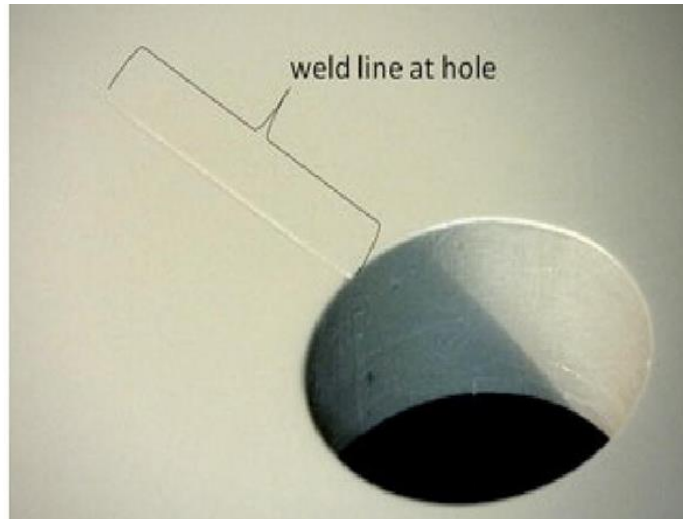
- 2. Sink marks (Σημάδια συρρίκνωσης/τραβήγματος/βαθουλώματος):** Τα sink marks εμφανίζονται ως βαθουλώματα ή κρατήρες όπου παγιδεύονται στο τελικό προϊόν. Εντοπίζονται σε καλούπια με μεγάλο πάχος τοιχώματος βλ. [Σχήμα 2.7](#). Είναι αποτέλεσμα δυναμικών τάσεων οι οποίες προκαλούν την συρρίκνωση στα εσωτερικά στρώματα του πολυμερούς. Αποτελεί μια φυσιολογική ιδιότητα των πολυμερών όμως η δράση της οποίας έχει επιπτώσεις στην εξωτερική επιφάνεια του τεμαχίου. Γενικά, δεν αποτελούν μόνο οπτικό ελάττωμα, αλλά επιδρούν αρνητικά και στην μηχανική αντοχή των προϊόντων έγχυσης. Έπειτα, η μεταβαλλόμενη πίεση έγχυσης, η μικρή σύσφιξη του καλουπιού και η ανομοιομορφία του πάχους των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου προκαλούν την ανάπτυξη των σημαδιών αυτών στα τελικά προϊόντα [13]. Είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψιν η συρρίκνωση του πολυμερούς στο σχεδιασμό καλουπιού επειδή συνδέεται με ελαττώματα βαθουλωμάτων, ειδικά στα καλούπια με παχύτερη γεωμετρία.



Σχήμα 2.7: Περίπτωση βαθουλωμάτων (sink marks) σε τελικό τεμάχιο

Για την εξάλειψη του ελαττώματος της συρρίκνωσης, είναι απαραίτητο να μειωθεί η θερμοκρασία καλουπιού (mold temperature) και να αυξηθεί ελαφρά η πίεση συμπίεσης (packing pressure), ο χρόνος συμπίεσης (packing time) και ο χρόνος ψύξης (cooling time). Αυτό θα βοηθήσει στο να γίνει πιο επαρκής ψύξη και σκλήρυνση του πολυμερούς. Επιπλέον, η αύξηση του χρόνου ψύξης και η μείωση του πάχους των παχύτερων τμημάτων θα εξασφαλίσουν ταχύτερη ψύξη, όπου θα συμβάλει στη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης βαθουλωμάτων.

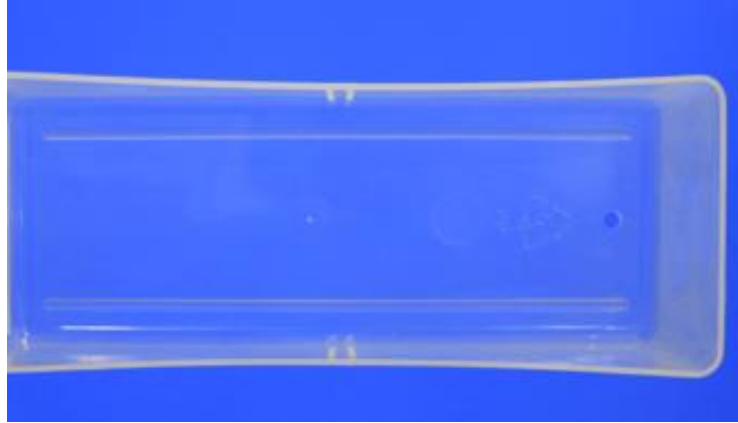
- 3. Weld lines (Γραμμές συγκόλλησης):** Αναφέρεται στις γραμμές που εμφανίζονται στα τελικά εξαρτήματα λόγω της ένωσης του λιωμένου υλικού, που ρέει μέσα στα καλούπια από δύο διαφορετικά μέρη του καλουπιού, κατά τη λειτουργία της χύτευσης βλ. [Σχήμα 2.8](#). Στα περισσότερα προϊόντα, το χαμηλό σημείο τήξης είναι η κύρια αιτία για την εμφάνιση αυτών των γραμμών. Ακόμη και η υψηλή ταχύτητα ροής πίεσης έγχυσης έχει επίσης άμεσο αντίκτυπο στη δημιουργία τέτοιων γραμμών στα προϊόντα. Επιπλέον, αυτό το ελάττωμα παρατηρείται στα καλούπια που κατασκευάζονται με δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά λόγω της διακύμανσης του εύρους θερμοκρασίας μεταξύ δύο υλικών. Ενώ η διαδικασία κατασκευής, δηλαδή η χύτευση με έγχυση, καθιστά απαραίτητη τη διατήρηση της θερμοκρασίας, διαφορετικά και τα δύο μπορούν να στερεοποιηθούν μερικώς, γεγονός που θα προκαλέσει τη σύνδεση μεταξύ τους. Αυτό το ελάττωμα επιδεινώνει περαιτέρω την αντοχή του προϊόντος [14].



Σχήμα 2.8: Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με γραμμή συγκόλλησης (weld line)

Για να εξαλειφθεί αυτό το ελάττωμα, πρέπει πρώτα να αντιμετωπιστούν οι απαιτήσεις της θερμοκρασίας του υλικού. Η αυξημένη θερμοκρασία του υλικού βοηθά στην αποτροπή της μερικής στερεοποίησης του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, η ελαφρά αύξηση της ταχύτητας έγχυσης (flow rate) και της πίεσης έγχυσης (injection pressure), μπορεί επίσης να οδηγήσει στον περιορισμό του ρυθμού ψύξης και ιδιαίτερα πριν το υλικό γεμίσει το καλούπι..

- 4. Warpage (Στρέβλωση ή παραμόρφωση):** Αφορά την απόκλιση της μορφής ενός προϊόντος έγχυσης από την αντίστοιχη μορφή που στοιχειοθετούν οι γεωμετρίες της κοιλότητας και του πυρήνα του καλούπιού βλ. *Σχήμα 2.9*. Ο όρος μπορεί να αφορά είτε την σκέβρωση, είτε την κάμψη ενός προϊόντος είτε την μεταβολή του μεγέθους των γωνιών του. Οι λόγοι για τη στρέβλωση είναι ότι ένα μέρος του αντικειμένου υφίσταται εξόλκευση όταν είναι πολύ ζεστό, ο σχεδιασμός του συστήματος εξώλκευσης είναι κακός, ανεπαρκής πίεση ή χρόνος έγχυσης, ακατάλληλοι ρυθμοί ροής και η ψύξη στο καλούπι δεν είναι ομοιόμορφη [15]. Η στρέβλωση προκύπτει από την αδικαιολόγητη ανάπτυξη πίεσης στη διαδικασία και έχει ως αποτέλεσμα κάμψη/στρέψη στη γεωμετρία του τελικού προϊόντος. Η γρήγορη ψύξη στα καλούπια για την αύξηση του ρυθμού παραγωγικότητας των μηχανών, είναι ο βασικότερος παράγοντας στο ελάττωμα της στρέβλωσης.



Σχήμα 2.9: Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με ελάττωμα στρέβλωσης (warpage)

Για την εξάλειψη αυτού του ελαττώματος, πρέπει ο χρόνος ψύξης να είναι αρκετά μεγάλος και αρκετά αργός ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία παραμενουσών τάσεων που κλειδώνονται στο εξάρτημα. Έπειτα, είναι ευνοϊκό ένα καλούπι με ομοιόμορφο πάχος τοιχώματος, έτσι ώστε το πλαστικό να ρέει προς μία μόνο κατεύθυνση. Καθώς επίσης και η επιλογή πλαστικών υλικών που είναι λιγότερο πιθανό να συρρικνωθούν και να παραμορφωθούν. Τα ημικρυσταλλικά υλικά είναι γενικά πιο επιρρεπή σε στρέβλωση.

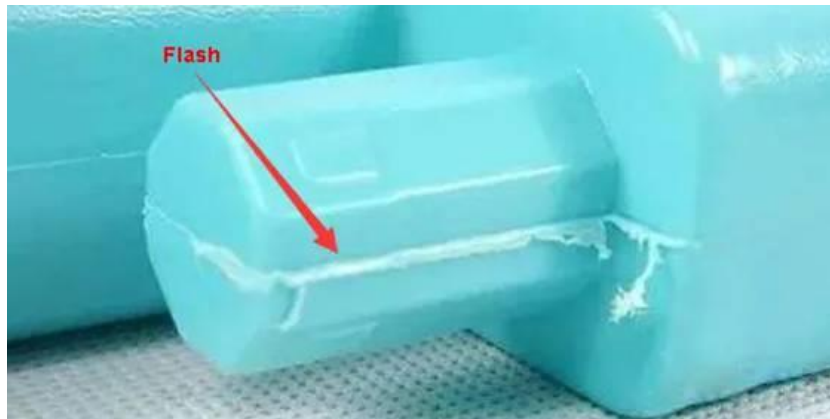
- 5. Flow Marks / Lines (Σημάδια / Γραμμές Ροής):** Τα σημάδια ή οι γραμμές ροής αποτελούν κοινή κατασκευαστική ατέλεια των προϊόντων έγχυσης και είναι ένδειξη ανομοιομορφίας του μοτίβου ροής στο καλούπι βλ. Σχήμα 2.10. Εντοπίζονται συνήθως στις περιοχές γύρω από τις πύλες εισόδου ή/και τις περιοχές με μειωμένη διατομή. Οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα ψύξης του υλικού είναι η κύρια αναφερόμενη αιτία για τα σημάδια ροής. Γενικά όμως, αιτίες εμφάνισης του συγκεκριμένου φαινομένου είναι η χαμηλή θερμοκρασία του τήγματος (melt temperature), η χαμηλή θερμοκρασία της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature), η χαμηλή πίεση συμπίεσης (packing pressure) και η χαμηλή ταχύτητα ροής (flow rate). Τέλος, η ατέλεια αυτή μπορεί να εμφανιστεί όταν τα τοιχώματα του μορφοποιημένου αντικειμένου είναι μεταβλητού πάχους.



Σχήμα 2.10: Περίπτωση τελικού προϊόντος χύτευσης με ελάττωμα γραμμών ροής (flow lines)

Για την εξάλειψη των σημαδιών ροής, θα πρέπει να αυξηθούν οι ταχύτητες έγχυσης και η πίεση στο βέλτιστο επίπεδο, ώστε το καλούπι να γεμίσει πλήρως πριν συμβεί η ψύξη. Η μικρή αλλαγή στο σχεδιασμό, ειδικά αντί ευθύγραμμων (τετράγωνων) γωνιών, προτείνονται οι στρογγυλές γωνίες που θα βοηθήσουν περαιτέρω στη συνοχή της ροής του υλικού μέσα στο καλούπι. Επίσης, προτείνεται η τοποθέτηση της πύλης εισόδου σε ένα σημείο στην κοιλότητα του αντικειμένου στην περίπτωση που αυτό έχει λεπτά τοιχώματα.

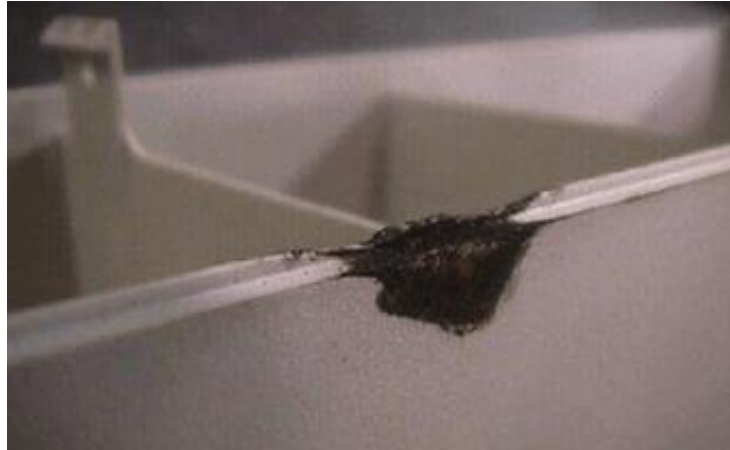
6. Flash / Spew (Προέκταμα): Είναι αποτέλεσμα της περίσσειας χυτευμένου πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού η οποία υπερβαίνει τα όρια που καθορίζει η γεωμετρία της κοιλότητας [16]. Συναντάται συχνά με τη μορφή προεξοχής ή λεπτού χείλους προσκολλημένο περιφερειακά του μορφοποιημένου αντικειμένου και συγκεκριμένα στα σημεία όπου το κινητό και το σταθερό μέρος του καλουπιού εφάπτονται βλ. Σχήμα 2.11. Τα αίτια που μπορούν να το προκαλέσουν είναι η υψηλή ταχύτητα ροής (flow rate) και η υψηλή πίεση συμπίεσης (packing pressure) που οδηγεί σε υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος (overpacking). Όπως επίσης, η χαμηλή δύναμη σύσφιξης του καλουπιού (clamping force), το χαμηλό ιξώδες του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς υλικού και το ακατάλληλο σύστημα εξαερισμού του καλουπιού (venting) μπορούν να συμβάλουν στην εμφάνιση προεκτάματος.



Σχήμα 2.11: Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με προέκτασμα (Flash)

Για την εξάλειψη των ελαττωμάτων προεκτάσματος, θα πρέπει να ρυθμιστεί η θερμοκρασία του καλουπιού και η πίεση έγχυσης. Έπειτα πρέπει να αυξηθεί η πίεση σύσφιξης για να διασφαλιστεί ότι τα μέρη του καλουπιού παραμένουν κλειστά κατά τη διάρκεια της έγχυσης. Απαραίτητο είναι και η εξασφάλιση κατάλληλου συστήματος εξαερισμού. Τέλος, πρέπει να βεβαιωθεί κανείς ότι το καλούπι συντηρείται και καθαρίζεται σωστά (ή αντικαθίσταται όταν έχει φτάσει στο τέλος της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του).

- 7. Burn mark (Σημάδια καύσης):** Τα σημάδια καύσης είναι αποχρωματισμοί, συνήθως σε χρώμα σκουριάς ή σε μαύρο χρώμα, που εμφανίζονται στην εξωτερική επιφάνεια των προϊόντων με έγχυση βλ. Σχήμα 2.12. Η συγκεκριμένη ατέλεια δεν επηρεάζει την ακεραιότητα του προϊόντος, εκτός εάν η καύση είναι σε βαθμό αλλοίωσης ή υποβάθμισης. Τα σημάδια αυτά προκαλούνται είτε από την υποβάθμιση του πλαστικού λόγω υπερβολικής θέρμανσης είτε από υπερβολικά γρήγορες ταχύτητες έγχυσης. Μπορεί επίσης να προκληθούν από την υπερθέρμανση του παγιδευμένου αέρα στην κοιλότητα μορφοποίησης, ο οποίος λόγω της υψηλής πίεσης, χαράσσει την επιφάνεια του καλουπωμένου τμήματος.



Σχήμα 2.12: Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με σημάδια καύσης (Burn mark)

Για την εξάλειψη των ελαττωμάτων καύσης, θα πρέπει αρχικά να μειωθεί η ταχύτητα έγχυσης (flow rate) και η πίεση έγχυσης (injection pressure). Έπειτα, να βελτιστοποιηθεί η εξαέρωση και απαέρωση του αερίου, με σκοπό την εξάλειψη των εγκλωβισμένων φυσαλίδων αέρος (air-traps). Τέλος, θα πρέπει να μειωθούν οι θερμοκρασίες τήγματος (melt temperature) και καλουπιού (mold temperature), ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του τήγματος και του τυχόν παγιδευμένου αέρα.

8. Surface Delamination (Στρωματική Αποκόλληση): Η επιφανειακή αποκόλληση είναι μια κατάσταση κατά την οποία εμφανίζονται λεπτά επιφανειακά στρώματα στο εξάρτημα λόγω ρυπαντικού υλικού. Αυτά τα στρώματα φαίνονται σαν επικαλύψεις υλικού και συνήθως μπορούν να αποκολληθούν από την υπόλοιπη επιφάνεια (δηλαδή «ξεκολλημένα») βλ. Σχήμα 2.13. Αποτελεί ιδιαίτερα σοβαρό ελάττωμα για το λόγο ότι υποβαθμίζει δραματικά τη μηχανική αντοχή των προϊόντων. Η πιο κοινή αιτία εμφάνισης της αποκόλλησης είναι η μόλυνση των σφαιριδίων του πολυμερούς τήγματος με κάποιο ξένο υλικό που συνηθίζεται να αποκαλείται μολυσματικός παράγοντας (contaminant). Τα ξένα υλικά που καταλήγουν στο λιωμένο πολυμερές διαχωρίζονται από το τελικό προϊόν επειδή ο ρύπος και το πολυμερές δεν μπορούν να συνδεθούν. Το γεγονός ότι δεν μπορούν να συνδεθούν επηρεάζει όχι μόνο την εμφάνιση του προϊόντος, αλλά και την αντοχή του. Ο ρύπος δρα ως τοπικό σφάλμα παγιδευμένο μέσα στο πλαστικό. Η υπερβολική εξάρτηση από τους παράγοντες απελευθέρωσης υλικού, που καλύπτουν τόσο την κοιλότητα όσο και τον πυρήνα του καλουπιού, μπορεί επίσης να προκαλέσει αποκόλληση. Επίσης, η υπερβολική υγρασία που ενδεχομένως επικρατεί εντός της κοιλότητας μορφοποίησης, λόγω ακατάλληλης προθέρμανσης πριν από την έναρξη του κύκλου έγχυσης, μπορεί επίσης να προκαλέσει αποκόλληση.



Σχήμα 2.13: Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με ελάττωμα αποκόλλησης (delamination)

Για την εξάλειψη των ελαττωμάτων αποκόλλησης θα πρέπει αρχικά να έχει γίνει σωστή αφύγρανση πολυμερούς υλικού και προθέρμανση του καλουπιού, με σκοπό να αντιμετωπιστεί η υψηλή υγρασία στο εσωτερικό της κοιλότητας. Στην συνέχεια, να γίνει αύξηση της θερμοκρασίας του καλουπιού (mold temperature) και της θερμοκρασίας του τήγματος (melt temperature). Έπειτα, είναι σημαντικό να γίνει λείανση των γωνιών και των αιχμηρών ακμών του προς μορφοποίηση αντικειμένου για να αποφευχθούν ξαφνικές αλλαγές στη ροή του τήγματος. Τέλος, να γίνει εστίαση στον μηχανισμό εξόλκευσης στο σχέδιο του καλουπιού για να μειωθεί ή να εξαλειφθεί η εξάρτηση από τους παράγοντες απελευθέρωσης καλουπιού.

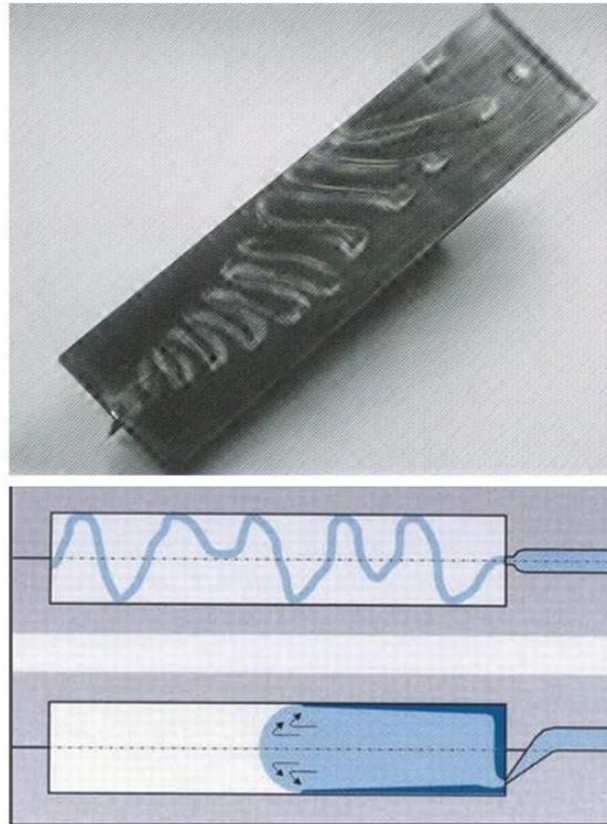
- 9. Voids (Κενά):** Τα κενά είναι θύλακες αέρα που παγιδεύονται μέσα ή κοντά στην επιφάνεια ενός αντικειμένου χυτευμένου με έγχυση βλ. Σχήμα 2.14. Τα κενά προκαλούνται συχνά από ανομοιομορφη στερεοποίηση μεταξύ της επιφάνειας και των εσωτερικών τμημάτων του αντικειμένου. Αυτό μπορεί να επιδεινωθεί όταν η πίεση συμπίεσης (packing pressure) είναι ανεπαρκής για να συμπιεστεί το τήγμα στο καλούπι και να αποβληθεί ο αέρας που ενδεχομένως βρίσκεται παγιδευμένος στην κοιλότητα. Μπορούν επίσης να δημιουργηθούν κενά όταν το κινητό και το σταθερό μέρους του καλουπιού δεν είναι σωστά ευθυγραμμισμένα.



Σχήμα 2.14: Περίπτωση τελικών προϊόντων έγχυσης με ελάττωμα κενών (voids)

Για την εξάλειψη των ελαττωμάτων κενών θα πρέπει αρχικά να τοποθετηθεί η πύλη στο παχύτερο μέρος του καλουπιού, με στόχο την επαρκή συμπίεση του πολυμερούς τήγματος στις περιοχές αυτές προτού ψυχθούν τα λεπτότερα τοιχώματα του αντικειμένου και φράξουν οι πύλες εισόδου με στερεοποιημένο πολυμερές. Ύστερα, να αυξηθεί η πίεση με την οποία εγχέεται το υλικό στο καλούπι, ώστε να αφαιρεθούν οι θύλακες αέρα (air-traps) και να αποφευχθούν τα κενά (voids). Με τις πλαστικές ρητίνες χαμηλότερου ιξώδους είναι λιγότερο πιθανό να προκληθούν φυσαλίδες αέρα που δημιουργούν ελαττώματα στην χύτευση με έγχυση εξαρχής. Έπειτα, είναι σημαντικό να γίνει αύξηση της πίεσης συμπίεσης καθώς και του χρόνου συμπίεσης, ώστε να επιτραπεί μεγαλύτερη συμπίεση του πολυμερούς. Τέλος, θα πρέπει να βεβαιωθεί κανείς ότι τα μέρη του καλουπιού είναι τέλεια ευθυγραμμισμένα.

10. Jetting (Φαινόμενο «Εκτόξευσης» ή Φαινόμενο Πίδακα): Η εκτόξευση αναφέρεται σε μια κατάσταση όπου το λιωμένο πλαστικό αποτυγχάνει να κολλήσει στην επιφάνεια του καλουπιού λόγω της υψηλής ταχύτητας έγχυσης (flow rate) κάτι που οδηγεί στην ανάπτυξη τυρβώδους ροής (turbulent flow). Όντας ρευστό, το λιωμένο πολυμερές στερεοποιείται σε μια κατάσταση όπου εμφανίζονται κυματιστές πτυχές του ρεύματος εκτόξευσης στην επιφάνεια του μορφοποιημένου αντικειμένου με έγχυση. Η εκτόξευση συμβαίνει κυρίως όταν η θερμοκρασία τήγματος (melt temperature) είναι πολύ χαμηλή και το ιξώδες του τηγμένου πλαστικού γίνεται πολύ υψηλό, αυξάνοντας έτσι την αντίσταση στην ροή του μέσα στο καλούπι. Όταν το πολυμερές έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα του καλουπιού, ψύχεται γρήγορα και αυξάνεται το ιξώδες. Το υλικό που ρέει πίσω από αυτό το παχύρρευστο πολυμερές ωθεί περαιτέρω το παχύρρευστο πολυμερές αφήνοντας σημάδια απόξεσης, μια παχύρρευστη «σερπαντίνα», στην επιφάνεια του τελικού προϊόντος βλ. Σχήμα 2.15 (πάνω).



Σχήμα 2.15: Περίπτωση τελικού προϊόντος έγχυσης με ελαττώμα εκτόξευσης (Jetting)(πάνω), σκαρίφημα της ανάπτυξης του φαινομένου εκτόξευσης και έπειτα της εξάλειψής του (κάτω)

Για την εξάλειψη του ελαττώματος πίδακα θα πρέπει να γίνει αύξηση των θερμοκρασιών τήγματος (melt temperature) και καλουπιού (mold temperature). Επίσης, να αυξηθεί το μέγεθος της πύλης έτσι ώστε η ταχύτητα έγχυσης (flow rate) να γίνει πιο αργή. Έπειτα να γίνει βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της πύλης εισόδου, για να εξασφαλιστεί επαρκή επαφή μεταξύ του πολυμερούς και του καλουπιού.

Συνοπτικά, τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από τα ελαττώματα που αναφέρονται παραπάνω, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί. Εκεί παρουσιάζεται ο τρόπος μεταβολής των παραμέτρων έγχυσης με σκοπό την μείωση ή και εξάλειψη των εκάστοτε ατελειών έγχυσης.

Πίνακας 1: Τρόπος μεταβολής παραμέτρων για την εξάλειψη των ελαττωμάτων στην χύτευση με έγχυση

Ελαττώματα Έγχυσης	Υπεύθυνες παράμετροι								
	Melt (material) temperature	Mold temperature	Packing Pressure	Injection Pressure	Packing Time	Cooling Time	Injection Speed (flow rate)	Clamping force	Εξαέρωση υλικού
Short-shot	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση			Αύξηση		
Sink-marks		Μείωση	Αύξηση		Αύξηση	Αύξηση			
Weld-lines	Αύξηση		Αύξηση	Αύξηση					
Warpage						Αύξηση			
Flow-marks			Αύξηση	Αύξηση			Αύξηση		
Flash			Μείωση				Μείωση	Αύξηση	Βελτίωση
Burn-marks	Μείωση	Μείωση		Μείωση				Μείωση	Βελτίωση
Delamination	Αύξηση	Αύξηση							
Voids			Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση				
Jetting	Αύξηση	Αύξηση					Μείωση		

2.4. Μελέτη της χύτευσης με έγχυση μέσω προσομοίωσης

Όπως είναι γνωστό στην κατεργασία παραγωγής χύτευση με έγχυση απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός καλουπιού για ένα νέο προϊόν. Αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη υψηλής ποιότητας ενός προϊόντος με κομψή εμφάνιση και καλές μηχανικές ιδιότητες. Προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός για το εκάστοτε αντικείμενο εφαρμόζονται τεχνικές όπως αυτή της δοκιμής και σφάλματος. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών επεξεργασίας με σκοπό την χαμηλότερη στρέβλωση, συρρίκνωση, υπολειπόμενη τάση, λιγότερες ανισοροπίες, παγίδες αέρα, γραμμές συγκόλλησης κ.λπ. Ωστόσο, αυτές οι δοκιμές συνήθως αυξάνουν το τελικό κόστος και είναι χρονοβόρες. Αυτό θα οδηγήσει σε απώλεια της ανταγωνιστικότητας σε μακροπρόθεσμη βάση.

Ευτυχώς, τα προβλήματα χύτευσης με έγχυση μπορούν να προβλεφθούν και να επιλυθούν πριν από την έναρξη της παραγωγής [17]. Ακόμη και κατά το στάδιο του σχεδιασμού του καλουπιού με την βοήθεια των λογισμικών προσομοίωσης χύτευσης με έγχυση ή IMS (Injection Molding Simulation) όπως είναι τα Autodesk Moldflow®, Moldex3D® και C-MOLD™. Το IMS παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των κατάλληλων σχεδίων των καλουπιών. Εκτός αυτού, το IMS βοηθά επίσης στον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων κατεργασίας.

Οι προσομοιώσεις που εκτελούνται σε τέτοια λογισμικά παρουσιάζουν ορισμένες απλοποιήσεις, όπως (1) η υπόθεση ότι το τήγμα πολυμερούς ρέει μέσω παράλληλων πλακών χωρίς ακμές, (2) δεν υπάρχει απώλεια θερμότητας ή αντίσταση στη ροή και (3) η υπόθεση ροής τήγματος πολυμερούς μέσω αγωγών διανομής με συμμετρικές συνθήκες κατά μήκος.

Αυτές οι παραδοχές δεν αλλάζουν τα αποτελέσματα και έτσι, οι χρήστες μπορούν να προσομοιώσουν το μοτίβο ροής, το χρόνο πλήρωσης, τις γραμμές συγκόλλησης, το κλάσμα παγωμένου στρώματος, τις αεροπαγίδες, τη συρρίκνωση, τις διαδικασίες συσκευασίας και ψύξης με μικρό σφάλμα.

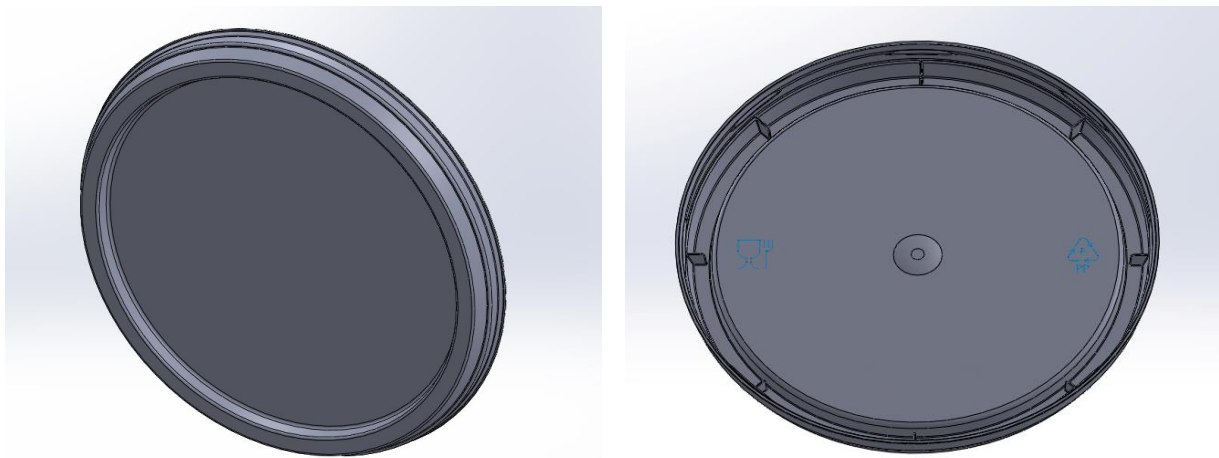
Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι οι εφαρμογές των πλαστικών έχουν επεκταθεί πολύ πέρα από τα καθημερινά προϊόντα. Κυμαίνονται από προσωπική φροντίδα, είδη οικιακής χρήσης, συσκευασίες τροφίμων και ποτών, παιχνίδια, αθλητικό εξοπλισμό έως και ηλεκτρικά εξαρτήματα και πάνελ. Με άλλα λόγια, τα πλαστικά είναι πανταχού παρόντα στην καθημερινή ζωή και παίζουν ζωτικό ρόλο στη βιομηχανία καταναλωτικών προϊόντων. Συνεπώς, οι κατασκευαστές καταναλωτικών προϊόντων πρέπει να εξασφαλίσουν την επιτυχία τους ανταποκρινόμενοι γρήγορα σε συνεχείς προκλήσεις όπως:

- Η μεταφορά θερμότητας και η συμβατότητα υλικών είναι κρίσιμα ζητήματα για προϊόντα χύτευσης πολλαπλών συστατικών υλικών, όπως ξυράφια ή λαβές οδοντόβουρτσας, λόγω των διαφορών στις θερμικές ιδιότητες των υλικών.
- Η σταθερότητα των διαστάσεων, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου στρεβλώσεων είναι η πρόκληση διαφόρων νέων εφαρμογών για καταναλωτικά προϊόντα, όπως η προσωπική οδοντιατρική φροντίδα.
- Για τη μαζική παραγωγή προϊόντων όπως η συσκευασία προσωπικής υγιεινής. Καθώς οι εταιρείες προσπαθούν να συντομεύσουν τον χρόνο του κύκλου έγχυσης, υπάρχει κίνδυνος να προκληθεί το φαινόμενο της στρέβλωσης (Warpage) από την ανεπαρκή ψύξη.
- Εκτός από τη σταθερότητα των διαστάσεων, το κόστος ενέργειας και υλικών, παίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο στη λήψη αποφάσεων για το προϊόν.
- Παιχνίδια όπως τα προϊόντα «LEGO» απαιτούν έλεγχο διαστάσεων υψηλής ακρίβειας, γεγονός που περιπλέκει τον σχεδιασμό του καλουπιού και καθιστά δύσκολη την ανάπτυξη προϊόντων αποκλειστικά με βάση την εμπειρία.
- Η μηχανική αντοχή και η ανθεκτικότητα του προϊόντος που επίσης απαιτείται σε μια τέτοια παραγωγή.

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1. BAZIGOS S.A – Περιγραφή Προϊόντος

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία το προϊόν που μελετάται είναι ένα πλαστικό κυκλικό καπάκι όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, της κατασκευαστικής εταιρείας «Bazigos S.A.». Η εταιρεία αποτελεί μια σύγχρονη ολοκληρωμένη μονάδα παραγωγής με ευρύ φάσμα μηχανημάτων χύτευσης με έγχυση, καθώς ειδικεύεται σε καλούπια έγχυσης, προοδευτικές μήτρες κοπής και διαμόρφωσης και στην μαζική παραγωγή μεταλλικών και πλαστικών εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας. Το προϊόν που εξετάζεται παράγεται μαζικά μέσω της τεχνολογίας χύτευσης με έγχυση στις εγκαταστάσεις της εταιρίας. Το πολυμερές δομικό υλικό που χρησιμοποιείται είναι το πολυπροπυλένιο (PP) J-590K της εταιρίας Borealis. Εν γένει, προμηθεύεται σε διεθνής γαλακτοκομική εταιρεία για την τελική του αξιοποίηση καθώς αποτελεί καταναλωτικό αγαθό.



Σχήμα 3.1: Το εξεταζόμενο καπάκι διαμέτρου 97.6mm και βάρους 4.2gr. Αποτελεί ευγενική χορηγία της εταιρείας «Bazigos S.A.»

Λόγω της συμμετρικής κυκλικής του γεωμετρίας το αντικείμενο αυτό δεν εμφανίζει κάποια σημαντικά ελαττώματα. Πέραν της παρουσίας αεροπαγίδων οι οποίες στην πράξη εξαλείφονται χάρις στα συστήματα εξαερισμού, δεν φαίνεται να εντοπίζεται κάποια άλλη κοινότυπη ατέλεια όπως για παράδειγμα γραμμές συγκόλλησης (weld lines), βαθουλώματα (sink marks), γραμμές ροής (flow lines) κλπ. Αυτό αποδεικνύεται εύκολα μετά από το πέρας επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων κύκλων έγχυσης.

3.2. Το λογισμικό Moldex3D

Στην εποχή μας, η μηχανική με τη βοήθεια υπολογιστή (**CAE-Computer Aided Engineering**) έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην προσομοίωση της κατεργασίας χύτευσης με έγχυση, καθώς παρέχει στους σχεδιαστές/μηχανικούς οπτική και αριθμητική ανατροφοδότηση της συμπεριφοράς του εξαρτήματος και εξαλείφει την παραδοσιακή προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος για βελτιστοποίηση. Η σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή του κατάλληλου υλικού, στην μείωση του χρόνου κύκλου έγχυσης και του κόστους για την αλλαγή καλουπιού[18].

Πάντα αποτελούσε μια πρόκληση να επιτευχθούν ποσοτικές παραλλαγές σχετικά με την επεξεργασία εξωτερικών παραγόντων όπως τα προφίλ θερμοκρασίας, πίεσης και ροής κατά τη χύτευση με έγχυση ακόμη και με τους πιο προηγμένους αισθητήρες. Προκειμένου να ληφθούν οι ποσοτικές αλλαγές των εξωτερικών παραγόντων επεξεργασίας μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού κατά τη διαδικασία χύτευσης με έγχυση, οι μέθοδοι προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων που είναι συνεπείς με τις πραγματικές συνθήκες επεξεργασίας πραγματοποιήθηκαν με χρήση του **εμπορικού λογισμικού ανάλυσης ροής καλουπιού «Moldex3D»** [19], [20].

Το λογισμικό «Moldex3D» αποτελεί μια εμπορική πλατφόρμα που χρησιμοποιείται ευρέως στον βιομηχανικό, ερευνητικό ακόμη και εκπαιδευτικό κλάδο. Γενικά, χρησιμεύει για την μελέτη σε βάθος, την σχεδίαση και την προσομοίωση της κατεργασίας του τελικού προϊόντος έγχυσης. Σε αυτό, μπορούν να ενωθούν τα σχέδια του προϊόντος και της αντίστοιχης μήτρας μορφοποίησης. Έπειτα, επιτρέπει την παραμετροποίηση τόσο της κατασκευαστικής όσο και της υπολογιστικής διαδικασίας. Με άλλα λόγια πρόκειται για ένα αυτόνομο και ολοκληρωμένο σύστημα CAE που είναι ειδικά σχεδιασμένο ώστε να καλύπτει τις ανάγκες προσομοίωσης της κατεργασίας χύτευσης με έγχυση, κάνοντας χρήση την τεχνολογία ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων (**FEA- Finite Elements Analysis**) [21].

Εν γένη, είναι αρκετά σημαντικό και απαραίτητο να γίνεται ανάλυση της διαδικασίας χύτευσης με έγχυση μέσω προσομοίωσης. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η προσομοίωση είναι τα εξής:

- Ελαχιστοποίηση του αριθμού των δοκιμών εργαλείων
- Μείωση του χρόνου προ αγοράς
- Μείωση του χρόνου κύκλου έγχυσης και του ποσοστού σκραπ
- Εξοικονόμηση των δαπανών ηλεκτρικής ενέργειας, χρόνου και ανθρώπινου δυναμικού κατά τη διάρκεια δοκιμών
- Παράταση της διάρκειας ζωής της μήτρας
- Δημιουργία ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος, με μειωμένο κόστος, αυξημένα περιθώρια κέρδους και υψηλότερες πωλήσεις

Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι η μελέτη των προϊόντων έγχυσης είναι πιο αποτελεσματικό να γίνεται μέσω της διαδικασίας προσομοίωσης παρά με την παραδοσιακή μέθοδο «δοκιμής και σφάλματος».

Το Moldex3D Studio επιτρέπει στον χρήστη να προετοιμάσει το μοντέλο, να δημιουργήσει πλέγμα, να ρυθμίσει την προσομοίωση, να εκτελέσει ανάλυση, να προβάλει και να μεταεπεξεργαστεί τα αποτελέσματα σε μία ενιαία πλατφόρμα. Με την εκκίνηση του Moldex3D, η διεπαφή του θα εμφανιστεί όπως φαίνεται παρακάτω. Ο χώρος εργασίας βρίσκεται στο επάνω μέρος του παραθύρου, εμφανίζοντας τις βασικές λειτουργίες στο τρέχον βήμα. Περισσότερες καρτέλες θα εμφανιστούν μετά τη δημιουργία νέας εργασίας (project). Ακολουθώντας την λωρίδα μενού και τις διαφορετικές καρτέλες από αριστερά προς τα δεξιά, οι οδηγοί και τα εργαλεία καθοδηγούν τους χρήστες για ολοκληρωμένες εργασίες μοντελοποίησης. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα γενικά βήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 που ακολουθήθηκαν για την μελέτη και ανάλυση συγκεκριμένης γεωμετρίας προϊόντος έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D.



Σχήμα 3.2: Γενικά βήματα προσομοίωσης στο Moldex3D

Ονομαστικά αυτά είναι τα εξής:

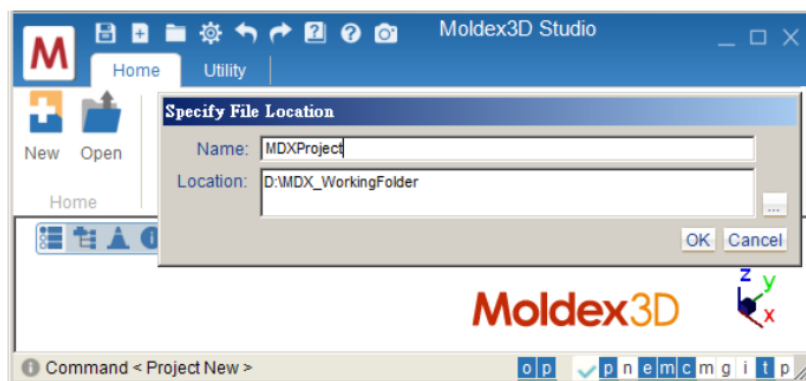
- εισαγωγή και προετοιμασία μοντέλου
- πλέγμα και έλεγχος
- ρύθμιση διαδικασίας
- ρύθμιση ανάλυσης
- εκτέλεση προσομοίωσης
- αποτέλεσμα και αναφορά

3.3. Προ- επεξεργασία

Στην ενότητα αυτή, εισάγεται το 3D σχέδιο του καπακιού, δημιουργείται το 3D πλέγμα του, έπειτα εισάγεται το σύστημα διανομής, ψύξης και η καλουπιέρα που απαιτείται για την προσομοίωση.

3.3.1. Εισαγωγή και προετοιμασία μοντέλου

Ξεκινώντας με το Moldex3D Studio, δημιουργείται αρχικά νέα εκτέλεση κάνοντας κλικ στο «New Run» στο επάνω μέρος του παραθύρου. Καθορίζεται το όνομα του έργου και η θέση του αρχείου βλ. [Σχήμα 3.3](#). Στη συνέχεια, εμφανίζονται περισσότερες διαθέσιμες λειτουργίες στην καρτέλα «Home» και περισσότερες καρτέλες που ακολουθούν στην κορυφή μετά τη δημιουργία νέας εκτέλεσης.



Σχήμα 3.3: Δημιουργία νέου Project στο Moldex3D

Από καρτέλα «Home»

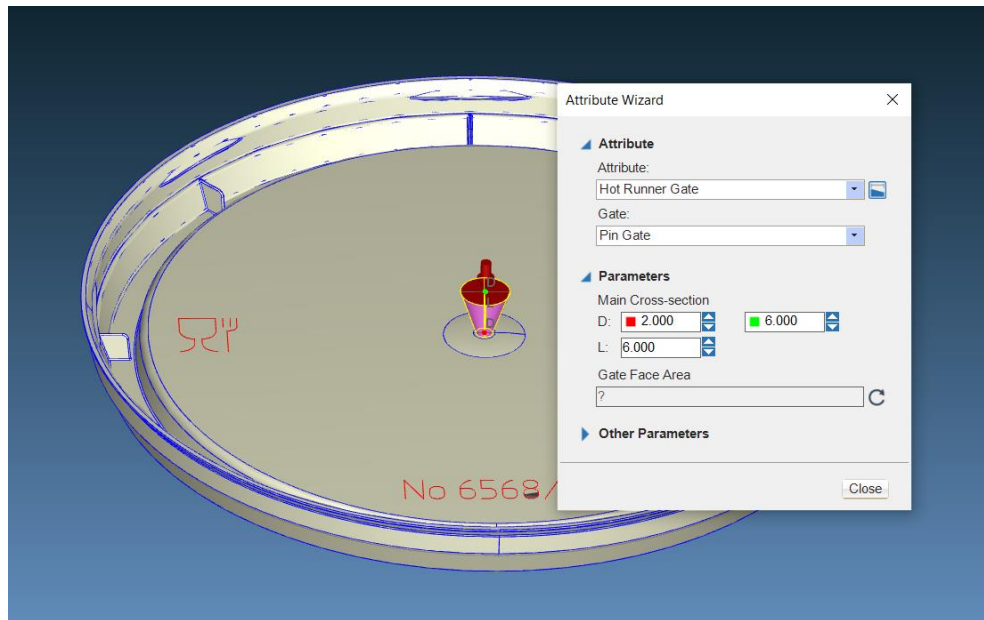
Από την καρτέλα «Home» θα πρέπει πρώτα να επιλεγεί στο Module να αναλυθεί το μοντέλο για τυπική διαδικασία χύτευσης με έγχυση (IM) ή άλλη ειδική διαδικασία χύτευσης (Add-ons). Έπειτα, μέσω του «Import Geometry», γίνεται η εισαγωγή της τρισδιάστατης γεωμετρίας αντικειμένου σε μορφή .stl.

3.3.2. Πλέγμα και έλεγχος

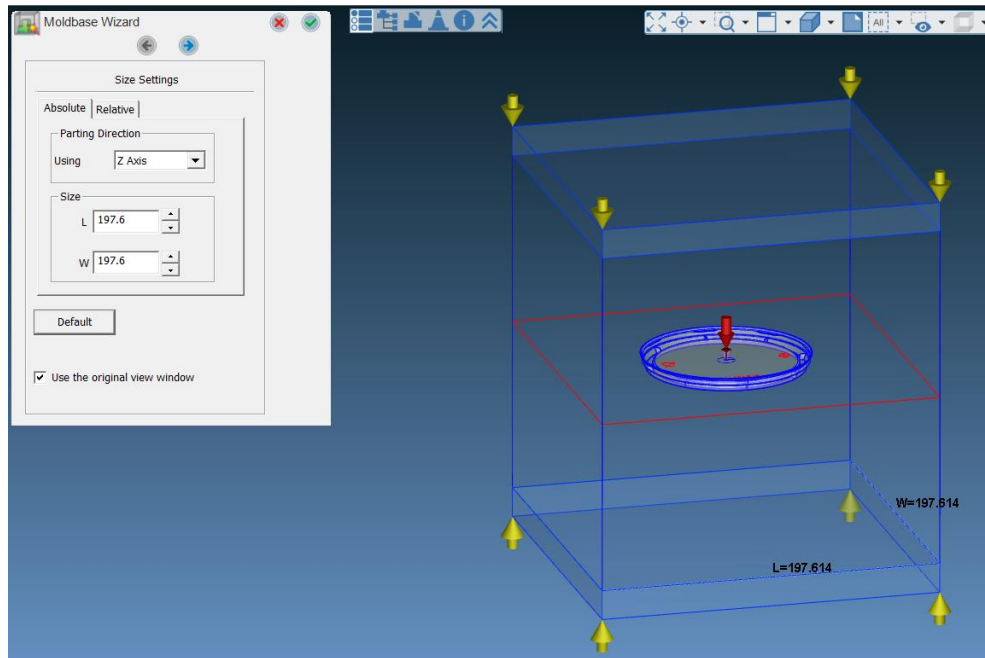
Από καρτέλα «Model»

Μετά την εισαγωγή της γεωμετρίας, το Studio θα αλλάξει από την καρτέλα «Home» στην καρτέλα «Model», ώστε οι χρήστες να ακολουθήσουν τη σειρά στην καρτέλα «Model» και

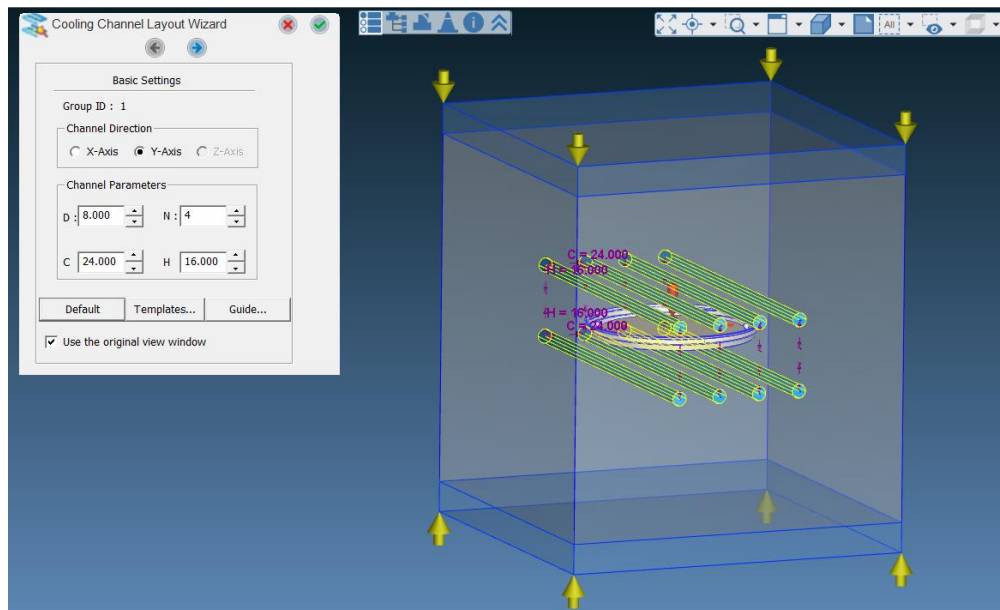
«Mesh» για να προετοιμαστεί ένα νέο μοντέλο πλέγματος. Μέσω του «Auto Heal» το Studio θα εκτελέσει αυτόματη διόρθωση γεωμετρίας για καλύτερη ποιότητα ώστε να ξεκινήσει η δημιουργία πλέγματος. Ακολουθεί ο καθορισμός του «Attribute» σε «part» και η επιλογή του είδους της πύλης εισόδου «Pin Gate» με τα εξής χαρακτηριστικά όπως φαίνεται στο [Σχήμα 3.4](#). Στην συνέχεια γίνεται η εισαγωγή και ο έλεγχος των «by default» καλουπιού και συστήματος ψύξης μέσω των επιλογών του «Moldbase» και του «Cooling system» βλ. [Σχήμα 3.5](#), [Σχήμα 3.6](#).



Σχήμα 3.4: Καθορισμός πύλης εισόδου



Σχήμα 3.5: Εισαγωγή του καλουπιού μέσω του «Moldbase Wizard»

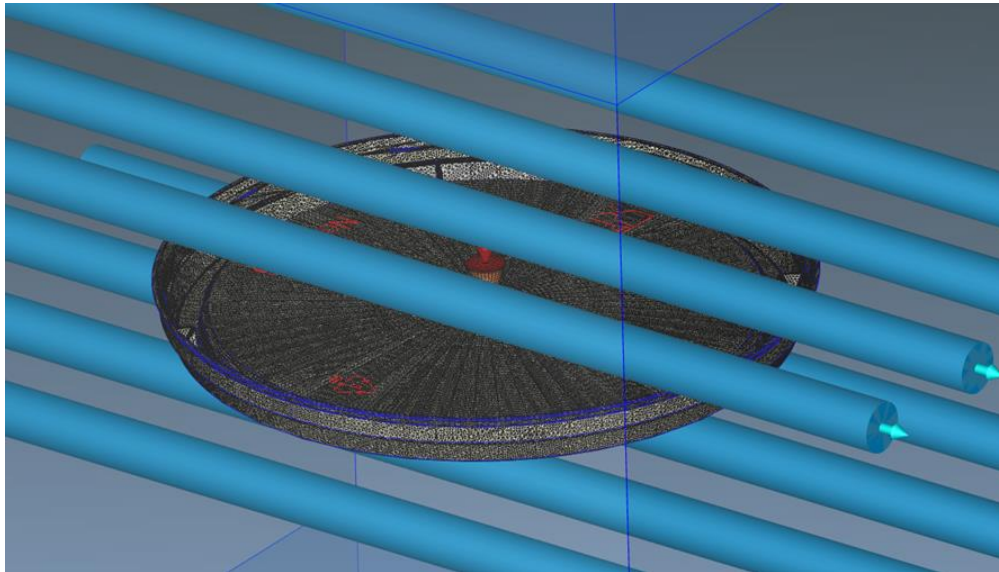


Σχήμα 3.6: Εισαγωγή βέλτιστου συστήματος ψύξης μέσω του «Cooling Channel Wizard»

Από καρτέλα «Mesh»

Εδώ γίνεται η δημιουργία γεωμετρίας του πλέγματος επιφάνειας. Επιλέγεται το ανώτατο πλέγμα «mesh level 5» με σκοπό την βέλτιστη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το Studio θα

πραγματοποιήσει την ανάλυση eDesign (*.mde) ή τη σταθερή ανάλυση (*.mfe) βάσει του τύπου πλέγματος που εισάχθηκε και τέλος γίνεται η εξαγωγή της γεωμετρίας πλέγματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.

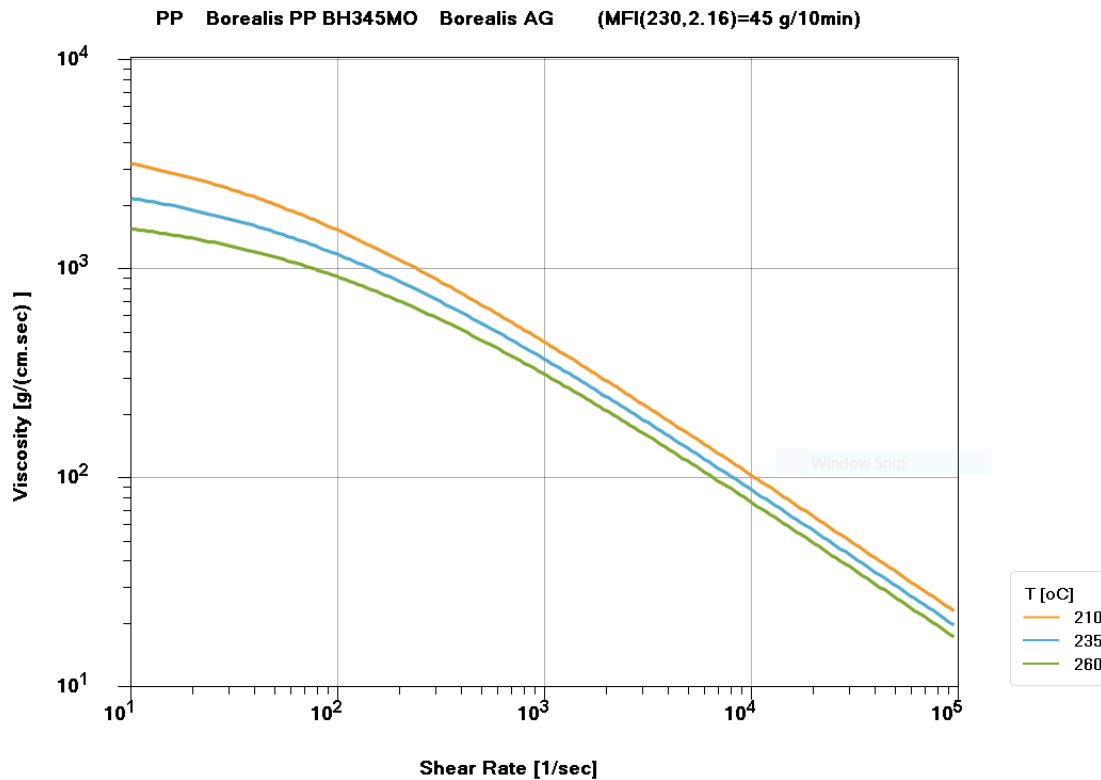


Σχήμα 3.7: Δημιουργία πλέγματος (Generated mesh)

3.4. Διεργασία

Παρακάτω, θα παρουσιαστούν οι παράμετροι της προσομοίωσης της διεργασίας «injection molding» μέσω του λογισμικού «Moldex3D Studio 2022». Στην συνέχεια θα αναλυθούν τα αποτελέσματα της διαδικασίας, η οποία χωρίζεται στις ενότητες της πλήρωσης (filling), συμπίεσης (packing), ψύξης (cooling) και στρέβλωσης (warpage).

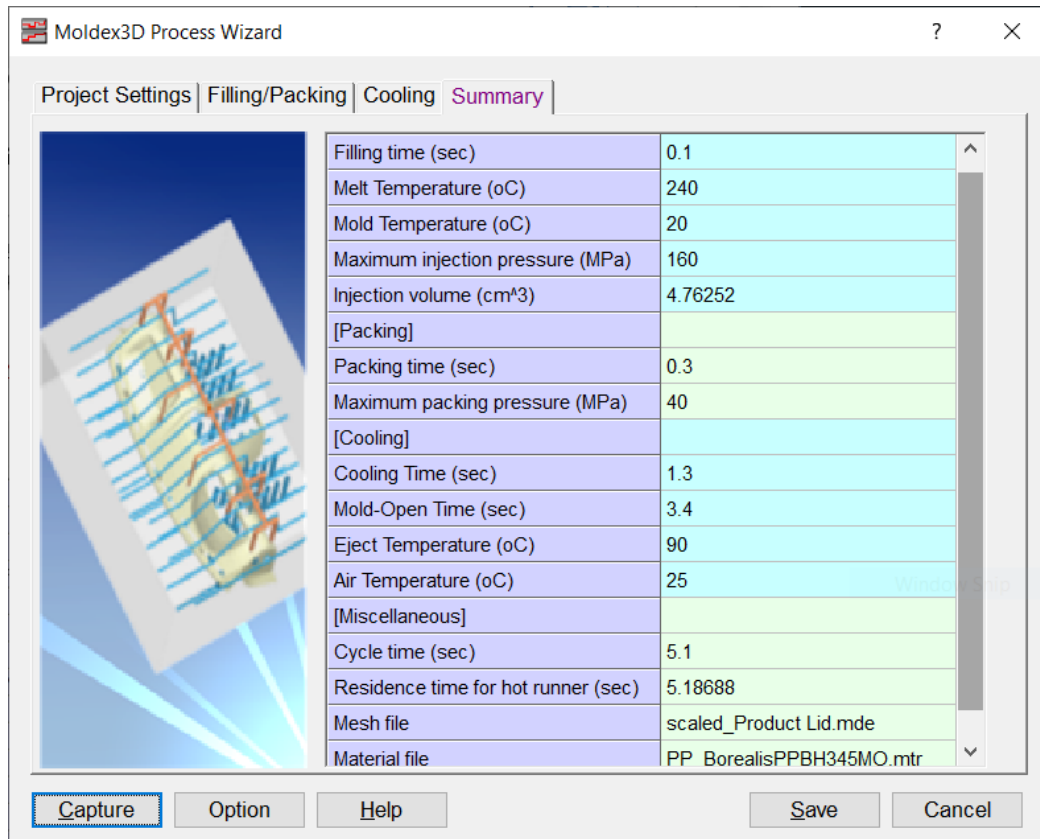
Το πολυμερές υλικό επιλέγεται από την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη που διαθέτει το πρόγραμμα, σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές του πελάτη. Πρόκειται για το πολυπροπυλένιο PP με MFI=45 g/10min της εταιρείας Borealis με χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Χαρακτηριστικά πολυμερές υλικού κατεργασίας χύτευσης με έγχυση

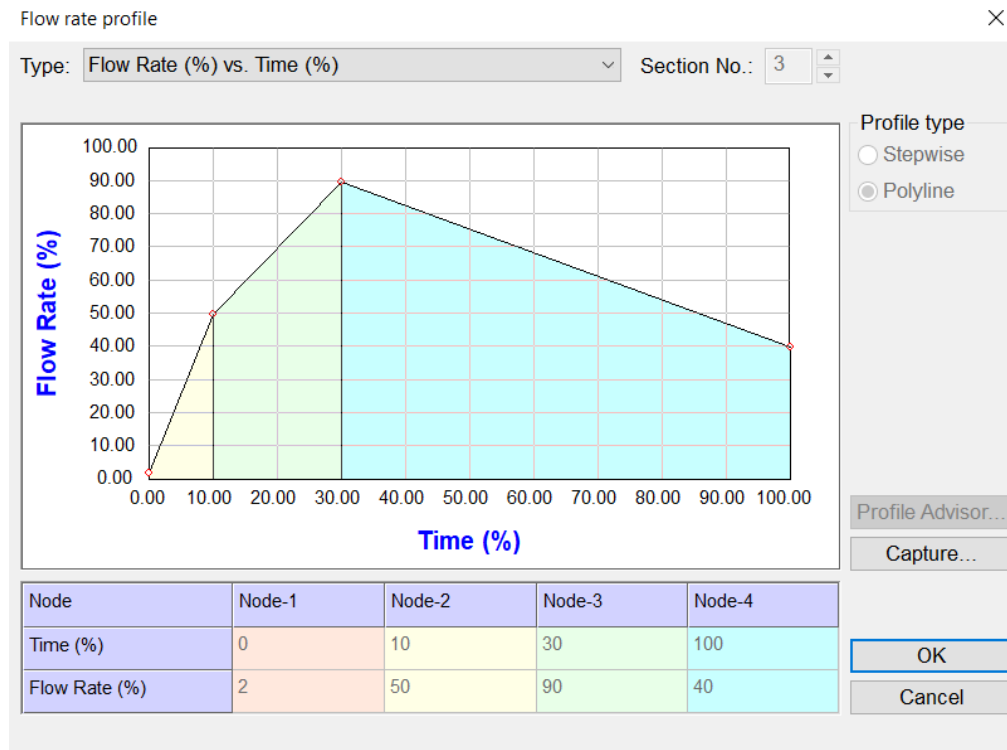
3.4.1. Ρύθμιση κατασκευαστικής διαδικασίας

Αρχικά, παρουσιάζονται συνοπτικά οι κατασκευαστικοί παράμετροι που εισήχθησαν στην καρτέλα του «Process». Όπως φαίνεται στο [Σχήμα 3.9](#) συνοπτικά αυτοί οι παράμετροι αφορούν τις θερμοκρασίες, τις πιέσεις και τους χρόνους για την κάθε φάση όπως αυτοί καθορίστηκαν από την εταιρεία. Σημειώνεται ότι επιλέγεται στις ρυθμίσεις της εργασίας η λειτουργία «CAE mode» ώστε να μπορεί να εισαχθούν χειροκίνητα οι επιθυμητές παράμετροι.

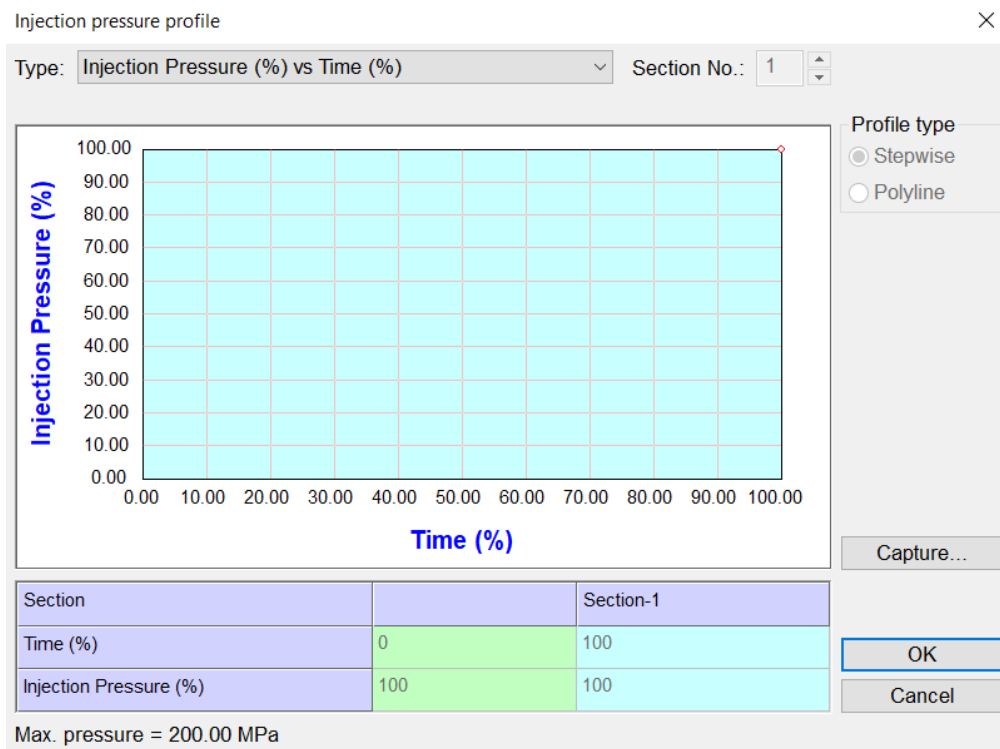


Σχήμα 3.9: Παράμετροι κατασκευαστικής διαδικασίας

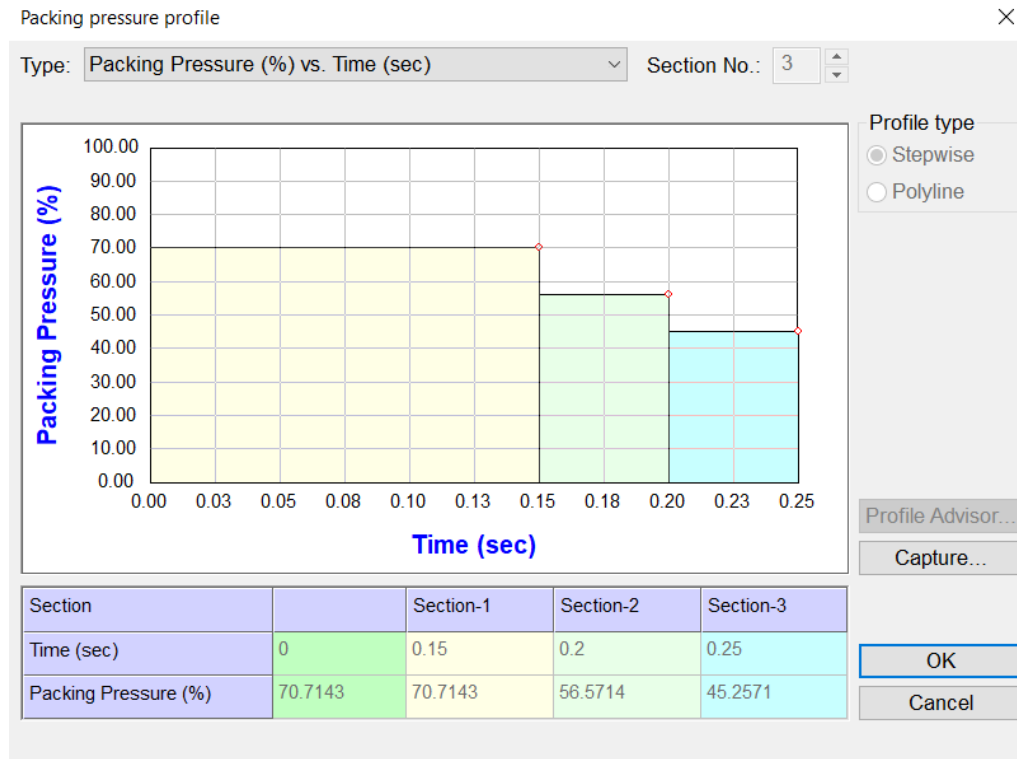
Στην συνέχεια, από την ενότητα «Analysis», συνήθως επιλέγεται το «Transient Analysis- Ct F P Ct W» ούτως ώστε να γίνει μια πλήρη μελέτη στην πλήρωση, στο γέμισμα, στην ψύξη και στην στρέβλωση. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία επιλέγεται η ανάλυση «Filling-Packing» εφόσον χρησιμοποιείται το ιδεατό σύστημα ψύξης του προγράμματος. Τα προφίλ ταχύτητας ροής, πίεσης έγχυσης και πίεσης συμπίεσης που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο [Σχήμα 3.10](#), στο [Σχήμα 3.11](#) και στο [Σχήμα 3.12](#) αντίστοιχα.



Σχήμα 3.10: Προφίλ ταχύτητας ροής τήγματος



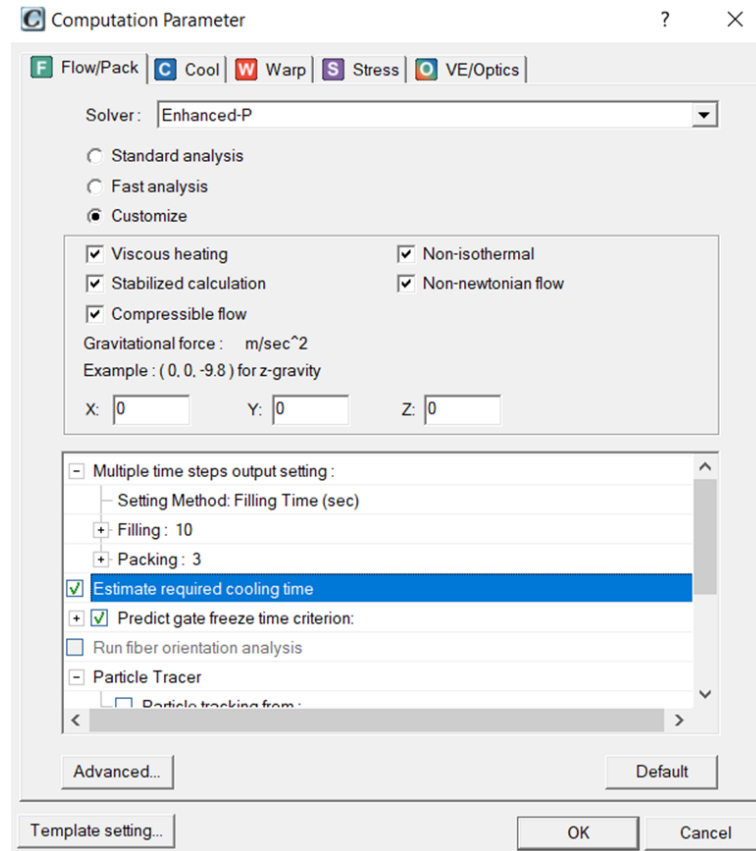
Σχήμα 3.11: Προφίλ πίεσης έγχυσης



Σχήμα 3.12: Προφίλ πίεσης συμπίεσης

3.4.2. Ρύθμιση υπολογιστικής διαδικασίας

Από την ενότητα του «Computation Parameter», στην καρτέλα του «Flow/Pack» επιλέχθηκε ο επιλύτης Enhanced-P με την επιλογή «Customize» ώστε να ενεργοποιηθεί η συμπίεστη ροή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Παράμετροι υπολογιστικής διαδικασίας

3.5. Μετα-επεξεργασία

Μετά το πέρας της προσομοίωσης από την εντολή «Run», στην ενότητα αυτή ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Όλα τα αποτελέσματα παρατίθενται στο «δέντρο εργασίας» που εμφανίζεται στην ενότητα του «Result». Επιλέγοντας την καρτέλα «Result», η οποία είναι διαθέσιμη μετά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης μιας ανάλυσης, αλλάζει η καρτέλα του «Home» σε αυτή των αποτελεσμάτων. Εκεί ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει διάφορα εργαλεία μετα-επεξεργασίας για προσαρμοσμένη ή προηγμένη εμφάνιση αποτελεσμάτων. Παρακάτω, στο [Σχήμα 3.14](#) παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές πληροφορίες που εξάγει το λογισμικό μετά το πέρας της εκάστοτε προσομοίωσης. Αυτά αφορούν λεπτομέρειες για το μοντέλο, πληροφορίες για το χρησιμοποιούμενο πολυμερές υλικό και τις συνθήκες της κατεργασίας.

Model Details	
Mesh Type	eDesign <Level 5>
Solid Mesh Element Count	2,270,122
Part	2,268,330
Hot Runner	1,792
Surface Mesh Element Count	16,810
Part	16,810
Dimension	(mm)
Part	99.08x99.08x8.57
Mold	199.08x199.08x199.08
Volume	(cc)
Part	4.63
Hot Runner	0.08
Material	
Part	PP_BorealisPPBH345MO.mtr
Temperature	°C
Freeze	121.000
Process Condition	
Time	sec
Filling	0.150
Packing	0.250
Cooling	1.300
Mold Open	3.400
Cycle	5.100
Temperature	°C
Melt	230.000
Mold	20.000

Σχήμα 3.14: Συνοπτικές πληροφορίες προσομοίωσης

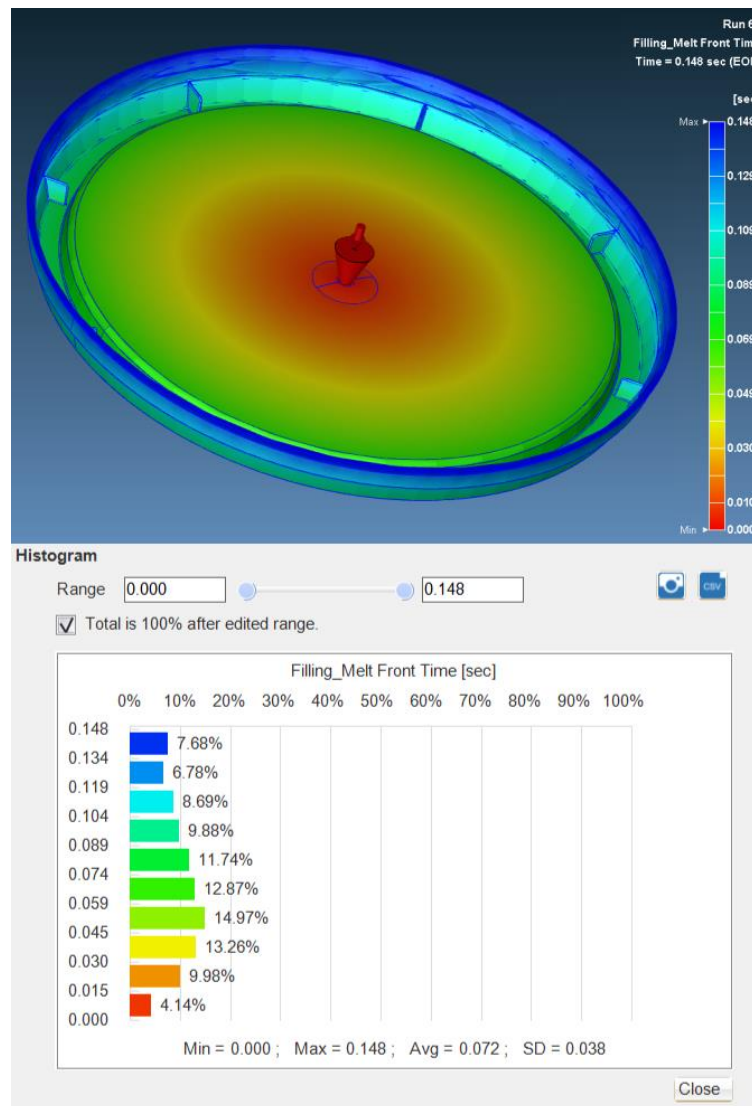
3.5.1. Αποτελέσματα Πλήρωσης

Στα αποτελέσματα της πλήρωσης τα οποία εμφανίζονται πρώτα στην σειρά, ο χρήστης αρχικά έχει πρόσβαση στον «σύμβουλο αποτελεσμάτων» (**result advisor**), που παρέχει εισαγωγή των αποτελεσμάτων, στατιστικά στοιχεία και ιστόγραμμα. Πιο συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να γίνουν ενέργειες όπως:

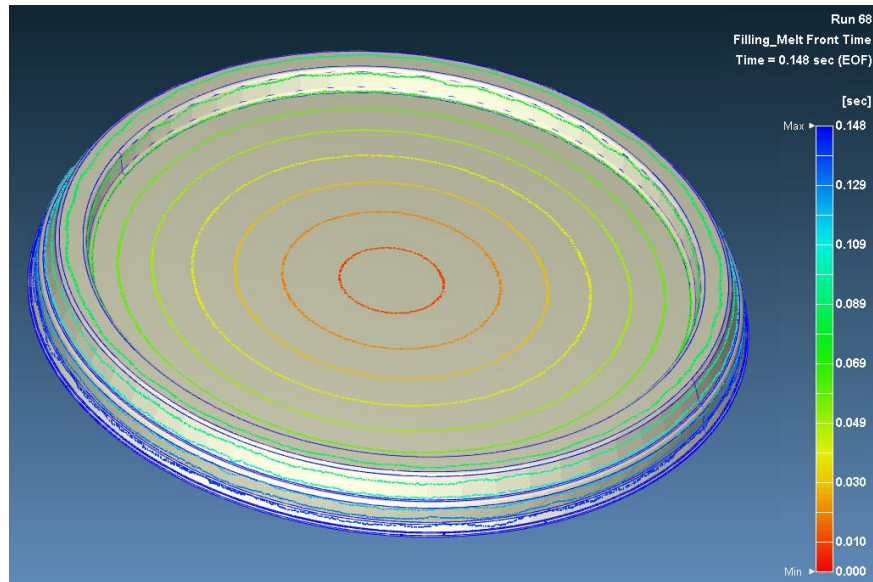
- ✓ Εξέταση του σχεδίου πλήρωσης του καλουπιού
- ✓ Έλεγχος πιθανού προβλήματος ατελούς πλήρωσης (short shot).
- ✓ Προσδιορισμός των θέσεων γραμμής συγκόλλησης
- ✓ Προσδιορισμός τοποθεσιών αεροπαγίδων
- ✓ Έλεγχος συνεισφοράς και εξισορρόπηση της πύλης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα που αφορούν την φάση πλήρωσης.

Χρόνος μετώπου ροής: Το «Filling Melt Front Time» παρουσιάζει την θέση του πολυμερούς τήγματος για την εκάστοτε χρονική στιγμή του κύκλου έγχυσης. Ο συνολικός χρόνος πλήρωσης ανέρχεται στα 0,148 sec (EOF-End of Filling) βλ. Σχήμα 3.15 του προς μελέτη τεμαχίου. Με μια πρώτη ματιά παρατηρείται ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή του τήγματος σε όλη την διάρκεια της φάσης πλήρωσης. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ισοποση κατανομή του πολυμερούς υλικού σε όλη την έκταση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Γεγονός το οποίο αμέσως συνεπάγει ότι έχει αποφευχθεί η ύπαρξη του ελαττώματος της ελλιπούς πλήρωσης. Έπειτα, ένας άλλος τρόπος έλεγχος του μετώπου ροής είναι μέσω των ισοπαραμετρικών καμπυλών, οι οποίες επιβεβαιώνουν ότι το μοτίβο της ροής είναι ομαλό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16.

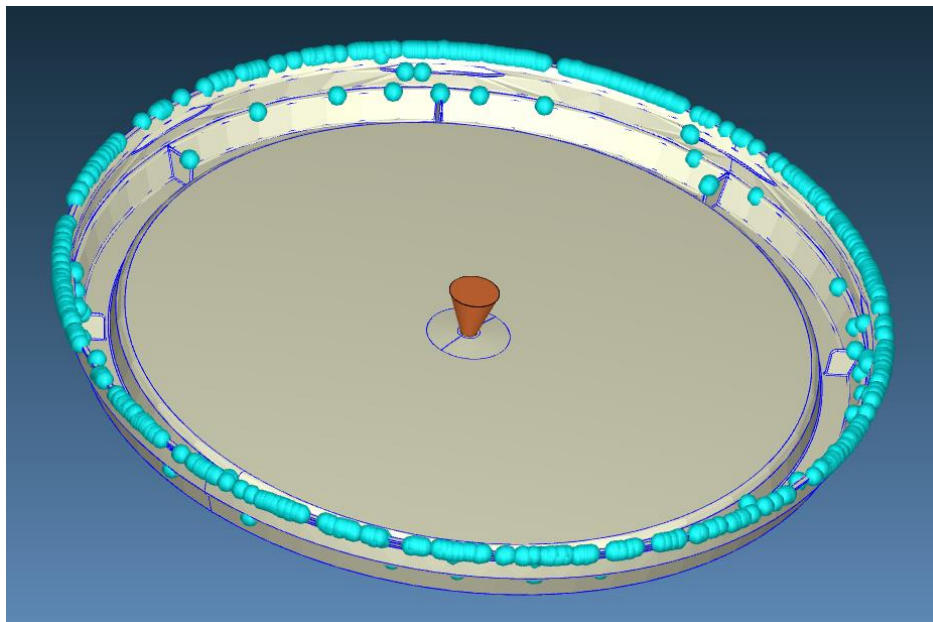


Σχήμα 3.15: Μέτωπο ροής πολυμερούς τήγματος φάσης πλήρωσης (Filling Melt Front Time)



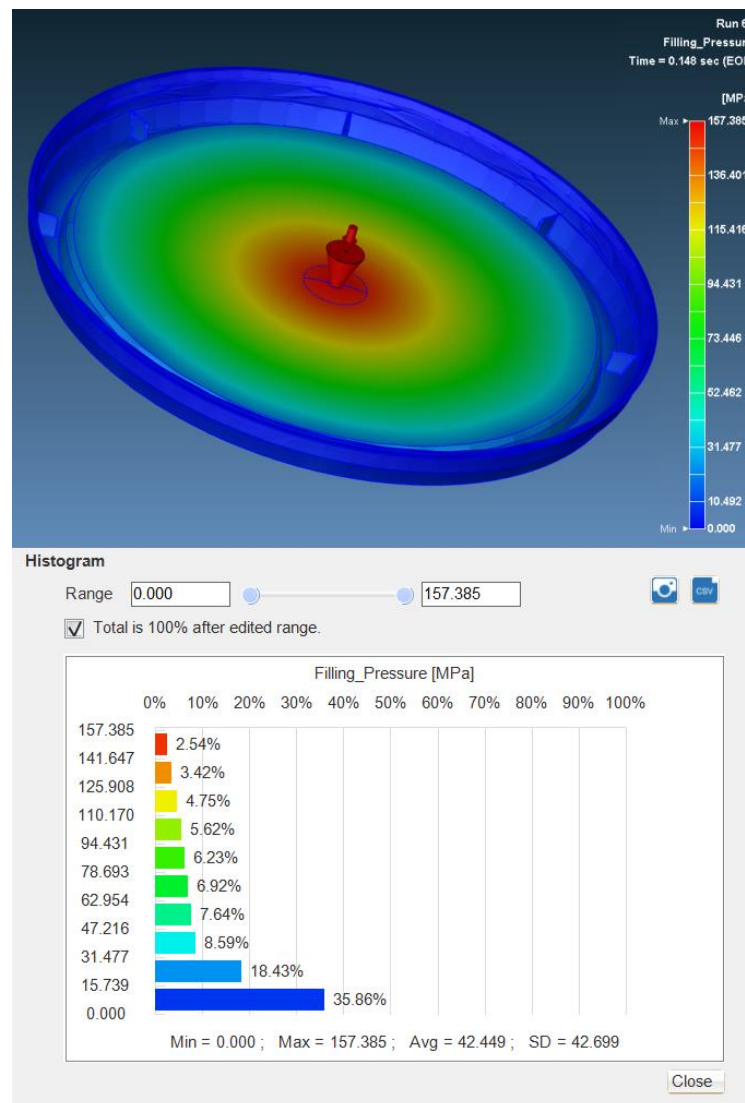
Σχήμα 3.16: Ισοπαραμετρικές καμπύλες χρόνου-μετώπου ροής υλικού

Ύστερα, από το δέντρο των αποτελεσμάτων παρατηρούνται **εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρος (Air traps)**. Αυτό το φαινόμενο είναι κάτι το φυσιολογικό να συμβεί σε τέτοιου είδους γεωμετρία για αυτό η εταιρεία έχει μεριμνήσει και έτσι αυτές πρόκειται να εκλυθούν στην ατμόσφαιρα. Γενικά, εντοπίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές του προϊόντος έγχυσης, περιμετρικά στο γείσο του τεμαχίου και στα νεύρα στήριξης όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 3.17: Εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα στο τεμάχιο μορφοποίησης (Air traps). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν εντοπίζονται **γραμμές συγκόλλησης (Weld Lines)** στο συγκεκριμένο τεμάχιο προς μελέτη.



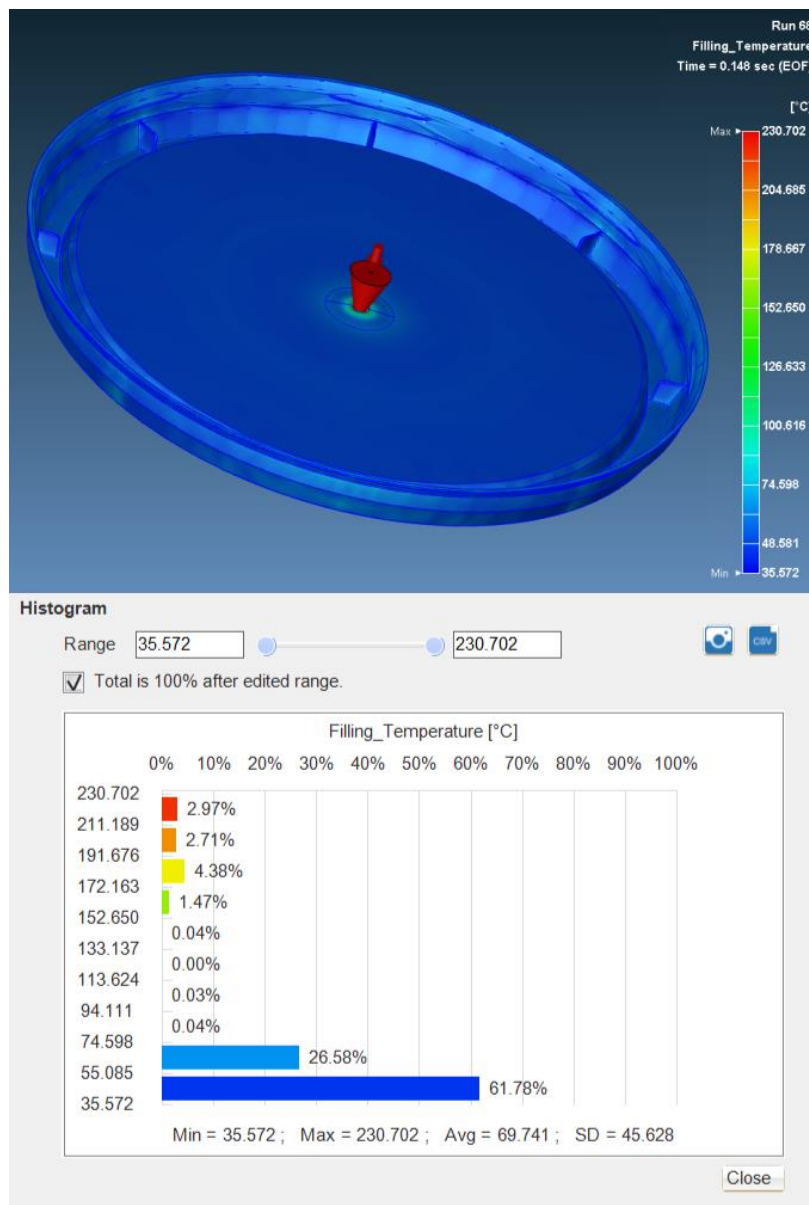
Σχήμα 3.17: Εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα στο τεμάχιο μορφοποίησης (Air traps)

Πίεση Έγχυσης: Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η διακύμανση της πίεσης πλήρωσης (**Filling Pressure**). Παρατηρείται ότι αυτή κυμαίνεται περισσότερο σε χαμηλά επίπεδα κάτι το οποίο φανερώνει η μπλε και πράσινη παλέτα χρωμάτων στο Σχήμα 3.18. Η μέγιστη τιμή στην οποία φτάνει είναι τα 157 MPa καθώς δεν πλησιάζει καθόλου την Max Injection Pressure στα 200MPa. Σε γενικές γραμμές η κατανομή της πίεσης είναι ομοιόμορφη. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι οι τιμές της πραγματικής πίεσης διαφέρουν, εφόσον στην προσομοίωση δεν λαμβάνεται υπόψη το πραγματικό δίκτυο διανομής του υλικού. Προβλέπεται ότι θα υπάρξει μεγαλύτερη πτώση πίεσης στην πράξη καθώς το καλούπι αποτελείται από 4 κοιλότητες μορφοποίησης και αρκετά πολύπλοκο σύστημα ψύξης το οποίο συμβάλει στην πτώση πιέσεων. Από την άλλη πλευρά, σε περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας τήγματος προκαλείται πιο αργή στερεοποίηση στην πύλη εισόδου, άρα μικρότερη πτώση πίεσης με αποτέλεσμα μεγαλύτερης πίεσης στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης.



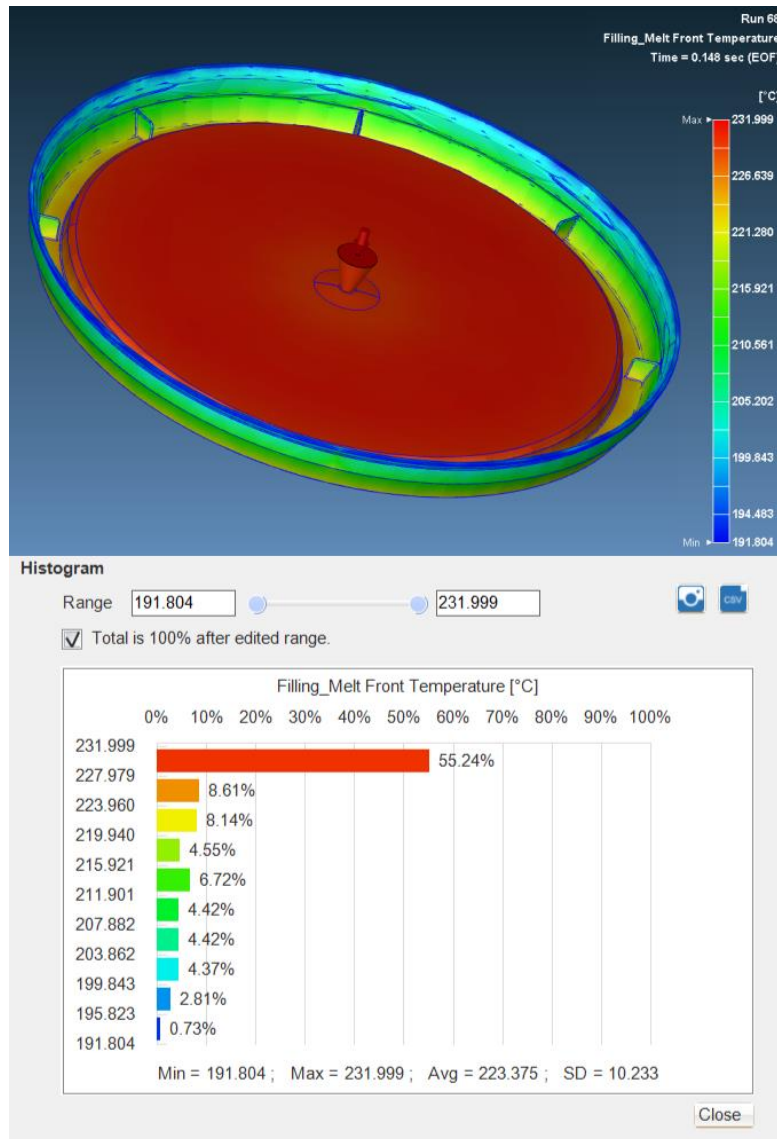
Σχήμα 3.18: Πίεση κατά την φάση έγχυσης (Filling Pressure)

Θερμοκρασία: στο σημείο αυτό εμφανίζεται η κατανομή της θερμοκρασίας πλήρωσης (**Filling Temperature**) εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Όπως είναι αναμενόμενο η θερμοκρασία στο τέλος της φάσης πλήρωσης αγγίζει την μέγιστη τιμή των 230 °C με ποσοστό 3% στο σημείο της πύλης εισόδου. Στο υπόλοιπο τμήμα του τεμαχίου, περιμετρικά προς την κατεύθυνση των τοιχωμάτων αυτή έχει χαμηλές τιμές καθώς έρχεται σε επαφή με τα ψυχρά τοιχώματα του καλουπιού και έχει ξεκινήσει το στάδιο στερεοποίησης βλ. Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19: Θερμοκρασία έγχυσης (Filling Temperature)

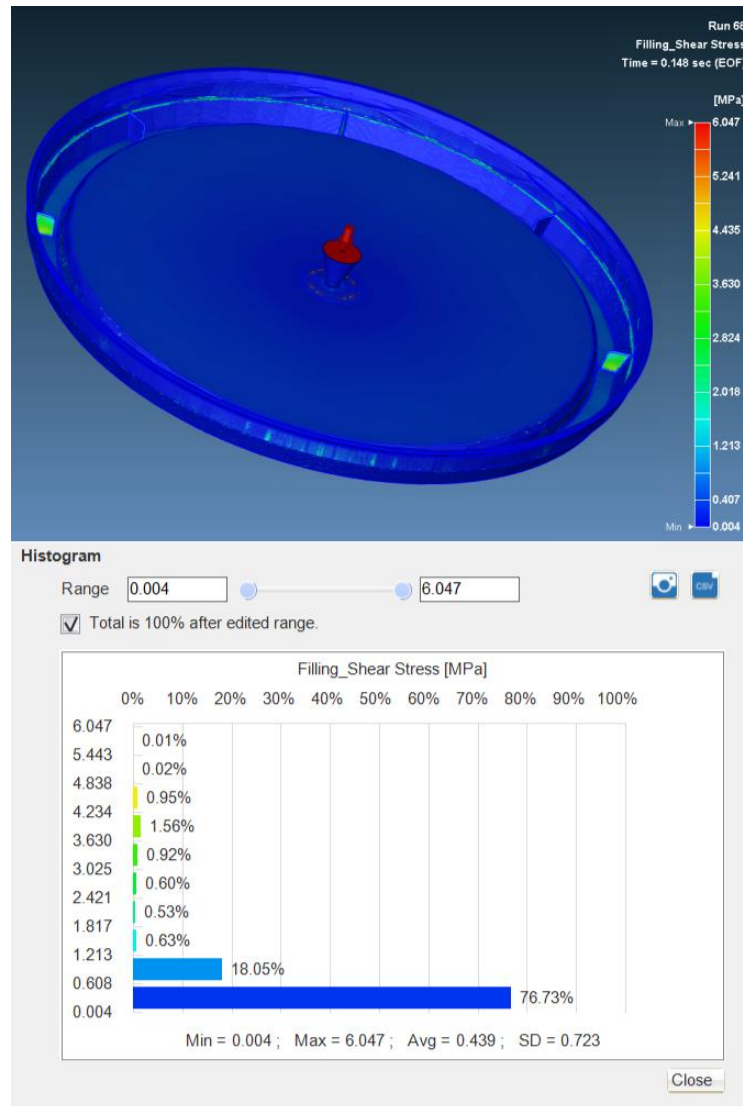
Θερμοκρασία μετώπου ροής: Το «**Melt Front Temperature**» δείχνει το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται και διαχέεται όσο τα επιμέρους στάδια της διεργασίας βρίσκονται σε εξέλιξη. Παρατηρείται ιδιαίτερα αυξημένη θερμοκρασία από την πύλη εισόδου περιμετρικά προς όλο το επίπεδο μέρος του τεμαχίου. Η πτώση θερμοκρασίας ξεκινάει εκεί που αλλάζει η γεωμετρία του τεμαχίου κάτι το οποίο συμβαίνει επειδή σε εκείνο το σημείο υπάρχει αγωγή με τα ψυχρά τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης.



Σχήμα 3.20: Θερμοκρασία μετώπου ροής (Melt Front Temperature)

Η **διατμητική τάση (Shear Stress)** για την τρέχουσα στιγμή εμφανίζεται με διαφορετικό χρώμα ανάλογα με το διαφορετικό επίπεδο τάσης. Η διατμητική τάση είναι μια από τις αιτίες ύπαρξης της παραμένουσας τάσης στο παραχθέν τεμάχιο. Ιδανικά θα πρέπει να κατανέμεται

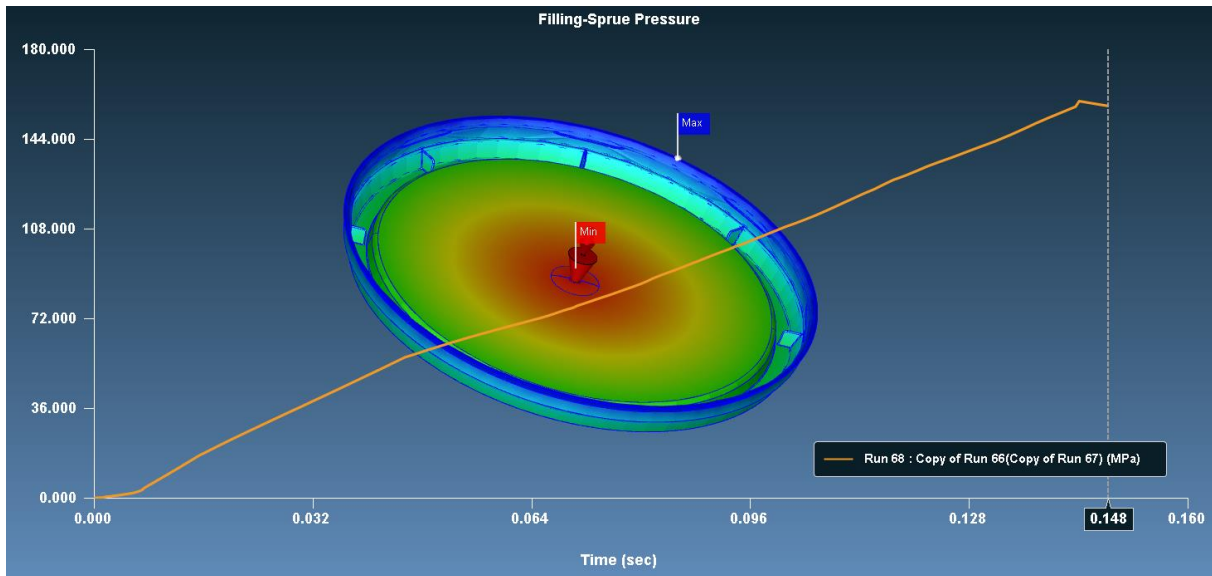
ομοιόμορφα και σε χαμηλές τιμές. Εν γένη, υψηλά επίπεδα διατμητικής τάσης έχουν ως αποτέλεσμα προβλήματα στο χυτευμένο τμήμα. Παρατηρείται ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι αρκετά χαμηλή η τάξη μεγέθους καθώς όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21: Διατμητική τάση (Shear Stress)

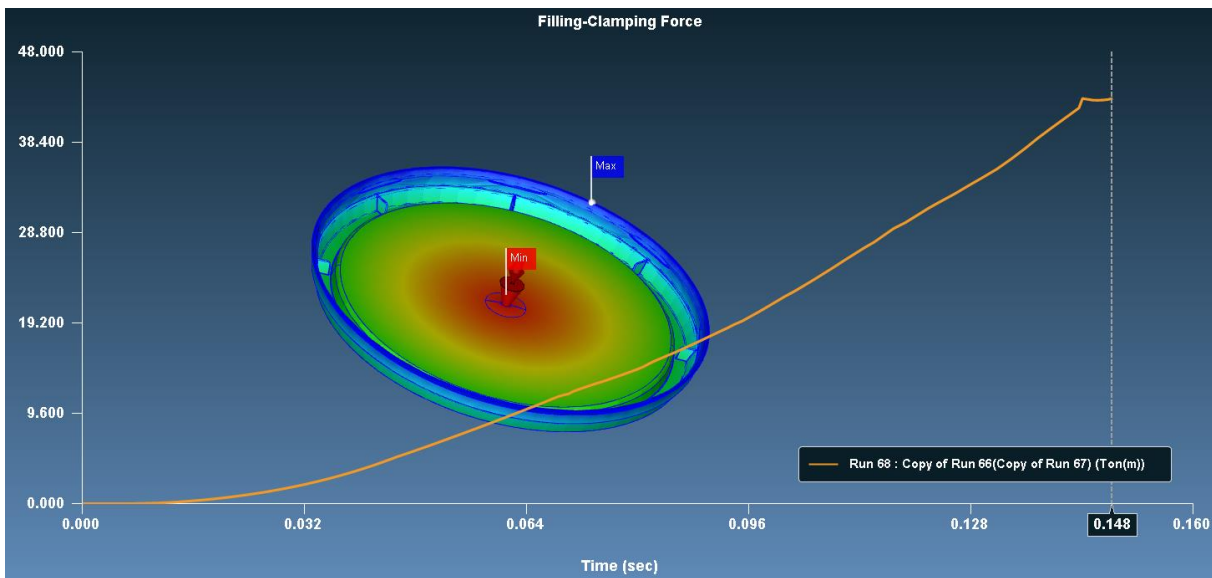
➤ X-Y Curve

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα τύπου «**XY Curve**». Αρχικά, εμφανίζεται η **πίεση στο κάθετο κανάλι (Sprue Pressure)** σε διάγραμμα μορφής πίεσης-χρόνου (MPa - sec) Σχήμα 3.22 η οποία δείχνει μια ομαλά ανοδική πορεία αγγίζοντας την μέγιστη τιμή των **159,4 MPa** την χρονική στιγμή **0,144 sec**. Έπειτα, αυτή αρχίζει να πέφτει ελαφρά καθώς από την χρονική στιγμή 0,148 sec (Switch Point) επέρχεται η φάση της συμπίεσης (packing).



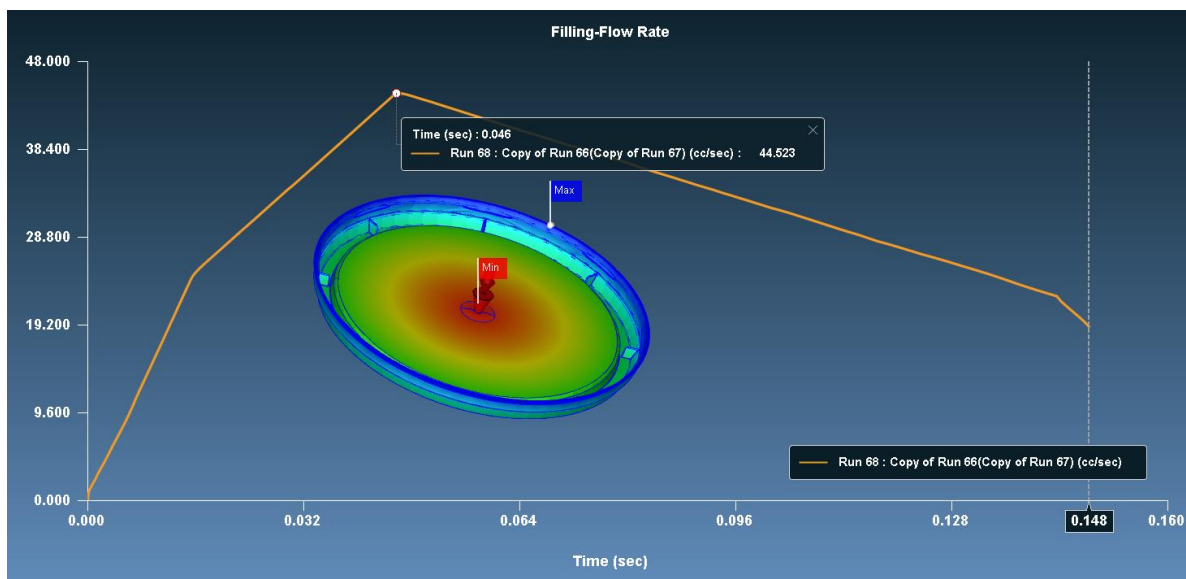
Σχήμα 3.22: Πίεση στο κάθετο κανάλι (Sprue Pressure)

Ακολουθώς, η **δύναμη σύσφιξης (Clamping force)** του καλουπιού, δείχνει το μέτρο της απαιτούμενης δύναμης σύσφιξης σε Ton(m). Η καμπύλη της εξελίσσεται ομαλά χωρίς κάποιες απότομες μεταβολές βλ. Σχήμα 3.23. Η μέγιστη τιμή της ισούται με **43 Ton(m)** την χρονική στιγμή **0.144 sec**. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι η δύναμη σύσφιξης είναι αλληλεξαρτώμενο μέγεθος με την πίεση στο κάθετο κανάλι (sprue pressure) αφού αγγίζουν τις μέγιστες τιμές τους την ίδια χρονική στιγμή.



Σχήμα 3.23: Δύναμη σύσφιξης (Clamping force) του καλουπιού

Ταχύτητα ροής: Το διάγραμμα του «**Flow Rate**» απεικονίζει την κατανομή της ταχύτητας ροής του πολυμερούς στο κάθετο κανάλι σε cc/sec κατά την διάρκεια της φάσης πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης. Συνήθως, το πρώτο στάδιο της πλήρωσης ελέγχεται από την ταχύτητα ροής που έχει καθορίσει ο μηχανικός. Συνεπώς, το αποτέλεσμα συνάδει με το προφίλ ταχύτητας που έχει επιλεγεί στην παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διαδικασίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.24. Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να ελεγχθεί μήπως η max injection pressure είναι χαμηλή.



Σχήμα 3.24: Ταχύτητα ροής του πολυμερούς τήγματος στο κάθετο κανάλι «Flow Rate»

Εν κατακλείδι, μελετώντας σωστά τις καμπύλες των παραπάνω διαγραμμάτων «XY Curves» μπορεί να αποσαφηνιστεί η τάξη μεγέθους των παραμέτρων διεργασίας της χύτευσης με έγχυση κατά την φάση της πλήρωσης (Filling phase).

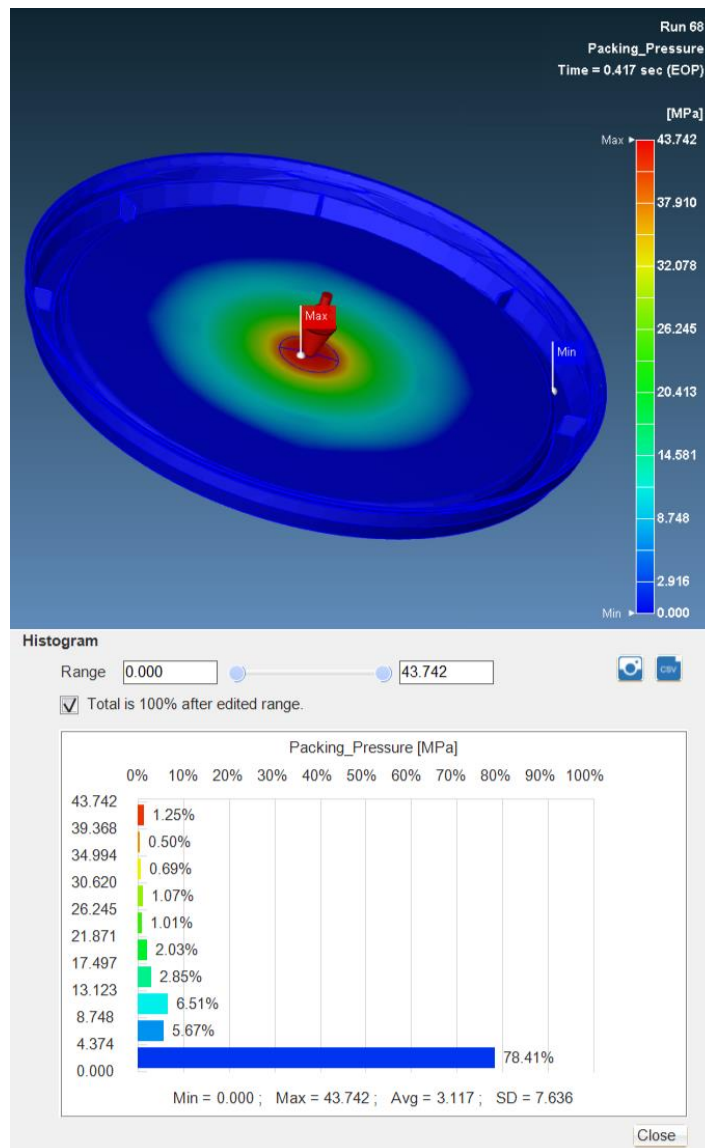
3.5.2. Αποτελέσματα Συμπίεσης

Στην ενότητα αυτή η οποία λαμβάνει χώρα αμέσως μετά την φάση πλήρωσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φάσης συμπίεσης. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα στο λογισμικό Moldex3D μπορούν να ωφελήσουν σε συμπεράσματα σχετικά με:

- ✓ Διαστάσεις του τελικού προϊόντος έγχυσης
- ✓ Απόδοση συστήματος τροφοδοσίας
- ✓ Ύπαρξη ατελειών όπως το προέκταμα (flash) και τα βαθουλώματα (sink marks)
- ✓ Απαιτούμενη δύναμη σύσφιξης (clamping force) και πίεση συμπίεσης (packing pressure)

Παρακάτω, γίνεται αναφορά στα κυριότερα αποτελέσματα της φάσης συμπίεσης για το παρόν προϊόν έγχυσης που μελετάται.

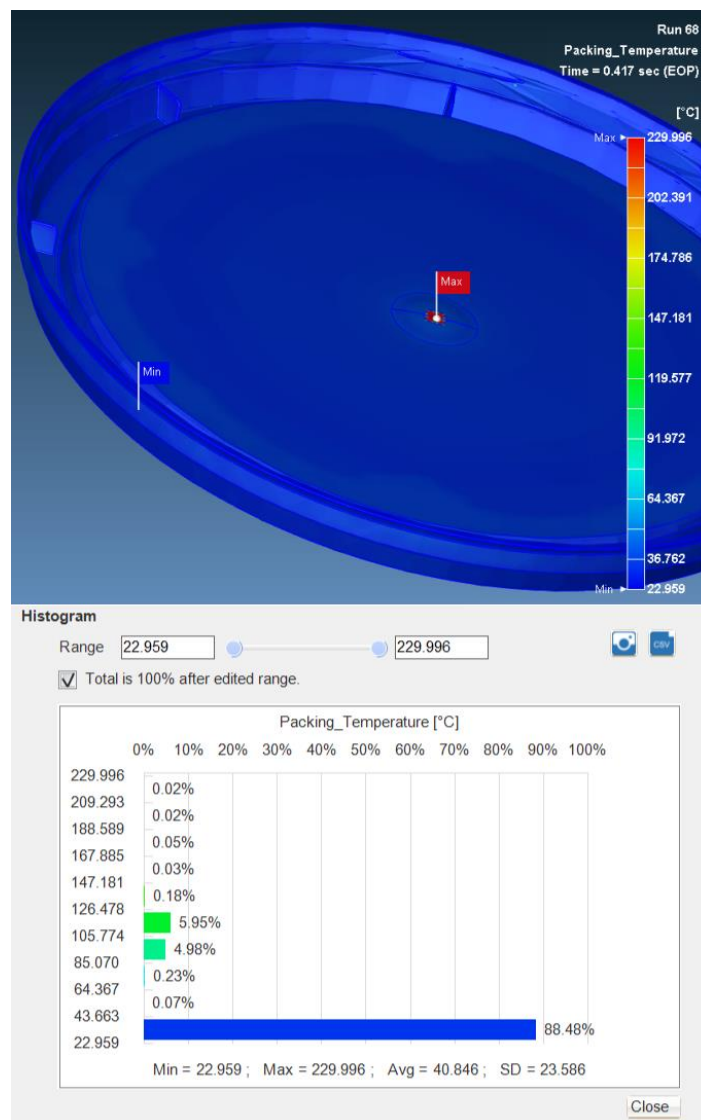
Πίεση συμπίεσης (Packing Pressure): αντίστοιχα με την φάση πλήρωσης παρουσιάζεται η κατανομή πίεσης στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης μετά το πέρας της φάσης συμπίεσης (EOP-End of Packing) βλ. Σχήμα 3.25. Γενικά, επιδιώκεται, όπως είναι και στην προκειμένη περίπτωση, σχετικά μικρή πίεση προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς (overpacking) πράγμα το οποίο οδηγεί στην εμφάνιση ατέλειας του προεκτάματος (flash).



Σχήμα 3.25: Πίεση συμπίεσης (Packing Pressure) κοιλότητας μορφοποίησης στο τέλος της φάσης συμπίεσης

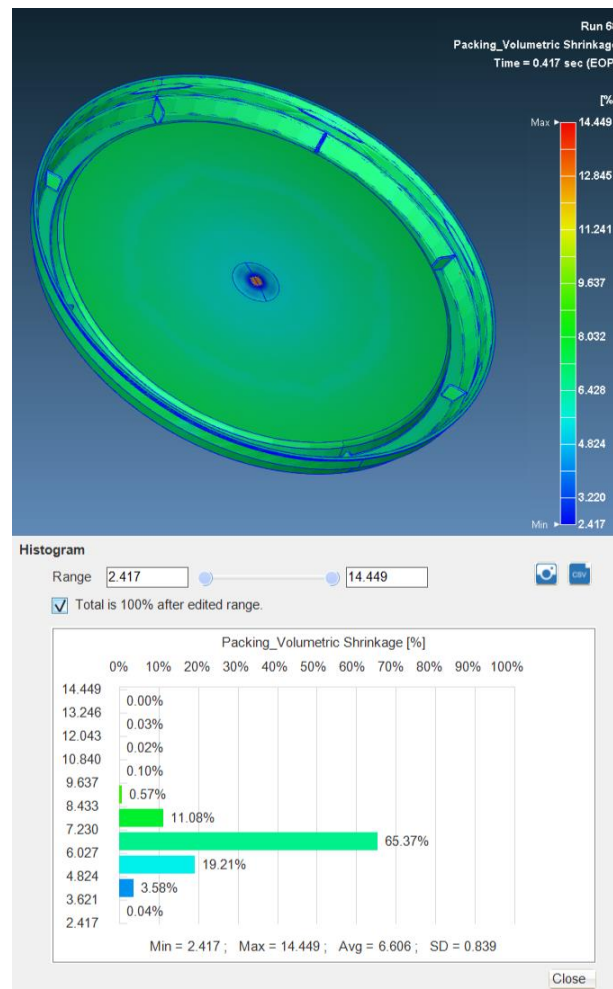
Melt front time: είναι το ίδιο αποτέλεσμα όπως της φάσης πλήρωσης. Αυτό που μπορεί να καταλάβει κανείς, στο σημείο της φάσης συμπίεσης, είναι το άθροισμα των χρόνων πλήρωσης και συμπίεσης σύμφωνα με την εκάστοτε αρχική παραμετροποίηση που έχει εισάγει. Για το προϊόν έγχυσης που μελετάται αυτός ο χρόνος ανέρχεται στα **0,417sec**.

Temperature: όσον αφορά την θερμοκρασία εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού μετά το πέρας της φάσης συμπίεσης, παρατηρείται ότι είναι χαμηλότερης τάξης σε σχέση με αυτή της πλήρωσης καθώς επίσης σχεδόν το 90% της επιφάνειας έχει στερεοποιηθεί Σχήμα 3.26.



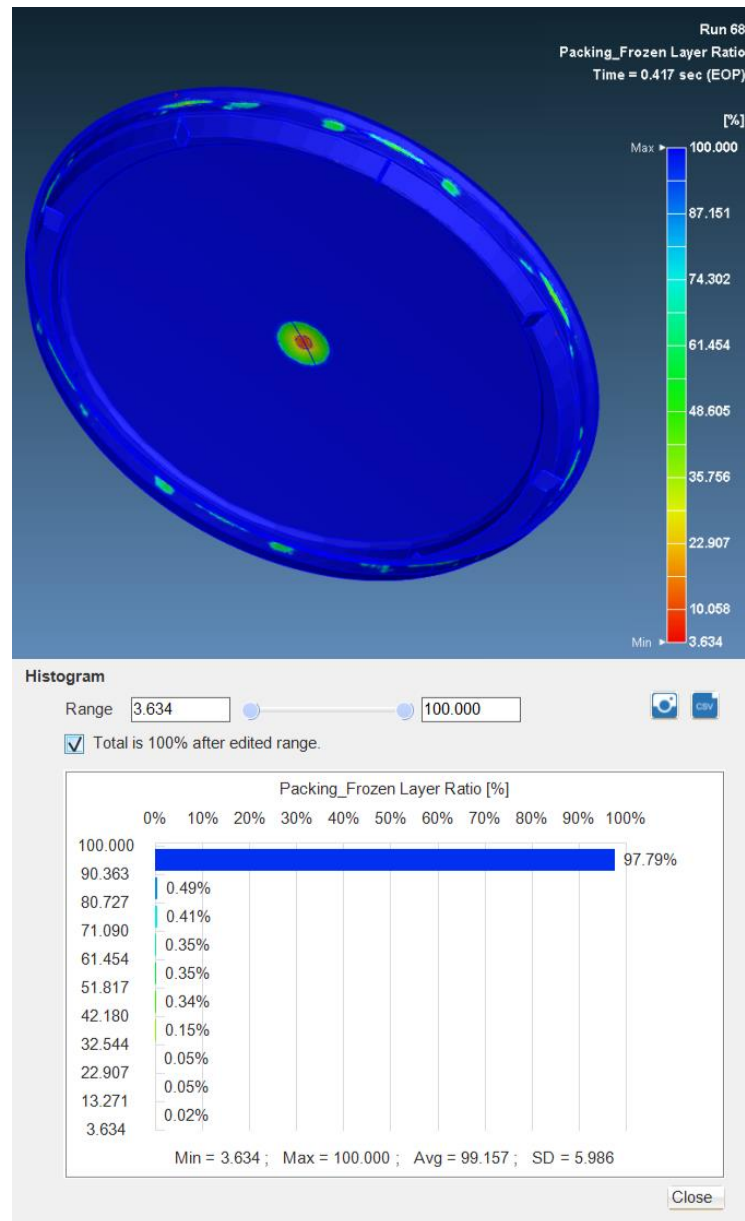
Σχήμα 3.26: Κατανομή θερμοκρασίας (Temperature) στην κοιλότητα μορφοποίησης στο τέλος της φάσης συμπίεσης

Ποσοστιαία ογκομετρική συρρίκνωση (Volumetric Shrinkage): δείχνει το ποσοστό αλλαγής όγκου εξαρτήματος λόγω αλλαγής των ογκομετρικών ιδιοτήτων (PVT properties) καθώς το εξάρτημα ψύχεται από την υψηλή θερμοκρασία, σε συνθήκες υψηλής πίεσης στην τρέχουσα στιγμή, σε θερμοκρασία δωματίου και σε συνθήκες πίεσης περιβάλλοντος. Η θετική τιμή αντιπροσωπεύει τη συρρίκνωση του όγκου ενώ η αρνητική τιμή αντιπροσωπεύει την επέκταση του όγκου λόγω υπερβολικής συμπίεσης. Η μη ομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση θα οδηγήσει σε παραμόρφωση ξεκαλουπωμένων εξαρτημάτων. Ο μέσος όρος της ποσοστιαίας ογκομετρικής συρρίκνωσης φαίνεται να είναι γύρω στα **6,6%** στο μεγαλύτερο μέρος του τεμαχίου Σχήμα 3.27. Γενικά, διαφέρει από τον απαιτούμενη τιμή που έχει θέσει ο πελάτης και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν λαμβάνεται υπόψιν το πραγματικό σύστημα ψύξης που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη μήτρα μορφοποίησης. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο σε γενικές γραμμές μιας και το μεγαλύτερο μέρος της συρρίκνωσης συμβαίνει στο καλούπι κατά την ψύξη. Αυτό γεννά την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα όσον αφορά το εξιδανικευμένο σύστημα διανομής και ψύξης ούτως ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.



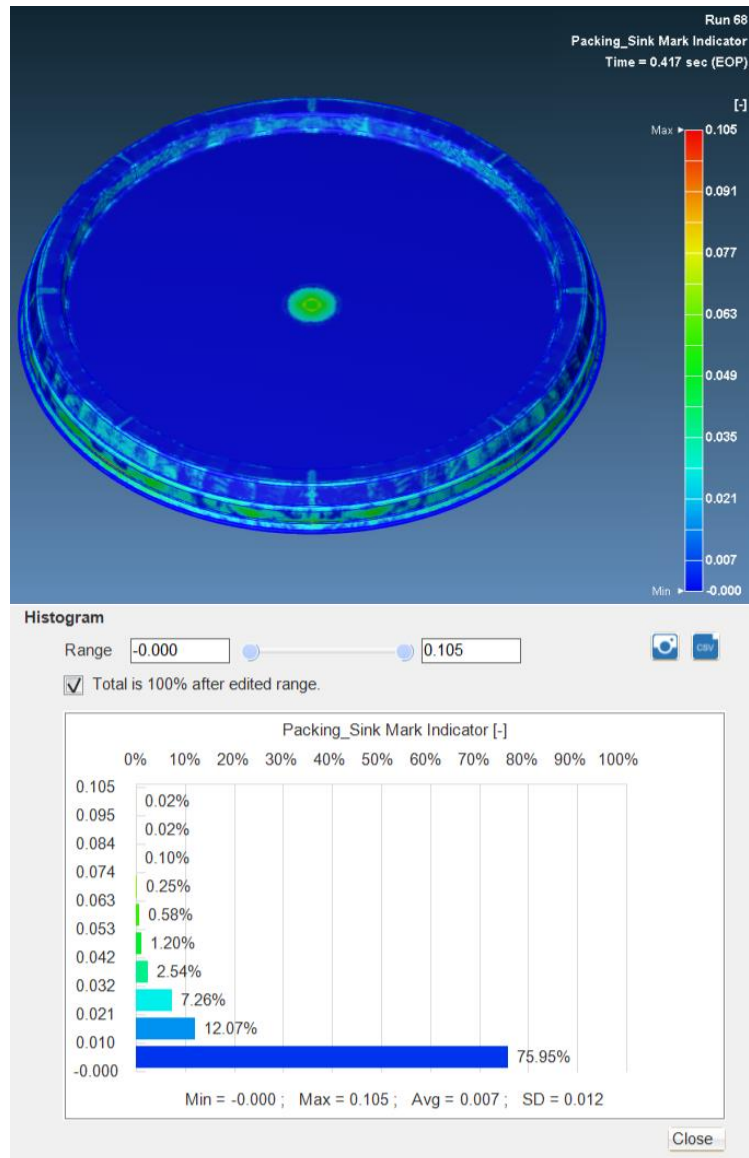
Σχήμα 3.27: Ποσοστιαία ογκομετρική συρρίκνωση (Volumetric Shrinkage) μορφοποιημένου τεμαχίου στο τέλος της φάσης συμπίεσης

Frozen Layer Ratio: Δείχνει το ποσοστό του όγκου του στερεοποιημένου πολυμερούς πλησίον της επιφάνειας της κοιλότητας. Το ζητούμενο είναι η τιμή του να φτάσει στο **100%** καθώς το πολυμερές τήγεται, μετά το πέρας της φάσης συμπίεσης κάτι το οποίο συμβαίνει στην εξεταζόμενη περίπτωση βλ. Σχήμα 3.28.



Σχήμα 3.28: Όγκος του στερεοποιημένου πολυμερούς (Frozen Layer Ratio) στο τέλος της φάσης συμπίεσης

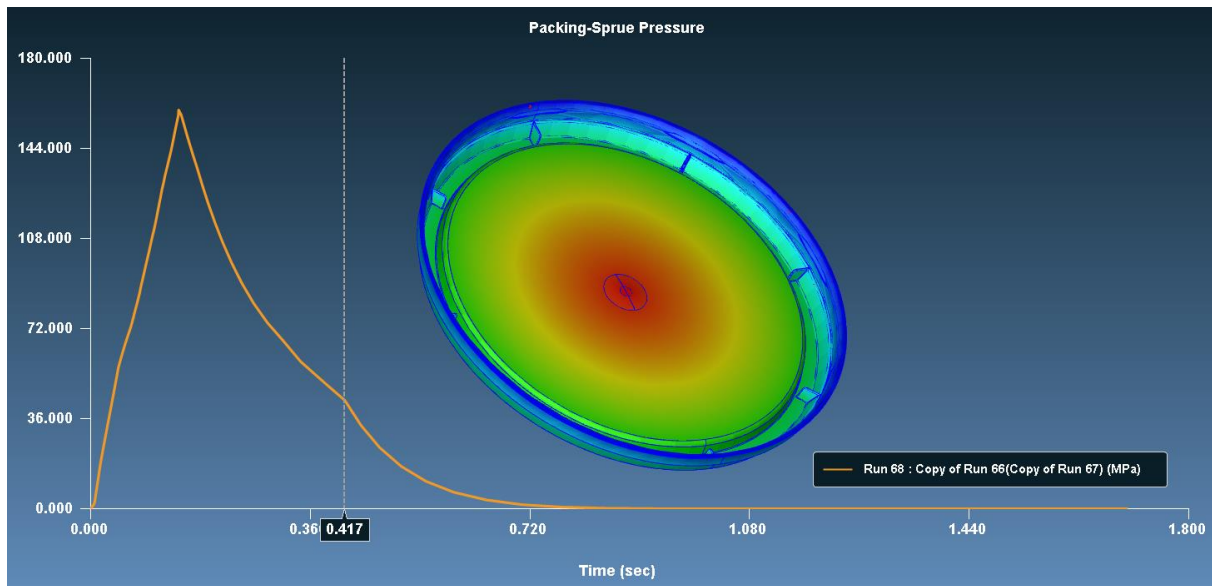
Sink Mark Indicator: Είναι ο δείκτης αξιολόγησης της απόδοσης της συμπίεσης του πολυμερούς εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Γενικά, η θετική τιμή του δείκτη υποδηλώνει ότι η συμπίεση του τήγματος δεν επαρκεί, άρα υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης βαθουλωμάτων (sink marks) στο τελικό προϊόν έγχυσης. Αντιθέτως, η αρνητική τιμή του δείκτη υποδηλώνει την υπερβολική συμπίεση του τήγματος (overpacking). Επομένως, ένα βέλτιστο αποτέλεσμα συμπίεσης θα είναι όταν ο δείκτης έχει τιμές σχεδόν μηδενικές, όπως άλλωστε προκύπτει και στην παρούσα περίπτωση μελέτης βλ. Σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.29: Δείκτης αξιολόγησης της απόδοσης της συμπίεσης του πολυμερούς εντός της κοιλότητας μορφοποίησης

➤ X-Y Curve

Sprue Pressure: Όμοια με την φάση πλήρωσης, απεικονίζει το διάγραμμα πίεσης – χρόνου (MPa – sec), δηλαδή την πίεση στο κάθετο κανάλι (sprue) του συστήματος διανομής (runner system) του καλουπιού κατά την διάρκεια της φάσης συμπίεσης του πολυμερούς. Η καμπύλη αυξάνεται ομαλά μέχρι την τιμή της μέγιστης πίεσης συμπίεσης η οποία ισούται με **159 MPa** την χρονική στιγμή **0.145 sec**. Έπειτα, η πίεση ακολουθεί φθίνουσα πορεία έως ότου φράξει η πύλη εισόδου και μηδενιστεί.

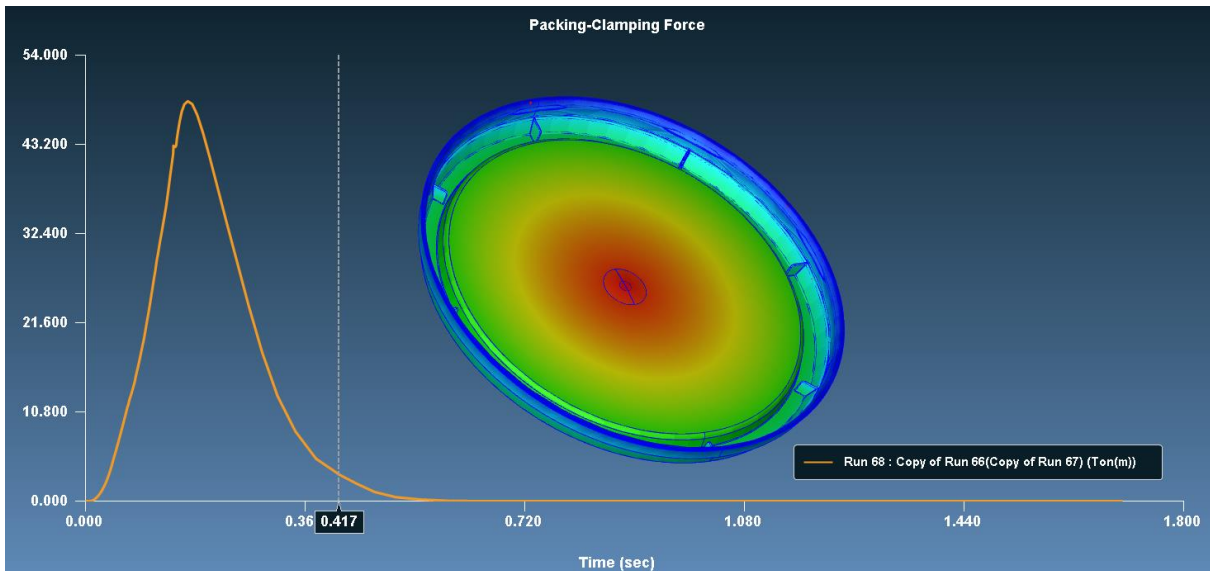


Σχήμα 3.30: Διάγραμμα πίεσης – χρόνου (Packing-Sprue pressure) στην φάση συμπίεσης

Clamping Force: Παρόμοια με την φάση πλήρωσης, εμφανίζει το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η κατανομή της δύναμης σύσφιξης (clamping force) του καλουπιού σε Ton(m) κατά την φάση της συμπίεσης. Η τιμή αυτή είναι η υπολογιζόμενη απαιτούμενη δύναμη σύσφιξης και όχι η δύναμη που εξάγει η μηχανή έγχυσης. Επομένως, αξίζει να αναφερθεί ότι είναι σημαντικό κριτήριο για την εκλογή της μηχανής έγχυσης με το καταλληλότερο μέγεθος όσο και για τον βαθμό τροποποίησης του καλουπιού.

Είναι σημαντικό να μελετηθεί η δύναμη σύσφιξης σε αυτή την φάση, καθώς λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της στη φάση της συμπίεσης. Αυτό συμβαίνει γιατί μετά τη συμπίεση του τήγματος η δύναμη σύσφιξης αυξάνεται καθώς η πίεση έγχυσης συνεχίζει να μεταδίδεται στην κοιλότητα. Στην συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης η μέγιστη τιμή των **48 Ton** την χρονική στιγμή **0,166 sec**, ξεπερνάει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή βλ. [Σχήμα 3.23](#). Καθώς το συγκεκριμένο καλούπι διαθέτει 4 κοιλότητες μορφοποίησης, η δύναμη σύσφιξης των **180 Ton** που διαθέτει η μηχανή έγχυσης του πελάτη, πρέπει να μοιραστεί ισόποσα. Άρα, η κάθε κοιλότητα δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα **45 Ton** και ιδανικότερα για την σωστή λειτουργία της μηχανής τα **40 Ton**. Στο φαινόμενο αυτό παίζει ρόλο η χαμηλή θερμοκρασία τήγματος, η οποία κάνει το ρευστό πιο παχύρευστο, οι χρόνοι έγχυσης και συμπίεσης καθώς και η ιδεατή

ψύξη που λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση, η οποία διαφέρει της πραγματικής. Τέλος, παρατηρείται ότι η μείωσή της ξεκινά κατά το τελευταίο στάδιο της φάσης της συμπίεσης και, συγκεκριμένα, όταν η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος αρχίζει να μειώνεται.



Σχήμα 3.31: Διάγραμμα δύναμης σύσφιξης – χρόνου (Packing-Clamping Force) στην φάση συμπίεσης

Συνεπώς, λόγω της σημαντικότητας που παρουσιάζει η συγκεκριμένη παράμετρος, επιλέγεται να μελετηθεί αναλυτικότερα ως παράγοντας ποιότητας στους σχεδιασμούς Taguchi που ακολουθούν.

4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.1. Η μέθοδος Taguchi

Οι μέθοδοι Taguchi είναι στατιστικές μέθοδοι που στοχεύουν στην βελτίωση της ποιότητας των βιομηχανικών προϊόντων. Αναπτύχθηκαν από τον Genichi Taguchi και συχνά αποκαλούνται μέθοδοι εύρωστου σχεδιασμού. Πλέον, εφαρμόζονται στη μηχανική, στη βιοτεχνολογία, στο μάρκετινγκ και στη διαφήμιση. Το έργο του Taguchi περιλαμβάνει τρεις κύριες συνεισφορές στη στατιστική:

- Μια συγκεκριμένη συνάρτηση απώλειας (loss function)
- Η φιλοσοφία του off-line ποιοτικού ελέγχου (off-line quality control)
- Καινοτομίες στο σχεδιασμό πειραμάτων (Design of Experiment- DOE)

Με άλλα λόγια η μέθοδος Taguchi είναι μια ισχυρή τεχνική για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των προϊόντων ή της διαδικασίας. Ο κύριος σκοπός του Taguchi είναι να μειώσει τη μεταβλητότητα γύρω από την τιμή στόχο των ιδιοτήτων του προϊόντος μέσω μιας συστηματικής εφαρμογής του στατιστικού πειραματικού σχεδιασμού που ονομάζεται εύρωστος σχεδιασμός [22], [23]. Το Robust Design είναι μια σημαντική τεχνική για την κατασκευή και τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Ο Taguchi απλοποίησε τη χρήση των ορθογώνιων πινάκων, με σκοπό τη ρύθμιση του πειραματικού σχεδιασμού. Χάρη σε αυτήν την εξέλιξη, οι ερευνητές και οι μηχανικοί εξοικονόμησαν χρόνο και χρήμα. Επιπλέον, ο Taguchi πρότεινε τη χρήση του λόγου S/N προκειμένου να μετρηθούν οι επιπτώσεις των παραγόντων στα χαρακτηριστικά απόδοσης. Σε αυτή τη μελέτη δίνεται μια σύντομη περιγραφή σχετικά με τη μέθοδο Taguchi και των στοιχείων της.

Η ποιότητα ενός προϊόντος είναι αποτέλεσμα της παραγωγικής διαδικασίας. Οι επιθυμητές ιδιότητες του προϊόντος θα πρέπει να καθοριστούν στο στάδιο του σχεδιασμού. Προς τα τέλη της δεκαετίας του 1950, ο Δρ. Genichi Taguchi πρότεινε πολλές έννοιες και μεθόδους για τη βελτίωση της ποιότητας που βασίζονται στον εύρωστο σχεδιασμό. Εύρωστος σχεδιασμός (Robust Design - RD) σημαίνει: η σχεδίαση ενός προϊόντος που δεν προκαλεί κανένα πρόβλημα σε καμία περίπτωση. Δηλαδή, το σχεδιασμό ενός προϊόντος που μπορεί να λειτουργήσει σωστά κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Το RD δίνει έμφαση στην μεταβλητότητα του προϊόντος και στην απόδοση της διαδικασίας. Η μείωση της μεταβλητότητας θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ποιότητας. Ο Taguchi αναφέρει ότι είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιηθεί η μεταβλητότητα στο προϊόν ή στη διαδικασία, επιλέγοντας τις τιμές των ελεγχόμενων παραγόντων (παραμέτρων) με τον βέλτιστο τρόπο έναντι των παραγόντων που δημιουργούν μεταβλητότητα. Η μεταβλητότητα καθορίζεται από δύο ομάδες.

- Ελεγχόμενοι παράγοντες: Παράγοντες που καθορίζονται από τον κατασκευαστή και δεν μπορούν να αλλάξουν απευθείας από τον πελάτη.
- Μη ελεγχόμενοι παράγοντες (παράγοντες θορύβου): Παράγοντες που ο παραγωγός δεν μπορεί να ελέγξει άμεσα και που ποικίλλουν ανάλογα με τη χρήση του πελάτη και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για την αποτελεσματική διεκπεραίωση της ανάλυσης Taguchi είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν μια σειρά ενεργειών:

1. Προσδιορισμός του προβλήματος και οργάνωση της πειραματικής ομάδας
2. Προσδιορισμός χαρακτηριστικών απόδοσης και σύστημα μέτρησης
3. Προσδιορισμός των μεταβλητών που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά απόδοσης
4. Καθορισμός του σχεδίου παρακολούθησης
5. Προσδιορισμός ελεγχόμενων και μη ελεγχόμενων μεταβλητών και των επιπέδων τους
6. Προσδιορισμός πιθανών αλληλεπιδράσεων
7. Επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα και αντιστοίχιση μεταβλητών σε σχετικές στήλες
8. Προσδιορισμός συνάρτησης απώλειας και στατιστικά απόδοσης
9. Καθιέρωση του πειράματος και καταγραφή των αποτελεσμάτων
10. Ανάλυση δεδομένων και επιλογή βέλτιστης τιμής ελεγχόμενων μεταβλητών

4.1.1. Αναλογία S/N (Signal-to-Noise ratio)

Ο Taguchi χρησιμοποιεί το στατιστικό μέτρο απόδοσης γνωστό ως αναλογία SN που χρησιμοποιείται στη θεωρία ηλεκτρικού ελέγχου για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Το **S/N Ratio** είναι ένα κριτήριο απόδοσης που αναπτύχθηκε από τον Taguchi για να επιλέξει τα καλύτερα επίπεδα μεταβλητών ελέγχου που ελαχιστοποιούν τον αντίκτυπο των μη-ελεγχόμενων μεταβλητών. Ο λόγος S/N λαμβάνει υπόψη τόσο τον μέσο όρο όσο και τη μεταβλητότητα. Στην απλούστερη μορφή του, το SN, είναι ο λόγος του μέσου όρου (σήμα) προς την τυπική απόκλιση (θόρυβος).

Οι μέθοδοι Taguchi χρησιμοποιούν S/N αναλογίες για δύο βασικούς σκοπούς. Ο πρώτος σκοπός είναι για τον εντοπισμό μεταβλητών ελέγχου που μειώνουν τη μεταβλητότητα και ο δεύτερος σκοπός είναι να εντοπιστούν μεταβλητές ελέγχου που μετακινούν τον μέσο όρο στον στόχο. Διαφορετικό SN μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με τον στόχο του πειράματος. Σε όλες τις περιπτώσεις, η αναλογία S/N πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Αν και ο Taguchi αναφέρει πάνω από 60 S/N αναλογίες, τρεις από αυτές, όπως «μικρότερο-καλύτερο», «μεγαλύτερο-καλύτερο» και «ονομαστικό-βέλτιστο» (**smaller-better**, **bigger-better** and **nominal-best**) χρησιμοποιούνται συχνά.

Σύμφωνα με την εφαρμογή του στη μηχανική και την επιστήμη, η **τιμή του S/N προορίζεται να είναι μεγάλη**, επομένως η τιμή του **MSD** (mean squared deviation) θα πρέπει να είναι μικρή. Επομένως, η μέση τετραγωνική απόκλιση (MSD) ορίζεται διαφορετικά για καθένα από τα τρία ποιοτικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται, μικρότερο (smaller is better), ονομαστικό (nominal is the best) ή μεγαλύτερο (bigger is better). Παρακάτω παρουσιάζονται τα MSD για καθένα από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά καθώς και ο γενικός τους τύπος για τον υπολογισμό του S/N.

Οι τύποι τους είναι οι εξής:

$$S/N = -10 \text{Log}_{10} (\text{MSD})$$

Όπου MSD = μέση τετραγωνική απόκλιση από την ονομαστική τιμή, του ποιοτικού χαρακτηριστικού

- Smaller is better

$$\text{MSD} = (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots) / n$$

Άρα το S/N είναι:

$$\frac{S}{N} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

- Nominal is the best

$$\text{MSD} = ((y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2 + \dots) / n$$

Άρα το S/N είναι:

$$\frac{S}{N} = 10 * \log \left(\frac{\bar{y}}{s^2} \right)$$

- Bigger is better

$$MSD = (1/y_1^2 + 1/y_2^2 + 1/y_3^2 + \dots) / n$$

Άρα το S/N είναι:

$$\frac{S}{N} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

Όπου y_1, y_2, \dots κλπ = αποτελέσματα πειραμάτων

m = η ονομαστική τιμή των αποτελεσμάτων

\bar{y} = μέσος όρος των παρατηρούμενων δεδομένων

y_i = το εκάστοτε παρατηρούμενο δεδομένο

s^2 = διακύμανση του y

n = αριθμός των παρατηρούμενων δεδομένων

4.1.2. Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

Ο Taguchi αντικαθιστά το πλήρες παραγοντικό πείραμα (full factorial experiment) με ένα λιτό, λιγότερο ακριβό, ταχύτερο, μερικά παραγοντικό πείραμα. Ο σχεδιασμός του Taguchi για το μερικά παραγοντικό πείραμα βασίζεται σε ειδικά αναπτυγμένες εξωτερικές συστοιχίες (outer arrays) [24]. Δεδομένου όμως ότι το μερικό πείραμα είναι μόνο ένα δείγμα του πλήρους πειράματος, η ανάλυση του μερικού πειράματος πρέπει να περιλαμβάνει ανάλυση της εμπιστοσύνης που μπορεί να δοθεί στα αποτελέσματα. Ευτυχώς, υπάρχει μια τυπική στατιστική τεχνική που ονομάζεται Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για να παρέχει ένα μέτρο εμπιστοσύνης/συνεισφοράς. Η τεχνική δεν αναλύει άμεσα τα δεδομένα, αντ' αυτού καθορίζει τη διακύμανση μεταβλητότητας των δεδομένων. Έτσι, η εμπιστοσύνη μετριέται από τη διακύμανση [25]. Η ανάλυση προσδιορίζει τη διακύμανση των ελεγχόμενων παραγόντων και των παραγόντων θορύβου. Με την κατανόηση της πηγής και του μεγέθους της διακύμανσης, μπορούν να προβλεφθούν σημαντικές και εύρωστες συνθήκες λειτουργίας. Αυτό είναι το δεύτερο όφελος της μεθοδολογίας.

Όπως αναφέρεται προηγουμένως, το DOE χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ή τη βελτίωση προϊόντων ή διαδικασιών. Έπειτα, τα δεδομένα που λαμβάνονται από το πείραμα πρέπει να αναλυθούν. Η ανάλυση διακύμανσης χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων. Γενικά, η ανάλυση διακύμανσης χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Βρετανό στατιστικολόγο Fisher. Οι ειδικοί συνήθως εργάζονται με δείγματα, καθώς άλλοτε είναι αδύνατο να δουλέψεις με όλο τον πληθυσμό και άλλοτε είναι πολύ ακριβό. Δείγματα

στατιστικών και υποθέσεων επιτρέπουν τον έλεγχο υποθέσεων σχετικά με πειραματικές παραμέτρους. Για να αναλυθεί η διακύμανση με τα δεδομένα του δείγματος, υπάρχουν τέσσερις βασικές παραδοχές.

1. Τα δείγματα είναι τυχαία
2. Ο πληθυσμός κατανέμεται κανονικά
3. Οι διακυμάνσεις πληθυσμού είναι ίσες
4. Η επιλογή των δειγμάτων είναι ανεξάρτητη από τις άλλες

Το ποσοστό μεταβλητότητας για κάθε σημαντικό παράγοντα και η αλληλεπίδραση που παρατηρείται στο πείραμα αντικατοπτρίζεται από το ποσοστό συνεισφοράς. Η ποσοστιαία συνεισφορά (**Percent contribution**) είναι συνάρτηση του αθροίσματος των τετραγώνων κάθε σημαντικού παράγοντα. Το ποσοστό συνεισφοράς υποδηλώνει την ισχύ των παραγόντων ή/και την αλληλεπίδραση στη μείωση της μεταβλητότητας. Εάν τα επίπεδα παράγοντα και/ή η αλληλεπίδραση είναι πλήρως ελεγχόμενα, η συνολική μεταβλητότητα μπορεί να μειωθεί κατά το ποσοστό συνεισφοράς. Είναι γνωστό ότι η διακύμανση για έναν παράγοντα ή η αλληλεπίδραση περιλαμβάνει διακύμανση σφάλματος. Επομένως, είναι εφικτό να υπολογιστεί η διακύμανση για κάθε παράγοντα ώστε να εμφανίζεται και η διακύμανση σφάλματος.

Η ποσοστιαία συμβολή του σφάλματος παρέχει μια εκτίμηση της επάρκειας του πειράματος. Εάν το ποσοστό συνεισφοράς σφάλματος είναι 15% ή λιγότερο, θεωρείται ότι κανένας σημαντικός παράγοντας δεν έχει παραλειφθεί στο πείραμα. Εάν το ποσοστό συμβολής σφάλματος είναι 50% ή περισσότερο, θεωρείται ότι στις πειραματικές συνθήκες αγνοούνται ορισμένοι σημαντικοί παράγοντες και δεν μπορούν να ελεγχθούν πλήρως ή ότι υπάρχει σφάλμα μέτρησης. Στην ανάλυση διακύμανσης πολλά μεγέθη όπως βαθμοί ελευθερίας, αθροίσματα τετραγώνων, μέσα τετράγωνα, κ.λπ., υπολογίζονται και οργανώνονται σε τυπική μορφή πίνακα. Τα μεγέθη αυτά και οι αλληλεπιδράσεις τους ορίζονται παρακάτω και παρουσιάζεται η μαθηματική τους ανάπτυξη.

Ορισμοί:

C.F. = Correction factor (συντελεστής διόρθωσης)	r = Num. of repetitions (αρ. επαναλήψεων)
e = error experimental (σφάλμα πειράματος)	P = Percent contribution (% συνεισφορά)
F = Variance ratio (αναλογία διακύμανσης)	T = Total (of results)
f = Degrees of freedom-DOF	S = Sum of squares

(βαθμοί ελευθερίας)	(άθροισμα τετραγώνων)
f_e = Degrees of freedom of error	S' = Pure sum of squares
f_T = Total degrees of freedom	S_T = Total sum of squares
n = Number of trials (αριθμός δοκιμών)	V = Mean squares / variance (διακύμανση)

Υπάρχουν δύο ήδη ANOVA, το μονόδρομο (**one way ANOVA**) το οποίο περιλαμβάνει έναν παράγοντα με δύο επίπεδα. Για μεγαλύτερη ποικιλία πειραματικών δεδομένων λαμβάνει χώρα το αμφίδρομο ANOVA (**two way ANOVA**), καθώς περιλαμβάνει πειραματικά δεδομένα δύο ή περισσότερων παραγόντων με δύο ή περισσότερα επίπεδα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το «Two way ANOVA», καθώς οι παράγοντες και τα επίπεδά τους είναι παραπάνω από δύο.

4.2. Σχεδιασμός πειραμάτων (DOE)

Με γνώμονα τον μεγάλο αριθμό παραμέτρων του πειράματος χύτευσης με έγχυση, αρχικά επιλέχθηκε να γίνει μια L8 ανάλυση Taguchi. Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει τις επτά σημαντικότερες παραμέτρους του πειράματος προς μελέτη, καθώς καθεμιά τους εξετάζεται σε δύο επίπεδα όπως παρουσιάζονται παρακάτω. Προκειμένου να εξαχθεί συμπέρασμα για την ευαισθησία του συστήματος, επιλέχθηκαν σχετικά ακραίες τιμές όσων αφορά τα επίπεδα των παραμέτρων. Η ανάλυση αυτή θα αποτελέσει σημείο αναφοράς για την επομένη ανάλυση Taguchi που ακολουθεί, εφόσον θα γίνει σαφές ποιες παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά την κατεργασία και σε τι εύρος τιμών θα πρέπει να περιοριστεί το πείραμα.

4.2.1. Πρωταρχικός σχεδιασμός Taguchi

Οι παράγοντες ελέγχου και ποιότητας που εξετάζονται (control & quality factors) επιλέχθηκαν με κριτήριο την επίδρασή τους στα ζητούμενα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Βασικός στόχος αποτελεί η βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων αυτών και η κατά το δυνατόν καλύτερη προσέγγισή τους. Επίσης επισημαίνεται ότι εφόσον λαμβάνεται υπόψιν βέλτιστη ψύξη στο σύστημα έγχυσης, εξαιρέθηκαν κριτήρια σχετικά με τον παράγοντα ψύξης «cooling». Έτσι, προτείνονται παράγοντες ελέγχου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, που αφορούν τον χρόνο έγχυσης, τον χρόνο συμπίεσης, την θερμοκρασία τήξης και το κατάλληλο πολυμερές δομικό υλικό (PP). Τέλος, μπορεί να ληφθεί υπόψιν και παράγοντας θορύβου, η θερμοκρασία του δωματίου.

Πίνακας 2: Παράγοντες ελέγχου πρωταρχικού σχεδιασμού Taguchi

Control Factor	Unit	Level 1	Level 2
Injection time	Sec	0.08	0.15
Packing time	Sec	0.25	0.4
Max Injection Pressure	MPa	150	200
Max Packing Pressure	MPa	50	100
Melt temperature	°C	220	260
Mold material MFI (PP)	g/10 min	45	100
Air temperature	°C	5	25

Με όμοια λογική επιλέχθηκαν και οι ποιοτικοί παράγοντες της μεθόδου όπου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3, οι οποίοι αξίζει να ελεγχθούν. Σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές του πελάτη, επιλέχθηκαν κριτήρια που ελέγχουν την τελική γεωμετρία του τεμαχίου, το total weight, έπειτα ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει το αποτέλεσμα του clamping force το οποίο εκτός των άλλων μας δίνει εικόνα για την συνολική εικόνα των πιέσεων. Τέλος, επιλέγεται να εξετασθεί ο συνολικός κύκλος διεργασίας ο οποίος είναι απαραίτητο να τηρείται, ώστε να εξασφαλίζει την βέλτιστη έγχυση.

Πίνακας 3: Παράγοντες ποιότητας πρωταρχικού σχεδιασμού Taguchi

Quality Factor	Unit	Προσέγγιση
Total weight	g	Nominal the best (4.2 gr)
Clamping force	Tonnage	Smaller the better
Desired cycle time	s	Smaller the better

Στην συνέχεια, με την βοήθεια του στατιστικού λογισμικού «Minitab» εξάχθηκε ο πίνακας L8 βλ. Πίνακας 4 με τους τυχαίους συνδυασμούς παραμέτρων στα δύο εξεταζόμενα επίπεδα, αφού αρχικά εισάχθηκαν στο περιβάλλον του προγράμματος οι παράγοντες ελέγχου και ποιότητας.

Πίνακας 4: Πίνακας L8-Σχεδιασμός πρωταρχικού Taguchi

Trial No.	Injection time	Packing time	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Melt temperature	MFI (PP)	Air temperature
1	0,08	0,25	150	50	220	45	5
2	0,08	0,25	150	100	260	100	25
3	0,08	0,4	200	50	220	100	25
4	0,08	0,4	200	100	260	45	5
5	0,15	0,25	200	50	260	45	25
6	0,15	0,25	200	100	220	100	5
7	0,15	0,4	150	50	260	100	5
8	0,15	0,4	150	100	220	45	25

Ύστερα από την εκτέλεση των πειραμάτων σύμφωνα με τους συνδυασμούς που προκύπτουν από τον παραπάνω πίνακα, προέκυψαν τα αποτελέσματα για τον κάθε ποιοτικό παράγοντα που εξετάζεται όπως φαίνονται παρακάτω στον Πίνακας 5. Έπεται η ανάλυση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών με χρήση στατιστικών μεθόδων.

Πίνακας 5: Απόκριση ποιοτικών παραγόντων του πρωταρχικού σχεδιασμού Taguchi

Trial No.	Control factors							Quality factors		
	Injection time	Packing time	Injection Press.	Packing press.	Melt temp.	MFI (PP)	Air temp.	Total weight	Clamping force	Cycle time
1	0,08	0,25	150	50	220	45	5	4,107	49,1	5,03
2	0,08	0,25	150	100	260	100	25	3,98	41,9	5,03
3	0,08	0,4	200	50	220	100	25	3,996	53,1	5,18
4	0,08	0,4	200	100	260	45	5	4,092	32,6	5,18
5	0,15	0,25	200	50	260	45	25	4,086	32,4	5,1
6	0,15	0,25	200	100	220	100	5	4,04	66	5,1
7	0,15	0,4	150	50	260	100	5	3,978	39,7	5,25
8	0,15	0,4	150	100	220	45	25	4,154	60	5,25

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων των οκτώ ανωτέρω πειραμάτων αρχικά έγινε μελέτη με την μέθοδο «S/N ratio». Η μετατροπή ενός συνόλου παρατηρήσεων σε έναν μόνο αριθμό, τον λόγο SN, πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Πρώτα, υπολογίζεται η μέση τετραγωνική απόκλιση (MSD) του συνόλου. Δεύτερον, ο λόγος SN υπολογίζεται από το MSD από την εξίσωση $S/N = -\text{Log}_{10} (MSD)$.

Έπειτα, έγινε ανάλυση της διακύμανσης «ANOVA» για την εξαγωγή συμπεράσματος του ποσοστού συμμετοχής κάθε παράγοντα στα αποτελέσματα. Η μελέτη έλαβε χώρα στο περιβάλλον του «Microsoft excel» σύμφωνα με τους απαραίτητους στατιστικούς τύπους.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες που προκύπτουν για τον κάθε ποιοτικό παράγοντα ξεχωριστά.

1. Απόκριση βάρους τεμαχίου (total weight)

- Προσέγγιση: Nominal the best

Πίνακας 6: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου»

S/N Ratio	Injection time	Packing time	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Melt temperature	MFI (PP)	Air temperature
level 1	16,7302	17,1403	18,3999	16,5931	19,2750	21,3922	17,2381
level 2	18,6493	18,2392	16,9796	18,7864	16,1045	13,9874	18,1414
	1,9191	1,0988	1,4203	2,1932	3,1706	7,4048	0,9033
	4	6	5	3	2	1	7

Πίνακας 7: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου»

ANOVA	Injection time	Packing time	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Melt temperature	MFI (PP)	Air temperature
Level 1	-0,625	-0,587	-0,581	-0,633	-0,503	-0,361	-0,583
Level 2	-0,542	-0,58	-0,586	-0,534	-0,664	-0,806	-0,584
Contribution for level 1	0,0977	0,0861	0,0844	0,1002	0,0633	0,0326	0,0850
Contribution for level 2	0,0734	0,0841	0,0858	0,0713	0,1102	0,1624	0,0853
Factor sum of square	0,0009	0,0000	0,0000	0,0012	0,0032	0,0248	0,0000
Variance	0,0009	0,0000	0,0000	0,0012	0,0032	0,0248	0,0000
Variance Ratio F	-	-	-	-	-	-	-
Contribution	0,0286	0,0002	0,0001	0,0407	0,1077	0,8227	0,0000
	4	5	6	3	2	1	7

2. Απόκριση δύναμης σύσφιξης (clamping force)

- Προσέγγιση: *Smaller the better*

Πίνακας 8: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη Σύσφιξης»

S/N Ratio	Injection time	Packing time	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Melt temperature	MFI (PP)	Air temperature
level 1	-32,7580	-33,2169	-33,4512	-32,6276	-35,0694	-32,4650	-33,1132
level 2	-33,5352	-33,0763	-32,8420	-33,6656	-31,2238	-33,8282	-33,1800
	0,7771	0,1407	0,6092	1,0381	3,8455	1,3632	0,0669
	4	6	5	3	1	2	7

Πίνακας 9: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη Σύσφιξης»

ANOVA	Injection time	Packing time	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Melt temperature	MFI (PP)	Air temperature
Level 1	176,7	189,4	190,7	174,3	228,2	174,1	187,4
Level 2	198,1	185,4	184,1	200,5	146,6	200,7	187,4
Contribution for level 1	7805,7	8968,1	9091,6	7595,1	13018,8	7577,7	8779,7
Contribution for level 2	9810,9	8593,3	8473,2	10050,1	5372,9	10070,1	8779,7
Factor sum of square	57,2	2,0	5,4	85,8	832,3	88,4	0,0
Variance	57,2	2,0	5,4	85,8	832,3	88,4	0,0
Variance Ratio F	-	-	-	-	-	-	-
Contribution	0,0534	0,0019	0,0051	0,0801	0,7770	0,0826	0,0000
	4	6	5	3	1	2	7

3. Απόκριση χρόνου κύκλου (cycle time)

- Προσέγγιση: *Smaller the better*

Πίνακας 10: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Χρόνος κύκλου»

S/N Ratio	Injection time	Packing time	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Melt temperature	MFI (PP)	Air temperature
level 1	-14,1590	-14,0914	-14,2173	-14,2181	-14,2181	-14,2181	-14,2181
level 2	-14,2773	-14,3449	-14,2190	-14,2181	-14,2181	-14,2181	-14,2181
	0,1183	0,2535	0,0017	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1	3				

Πίνακας 11: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Χρόνος κύκλου»

ANOVA	Injection time	Packing time	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Melt temperature	MFI (PP)	Air temperature
Level 1	20,42	20,26	20,56	20,56	20,56	20,56	20,56
Level 2	20,7	20,86	20,56	20,56	20,56	20,56	20,56
Contribution for level 1	104,24	102,62	105,68	105,68	105,68	105,68	105,68
Contribution for level 2	107,12	108,78	105,68	105,68	105,68	105,68	105,68
Factor sum of square	0,0098	0,045	0	0	0	0	0
Variance	0,0098	0,045	0	0	0	0	0
Variance Ratio F	-	-	-	-	-	-	-
Contribution	0,1788	0,8212	0	0	0	0	0
	2	1					

4.2.2. Τελικός σχεδιασμός Taguchi

Ύστερα, από την μελέτη που έγινε στον αρχικό σχεδιασμό Taguchi, λαμβάνει χώρα η ανάλυση του τελικού σχεδιασμού Taguchi. Αφού εξετάστηκαν αναλυτικά τα αποτελέσματα του πρώτου σχεδιασμού σύμφωνα με τις στατιστικές μεθόδους ANOVA και S/N ratio, εξάγεται συμπέρασμα για την κατεύθυνση του επόμενου σχεδιασμού με μεγαλύτερο αριθμό πειραμάτων και πιο στοχευμένων παραγόντων.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά επιλέγεται για το υλικό να εξετασθεί πολυμερές πολυπροπυλένιο με **MFI=45 g/10 min** εφόσον πληροί τις απαραίτητες λειτουργικές προϋποθέσεις. Έπειτα εφόσον εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία δωματίου (**air temperature**) επιδρά σχεδόν αμελητέα στο πείραμα, επιλέγεται να μείνει σταθερή η τιμή της στους **25°C**. Στην συνέχεια, κρίνεται σκόπιμο να μειωθεί το εύρος τιμών των δύο χρονικών παραγόντων όπως φαίνεται στον Πίνακας 12 παρακάτω, μιας και η αυξημένη τιμή τους φάνηκε να επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματα στα προηγούμενα πειράματα. Ωστόσο, σε ό,τι αφορά τις πιέσεις χύτευσης υπάρχει πιο ελαστικό περιθώριο πειραματισμού και μελέτης. Έτσι, οι τιμές τους επιλέγεται να κυμανθούν για το max injection pressure και το max packing pressure, από 160MPa έως 200MPa και από 40MPa έως 60MPa αντίστοιχα. Τέλος, για την θερμοκρασία τήγματος όπου επηρεάζει σημαντικά την ροή του υλικού προς τις κοιλότητες του καλουπιού επιλέγεται να εξεταστούν οι τιμές 230, 240, 250°C.

Πίνακας 12: Παράγοντες ελέγχου τελικού σχεδιασμού Taguchi

Control Factor	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
Injection time	Sec	0.095	0.1	0.15
Packing time	Sec	0.25	0.3	0.35
Max Injection Pressure	MPa	160	180	200
Max Packing Pressure	MPa	40	50	60
Melt temperature	°C	230	240	250
Mold material MFI (PP)	g/10 min		45	
Air temperature	°C		25	

Με όμοια λογική επιλέχθηκαν και οι ποιοτικοί παράγοντες της μεθόδου όπου παρουσιάζονται στον Πίνακας 13, οι οποίοι αξίζουν να ελεγχθούν.

Πίνακας 13: Παράγοντες ποιότητας τελικού σχεδιασμού Taguchi

Quality Factor	Unit	Προσέγγιση
Total weight	g	Nominal the best (4.2 gr)
Clamping force	Tonnage	Smaller the better

Στην συνέχεια, με την βοήθεια του στατιστικού λογισμικού «Minitab» εξάχθηκε ο πίνακας L27 βλ. Πίνακας 14 με τους συνδυασμούς παραμέτρων στα **τρία εξεταζόμενα επίπεδα**, αφού αρχικά εισάχθηκαν στο περιβάλλον του προγράμματος οι παράγοντες ελέγχου και ποιότητας. Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του Microsoft excel.

Πίνακας 14: Πίνακας L27-Σχεδιασμός τελικού Taguchi

Trial No.	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Injection Time	Packing Time	Melt Temperature
1	160	40	0,095	0,25	230
2	180	40	0,095	0,3	240
3	200	40	0,095	0,35	250
4	200	50	0,095	0,3	230
5	160	50	0,095	0,35	240
6	180	50	0,095	0,25	250
7	180	60	0,095	0,35	230
8	200	60	0,095	0,25	240
9	160	60	0,095	0,3	250
10	180	60	0,1	0,35	250
11	200	60	0,1	0,25	230
12	160	60	0,1	0,3	240
13	160	40	0,1	0,25	250
14	180	40	0,1	0,3	230
15	200	40	0,1	0,35	240
16	200	50	0,1	0,3	250
17	160	50	0,1	0,35	230
18	180	50	0,1	0,25	240
19	200	50	0,15	0,3	240
20	160	50	0,15	0,35	250
21	180	50	0,15	0,25	230
22	180	60	0,15	0,35	240
23	200	60	0,15	0,25	250
24	160	60	0,15	0,3	230
25	160	40	0,15	0,25	240
26	180	40	0,15	0,3	250
27	200	40	0,15	0,35	230

Ύστερα από την εκτέλεση των πειραμάτων σύμφωνα με τους συνδυασμούς που προκύπτουν από τον παραπάνω πίνακα, προέκυψαν τα αποτελέσματα για τον κάθε ποιοτικό παράγοντα που εξετάζεται όπως φαίνονται παρακάτω στον Πίνακας 15. Έπεται η ανάλυση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών με χρήση των στατιστικών μεθόδων ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) και αναλογία σήματος-θορύβου (Signal to Noise ratio).

Πίνακας 15: Απόκριση ποιοτικών παραγόντων του τελικού σχεδιασμού Taguchi

Trial No.	Control factors					Quality factors	
	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Injection Time	Packing Time	Melt Temperature	Total Weight	Clamping Force
1	160	40	0,095	0,25	230	4,223	51,3
2	180	40	0,095	0,3	240	4,22	42,9
3	200	40	0,095	0,35	250	4,218	42,7
4	200	50	0,095	0,3	230	4,222	51,7
5	160	50	0,095	0,35	240	4,219	43,2
6	180	50	0,095	0,25	250	4,217	43,2
7	180	60	0,095	0,35	230	4,222	52,2
8	200	60	0,095	0,25	240	4,22	43,6
9	160	60	0,095	0,3	250	4,219	43,7
10	180	60	0,1	0,35	250	4,22	41,9
11	200	60	0,1	0,25	230	4,221	51
12	160	60	0,1	0,3	240	4,221	42,3
13	160	40	0,1	0,25	250	4,219	41,2
14	180	40	0,1	0,3	230	4,222	50,1
15	200	40	0,1	0,35	240	4,219	41,6
16	200	50	0,1	0,3	250	4,22	41,5
17	160	50	0,1	0,35	230	4,221	50,6
18	180	50	0,1	0,25	240	4,22	41,9
19	200	50	0,15	0,3	240	4,222	46,7
20	160	50	0,15	0,35	250	4,21	43,3
21	180	50	0,15	0,25	230	4,226	57,9
22	180	60	0,15	0,35	240	4,222	46,8
23	200	60	0,15	0,25	250	4,22	43,5
24	160	60	0,15	0,3	230	4,226	58,2
25	160	40	0,15	0,25	240	4,221	46,6
26	180	40	0,15	0,3	250	4,219	43,1
27	200	40	0,15	0,35	230	4,225	57,7

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων των 27 ανωτέρω πειραμάτων αρχικά έγινε μελέτη με την μέθοδο «S/N ratio». Η μετατροπή ενός συνόλου παρατηρήσεων σε έναν μόνο αριθμό, τον λόγο SN, πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Πρώτα, υπολογίζεται η μέση τετραγωνική απόκλιση (MSD) του συνόλου. Δεύτερον, ο λόγος SN υπολογίζεται από το MSD από την εξίσωση $S/N = -Log_{10}(MSD)$.

Έπειτα, έγινε ανάλυση της διακύμανσης «ANOVA» για την εξαγωγή συμπεράσματος του ποσοστού συμμετοχής κάθε παράγοντα στα αποτελέσματα. Η μελέτη έλαβε χώρα στο περιβάλλον του «Microsoft excel» σύμφωνα με τους απαραίτητους στατιστικούς τύπους.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες που προκύπτουν για τον κάθε ποιοτικό παράγοντα ξεχωριστά.

1. Απόκριση βάρους τεμαχίου (total weight)

- Προσέγγιση: Nominal the best

Πίνακας 16: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου»

S/N Ratio	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Injection Time	Packing Time	Melt Temperature
level 1	34,2675	33,7403	34,0181	33,7035	32,7526
level 2	33,6566	34,3704	33,8452	33,5022	33,8003
level 3	33,6842	33,4976	33,7450	34,4026	35,0554
delta	0,6109	0,8729	0,2731	0,9005	2,3028
Rank	4	3	5	2	1

Πίνακας 17: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου»

ANOVA	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Injection Time	Packing Time	Melt Temperature
Level 1	0,179	0,186	0,18	0,187	0,208
Level 2	0,188	0,177	0,183	0,191	0,184
Level 3	0,187	0,191	0,191	0,176	0,162
Contribution for level 1	0,00356	0,00384	0,00360	0,00389	0,00481
Contribution for level 2	0,00393	0,00348	0,00372	0,00405	0,00376
Contribution for level 3	0,00389	0,00405	0,00405	0,00344	0,00292
Factor sum of square	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Variance	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Variance Ratio F	0,378	0,781	0,502	0,936	8,214
Contribution	0,0225	0,0465	0,0298	0,0557	0,4886
	2,246%	4,646%	2,985%	5,569%	48,862%

2. Απόκριση δύναμης σύσφιξης (clamping force)

- Προσέγγιση: *Smaller the better*

Πίνακας 18: Απόκριση Μέσης Αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη σύσφιξης»

S/N Ratio	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Injection Time	Packing Time	Melt Temperature
level 1	-33,3361	-33,2686	-33,2336	-33,3318	-34,5369
level 2	-33,3273	-33,3275	-32,9653	-33,3319	-32,8512
level 3	-33,3269	-33,3943	-33,7915	-33,3266	-32,6022
delta	0,0093	0,1257	0,8263	0,0054	1,9347
Rank	4	3	2	5	1

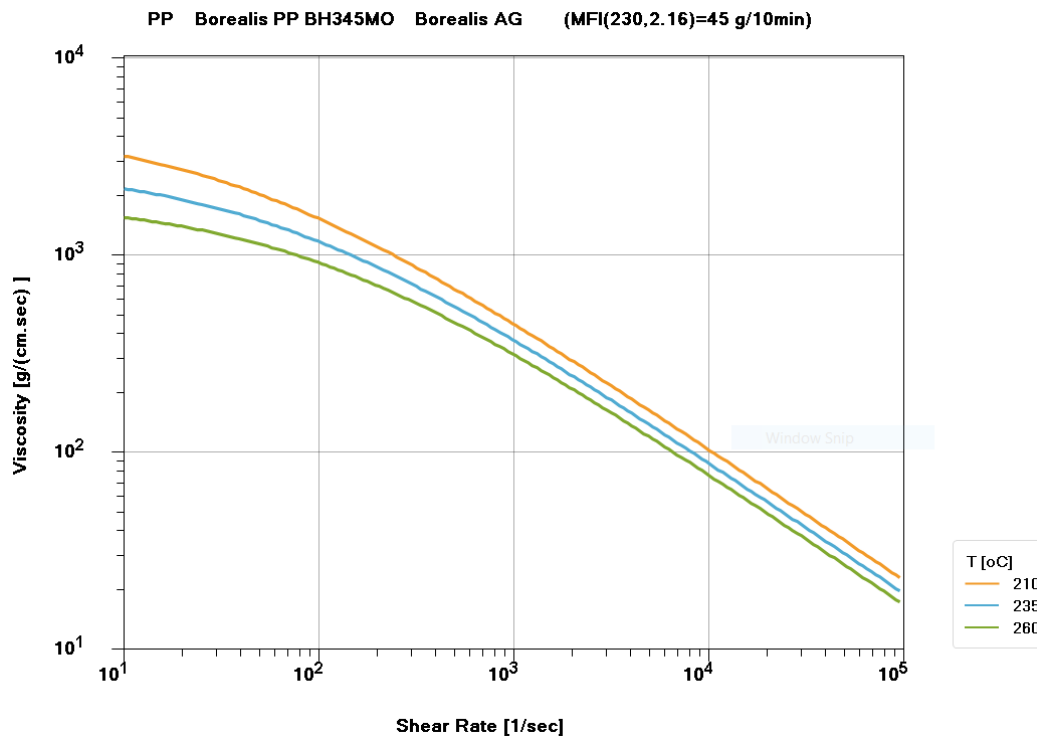
Πίνακας 19: Ανάλυση Διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη σύσφιξης»

ANOVA	Max Injection Pressure	Max Packing Pressure	Injection Time	Packing Time	Melt Temperature
Level 1	420,4	417,2	414,5	420,2	480,7
Level 2	420	420	402,1	420,2	395,6
Level 3	420	423,2	443,8	420	384,1
Contribution for level 1	19637,35	19339,54	19090,03	19618,67	25674,72
Contribution for level 2	19600,00	19600,00	17964,93	19618,67	17388,82
Contribution for level 3	19600,00	19899,80	21884,27	19600,00	16392,53
Factor sum of square	0,0119	2,0030	101,8941	0,0030	618,7341
Variance	0,0059	1,0015	50,9470	0,0015	309,3670
Variance Ratio F	0,0020	0,3456	17,5807	0,0005	106,7555
Contribution	0,00002	0,00264	0,13453	0,00000	0,81690
	0,00156%	0,26445%	13,45277%	0,00039%	81,68961%

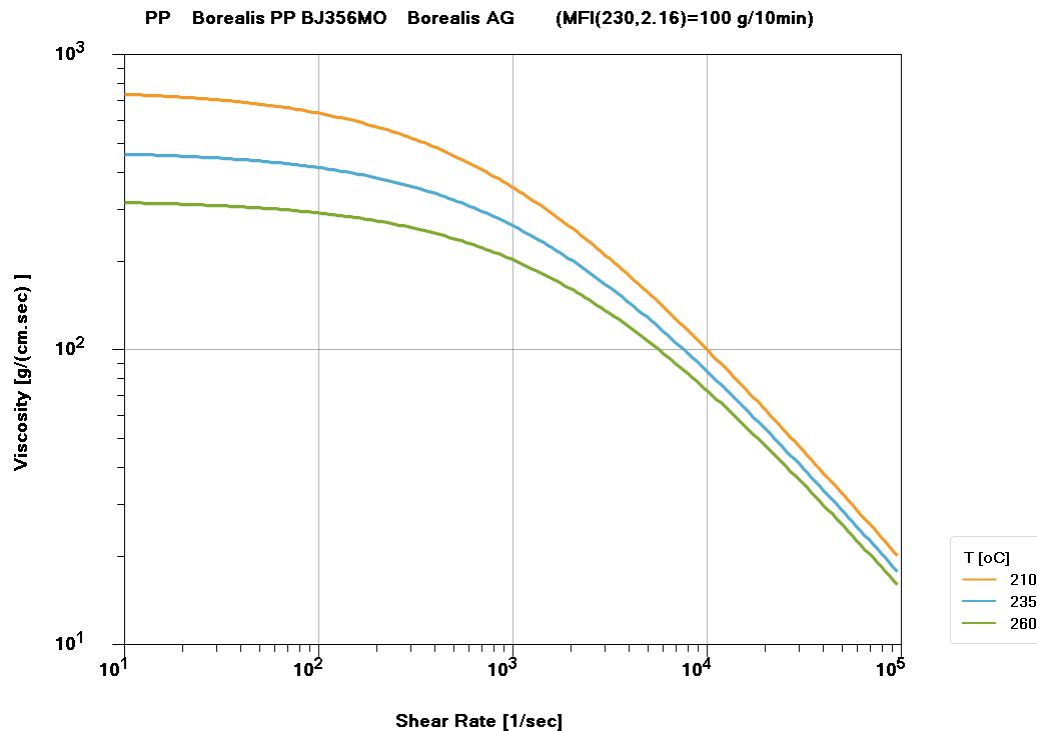
4.3. Αποτελέσματα πειραμάτων (DOE results)

4.3.1. Αποτελέσματα πρωταρχικού σχεδιασμού Taguchi

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων για τους ποιοτικούς παράγοντες βάρους και δύναμης σύσφιξης, γίνεται σαφές ότι το δομικό πολυμερές υλικό που χρησιμοποιείται έχει καθοριστικό ρόλο στην κατεργασία χύτευσης με έγχυση. Ο βαθμός στον οποίο το είδος του υλικού επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα είναι τεράστιος σε σχέση με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Έπειτα, όπως ήταν αναμενόμενο, το πολυπροπυλένιο με **MFI =100g/10min** έχει αρκετά μεγαλύτερη συνεισφορά στο πείραμα σε σχέση με το PP με **MFI = 45g/10min**. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ρευστό υλικό, όταν έχει μεγαλύτερο ιξώδες βλ. Σχήμα 4.1, συναντά μεγαλύτερη δυσκολία και αντίσταση στην διαδρομή του προς την κοιλότητα μορφοποίησης. Έτσι, επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη πλήρωση της μήτρας με πολυμερές μικρότερου ιξώδους βλ. Σχήμα 4.2 και μεγαλύτερου δείκτη ροής τήγματος (**MFI-Melt Flow Index**). Καθώς το PP με **MFI=45g/10min** καλύπτει τις ανάγκες της παραγωγής και είναι σημαντικά οικονομικότερο σε σύγκριση με το PP με **MFI=100g/10min**, επιλέγεται αυτό ως δομικό υλικό.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ιξώδους συναρτήσει ρυθμού διάτμησης για πολυπροπυλένιο με MFI 45



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ιξώδους συναρτήσει ρυθμού διάτμησης για πολυπροπυλένιο με MFI 100

Στην συνέχεια, ο αμέσως επόμενος σημαντικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει το βάρος και την δύναμη σύσφιξης είναι η θερμοκρασία τήγματος (**melt temperature**). Μάλιστα, σύμφωνα με την απόκριση της δύναμης σύσφιξης, ξεπερνάει την συνεισφορά και του MFI του υλικού. Μεγαλύτερη συνεισφορά παρατηρείται ότι υπάρχει για το επίπεδο 2 με τιμή θερμοκρασίας 260°C σε σχέση με το επίπεδο 1 με τιμή 220°C. Ο παράγοντας της θερμοκρασίας τήγματος λόγω της σημαντικότητας που παρουσιάζει, επιλέγεται να μελετηθεί περαιτέρω σε επόμενα πειράματα με πιο μικρό εύρος τιμών. Από την άλλη πλευρά η θερμοκρασία δωματίου (Air temperature) κάτι το οποίο μπορεί να θεωρηθεί και ως παράγοντας θορύβου, φαίνεται ότι δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου τα αποτελέσματα των πειραμάτων, εφόσον λαμβάνει την τελευταία 7^η θέση σημαντικότητας.

Έπειτα, σημαντικό ρόλο έχει η παράμετρος της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (**Max Packing Pressure**), καθώς λαμβάνει την 3^η θέση στην κατάταξη συνεισφοράς μεταξύ όλων των παραμέτρων ελέγχου. Φαίνεται ότι μεγαλύτερη συνεισφορά, με ελάχιστη διαφορά έχει το **επίπεδο 1** με τιμή **50MPa** έναντι της τιμής 100MPa. Όσον αφορά την μέγιστη πίεση έγχυσης (**Max Injection Pressure**), ο ρόλος της δεν είναι καθοριστικός στην κατεργασία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτή λαμβάνει την 5^η θέση στην κατάταξη και σημειώνει προτίμηση στο **επίπεδο 2** με τιμή **200MPa** έναντι των 150MPa. Έτσι, για τους λόγους αυτούς στα επόμενα πειράματα επιλέγεται να μελετηθεί για την Max Packing Pressure εύρος τιμών γύρω από τα 40MPa και για την Max Injection Pressure η τιμή των 160MPa όπως προτείνεται από την κατασκευαστική εταιρεία.

Τέλος, οι χρονικοί παράγοντες χρόνος έγχυσης και συμπίεσης (Injection time & Packing time) παίζουν καθοριστικό ρόλο σαφώς στον κύκλο έγχυσης με μεγαλύτερη συνεισφορά του χρόνου συμπίεσης. Σε αυτό επίσης, φαίνεται να παίζει μικρό ρόλο η πίεση συμπίεσης. Ωστόσο, σε ό,τι αφορά τους ποιοτικούς παράγοντες του βάρους και της δύναμης σύσφιξης σημαντικότερος φαίνεται ότι είναι ο χρόνος έγχυσης (**injection time**) με μεγαλύτερη συνεισφορά στο **επίπεδο 1** με τιμή **0,08sec**. Αυτό είναι λογικό αποτέλεσμα μιας και όταν αυξάνεται ο χρόνος πλήρωσης υπάρχει κίνδυνος στερεοποίησης του τήγματος, για παράδειγμα στην περιοχή της πύλης εισόδου με αποτέλεσμα την μη-ομοιόμορφη ή και ελλιπή πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης. Σημειώνεται ότι για το **packing time, με ελάχιστη διαφορά** σημειώνει μεγαλύτερη συνεισφορά το **επίπεδο 1** με τιμή **0,25sec**.

Αξιοσημείωτο είναι ότι το DOF και το Se των όρων σφάλματος είναι μηδέν, επομένως ο λόγος F, δηλαδή ο λόγος των αποκλίσεων δεν μπορεί να υπολογιστεί. Επομένως, αυτός ο πειραματικός σχεδιασμός δεν είναι τόσο αποτελεσματικός για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης παραγόντων. Επιπρόσθετοι βαθμοί ελευθερίας είναι απαραίτητοι για μια πλήρη ανάλυση των αλληλεπιδράσεων και των κύριων επιπτώσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί επαναλαμβάνοντας τα πειράματα για κάθε ρύθμιση, έτσι ώστε να υπάρχει ένας όρος σφάλματος που θα έχει μη μηδενικούς βαθμούς ελευθερίας και όρους διακύμανσης.

4.3.2. Αποτελέσματα τελικού σχεδιασμού Taguchi

Ύστερα από τον καθορισμό σταθερών τιμών για την παράμετρο του υλικού (mold material) και της θερμοκρασίας δωματίου (air temperature) εξετάστηκε εκτενώς η επίδραση των υπόλοιπων παραγόντων ελέγχου σύμφωνα με ένα μικρότερο εύρος τιμών. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κάθε ανάλυσης για κάθε ποιοτικό παράγοντα.

1. Ποιοτικός παράγοντας- Total Weight

Αρχικά, παρουσιάζονται τα ποσοτικά διαγράμματα για τον ποιοτικό παράγοντα βάρους. Στο Σχήμα 4.3, φαίνεται η μέση απόκριση της διακύμανσης (mean of means), όπου κάθε ελάχιστο σημείο του εκάστοτε παράγοντα ελέγχου δείχνει την βέλτιστη τιμή συνεισφοράς του. Σημειώνεται ότι η διακύμανση του σφάλματος που προκύπτει είναι 0%.



Σχήμα 4.3: Ποσοτικά διαγράμματα για τον ποιοτικό παράγοντα «Βάρος Τεμαχίου»

- Σύμφωνα με κατάταξη που προκύπτει από τον λόγο SN, η θερμοκρασία τήγματος (**melt temperature**) ασκεί την μεγαλύτερη με διαφορά επιρροή στην διαμόρφωση του βάρους του τεμαχίου. Η ανάλυση ANOVA το επιβεβαιώνει καθώς η μεγαλύτερη συνεισφορά της τάξης **48,862%** συναντάται εκεί.
- Έπεται, ο παράγοντας ελέγχου χρόνος συμπίεσης (**packing time**). Η συνεισφορά του οποίου είναι σύμφωνα με το ANOVA, στα **5,569%**.
- Ακολουθεί με μικρή διαφορά, η επίδραση της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (**max packing pressure**) με συνεισφορά στα **4,646%**.
- Στην συνέχεια, παρατηρείται ότι την μικρότερη επίδραση στο βάρος την ασκούν ο χρόνος έγχυσης (**injection time**) με ποσοστό **2,985%** και τέλος η μέγιστη πίεση έγχυσης (**max injection pressure**) με **2,246%**.

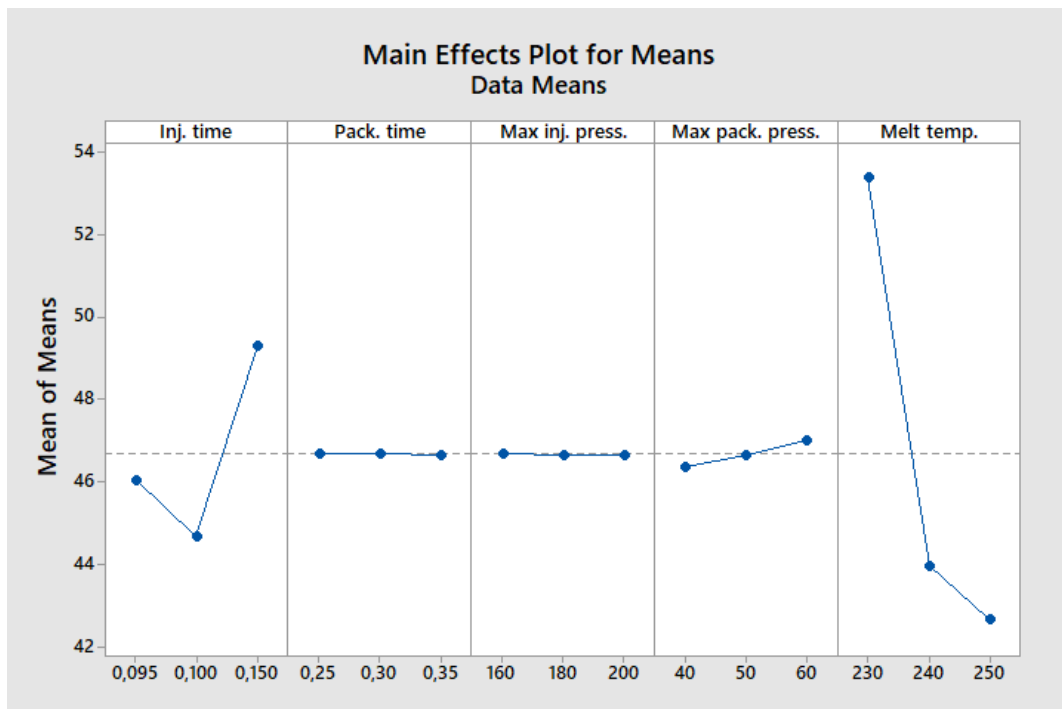
Παρακάτω παρουσιάζεται στον Πίνακα 20 η βελτιστοποιημένη λύση για τον ποιοτικό παράγοντα «Total weight». Η λύση παρέχει για τον κάθε παράγοντα ελέγχου το επίπεδο που συνεισφέρει βέλτιστα στον εκάστοτε ποιοτικό παράγοντα.

Πίνακας 20: Optimized solution for Total weight

Factor	Value	Level
Max inj. press. (MPa)	160	1
Max pack. press. (MPa)	50	2
Inj. Time (s)	0,095	1
Pack. Time (s)	0,35	3
Melt temp. (°C)	250	3

2. Ποιοτικός παράγοντα- Clamping Force

Αρχικά, παρουσιάζονται τα ποσοτικά διαγράμματα για τον ποιοτικό παράγοντα δύναμης σύσφιξης. Στο Σχήμα 4.4, φαίνεται η μέση απόκριση της διακύμανσης (mean of means), όπου κάθε ελάχιστο σημείο του εκάστοτε παράγοντα ελέγχου δείχνει την βέλτιστη τιμή συνεισφοράς του. Σημειώνεται ότι η διακύμανση του σφάλματος που προκύπτει είναι 2,9%.



Σχήμα 4.4: Ποσοτικά διαγράμματα για τον ποιοτικό παράγοντα «Δύναμη Σύσφιξης»

- Αρχικά, παρατηρείται από την ανάλυση SN ότι και εδώ την μεγαλύτερη επίδραση με διαφορά, την ασκεί η θερμοκρασία τήγματος (**melt temperature**). Συγκεκριμένα, η συνεισφορά της είναι **81,69%**.
- Ύστερα, σημαντική επίδραση παρουσιάζει και ο χρόνος έγχυσης (**injection time**) με ποσοστό συνεισφοράς σύμφωνα με το ANOVA, στα **13,45%**.
- Στην συνέχεια, ελάχιστη επίδραση φαίνεται να έχει η μέγιστη πίεση συμπίεσης (**max packing pressure**) με συνεισφορά **0,264%**.
- Τέλος, αμελητέες θεωρούνται οι επιδράσεις των παραγόντων ελέγχου «**max injection pressure**» και «**packing time**» καθώς φέρουν ποσοστό συνεισφοράς **0,0016%** **0,0004%** αντίστοιχα.

Παρακάτω παρουσιάζεται στον Πίνακα 21 η βελτιστοποιημένη λύση για τον ποιοτικό παράγοντα «Clamping force». Η λύση αυτή προκύπτει σύμφωνα με την ανάλυση του SN ratio και παρέχει για τον κάθε παράγοντα ελέγχου το επίπεδο που συνεισφέρει βέλτιστα στις απαιτήσεις του εκάστοτε ποιοτικού παράγοντα.

Πίνακας 21: Optimized solution for Clamping Force

Factor	Value	Level
<i>Max inj. press. (MPa)</i>	200	3
<i>Max pack. press. (MPa)</i>	40	1
<i>Inj. Time (s)</i>	0,1	2
<i>Pack. Time (s)</i>	0,35	3
<i>Melt temp. (°C)</i>	250	3

4.3.3. Βέλτιστος σχεδιασμός

Εν κατακλείδι, σύμφωνα με τα τελικά αποτελέσματα του σχεδιασμού Taguchi, εξάχθηκαν κάποια συμπεράσματα αναφορικά με τα βέλτιστα επίπεδα των παραγόντων ελέγχου. Οι παράμετροι αυτές, όπως αναγράφονται στους παραπάνω πίνακες (Πίνακας 20, Πίνακας 21) εξετάστηκαν τελικώς και τα βελτιστοποιημένα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται παρακάτω.

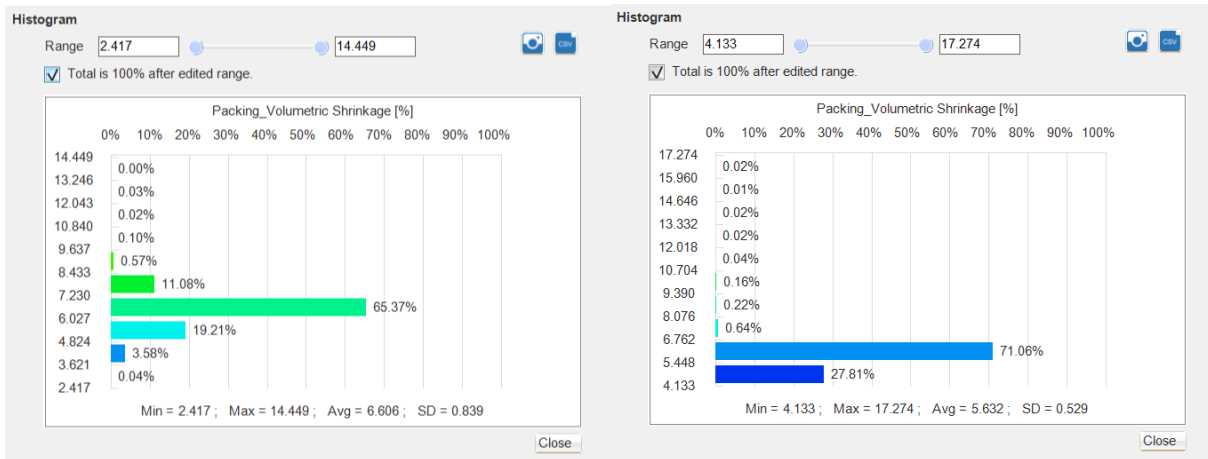
❖ Packing-Volumetric Shrinkage (%)

Αρχικά, υπενθυμίζεται ότι ο μέσος όρος της ποσοστιαίας ογκομετρικής συρρίκνωσης ήταν γύρω στα **6,6%** στο μεγαλύτερο μέρος του τεμαχίου. Γενικά, όπως προαναφέρθηκε διαφέρει αρκετά από τον απαιτούμενη τιμή που έχει θέσει ο πελάτης (1,5%). Έπειτα, από πολλές προσπάθειες μείωσης του ποσοστού αυτού, το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα δόθηκε με τις βέλτιστες τιμές για το τελικό βάρος. Όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 4.5 το ποσοστό της συρρίκνωσης πράγματι μειώθηκε στο **5,6%** για την μεγαλύτερη επιφάνεια. Ωστόσο, εξακολουθεί να μην πληροί τις προδιαγραφές του πελάτη, γεγονός που επαληθεύει την αρχική εκτίμηση ότι αυτό οφείλεται στη λήψη ιδεατού συστήματος ψύξης αντί του πραγματικού συστήματος ψύξης στην μήτρα μορφοποίησης. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν λογικό αφού και το μεγαλύτερο μέρος της συρρίκνωσης συμβαίνει στο καλούπι κατά την φάση ψύξης. Αυτό καθιστά επιτακτική την ανάγκη για την εξέταση του συγκεκριμένου προϊόντος λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό σύστημα διανομής και ψύξης ούτως ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Σύμφωνα με την θεωρία, όσο μεγαλύτερη είναι η ποσοστιαία μείωση της τυπικής απόκλισης, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό βελτίωσης του ποιοτικού παράγοντα. Υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση ως εξής:

$$PIM = ((SD_{optimum} - SD_{original}) / SD_{original}) \times 100 \%$$

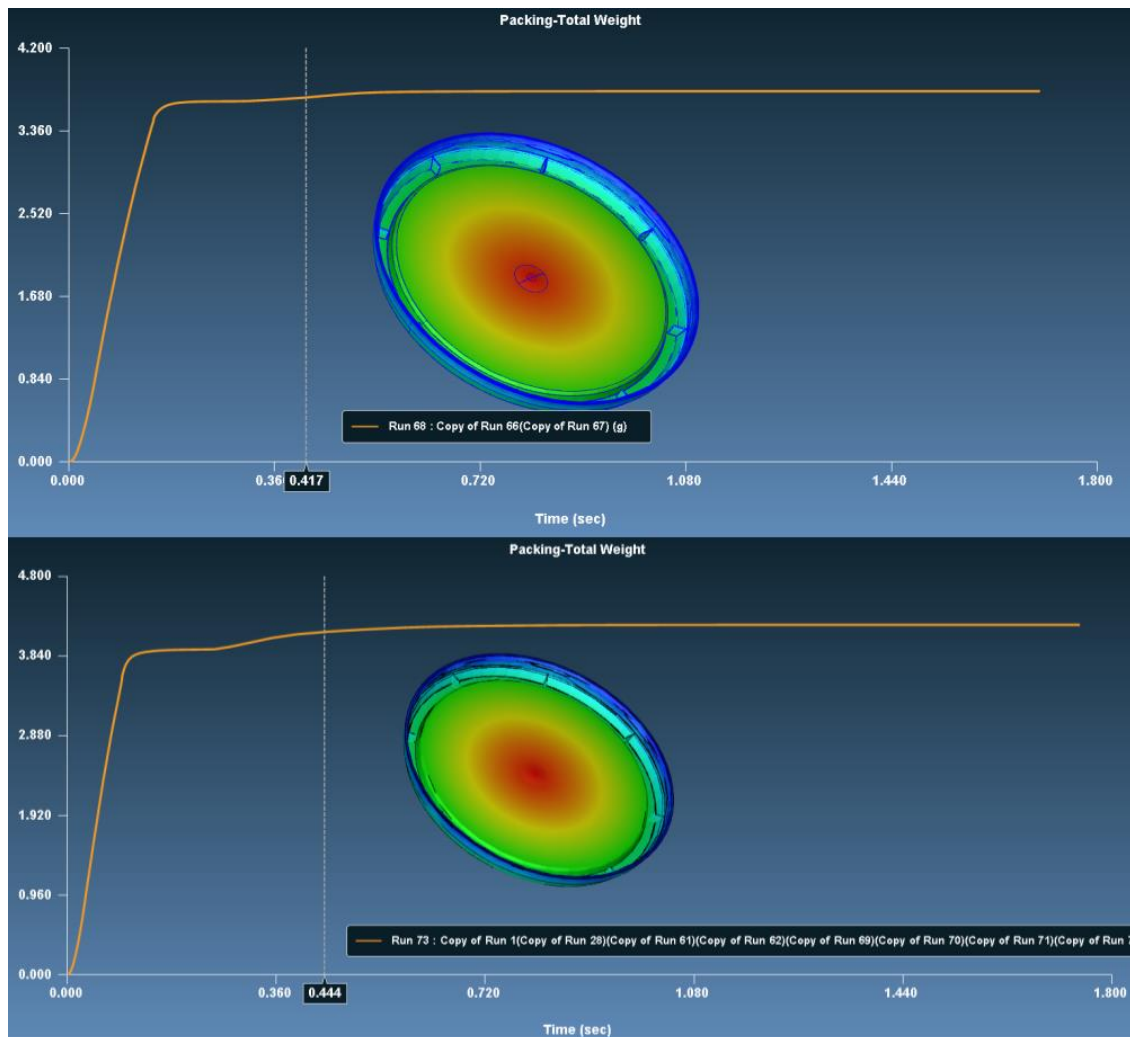
$$((0,529 - 0,839) / 0,839) \times 100\% = - 36,9\%$$



Σχήμα 4.5: Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (αριστερά) και αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (δεξιά) για τον παράγοντα “Packing- Volumetric Shrinkage ” ο οποίος βελτιώθηκε τελικώς κατά 36,9%.

❖ Packing -Total Weight

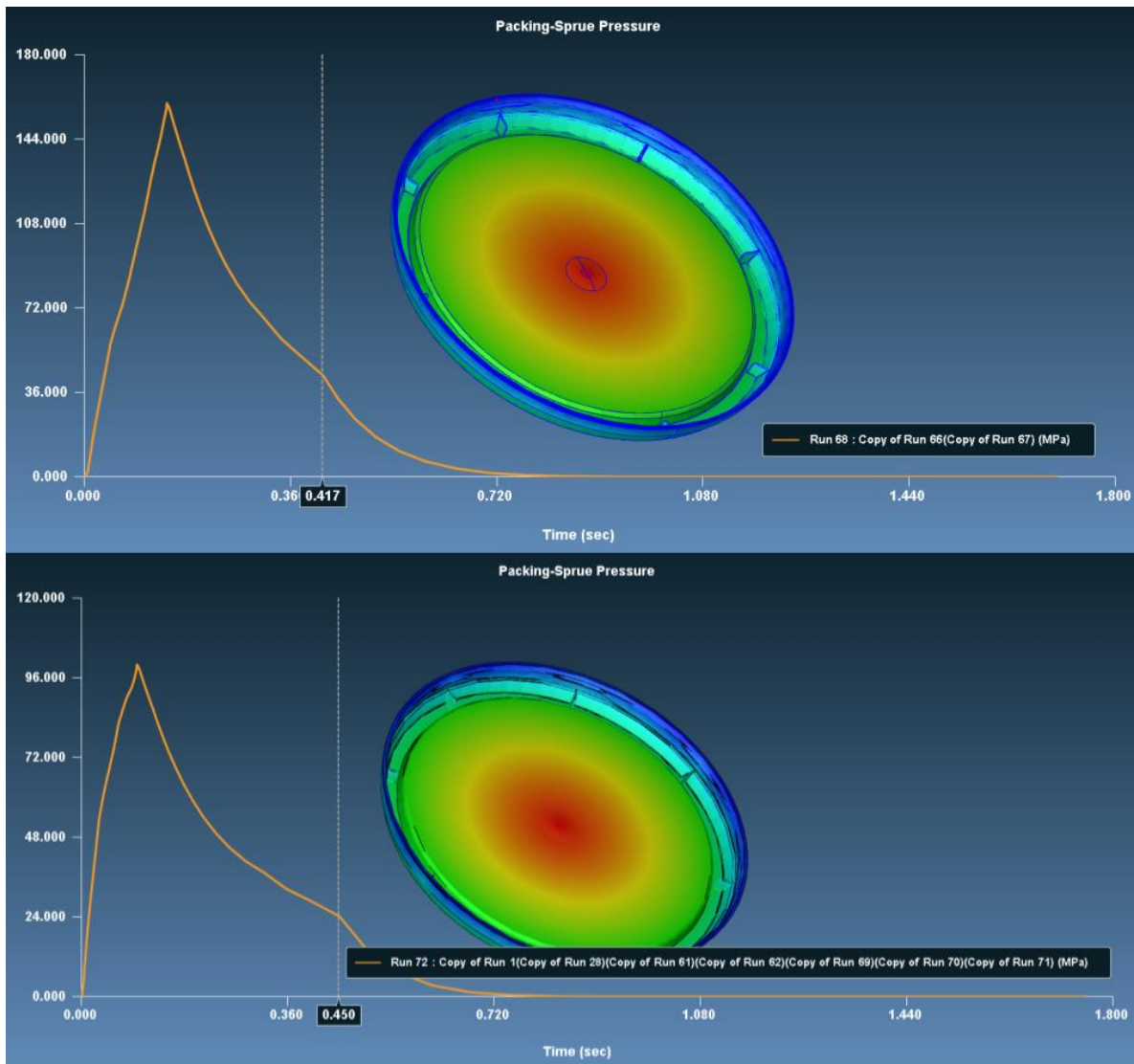
Όσον αφορά τα πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης για τον ποιοτικό παράγοντα βάρος τεμαχίου, αυτά κυμαίνονταν σε τιμές της τάξεως του **3,8 gr**. Έπειτα, από την ανάλυση προσομοίωσης με τα βέλτιστα επίπεδα παραμέτρων όπως εξάχθηκε από την ανάλυση SN ratio του τελικού σχεδιασμού Taguchi, προέκυψε βελτίωση του βάρους με τελική τιμή **4.226 gr** στο τέλος της φάσης συμπίεσης. Αυτή η τιμή είναι ικανοποιητική, καθώς καλύπτει τις προδιαγραφές του πελάτη και βρίσκεται στο επιτρεπτό όριο της ανοχής βάρους $\pm 3\%$ του 4,2. Σχετικά με την καμπύλη που ακολουθεί φαίνεται να αυξάνεται ομαλά μέχρι το τέλος της φάσης πλήρωσης βλ. Σχήμα 4.6. Έπειτα, ακολουθεί μια ελαφρά αύξηση μέχρι το σημείο εναλλαγής φάσεων (switch point) έως ότου σταθεροποιηθεί με το γέμισμα της κοιλότητας μορφοποίησης.



Σχήμα 4.6: Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (πάνω) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (κάτω) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing - Total Weight ” ο οποίος αυξήθηκε κατά 0,43gr.

❖ Packing-Sprue Pressure (MPa)

Τα πρωτογενή αποτελέσματα της πίεσης συμπίεσης στο κάθετο κανάλι διανομής, υπενθυμίζεται ότι έδειξαν πως η μέγιστη πίεση συμπίεσης η ισούται με **159 MPa** την χρονική στιγμή **0.145 sec**. Έπειτα, από τον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό αυτή μειώθηκε σημαντικά με μέγιστη τιμή στα **99 MPa** την χρονική στιγμή **0,097 sec** βλ. [Σχήμα 4.7](#). Ωστόσο, η μορφή της καμπύλης παραμένει ίδια, ομαλά αύξουσα έως το σημείο καμψής στην μέγιστη τιμή της. Έπειτα, ακολουθεί ομαλά φθίνουσα έως ότου μηδενιστεί όταν στερεοποιηθεί η πύλη εισόδου.

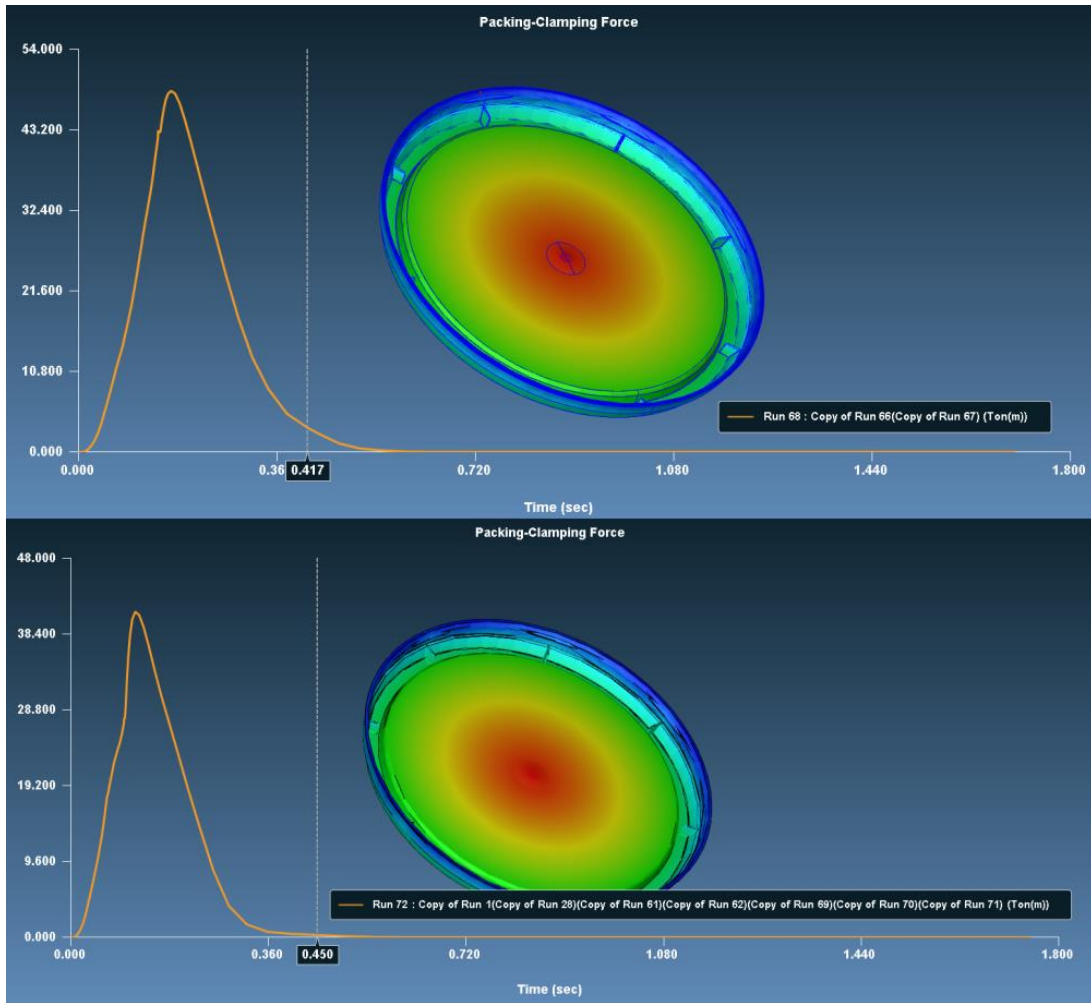


Σχήμα 4.7: Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (πάνω) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (κάτω) για τον παράγοντα “Packing-Sprue Pressure ” ο οποίος μειώθηκε τελικώς κατά 60 MPa.

❖ Packing-Clamping Force (Ton)

Τα πρωτογενή αποτελέσματα αρχικής προσομοίωσης του παράγοντα ποιότητας «δύναμη σύσφιξης» στην φάση της συμπίεσης, υπενθυμίζεται ότι έδειξαν πως η μέγιστη τιμή της ισούται με **48 Ton** την χρονική στιγμή **0,166 sec** η οποία ξεπερνούσε την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή των 45 MPa.

Έπειτα, από τον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό η τιμή αυτή μειώθηκε με μέγιστη τιμή στα **41,2 Ton** την χρονική στιγμή **0,117 sec** βλ. Σχήμα 4.8. Ωστόσο, η μορφή της καμπύλης παραμένει ίδια, ομαλά αύξουσα έως το σημείο καμψής στην μέγιστη τιμή της. Έπειτα, ακολουθεί ομαλά φθίνουσα έως ότου μηδενιστεί όταν στερεοποιηθεί η πύλη εισόδου.



Σχήμα 4.8: Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (πάνω) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (κάτω) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing-Clamping Force ” ο οποίος μειώθηκε τελικώς κατά 6.8 Ton.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

5.1. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε μια μελέτη περίπτωσης για την προσομοίωση χύτευσης με έγχυση ενός εμπορικού πλαστικού καταναλωτικού προϊόντος (PP 4,2g). Αρχικά, διερευνήθηκε η συμπεριφορά της διεργασίας χύτευσης με έγχυση κατά την εκκίνηση καθώς και μετά την αλλαγή των παραμέτρων της μηχανής έγχυσης. Η ανάλυση προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε για να ποσοτικοποιήσει ένα εμπειρικό μοντέλο για τη διαδικασία ώστε να ληφθεί η επιθυμητή τιμή δύναμης σύσφιξης και βάρους για συγκεκριμένες παραμέτρους διαδικασίας. Το λογισμικό Moldex3D είναι αυτό που αξιοποιήθηκε για την εκτέλεση του κύκλου δοκιμών καθώς μέσω αυτών γίνεται σαφές ποιοι παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της προσομοίωσης. Με γόμωνα αυτό επιλέχθηκε να μελετηθεί εκτενώς η επίδραση των παραμέτρων «Max Injection Pressure», «Max Packing Pressure», «Injection Time», «Packing Time» και «Melt Temperature» υπό την μορφή παραγόντων ελέγχου στον σχεδιασμό Taguchi. Ωστόσο, οι παράγοντες της φάσης ψύξης δεν μελετήθηκαν εφόσον στην παρούσα εργασία δεν λαμβάνεται υπόψη το πραγματικό σύστημα ψύξης. Στον σχεδιασμό πειραμάτων (DOE) ως παράγοντες ποιότητας εξετάζονται η δύναμη σύσφιξης (Clamping force) και το βάρος. Σκοπός είναι μέσω της χρήσης μιας στατιστικής και αριθμητικής προσέγγισης η εκτίμηση των βέλτιστων επιπέδων τους.

Συγκεκριμένα, ο λόγος SN δείχνει την κατάταξη κάθε παραμέτρου, ενώ η ανάλυση διακύμανσης ANOVA υπολογίζει την πραγματική ποσοστιαία συνεισφορά κάθε παραμέτρου στη διαδικασία. Στο «δια ταύτα», τα αποτελέσματα των σχεδιασμών Taguchi δείχνουν ότι η θερμοκρασία τήγματος είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος για τους δύο παράγοντες ποιότητας που εξετάζονται και κατατάσσεται στο πρώτο επίπεδο.

Τα κύρια συμπεράσματα αυτής της μελέτης περιλαμβάνουν:

- Αρχικά, επιβεβαιώθηκε ότι το είδος του πολυμερούς υλικού επηρεάζει σε τεράστιο βαθμό τα τελικά αποτελέσματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Παρά την μεγαλύτερη συνεισφορά υλικών μεγαλύτερου δείκτη ροής (MFI), επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί υλικό με **MFI=45g/10min** εφόσον καλύπτει τις ανάγκες της παραγωγής και είναι σημαντικά οικονομικότερο.
- Η **θερμοκρασία τήγματος** έχει την μεγαλύτερη με διαφορά συνεισφορά όσον αφορά την δύναμη σύσφιξης αλλά και το τελικό βάρος προϊόντος. Η συνεισφορά της ανέρχεται στα **81,69%** και στα **48,862%** αντίστοιχα ενώ το βέλτιστο επίπεδό της φαίνεται να είναι το τρίτο με τιμή **250°C**.
- Σε σύγκριση με τις άλλες τέσσερις παραμέτρους, ακολουθεί ο **χρόνος έγχυσης** ο οποίος παίζει σημαντικό ρόλο στην μείωση του «Clamping Force» με συνεισφορά **13,45%** και βέλτιστη τιμή **0,1sec**.

- Έπειτα, ο **χρόνος συμπίεσης** επηρεάζει σημαντικά τον παράγοντα «Total weight» με συνεισφορά **5,569%** και βέλτιστη τιμή **0,35sec**. Με μικρή διαφορά το τελικό βάρος επηρεάζεται με ποσοστό συνεισφοράς **4,646%** από την **μέγιστη πίεση συμπίεσης**.
- Ωστόσο, ο παράγοντας «**Max Injection Pressure**» στις τιμές που εξετάζεται δεν φαίνεται να ασκεί ιδιαίτερα σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα. Αυτό συμπεραίνεται αφού η συνεισφορά του είναι **2,246%** για το βάρος και **0,0016%** για την δύναμη σύσφιξης.
- Τα ελάχιστα σφάλματα σε κάθε ανάλυση ANOVA δείχνουν την ακρίβεια του σχεδιασμού Taguchi στον σχεδιασμό πειραμάτων που αναλύθηκε.

5.2. Μελλοντική εργασία

Στο μέλλον, αναμφίβολα θα μπορούσε να εξετασθεί η συμπεριφορά προϊόντος ίδιας λογής με διαφορετικές συνθήκες διεργασίας. Θα μπορούσε να διεξαχθεί μελέτη η οποία να περιλαμβάνει το πραγματικό σύστημα διανομής και ψύξης. Αυτό προϋποθέτει την εισαγωγή του 3D σχεδίου του καλουπιού στο λογισμικό ανάλυσης ροής. Θα ήταν χρήσιμο να αναλυθεί σε βάθος κάθε παράμετρος του συστήματος ψύξης μιας και αυτό επηρεάζει σημαντικά και αναπόφευκτα την γεωμετρία και τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος έγχυσης. Αυτό βέβαια θα επιφέρει αλλαγές στον σχεδιασμό των πειραμάτων καθώς θα είναι εφικτό να ληφθούν υπόψη παραπάνω παράγοντες ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της διεργασίας. Ωστόσο, ενδιαφέρον θα είχε να μελετηθεί και εκτενέστερα η επίδραση της ψύξης στην ογκομετρική συρρίκνωση του προϊόντος έγχυσης. Καθώς, με γνώμονα την περαιτέρω μείωση της επαγωγής των περιοχών συγκέντρωσης τάσεων εκτιμάται ότι θα μπορεί να μειωθεί ο ρυθμός συρρίκνωσης του τεμαχίου.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Volke and H.-P. Heim, “Evaluation of the injection molding process behavior during start-up and after parameter changes using dynamic time warping correspondences,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 95, pp. 183–203, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.03.076.
- [2] J. Gim and L.-S. Turng, “A review of current advancements in high surface quality injection molding: Measurement, influencing factors, prediction, and control,” *Polymer Testing*, vol. 115, p. 107718, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107718.
- [3] M. R. Khosravani, S. Nasiri, and T. Reinicke, “Intelligent knowledge-based system to improve injection molding process,” *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 25, p. 100275, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jii.2021.100275.
- [4] K. Maghsoudi, R. Jafari, G. Momen, and M. Farzaneh, “Micro-nanostructured polymer surfaces using injection molding: A review,” *Materials Today Communications*, vol. 13, pp. 126–143, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.mtcomm.2017.09.013.
- [5] F.-Y. Wu *et al.*, “Application of machine learning to reveal relationship between processing-structure-property for polypropylene injection molding,” *Polymer*, vol. 269, p. 125736, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.polymer.2023.125736.
- [6] D. Feldman, “Polymer History,” *Designed Monomers and Polymers*, vol. 11, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2008, doi: 10.1163/156855508X292383.
- [7] M. C. Hacker, J. Krieghoff, and A. G. Mikos, “Synthetic Polymers,” in *Principles of Regenerative Medicine*, Elsevier, 2019, pp. 559–590. doi: 10.1016/B978-0-12-809880-6.00033-3.
- [8] M. A. M. Amran, N. Idayu, K. M. Faizal, M. Sanusi, R. Izamshah, and M. Shahir, “Part weight verification between simulation and experiment of plastic part in injection moulding process,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 160, no. 1, p. 012016, Aug. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/160/1/012016.
- [9] A. Mourya, A. Nanda, K. Parashar, Sushant, and R. Kumar, “An explanatory study on defects in plastic molding parts caused by machine parameters in injection molding process,” *Materials Today: Proceedings*, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.070.
- [10] G. Trotta, S. Cacace, and Q. Semeraro, “Optimizing process parameters in micro injection moulding considering the part weight and probability of flash formation,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 79, pp. 250–258, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.04.048.
- [11] M. U. Rosli, C. Y. Khor, M. A. M. Nawawi, N. S. Mohamad, and M. S. Zakaria, “Minimizing Warpage and Shrinkage of Plastic Car Rear Bumper Fabrication via Simulation Based Optimisation,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2051, no. 1, p. 012012, Jul. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2051/1/012012.
- [12] Y. Liu, S. J. Li, Y. Li, and B. Wan, “Process Parameters Modeling and Optimizing for Compound Machining with Ultrasonic Vibration on SiC Wafer,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 217–219, pp. 1520–1525, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.1520.
- [13] “Research on a New Variotherm Injection Molding Technology and its Application on the Molding of a Large LCD Panel: Polymer-Plastics Technology and Engineering: Vol 48, No 7.” <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03602550902824549> (accessed Apr. 11, 2023).
- [14] N. M. Mehat and S. Kamaruddin, “Multi-Response Optimization of Injection Moulding Processing Parameters Using the Taguchi Method,” *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 50, no. 15, pp. 1519–1526, Nov. 2011, doi: 10.1080/03602559.2011.603776.

- [15] M. Ramesh and K. Panneerselvam, “Optimization for Injection Moulding process parameters towards Warpage and Shrinkage of HDPE-PBI composites,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1183, no. 1, p. 012001, Jun. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1183/1/012001.
- [16] N. M. Mehat, S. Kamaruddin, and A. R. Othman, “Modeling and Analysis of Injection Moulding Process Parameters for Plastic Gear Industry Application,” *ISRN Industrial Engineering*, vol. 2013, pp. 1–10, Jun. 2013, doi: 10.1155/2013/869736.
- [17] E. Oliaei *et al.*, “Warpage and Shrinkage Optimization of Injection-Molded Plastic Spoon Parts for Biodegradable Polymers Using Taguchi, ANOVA and Artificial Neural Network Methods,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 32, no. 8, pp. 710–720, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.jmst.2016.05.010.
- [18] C.-P. Chen, M.-T. Chuang, Y.-H. Hsiao, Y.-K. Yang, and C.-H. Tsai, “Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis,” *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 7, pp. 10752–10759, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2009.02.017.
- [19] P. Thakre, A. S. Chauhan, A. Satyanarayana, E. Raj Kumar, and R. Pradyumna, “Estimation of Shrinkage & Distortion in WaxInjection using Moldex3D Simulation,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 9, Part 3, pp. 19410–19417, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.301.
- [20] J. Volke, M. Reit, and H.-P. Heim, “Parameter recommendation for injection molding based on similarity analysis of injection molded parts,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 95, pp. 171–182, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.03.072.
- [21] J. Gim, H. Yang, and L.-S. Turng, “Transfer learning of machine learning models for multi-objective process optimization of a transferred mold to ensure efficient and robust injection molding of high surface quality parts,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 87, pp. 11–24, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.12.055.
- [22] C. Hamzaçebi, “Taguchi Method as a Robust Design Tool,” in *Quality Control - Intelligent Manufacturing, Robust Design and Charts*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.94908.
- [23] S. Rahimic, “Determination of the Influence of Parameters of Injection Molding Using the Taguchi Methods,” Jan. 2016, Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: https://www.academia.edu/84308788/Determination_of_the_Influence_of_Parameters_of_Injection_Molding_Using_the_Taguchi_Methods
- [24] R. K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*. Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- [25] J. Chen, Y. Cui, Y. Liu, and J. Cui, “Design and Parametric Optimization of the Injection Molding Process Using Statistical Analysis and Numerical Simulation,” *Processes*, vol. 11, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/pr11020414.