



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

***ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΓΙΑ  
ΔΟΧΕΙΟ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ***

Διπλωματική Εργασία

**Ηλιοπούλου Βασιλική**

Επιβλέπων Καθηγητής

**Γεώργιος Χριστόφορος Βοσνιάκος**

**ΑΘΗΝΑ, 2023**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια του προπτυχιακού κύκλου σπουδών από την φοιτήτρια Ηλιοπούλου Βασιλική, το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον επιβλέποντα της εργασίας και καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, κύριο Γεώργιο Χριστόφορο Βοσνιάκο, για την αμέριστη καθοδήγηση που μου παρείχε, αλλά και την υπομονή και κατανόηση που επέδειξε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η συνεργασία μαζί του μου επέτρεψε την απόκτηση νέων γνώσεων στον τομέα των κατεργασιών όπως και στην διαμόρφωση τρόπου σκέψης για την αντιμετώπιση των διαφόρων προβλημάτων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την εταιρεία Μπαζίγος και πιο συγκεκριμένα τους κυρίους Μάνο Μπαζίγο και Κυριάκο Παπαδάκη, οι οποίοι δέχτηκαν την πρόταση για συνεργασία και με την βοήθειά τους οριστικοποιήθηκε το θέμα της διπλωματικής. Επιπλέον, να ευχαριστήσω θερμά τους Ιωάννη Αδαμόπουλο και Λίνα Φουρική, καθώς συνέβαλαν ενεργά στην επίλυση αποριών και αντιμετώπιση οποιωνδήποτε προβλημάτων κατά την διεκπεραίωση της μελέτης. Η στήριξη και καθοδήγησή τους ήταν καταλυτική.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την συνάδελφο και μεταπτυχιακή φοιτήτρια Μέγκαν Ασένοβα, με την οποία συμβαδίσαμε κατά την εκπόνηση των εργασιών μας, για την υποστήριξη και την ανταλλαγή γνώσεων. Τέλος, να ευχαριστήσω από καρδιάς την φίλη μου Βασιλική Καλύβα που αποτέλεσε τον εξωτερικό παρατηρητή και κριτή κατά την συγγραφή και σύνταξη της παρούσας εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η χύτευση με έγχυση τεμαχίου, το οποίο κατασκευάζεται από πολυπροπυλένιο. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα δοχείο συσκευασίας τροφίμων. Η μελέτη πραγματοποιείται σε δύο κυρίως στάδια. Σε πρωταρχικό στάδιο, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με την βοήθεια του λογισμικού Moldex3D. Μελετώνται τα στάδια πλήρωσης και συμπίεσης, προκειμένου να διαπιστωθεί το μοτίβο πλήρωσης της κοιλότητας και να εντοπισθούν τυχόν ατέλειες ή ιδιαιτερότητες του τεμαχίου. Στο δεύτερο στάδιο, πραγματοποιούνται τρεις διαδοχικοί σχεδιασμοί πειραμάτων (*Taguchi DoE*), ώστε να εντοπισθούν οι παράγοντες της κατεργασίας με την μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό προϊόν, και να ρυθμιστούν τα επίπεδα αυτών για βελτιστοποιημένο αποτέλεσμα. Κατά τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων εξετάστηκαν επτά παράγοντες ελέγχου, ένας εκ των οποίων ήταν το υλικό. Επιλέχθηκαν τρία υλικά με διαφορετικά MFI προκειμένου να διαπιστωθεί η ευκολία πλήρωσης της κοιλότητας, ενώ παράλληλα τα επίπεδα των υπόλοιπων παραγόντων θερμοκρασίας, χρόνων και πιέσεων ρυθμίζονται κατάλληλα για την διερεύνηση των ορίων της κατεργασίας. Ως ποιοτικοί παράγοντες επιλέγονται το βάρος τεμαχίου, η δύναμη σύσφιξης και ένας «πλασματικός» παράγοντας που αφορά στην πρόωρη στερεοποίηση του υλικού κατά την συμπίεση. Στο επόμενο στάδιο, και αφού πρώτα έχει γίνει η επιλογή κατάλληλου υλικού, εξετάζονται οι τέσσερις σημαντικότεροι παράγοντες. Προστίθεται στο στάδιο αυτό ο ποιοτικός παράγοντας του χρόνου κύκλου έγχυσης. Καθότι, κρίνεται έντονη η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από την θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος, αποφασίστηκε να διεξαχθεί και ένας τρίτος σχεδιασμός πειραμάτων, με ίδιους παράγοντες ελέγχου και ποιότητας, με μειωμένο εξεταζόμενο θερμοκρασιακό εύρος. Στο στάδιο αυτό, ο πλασματικός ποιοτικός παράγοντας δεν εξετάζεται. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια: υπολογισμός των λόγων S/N και ανάλυση διακύμανσης (*ANOVA*). Τέλος, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας μέσω αντικειμενικής συνάρτησης.

## ABSTRACT

In the present diploma thesis the injection molding of a polypropylene (PP) part is studied. Specifically, this is a food packaging container. The study is conducted in two main stages. During the first stage, simulations are executed using Moldex3D software. The filling and packing stage are studied in order to establish the flow pattern inside the cavity and to identify any defects or part peculiarities. In the second stage, three successive designs of experiments (Taguchi DoE) are performed, so as to identify the control factors with the greatest effect on the final product and to adjust their levels for an optimized result. In the first design of experiments, seven control factors were considered, one of which was polymer material. Three materials with different MFIs were selected in order to investigate the ease of filling, while the levels of the remaining factors, such as temperature, time and pressure, are adjusted appropriately to explore the manufacturing process limits. Piece weight, clamping force and a fictitious factor related to premature solidification of the material during the packing stage are selected as quality factors. In the next stage, and after the selection of suitable material, the four most important factors are examined. At this stage, the injection cycle time is added as a quality factor. Since the dependence of the results on the melt temperature is strong, it was decided to conduct a third design of experiments, with the same control and quality factors, with a reduced temperature range. The fictitious quality factor is not examined at this point of the experimentation. The analysis of the results was performed in two steps: calculation of S/N ratios and analysis of variance (ANOVA). Finally, the optimization of the process parameters was carried out through an objective function.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ABSTRACT .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΧΥΤΕΥΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ .....	11
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	11
2.2. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ .....	11
2.2.1. Ρεολογικές Ιδιότητες .....	13
2.2.2. Θερμοπλαστικά .....	14
2.2.3. Θερμοσκληρυνόμενα Πλαστικά .....	15
2.2.4. Ελαστομερή .....	16
2.2.5. Ανακύκλωση Πλαστικών- Βιοδιασπώμενα Πλαστικά .....	17
2.3. ΚΥΚΛΟΣ ΕΓΧΥΣΗΣ .....	19
2.3.1. Φάση Πλαστικοποίησης Θερμοπλαστικών σε Μηχανή Έγχυσης .....	19
2.3.2. Φάση Έγχυσης Θερμοπλαστικού στο Καλούπι ( <i>Filling Stage</i> ) .....	20
2.3.2. Φάση Συμπίεσης ( <i>Packing Stage</i> ) .....	20
2.3.3. Φάση Ψύξης ( <i>Cooling Stage</i> ).....	21
2.3.4. Φάση Εξόλκευσης ( <i>Ejection</i> ) .....	21
2.4. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΓΧΥΣΗΣ.....	22
2.4.1. Μονάδα Παροχής Ενέργειας.....	23
2.4.2. Μονάδα Πλαστικοποίησης .....	23
2.4.3. Μονάδα Σύσφιξης Καλουπιού .....	26
2.4.4. Μονάδα Ελέγχου .....	27
2.5. ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΡΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ .....	27
2.5.1. Δίκτυο Διανομής Υλικού .....	28
2.5.2. Δίκτυο Ψύξης.....	31
2.5.3. Σύστημα Εξαέρωσης.....	33
2.5.4. Σύστημα Εξόλκευσης.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ .....	35
3.1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	35
3.2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ .....	36
3.2.1. Ελλιπής Πλήρωση ( <i>Short Shot</i> ).....	36
3.2.2. Βαθουλώματα ( <i>Sink Marks</i> ) .....	37

3.2.3. Γραμμές Συγκόλλησης ( <i>Weld Lines</i> ) .....	38
3.2.4. Στρέβλωση ( <i>Warpage</i> ) .....	39
3.2.5. Γραμμές Ροής ( <i>Flow Marks</i> ) .....	40
3.2.6. Φαινόμενο Πίδακα ( <i>Jetting</i> ).....	41
3.2.7. Εγκλωβισμένες Φυσαλίδες Αέρα- Σημάδια Καύσης ( <i>Air Traps- Burn Marks</i> ) .....	42
3.2.8. Προέκταμα ( <i>Flash</i> ).....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΣΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΡΟΗΣ .....	44
4.1. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MOLDEX3D .....	44
4.2. ΠΡΟΪΟΝ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ.....	44
4.3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	48
4.3.1. Προ-επεξεργασία .....	49
4.3.2. Διεργασία .....	52
4.3.3. Μετα-επεξεργασία .....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	74
5.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ- ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	74
5.1.1. Η Μέθοδος Taguchi.....	75
5.1.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων από Σχεδιασμό Πειραμάτων .....	76
5.2. ΠΡΩΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	79
5.2.1. Εκτέλεση Πειραμάτων Πρώτου Σχεδιασμού.....	81
5.2.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων Πρώτου Σχεδιασμού .....	82
5.3. ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	90
5.3.1. Εκτέλεση Δεύτερου Σχεδιασμού Πειραμάτων.....	93
5.3.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων Δεύτερου Σχεδιασμού Πειραμάτων .....	94
5.4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΣ ΤΡΙΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	101
5.4.1. Εκτέλεση Τρίτου Σχεδιασμού Πειραμάτων.....	102
5.4.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων Διερευνητικού Τρίτου Σχεδιασμού Πειραμάτων .....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ... ..	108
6.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ .....	108
6.2. ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ .....	108
6.2.1. Στάδιο Πλήρωσης.....	111
6.2.2. Στάδιο Συμπύεσης.....	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΝΟΨΗ .....	116
7.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	116
7.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....	116

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ..... 118



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν διάφορες βιβλιογραφικές πηγές, ανάλογα φυσικά με την θεματική ενότητα που εξεταζόταν. Αρχικά, για τη γενικότερη εξοικείωση με την κατεργασία της χύτευσης με έγχυση χρησιμοποιήθηκαν οι εξής πηγές:

[1] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering*, 9. ed., SI version. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.

[2] A. Whelan and J. P. Goff, *Injection molding of thermoplastics materials*. in v. 2: Pocket guides to plastics. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

[3] Δημήτρης Ι. Παντελής, *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*, 2nd ed. Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2008.

[4] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing engineering and technology*, Seventh edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.

[5] Jay Shoemaker, "Moldflow Design Guide- A Resource for plastic engineers." Moldflow Corporation, 2006.

[6] D. V. Rosato, D. V. Rosato, M. G. Rosato, and D. V. Rosato, Eds., *Injection molding handbook*, 3rd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.

[7] R. Brooks, "2.30 - Injection Molding Based Techniques," in *Comprehensive Composite Materials*, A. Kelly and C. Zweben, Eds., Oxford: Pergamon, 2000, pp. 999–1028. doi: 10.1016/B0-08-042993-9/00189-3.

[8] H. Rees, *Understanding injection mold design*. in Hanser understanding books. Munich: Hanser [u.a.], 2001.

[9] Bayer Material Science, "Part and Mold Design- A Design Guide." 2000.

[10] 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," *Mater. Today Proc.*, vol. 78, pp. 656–661, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.070.

Οι ίδιες βιβλιογραφικές πηγές χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη των πιθανών ελαττωμάτων που εμφανίζονται σε τεμάχια που παράγονται με αυτού του είδους την κατεργασία. Οι *Shenoy και Saini* [11] υπογράμμισαν την σημαντικότητα του Δείκτη ροής τήγματος (*MFI*) για την επιλογή κατάλληλου πολυμερούς υλικού, ενώ μελέτησαν την συσχέτιση του δείκτη αυτού με άλλες παραμέτρους της κατεργασίας.

Η μελέτη του Σχεδιασμού πειραμάτων (*DOE*) και πιο συγκεκριμένα των μεθόδων Taguchi και ANOVA στηρίχτηκε στις δύο εξής πηγές:

[12] P. J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*. New York: McGraw-Hill, 1988.

[13] R. K. Roy, *A primer on the Taguchi method*. Dearborn, Mich: Society of Manufacturing Engineers, 1990.

Επιπλέον, ο *Teklehaimanot S.* [14] πραγματοποίησε αναλύσεις έγχυσης, δηλαδή μελέτησε τις φάσεις πλήρωσης και συμπίεσης, για την οπτικοποίηση της ροής του υλικού και τον εντοπισμό τυχόν ελαττωμάτων, πρώτου προβεί στον σχεδιασμό του καλουπιού για το αντίστοιχο τεμάχιο. Ο *I. Σαπουνάς* [15] μελέτησε, με την βοήθεια λογισμικού προσομοίωσης, τις φάσεις πλήρωσης, συμπίεσης και ψύξης, προκειμένου να εντοπίσει πιθανά ελαττώματα και να καταστρώσει γενικές κατευθυντήριες οδηγίες για τους χειριστές των μηχανών. Οι *Chen C. P. et al.* [16] μελέτησαν την στρέβλωση λεπτότοιχου τεμαχίου με την βοήθεια CAE συστήματος. Με την μέθοδο Taguchi, σε συνδυασμό με πειραμάτα πραγματικού χρόνου, διαπίστωσαν ότι η θερμοκρασία τήγματος καθώς και η πίεση συμπίεσης είχαν την μεγαλύτερη επίδραση στην στρέβλωση του τεμαχίου. Οι *M. V. Kanade* και *S. D. Kadam* [17], χρησιμοποίησαν το βάρος τεμαχίου ως ποιοτικό παράγοντα για την μελέτη προϊόντος πολυπροπυλενίου. Παρατήρησαν ότι η θερμοκρασία του τήγματος στον κύλινδρο πλαστικοποίησης επηρεάζει έντονα τον ποιοτικό παράγοντα, με την πίεση πλήρωσης και την ταχύτητα πλήρωσης να ακολουθούν. Το βάρος τεμαχίου χρησιμοποιήθηκε και από τους *G. Trotta et al.* [18] σε συνδυασμό με την πιθανότητα εμφάνισης προεκτάματος για τον καθορισμό των παραμέτρων κατεργασίας σε τεμάχιο μικρο-χύτευσης με έγχυση. Τέλος, οι *Su Chi-Wei et al.* [19] εξέτασαν τρία δομικά υλικά πολυπροπυλενίου με διαφορετικό ιξώδες το καθένα αναφορικά με το βάρος τεμαχίου, προκειμένου να ευρεθεί το κατάλληλο «switch off point» και η βέλτιστη δύναμη σύσφιξης.

Καταληκτικά, να σημειωθεί ότι για την εκμάθηση του λογισμικού προσομοίωσης Moldex3D και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ο διαδικτυακός οδηγός ([Moldex3D Help 2021](#)).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΧΥΤΕΥΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ

### 2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σήμερα, είναι αδύνατον να φανταστεί κανείς έναν κόσμο χωρίς πλαστικά. Από τα πιο απλά οικιακά σκεύη, μέχρι την βιομηχανία, τα πλαστικά εξαρτήματα είναι πλέον αναπόσπαστο κομμάτι του ανθρώπινου πολιτισμού. Μερικές από τις κυριότερες μεθόδους μορφοποίησης των πλαστικών υλικών είναι η χύτευση με έγχυση (*injection molding*), η εκβολή (*extrusion*), η μορφοποίηση με εμφύσηση (*blow molding*) και η χύτευση με συμπίεση (*compression molding*). Από αυτές, η πιο διαδεδομένη για θερμοπλαστικά υλικά, χωρίς όμως να περιορίζεται μόνο σε αυτά, είναι η χύτευση με έγχυση.

Εξαρτήματα, τα οποία κατασκευάζονται με αυτού του είδους την κατεργασία κατακλύζουν τον σύγχρονο κόσμο, από την αυτοκινητοβιομηχανία μέχρι και την συσκευασία τροφίμων. Πρόκειται για μια κατεργασία ευέλικτη, η οποία πλεονεκτεί έναντι των κατεργασιών της ίδιας κατηγορίας. Καταρχάς, το τελικό προϊόν προκύπτει από την απευθείας χύτευση της πρώτης ύλης, τις περισσότερες φορές μάλιστα χωρίς ανάγκη για κάποια κατεργασία αποπεράτωσης. Σαν κατεργασία, είναι ιδανική για εξαρτήματα περίπλοκης γεωμετρίας με υψηλές διαστασιολογικές ανοχές που φτάνουν και την τάξη του εκατοστού του χιλιοστού. Ακόμη, χαρακτηρίζεται από την υψηλό ρυθμό παραγωγής, με χαμηλό κόστος μάλιστα, σε μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία παραγωγής. Για τα θερμοπλαστικά μάλιστα πολυμερή, τα οποία και στερεοποιούνται σχεδόν άμεσα μετά την απομάκρυνση του φορτίου, οι κύκλοι έγχυσης είναι πολύ σύντομοι, με τους συνηθέστερους να κυμαίνονται στα 10 με 30 (s) [1]. Ωστόσο, η κατασκευή των καλουπιών έγχυσης είναι κατά κύριο λόγο κοστοβόρα.

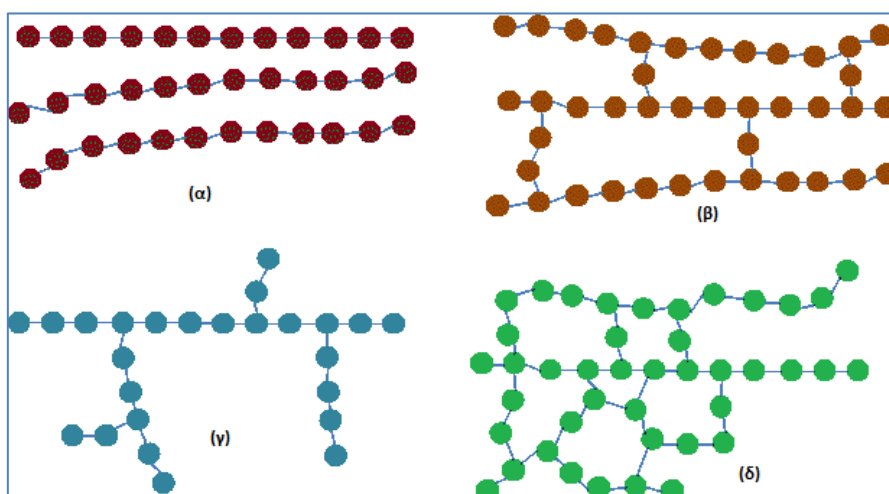
Εν συντομία, η διαδικασία της χύτευσης με έγχυση έχει ως εξής: κόκκοι πολυμερούς συμπιεζόμενοι θερμαίνονται μέχρι να τακούν. Στην συνέχεια, το τηγμένο υλικό εγχύεται σε καλούπι, το οποίο κρατείται κλειστό με την βοήθεια δεύτερης πίεσης. Το τηγμένο υλικό στερεοποιείται γρήγορα μετά από συγκεκριμένη περίοδο ψύξης, η μήτρα ανοίγει και το παραχθέν προϊόν εξέλκεται. Ως ξεχωριστά υποσυστήματα, τα οποία συμμετέχουν στην κατεργασία και θα μελετηθούν εκτενέστερα παρακάτω, σημειώνονται η μηχανή έγχυσης και το καλούπι ή αλλιώς μήτρα.

### 2.2. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ

Τα πολυμερή είναι συνυφασμένα με την έννοια της ζωής και της ανθρωπότητας. Αρκετές πρωτεΐνες και ένζυμα, όπως το άμυλο και η κυτταρίνη, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι διαφόρων βιολογικών και φυσιολογικών διεργασιών για τα φυτά και τα ζώα. Άλλα φυσικά πολυμερή, όπως είναι το ξύλο, το δέρμα και το μαλλί, έχουν χρησιμοποιηθεί από την απαρχή του ανθρώπινου πολιτισμού. Κατά τον τελευταίο μάλιστα αιώνα, στον τομέα της επιστήμης των υλικών έχει σημειωθεί

επανάσταση με τη παραγωγή συνθετικών πολυμερών. Έτσι, τα πολυμερή κατακλύζουν πλέον την ζωή ενός ανθρώπου, από τις πιο απλές καθημερινές χρήσεις, μέχρι τις πιο προηγμένες.

Τα πολυμερή είναι χημικές ενώσεις με μακρομοριακές αλυσίδες, οι οποίες σχηματίζονται μέσω της αντίδρασης του πολυμερισμού μονομερών. Ως μονομερές ορίζεται η μικρότερη δομική μονάδα, η οποία, κατά τον πολυμερισμό, συνδέεται με άλλα μονομερή με ομοιοπολικούς δεσμούς, δημιουργώντας κατά αυτόν τον τρόπο μια αλυσίδα πολυμερούς. Οι αλυσίδες αυτές δεν είναι απαραίτητα γραμμικές. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2- 1, λόγω των δεσμών άνθρακα-άνθρακα μπορεί να διακλαδώνονται, να διασταυρώνονται ή ακόμα και να δικτυώνονται. Οι αλυσίδες πολυμερών με την σειρά τους συνδέονται μεταξύ τους με δευτερεύοντες δεσμούς. Συχνά ο όρος «πολυμερές» χρησιμοποιείται ως συνώνυμος με τον όρο «πλαστικό». Ωστόσο, αν και όλα τα πλαστικά είναι πολυμερή, δεν ισχύει και το αντίστροφο [2]. Ο όρος πλαστικά αφορά σε υλικά τα οποία έχουν την ικανότητα να διαμορφώνονται με διάφορες κατεργασίες και να σχηματοποιούνται σε περίπλοκες γεωμετρίες με σχετική ευκολία.



Εικόνα 2- 1: Δομές πολυμερικών αλυσίδων: (α) Γραμμική δομή, (β) Διασταυρούμενη δομή, (γ) Διακλαδωμένη δομή, (δ) Δομή δικτύου.

Στην πραγματικότητα, πρόκειται για μια κατηγορία υλικών με μεγάλη γκάμα μηχανικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων. Για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες πτυχές της βιομηχανίας· από αντικείμενα που συναντά κανείς στην καθημερινότητα του, όπως παιχνίδια, δοχεία τροφίμων, χτένες και είδη συσκευασίας, μέχρι και σε ιατρικές συσκευές και εξαρτήματα για αεροσκάφη. Μάλιστα, η ικανότητα των πολυμερών να αναμειγνύονται με πρόσθετα και να βελτιώνουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους τα κάνει ανταγωνιστικά έναντι των μετάλλων. Για τον λόγο αυτό, υπάρχει έντονη τάση αντικατάστασης των δεύτερων από τα πρώτα σε πολλούς τομείς εφαρμογών, όπως εξαρτήματα αυτοκινήτων, πολιτικών και στρατιωτικών αεροσκαφών και σκεύη γενικής χρήσης. Τα πρόσθετα

(*additives*) που χρησιμοποιούνται για να τροποποιηθούν οι δομές των υλικών μπορεί να είναι πλαστικοποιητές (*plasticizers*), χρωστικές ουσίες (*colorants*) και υλικά πλήρωσης (*fillers*).

Οι ιδιότητες των πολυμερών είναι συνάρτηση αρκετών μεταβλητών. Σημαντικό ρόλο παίζει το μοριακό τους βάρος, η δομή, το σχήμα και το μέγεθος των μορίων τους, όπως επίσης και η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Ως θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ορίζεται η θερμοκρασία στην οποία συμβαίνει η μετάβαση από την υγρή φάση στην άμορφη στερεή [3]. Είναι γενικά υλικά με χαμηλή πυκνότητα και ικανοποιητική αντίσταση σε διάβρωση. Εμφανίζουν χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, ωστόσο έχουν υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος. Επιπλέον είναι διαθέσιμα σε μεγάλη ποικιλία χρωμάτων και διαφανειών. Ωστόσο, χαρακτηρίζονται από ευφλεκτότητα και δυσκαμψία. Με την χρήση όμως των κατάλληλων προσθέτων, ιδιότητες όπως η ευκαμψία, η αντοχή και η σκληρότητα, μπορούν να βελτιωθούν. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που εμφανίζουν είναι ότι πρόκειται για υλικά με χαμηλό κόστος, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σχεδιαστικώς πολύπλοκα προϊόντα, δίχως την ανάγκη επιφανειακών κατεργασιών αποπεράτωσης.

Τα πολυμερή χωρίζονται σε τρεις κύριες ομάδες: τα θερμοπλαστικά (*thermoplastics*), τα θερμοσκληρυνόμενα (*thermosets*) και τα ελαστομερή (*elastomers*). Βέβαια, ο διαχωρισμός αυτός δεν είναι πάντα εύκολος και σαφής. Οι δομές των υλικών μπορούν να τροποποιηθούν με διάφορα μέσα και έτσι τα πολυμερή μπορούν να μεταπέσουν σε άλλη κατηγορία [2].

### 2.2.1. Ρεολογικές Ιδιότητες

Ένας από τους σημαντικότερους τρόπους έκφρασης των ρεολογικών χαρακτηριστικών των πολυμερών, όπως η ιξωδοελαστικότητα (*viscoelasticity*), είναι ο δείκτης ροής τήγματος. Ως δείκτης ροής τήγματος, ο οποίος συμβολίζεται εν συντομία από τα αρχικά της αγγλικής ορολογίας «MFI» (*Melt Flow Index*), ορίζεται η μάζα του πολυμερούς τήγματος, μετρημένη σε γραμμάρια, που ρέει μέσω τυπικής τριχοειδούς μήτρας κάθε δέκα λεπτά.

Η ιδιότητα της ιξωδοελαστικότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική για το στάδιο της πλήρωσης, καθότι στην ουσία εκφράζει την άνεση με την οποία οι αλυσίδες κινούνται υπό την άσκηση εξωτερικού φορτίου. Με ένα λογικό άλμα, υποδεικνύει και την ευκολία με την οποία πληρώνεται η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού. Γενικά, υλικά με μεγαλύτερο MFI χυτεύονται ευκολότερα σε τυπική μηχανή έγχυσης οριζόντιου τύπου. Μάλιστα, η απαιτούμενη ενέργεια για την έγχυση μειώνεται, καθώς εντοπίζεται μικρότερη πτώση πίεσης στο δίκτυο διανομής και άρα μεγαλύτερες πιέσεις εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Αντίθετα, για υλικά με μικρότερο MFI απαιτούνται μεγαλύτερες πιέσεις έγχυσης ή μεγαλύτερης διαμέτρου πύλες προκειμένου να ξεπεραστεί η δυσκολία πλήρωσης [11]. Κάτι

τέτοιο ωστόσο μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση του υλικού και στην εμφάνιση ελαττωμάτων στο προϊόν.

### 2.2.2. Θερμοπλαστικά

Ως θερμοπλαστικά ορίζονται τα υλικά που επιδεικνύουν μια πολύ χαρακτηριστική συμπεριφορά. Θερμαινόμενα, πάνω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, μαλακώνουν και διαμορφώνονται εύκολα, ενώ όταν ψύχονται, επανέρχονται στην αρχική τους σκληρότητα. Η κατεργασία αυτή είναι αντιστρέψιμη, μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές και είναι αυτή που ξεχωρίζει τα θερμοπλαστικά από τα υπόλοιπα υλικά. Στην πραγματικότητα, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, οι δευτερεύοντες δεσμοί χαλαρώνουν, επιτρέποντας κατά αυτόν τον τρόπο την σχετική κίνηση των γειτονικών αλυσίδων υπό την εφαρμογή τάσης. Σημαντικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την συμπεριφορά τους είναι η δομή και η σύστασή τους, καθώς ακόμη, όπως είναι φυσικό, η θερμοκρασία και ο ρυθμός παραμόρφωσης. Κοινά παραδείγματα θερμοπλαστικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2- 1 και είναι το πολυπροπυλένιο (PP), τα πολυαμίδια (Nylon) και το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC).

Πίνακας 2- 1: Τα κυριότερα θερμοπλαστικά και οι χρήσεις τους, [3]

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΜΟΝΟΜΕΡΕΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ-ΧΡΗΣΕΙΣ
Πολυαιθυλένιο (PE)	-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -	Σωλήνες, φιάλες, ηλεκτρικές μονώσεις, κύπελλα, συσκευασία.
Πολυπροπυλένιο (PP)	-C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> -	Ίδιες εφαρμογές με PE, αλλά ελαφρύτερο, στιβαρότερο και ανθεκτικότερο στην ηλιακή ακτινοβολία.
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE)	-C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> -	Teflon: καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλό συντελεστή τριβής. Αντικολλητικές επενδύσεις τηγανιών, σφραγίδες.
Πολυστυρένιο (PS)	-C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> -	Φθηνά προϊόντα χύτευσης. Μορφοποιείται και σε αφρώδες πολυμερές για υλικά συσκευασίας.
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	-C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl-	Πλαίσια παραθύρων, απομιμήσεις δέρματος για ενδύματα
Nylon 6.6	-C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -	Άριστη εγχυτότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες, διαστασιακή σταθερότητα από αέρια και ατμούς, αργή καύση και αυτόσβεση. Διακόπτες, μπρίζες, μελανοταινίες, χειρουργικά νήματα, συνθετικές υφάνσιμες ίνες.
Nylon 6	-C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NO-	
Nylon 610	-C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -	
Nylon 11	-C <sub>11</sub> H <sub>21</sub> NO-	

#### 2.2.2.1. Πολυπροπυλένιο (PP)

Το πολυπροπυλένιο (PP) ανήκει στην κατηγορία των θερμοπλαστικών πολυμερών και έχει ως δομική μονάδα το προπυλένιο. Πρόκειται για ένα ελαφρύ υλικό, με πυκνότητα 0.9 (g/cm<sup>3</sup>) και το φυσικό του χρώμα είναι ημιδιαφανές (ιβουάρ λευκό). Χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα και θερμική αντίσταση, καλή ακαμψία και εντυπωσιακή χημική αντοχή σε διάφορα χημικά διαλυτικά. Καθίσταται λοιπόν υλικό κατάλληλο για μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών συμπεριλαμβανομένων των εξαρτημάτων αυτοκινήτων, συσκευασία, λαβές εργαλείων και οικιακά αντικείμενα.

Παρόλη την υψηλή του ακαμψία, το πολυπροπυλένιο είναι επιρρεπές στον ερπυσμό και επομένως ακατάλληλο για εφαρμογές με υψηλές καταπονήσεις για μεγάλα διαστήματα. Με την προσθήκη ινών γυαλιού ή (και) υλικών πλήρωσης, οι ιδιότητες του αυτές μπορούν να τροποποιηθούν έντονα.

Ακόμη, χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλό ποσοστό συρρίκνωσης (1.8%), το οποίο μπορεί να αγγίξει και το 2.5 % για παχύτερα τμήματα [2]. Τέλος, η θερμοκρασία τήγματος συνίσταται να διατηρείται ανάμεσα στους 220-275 °C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η ιξωδοελαστικότητα αλλάζει δραματικά και μπορεί να σημειωθεί οξείδωση του υλικού. Για τον λόγο αυτό άλλωστε, όλα τα εμπορικά διαθέσιμα πολυπροπυλένια περιέχουν θερμοσταθεροποιητές (*thermostabilizers*).

Για τεμάχια που κατασκευάζονται από πολυπροπυλένιο, η θερμοκρασία του καλουπιού συνήθως κυμαίνεται στους 40 (°C) με 80 (°C), ενώ για λεπτότοιχα τεμάχια, που απαιτούν και μικρότερους χρόνους ψύξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και καλούπια με μικρότερη μέση θερμοκρασία.

### **2.2.3. Θερμοσκληρυνόμενα Πλαστικά**

Θερμοσκληρυνόμενα είναι τα πλαστικά εκείνα τα οποία εφόσον δομηθούν με την αντίδραση του πολυμερισμού, δεν επιδέχονται περαιτέρω επεξεργασία με άσκηση πίεσης ή πρόσδοση θερμότητας. Αυτό συμβαίνει διότι η συγκεκριμένη κατηγορία πολυμερών χαρακτηρίζεται από μια τρισδιάστατη, διασταυρούμενη δομή, με ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ των αλυσίδων του. Η δομή τους αυτή «κλειδώνει», απαγορεύοντας την σχετική κίνηση μεταξύ των μορίων του υλικού.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά δεν έχουν συγκεκριμένη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και λόγω της φύσης των δεσμών τους δεν επηρεάζονται από την θερμοκρασία και τον ρυθμό παραμόρφωσης. Μόνο η αύξηση της θερμοκρασίας σε εξαιρετικά υψηλές τιμές, μπορεί να καταπονήσει ένα θερμοσκληρυνόμενο πλαστικό, το οποίο και αρχίζει να αποσυντίθεται. Γενικά τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά εμφανίζουν καλύτερες ιδιότητες από τα θερμοπλαστικά. Ενδεικτικά παραδείγματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2- 2 και είναι οι σιλικόνες, οι εποξειδικές ρητίνες και οι πολυεστέρες.

Πίνακας 2- 2: Τα κυριότερα θερμοσκληρυνόμενα και οι χρήσεις τους, [3]

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ-ΧΡΗΣΕΙΣ
<i>Εποξειδική ρητίνη</i>	Μήτρα σύνθετων υλικών. Συστατικό για κόλλες. Ακριβό υλικό.
<i>Πολυεστέρας</i>	Μορφοποιείται εύκολα. Σύνθετα υλικά, κόλλες. Είναι φθηνότερο της εποξειδικής ρητίνης.
<i>Φαινοπλάστες ή βακελίτες</i>	Έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, διαστασιολογική σταθερότητα. Κατασκευή δαπέδων αντοχής, ηλεκτρολογικές εφαρμογές, κατασκευή αφρωδών πολυμερών και του βασικού υποστρώματος διακοσμητικών φύλλων Formica.
<i>Πολυμερές ουρίας ή πολυμερές μελαμίνης</i>	Υστερούν σε μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τους φαινοπλάστες, όμως υπερτερούν σε διαφάνεια. Κατασκευή επιτραπέζιων ειδών, παραγωγή συγκολλητικών και υλικών προστατευτικών επικαλύψεων.

#### 2.2.4. Ελαστομερή

Τα ελαστομερή είναι άμορφα πολυμερή με χαρακτηριστική ικανότητα να υπόκεινται σε μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις χωρίς θραύση. Είναι συνήθως μαλακά με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και χαμηλή θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Τα ελαστομερή έχουν την δυνατότητα να ανακτούν το σχήμα και το μέγεθός τους σε μεγάλο βαθμό αφού αποφορτιστούν. Τα ελαστομερή χαρακτηρίζονται από μια άμορφη διευθέτηση των πολυμερικών αλυσίδων του και τα οποία υπό έκταση εμφανίζουν «βοστρυχωτή» δομή. Αυτό σημαίνει ότι στην πραγματικότητα, με την εφαρμογή φορτίων τα ελαστομερή δεν παραμορφώνονται παρά μόνο τα μόρια τους ακολουθούν διαφορετικό προσανατολισμό. Οι μακριές πολυμερικές αλυσίδες ξεδιπλώνονται γύρω από τους δεσμούς άνθρακα-άνθρακα, ωστόσο η προτίμησή τους σε μια άτακτη, χωρίς προσανατολισμό, δομή επανέρχεται με την απομάκρυνση του φορτίου [2]. Οι κυριότεροι εκπρόσωποι αυτής της κατηγορίας παρατίθενται στον Πίνακας 2- 3.

Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό των ελαστομερών είναι οι απώλειες υστέρησης υπό έκταση ή θλίψη [4]. Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει στα ελαστομερή την δυνατότητα να καταναλώνουν ενέργεια και να απορροφούν αιφνίδιες φορτίσεις και την ενέργεια κραδασμών, κάτι που τα καθιστά εξαιρετικά υλικά για ελαστικά αυτοκινήτων, φλάντζες και είδη υπόδησης.



Πίνακας 2- 3: Τα κυριότερα ελαστομερή και οι χρήσεις τους, [3]

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΜΟΝΟΜΕΡΕΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ-ΧΡΗΣΕΙΣ
Πολυϊσοπρένιο	-C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> -	Φυσικό ελαστικό
Πολυβουταδιένιο	-C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> -	Συνθετικό ελαστικό με εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία.
Πολυχλωροπένιο	-C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> Cl-	Ελαστικό ανθεκτικό σε έλαια. Κατασκευή σφραγίδων.
Πολυϊσοβουτυλένιο	-C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> -	Κατασκευή σωλήνων, μονωτικών και επιστρωμάτων.
Πολυσιλοξάνια ή σιλικόνες	-Si(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O-	Κατασκευή πωμάτων και δακτυλίων σε συστήματα κυκλοφορίας θερμού αέρα, στεγανό κλείσιμο θυρών και παραθύρων. Μόνωση ηλεκτρικών καλωδίων σε πλοία.

### 2.2.5. Ανακύκλωση Πλαστικών- Βιοδιασπώμενα Πλαστικά

Τα πλαστικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χαρακτηρίζονται από υψηλή χημική και βιολογική αδράνεια, και σε συνδυασμό φυσικά με τα λοιπά μηχανικά χαρακτηριστικά και το χαμηλό κόστος τους είναι οι λόγοι που κατακλύζουν την βιομηχανία σήμερα. Ωστόσο, εξαιτίας της αδράνειάς τους, ανεγείρονται διάφορα περιβαλλοντικά ζητήματα αναφορικά με την απόρριψή τους. Τα πλαστικά απορρίμματα αντιπροσωπεύουν περίπου το 16% των στερεών αστικών λυμάτων, ενώ αντιστοιχούν στο 50-80% των λυμάτων που ρυπαίνουν το θαλάσσιο και υδάτινο περιβάλλον [4]. Να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των πλαστικών υλικών προέρχεται από μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους, επομένως δεν είναι βιοδιασπώμενα, ενώ η ανακύκλωση τους είναι αρκετά δύσκολη. Ως βιοδιασπώμενα υλικά ορίζονται εκείνα που αποσυντίθεται υπό την επίδραση της μικροβιακής χλωρίδα του περιβάλλοντος, χωρίς τοξικά υποπροϊόντα. Η ανάγκη για ανάπτυξη πλήρως βιοδιασπώμενων υλικών είναι μεγάλη και η έρευνα στον τομέα αυτό διαρκής.

Από την άλλη, πραγματοποιείται μια τεράστια παγκόσμια προσπάθεια για συλλογή και επαναχρησιμοποίηση πλαστικών υλικών. Η ανακύκλωση των πλαστικών υλικών περιλαμβάνει την εκ νέου τήξη τους, ανάμειξή τους και μορφοποίηση σε νέα προϊόντα. Τα πλαστικά που διαθέτουν την ικανότητα αυτή, φέρουν το σύμβολο ανακύκλωσης της Εικόνα 2- 2. Ο αριθμός στον κέντρο του τριγώνου αντιστοιχεί σε ένα σύστημα τυποποίησης που αναπτύχθηκε το 1988. Στον Πίνακα 2- 4 παρουσιάζονται μερικά από τα ανακυκλώσιμα υλικά με τον αντίστοιχο αριθμό τυποποίησης, καθώς επίσης και πιθανές χρήσεις τους ως παρθενικά και ανακυκλώσιμα υλικά.



Εικόνα 2- 2: Σύμβολο ανακύκλωσης

Πίνακας 2- 4: Αριθμός τυποποίησης μερικών πλαστικών υλικών και χρήσεις τους

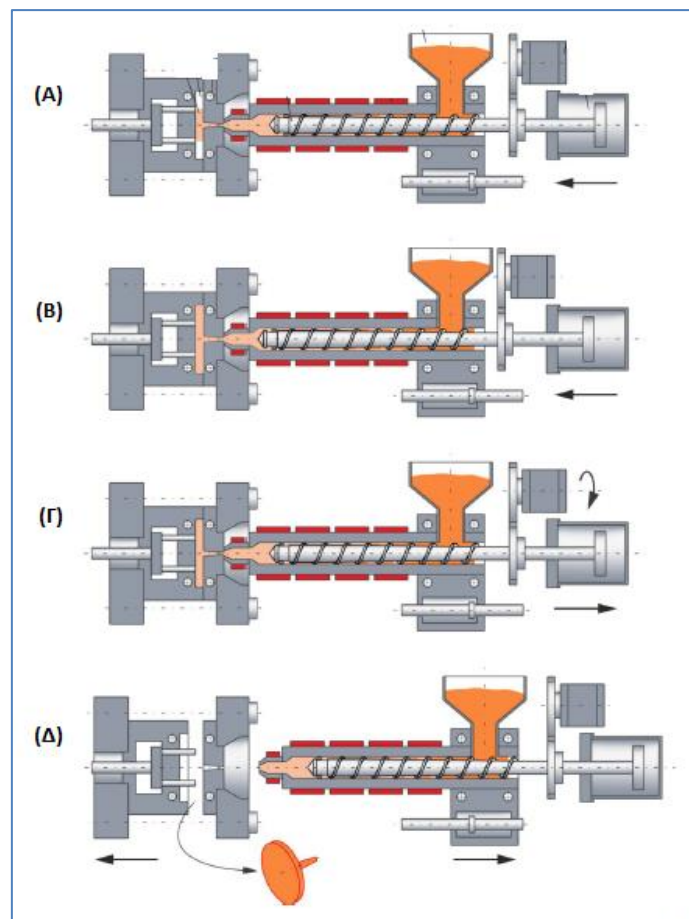
ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΠΑΡΘΕΝΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ	ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΙΜΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ
1	Πολυ(τερεφθαλικό εστέρα αιθυλενίου) (PET/PETE)	Δοχεία υγρών, βάζα για φυστικοβούτυρο και σάλτσες	Πληρωτικό ινών για παλτά, ζώνες, ιστιοσανίδες, βούρτσες, μπάλες τένις, δοχεία αναψυκτικών, φιλμ, σκι, χαλιά, βάρκες
2	Υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE)	Δοχεία νερού, γάλατος και υγρών απορρυπαντικών, παιχνίδια	Γλάστρες, υδρορροές, πινακίδες, καθίσματα σταδίων, σκουπιδοτενεκέδες, κώνου σήμανσης, δοχεία απορρυπαντικών
3	Πολυβινυλοχλωρίδιο (V)	Συσκευασίες τροφίμων, μπουκάλια σαμπουάν	Δάπεδα, σωλήνες, μάνικες
4	Χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (LDPE)	Τσάντες συσκευασίας ψωμιού, συσκευασίες κατεψυγμένων προϊόντων	Τσάντες συσκευασίας λαχανικών, τσάντες πολλαπλών χρήσεων
5	Πολυπροπυλένιο (PP)	Δοχεία γιαουρτιού, μπουκάλια φαρμάκων	Σκάλες υπονόμου, κουβάδες, μηχανή κουρέματος γκαζόν, τμήματα μπαταρίας αυτοκινήτου
6	Πολυστυρόλιο (PS)	Συσκευασία βιντεοκασέτας, μαχαιροπίρουνα, συσκευασία έτοιμου φαγητού	Πινακίδες αυτοκινήτων, συστήματα αποχέτευσης, αντικείμενα γραφείου

### 2.3. ΚΥΚΛΟΣ ΕΓΧΥΣΗΣ

Με τον όρο κύκλος έγχυσης (*injection cycle*) νοείται το σύνολο των φάσεων της χύτευσης με έγχυση για την κατασκευή ενός εξαρτήματος. Οι φάσεις αυτές απαρτίζουν μια συνεχόμενη ακολουθία, η οποία και επαναλαμβάνεται. Ο χρόνος ενός κύκλου έγχυσης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως και μερικά λεπτά και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση, όπου κάθε χρονικός όρος αντιστοιχεί και σε ένα από τα στάδια του κύκλου.

$$t_{total} = t_f + t_p + t_c + t_{m.o.}$$

Πάντως, ανεξαρτήτως του ολικού χρόνου και της πολυπλοκότητας του τεμαχίου, ο κύκλος έγχυσης αποτελείται από πέντε κυρίως στάδια, εκ των οποίων το ένα λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με τα άλλα, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 2- 3. Από τα πέντε αυτά στάδια, το πρώτο στάδιο αφορά τη μηχανή έγχυσης και δεν λαμβάνεται υπόψιν στον τελικό χρόνο κύκλου, ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα στάδια αφορούν το καλούπι.



Εικόνα 2- 3: Στάδια κύκλου έγχυσης (α) πλήρωση, (β) συμπίεση, (γ) ψύξη, (δ) εξόλκευση

#### 2.3.1. Φάση Πλαστικοποίησης Θερμοπλαστικών σε Μηχανή Έγχυσης

Σε αυτή την πρώτη φάση, υλικό τροφοδοτείται από την χοάνη τροφοδοσίας στον κύλινδρο πλαστικοποίησης. Εκεί, το υλικό θερμαίνεται πάνω από την θερμοκρασία

υαλώδους μετάπτωσης και ομογενοποιείται. Η τηγμένη μάζα πολυμερούς προωθείται με την βοήθεια κατάλληλων συστημάτων (εμβόλου ή περιστρεφόμενου κοχλία παλινδρομικής κίνησης) στο κανάλι πλήρωσης. Όταν συσσωρευτεί κατάλληλη ποσότητα, το υλικό εγχύεται μέσω ακροφυσίου στο καλούπι.

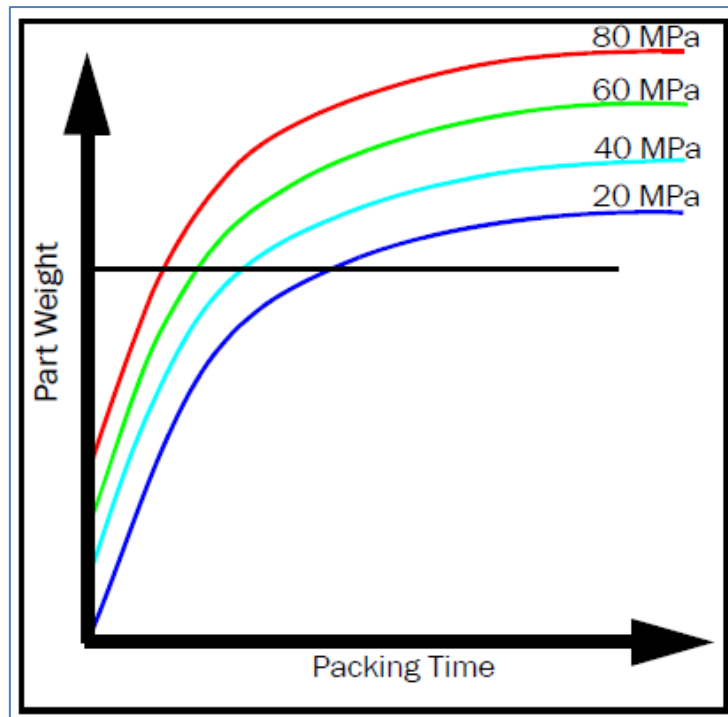
### **2.3.2. Φάση Έγχυσης Θερμοπλαστικού στο Καλούπι (*Filling Stage*)**

Η μήτρα κλείνει με την επενέργεια του κλειστικού και η τηγμένη μάζα διοχετεύεται από το ακροφύσιο (*nozzle*) στο καλούπι. Μέσω κατάλληλα σχεδιασμένου δικτύου διανομής, το υλικό ωθείται στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης. Προκειμένου να γεμίσουν πολύπλοκες γεωμετρίες, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο πράγματα. Το χρονικό διάστημα που διαρκεί η φάση έγχυσης πρέπει να είναι κατάλληλο ώστε η κοιλότητα να πληρωθεί επαρκώς, αλλά και το υλικό να μην αρχίσει να στερεοποιείται. Επίσης, είναι σαφές ότι οι πιέσεις που απαιτούνται για το γέμισμα του καλουπιού είναι μεγάλες, με τα υψηλότερα επίπεδα να εντοπίζονται κατά το πέρας της φάσης αυτής (αφού δηλαδή έχει γεμίσει το καλούπι) και μπορούν να φτάσουν και την τάξη των 200 (MPa). Επομένως, προς αποφυγή υπερφόρτωσης της μηχανής και του καλουπιού οι πιέσεις οφείλονται να έχουν προκαθοριστεί πλήρως κατά την φάση σχεδιασμού της κατεργασίας.

### **2.3.2. Φάση Συμπίεσης (*Packing Stage*)**

Καθώς το υλικό αρχίζει να στερεοποιείται, αρχίζοντας από τα τοιχώματα της κοιλότητας, η μάζα του διαμορφωμένου τεμαχίου συρρικνώνεται. Προκειμένου να επιτευχθούν οι διαστασιολογικές απαιτήσεις και να αντισταθμιστεί η ογκομετρική συρρίκνωση (*volumetric shrinkage*) και στρέβλωση (*warpage*), κρίνεται απαραίτητη η άσκηση πίεσης για την συμπλήρωση της κοιλότητας με νέο υλικό. Η πίεση αυτή ονομάζεται μεταγενέστερα πίεση και είναι μικρότερη από την πίεση έγχυσης, το δε χρονικό σημείο εναλλαγής των δύο πιέσεων ονομάζεται «switch off point». Κατά την φάση του «σιδερώματος», η μεταφορά πολυμερούς τήγματος πραγματοποιείται με μικρότερο ρυθμό και υπό σταθερή πίεση, έως ότου οι πύλες εισόδου φράξουν από στερεοποιημένο υλικό. Είναι δε σημαντικό η μεταγενέστερα πίεση να μηδενίζεται όταν παύει να έχει αξιοσημείωτη επίδραση σε αυτή την φάση της κατεργασίας, προκειμένου να μειωθούν οι παραμένουσες τάσεις στο προϊόν.

Συνήθως, η επίτευξη ενός συγκεκριμένου βάρους τεμαχίου για μειωμένο χρόνο συμπίεσης, απαιτεί και αύξηση της πίεσης συμπίεσης, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το διάγραμμα της Εικόνα 2- 4.



Εικόνα 2- 4: Βάρος Τεμαχίου συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης για διάφορες πιέσεις συμπίεσης, [5]

### 2.3.3. Φάση Ψύξης (*Cooling Stage*)

Το πολυμερές τήγμα αρχίζει να ψύχεται, ενώ η στερεοποίηση του στα τοιχώματα της κοιλότητας και στο δίκτυο διανομής έχει ήδη αρχίσει από το προηγούμενο στάδιο, ενώ το ακροφύσιο έχει αποσυνδεθεί. Το χρονικό διάστημα για το οποίο θα διαρκέσει η ψύξη πρέπει να είναι επαρκές, ώστε να αποφευχθεί η διαρροή υλικού προς το στόμιο έγχυσης. Επιπροσθέτως, η θερμοκρασία του πολυμερούς πρέπει να πέσει κάτω από τα επίπεδα της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς με αυτό τον τρόπο μειώνεται η στρέβλωση και η συρρίκνωση του παραχθέντος τεμαχίου.

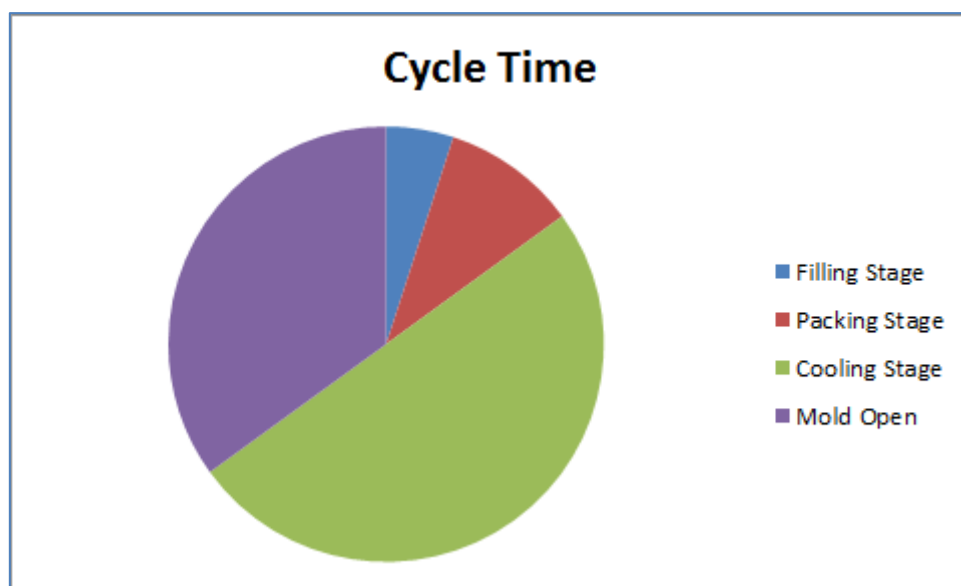
Παράλληλα με την φάση της ψύξης, στον κύλινδρο της μηχανής έγχυσης αρχίζει να επαναλαμβάνεται η πρώτη φάση πλαστικοποίησης του υλικού για την επόμενη επανάληψη του κύκλου.

### 2.3.4. Φάση Εξόλκευσης (*Ejection*)

Μετά το πέρας του σταδίου ψύξης, η δύναμη σύσφιξης που διατηρεί το καλούπι κλειστό εκτονώνεται. Έτσι, το κινητό τμήμα της μήτρας υποχωρεί μέχρι την ακραία θέση και το παραχθέν τεμάχιο εξέλκεται. Για αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής, ρομποτικοί βραχίονες απομακρύνουν το προϊόν και το καλούπι κλείνει, σηματοδοτώντας την εκ νέου έναρξη του κύκλου έγχυσης. Καθώς το εξάρτημα έχει υποστεί ογκομετρική συρρίκνωση, βρίσκεται προσκολλημένο στα τοιχώματα του πυρήνα του καλουπιού. Για τον λόγο αυτό, η αποκόλληση του πραγματοποιείται μέσω της δύναμης που ασκεί το εκάστοτε σύστημα εξόλκευσης. Συχνά, ο χρονικός όρος που αντιστοιχεί στο διάστημα της εξόλκευσης γενικεύεται στο χρονικό

διάστημα που το καλούπι παραμένει ανοιχτό, δηλαδή συμπεριλαμβάνει και τον απαραίτητο χρόνο για το άνοιγμα και κλείσιμο του καλουπιού.

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα προκύπτει η Εικόνα 2- 5, στην οποία παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες συμβολές των σταδίων έγχυσης στον συνολικό κύκλο έγχυσης.

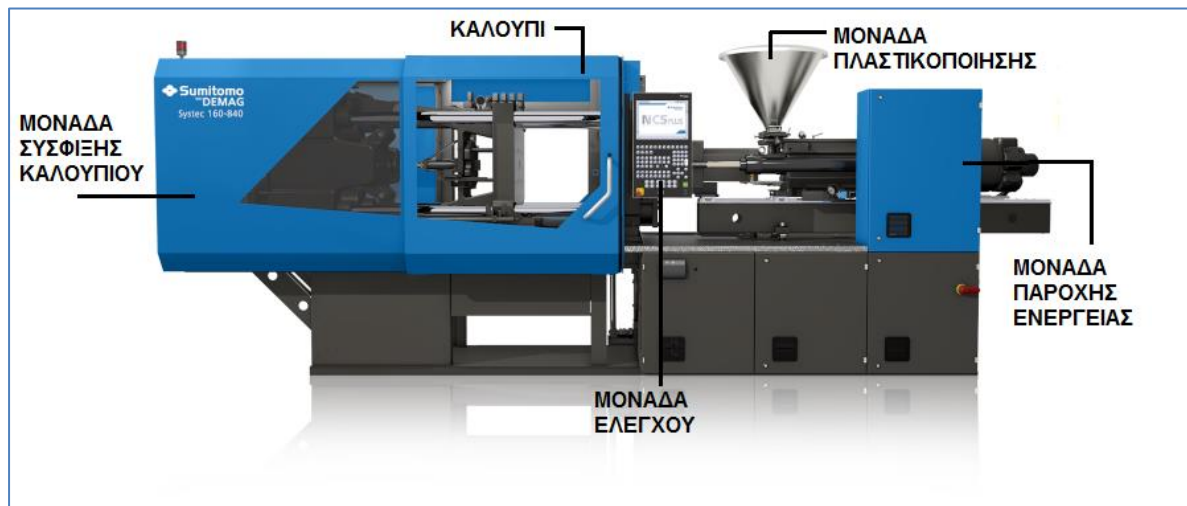


Εικόνα 2- 5: Κύκλος έγχυσης-Ποσοστιαία συνεισφορά επιμέρους φάσεων

## 2.4. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΓΧΥΣΗΣ

Ως μηχανή έγχυσης (*Injection Molding Machine- IMM*) νοείται όλος ο τεχνολογικός εκείνος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την κατασκευή προϊόντων με την κατεργασία της χύτευσης με έγχυση. Οι μηχανές έγχυσης είναι κατάλληλες για την εκτέλεση ευέλικτων εργασιών και συνήθως είναι εφοδιασμένες με μικροεπεξεργαστές, ώστε να υπάρχει, καθ' όλη την διάρκεια της χύτευσης, πλήρης εποπτεία επί των παραμέτρων κατεργασίας. Είναι συνήθως οριζόντιου τύπου κατακόρυφες μηχανές χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μικρών τεμαχίων με μικρές ανοχές [4]. Το είδος και το μέγεθος της μηχανής έγχυσης που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από το προϊόν και το κόστος παραγωγής και συνδέεται με δύο κυρίως μεγέθη: τον όγκο της πλαστικοποιημένης μάζας και την αναγκαία δύναμη σύσφιξης. Οι πρωταρχικές απαιτήσεις της μηχανής έγχυσης καθορίζονται από όλες τις διαστασιολογικές ανάγκες του προϊόντος, τον αριθμό των παραγόμενων τεμαχίων ανά κύκλο έγχυσης, δηλαδή τον αριθμό κοιλοτήτων του καλουπιού και τις διαστασιολογικές απαιτήσεις του καλουπιού. Ακόμη, αν και εφόσον λαμβάνει χώρα, το ύψος του στοιβάγματος (*stack height*) θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή μηχανής [6]. Το εύρος της δύναμης που παρέχει μια μηχανή μπορεί να αγγίξει τους 5.000 (Tn), συνήθως βέβαια κυμαίνεται στο εύρος 100-250 (Tn) [4].

Μια μηχανή έγχυσης απαρτίζεται από πέντε κύρια υποσυστήματα, όπως παρουσιάζονται ενδεικτικά στην Εικόνα 2- 6 και τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω: την μονάδα παροχής ενέργειας/κίνησης, την μονάδα πλαστικοποίησης, το καλούπι, την μονάδα σύσφιξης και την μονάδα ελέγχου.



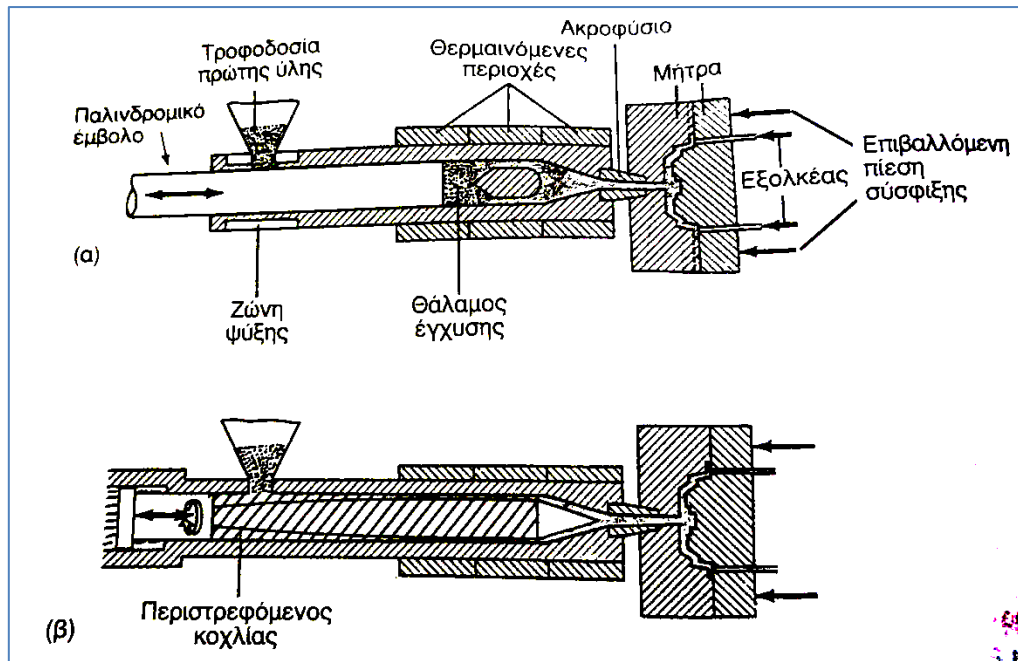
Εικόνα 2- 6: Δομικά υποσυστήματα μιας τυπικής μηχανής έγχυσης οριζόντιου τύπου

#### 2.4.1. Μονάδα Παροχής Ενέργειας

Ανάλογα με τον τρόπο κίνησης των μηχανικών μερών τους, οι μηχανές έγχυσης κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους: υδραυλικές, ηλεκτρικές και υβριδικές, δηλαδή συνδυασμός και των δύο τρόπων. Συγκριτικά, οι ηλεκτρικές μηχανές φαίνεται να κερδίζουν σημαντικό έδαφος, καθώς έχουν μια σειρά περιβαλλοντικών και ενεργειακών πλεονεκτημάτων. Σε μια εποχή αυτοματοποίησης των γραμμών παραγωγής, οι ηλεκτρικές μηχανές προσφέρουν μεγάλη επαναληψιμότητα της διαδικασίας, χωρίς ανάγκη για επίβλεψη της κατεργασίας και της ίδιας της μηχανής από τους χειριστές. Αυξάνεται επομένως η παραγωγικότητα με ταυτόχρονη μείωση των κόστων εργασίας. Στην αντίπερα όχθη, οι υδραυλικές μηχανές προσφέρουν μια καλή αναλογία απόδοσης-τιμής με πολλά τεχνικά πλεονεκτήματα. Για τους λόγους αυτούς, είναι επωφελής η χρήση και ανάπτυξη των υβριδικών συστημάτων, μιας και συνδυάζουν πλεονεκτήματα και των δύο τύπων μηχανής.

#### 2.4.2. Μονάδα Πλαστικοποίησης

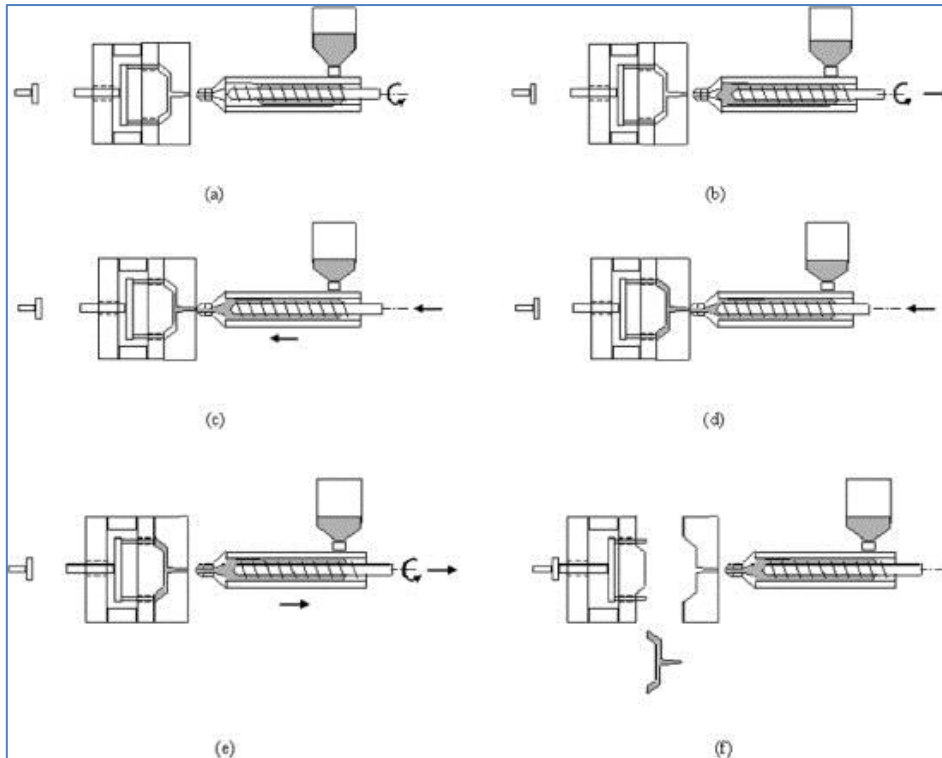
Η μονάδα πλαστικοποίησης σε μια μηχανή έγχυσης είναι υπεύθυνη για την τήξη, την ομογενοποίηση σε περίπτωση χρήσης πρόσθετων, τη μεταφορά/συσσώρευση και την έγχυση του πολυμερούς υλικού στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης. Ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς του πολυμερούς δομικού υλικού στην μήτρα, διακρίνονται δύο τύποι μηχανής έγχυσης: μηχανή περιστρεφόμενου κοχλία (*rotating screw*) και μηχανή παλινδρομικού εμβόλου (*reciprocating plunger*). Μια τυπική απεικόνιση των δύο μονάδων δίνεται στην Εικόνα 2- 7.



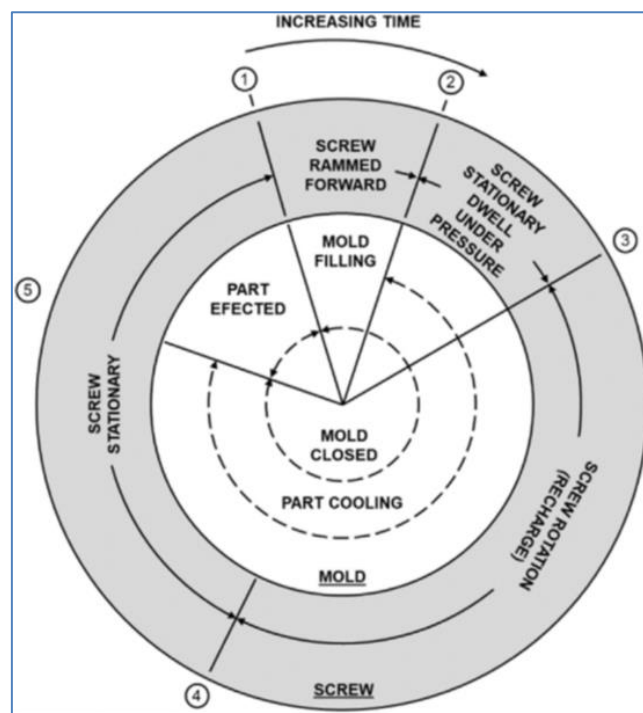
Εικόνα 2- 7: Μονάδα έγχυσης (α) παλινδρομικού εμβόλου, (β) περιστρεφόμενου κοχλίας, [3]

Στον πρώτο τύπο μονάδας πλαστικοποίησης, το υλικό τήκεται εξαιτίας της θερμότητας που αναπτύσσεται από τους θερμαινόμενους ιμάντες που περιβάλλουν τον κύλινδρο πλαστικοποίησης και λόγω της τριβής του υλικού καθώς ο κοχλίας περιστρέφεται. Αρχικά υλικό μεταφέρεται από την χοάνη στον κύλινδρο πλαστικοποίησης και ο κοχλίας αρχίζει να περιστρέφεται. Καθώς τηγμένο υλικό συσσωρεύεται μπροστά στην αιχμηρή απόληξή του, η πίεση που αναπτύσσεται ωθεί τον περιστρεφόμενο κοχλία να υποχωρήσει προς τα πίσω. Με την συγκέντρωση κατάλληλης ποσότητας πολυμερούς δομικού υλικού, ο κοχλίας σταματάει την περιστροφή του και λειτουργώντας σαν έμβολο, κινείται προς τα εμπρός. Ωθείται κατά αυτόν τον τρόπο υλικό εντός της μήτρας με σταθερό ρυθμό παροχής. Αφού ολοκληρωθεί η φάση της έγχυσης και η πύλη έχει φράξει από στερεοποιημένο υλικό, ο κοχλίας με το ίδιο μοτίβο κινήσεων προετοιμάζει το υλικό για τον επόμενο κύκλο. Σε έναν κύκλο έγχυσης, οι κινήσεις του κοχλίας έχουν ως στην Εικόνα 2- 8 και επεξηγούνται από το γράφημα της Εικόνα 2- 9.





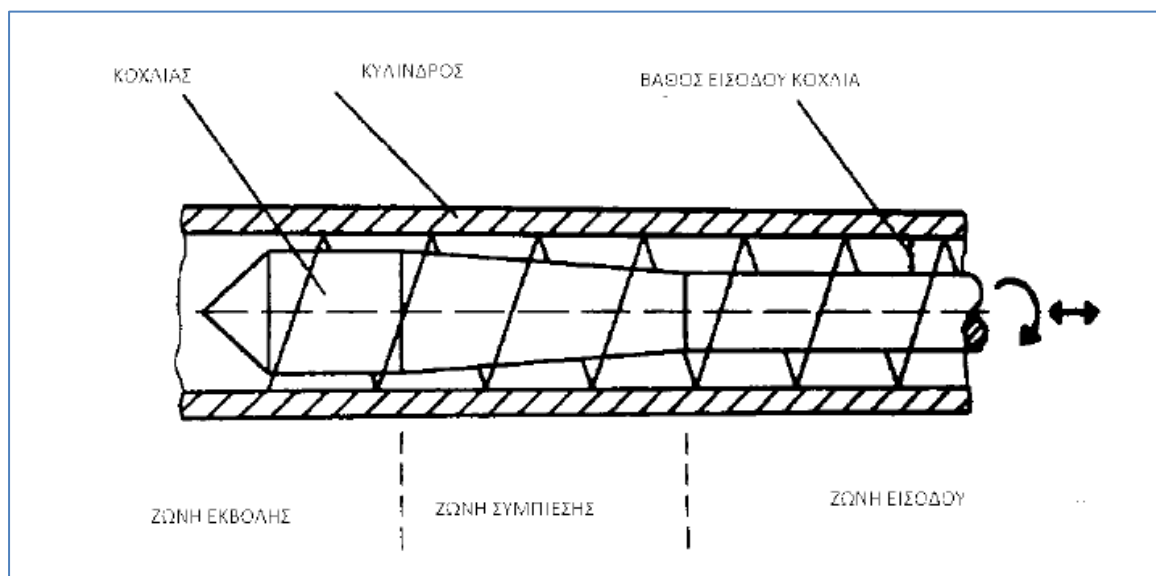
Εικόνα 2- 8: Κινήσεις περιστρεφόμενου κοχλία κατά τη διάρκεια ενός κύκλου έγχυσης, [7]



Εικόνα 2- 9: Επεξήγηση κινήσεων κοχλία ανά στάδιο κύκλου έγχυσης, [19]

Μάλιστα, για την αποτελεσματικότερη ομογενοποίηση του υλικού, ο κοχλίας χωρίζεται σε τρεις ζώνες, όπως στην Εικόνα 2- 10. Στην ζώνη εισόδου, δεν υπάρχει κάποια αλλαγή στην κατάσταση του πολυμερούς υλικού και καθώς μεταφέρεται

στην επόμενη ζώνη, την ζώνη συμπίεσης, το πλαστικό αρχίζει να τήκεται. Στην τελευταία ζώνη, το τηγμένο πλέον υλικό είναι έτοιμο για την έγχυση.



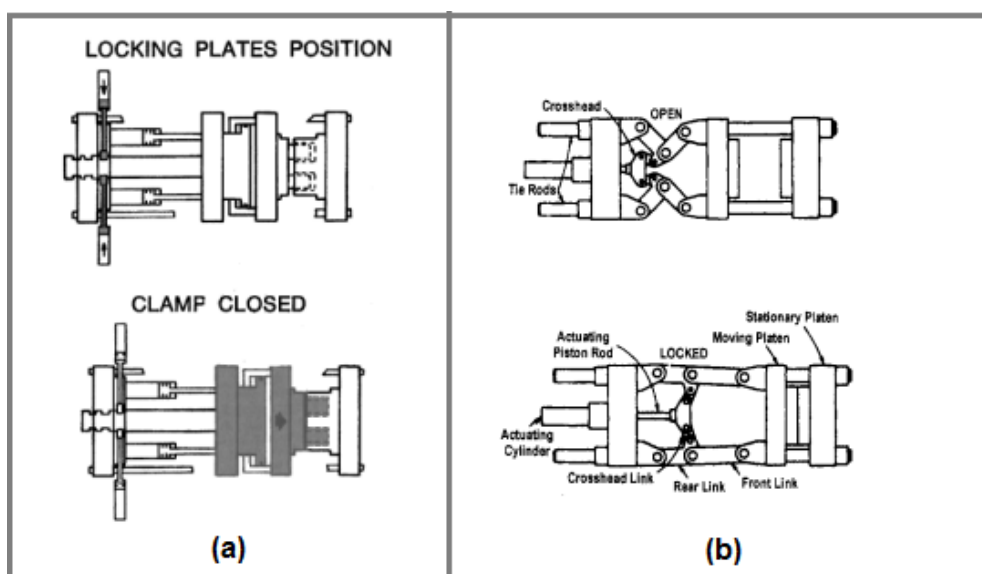
Εικόνα 2- 10: Ζώνες περιστρεφόμενου κοχλία μονάδας έγχυσης, [15]

Απεναντίας, σε μια μονάδα έγχυσης με παλινδρομικό έμβολο, η τήξη του υλικού επιτυγχάνεται υπό πίεση ή/και με την υποβοήθεια θερμαντήρων. Προκαθορισμένη ποσότητα πολυμερούς υλικού μεταφέρεται από την χοάνη στο εσωτερικό του κυλίνδρου πλαστικοποίησης, οπότε και το έμβολο ενεργοποιείται. Το υλικό ωθείται προς τα εμπρός καθώς τήκεται και διαμέσου του ακροφυσίου εγχύεται στο καλούπι. Πρόκειται γενικά για έναν εξοπλισμό με χαμηλότερο κόστος, ο οποίος ωστόσο χαρακτηρίζεται από μικρότερες ποσότητες έγχυσης. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι σαν τεχνολογία χρησιμοποιείται από το 1870.

### 2.4.3. Μονάδα Σύσφιξης Καλουπιού

Η μονάδα σύσφιξης του καλουπιού είναι το τμήμα της μηχανής το οποίο αποτελείται κυρίως από δύο πλάκες στήριξης και στις οποίες τοποθετείται το καλούπι. Αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα της μηχανής και διακρίνεται σε τρεις τύπους: μηχανική, υδραυλική και υδρομηχανική (Εικόνα 2- 11). Χάρη σε αυτή, το καλούπι, με πλήρως ελεγχόμενη κίνηση και δύναμη, ανοίγει, κλείνει και παραμένει κλειστό καθ' όλη την φάση της έγχυσης, κόντρα στην πίεση έγχυσης. Στην σταθερή πλάκα στήριξης, προσδένεται το τμήμα του καλουπιού που διαθέτει το κάθετο κανάλι του συστήματος διανομής υλικού και το οποίο ευθυγραμμίζεται με το ακροφύσιο της μονάδας έγχυσης. Από την άλλη, η κινητή πλάκα διασφαλίζει το άλλο τμήμα του καλουπιού και χάρη σε αυτή το καλούπι ανοίγει και κλείνει. Προκειμένου να διασφαλιστεί σωστά η κίνηση αυτή, τέσσερις συνήθως πείροι, προσαρτημένοι στην σταθερή πλάκα οδηγούν τον διαχωρισμό και κλείσιμο του καλουπιού. Τα διάφορα πολυμερή υλικά απαιτούν διαφορετικές πιέσεις έγχυσης, οι οποίες κυμαίνονται από 14 (MPa) έως 200 (MPa) και τις οποίες πρέπει ένας

μηχανικός να λάβει υπόψιν προκειμένου να εξασφαλιστεί η αναγκαία δύναμη σύσφιξης. Οι μηχανές έγχυσης προσφέρουν δυνάμεις σύσφιξης από 10 (Tn) και για μεγάλα προϊόντα χύτευσης μπορεί να φτάσουν και 1000 (Tn) [6].



Εικόνα 2- 11: Μονάδα σύσφιξης καλούπιού (α) υδραυλικός τύπος, (β) μηχανικός τύπος

#### 2.4.4. Μονάδα Ελέγχου

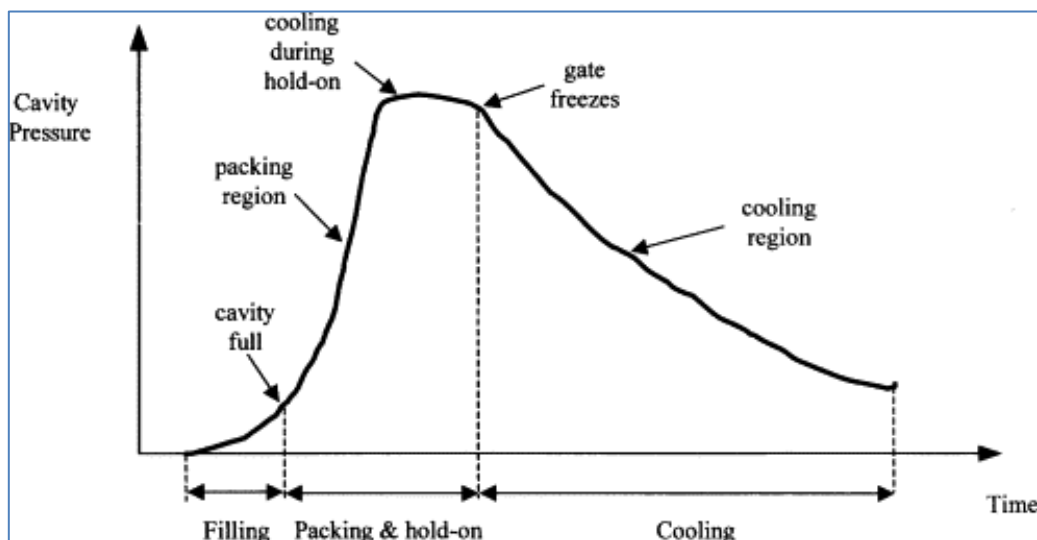
Ελέγχει όλα τα υποσυστήματα μιας μηχανής έγχυσης για την ανεμπόδιστη λειτουργία της. Με την βοήθεια ειδικών αισθητήρων, μετρούνται όλες οι παράμετροι κατεργασίας και μέσω κατάλληλου λογισμικού ελέγχεται η διεργασία και εξασφαλίζεται η ορθή λειτουργία της μηχανής.

#### 2.5. ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΡΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

Το καλούπι αποτελεί το πιο σημαντικό μέρος μιας μηχανής έγχυσης, εξετάζεται όμως πάντα ξεχωριστά. Πρόκειται για μια περίπλοκη και ακριβή συσκευή, η οποία αν δεν σχεδιαστεί, χειριστεί και συντηρηθεί κατάλληλα, η λειτουργία της μπορεί να καταστεί δαπανηρή και αναποτελεσματική. Εν ολίγοις, το καλούπι είναι υπεύθυνο για την παραλαβή του τηγμένου υλικού, την διανομή του εντός της/των κοιλοτήτων διαμόρφωσης, την ψύξη και την εξόλκευση του παραγόμενου προϊόντος. Από αυτές τις βασικές ενέργειες, προκύπτουν και τα επιμέρους εξαρτήματα: το κάθετο κανάλι ή αλλιώς μπουκαδούρα, οι αγωγοί διανομής ή αλλιώς δρομείς, ο θάλαμος έγχυσης ή κοιλότητα μορφοποίησης, το δίκτυο ψύξης, το σύστημα εξαέρωσης και τέλος το σύστημα εξόλκευσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το καλούπι αποτελείται από δύο μέρη. Το ένα μέρος του καλούπιού προσδένεται στην κινητή πλάκα και συνήθως αναφέρεται ως πυρήνας (*core*). Το άλλο μέρος κρατείται ακλόνητο στην σταθερή πλάκα, δηλαδή στην μηχανή έγχυσης και αναφέρεται ως κοιλότητα (*cavity*). Άλλοι τρόποι ονομασίας του πυρήνα και της κοιλότητας είναι η αρσενική και θηλυκή γεωμετρία αντίστοιχα.

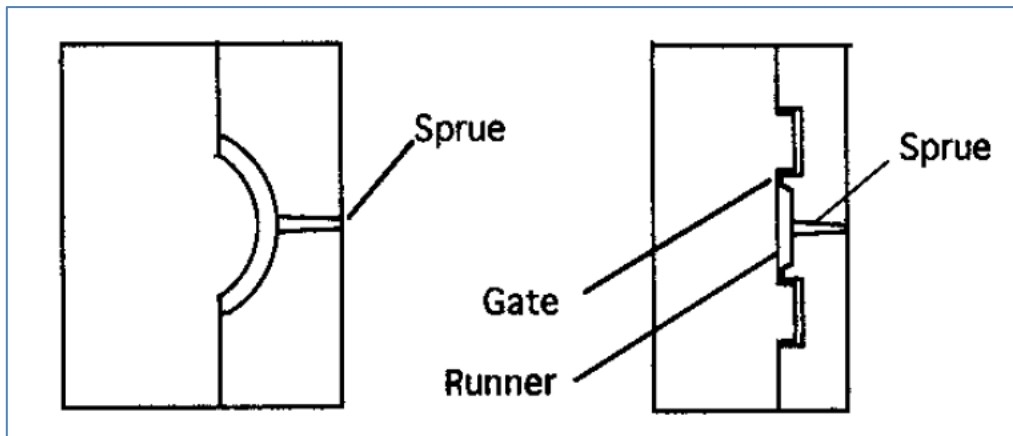
Καθώς το καλούπι κλείνει, το διάκενο που σχηματίζεται μεταξύ θηλυκής και αρσενικής γεωμετρίας είναι και η επονομαζόμενη κοιλότητα μορφοποίησης. Η πίεση που αναπτύσσεται εντός της κοιλότητας μορφοποίησης, καθ' όλην τον κύκλο έγχυσης διακρίνεται από την καμπύλη της Εικόνα 2- 12.



Εικόνα 2- 12: Πίεση κοιλότητας στην διάρκεια του κύκλου έγχυσης, [7]

### 2.5.1. Δίκτυο Διανομής Υλικού

Ορίζεται το σύνολο των ειδικά διαμορφωμένων διατάξεων, οι οποίες διασυνδέουν την μηχανή έγχυσης με το καλούπι και επιτρέπουν την διακίνηση του υλικού στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης. Για να πληρωθεί πλήρως η κοιλότητα, θα πρέπει το δίκτυο διανομής να εξασφαλίζει την απαραίτητη πίεση ώστε το υλικό να μην ψυχθεί πρόωρα. Ανδρομερώς, το δίκτυο διανομής αποτελείται από το κάθετο κανάλι (*sprue*), μέσω του οποίου το ακροφύσιο (*nozzle*) της μηχανής έγχυσης επικοινωνεί με το καλούπι, τους δρομείς (*runners*), οι οποίοι διανέμουν το υλικό στο εσωτερικό του καλουπιού, και την πύλη εισόδου (*gate*), ένα μικρό άνοιγμα που οδηγεί το υλικό από τους δρομείς εντός της κοιλότητας. Μια τυπική παρουσίαση των πιο απλών δικτύων διανομής υλικού φαίνεται στην Εικόνα 2- 13. Να σημειωθεί ότι η απευθείας έγχυση πολυμερούς υλικού από τον διάυλο στην κοιλότητα μορφοποίησης δεν συνηθίζεται, παρά μόνο για μεγάλα τεμάχια, ενώ αντιστοίχως της Εικόνα 2- 13 (β) μπορούν να συνδεθούν και περισσότερες κοιλότητες μορφοποίησης.



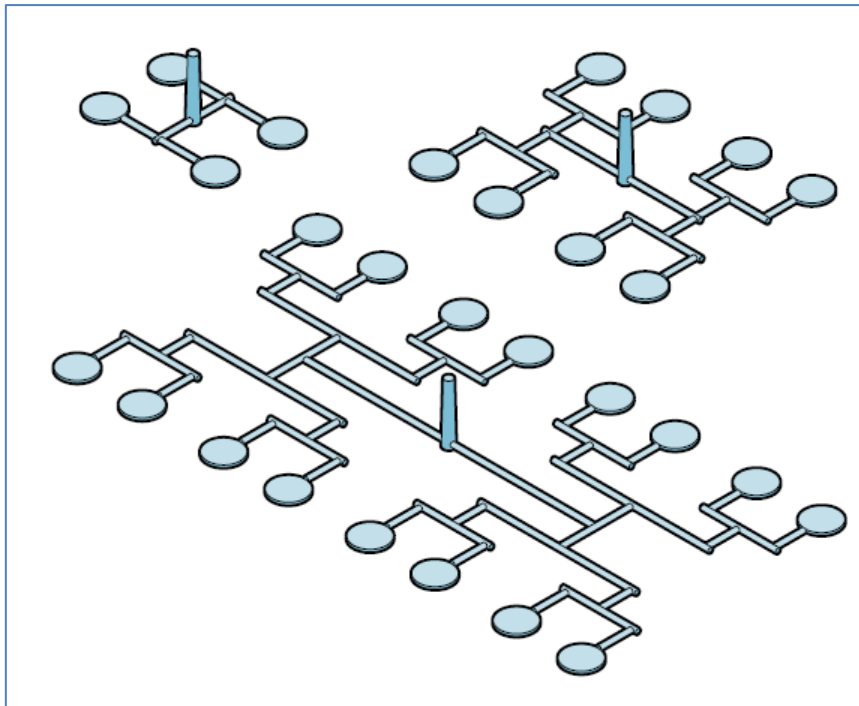
Εικόνα 2- 13: Απλούστεροι τύποι δικτύου διανομής υλικού (α) καλούπι μονής κοιλότητας με έγχυση από το κάθετο κανάλι απευθείας στην κοιλότητα, (β) δίκτυο διανομής για καλούπι δύο κοιλοτήτων, [8]

#### 2.5.1.1. Κάθετο κανάλι- δίαυλος

Το κάθετο κανάλι εντοπίζεται στην σταθερή πλάκα του καλουπιού και είναι συνήθως παράλληλο στον άξονα της μηχανής έγχυσης. Αναλαμβάνει τον ρόλο του μεσολαβητή μεταξύ της άκρης του ακροφυσίου και του καλουπιού, μεταφέροντας εις βάθος το υλικό, πολλές φορές μέχρι και την γραμμή διαχωρισμού πυρήνα/κοιλότητας. Έχει κωνικό σχήμα, με την διάμετρο στην βάση του να αυξάνεται όσο μεγαλώνει το μήκος του καναλιού. Ο σωστός σχεδιασμός του διαύλου διευκολύνει την ροή του υλικού, καθώς στην περιοχή αυτή εντοπίζεται η μεγαλύτερη ογκομετρική παροχή για το καλούπι. Κατά γενικό κανόνα, μεγάλα τεμάχια ή προϊόντα που απαιτούν μεγάλη ταχύτητα ροής κατά την πλήρωση χρειάζονται και μεγαλύτερης διαμέτρου διαύλους [9].

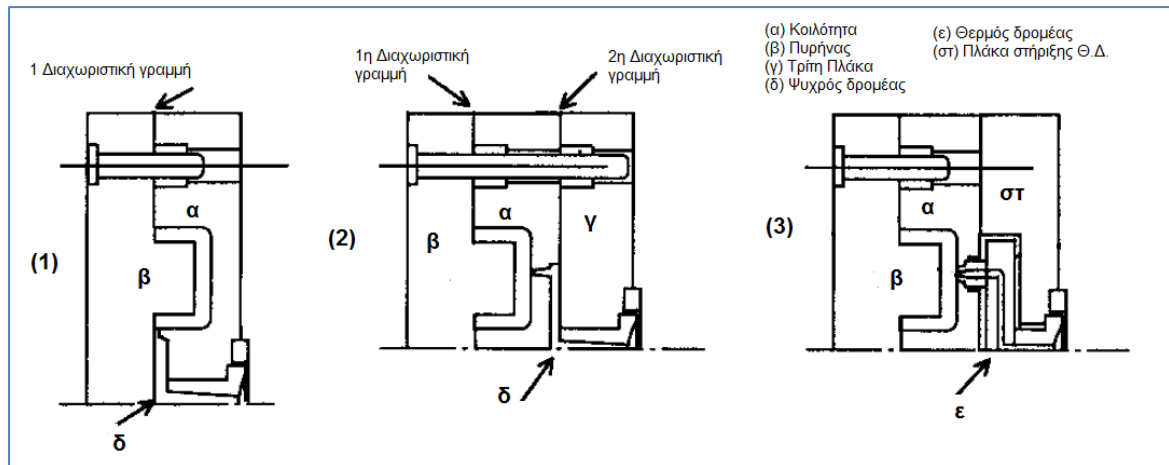
#### 2.5.1.2. Δρομείς

Οι δρομείς διακινούν το υλικό κατά μήκος του καλουπιού, συνήθως πάνω στην γραμμή διαχωρισμού. Γενικά, δρομείς μεγάλης διαμέτρου αυξάνουν άσκοπα τον κύκλο έγχυσης, ενώ από την άλλη λεπτοί δρομείς αυξάνουν την πίεση έγχυσης. Καθώς το υλικό διακινείται εντός των αγωγών, οι στρώσεις που έρχονται σε επαφή με τα τοιχώματα των σωληνώσεων, στερεοποιούνται, παρεμποδίζοντας κατά τον τρόπο αυτό την ροή το υλικού και προκαλώντας πτώση πίεσης εντός του δικτύου διανομής. Μάλιστα, η πτώση πίεσης αυτή μπορεί να αγγίξει μέχρι και το 40% της απαιτούμενης πίεσης έγχυσης [9]. Για καλούπια πολλών κοιλοτήτων, το δίκτυο των αγωγών θα πρέπει να είναι συμμετρικό και σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε η πλήρωση των κοιλοτήτων να επιτυγχάνεται την ίδια χρονική στιγμή (Εικόνα 2- 14).



Εικόνα 2- 14: Δίκτυο κύριων και δευτερευόντων δρομέων για καλούπι πολλαπλών κοιλοτήτων

Ακόμη, οι δρομείς διακρίνονται σε ψυχρούς και θερμούς. Για τους ψυχρούς δρομείς (*cold runners*), το πολυμερές υλικό στο δίκτυο διανομής ψύχεται και στερεοποιείται μαζί με το τεμάχιο. Το τμήμα αυτό θα πρέπει να αφαιρεί μετά την εξόλκευση του τεμαχίου, σε επόμενη φάση της παραγωγής, με κάποια κατεργασία αποπεράτωσης, όπως κοπή ή λείανση. Το υλικό αυτό θεωρείται φύρα, μπορεί να ανακυκλωθεί, αν και δεν συνίσταται για οικονομικούς και ενεργειακούς λόγους, συμπληρωματικά με τον κίνδυνο μόλυνσής του. Βέβαια, υπάρχουν καλούπια τριών τμημάτων με ψυχρό σύστημα διανομής, στα οποία η απόρριψη του δικτύου διανομής γίνεται αυτόματα. Ωστόσο, τα καλούπια αυτά έχουν υψηλό κόστος καθώς απαιτούν ένα περίπλοκο σύστημα εξόλκευσης και εντούτοις δεν εγγυόνται 100% αυτόματη εξόλκευση του συστήματος διανομής. Αντιθέτως, το θερμό σύστημα διανομής (*hot runner*) είναι μονωμένο και το υλικό δεν στερεοποιείται ποτέ. Στην ουσία, κατά τον επόμενο κύκλο έγχυσης η ροή του υλικού αρχίζει από την πύλη εισόδου του υλικού και όχι από το ακροφύσιο, όπως για την περίπτωση του ψυχρού συστήματος. Τα καλούπια με θερμό σύστημα διανομής απαιτούν μικρότερους κύκλους έγχυσης, μιας και μόνο το τεμάχιο πρέπει να ψυχθεί, ωστόσο αυξάνουν αρκετά το κόστος κατασκευής και συντήρησης. Τα τρία αυτά συστήματα παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 2- 15.



Εικόνα 2- 15: Δίκτυο διανομής υλικού (1) δύο τμημάτων με ψυχρό σύστημα διανομής, (2) τριών πλακών με ψυχρό σύστημα διανομής, (3) δύο πλακών με θερμό δίκτυο διανομής

### 2.5.1.3. Πύλη εισόδου

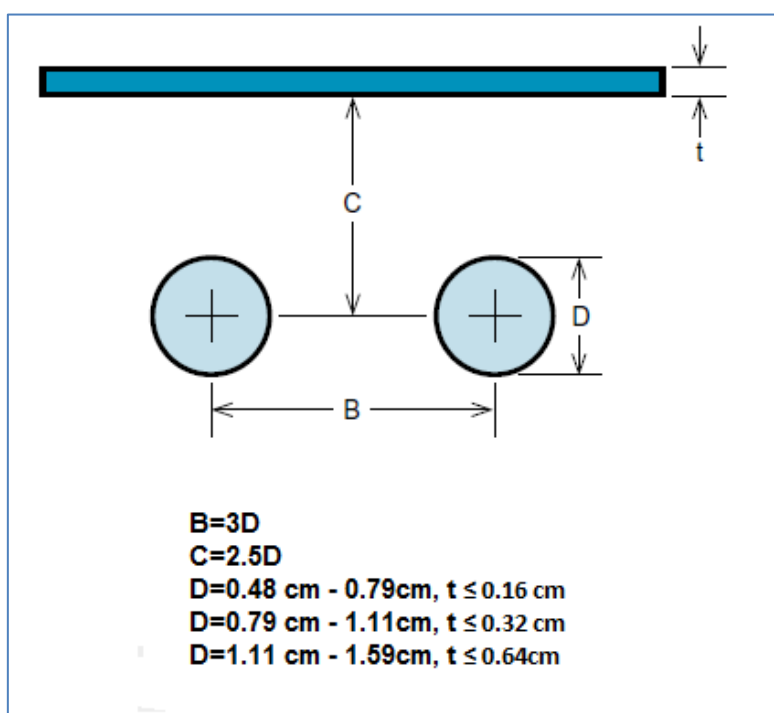
Οι πύλες εισόδου αποτελούν το μεταβατικό στάδιο μεταξύ δρομέων και κοιλότητας μορφοποίησης. Το πάχος τους είναι μικρότερο από το πάχος των τοιχωμάτων του τεμαχίου και των δρομέων για δύο κυρίως λόγους: οι πύλες πρέπει να στερεοποιούνται, αποτρέποντας το υπό πίεση υλικό να αντιστρέψει την ροή του κατά την φάση της συμπίεσης, και διευκολύνει τη απομάκρυνση του δικτύου διανομής μετά την εξόλκευση του τεμαχίου και σε δεύτερη φάση της παραγωγής. Βέβαια, λεπτότοιχα τεμάχια, με πάχος τοιχωμάτων μικρότερο των 1.5 (mm), ίσως χρειαστούν δυσανάλογα μεγάλες πύλες, προκειμένου να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες ροής, απαραίτητες για τους μικρούς χρόνους πλήρωσης.

Επιπροσθέτως, η επιλογή της θέσης της πύλης εισόδου επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την χυτευσιμότητα και την εμφάνιση του τεμαχίου, όπως και το κόστος παραγωγής. Η θέση της πύλης καθορίζει το μοτίβο πλήρωσης εντός της κοιλότητας, αλλά και το μήκος ροής. Επιδιώκεται μια ισορροπημένη πλήρωση με το μικρότερο δυνατό μήκος ροής, κάτι που συνήθως επιτυγχάνεται από το κέντρο του τεμαχίου. Ωστόσο, η επιλογή αυτή δεν είναι πάντα εφικτή, καθώς μπορεί να προκληθούν αισθητικά ελαττώματα ή να αυξηθεί ανεπιθύμητα το κόστος παραγωγής του καλουπιού.

### 2.5.2. Δίκτυο Ψύξης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί αρκετές φορές, το καλούπι είναι υπεύθυνο για τρεις βασικές λειτουργίες, την διαμόρφωση του πλαστικού υλικού στο εσωτερικό της κοιλότητας, τη ψύξη του υλικού και την εξόλκευση του παραγόμενου τεμαχίου. Από αυτές τις τρεις, η απαγωγή της θερμότητας απαιτεί και την περισσότερη ώρα, συμβάλλοντας δυναμικά στην αύξηση του κύκλου έγχυσης. Για τον λόγο αυτό, ένα καλά σχεδιασμένο δίκτυο ψύξης διατηρεί το καλούπι σε κατάλληλη θερμοκρασία και προσφέρει ομοιογενής ψύξη σε όλες τις κοιλότητες μορφοποίησης, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο ψύξης. Κάτι τέτοιο έχει και σημαντική

επίδραση στην ποιότητα του τελικού προϊόντος, ιδίως αναφορικά με την συρρίκνωση που υφίσταται και άρα την τελική παραμόρφωση και διαστασιολογική ακρίβειά του, αλλά και το κόστος παραγωγής. Καθώς το κομμάτι ψύχεται και συρρικνώνεται, στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό συμβαίνει προς την αντίθετη κατεύθυνση της κοιλότητας, δηλαδή το τεμάχιο αρχίζει να αγκαλιάζει περισσότερο τον πυρήνα. Από το γεγονός αυτό, κανείς διαπιστώνει δύο πράγματα: στο διάστημα μεταξύ τεμαχίου και κοιλότητας διαμορφώνεται ένας καλά μονωμένος κενός χώρος, ή σε περίπτωση καλής εξαέρωσης γεμάτος αέρα, ο οποίος περιορίζει την συναλλαγή θερμότητας μεταξύ τεμαχίου και κοιλότητας, και το τεμάχιο έρχεται σε περισσότερη επαφή με τον πυρήνα. Επομένως, ο πυρήνας συνήθως έχει ανάγκη περισσότερης ψύξης από την κοιλότητα αν και συνήθως, λόγω επιπλέον μηχανικών διατάξεων, όπως το σύστημα εξόλκευσης, δεν έχει τον ίδιο διαθέσιμο χώρο. Ακόμη, το πάχος των τοιχωμάτων επηρεάζει σημαντικά τον απαραίτητο χρόνο ψύξης για την στερεοποίηση του υλικού. Φαίνεται μάλιστα ο χρόνος ψύξης να σχετίζεται με το τετράγωνο του πάχους τοιχωμάτων. Έτσι, για τις περιοχές με μεγαλύτερο πάχος θα πρέπει να προβλέπεται επιπλέον ψύξη. Όπως είναι λογικό, σημαντικό ρόλο παίζει ακόμη η θερμική διαπερατότητα του υλικού και η απόσταση μεταξύ των αγωγών ψύξης, καθώς διαμορφώνουν τον ρυθμό απαγωγής θερμότητας στην περιοχή. Μια πρότυπη μέθοδος διαστασιολόγησης των αγωγών ψύξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2- 16.



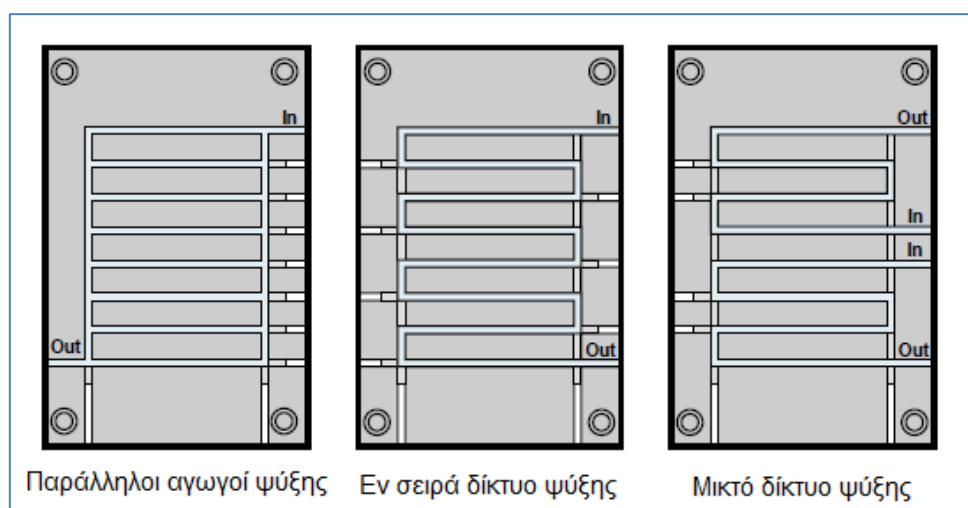
Εικόνα 2- 16: Πρότυπη μέθοδος διαστασιολόγησης των αγωγών ψύξης, [9]

Αναφορικά με την διασύνδεση των αγωγών ψύξης, αξίζει να σημειωθεί σε παράλληλους αγωγούς, μικρή διαφορά πτώσης πίεσης μεταξύ τους μπορεί να προκαλέσει μεγάλες διαφορές στην παροχή του ψυκτικού και επομένως πιθανά



προβλήματα ψύξης. Από την άλλη, στους εν σειρά αγωγούς, υπάρχει περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας του ψυκτικού προς το τέλος του δικτύου και επομένως να παρατηρηθεί ανομοιογενής ψύξη. Για τον λόγο αυτό προτείνεται τα εκτενή δίκτυα ψύξης να διαιρούνται σε μικρότερα, όπως στην Εικόνα 2- 17. Γενικότερα, μεγαλύτερη ογκομετρική παροχή του υλικού στα κανάλια ψύξης συνεπάγεται και μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου-εξόδου τους. Επίσης, προτιμάται τυρβωειδής ροή του ψυκτικού, παρά στρωτή, καθώς η ανάπτυξη δινών «ανακατεύει» το ψυκτικό μέσο και ψυχρά ρεύματα έρχονται συνεχώς σε επαφή με το θερμό μέταλλο του καλουπιού, απάγωντας έτσι περισσότερη θερμότητα. Η τυρβωειδής ροή ορίζεται μέσω του υπολογισμού του αδιάστατου αριθμού Reynolds· αριθμός Reynolds μεγαλύτερος από 4000 συνεπάγεται ανάπτυξη τυρβώδους ροής. Ο αδιάστατος αυτός δείκτης μπορεί να υπολογιστεί όπως ακολούθως, όπου  $V$  η ταχύτητα ροής του ψυκτικού (m/s),  $D$  η διάμετρος του αγωγού (m),  $\rho$  η πυκνότητα του ψυκτικού μέσου ( $\text{kg/m}^3$ ) και  $\mu$  το ιξώδες του ( $\text{kg/ms}$ ).

$$Re = \frac{V * D * \rho}{\mu}$$



Εικόνα 2- 17: Συνδεσιμότητα αγωγών ψύξης

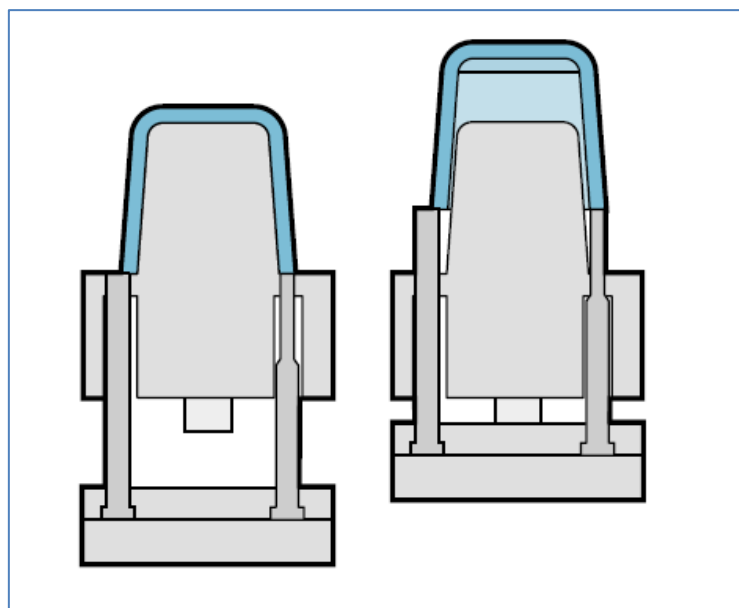
### 2.5.3. Σύστημα Εξαέρωσης

Καθώς το τηγμένο πολυμερές υλικό εισέρχεται στην κοιλότητα μορφοποίησης, μετατοπίζει γρήγορα τον ενυπάρχοντα αέρα, μερικός από τον οποίο ίσως να διαφύγει από την γραμμή διαχωρισμού ή διαμέσω των μηχανικών στοιχείων εξόλκευσης. Παρ' όλα αυτά, τα καλούπια απαιτούν ένα στρατηγικά σχεδιασμένο δίκτυο εξαέρωσης για την πλήρη και γρήγορη αφαίρεση του αέρα. Συνήθως η ανάγκη για εξαέρωση αυξάνεται αναλογικά με τον όγκο του τεμαχίου και την ταχύτητα πλήρωσης. Για την αποτροπή της ροής του υλικού στο εσωτερικό των αγωγών εξαέρωσης κατά το στάδιο της πλήρωσης, αυτοί πρέπει να έχουν πολύ μικρή διάμετρο. Σημεία εξαέρωσης θα πρέπει να τοποθετούνται σε διάφορα μέρη του καλουπιού, κατά μήκος του δικτύου διανομής και την περιφέρεια του τεμαχίου,

αλλά κυριώς στις περιοχές που πληρώνονται τελευταίες. Αν οι περιοχές που πληρώνονται τελευταίες δεν εξαερώνονται κατάλληλα, τότε ο αέρας μπορεί να παραμείνει εγκλωβισμένος στο καλούπι, αποτρέποντας την απόλυτη πλήρωσή του. Όσο γρηγορότερη είναι η ροή του υλικού, τόσο περισσότερο συμπιέζεται ο εγκλωβισμένος αέρας, μπορεί μάλιστα να υπερθερμανθεί και το πλαστικό που έρχεται σε επαφή με αυτόν να εμφανίσει σημάδια καύσης. Ένα άλλο ζήτημα αναδύεται, όταν υπάρχουν πολλαπλές πύλες εισόδου και ο αέρας εγκλωβίζεται ανάμεσα στα μέτωπα ροής. Σε αυτή την περίπτωση, ο αέρας μπορεί να αποτρέψει την ανάμειξη και συνένωση των μετώπων ροής, προκαλώντας τρύπες στα τοιχώματα του τεμαχίου.

#### 2.5.4. Σύστημα Εξόλκευσης

Μετά το πέρας του σταδίου ψύξης, το καλούπι ανοίγει και το τεμάχιο απομακρύνεται. Για την διευκόλυνση της διεργασίας αυτής, χρησιμοποιείται το σύστημα εξόλκευσης, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει βελόνες, πλάκες και να υποβοηθείται με αέρα. Συνηθέστερα, το σύστημα εξόλκευσης εδράζεται στην κινητή πλάκα του καλουπιού, αποτελείται δε από δύο πλάκες. Η πλάκα επαναφοράς συνδέεται με την κινητή πλάκα του καλουπιού. Στην πλάκα εκτίναξης υπάρχουν πείροι, οι οποίοι και ενεργοποιούνται μέσω ελεγκτή, διαπερνούν την μικρή τους οπή και απομακρύνουν το τεμάχιο από τον πυρήνα, όπως στην Εικόνα 2-18. Από την άλλη, τα ανάστροφα συστήματα εξόλκευσης, δηλαδή εκείνα που εδράζονται στην σταθερή πλάκα του καλουπιού, μειώνουν τα αισθητικά σημάδια από τους εξολκείς στο τελικό προϊόν, είναι ωστόσο μια ιδιαίτερα δαπανηρή κατασκευή. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή του συστήματος εξόλκευσης εξαρτάται από το σχήμα του παραγόμενου τεμαχίου, το είδος του καλουπιού και την αναμενόμενη παραγωγικότητα.



Εικόνα 2- 18: Σύστημα εξόλκευσης για πλάκες και πείρους, [9]

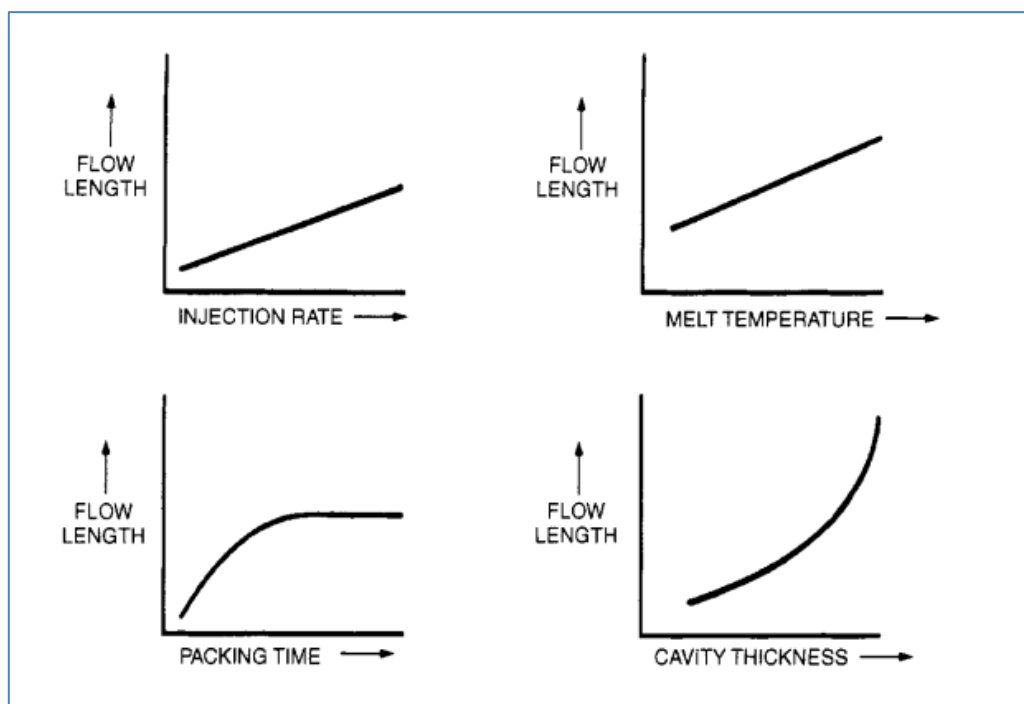
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

### 3.1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

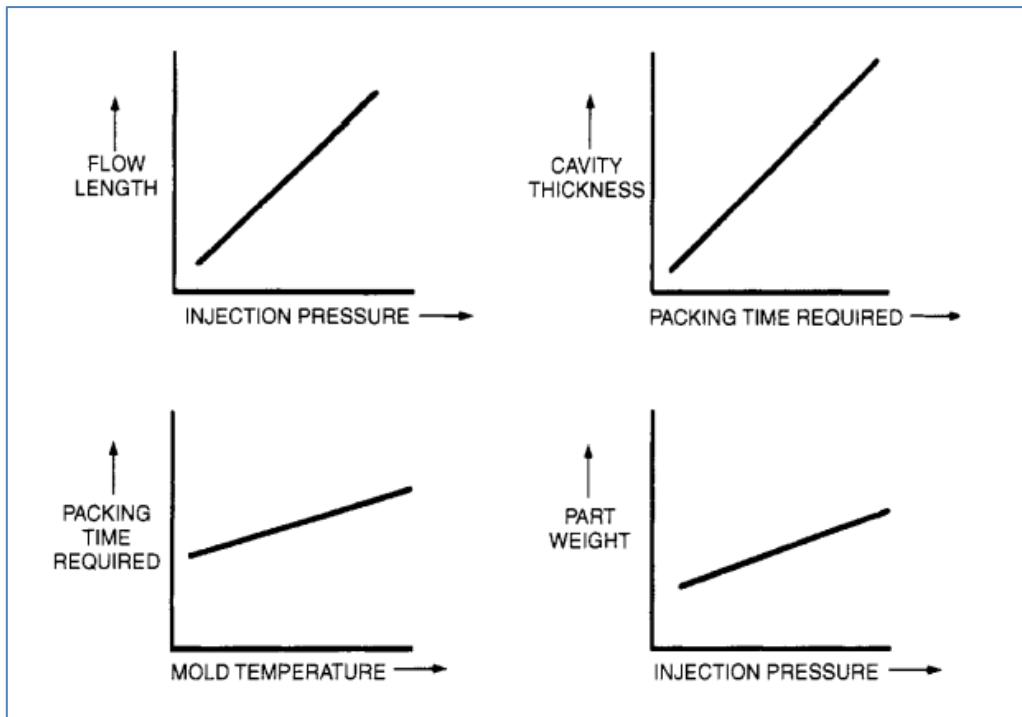
Όσο απλός και να φαντάζει ο κύκλος της χύτευσης με έγχυση, πρέπει κανείς να συνειδητοποιήσει ότι στην πραγματικότητα πρόκειται για μια περίπλοκη διεργασία, στην οποία συμμετέχουν πολλά μηχανικά υποσυστήματα και επιδρούν ταυτόχρονα αναρίθμητοι παράγοντες. Η επιλογή της πρώτης ύλης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί διαδραματίζει σημαντικό ρόλο καθώς μέσω του πολυμερούς δομικού υλικού καθορίζονται οι παράμετροι κατεργασίας. Οι παράμετροι κατεργασίας πρέπει να εναρμονίζονται πλήρως με τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του υλικού διότι διαφορετικά μπορεί να δημιουργηθούν διάφορες ατέλειες. Οι βασικές παράμετροι που επιδρούν στην χύτευση με έγχυση είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία τήγματος
- Θερμοκρασία καλουπιού
- Χρόνοι φάσεων του κύκλου έγχυσης (πλήρωση, συμπίεση, ψύξη)
- Πιέσεις πλήρωσης και συμπίεσης
- Ταχύτητα έγχυσης
- Διαδρομές γεμίματος υλικού

Στις Εικόνα 3- 1 και Εικόνα 3- 2 παρουσιάζεται η αλληλοεξάρτηση διαφόρων παραγόντων κατεργασίας μεταξύ τους.



Εικόνα 3- 1: Επίδραση παραγόντων κατεργασίας σε διάφορες ιδιότητες μέρος Ι, [6]



Εικόνα 3- 2: Επίδραση παραγόντων κατεργασίας σε διάφορες ιδιότητες μέρος II, [6]

### 3.2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κατεργασία της χύτευσης με έγχυση είναι μια περίπλοκη διεργασία στην οποία επιδρούν πολλοί παράγοντες. Οι ατέλειες που μπορεί να εμφανιστούν σε προϊόντα αυτής της τεχνολογίας μπορεί να οφείλονται σε ακατάλληλο σχεδιασμό τεμαχίου ή/ και καλουπιού, σε λάθος επιλογή δομικού υλικού, ή ακόμα σε λανθασμένη παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, η παρέμβαση στο σχεδιασμό του τεμαχίου δεν είναι πάντα επιτρεπτή και ιδίως οι διορθωτικές επεμβάσεις στο ίδιο το καλούπι είναι συχνά δαπανηρές τόσο από άποψη χρόνου όσο (κυρίως) από άποψη κόστους. Επομένως, η ρύθμιση και βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας θα πρέπει να αποτελεί την επιβεβλημένη μέθοδο διόρθωσης των οποιοδήποτε κατασκευαστικών σφαλμάτων.

#### 3.2.1. Ελλιπής Πλήρωση (*Short Shot*)

Στην ουσία, πρόκειται για μη ολοκληρωμένα τεμάχια που προέκυψαν από μη πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης κατά τον κύκλο έγχυσης (Εικόνα 3- 3). Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν αρχίζει η παραγωγή ενός καινούργιου τεμαχίου σε μηχανή. Η εμφάνισή του είναι έντονα συνυφασμένη με το ίδιο το υλικό και την ροή του εντός της κοιλότητας, η οποία με την σειρά της εξαρτάται από την θερμοκρασία του τήγματος, τον χρόνο έγχυσης, όπως επίσης και την πίεση έγχυσης. Συνιστάται η αύξηση των πιέσεων έγχυσης και συμπίεσης ή η αύξηση της θερμοκρασίας πολυμερούς τήγματος. Βέβαια, και η αύξηση της θερμοκρασίας του καλουπιού συμβάλλει στην εξάλειψη του φαινομένου αυτού. Ακόμη, ελαττώματα ελλιπούς

πλήρωσης εμφανίζονται σε καλούπια με μικρής διαμέτρου πύλη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, προτείνεται η αύξηση της πίεσης έγχυσης και της ταχύτητας έγχυσης.



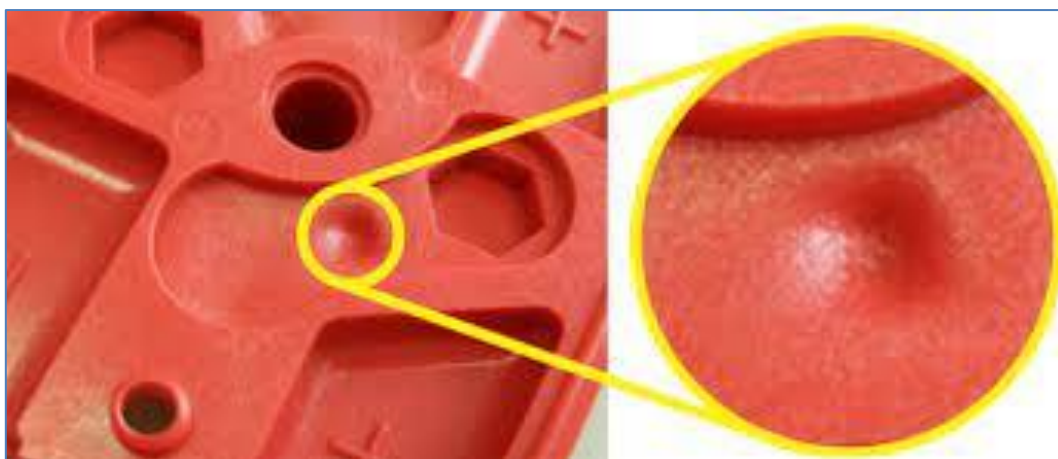
Εικόνα 3- 3: Λειψό αντικείμενο

### 3.2.2. Βαθουλώματα (*Sink Marks*)

Τα βαθουλώματα είναι κοιλότητες ή κρατήρες, οι οποίες εκτός από αισθητικές ατέλειες συνεπάγονται και μειωμένη μηχανική αντοχή των προϊόντων (Εικόνα 3- 4). Αναπτύσσονται κυρίως σε περιοχές με αυξημένο πάχος τοιχώματος [10]. Στην ουσία, τα βαθουλώματα είναι η συρρίκνωση των εσωτερικών στιβάδων του πολυμερούς όταν αυτό ψύχεται.

Για να γίνει πιο εύκολα αντιληπτό, κανείς πρέπει να γνωρίζει ότι με την πρόσδοση θερμότητας, τα μακρομόρια αποκτούν κινητική ενέργεια και οι δευτερεύοντες δεσμοί των πολυμερικών αλυσιδών χαλαρώνουν, επιτρέποντας την απομάκρυνση των μακρομορίων. Καθώς, το τηγμένο υλικό διέρχεται μέσα από στενά ανοίγματα, όπως είναι η πύλη, τα μόρια προσανατολίζονται στην κατεύθυνση της ροής. Ταυτόχρονα όμως, τα στρώματα που έρχονται σε επαφή με τα κρύα τοιχώματα του καλουπιού στερεοποιούνται πρόωρα, δημιουργώντας περιμετρικά έναν στερεό φλοιό. Παρατηρούνται λοιπόν έντονες διαφορές στην ταχύτητα του μετώπου ροής, οι οποίες και προκαλούν έντονες παραμορφώσεις στα μακρομόρια του πολυμερούς. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται χαλάρωση. Όλα αυτά συντελούν στην ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στη μάζα του υλικού, οι οποίες, όταν το υλικό δεν έχει στερεοποιηθεί πλήρως, τραβούν το υλικό προς τα μέσα, δημιουργώντας τα ελαττώματα των βαθουλωμάτων.

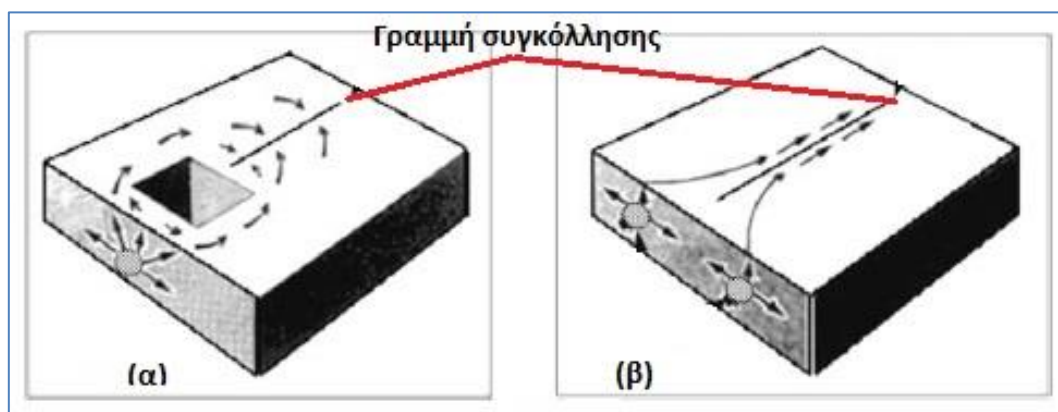
Στην περίπτωση αυτή, όπως είναι προφανές, απαιτείται αποδοτικότερη ψύξη, δηλαδή ενδεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας τήγματος και του χρόνου ψύξης και μείωση της θερμοκρασίας του καλουπιού. Επίσης, η αύξηση του χρόνου συμπίεσης και της πίεσης που αντιστοιχεί στο διάστημα αυτό φαίνεται να συμβάλλει θετικά στην εξάλειψη του φαινομένου αυτού, καθώς παρατηρείται αποδοτικότερη στερεοποίηση της επιφάνειας του τεμαχίου.



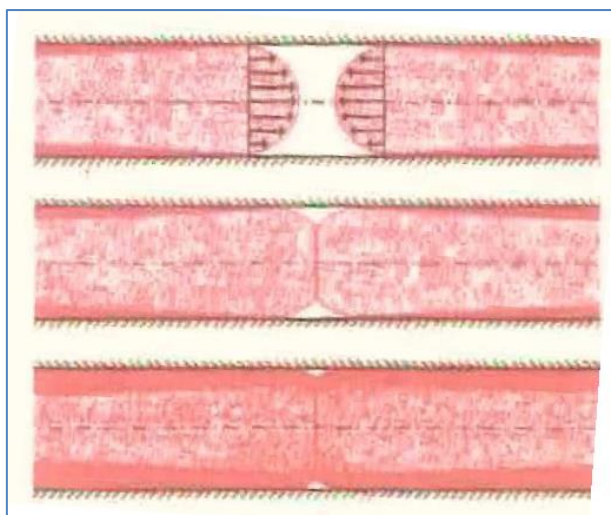
Εικόνα 3- 4: Βαθουλώματα σε προϊόν χύτευσης με έγχυση

### 3.2.3. Γραμμές Συγκόλλησης (Weld Lines)

Αναφέρεται στις επιφανειακές γραμμές των τεμαχίων που οφείλονται στην συνένωση μετώπων ροής. Η γραμμές αυτές δεν σχετίζονται μόνο με την ύπαρξη πολλαπλών πυλών τροφοδοσίας, αλλά και σε οποιοδήποτε σχεδιαστικό εμπόδιο μπορεί να αναγκάσει την διάσπαση του μετώπου ροής, όπως είναι οι οπές (Εικόνα 3-5). Τα μέτωπα ροής παρελαύνουν στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης, έχοντας κυρτή επιφάνεια, η οποία αρχίζει να γίνεται επίπεδη καθώς αυτά συνενώνονται (Εικόνα 3- 6). Εάν οι συνθήκες έγχυσης δεν είναι κατάλληλες, οι αιχμές των μετώπων ροής παραμένουν κυρτές, προκαλώντας στην επιφάνεια του τελικού προϊόντος γραμμή συγκόλλησης, η οποία παρομοιάζει με χαρακιά. Αν και στα σημεία αυτά παρατηρείται μειωμένη μηχανική αντοχή, εφόσον τα σημεία αυτά δεν χαρακτηρίζονται από κάποια κρισιμότητα, οι ατέλειες κρίνονται ως οπτικά ελαττώματα.



Εικόνα 3- 5: Γραμμές συγκόλλησης (α) λόγω οπής, (β) λόγω δύο πυλών εισόδου



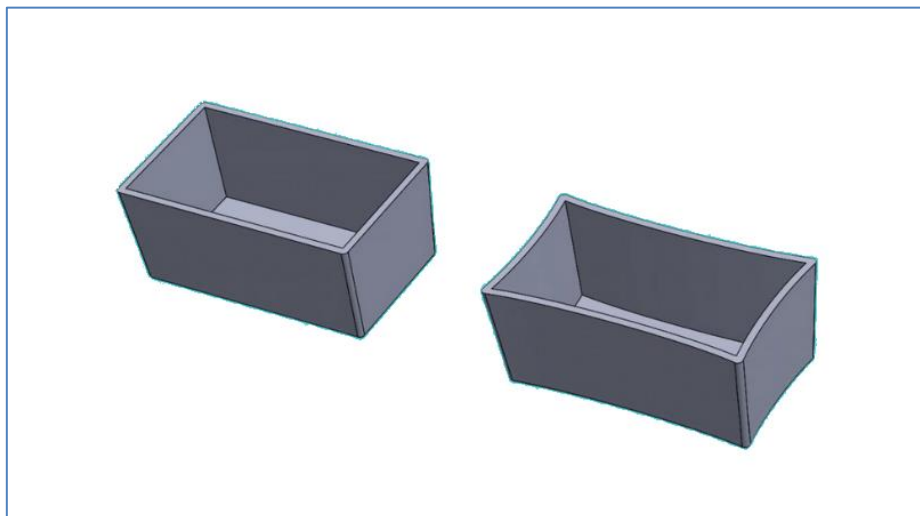
Εικόνα 3- 6: Συνάντηση μετώπων ροής δημιουργώντας γραμμές συγκόλλησης

Καθώς, σχεδιαστικοί περιορισμοί μπορεί να καθιστούν αναπόφευκτη την εμφάνιση γραμμών συγκόλλησης, ο μηχανικός οφείλει να μεριμνά για την όσο δυνατόν μείωσή τους με τον σχεδιασμό του κατάλληλου δικτύου διανομής υλικού. Όσον αναφορά τις κατασκευαστικές παραμέτρους, για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, θα πρέπει κανείς να εξετάσει πρωταρχικά την αύξηση της θερμοκρασίας τήγματος, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη συγχώνευση των μετώπων ροής και να αποφευχθεί η πρόωρη στερεοποίηση του υλικού. Επίσης, ενδείκνυται η μικρή αύξηση στην ταχύτητα έγχυσης και πίεσης, ώστε να περιοριστεί ο ρυθμός ψύξης του υλικού, ειδικά πριν αυτό πληρώσει την κοιλότητα μορφοποίησης.

#### 3.2.4. Στρέβλωση (*Warpage*)

Καθώς το τεμάχιο εξέλκεται από το καλούπι, πολλές φορές εντοπίζεται μια κάποια στρέβλωση, μια περιφερειακή απόκλιση δηλαδή από τον αρχικό σχεδιασμό του (Εικόνα 3- 7). Η στρέβλωση οφείλεται στις παραμένουσες τάσεις στο τεμάχιο, οι οποίες προκαλούν κύρτωση στην τελική γεωμετρία του προϊόντος. Ενώ μπορεί μετά την εξόλκευση, ένα τεμάχιο να διατηρεί τις διαστασιολογικές του απαιτήσεις, ωστόσο αν οι παραμένουσες τάσεις δεν έρθουν πρότερα σε ισορροπία, υπάρχει περίπτωση, με την πάροδο του χρόνου και υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων, να εκδηλωθούν και να προκαλέσουν παραμόρφωση. Άλλες συνήθεις αιτίες για την εμφάνιση του φαινομένου αυτού αφορούν την φάση ψύξης και εξόλκευσης, όπως ανομοιόμορφη ψύξη του τεμαχίου σε συνδυασμό με μικρό χρονικό διάστημα της φάσης αυτής, υψηλή θερμοκρασία εξόλκευσης και λανθασμένος σχεδιασμός συστήματος εξόλκευσης. Επιπλέον μπορεί να συνδέεται με ανεπαρκείς πιέσεις και χρόνους έγχυσης ή ακόμη και με ακατάλληλη ταχύτητα ροής. Πέρα από εμφανώς αισθητικό ελάττωμα, η παραμόρφωση μειώνει τη χρηστικότητα των τεμαχίων, όταν αυτά προορίζονται για κάποιου είδους μηχανολογική συναρμογή. Ένας συνήθης τρόπος για την αντιμετώπιση της στρέβλωσης είναι η αύξηση του χρόνου ψύξης με κατάλληλη προσαρμογή του αντίστοιχου δικτύου. Ακόμη, προτείνεται η ρύθμιση

του χρόνου και της πίεσης συμπίεσης προκειμένου να περιοριστεί η ανάπτυξη τάσεων στο εσωτερικό της μάζας του υλικού.



Εικόνα 3- 7: Στρέβλωση αντικειμένου

### 3.2.5. Γραμμές Ροής (*Flow Marks*)

Ως γραμμές ροής νοούνται τα επιφανειακά ανεπιθύμητα μοτίβα και αποτελούν κατά κύριο λόγο αισθητικά ελαττώματα (Εικόνα 3- 8). Εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στην περιοχή γύρω από την πύλη εισόδου ή σε περιοχές με διαφορετικό πάχος τοιχωμάτων και υποδηλώνουν ανομοιομορφία στο μοτίβο ροής του υλικού. Όταν μάλιστα υπάρχει μικρή θερμοκρασιακή διαβάθμιση στο υλικό, μπορεί να προκληθούν και διαφορετικοί χρωματικοί τόνοι στο τεμάχιο [10]. Κύρια αιτία για την εμφάνιση των γραμμών ροής είναι η διακύμανση στον ρυθμό ψύξης του υλικού. Όπως είναι εύκολα κατανοητό, αύξηση της θερμοκρασίας του τήγματος ή/ και του καλουπιού, όπως επίσης αύξηση της ταχύτητας ροής του υλικού θα αποτρέψει την πρόωρη στερεοποίηση του υλικού. Για προληπτικούς λόγους, ένας μηχανικός χρειάζεται να ρυθμίσει κατάλληλα τον χρόνο και την πίεση πλήρωσης, προκειμένου να επιτευχθεί απόλυτη πλήρωση της κοιλότητας προτού αρχίσει το στάδιο της ψύξης. Επίσης, συνιστάται η στρογγύλευση και λείανση των αιχμηρών ακμών των παχύτερων τμημάτων του τεμαχίου προς εξομάλυνση της κατεύθυνσης και ταχύτητας της ροής.

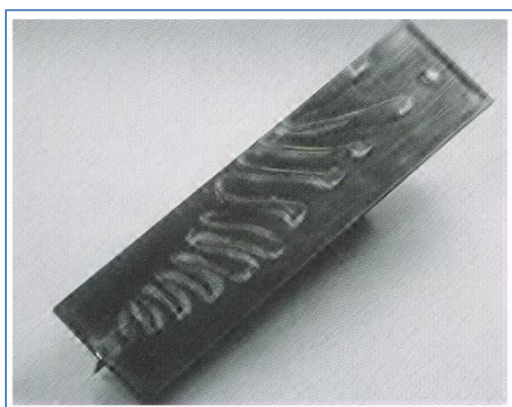




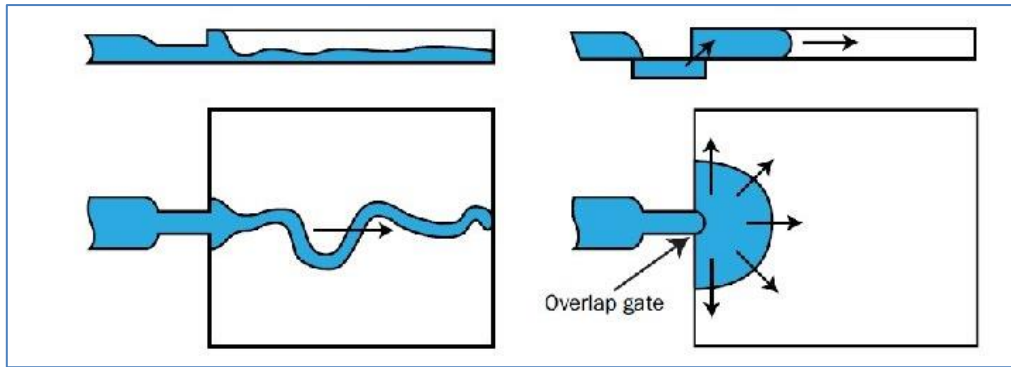
Εικόνα 3- 8: Γραμμές ροής

### 3.2.6. Φαινόμενο Πίδακα (*Jetting*)

Αναφέρεται στο ίχνος που παρατηρείται στις επιφάνειες του προϊόντος, συνήθως κυματοειδούς μορφής, και συναντάται κυρίως στις περιοχές γύρω από την πύλη εισόδου (Εικόνα 3- 9). Το ίχνος αυτό σχηματίζεται καθώς το υλικό αποτυγχάνει να προσκολληθεί στα τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης καθώς εισέρχεται στο εσωτερικό της με αυξημένη ταχύτητα ροής (Εικόνα 3- 10), αναπτύσσοντας έτσι τυρβώδη ροή. Οφείλεται δε σε αυξημένη αντίσταση της ροής (υλικό με υψηλό ιξώδες, χαμηλή θερμοκρασία τήγματος). Αναπτύσσεται λοιπόν ένα είδος ροής, με μορφή σερπαντίνας, η οποία και εφάπτεται σε ορισμένα μόνο σημεία με τα τοιχώματα της κοιλότητας. Το ιξώδες της σερπαντίνας είναι μεγαλύτερο από εκείνο του υπόλοιπου μετώπου ροής, οπότε και είναι ανέφικτη η ομογενοποίησή τους. Στο τελικό προϊόν, είναι εμφανή τα όρια των δύο μετώπων ροής, τα οποία και χαρακτηρίζονται από χαμηλή στιλπνότητα και υποβαθμίζουν την μηχανική αντοχή του. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με αύξηση των θερμοκρασιών του τήγματος ή/ και του καλουπιού. Σχεδιαστικά, η μεγέθυνση των πυλών εισόδου προς μείωση της ταχύτητας ροής συνδράμει στην εξάλειψη της εμφάνισης της τυρβώδους ροής.



Εικόνα 3- 9: Φαινόμενο πίδακα



Εικόνα 3- 10: Τυρβώδης ροή κατά την εμφάνιση του φαινομένου του πίδακα

### 3.2.7. Εγκλωβισμένες Φυσαλίδες Αέρα- Σημάδια Καύσης (*Air Traps- Burn Marks*)

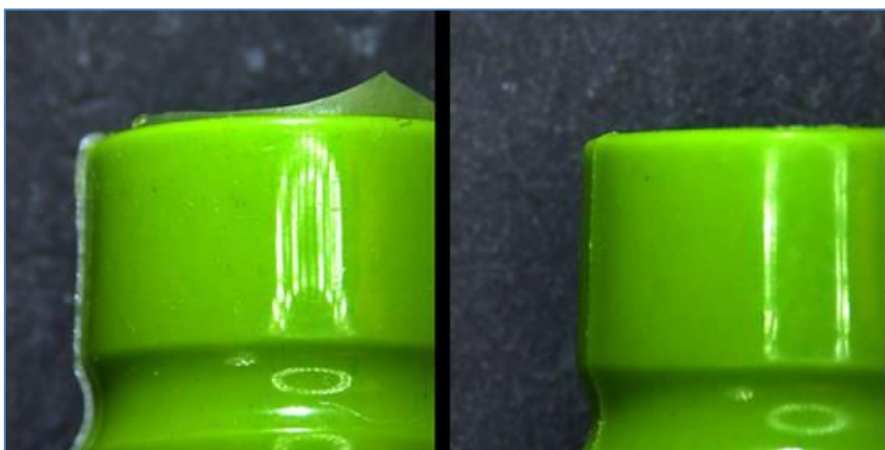
Πρόκειται για αέρια παγιδευμένα στην μάζα του υλικού και προκαλούνται κατά την συνένωση των μετώπων ροής ή την ανάπτυξη του φαινομένου της εκτόξευσης (*jetting*). Στο τελικό προϊόν εμφανίζονται ως κηλίδες στις ελεύθερες επιφάνειες, παρατηρούνται δε κατά κύριο λόγο σε νεύρα στήριξης, σε σπειρώματα και γενικά στις περιοχές εκείνες που το δίκτυο εξαέρωσης δεν είναι επαρκές. Ακόμη, μπορεί ο αέρας αυτός να μετακομίσει στο εσωτερικό του υλικού προκαλώντας κενά αέρα ή και βαθουλώματα. Ο εγκλωβισμός του αέρα οφείλεται κατά κύριο λόγο σε σχεδιαστικά λάθη, όπως ακατάλληλο δίκτυο διανομής υλικού και προβληματική κοιλότητα μορφοποίησης, τα οποία προκαλούν μη συμμετρική ροή και επιβραδύνσεις του υλικού, αλλά κατά κύριο λόγο σε ελλιπές σύστημα εξαερισμού. Μάλιστα, όταν ο αέρας αυτός υποβάλλεται στις υψηλές πιέσεις της έγχυσης, υπάρχει πιθανότητα υψηλής συμπίεσης και υπερθέρμανσής του. Έτσι ο αέρας εμφανίζεται στο τελικό προϊόν ως σημάδι καύσης (Εικόνα 3- 11). Σημάδια καύσης μπορεί να προκληθούν και από υψηλή θερμοκρασία τήγματος σε συνδυασμό με υπερβολική ταχύτητα έγχυσης. Ο έλεγχος για τυχόν εγκλωβισμένο αέρα πρέπει να είναι ενδεδειγμένος, καθώς οι φυσαλίδες και τα σημάδια καύσης υποτιμούν την μηχανική αντοχή των τελικών τεμαχίων. Στις περιπτώσεις αυτές, κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός κατάλληλου και στοχευμένου συστήματος εξαέρωσης, το οποίο θα αποτρέπει τον εγκλωβισμό του αέρα καθώς το πολυμερές τήγμα θα εισέρχεται στην κοιλότητα. Τα σημάδια καύσης μπορούν να εξαληφθούν με την κατάλληλη επιλογή θερμοκρασιών για το υλικό και το καλούπι, ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του υλικού.



Εικόνα 3- 11: Σημάδια καύσης

### 3.2.8. Προέκταμα (Flash)

Είναι η περίσσια του υλικού περιφερειακά των εξωτερικών επιφανειών του τεμαχίου, δηλαδή η ροή του υλικού εκτός της καθορισμένης γεωμετρίας της κοιλότητάς του (Εικόνα 3- 12). Συνήθως εμφανίζεται κατά μήκος της γραμμής διαχωρισμού ή σε οποιαδήποτε διάκενα δύναται να εισχωρήσει τηγμένο υλικό (σύστημα εξόλκευσης). Πέρα από οπτικό ελάττωμα, το προέκταμα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα και στο ίδιο το καλούπι. Η εμφάνισή του οφείλεται στην χύτευση του τεμαχίου υπό υψηλή πίεση έγχυσης και υψηλή θερμοκρασία τήγματος, ή όταν η δύναμη σύσφιξης δεν είναι επαρκής και παρατηρείται κακή ευθυγράμμιση των γραμμών διαχωρισμού κοιλότητας/ πυρήνα. Συνήθεις τρόποι αντιμετώπισης είναι η προσαρμογή της θερμοκρασίας του καλουπιού και της πίεσης έγχυσης. Επιπροσθέτως, η αύξηση της δύναμης σύσφιξης συνιστάται στις περιπτώσεις αυτές.



Εικόνα 3- 12: Προέκταμα στο τελικό προϊόν

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΣΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΡΟΗΣ

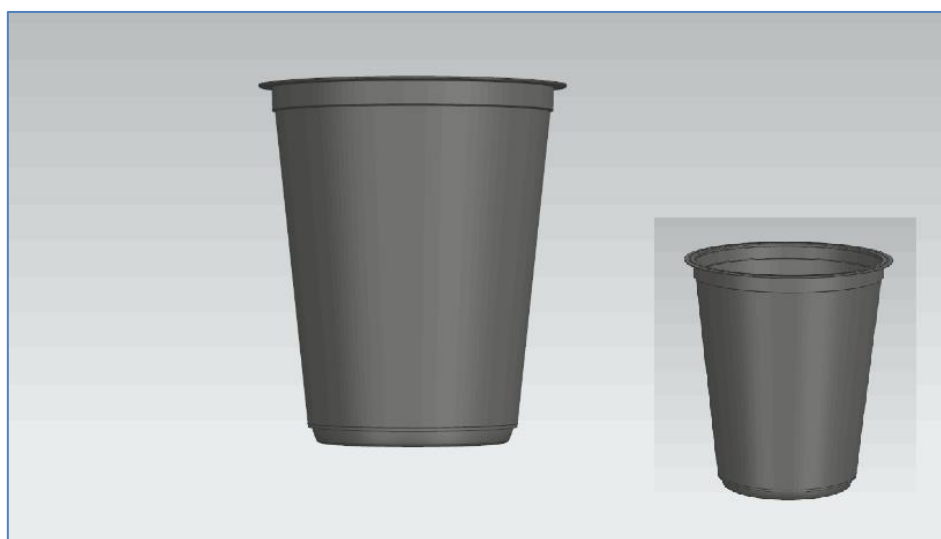
### 4.1. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MOLDEX3D

Το λογισμικό Moldex3D είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιείται για μια μεγάλη ποικιλία κατεργασιών χύτευσης πολυμερούς. Πρόκειται για μια ενιαία πλατφόρμα, στην οποία ο σχεδιασμός του τεμαχίου και του αντίστοιχου καλουπιού ενοποιούνται με τη παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Είναι λοιπόν ένα ολοκληρωμένο CAE λογισμικό που αξιοποιεί την τεχνολογία της ανάλυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Αναμφίβολα, η εκπόνηση δοκιμών και πειραμάτων σε πραγματικό χρόνο είναι, για έναν μηχανικό, χρονοβόρα και οικονομικά ασύμφορη τακτική, ειδικά μάλιστα όταν το προϊόν θα πρέπει να βγει άμεσα στην αγορά. Αντιθέτως, λογισμικά προσομοίωσης, όπως το MOLDEX3D, τον διευκολύνουν να μελετήσει και αναλύσει εις βάθος το προς εξέταση προϊόν. Η χρήση συστημάτων CAE προσφέρει σε έναν μηχανικό την δυνατότητα να:

- Προβλέψει την τελική μορφή του τεμαχίου
- Εντοπίσει πιθανά ελαττώματα
- Βελτιστοποιήσει τις συνθήκες κατεργασίας
- Βελτιώσει τον σχεδιασμό του καλουπιού
- Βελτιστοποιήσει τον χρόνο κατεργασίας
- Μειώσει το κατασκευαστικό κόστος

### 4.2. ΠΡΟΪΟΝ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ

Το προς μελέτη προϊόν της παρούσας εργασίας είναι το δοχείο συσκευασίας τροφίμων που παρουσιάζεται στις Εικόνα 4- 1 και Εικόνα 4- 2. Λόγω πολιτικής απορρήτου της εταιρείας, στα πλαίσια της μελέτης αποφεύγεται γενικά η αναφορά σε συγκεκριμένες διαστάσεις και ανοχές.



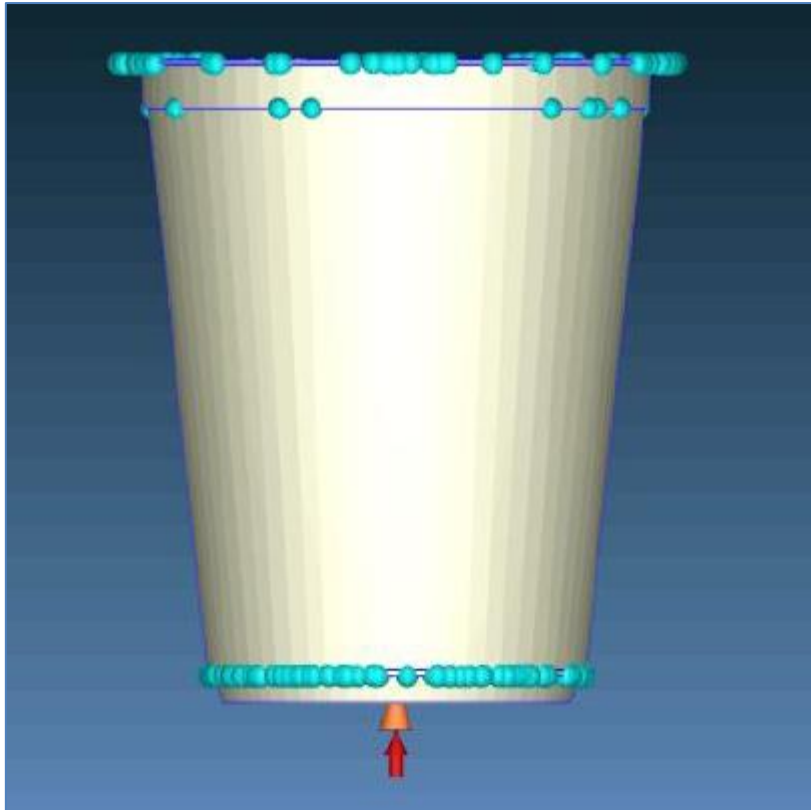
Εικόνα 4- 1: Το δοχείο συσκευασίας τροφίμων που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία - πλάγια όψη



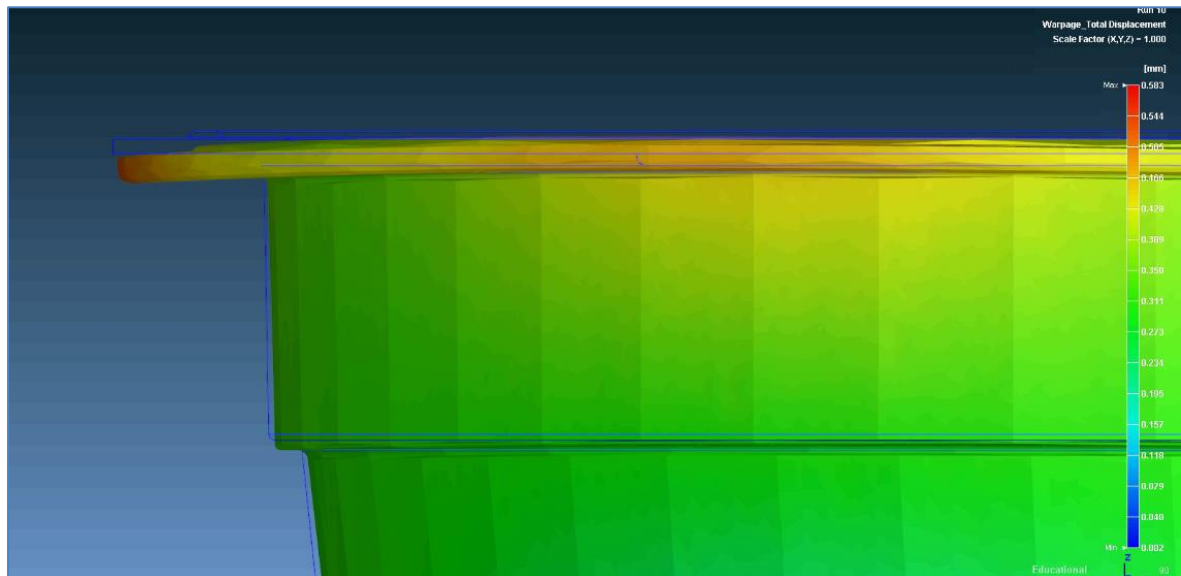
**Εικόνα 4- 2: Το δοχείο συσκευασίας τροφίμων – κάτοψη**

Πρόκειται για ένα δοχείο για συσκευασία τροφίμων με χωρητικότητα 450 ml, το οποίο κατασκευάζεται σε καλούπι τεσσάρων κοιλοτήτων. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι το πολυπροπυλένιο (PP). Θεωρείται γενικά ένα εύκολα κατασκευάσιμο τεμάχιο, χωρίς ιδιαίτερα κατασκευαστικά ελαττώματα. Οι ατέλειες που εν γένει εντοπίζονται σε τεμάχια τέτοιου είδους είναι εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα (*air traps*), κάτι που λαμβάνεται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό του καλουπιού, με την ενσωμάτωση δικτύου εξαέρωσης στις περιοχές που τείνουν να εμφανίζονται. Επίσης, στο φως, πολλές φορές μπορούν να παρατηρηθούν νερά στις επιφάνειες, κάτι που υποδηλώνει ανεπαρκές χρονικό διάστημα στο στάδιο της συμπίεσης. Τέλος, μπορεί να παρατηρηθεί μικρή παραμόρφωση στο γείσο του δοχείου, κάτι που κρίνεται ωστόσο συνήθως φυσιολογικό.

Όλες αυτές οι ατέλειες μπορούν να προβλεφθούν αρκετά αξιόπιστα από μια τυπική ανάλυση. Έτσι, ένας μηχανικός μπορεί να έχει την γενική εποπτεία των αναγκών του τεμαχίου, προτού προβεί στον σχεδιασμό του καλουπιού. Οι εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα, όπως φαίνονται στην Εικόνα 4- 3, αναμένονται στον πάτο και στο γείσο του δοχείου. Γενικότερα, εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα τείνουν να εμφανίζονται στις περιοχές, οι οποίες πληρώνονται τελευταίες ή και όπου σημειώνεται αλλαγή στο μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος. Στην πραγματικότητα, το αποτέλεσμα αυτό έχει αξιοποιηθεί από τους μηχανικούς της εταιρείας, με τον σχεδιασμό κατάλληλων σημείων εξαέρωσης στο καλούπι. Επιπλέον μια φυσιολογική παραμόρφωση στο γείσο του τεμαχίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4- 4.



Εικόνα 4- 3: Εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα στο δοχείο συσκευασίας τροφίμων



Εικόνα 4- 4: Παραμόρφωση που παρατηρείται στο γείσο του τεμαχίου

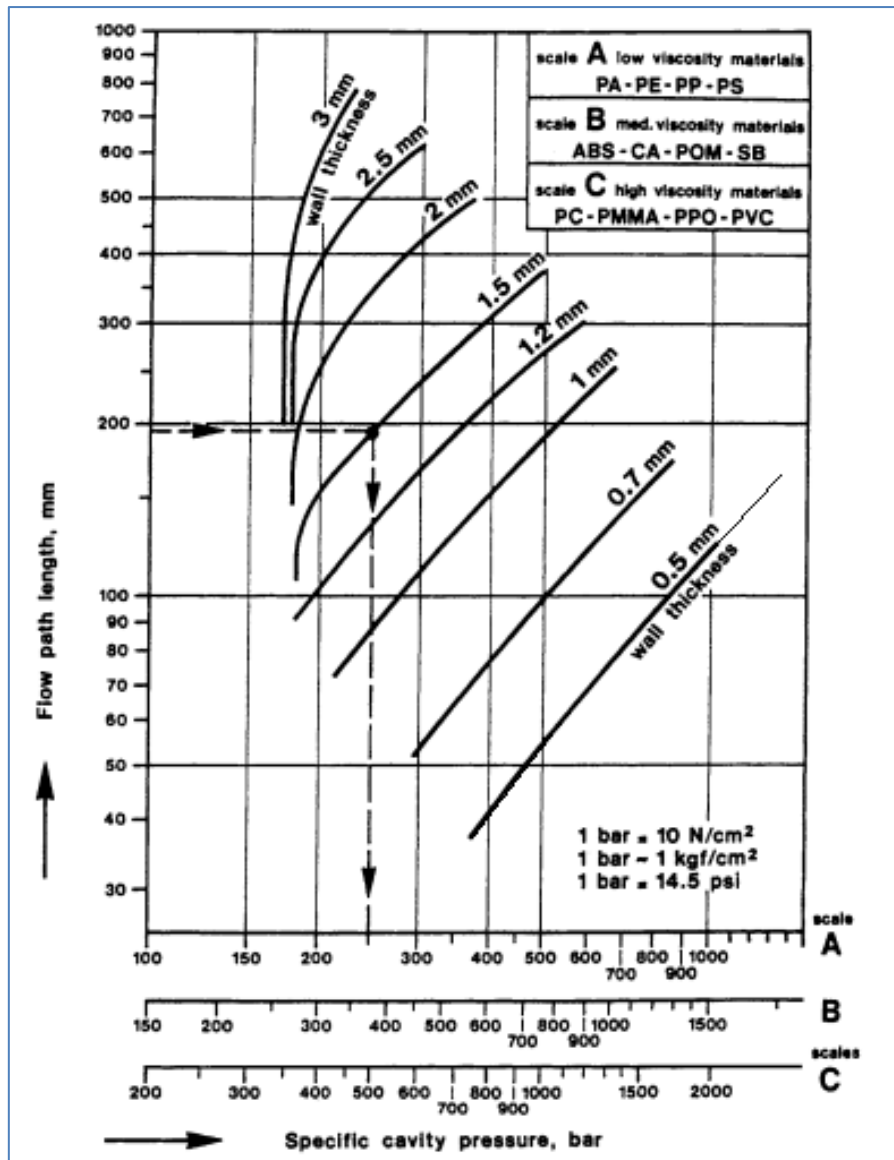
Επίσης, στην Εικόνα 4- 5 παρουσιάζεται ένα μέρος από το φύλλο προδιαγραφών (*specification form*) του πελάτη. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν λεπτομέρειες του προϊόντος και θα αξιοποιηθούν στο επόμενο στάδιο μελέτης αυτής της εργασίας. Άλλες πληροφορίες που αναφέρονται στην φόρμα προδιαγραφών του πελάτη είναι πληροφορίες αναφορικά με την εκάστοτε διαθέσιμη μηχανή. Στην συγκεκριμένη

περίπτωση, ο πελάτης διαθέτει μηχανή Demag Systec 350, δηλαδή μια μηχανή με τονάζ 350 (Tn). Λαμβάνοντας υπόψη την πληροφορία αυτή και δεδομένου ότι πρόκειται για καλούπι τεσσάρων κοιλοτήτων, τίθεται ανώτατο όριο για την μέγιστη δύναμη σύσφιξης οι 87.5 (Tn). Ωστόσο, για την σωστή λειτουργία της μηχανής, η μέγιστη δύναμη σύσφιξης θα ήταν θεμιτό να μην ξεπερνάει τους 80 (Tn). Επίσης, στο φύλλο προδιαγραφών του πελάτη προσδιορίζεται ο αριθμός των κοιλοτήτων και ο τρόπος εξόλκευσης. Για το τεμάχιο μελέτης της παρούσας εργασίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το καλούπι έγχυσης περιλαμβάνει τέσσερις κοιλοότητες μορφοποίησης. Η εξόλκευση του παραχθέντος προϊόντος γίνεται με δύο τρόπους σε τρία στάδια. Με το άνοιγμα του καλουπιού, το τεμάχιο, λόγω ογκομετρικής συρρίκνωσης παραμένει προσκολλημένο στο κινητό μέρος του καλουπιού. Επομένως, είναι πρωταρχικής σημασίας το τεμάχιο να αποκολληθεί από τον πυρήνα με την εμφύσηση αέρα πρώτα στον πάτο του δοχείου και σε δεύτερη φάση στα τοιχώματα. Έτσι εύκολα, σε τρίτο στάδιο το προϊόν εξέλκεται από την πλάκα εξόλκευσης.

Product Details			
Desired Part Weight	15.5 (g)	Desired Cycle Time (sec)	4.5
Desired Wall Thickness	0.54 (mm)	Standard Cycle Time (8 x Wall Thickness) (sec)	4.32
Material #1	PP	MFI 40-70/10	Provided by customer: Yes
Addition/Color #1		(%)	Provided by customer: -

Εικόνα 4- 5: Φύλλο προδιαγραφών πελάτη

Μια πρώτη εκτίμηση της απαραίτητης πίεσης έγχυσης για την πλήρωση της κοιλοτήτας του τεμαχίου μπορεί να γίνει από το διάγραμμα της Εικόνα 4- 6. Για πολυμερές υλικό πολυπροπυλενίου, πάχος τοιχωμάτων που φαίνεται στην Εικόνα 4- 5, και μήκος ροής 147 (mm), προκύπτει περίπου μια πίεση 110-120 (MPa). Η πίεση αυτή, πολλαπλασιαζόμενη με την προβαλλόμενη επιφάνεια του τεμαχίου εκφράζει την απαιτούμενη δύναμη σύσφιξης. Υπολογίζεται μια απαιτούμενη δύναμη περί των 85 (Tn), οπότε πολλαπλασιαζόμενη με τον αριθμό των κοιλοτήτων του καλουπιού, προκύπτει η επιλογή μηχανής που θα παρέχει συνολική δύναμη σύσφιξης 350 (Tn). Φυσικά, ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες συνθήκες κατεργασίας και το ιξώδες του πολυμερούς υλικού, η πίεση και δύναμη σύσφιξης θα διαφέρουν.



Εικόνα 4- 6: Διάγραμμα απαραίτητης πίεσης έγχυσης, δεδομένου πολυμερούς υλικού, μήκης ροής και πάχους τοιχωμάτων, [6]

### 4.3. ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο λογισμικό προσομοίωσης, η μελέτη του προϊόντος έγχυσης μπορεί να διαιρεθεί σε τρία βασικά στάδια, σε καθένα από τα οποία υλοποιούνται απλά βήματα. Τα στάδια αυτά είναι τα εξής:

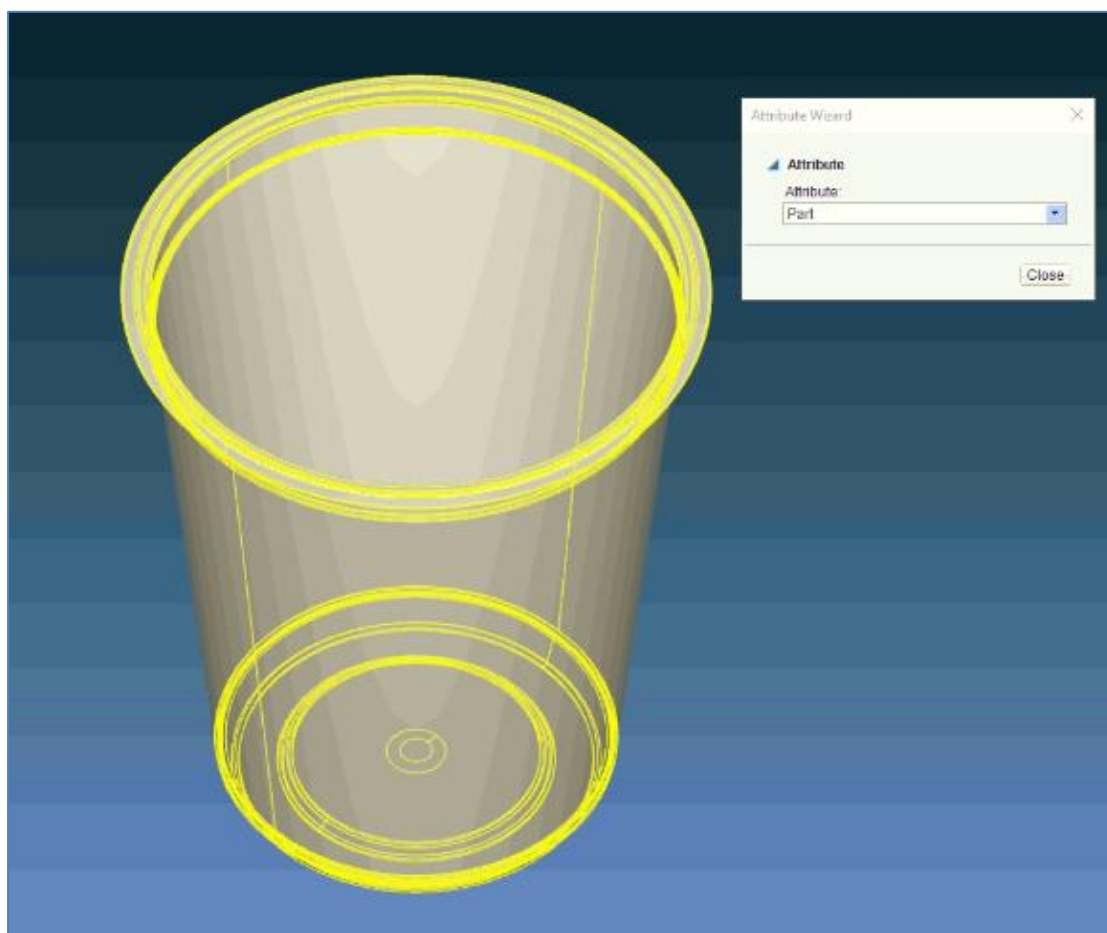
1. Προ-επεξεργασία: εισαγωγή του τεμαχίου, σχεδιασμός δικτύου διανομής, δικτύου ψύξης και καλουπιέρας και πλεγματοποίηση των προηγούμενων
2. Διεργασία: παραμετροποίηση της κατεργασίας και της υπολογιστικής διαδικασίας
3. Μετά-επεξεργασία: επισκόπηση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων ανάλυσης



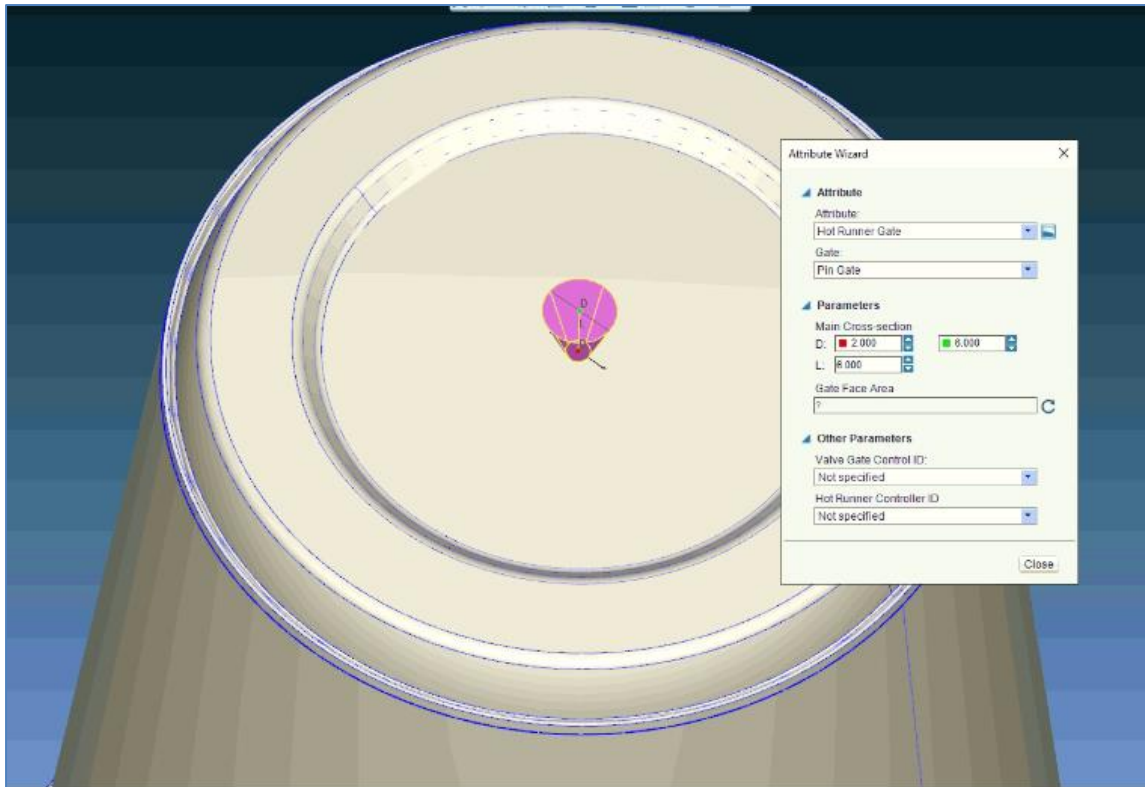
### 4.3.1. Προ-επεξεργασία

Αρχικά, εισάγεται η γεωμετρία του τεμαχίου στο λογισμικό και πραγματοποιείται ο ορισμός της ως τεμάχιο προς μελέτη (Εικόνα 4- 7). Στην συνέχεια, σχεδιάζεται η πύλη εισόδου. Η παρούσα εργασία αφορά τα πρωταρχικά βήματα μελέτης που κάνει ένας μηχανικός για τον σχεδιασμό καλουπιού έγχυσης, προκειμένου να αναδυθούν οι ανάγκες και απαιτήσεις σχεδιασμού. Επιλέγεται λοιπόν να παραμείνουν ως έχουν οι προεπιλεγμένες διαστάσεις της πύλης. Ορίζεται μόνο ο τύπος της (*pin gate*) και ως θερμή πύλη (Εικόνα 4- 8). Η πλευρά έγχυσης προσδιορίζεται από τον πελάτη και καθώς πρόκειται για ένα αξονοσυμμετρικό τεμάχιο, ως σημείο πύλης επιλέγεται εύκολα το κέντρο της εξωτερικής πλευράς του πάτου.

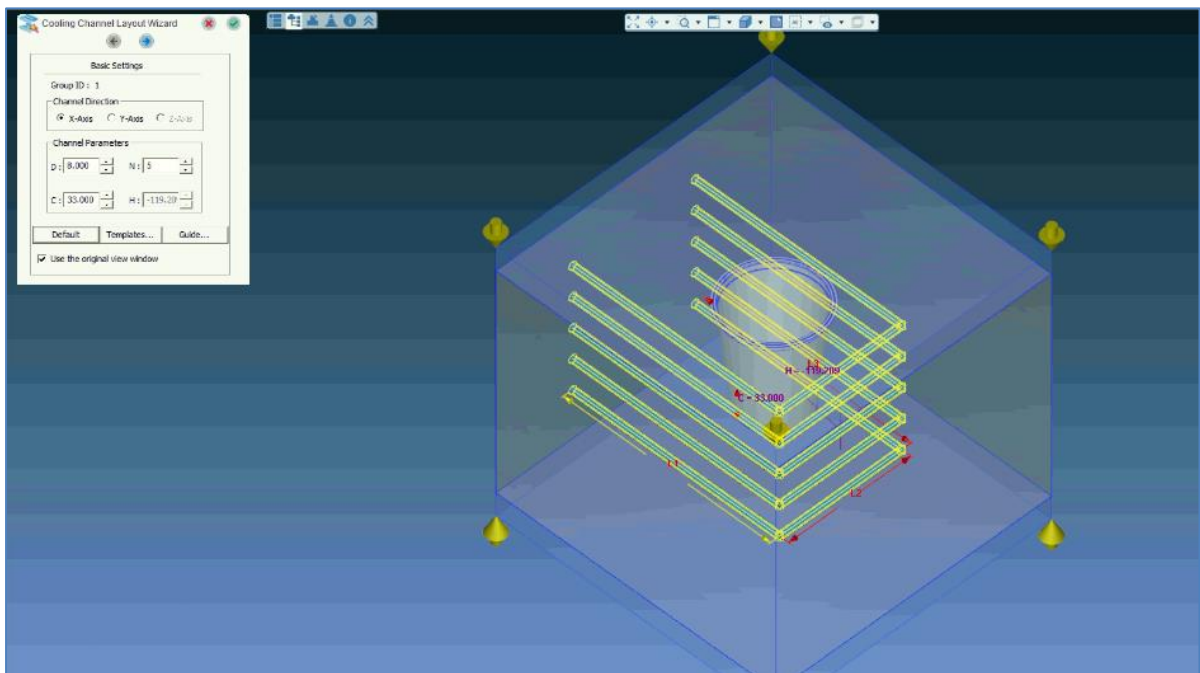
Ομοίως, αναφορικά με το δίκτυο ψύξης, επιλέγεται ένα από τα πρότυπα δίκτυα ψύξης που ακολουθεί την γεωμετρία του προς μελέτη τεμαχίου (Εικόνα 4- 9). Οι διαστάσεις των αγωγών παραμένουν ως έχουν οι προτεινόμενες από το λογισμικό. Στην συνέχεια ορίζονται οι διαστάσεις της καλουπιέρας (Εικόνα 4- 10).



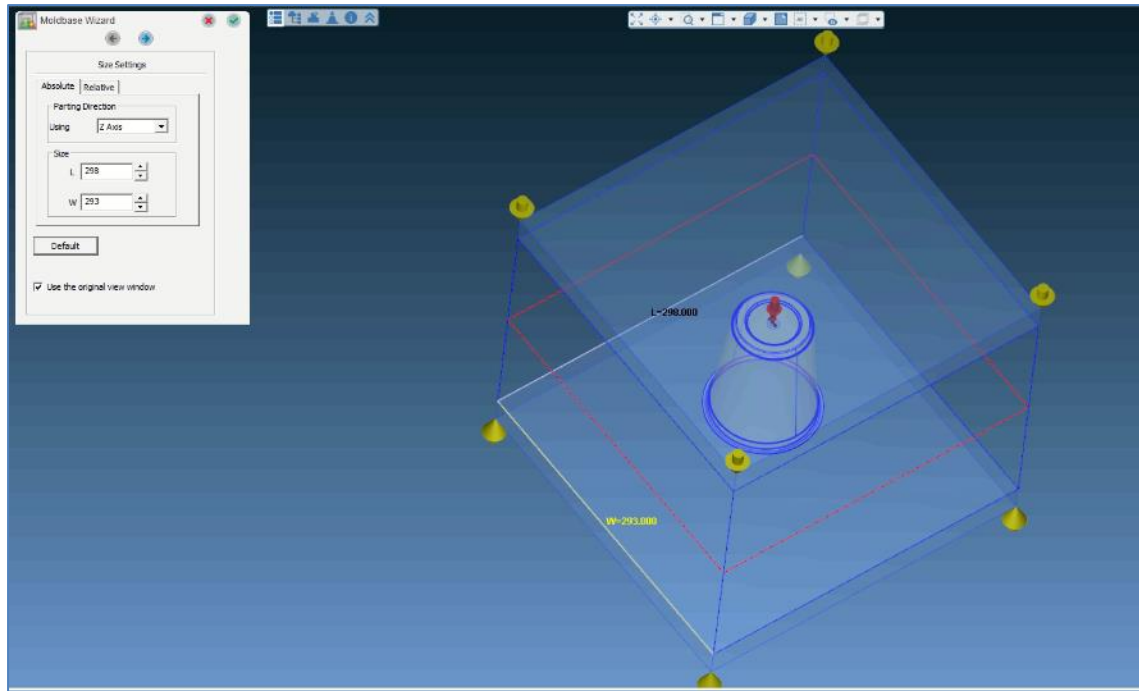
Εικόνα 4- 7: Εισαγωγή γεωμετρίας και της ιδιότητας του τεμαχίου στο λογισμικό προσομοίωσης



Εικόνα 4- 8: Σχεδιασμός της θερμής πύλης εισόδου

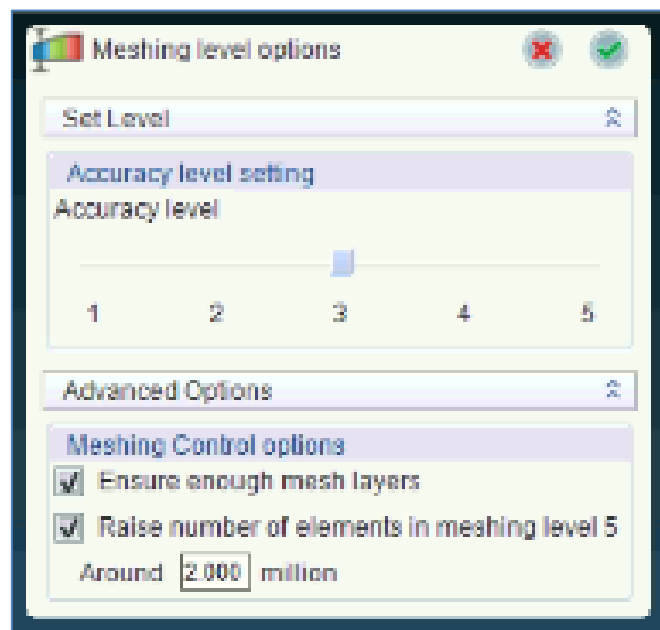


Εικόνα 4- 9: Τυπικό δίκτυο ψύξης που ακολουθεί εν γένει την γεωμετρία του τεμαχίου



Εικόνα 4- 10: Σχεδιασμός καλουπιέρας

Τελικό βήμα στο πρώτο αυτό στάδιο είναι η δημιουργία του τρισδιάστατου πλέγματος. Η μελέτη του τεμαχίου διεκπεραιώθηκε με ακαδημαϊκή άδεια για το λογισμικό, οπότε ο σχεδιασμός του πλέγματος αφορά της επιλογή μιας τάξης ακρίβειας. Επιλέχθηκε ένα πλέγμα μεσαίου επιπέδου, το οποίο φέρνει τα ζητούμενα αποτελέσματα με χρονικά αποδοτικό τρόπο (Εικόνα 4- 11). Να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε και δοκιμή με πλέγμα μεγαλύτερης τάξης. Εντούτοις, ο χρόνος που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης ήταν ο διπλάσιος, χωρίς ζωτική διαφορά στα μετρήσιμα αποτελέσματα.

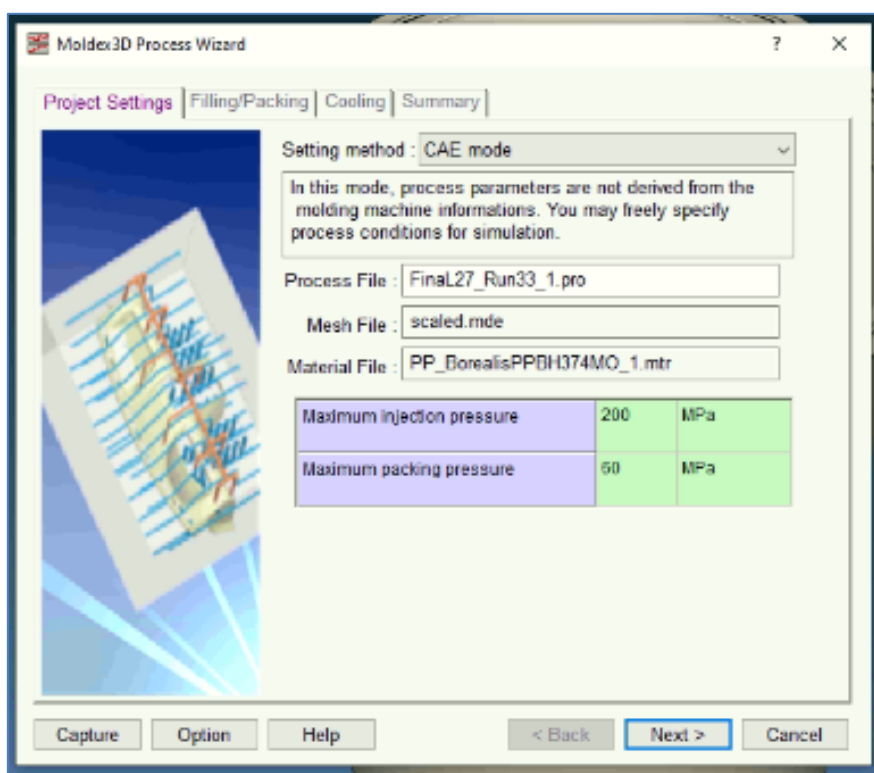


Εικόνα 4- 11: Επιλογή επιπέδου ακρίβειας για το πλέγμα

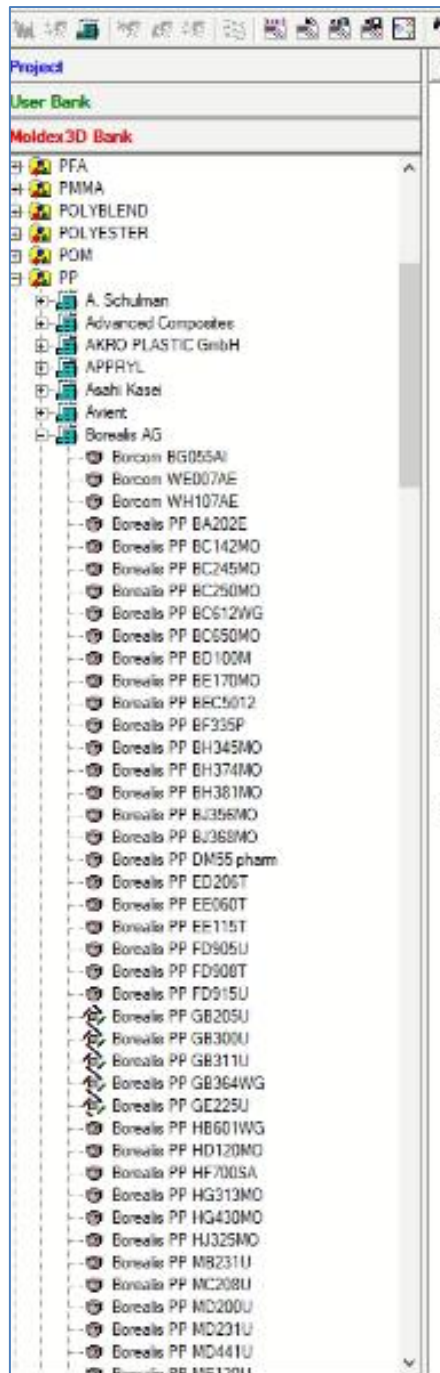
### 4.3.2. Διεργασία

Αφού ολοκληρωθούν τα βήματα του πρωταρχικού σταδίου σεταρίσματος, επιλέγεται το πολυμερές δομικό υλικό από την διαθέσιμη τράπεζα υλικών του λογισμικού (Εικόνα 4- 13). Υπενθυμίζεται ότι το παρόν τεμάχιο κατασκευάζεται από πολυπροπυλένιο. Οπότε και επιλέγεται από την τράπεζα του λογισμικού υλικό PP της εταιρείας Borealis. Οι αρχικές δοκιμές/προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση υλικού προπυλενίου με MFI45, ενώ σε επόμενο στάδιο χρησιμοποιείται υλικό με μεγαλύτερο MFI, της ίδιας βέβαια εταιρείας.

Σε επόμενο βήμα, καθορίζονται οι παράμετροι που αφορούν την ίδια την κατεργασία. Δεδομένης της κατεύθυνσης της εργασίας για γενική εποπτεία των αναγκών και περιορισμών του τεμαχίου και των προβλεπόμενων παραμέτρων κατεργασίας, ως μέθοδος σεταρίσματος της ανάλυσης επιλέγεται η «CAE mode» (Εικόνα 4- 12). Στο ίδιο παράθυρο, οριοθετούνται και οι μέγιστες επιτρεπόμενες πιέσεις έγχυσης και συμπίεσης (Εικόνα 4- 12).



Εικόνα 4- 12: Επιλογή μεθόδου σεταρίσματος και οριοθέτηση των άνω ορίων πίεσης έγχυσης και συμπίεσης

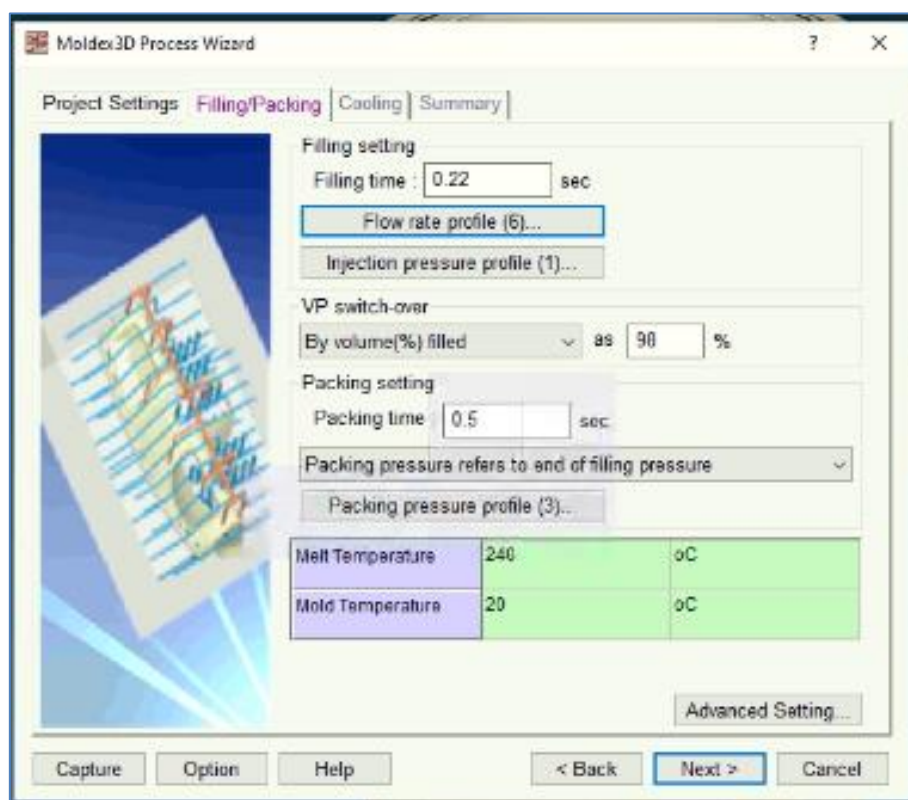


Εικόνα 4- 13: Η ενσωματωμένη τράπεζα υλικών του λογισμικού

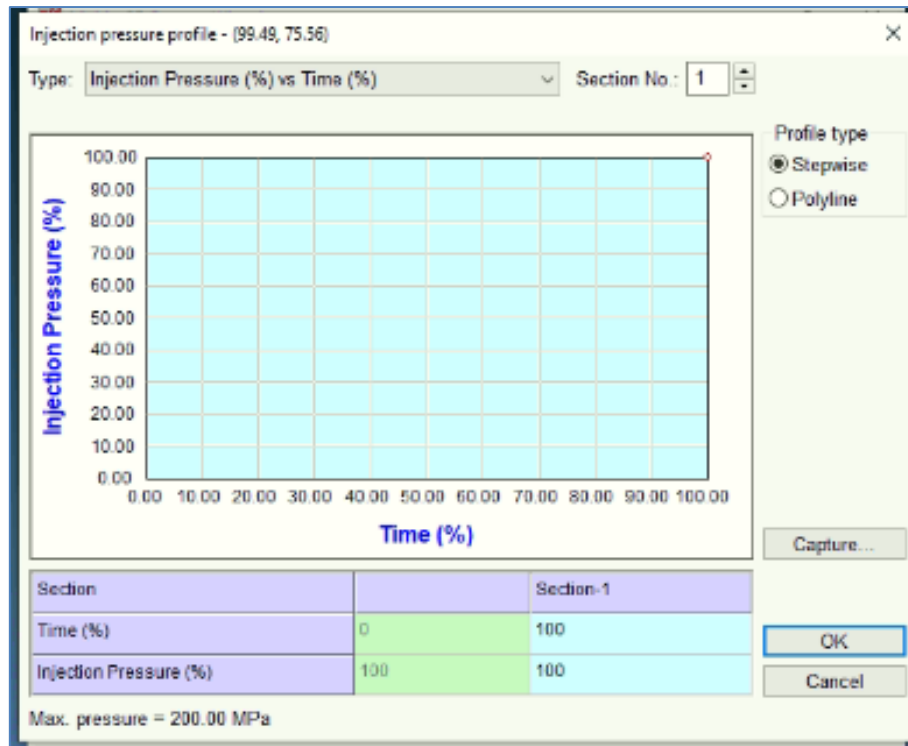
Μετάπειτα, επιλέγονται οι παράμετροι κατεργασίας που αφορούν τα δύο πρώτα στάδια της χύτευσης με έγχυση, δηλαδή τις παραμέτρους της πλήρωσης και συμπίεσης (Εικόνα 4- 14). Ανάμεσα σε αυτά που ορίζονται είναι τα χρονικά διαστήματα για τα οποία διαρκούν τα στάδια αυτά και τα προφίλ των πιέσεων που αντιστοιχούν σε αυτά. Προκειμένου να διερευνηθούν τα όρια του συστήματος και δεδομένου ότι στις προσομοιώσεις η πίεση έγχυσης δεν φτάνει τα ορισθέντα ανώτερα όρια, το προφίλ της πίεσης έγχυσης δεν τροποποιείται από το προτεινόμενο (Εικόνα 4- 15). Για το προφίλ της πίεσης συμπίεσης ακολουθείται μια

πρότυπη μορφή (Εικόνα 4- 16). Η αποδοτικότερη πίεση συμπίεσης ξεκινά συνήθως από το 70-80% της πίεσης που έχει αναπτυχθεί στο τέλος της φάσης έγχυσης και μειώνεται σε τρία στάδια.

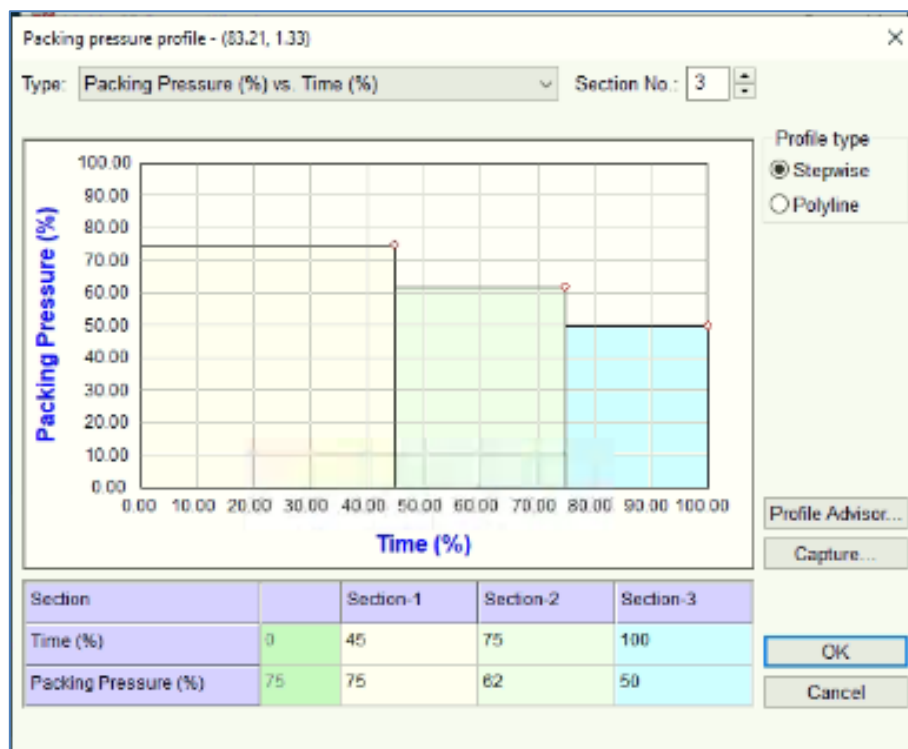
Επιλέγεται το ποσοστό μετάβασης από το στάδιο της πλήρωσης στο στάδιο της συμπίεσης (VP Switchover) να παραμείνει στην προκαθορισμένη τιμή του 98%, ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε ζημιά στην μηχανή έγχυσης. Η πλήρωση που έχει επιτευχθεί στο σημείο μετάβασης φαίνεται στην Εικόνα 4- 17. Για μεγαλύτερα ποσοστά αυτής της παραμέτρου, η ταχύτητα ροής του πολυμερούς και η πίεση στο εσωτερικό της κοιλότητας συνήθως ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια του εξοπλισμού. Κάτι τέτοιο, ενδεχομένως να προκαλέσει την αντιστροφή της ροής του πολυμερούς τήγματος προς το σύστημα διανομής και σε επόμενο βαθμό την εμφάνιση ελαττωμάτων στο τελικό προϊόν. Ακόμη, ρυθμίζονται οι θερμοκρασίες πολυμερούς τήγματος και καλουπιού. Η πρώτη θερμοκρασία αναφέρεται στην θερμοκρασία εισόδου του τήγματος στο πλέγμα της πύλης εισόδου και ενδέχεται να διαφέρει της θερμοκρασίας του υλικού εντός του κυλίνδρου μορφοποίησης λόγω του φαινομένου της ιξώδους θέρμανσης.



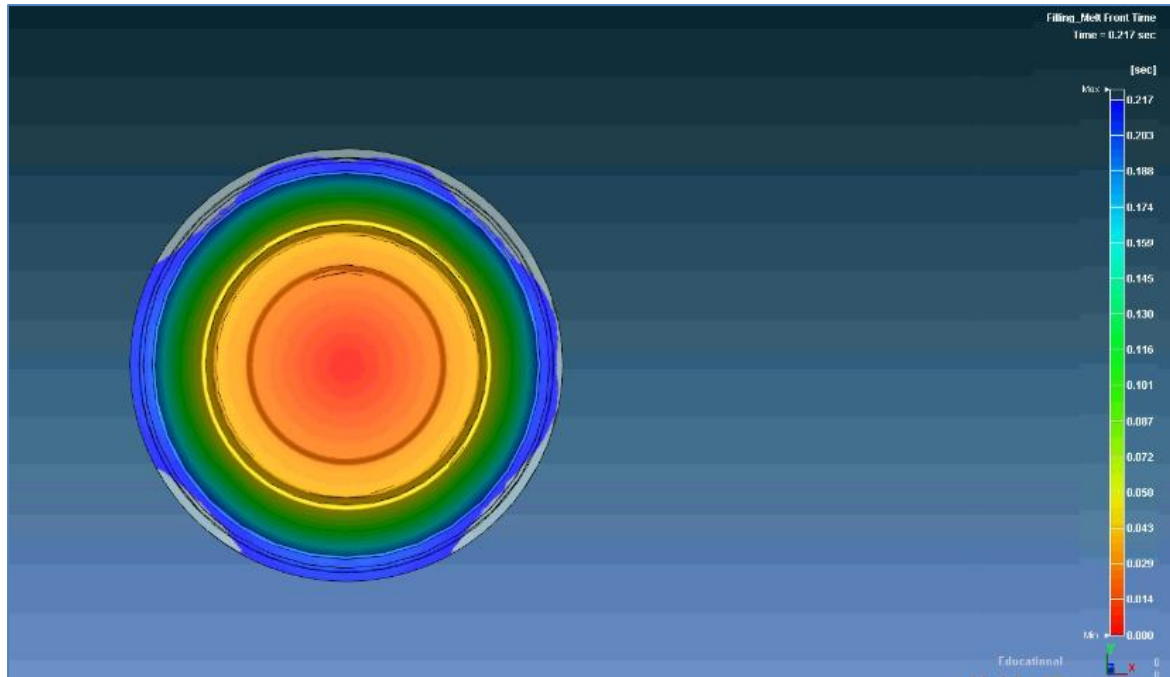
Εικόνα 4- 14: Παράμετροι κατεργασίας που αφορούν τα στάδια πλήρωσης και συμπίεσης



Εικόνα 4- 15: Προφίλ πίεσης έγχυσης



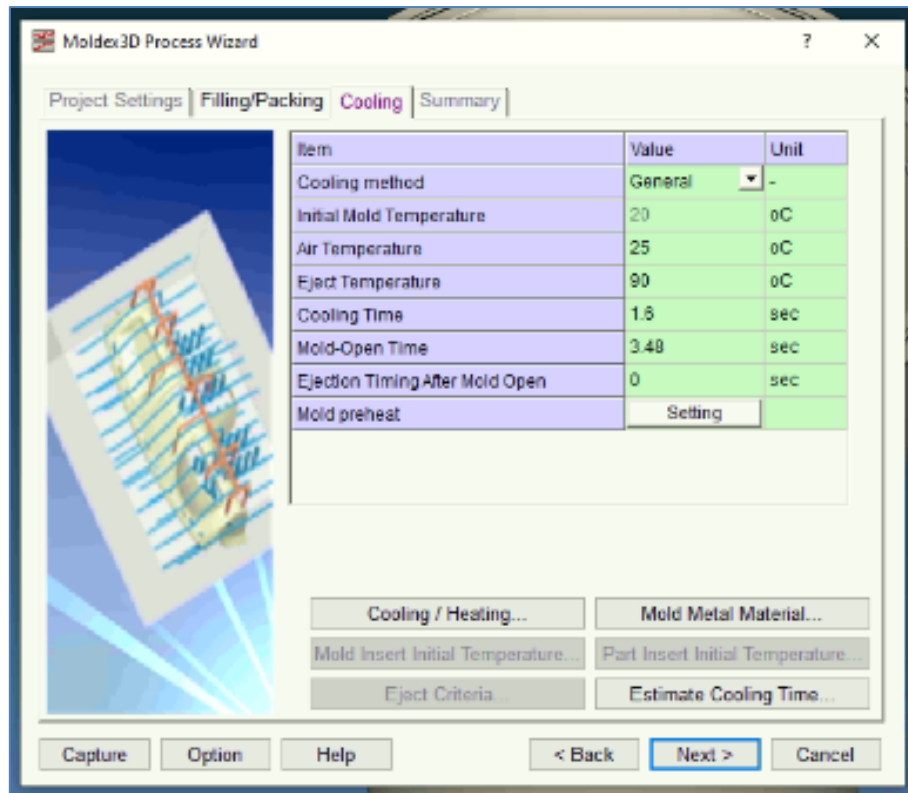
Εικόνα 4- 16: Προφίλ πίεσης για το στάδιο της συμπίεσης



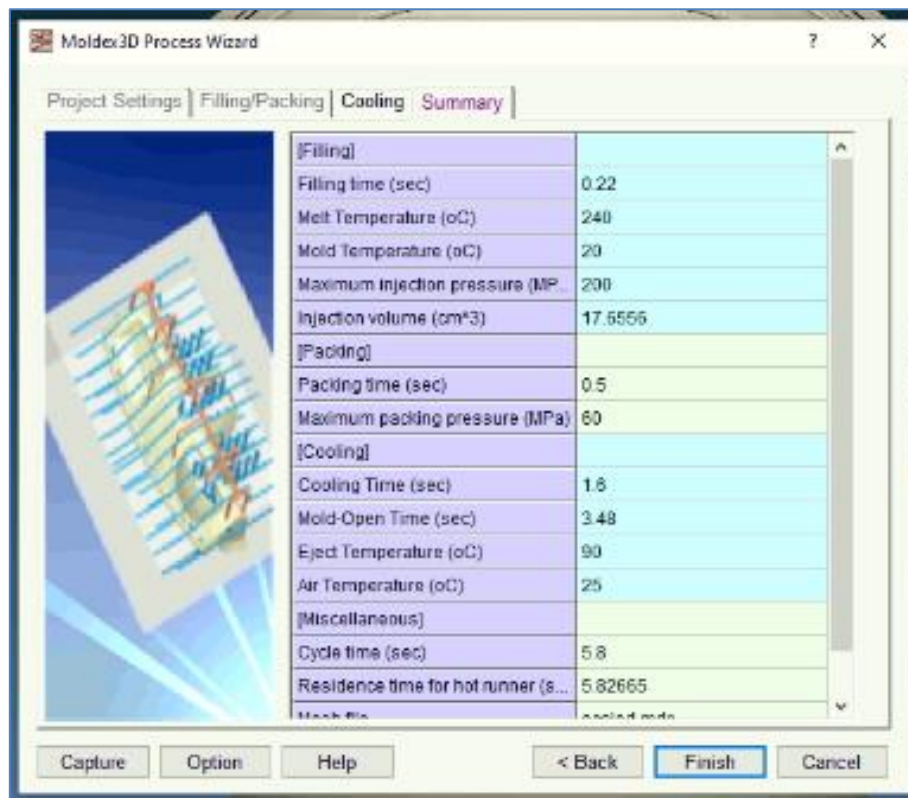
Εικόνα 4- 17: Η πλήρωση του τεμαχίου στο 98%, όπου και λαμβάνει χώρα η εναλλαγή των σταδίων έγχυσης-συμπύεσης

Ακολουθεί ο καθορισμός των παραμέτρων της φάσης ψύξης. Να σημειωθεί ότι η ψύξη δεν θα μελετηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, οπότε και οι παράμετροι που εισάγονται παραμένουν ίδιες σε όλες τις προσομοιώσεις. Οι τιμές των παραμέτρων που σημειώνονται στην Εικόνα 4- 18 έχουν προκύψει έπειτα από την καθοδήγηση των έμπειρων μηχανικών της εταιρείας. Ο χρόνος για το στάδιο της ψύξης ανέρχεται στα 1.6 (s), ενώ ο χρόνος για τον οποίο το καλούπι παραμένει ανοιχτό στα 3.48 (s). Στον δεύτερο χρόνο, συνυπολογίζονται οι χρόνοι που χρειάζεται το καλούπι να ανοίξει πλήρως και να κλείσει, ο χρόνος που απαιτείται για την εξόλκευση του τεμαχίου και τέλος ο χρόνος μεταξύ δύο κύκλων. Οι υπόλοιποι παράμετροι παραμένουν με τις προκαθορισμένες από το λογισμικό τιμές. Η θερμοκρασία εξόλκευσης ορίζεται βάση του υλικού που έχει επιλεγεί. Είναι συνήθως 20-30 (°C) χαμηλότερη της θερμοκρασίας στερεοποίησης του υλικού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του απαιτούμενου χρόνου ψύξης. Στο τελικό παράθυρο της παραμετροποίησης της κατεργασίας εμφανίζεται μια σύνοψη όλων των παραμέτρων που ορίστηκαν προηγουμένως (Εικόνα 4- 19).



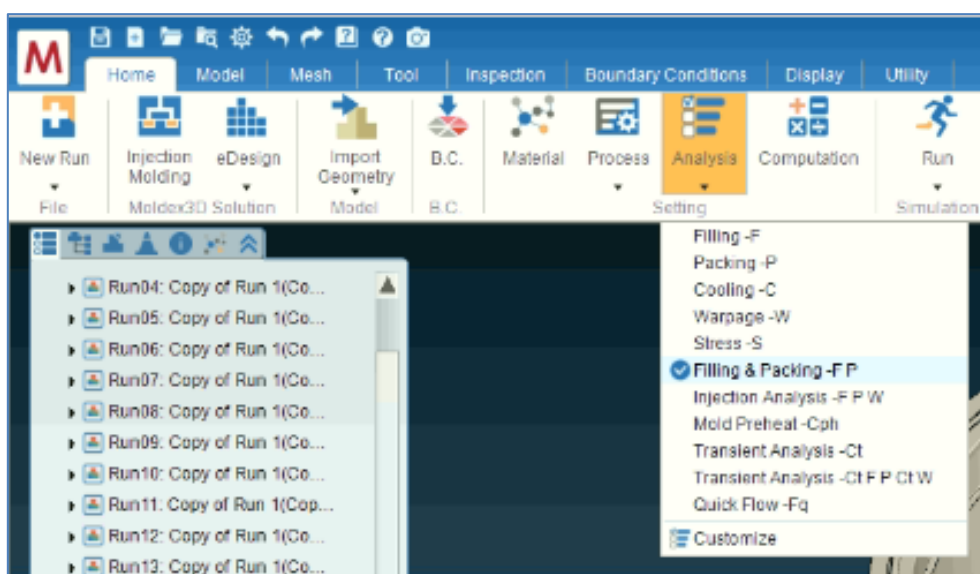


Εικόνα 4- 18: Παράμετροι ψύξης



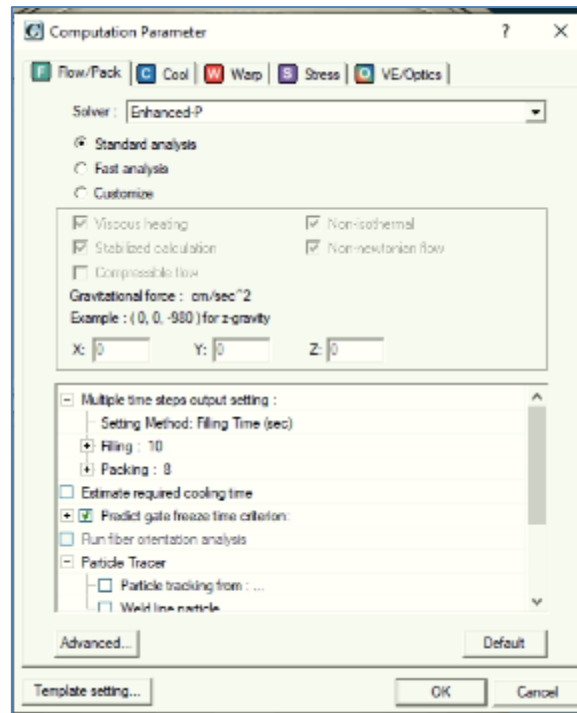
Εικόνα 4- 19: Γενική επισκόπηση των παραμέτρων κατεργασίας

Αφού παραμετροποιηθεί πλήρως η κατασκευαστική διεργασία, επιλέγεται το είδος της ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί (Εικόνα 4- 20). Η παρούσα διπλωματική εστιάζει στις δύο πρώτες φάσεις της κατεργασίας. Μελετάται η πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης ως προς την εξισορρόπηση της ροής του υλικού και τις πιέσεις και δυνάμεις που αναπτύσσονται εντός της κοιλότητας. Έτσι λοιπόν, πραγματοποιήθηκαν δύο ειδών αναλύσεις. Για τις τυπικές προσομοιώσεις του σχεδιασμού πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για τις φάσεις έγχυσης και συμπίεσης (*Filling & Packing –F P*), ενώ στα αρχικά στάδια εξοικείωσης και πειραματισμού, καθώς επίσης και για τις επιβεβαιωτικές προσομοιώσεις, επιλέχθηκε ανάλυση έγχυσης (*Injection Analysis –F P W*).



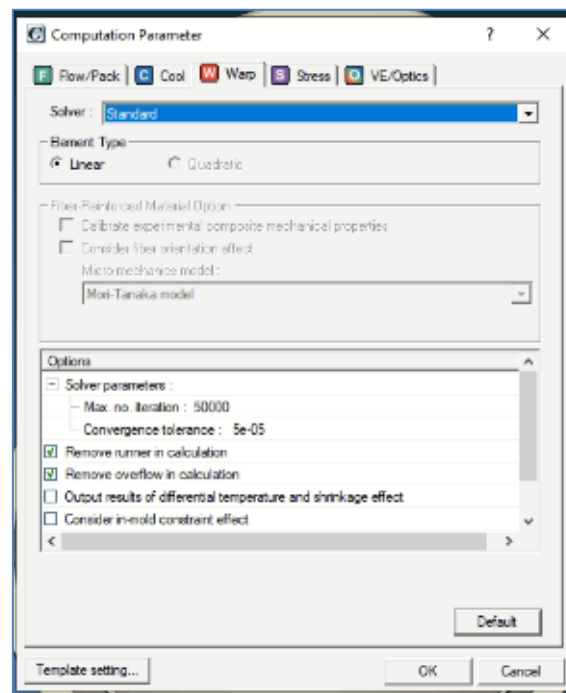
Εικόνα 4- 20: Επιλογή τύπου ανάλυσης για την προσομοίωση

Το τελικό βήμα στο στάδιο της διεργασίας είναι η παραμετροποίησης της υπολογιστικής διεργασίας (Εικόνα 4- 21 και Εικόνα 4- 22). Για το στάδιο της πλήρωσης και συμπίεσης επιλέγεται ως επιλύτης ο «Enhanced P». Ο επιλύτης αυτός προτείνεται για λεπτότοιχα τεμάχια με μεγάλο λόγο μήκους ροής/πάχους τοιχωμάτων (*L/T Ratio*). Κατά την ανάλυση, λαμβάνεται υπόψιν, μεταξύ των άλλων, η ιξώδης θέρμανση (*viscous heating*) και η επίδρασή της στην θερμοκρασία του πολυμερούς, η μη ισοθερμική ροή (*Non-isothermal*), προκειμένου να συνυπολογιστούν οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός της κοιλότητας και η επιρροή τους στις ιδιότητες της ροής τήγματος, και η μη νευτωνική ροή (*Non-Newtonian flow*), δηλαδή η μεταβλητότητα του ιξώδους ανάλογα με τον ρυθμό διάτμησης (Εικόνα 4- 21).



Εικόνα 4- 21: Παράμετροι υπολογιστικής διαδικασίας για τις φάσεις πλήρωσης και συμπίεσης

Στην παρούσα εργασία, για τους δύο τύπους ανάλυσης που πραγματοποιούνται θεωρείται ιδανική ψύξη, δηλαδή τέλεια απαγωγή θερμότητας. Για τον λόγο αυτό, ο υπολογισμός της στρέβλωσης είναι εντελώς ενδεικτικός και ενδέχεται να διαφέρει από τον πραγματικό. Επομένως, οι παράμετροι της υπολογιστικής διαδικασίας της στρέβλωσης παραμένουν ως οι πρότυποι του λογισμικού (Εικόνα 4- 22).



Εικόνα 4- 22: Παράμετροι υπολογιστικής διαδικασίας για την στρέβλωση

### 4.3.3. Μετα-επεξεργασία

#### 4.3.3.1. Αποτελέσματα φάσης έγχυσης

Η προσομοίωση της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D είναι πρωταρχικής σημασίας για έναν μηχανικό, διότι οπτικοποιείται το μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος και κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούν να προβλεφθούν μερικά από τα πιο κοινά προβλήματα που αντιμετωπίζονται στην χύτευση με έγχυση. Παρατηρώντας τα μοτίβα πλήρωσης, ένας μηχανικός μπορεί να προβλέψει:

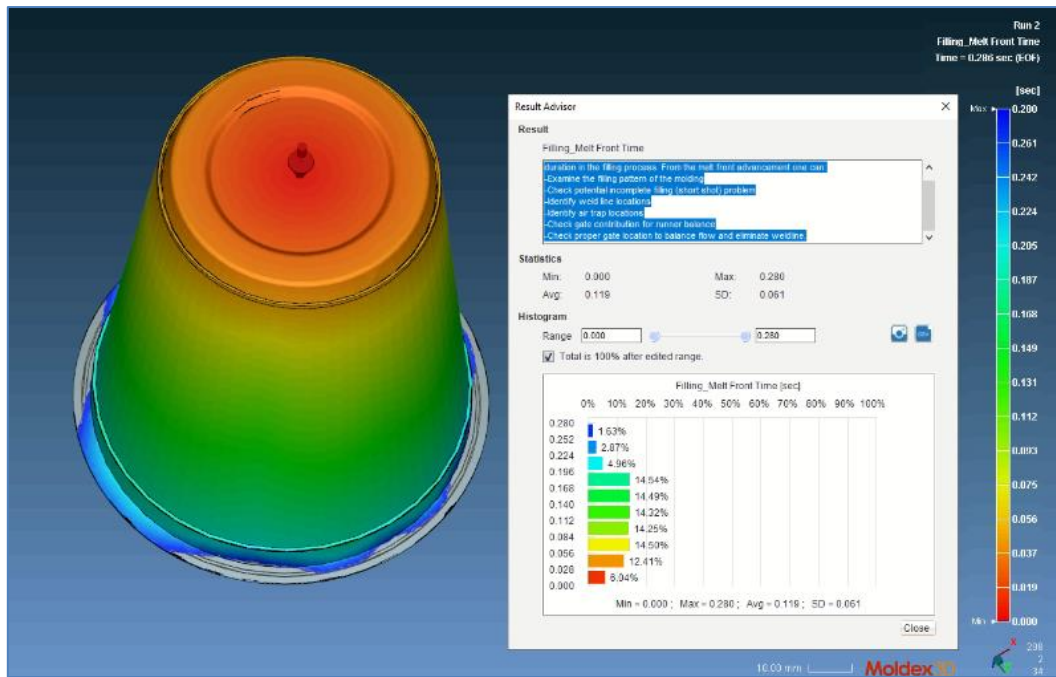
- Την ελλιπή πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης (short shot)
- Γραμμές συγκόλλησης (weld lines)
- Εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα (air traps)
- Αξιολόγηση δικτύου διανομής (runner system) και πυλών εισόδου (gate)
- Εξισορρόπηση ροής (flow balance)

Τα αποτελέσματα που μπορούν να αξιολογηθούν αναλύονται παρακάτω.

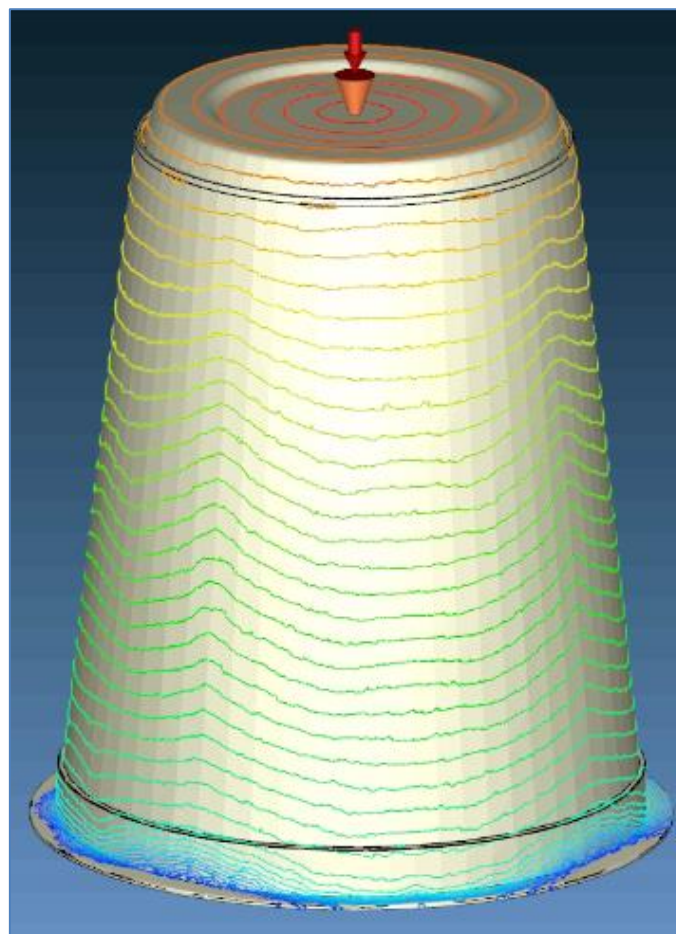
#### Χρόνος Μετώπου Ροής (Melt Front Temperature)

Απεικονίζεται η θέση του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος σε κάθε χρονική στιγμή υπολογισμού της φάσης πλήρωσης. Αποτελεί ένα από τα πιο χρήσιμα αποτελέσματα για μια προσομοίωση έγχυσης, καθώς προσφέρει εποπτεία επί των μοτίβων πλήρωσης της κοιλότητας και της συνεισφοράς των πυλών εισόδου. Επομένως, δύναται να προβλεφθούν τυχόν επιβραδύνσεις ροής που ενδέχεται να προκαλέσουν ελλιπή πλήρωση.

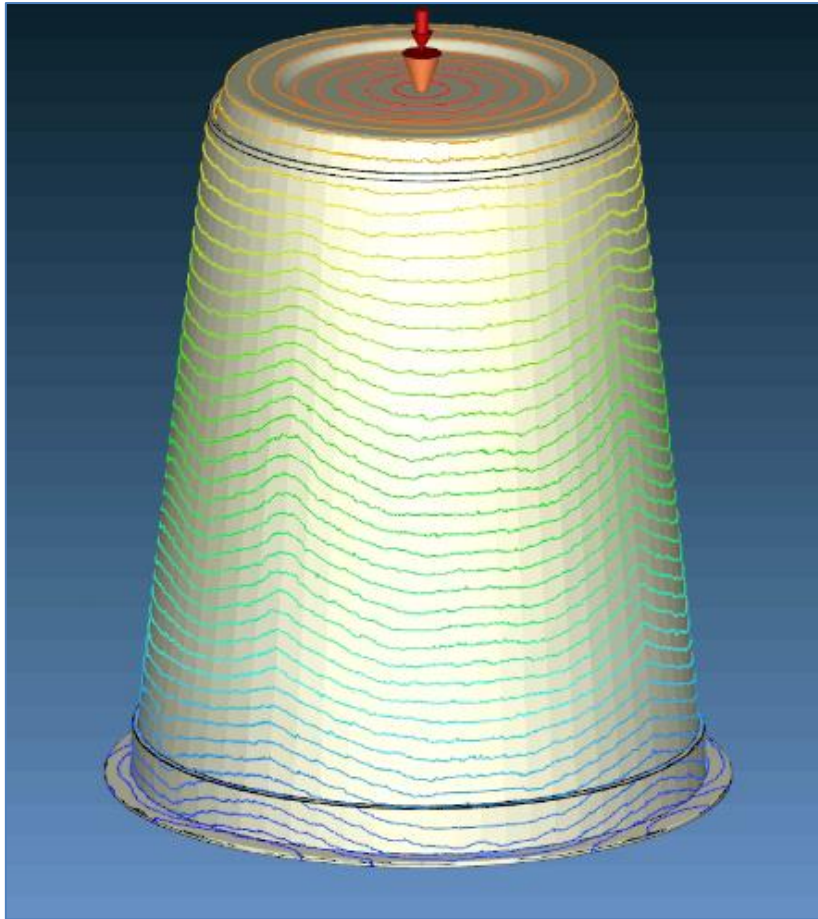
Για το προς μελέτη τεμάχιο, όπως φαίνεται από την Εικόνα 4- 23, παρατηρείται ομαλή και ισορροπημένη πλήρωση της κοιλότητας, με το μέτωπο ροής να καταλήγει ισόποσα στο γείσο του τεμαχίου. Μια επιπλέον οπτική επισκόπηση του μετώπου ροής γίνεται μέσω των ισοπαραμετρικών καμπύλων. Για υλικά με MFI45 παρατηρήθηκαν πυκνότερες ισοπαραμετρικές καμπύλες προς το τέλος του μετώπου ροής, το οποίο μεταφράζεται ως επιβράδυνση της ροής (Εικόνα 4- 24). Για τον λόγο αυτό, κατά τον σχεδιασμό πειραμάτων εξετάζονται και υλικά με μεγαλύτερο MFI, για τα οποία δεν παρατηρήθηκε κάποιο τέτοιο φαινόμενο (Εικόνα 4- 25).



Εικόνα 4- 23: Μέτωπο ροής στο τέλος της φάσης πλήρωσης



Εικόνα 4- 24: Ισοπαραμετρικές καμπύλες χρόνου μετώπου ροής για υλικό PP με MFI45



Εικόνα 4- 25: Ισοπαραμετρικές καμπύλες χρόνου μετώπου ροής για PP με MF170

#### Εγκλωβισμένες Φυσαλίδες Αέρα (Air Traps)

Εμφανίζονται οι θέσεις όπου πιθανότατα θα εγκλωβιστούν φυσαλίδες αέρα. Στην μελέτη του τεμαχίου στα πλαίσια της εργασίας δεν έχει συμπεριληφθεί το δίκτυο εξαέρωσης. Το αποτέλεσμα αυτό έχει ήδη αξιοποιηθεί στον σχεδιασμό του καλουπιού με την ενσωμάτωση σημείων εξαέρωσης στις περιοχές αυτές.

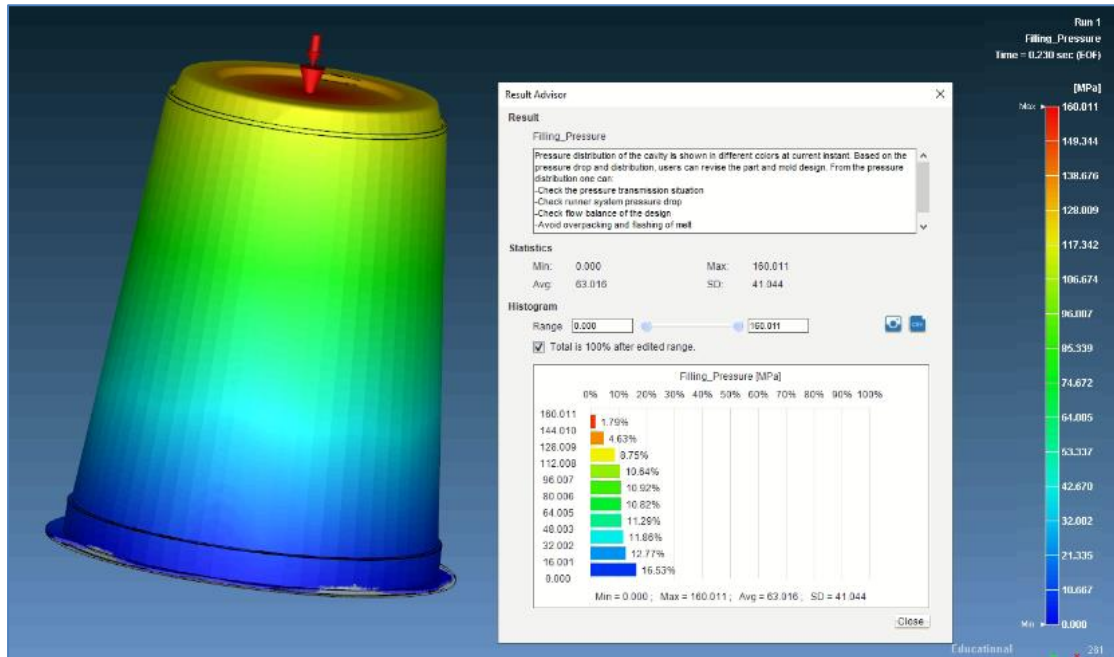
#### Γραμμές Συγκόλλησης (Weld Line)

Οπτικοποιούνται οι πιθανές περιοχές του προϊόντος με ασθενέστερη δομή. Στο παρόν προϊόν μελέτης, δεν παρατηρήθηκαν καθόλου γραμμές συγκόλλησης καθ' όλη την φάση πειραματισμού.

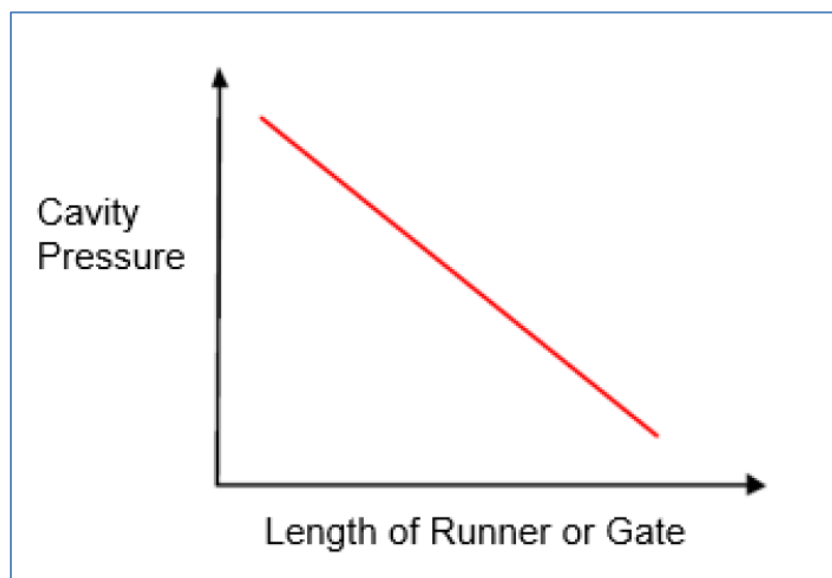
#### Πίεση (Pressure)

Η κατανομή της πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης παρουσιάζεται με διαφορετικά χρώματα. Παρατηρείται μια εν γένει ομοιόμορφη κατανομή πίεσης (Εικόνα 4- 26). Εφόσον, στην μελέτη του τεμαχίου δεν έχει ληφθεί υπόψιν το δίκτυο διανομής του πολυμερούς τήγματος, η πραγματική πίεση θα διαφέρει. Πιο συγκεκριμένα, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνα 4- 27, η πίεση έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με το μήκος των αγωγών διανομής, οπότε και για μεγάλα μήκη παρουσιάζεται μεγάλη πτώση πίεσης. Στην προς μελέτη περίπτωση

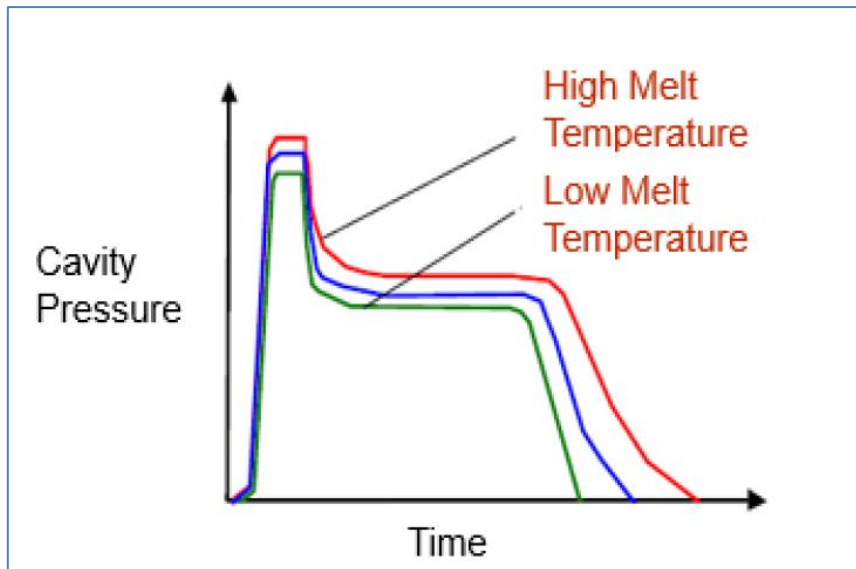
της εργασίας, δεδομένου ότι μελετάται καλούπι τεσσάρων κοιλοτήτων με προφανώς εκτενές δίκτυο αγωγών διανομής, η πτώση πίεσης που αναμένεται εντός της κοιλότητας μορφοποίησης θα είναι σχετικά υψηλή. Η πίεση επηρεάζεται και από την θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος, όπως στην Εικόνα 4- 28. Αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς συνεπάγεται μεγαλύτερο χρόνο πλήρωσης, καθώς οι πύλες εισόδου θα στερεοποιηθούν δυσκολότερα. Άρα, θα σημειωθεί μικρότερη πτώση πίεσης και επομένως ανάπτυξη μεγαλύτερων πιέσεων εντός της κοιλότητας.



Εικόνα 4- 26: Πίεση στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης



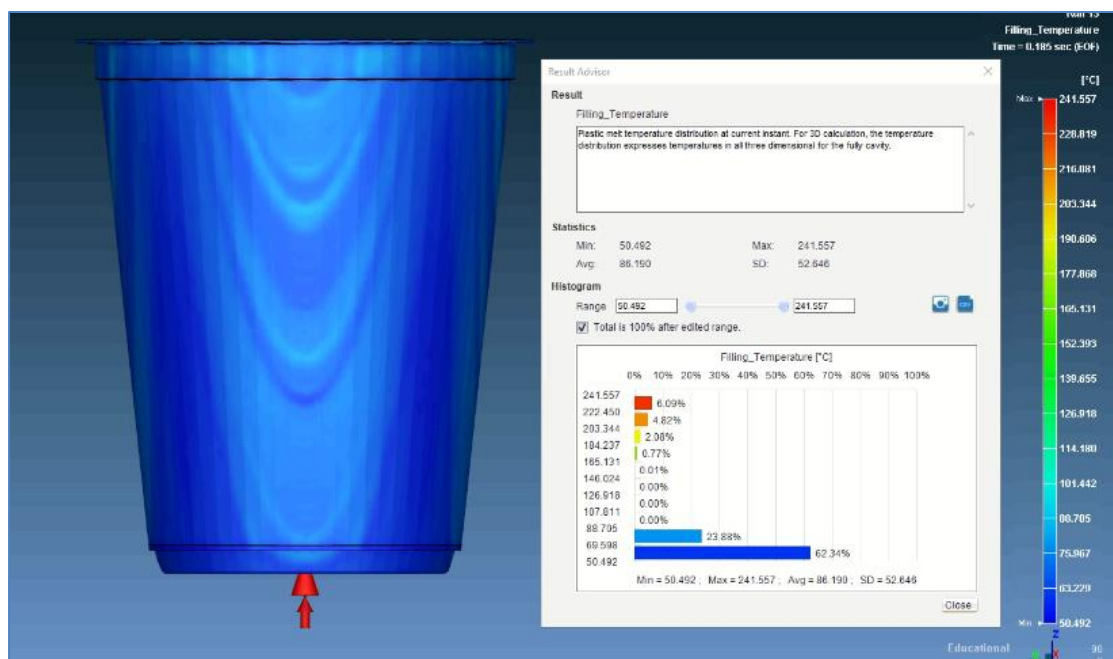
Εικόνα 4- 27: Πίεση στο εσωτερικό της κοιλότητας συναρτήσει του μήκους των αγωγών διανομής



Εικόνα 4- 28: Πίεση στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης για διαφορετικές θερμοκρασίες πολυμερούς τήγματος

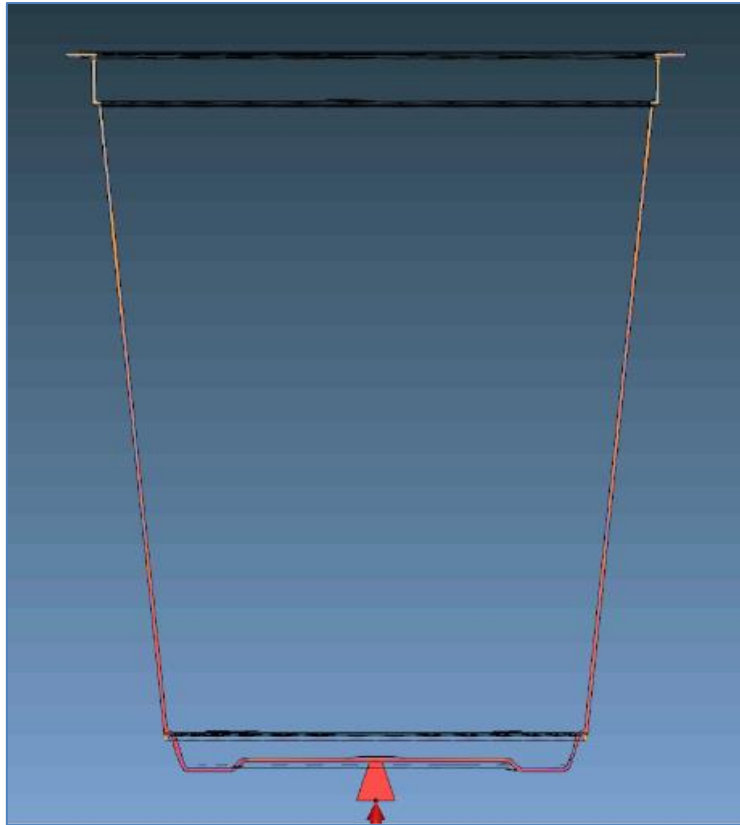
### Θερμοκρασία (Temperature)

Εμφανίζει τη κατανομή της θερμοκρασίας εντός της κοιλότητας για μια δεδομένη στιγμή. Παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία τήγματος είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την ορισθείσα στην παραμετροποίηση της κατεργασίας, συνήθως της τάξης των 1.5 °C. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται από την εντός φυσιολογικών πλαισίων ιξώδους θέρμανση του πολυμερούς. Κατά μήκος των τοιχωμάτων εντοπίζεται η πτώση της θερμοκρασίας λόγω της αγωγής με τα ψυχρά τοιχώματα του κοιλότητας μορφοποίησης (Εικόνα 4- 29), ενώ στον πυρήνα της κοιλότητας μορφοποίησης το υλικό παραμένει κοντά στη θερμοκρασία τήγματος (Εικόνα 4- 30).



Εικόνα 4- 29: Κατανομή θερμοκρασίας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης

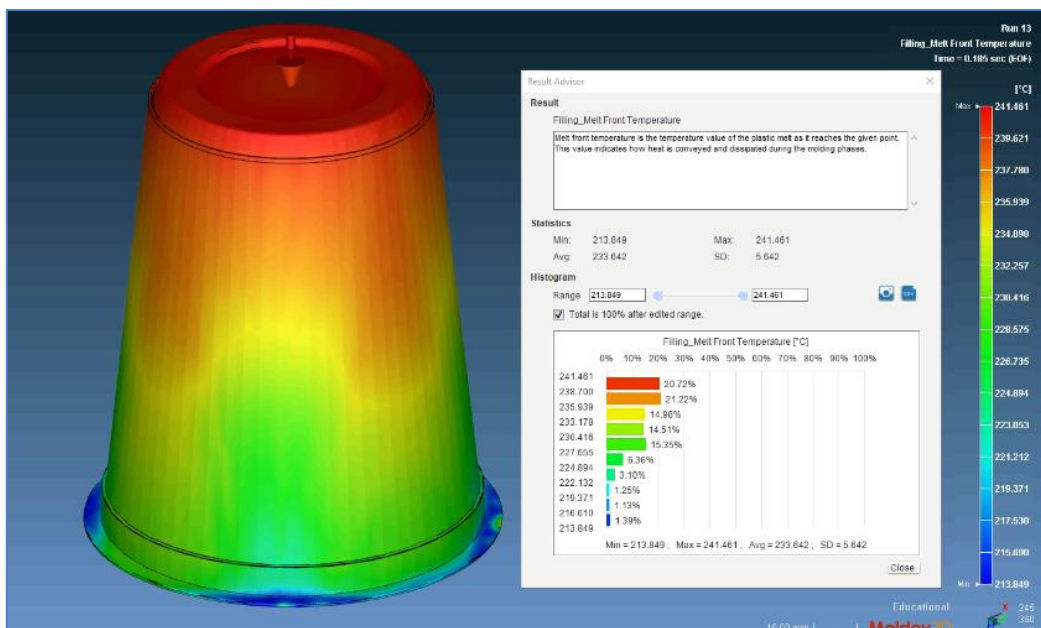




Εικόνα 4- 30: Θερμοκρασία του επικρατεί στον πυρήνα του τεμαχίου για μια δεδομένη στιγμή

Θερμοκρασία Μετώπου Ροής (Melt Front Temperature)

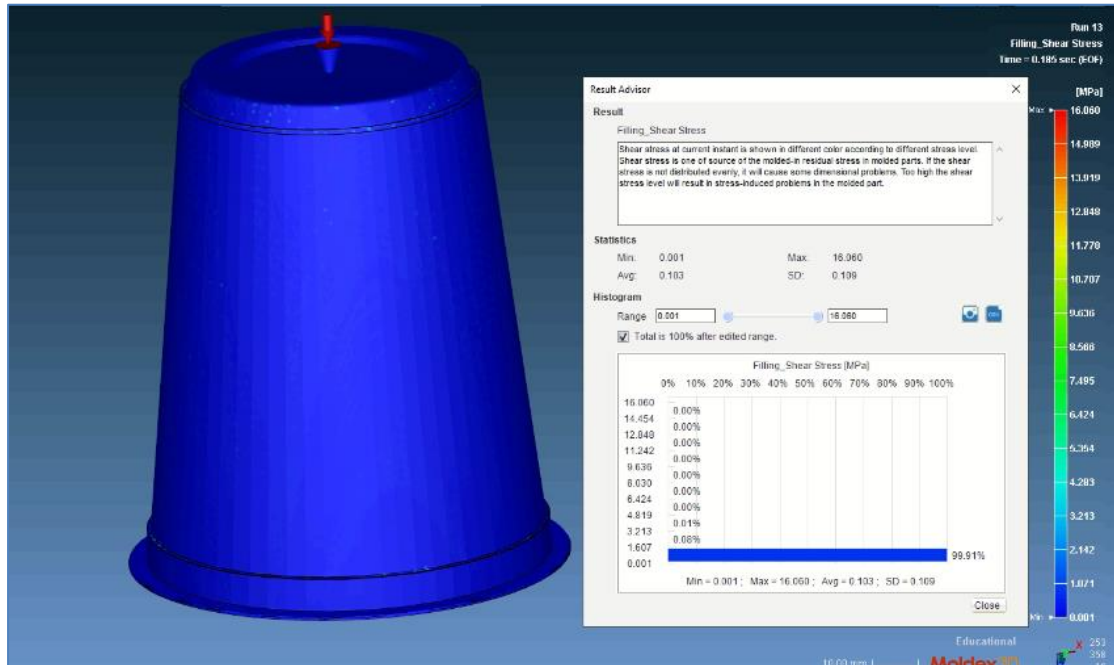
Απεικονίζει την θερμοκρασία του αντιστοιχεί στο μέτωπο ροής όταν αυτό φτάνει στο συγκεκριμένο σημείο, οπότε οι τιμές της θερμοκρασίας δεν αφορούν την ίδια χρονική στιγμή. Παρατηρείται μια εν γένει ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας, με μικρή θερμοκρασιακή πτώση καθώς το μέτωπο ροής προχωράει (Εικόνα 4- 31).



Εικόνα 4- 31: Θερμοκρασία μετώπου ροής

### Διατμητική Τάση (Shear Stress)

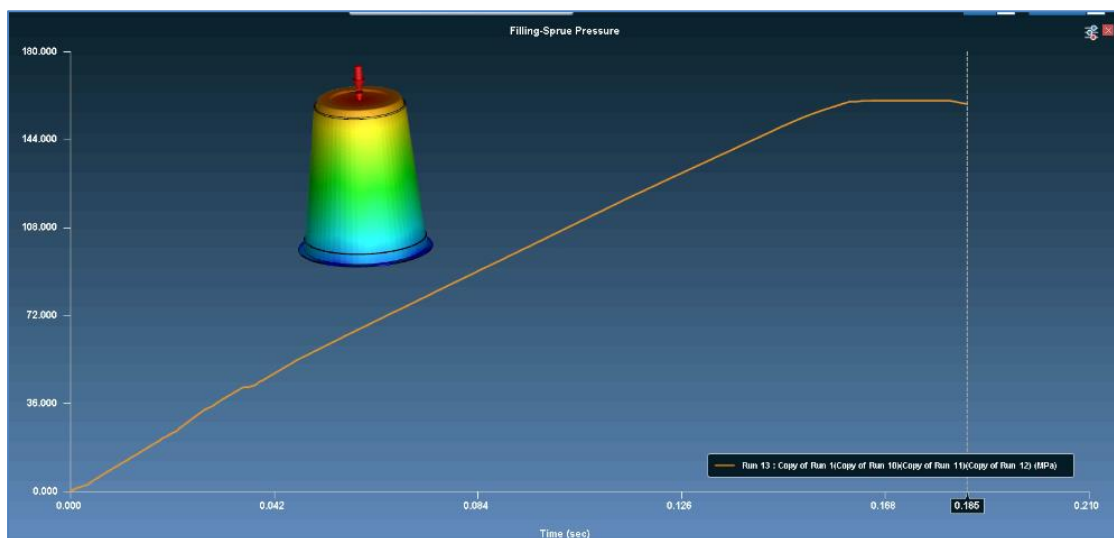
Εμφανίζεται η κατανομή της διατμητικής τάσης με διαφορετικά χρώματα. Ιδανικά, επιδιώκεται η διατμητική τάση να κατανέμεται ομαλά και να είναι όσο τον δυνατόν χαμηλότερη, όπως ισχύει στην συγκεκριμένη περίπτωση (Εικόνα 4- 32).



Εικόνα 4- 32: Επίπεδα διατμητικής τάσης

### Πίεση στο κάθετο κανάλι (Sprue Pressure)

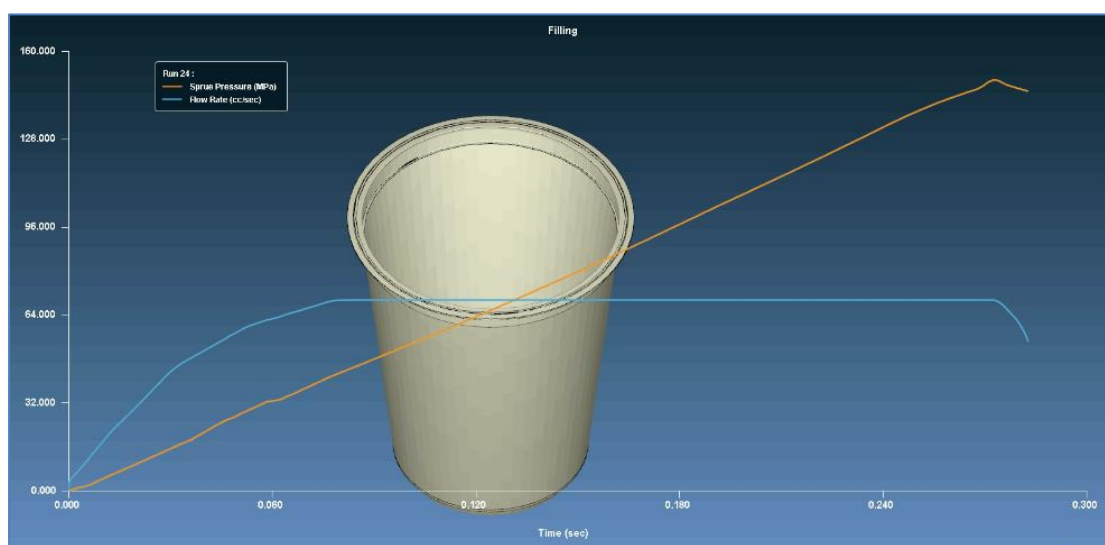
Δίνεται η καμπύλη της πίεσης (MPa) που αναπτύσσεται στο κάθετο κανάλι συναρτήσει του χρόνου πλήρωσης (s). Σε όλες τις δοκιμές παρατηρήθηκε ομαλή αύξηση της πίεσης και αποσαφηνίστηκε η τάξη μεγέθους της απαιτούμενης πίεσης έγχυσης (Εικόνα 4- 33).



Εικόνα 4- 33: Πίεση στο κάθετο κανάλι

### Παροχή Τήγματος (Flow Rate)

Η παροχή του τήγματος (cc/s) επιλέγεται να ελεγχθεί παράλληλα με την πίεση στο κάθετο κανάλι, καθώς πρόκειται για δύο αλληλοεξαρτώμενα μεγέθη (Εικόνα 4- 34). Κατά το πρώτο στάδιο της έγχυσης, η πλήρωση ελέγχεται από την ταχύτητα ροής του υλικού, η οποία αυξάνεται σταδιακά μέχρι μια μέγιστη τιμή, οπότε και παραμένει σταθερή. Ανάλογα με την αντίσταση ροής, η πίεση αυξάνεται μέχρι να φτάσει μια μέγιστη τιμή, οπότε και πραγματοποιείται η μετάβαση στο στάδιο συμπίεσης. Στο στάδιο συμπίεσης η ροή ελέγχεται από την πίεση και η παροχή αρχίζει σταδιακά με πέφτει.



Εικόνα 4- 34: Παροχή ροής τήγματος συγκριτικά με την πίεση στο κάθετο κανάλι

#### **4.3.3.2. Αποτελέσματα φάσης πλήρωσης**

Με την προσομοίωση της φάσης της συμπίεσης δύναται να ελεγχθούν:

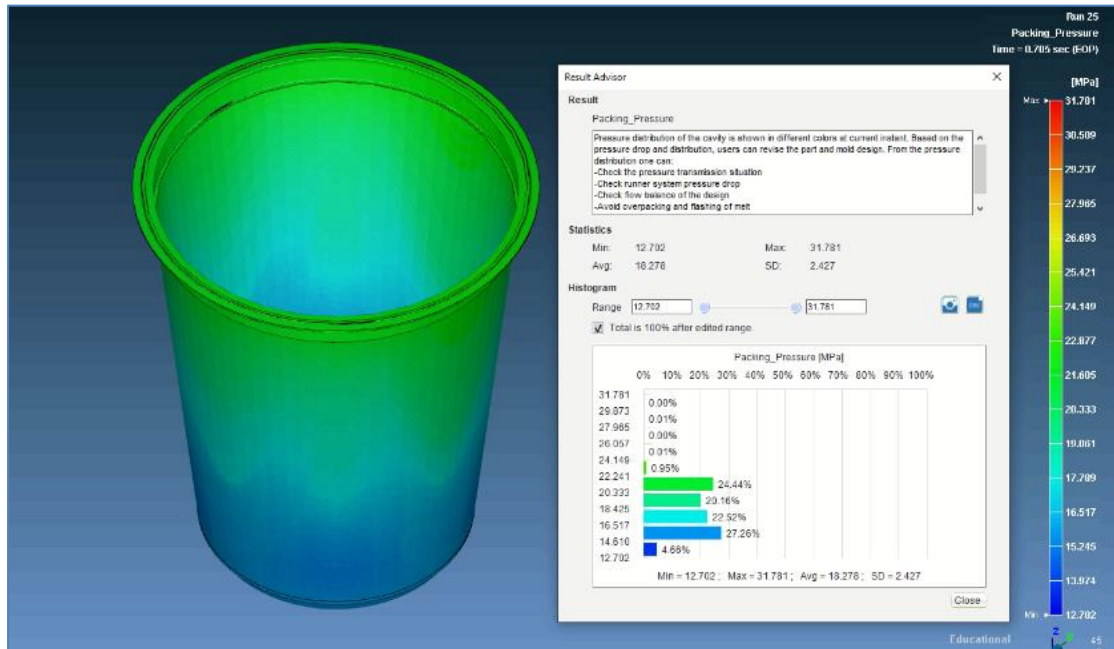
- Η αποδοτικότητα του συστήματος τροφοδοσίας
- Η εμφάνιση κατασκευαστικών ελαττωμάτων, όπως τα βαθουλώματα, και αισθητικών ατελειών
- Η απαιτούμενη δύναμη του κλειστικού για το προς μελέτη τεμάχιο
- Ο απαραίτητος χρόνος συμπίεσης

Από τα διαθέσιμα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτά που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον κατά την μελέτη του προϊόντος παρατίθενται παρακάτω.

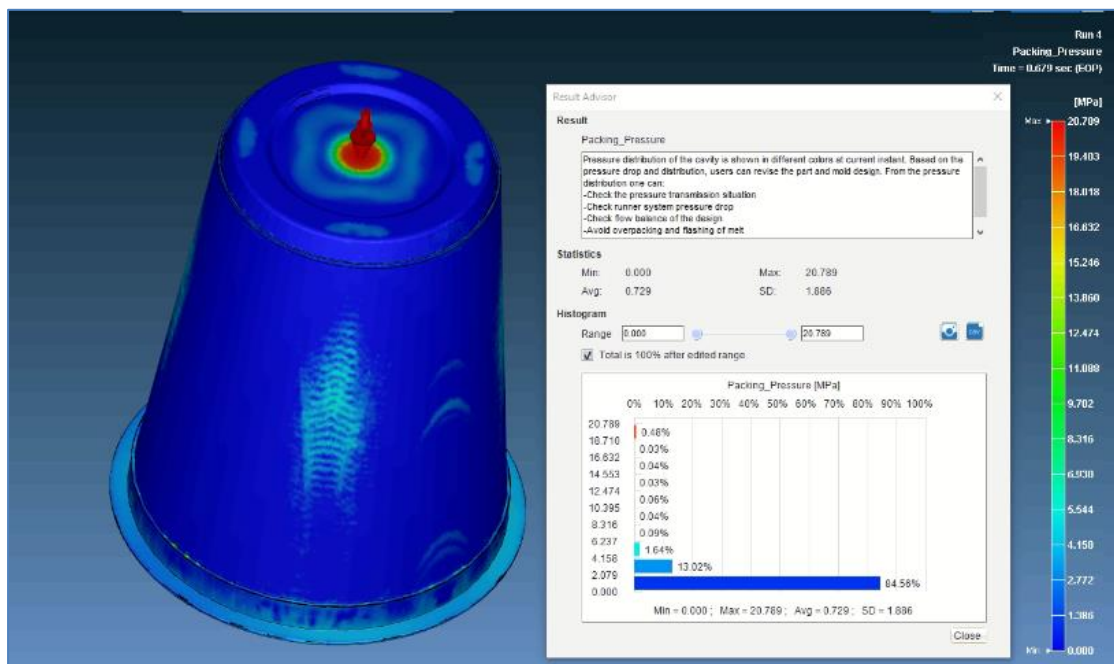
### Πίεση (Pressure)

Σε αντιστοιχία με το αποτέλεσμα της πίεσης για την φάση της πλήρωσης, οπτικοποιείται η κατανομή της πίεσης στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης για το στάδιο της συμπίεσης. Ιδανικά, επιδιώκεται μια ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης κατά το πέρασ του σταδίου συμπίεσης, όπως στην Εικόνα 4- 35. Ωστόσο, στο αρχικό στάδιο μελέτης και πειραματισμού, παρατηρήθηκε σε αρκετές περιπτώσεις μια άνιση κατανομή της πίεσης (Εικόνα 4- 36). Το αποτέλεσμα αυτό εύκολα

συνδέθηκε με ακατάλληλους χρόνους συμπίεσης και πλήρωσης και μελετήθηκε παράλληλα με άλλα αποτελέσματα.



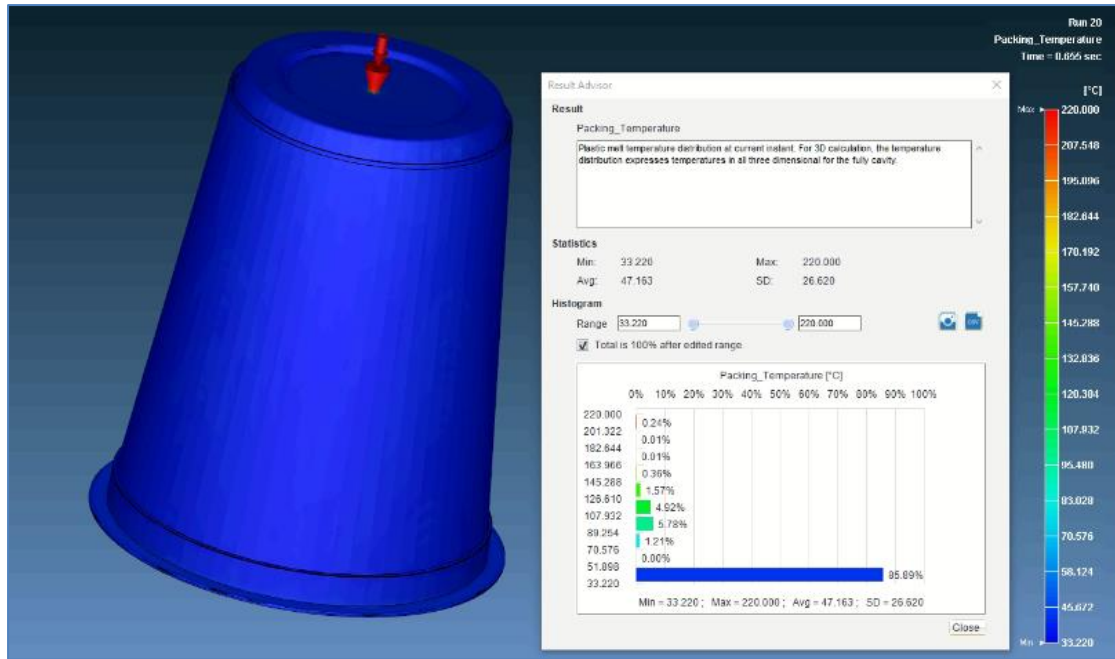
Εικόνα 4- 35: Ομοιόμορφη κατανομή πίεσης στο τέλος της φάσης συμπίεσης



Εικόνα 4- 36: Άνιση κατανομή της πίεσης στην κοιλότητα μορφοποίησης κατά το τέλος της φάσης συμπίεσης

### Θερμοκρασία (Temperature)

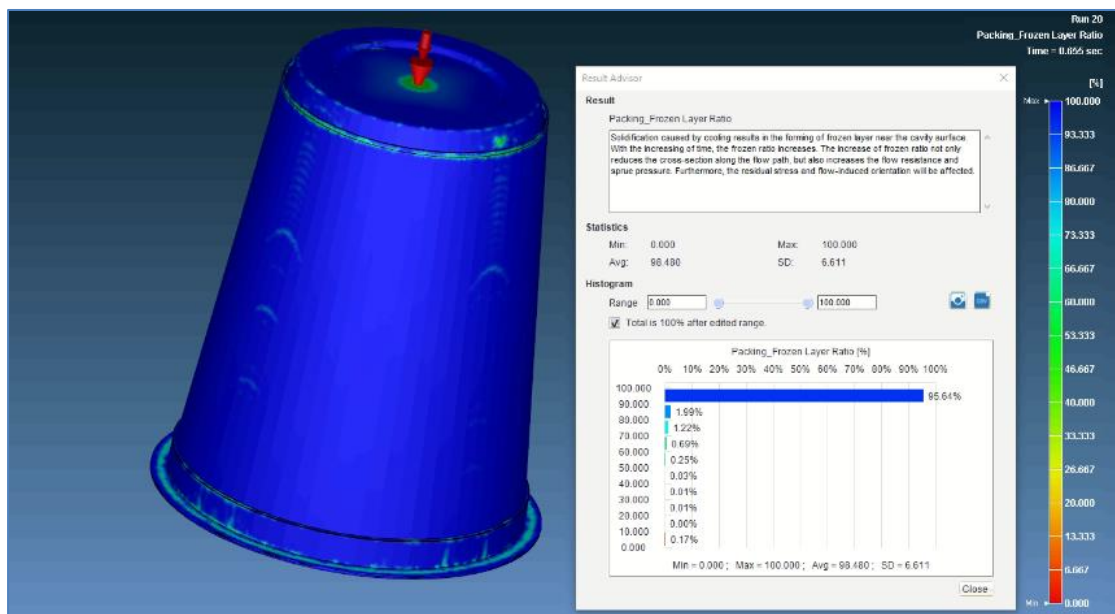
Με το πέρας της φάσης συμπίεσης, το μεγαλύτερο μέρος του τεμαχίου έχει ήδη στερεοποιηθεί (Εικόνα 4- 37).



Εικόνα 4- 37: Κατανομή της θερμοκρασίας στην κοιλότητα μορφοποίησης στο πέρας της φάσης συμπίεσης

### Ποσοστό Στερεοποιημένου Υλικού (Frozen Layer Ratio)

Σε αντιστοιχία με το αποτέλεσμα της θερμοκρασίας, δίνεται ο όγκος του στερεοποιημένου υλικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του τεμαχίου έχει στερεοποιηθεί με το πέρας της φάσης συμπίεσης (Εικόνα 4- 38).

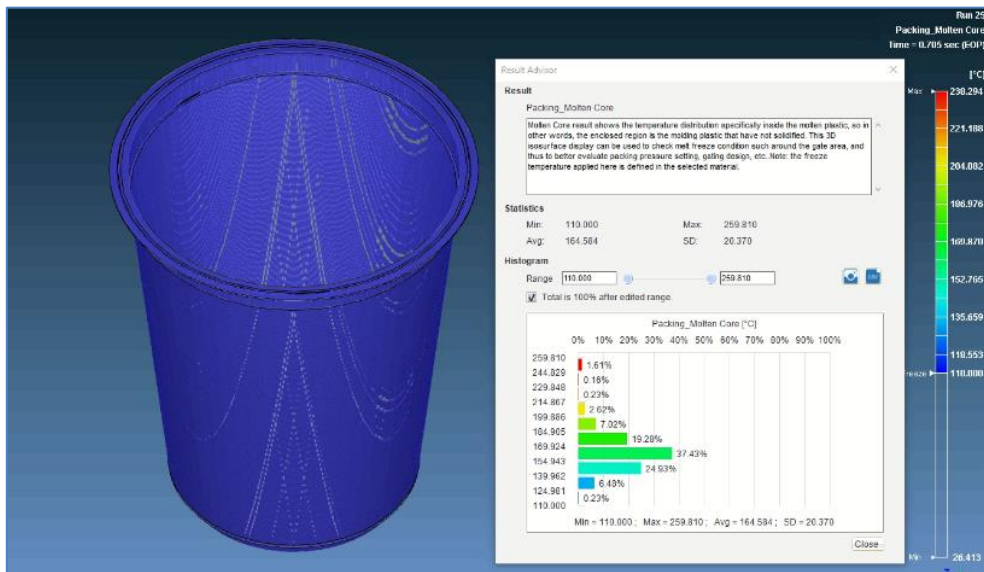


Εικόνα 4- 38: Ποσοστό όγκου στερεοποιημένου υλικού

### Τηγμένος Πυρήνας (Molten Core)

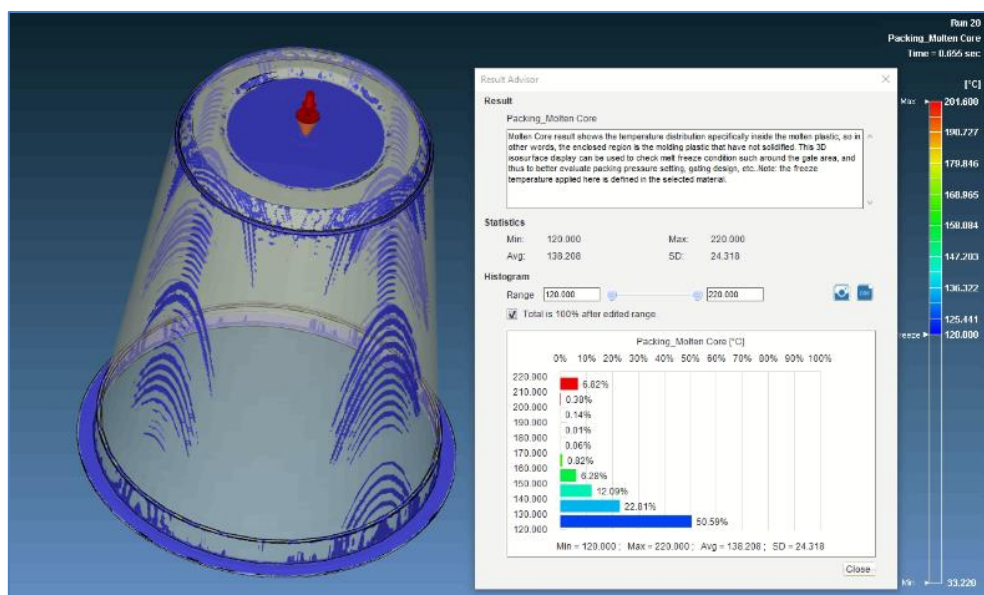
Οπτικοποιείται η ισοπαραμετρική επιφάνεια του στερεοποιημένου υλικού. Δίνεται λοιπόν η εικόνα που επικρατεί στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης. Κατά

την φάση της συμπίεσης, η εφαρμογή της πίεσης μπορεί να διανεμηθεί μόνο μέσω τηγμένου υλικού, οπότε και επιδιώκεται η επικράτηση της Εικόνα 4- 39.



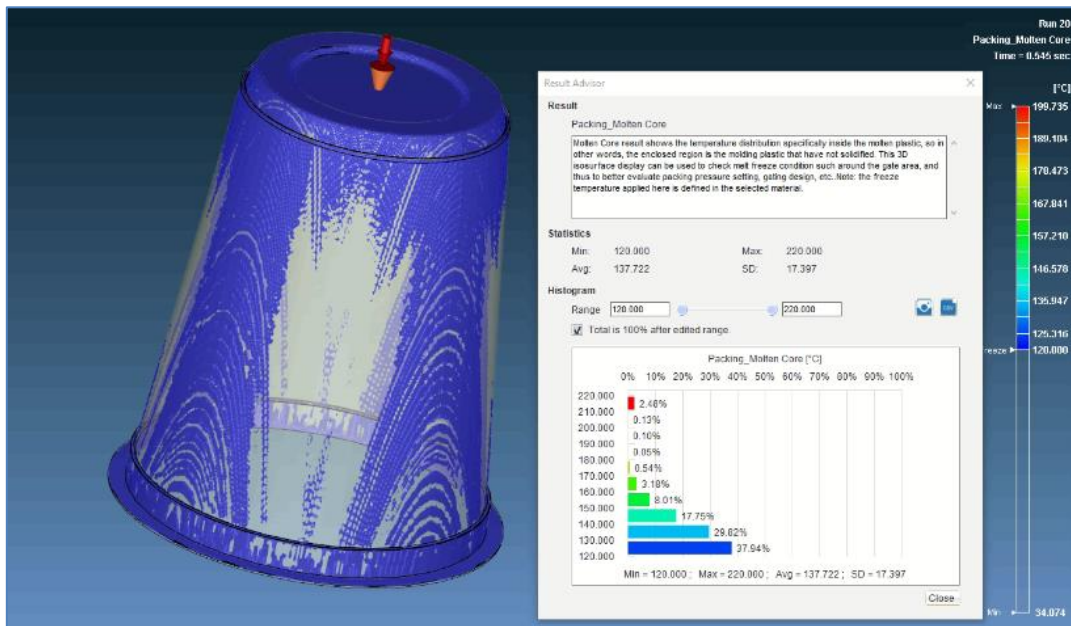
Εικόνα 4- 39: Ο πυρήνας της κοιλότητας παραμένει σε ρευστή κατάσταση με το πέρας της φάσης συμπίεσης

Ωστόσο, αρκετές ήταν οι περιπτώσεις που επικράτησε η Εικόνα 4- 40. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται συμπληρωματικά με τις προσομοιώσεις στις οποίες παρουσιάστηκε άνιση κατανομή της πίεσης. Όπως διακρίνεται, τα τοιχώματα του δοχείου έχουν ήδη στερεοποιηθεί ήδη πριν το τέλος της φάσης συμπίεσης, ενώ παράλληλα η περιοχή γύρω από την πύλη εισόδου και το γείσο παραμένουν σε ρευστή κατάσταση. Στην τομή της Εικόνα 4- 42, παρατηρούνται εσώκλειστες περιοχές με θερμοκρασία μεγαλύτερη εκείνης του στερεοποιημένου υλικού. Επομένως, αποκόπτεται η διανομή του υλικού στο εσωτερικό της κοιλότητας, καθιστώντας τη φάση της συμπίεσης μη αποδοτική.

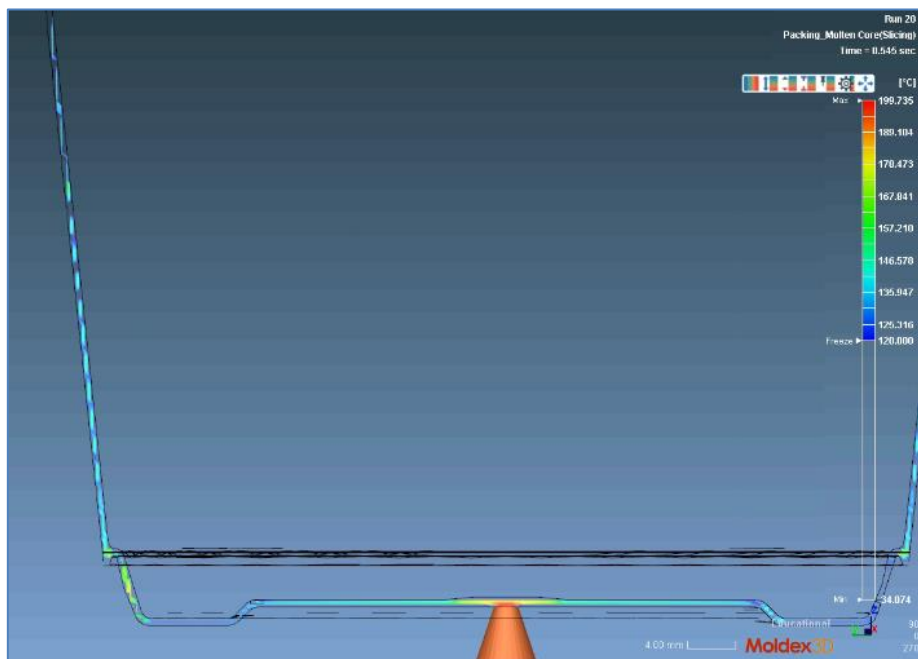


Εικόνα 4- 40: Περίπτωση στερεοποιημένων τοιχωμάτων στο πέρας της συμπίεσης

Πολλές μάλιστα ήταν οι περιπτώσεις όπου το φαινόμενο της αποκοπής της διανομής υλικού άρχισε να εμφανίζεται ήδη από τα μέσα της φάσης συμπίεσης (Εικόνα 4- 41). Οι περιπτώσεις αυτές συνδέθηκαν έντονα με ακατάλληλους χρόνους πλήρωσης και συμπίεσης, ενώ φάνηκε να βελτιώνεται με αύξηση της μέγιστης πίεσης ή και της θερμοκρασίας τήγματος. Ωστόσο να σημειωθεί ότι η αύξηση της πίεσης είναι γενικά μια οικονομικά ασύμφορη λύση, διότι ενδέχεται να χρειαστεί μηχανή μεγαλύτερης κλειστικής δύναμης.



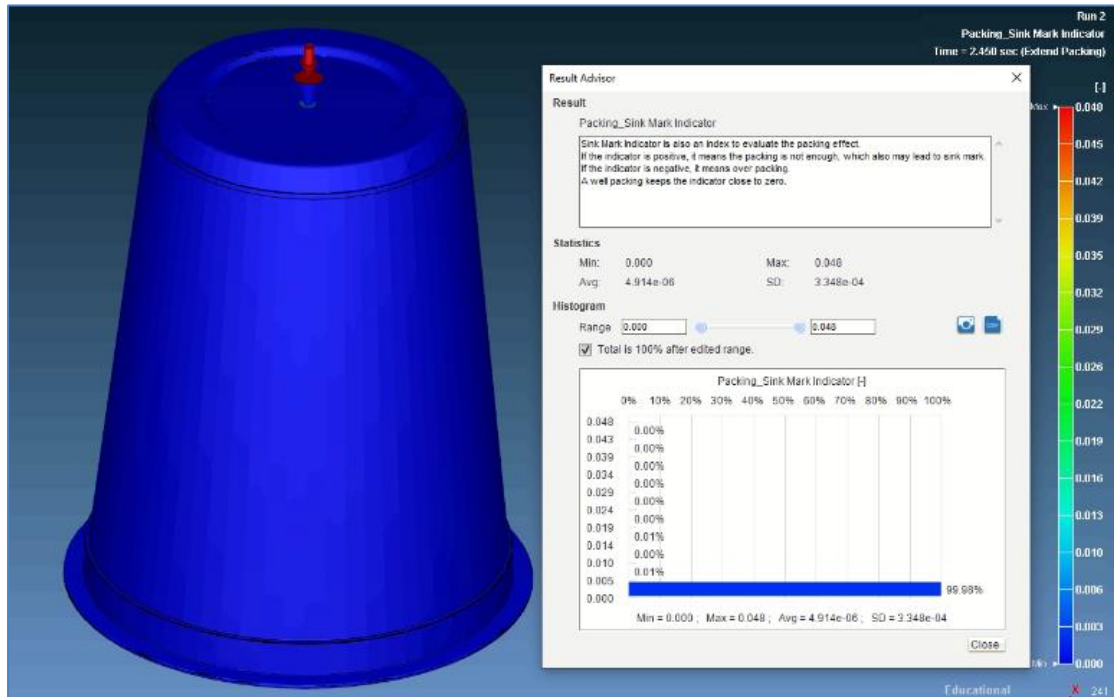
Εικόνα 4- 41: Η αρχή του φαινομένου στερεοποίησης του πυρήνα ήδη από τα μέσα της φάσης συμπίεσης



Εικόνα 4- 42: Εικόνα της θερμοκρασίας που επικρατεί στον πυρήνα της κοιλότητας σε τομή

### Δείκτης Βαθουλωμάτων (Sink Mark Indicator)

Αποτελεί έναν δείκτη αξιολόγησης της φάσης συμπίεσης. Γενικά, υψηλές θετικές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν ότι η συμπίεση δεν είναι επαρκής και η πιθανότητα για εμφάνιση βαθουλωμάτων υψηλή. Από την άλλη, αρνητική τιμή του δείκτη μεταφράζεται σαν υπερβολική συμπίεση του τήγματος (*overpacking*). Το ζητούμενο για μια ικανοποιητική συμπίεση είναι ο δείκτης αυτός να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρός και κοντά στο μηδέν, όπως συμβαίνει στο συγκεκριμένο τεμάχιο (Εικόνα 4-43).

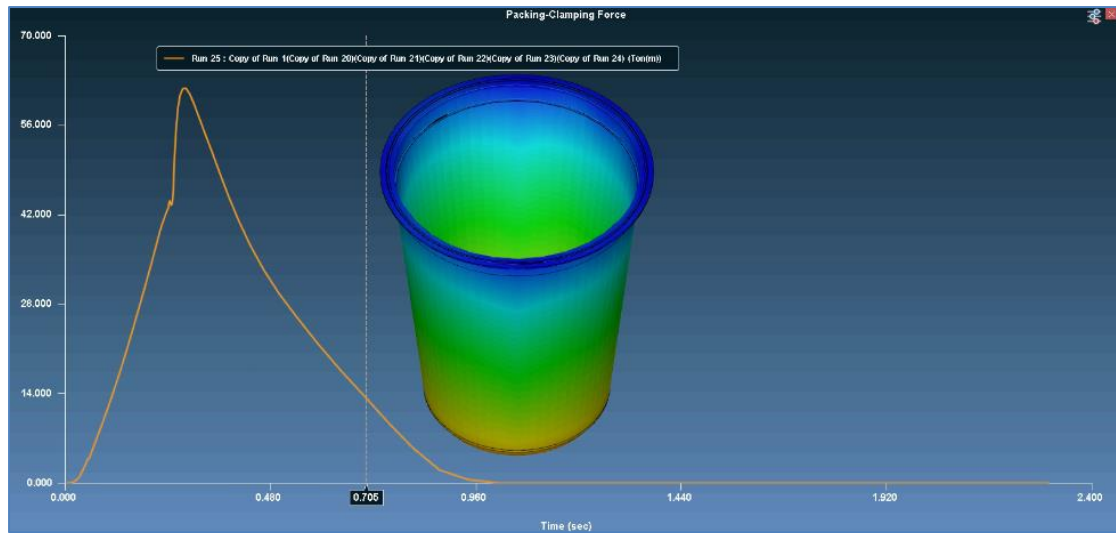


Εικόνα 4- 43: Δείκτης πιθανότητας εμφάνισης βαθουλωμάτων

### Δύναμη σύσφιξης (Clamping Force)

Εμφανίζεται το διάγραμμα της απαιτούμενης δύναμης σύσφιξης ( $T_n$ ) για την έγχυση. Έχει πολύ μεγάλη σημασία το αποτέλεσμα αυτό να αναγιγνώσκεται κατά την φάση της συμπίεσης και όχι μόνο στην φάση πλήρωσης, καθώς τότε εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της δύναμης (Εικόνα 4- 44). Υπενθυμίζεται ότι ο πελάτης διαθέτει μηχανή 350 (Tn), οπότε και για καλούπι τεσσάρων κοιλοτήτων δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τους 87 (Tn). Βέβαια, για την ασφάλεια της μηχανής και του καλουπιού, θα ήταν επιθυμητό η δύναμη αυτή να είναι ακόμα χαμηλότερη.





Εικόνα 4- 44: Δύναμη σύσφιξης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

### 5.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ- ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Δεν θα ήταν παράλογο να ειπωθεί ότι το ανθρώπινο είδος ήταν ανέκαθεν γοητευμένο με την έννοια της ποιότητας. Η εξέλιξη της τεχνολογίας οφείλεται ακριβώς σε αυτόν τον λόγο· στην επιθυμία του ανθρώπου να παρέχει προϊόντα και υπηρεσίες καλύτερης ποιότητας. Ωστόσο, η ποιότητα ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας δεν είναι μια συνάρτηση με άπειρο κέρδος. Ιδίως για έναν μηχανικό, η βελτίωση ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας δεν γίνεται με μοναδικό γνώμονα την ποιότητα του. Η βελτίωση του πρώτου θα πρέπει να επιτευχθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε το σχεδιαστικό ή και παραγωγικό κόστος, σε συνδυασμό πάντα με τη επίδοση, να καθιστούν το προϊόν ή τη διαδικασία ανταγωνιστικά και το περιθώριο κέρδους να διατηρείται όσο το δυνατόν υψηλότερο. Η τεχνική λοιπόν με την οποία αναλύεται μια διαδικασία, εξετάζεται ο αντίκτυπος διαφόρων συνθηκών εισόδου της και καθορίζονται τα κατάλληλα επίπεδα αυτών ονομάζεται σχεδιασμός πειραμάτων (*Design of Experiments – DOE*). Για έναν μηχανικό, τα σχεδιασμένα πειράματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στην βελτίωση διεργασιών και προϊόντων καθώς μπορεί με αυτόν τον τρόπο να:

- Μειώσει το σχεδιαστικό ή και παραγωγικό κόστος, απλοποιώντας το προϊόν, την εργασία και την ανάγκη για επιθεώρηση.
- Προσδιορίζει τους παράγοντες με ζωτική, για τη διεργασία, σημασία.
- Επιτύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα.
- Συγκρίνει εναλλακτικές λύσεις αναφορικά με το δίπτυχο κόστος - ποιότητα.
- Μειώσει τη μεταβλητότητα της διαδικασίας.
- Βελτιώσει την ευρωστία (robustness).

Κάθε σχεδιασμός πειραμάτων μπορεί να χωριστεί σε τρεις κυρίως φάσεις: σχεδιασμός, εκτέλεση και ανάλυση, με την πρώτη φάση να έχει και την μεγαλύτερη σημασία [12]. Η σημαντικότητα της πρώτης φάσης έγκειται στο είδος της πληροφορίας που ένας μηχανικός μπορεί να αντλήσει από τα πειράματα. Θετικού προσήμου πληροφορία υποδεικνύει ποιοι παράγοντες και με ποια επίπεδα οδηγούν σε βελτιωμένο προϊόν ή διαδικασία, ενώ πληροφορία με αρνητικό πρόσημο παρουσιάζει ποιοι παράγοντες δεν βελτιώνουν το προϊόν ή τη διαδικασία, χωρίς ωστόσο κάποια ένδειξη ως προς τους παράγοντες που παίζουν ρόλο. Ακριβώς για αυτόν τον λόγο οφείλεται η φάση του σχεδιασμού των πειραμάτων να πραγματοποιείται με ύψιστη ευλάβεια. Επιπροσθέτως, ένα καλά σχεδιασμένο πείραμα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερο, ταυτόχρονα όμως να λαμβάνονται οι ζητούμενες πληροφορίες με οικονομικά αποδοτικό και συνάμα εύκολα αναπαράξιμο τρόπο.

Ανεξαρτήτως της μεθόδου που θα ακολουθηθεί, κατά τον σχεδιασμό πειραμάτων πρέπει να υλοποιηθούν τρία πολύ βασικά στάδια:

1. Ορισμός εξόδου πειράματος: καθορίζονται οι ποιοτικοί παράγοντες, δηλαδή μετρήσιμα αποτελέσματα, ως προς τα οποία θα εξετασθεί το προϊόν ή η διαδικασία. Η βελτιστοποίηση ενός προϊόντος ή διαδικασίας δεν πρέπει να πραγματοποιείται ως προς ένα μόνο αποτέλεσμα εις βάρος άλλου. Για τον λόγο αυτόν, οφείλεται να μετριοούνται και αναλύονται όλα τα σημαντικά αποτελέσματα του πειράματος, ώστε να προκύψει ένα συνολικά βέλτιστο αποτέλεσμα.
2. Ορισμός εισόδων διαδικασίας: προσδιορίζονται οι συνθήκες που επιδρούν στους ποιοτικούς παράγοντες. Οι εισοδοί ταξινομούνται σε παράγοντες ελέγχου (ελεγχόμενες μεταβλητές) και στον θόρυβο (ανεξέλεγκτες εισοδοί).
3. Ορισμός επιπέδων παραγόντων: σημειώνονται οι τιμές που λαμβάνουν οι παράγοντες ελέγχου και ο θόρυβος.

Για την εκτέλεση ενός πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού πειραμάτων (*full factorial design*), ο αριθμός των πιθανών σχεδίων  $N$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$N = L^m$$

Όπου με  $L$  συμβολίζεται ο αριθμός των επιπέδων του κάθε παράγοντα και με  $m$  το πλήθος των παραγόντων ελέγχου.

Επομένως, για ένα πείραμα με δύο παράγοντες ελέγχου, δύο επιπέδων, υπάρχουν  $N = 2^2 = 4$  δυνατοί συνδυασμοί. Κάτι τέτοιο αποτελεί ένα από τα πιο απλά και εύκολα διαχειρίσιμα προβλήματα, το οποίο μάλιστα μπορεί να διερευνηθεί πλήρως με άνεση. Ωστόσο, αυξάνοντας τους παράγοντες ελέγχου και τα επίπεδα τους, η ενδελεχής διεκπεραίωση των πειραμάτων καθιστούν την έρευνα εξωφρενικά χρονοφόρα και οικονομικά ασύμφορη. Αναδύεται έτσι η ανάγκη απλοποίησης της πειραματικής διαδικασίας προς μια κατεύθυνση εξοικονόμησης χρόνου και χρήματος. Για τον σκοπό αυτό, επιστρατεύονται τεχνικές όπως τα κλασματικά παραγοντικά πειράματα (*fractional factorial experiments*), οι οποίες ωστόσο απαιτούν σχολαστική μαθηματική επεξεργασία τόσο στη φάση του σχεδιασμού όσο και στη φάση της ανάλυσης των πειραμάτων [13]. Μάλιστα, καθώς αυξάνεται το πλήθος των παραγόντων ελέγχου, τα πειράματα καθίστανται δύσχρηστα και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους δύσκολη. Το σημαντικότερο δε μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι μέθοδοι αυτοί είναι ότι δύο σχεδιασμοί για το ίδιο πείραμα δύναται να επιφέρουν διαφορετικά αποτελέσματα, χωρίς μάλιστα να προσδιορίζεται η βαρύτητα των παραγόντων ελέγχου.

### 5.1.1. Η Μέθοδος Taguchi

Στην επιστήμη του σχεδιασμού πειραμάτων, ο Δρ. Genichi Taguchi ανέπτυξε μια καινοτόμο τεχνική, αναιρώντας τους περιορισμούς που έθεταν οι προηγούμενες

μέθοδοι. Κατάφερε να απλοποιήσει και τυποποιήσει τους κλασματικούς παραγοντικούς σχεδιασμούς, έτσι ώστε να προκύπτει κάθε φορά παρόμοιο αποτέλεσμα. Προκειμένου ο πειραματικός σχεδιασμός να καταστεί προσιτός στη βιομηχανία, ο Δρ. Taguchi πρότεινε να ληφθούν υπόψιν τα εξής:

- Ορισμός της ποιότητας: η ποιότητα ορίστηκε σε σχέση με την ελάχιστη απώλεια για την κοινωνία, καθότι ο καταναλωτής κατέχει τον ρόλο του κριτή- δικαστή. Η ποιότητα συσχετίστηκε με την συνοχή στην απόδοση, δηλαδή αποτέλεσμα κοντά στον στόχο με μικρή απόκλιση. Έχοντας αυτό σαν γνώμονα, η βελτίωση της ποιότητας επιτυγχάνεται σε δύο στάδια: εύρεση των επιπέδων των παραγόντων που μειώνουν την μεταβλητότητα και ρύθμιση τους προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απόκλιση.
- Τυποποιημένο DOE: χρησιμοποιήθηκε ένα ειδικό σύνολο πινάκων, οι ορθογώνιες διατάξεις (*Orthogonal Arrays – OA*). Οι διατάξεις αυτές αντιπροσωπεύουν τους μικρότερους κλασματικούς παράγοντες και εξασφαλίζουν συνοχή για διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες.
- Εύρωστη στρατηγική σχεδιασμού (*Robust Design Strategy*): οι θόρυβοι ενσωματώθηκαν στην μελέτη πειραμάτων. Δημιουργήθηκε μια νέα δομή, ο επονομαζόμενος σχεδιασμός εξωτερικών διατάσεων (*Outer Array Design*), που διευκολύνει την διεξαγωγή πειραμάτων μικρότερου μεγέθους για την μελέτη των επιπτώσεων των παραγόντων θορύβου, ώστε η μεταβλητότητα που προκαλούν να μην θεωρείται τυχαία ή πειραματικό σφάλμα. Αυτό οδηγεί σε ένα καλά σχεδιασμένο πείραμα, με μικρή επίδραση των παραγόντων θορύβου.
- Συνάρτηση απώλειας: το μαθηματικό μοντέλο της συνάρτησης απώλειας είναι μια συνεχής τετραγωνική συνάρτηση, η οποία ορίζεται ως η απόκλιση από μια επιθυμητή τιμή. Η ελαχιστοποίηση της απώλειας ποιότητας επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση της ποιότητας στον σχεδιασμό του προϊόντος. Η συνάρτηση απώλειας μπορεί να πάρει τρεις μορφές:
  - Ονομαστική- η πιο καλή (*Nominal- the best*): όσο αποκλίνει ο ποιοτικός παράγοντας από μια ονομαστική τιμή, τόσο η απώλεια ποιότητας αυξάνεται
  - Μικρή- η καλύτερη (*The smaller- the better*): η τιμή του ποιοτικού παράγοντα και η απώλεια ποιότητας είναι ποσά ανάλογα
  - Μεγάλη- η καλύτερη (*The larger- the better*): ο ποιοτικός παράγοντας και η απώλεια ποιότητας έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση

### 5.1.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων από Σχεδιασμό Πειραμάτων

Μέσω της ανάλυσης των αποτελεσμάτων επιτυγχάνονται τα εξής:

- Εντοπισμός των παραγόντων με σημαντική επίδραση στο αποτέλεσμα
- Εύρεση των βέλτιστων συνθηκών πειράματος

Για την μέθοδο Taguchi, η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται προς δύο κατευθύνσεις : τον υπολογισμό των αποκρίσεων για τον λόγο Σήματος/Θορύβου και την Ανάλυση Διακύμανσης.

#### 5.1.2.1. Εύρωστος σχεδιασμός και λόγος Σήματος/Θορύβου (*S/N Ratio*)

Μέσω ενός σωστού σχεδιασμού πειραμάτων, ένας μηχανικός μπορεί να εντοπίσει τους σημαντικότερους παράγοντες και να ρυθμίσει τα επίπεδα τους προκειμένου να βελτιωθεί η συνοχή της απόδοσης. Ωστόσο, οι παράγοντες αυτοί είναι κυρίως ελεγχόμενοι από τον ίδιο. Από την άλλη, οι ανεξέλεγκτοι παράγοντες προκαλούν μεταβλητότητα σε ένα πείραμα, κάτι που αυξάνεται με τις επαναλήψεις που μπορεί να χρειαστούν για την εξέταση μιας συνθήκης. Στο σημείο αυτό υπεισέρχεται ο εύρωστος σχεδιασμός που πρότεινε ο δρ. Taguchi, στόχος του οποίου είναι η ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας όταν το πείραμα εκτεθεί στον θόρυβο. Ένας δείκτης, μέσω του οποίου υπολογίζεται η μεταβλητότητα, είναι ο λόγος Σήματος/Θορύβου (*S/N Ratio*). Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η τιμή του δείκτη αυτού τόσο μικρότερη είναι η διακύμανση του προϊόντος από την επιθυμητή τιμή.

Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, για τον συνυπολογισμό τόσο του μέσου όρου, όσο και της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων, εισάγεται ο δείκτης της Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης (*MSD*), ο οποίος ορίζεται διαφορετικά για κάθε ορισμό ποιότητας. Ο λόγος *S/N* είναι ο λογαριθμικός μετασχηματισμός της μέσης τετραγωνικής απόκλισης, για διευκόλυνση της γραμμικότητας και για την δυνατότητα μελέτης ευρύτερου φάσματος αποτελεσμάτων ορίζεται ως εξής.

$$S/N = -10 * \log_{10}(MSD)$$

Ανάλογα με τον ορισμό της ποιότητας, ο όρος *MSD* υπολογίζεται ως εξής.

- Smaller is better:

$$MSD = \frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n}$$

- Nominal is best:

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

- Bigger is better:

$$MSD = \frac{(\frac{1}{y_1} + \frac{1}{y_2} + \dots)}{n}$$

Όπου:  $y_1, y_2, \dots$  : τα αποτελέσματα των πειραμάτων  
 $m$ : η επιθυμητή τιμή αποτελέσματος (target value)  
 $n$ : ο αριθμός των επαναλήψεων.

### 5.1.2.2. Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

Στην ουσία, η μέθοδος Taguchi αντικατέστησε τα χρονοβόρα και κοστοβόρα πλήρη παραγοντικά πειράματα, με ένα οικονομικότερο και γρηγορότερο μερικό παραγοντικό πείραμα. Εφόσον, η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα μέρος μόνο της ολικής εικόνας, πρέπει στην ανάλυση των πειραμάτων να περιλαμβάνεται και ανάλυση εμπιστοσύνης για τα αποτελέσματα. Μια πρότυπη στατιστική τεχνική, η οποία ονομάζεται Ανάλυση Διακύμανσης (*Analysis of Variance – ANOVA*), είναι αυτή που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην ανάλυση των αποτελεσμάτων. Με την μέθοδο αυτή, τα αποτελέσματα δεν αναλύονται απευθείας, αλλά προσδιορίζεται η διακύμανσή τους, μέσω της οποίας εξετάζεται και η εμπιστοσύνη. Επιπροσθέτως, διεξάγοντας ανάλυση ευαισθησίας και ANOVA είναι δυνατός ο προσδιορισμός και του ποσοστού επίδρασης για κάθε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα.

Για πειράματα με δύο ή περισσότερους παράγοντες, δύο ή περισσότερων επιπέδων ακολουθείται η τεχνική της αμφίδρομης ανάλυσης διακύμανσης (*Two-way ANOVA*). Η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής.

Αρχικά υπολογίζονται οι βαθμοί ελευθερίας [ολικοί ( $f_T$ ), κάθε παράγοντα  $P$  ( $f_P$ ) και σφάλματος ( $f_e$ )] και προσδιορίζεται ο παράγοντας διόρθωσης (*Correction Factor – C.F.*).

$$f_T = n - 1$$

$$f_P = \text{number of levels} - 1$$

$$f_e = f_T - \sum f_P$$

$$C.F. = \frac{(\sum_1^n (y_n - m))^2}{n}$$

Στην συνέχεια υπολογίζονται τα αθροίσματα των τετραγωνικών αποκλίσεων: το ολικό ( $S_T$ ), για κάθε παράγοντα ( $S_P$ ), προσδιορίζοντας πρώτα ξεχωριστά τα επίπεδα συνεισφορών για κάθε επίπεδο  $l$  για κάθε παράγοντα ( $P_l$ ), και του σφάλματος ( $S_e$ ).

$$S_T = \sum_1^n ((y_n - m)^2) - C.F.$$

$$P_l = \sum_1^n (y_{nl} - m)$$

$$S_P = \sum_1^l \left[ \frac{P_l^2}{n_{P_l}} \right] - C.F.$$

$$S_e = S_T - \sum_1^F S_P$$

Πλέον, πολύ εύκολα υπολογίζονται οι διακυμάνσεις και τα επίπεδα επίδρασης για κάθε παράγοντα.

$$V_P = \frac{S_P}{f_P}$$

$$V_e = \frac{S_e}{f_e}$$

$$\text{Contribution of factor } P = \frac{S_P}{S_T}$$

## 5.2. ΠΡΩΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Ο πρώτος σχεδιασμός πειραμάτων αποσκοπεί στον εντοπισμό των παραγόντων ελέγχου με την μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό προϊόν. Υπενθυμίζεται ότι η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στις δύο πρώτες φάσεις της κατεργασίας και για τον λόγο αυτό οι παράγοντες ελέγχου αφορούν τα στάδια πλήρωσης και συμπίεσης. Έτσι, παράγοντες που αφορούν ή επηρεάζονται από το στάδιο της ψύξης γενικά εξαιρούνται, μιας και στις προσομοιώσεις θεωρείται ιδανική απαγωγή θερμότητας. Παρομοίως, επιλέγονται και οι ποιοτικοί παράγοντες από το έντυπο προδιαγραφών του πελάτη σε μια κατεύθυνση καλύτερης προσέγγισης τους.

Σε αυτό το πρώτο στάδιο μελέτης, επιλέγονται επτά παράγοντες ελέγχου, καθένας από τους οποίους εξετάζεται σε τρία επίπεδα. Οι τιμές των επιπέδων που επιλέχθηκαν αποσκοπούν στην διερεύνηση της ευαισθησίας του συστήματος και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5- 1. Με την ίδια λογική, επιλέγονται και οι ποιοτικοί παράγοντες του Πίνακα 5- 2, αναφορικά με την διαθέσιμη μηχανή έγχυσης και το βάρος τεμαχίου. Ακόμη, εφόσον στο στάδιο αυτό εξετάζεται η ευαισθησία του συστήματος και αναμένεται η αποκοπή της διανομής του υλικού στην φάση της συμπίεσης να είναι έντονη, ορίζεται ο πλασματικός ποιοτικός παράγοντας του τηγμένου πυρήνα που αφορά την στερεοποίηση στο κέντρο του τεμαχίου κατά το πέρας της φάσης συμπίεσης.

Πίνακας 5- 1: Παράγοντες ελέγχου για τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων

Παράγοντας Ελέγχου	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
Πολυμερές Υλικό (MFI g/10 min)	MFI45	MFI70	MFI100
Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	220	240	260
Θερμοκρασία Καλουπιού (°C)	10	20	30
Μέγιστη Πίεση Έγχυσης (MPa)	160	180	220
Χρόνος Έγχυσης (s)	0.17	0.22	0.28
Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	40	60	80
Χρόνος Συμπίεσης (s)	0.45	0.50	0.80

Πίνακας 5- 2: Ποιοτικοί παράγοντες για τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων

Ποιοτικοί Παράγοντες	Προσέγγιση	Τιμή Προδιαγραφών Πελάτη
Δύναμη Σύσφιξης (Tn)	Μικρότερη – Η καλύτερη	87.5
Βάρος Τεμαχίου (g)	Ονομαστική – Η πιο καλή	15.5 ±3%
Τηγμένος Πυρήνας	Μικρότερη – Η καλύτερη	-

Επιλέγεται λοιπόν να διεξαχθεί μια L27 ανάλυση Taguchi. Για την δημιουργία του ορθογώνιου πίνακα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα «Minitab». Στο περιβάλλον του προγράμματος, εισήχθησαν οι παράγοντες ελέγχου και προσδιορίστηκαν τα επίπεδά τους. Προέκυψε λοιπόν ο Πίνακας 5- 3, με τους συνδυασμούς παραμέτρων για κάθε προσομοίωση.

Πίνακας 5- 3: Προσομοιώσεις πρώτου σχεδιασμού πειραμάτων με τα αντίστοιχα επίπεδα παραγόντων

N.	Υλικό ( $\frac{g}{10min}$ )	Θερμ. Τήγματος (°C)	Θερμ. Καλουπιού (°C)	Μέγ. Πίεση Έγχυσης (MPa)	Χρόνος Έγχυσης (s)	Μέγ. Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
1	MFI45	220	10	160	0.17	40	0.45
2	MFI45	220	10	160	0.22	60	0.5
3	MFI45	220	10	160	0.28	80	0.8
4	MFI45	240	20	180	0.17	40	0.45
5	MFI45	240	20	180	0.22	60	0.5
6	MFI45	240	20	180	0.28	80	0.8
7	MFI45	260	30	220	0.17	40	0.45
8	MFI45	260	30	220	0.22	60	0.5
9	MFI45	260	30	220	0.28	80	0.8
10	MFI70	220	20	220	0.17	60	0.8
11	MFI70	220	20	220	0.22	80	0.45
12	MFI70	220	20	220	0.28	40	0.5
13	MFI70	240	30	160	0.17	60	0.8
14	MFI70	240	30	160	0.22	80	0.45
15	MFI70	240	30	160	0.28	40	0.5
16	MFI70	260	10	180	0.17	60	0.8
17	MFI70	260	10	180	0.22	80	0.45
18	MFI70	260	10	180	0.28	40	0.5
19	MFI100	220	30	180	0.17	80	0.5
20	MFI100	220	30	180	0.22	40	0.8
21	MFI100	220	30	180	0.28	60	0.45
22	MFI100	240	10	220	0.17	80	0.5
23	MFI100	240	10	220	0.22	40	0.8
24	MFI100	240	10	220	0.28	60	0.45
25	MFI100	260	20	160	0.17	80	0.5
26	MFI100	260	20	160	0.22	40	0.8
27	MFI100	260	20	160	0.28	60	0.45

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων διατηρούνται σε σταθερά επίπεδα οι υπόλοιποι παράγοντες ελέγχου των προσομοιώσεων. Υπό την καθοδήγηση των μηχανικών της εταιρείας, προέκυψαν οι τιμές που αναγράφονται στον Πίνακα 5- 4.



Πίνακας 5- 4: Σταθεροί παράγοντες προσομοίωσης κατά την διεξαγωγή του πρώτου σχεδιασμού πειραμάτων

Σταθεροί Παράγοντες Προσομοίωσης	Τιμή
Χρόνος Ψύξης (s)	1.6
Χρόνος που παραμένει ανοιχτό το καλούπι (s)	3.48
Θερμοκρασία Δωματίου (°C)	25

### 5.2.1. Εκτέλεση Πειραμάτων Πρώτου Σχεδιασμού

Από τις προσομοιώσεις του πρώτου σχεδιασμού πειραμάτων απορρέει ο Πίνακας 5-5 με τα αποτελέσματα - μετρήσεις των ποιοτικών παραγόντων. Για τον πλασματικό ποιοτικό παράγοντα του τηγμένου πυρήνα ορίζονται δύο εικονικές τιμές σε σχέση με την εμφάνιση ή μη του φαινομένου αυτού. Η τιμή «1» ορίζεται για τις προσομοιώσεις εκείνες στις οποίες εντοπίζεται η αποκοπή της διανομής υλικού, ενώ η τιμή «0.2» αντιστοιχεί σε προσομοιώσεις χωρίς το φαινόμενο αυτό. Οι τιμές αυτές είναι εικονικές και δεν έχουν κάποια φυσική σημασία, πέρα από τον χαρακτηρισμό της εμφάνισης του φαινομένου αυτού.

Πίνακας 5- 5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων πρώτου σχεδιασμού πειραμάτων

Πείραμα	Βάρος Τεμαχίου (g)	Δύναμη Σύσφιξης (Tn)	Τηγμένος Πυρήνας
1	15.173	68.4	1
2	15.152	69.2	1
3	15.098	62.8	1
4	15.179	73.7	1
5	15.219	72.3	1
6	15.206	71.4	1
7	15.23	66.8	0.2
8	15.093	64.5	1
9	15.168	64.2	1
10	15.783	87.1	1
11	15.815	87.3	0.2
12	15.847	86.3	0.2
13	15.714	82.2	1
14	15.738	80.6	0.2
15	15.748	75.4	0.2
16	15.728	76.1	1
17	15.75	74.7	0.2
18	15.759	73	0.2
19	15.324	87.4	1
20	15.427	82.7	1
21	15.49	82.4	1
22	15.4	83.7	1
23	15.373	78.1	1
24	15.433	78.5	1
25	15.297	73.9	1
26	15.273	70.1	1
27	15.484	70.2	0.2

### 5.2.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων Πρώτου Σχεδιασμού

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα γίνει σε δύο στάδια. Ο υπολογισμός του λόγου Σήματος/Θορύβου θα καταστήσει σαφές ποιοι από τους παράγοντες ελέγχου προκαλούν μεταβλητότητα στο πείραμα.

Συμπληρωματικά, μέσω της ανάλυσης διακύμανσης θα εντοπισθούν και τα επίπεδα συνεισφοράς των παραγόντων ελέγχου στον προς εξέταση ποιοτικό παράγοντα.

#### 5.2.2.1. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Δύναμη σύσφιξης

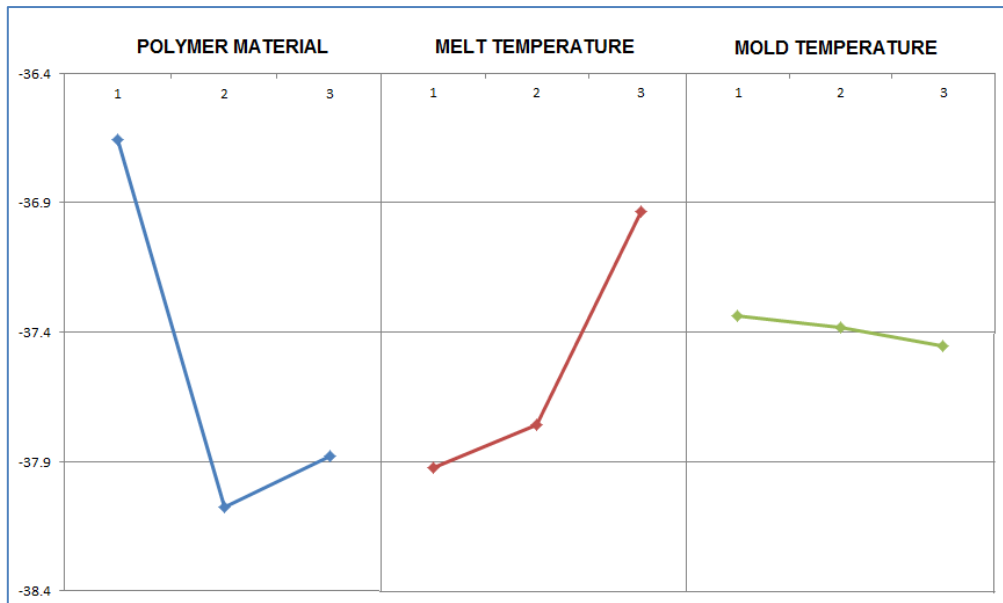
Σύμφωνα με την μεθοδολογία που έχει αναφερθεί παραπάνω, υπολογίζεται, για κάθε επίπεδο, η επίδραση του κάθε παράγοντα ελέγχου στην μέση απόκριση της αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα της δύναμης σύσφιξης (Πίνακας 5- 6) και στην συνέχεια εκτελείται η ανάλυση διακύμανσης (Πίνακας 5- 7). Η ποσοτική αναπαράσταση των επιδράσεων των παραγόντων ελέγχου στην μέση απόκριση της S/N αναλογίας παρουσιάζεται στις Εικόνα 5- 1 και Εικόνα 5- 2.

Πίνακας 5- 6: Μέση απόκριση της αναλογίας S/N για τον παράγοντα δύναμη σύσφιξης στον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων

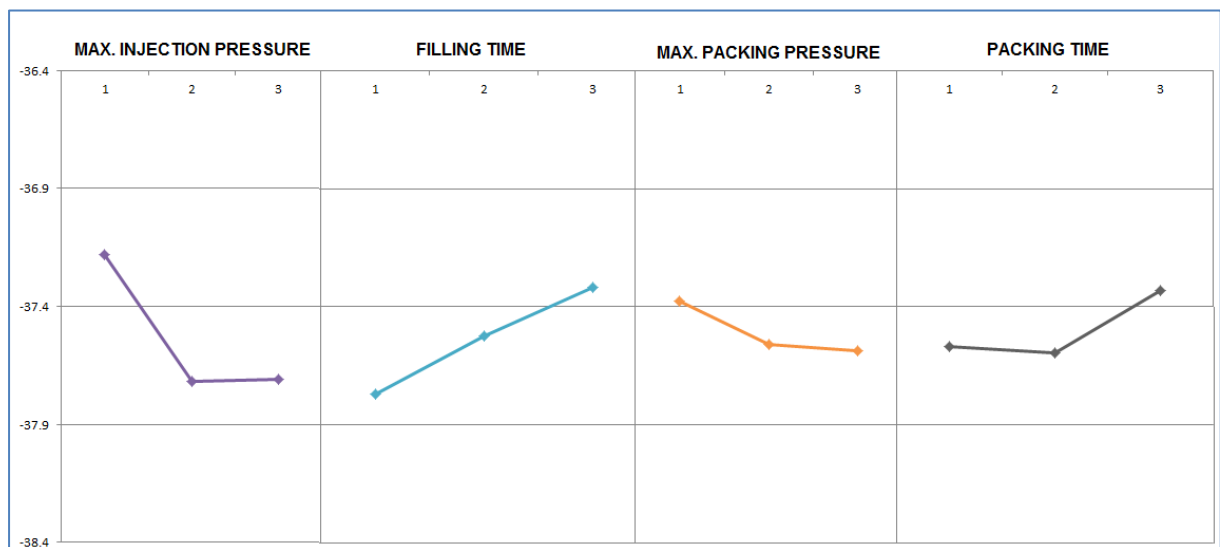
	Υλικό ( $\frac{g}{10min}$ )	Θερμ. Τήγματος (°C)	Θερμ. Καλουπιού (°C)	Μεγ. Πίεση Έγχυσης (MPa)	Χρόνος Έγχυσης (s)	Μεγ. Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Επ. 1	-36.66	-37.92	-37.34	-37.18	-37.77	-37.38	-37.57
Επ. 2	-38.08	-37.75	-37.38	-37.72	-37.52	-37.56	-37.60
Επ. 3	-37.88	-36.94	-37.45	-37.71	-37.32	-37.58	-37.33
Δέλτα	1.42	0.99	0.12	0.54	0.45	0.21	0.27
<b>Βαθμός</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>5</b>

Πίνακας 5- 7: Ανάλυση Διακύμανσης για την δύναμη σύσφιξης στον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων

	Υλικό ( $\frac{g}{10min}$ )	Θερμ. Τήγματος (°C)	Θερμ. Καλουπιού (°C)	Μεγ. Πίεση Έγχυσης (MPa)	Χρόνος Έγχυσης (s)	Μεγ. Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Contr. of Level 1	41793	56581	49025	47350	54336	50568	51771
Contr. of Level 2	58033	53809	53253	53469	51302	51756	52243
Contr. of Level 3	55539	44591	52319	53901	49018	52288	50605
SS	777.58	393.45	10.24	132.98	68.82	25.86	31.85
Variance	388.79	196.72	5.12	66.49	34.41	12.93	15.92
<b>Contr. %</b>	<b>53.34</b>	<b>26.99</b>	<b>0.70</b>	<b>9.12</b>	<b>4.72</b>	<b>1.77</b>	<b>2.185</b>



Εικόνα 5- 1: Ποσοτικό γράφημα της μέση απόκρισης της αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα της δύναμης σύσφιξης κατά τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων – Μέρος 1



Εικόνα 5- 2: Ποσοτικό γράφημα της μέση απόκρισης της αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα της δύναμης σύσφιξης κατά τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων – Μέρος 2

#### 5.2.2.2. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Βάρος τεμαχίου

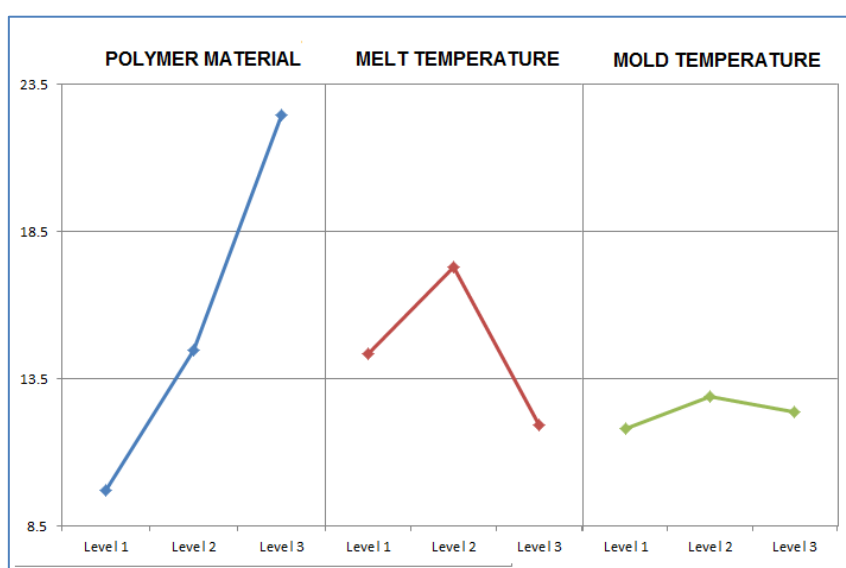
Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία, προκύπτουν, για τον ποιοτικό παράγοντα του βάρους τεμαχίου, οι Πίνακας 5- 8 και Πίνακας 5- 9 με την μέση απόκριση της αναλογίας S/N και την ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων ελέγχου στο αποτέλεσμα αντίστοιχα. Στις Εικόνα 5- 3 και Εικόνα 5- 4 απεικονίζεται η ποσοτική επίδραση των παραγόντων ελέγχου στο μετρήσιμο αποτέλεσμα που εξετάζεται επί του παρόντος.

Πίνακας 5- 8: Μέση απόκριση της αναλογίας S/N για τον παράγοντα του Βάρους Τεμαχίου κατά τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων

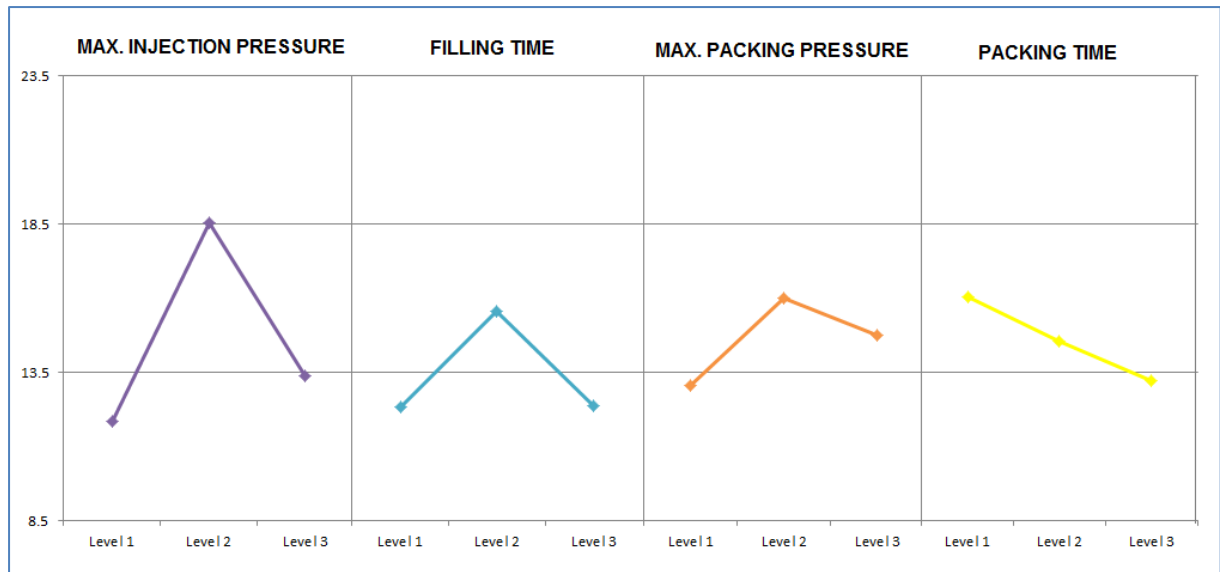
	Υλικό ( $\frac{g}{10min}$ )	Θερμ. Τήγματος (°C)	Θερμ. Καλουπιού (°C)	Μεγ. Πίεση Έγχυσης (MPa)	Χρόνος Έγχυσης (s)	Μεγ. Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Επ. 1	9.68	14.35	11.79	11.84	12.3	13.06	16.01
Επ. 2	14.47	17.29	12.86	18.53	15.52	15.97	14.53
Επ. 3	22.43	11.91	12.35	13.37	12.36	14.72	13.21
Δέλτα	12.75	5.38	1.07	6.69	3.22	2.92	2.80
<b>Βαθμός</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>6</b>

Πίνακας 5- 9: Ανάλυση Διακύμανσης του ποιοτικού παράγοντα του Βάρους Τεμαχίου στον πρώτο σχεδιασμό

	Υλικό ( $\frac{g}{10min}$ )	Θερμ. Τήγματος (°C)	Θερμ. Καλουπιού (°C)	Μεγ. Πίεση Έγχυσης (MPa)	Χρόνος Έγχυσης (s)	Μεγ. Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Contr. of Level 1	1.1011	0.0059	0.0447	0.1073	0.0510	0.0480	0.0317
Contr. of Level 2	0.6304	0.0267	0.0344	0.0074	0.0484	0.0353	0.0279
Contr. of Level 3	0.1109	0.1211	0.0366	0.0305	0.0202	0.0329	0.0592
SS	1.7270	0.0383	0.0004	0.0299	0.0043	0.0008	0.0034
Variance	0.8635	0.0191	0.0002	0.0149	0.0022	0.0004	0.0017
<b>Contr. %</b>	<b>95.2</b>	<b>2.1</b>	<b>0.02</b>	<b>1.65</b>	<b>0.24</b>	<b>0.045</b>	<b>0.188</b>



Εικόνα 5- 3: Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα του βάρους τεμαχίου κατά τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων – Μέρος 1



Εικόνα 5- 4: Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα του βάρους τεμαχίου κατά τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων – Μέρος 2

### 5.2.2.3. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Τηγμένος πυρήνας

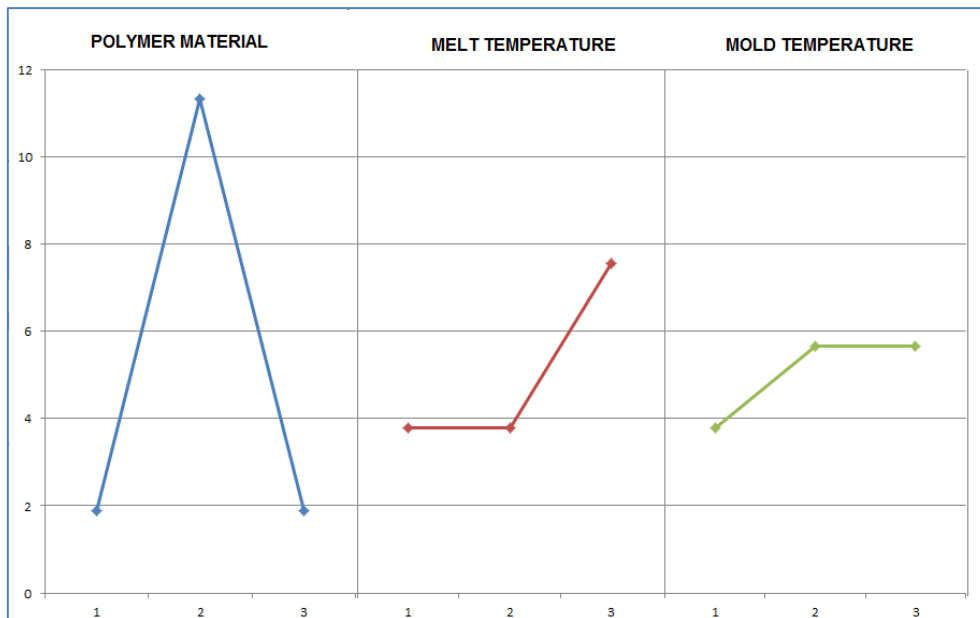
Ομοίως, για τον πλασματικό παράγοντα που ορίστηκε προκειμένου να εξετασθεί η ευαισθησία της κατεργασίας, ακολουθείται η ίδια διαδικασία ανάλυσης. Εξάγονται οι Πίνακας 5- 10 και Πίνακας 5- 11 με την ανάλυση του λόγου S/N και την ανάλυση ANOVA αντιστοίχως. Η ποσοτική μετάφραση της αναλογίας S/N αναπαρίσταται στις Εικόνα 5- 5 και Εικόνα 5- 6.

Πίνακας 5- 10: Ανάλυση μέσης απόκρισης S/N για τον πλασματικό παράγοντα του τηγμένου πυρήνα κατά τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων

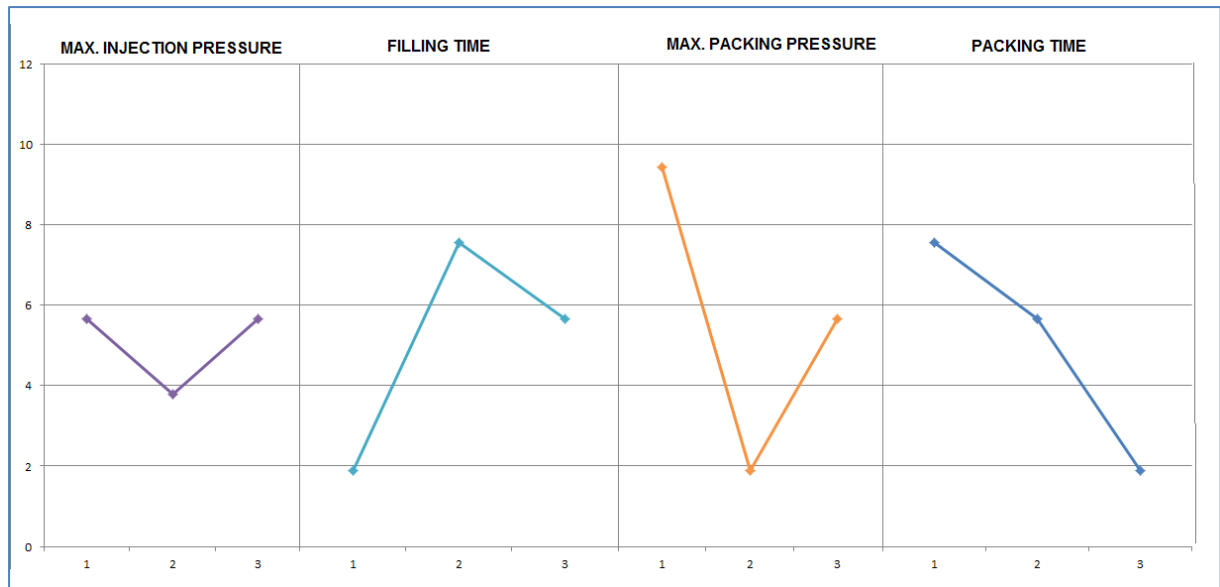
	Υλικό ( $\frac{g}{10min}$ )	Θερμ. Τήγματος (°C)	Θερμ. Καλουπιού (°C)	Μεγ. Πίεση Έγχυσης (MPa)	Χρόνος Έγχυσης (s)	Μεγ. Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Επ. 1	1.89	3.78	3.78	5.66	1.89	9.44	7.55
Επ. 2	11.33	3.78	5.66	3.78	7.55	0	5.66
Επ. 3	1.89	7.55	5.66	5.66	5.66	5.66	1.89
Δέλτα	9.44	3.78	1.89	1.89	5.6	9.44	5.66
<b>Βαθμός</b>	<b>1'2</b>	<b>5</b>	<b>6'7</b>	<b>6'7</b>	<b>3'4</b>	<b>1'2</b>	<b>3'4</b>

Πίνακας 5- 11: Ανάλυση Διακύμανσης του τηγμένου πυρήνα για τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων

	Υλικό ( $\frac{g}{10min}$ )	Θερμ. Τήγματος (°C)	Θερμ. Καλουπιού (°C)	Μεγ. Πίεση Έγχυσης (MPa)	Χρόνος Έγχυσης (s)	Μεγ. Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Contr. of Level 1	7.111	5.444	5.444	4.000	7.111	2.778	1.778
Contr. of Level 2	1.000	5.444	4.000	5.444	4.000	7.111	4.00
Contr. of Level 3	7.111	2.778	4.000	4.000	2.778	4.000	9.00
SS	1.852	0.296	0.074	0.074	0.519	0.519	1.407
Variance	0.926	0.148	0.037	0.037	0.259	0.259	0.704
<b>Contr. %</b>	<b>32.895</b>	<b>5.263</b>	<b>1.316</b>	<b>1.316</b>	<b>9.210</b>	<b>9.211</b>	<b>25</b>



Εικόνα 5- 5: Ποσοτική αναπαράσταση των λόγων S/N του ποιοτικού παράγοντα τηγμένου πυρήνα για τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων - Μέρος 1

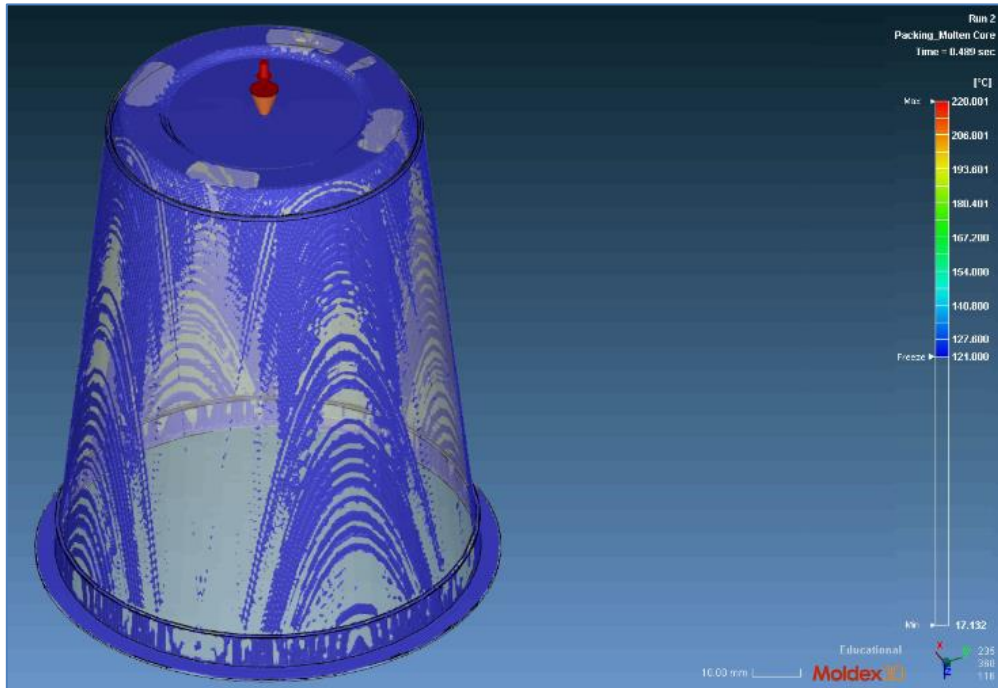


Εικόνα 5- 6: Ποσοτική αναπαράσταση των λόγων S/N του ποιοτικού παράγοντα τηγμένου πυρήνα για τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων - Μέρος 2

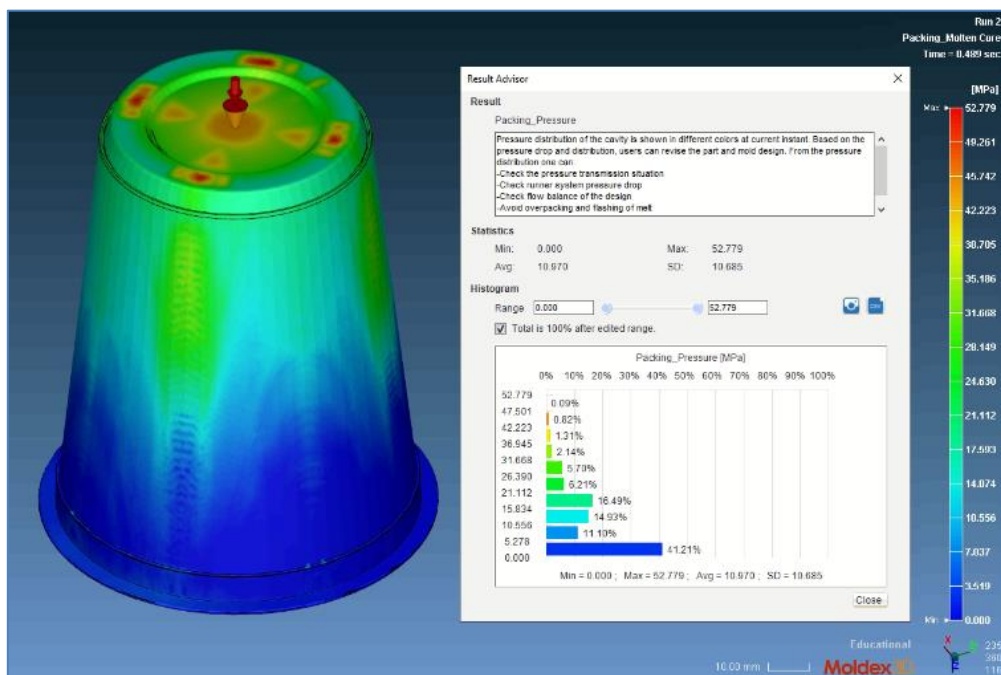
#### 5.2.2.4. Συμπεράσματα πρώτου Σχεδιασμού πειραμάτων

Καταρχάς, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι οι 19 από τις 27 δοκιμές της πρωταρχικής φάσης διερεύνησης εμφανίζουν το φαινόμενο του τηγμένου πυρήνα. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η κατεύθυνση καθορισμού των ορίων της κατεργασίας που τηρήθηκε κατά τον σχεδιασμό των πειραμάτων ήταν επιτυχημένη. Πρωταρχικό ρόλο, με ποσοστό συμμετοχής 33%, φαίνεται να παίζει η επιλογή του υλικού. Σημαντική ποσοστιαία επίδραση της τάξης 25%, φαίνεται να έχει και ο χρόνος που διαρκεί το στάδιο της συμπίεσης. Ο χρόνος έγχυσης και η μέγιστη πίεση συμπίεσης φαίνεται να επιδρούν με τον ίδιο βαθμό, σε ποσοστό 9%, επί του αποτελέσματος. Η θερμοκρασία του τήγματος φαίνεται να διαδραματίζει και αυτή κάποιο μικρό ρόλο στη διαμόρφωση του αποτελέσματος, ενώ από την άλλη η θερμοκρασία του καλουπιού και η μέγιστη πίεση έγχυσης έχουν μηδαμινή συμμετοχή στην ανάπτυξη του προς εξέταση φαινομένου. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις που εμφανίζουν το φαινόμενο της αποκοπής της ροής παρατηρείται να έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό, τους «ακραίους» εξεταζόμενους χρόνους για τα στάδια της πλήρωσης και της συμπίεσης. Όταν η πλήρωση πραγματοποιείται με πιο αργούς ρυθμούς ή όταν το υλικό δεν έχει αρκετό χρόνο να στερεοποιηθεί κατά την φάση της συμπίεσης, τότε το φαινόμενο της άνισης κατανομής της πίεσης βελτιώνεται. Κάτι τέτοιο διαπιστώνεται και από την Εικόνα 5- 6, όπου και οι μεσαίες τιμές για τους χρόνους που εξετάζονται δίνουν μεγαλύτερο λόγο Σήματος/Θορύβου, επομένως και μικρότερη μεταβλητότητα στο πείραμα. Ακόμη, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται η μείωση του φαινομένου της στερεοποίησης του υλικού γύρω από την πύλη. Εντούτοις, η θερμοκρασία συνιστάται να διατηρείται όσο το δυνατόν κοντά στις τιμές που προτείνει ο κατασκευαστής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι μηχανικές απώλειες του υλικού. Ενδεικτικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση υπ' αριθμόν 2. Η πλήρης στερεοποίηση των

τοιχωμάτων του τεμαχίου έχει ήδη αρχίσει από την μέση περίπου του χρονικού διαστήματος της συμπίεσης (Εικόνα 5- 7), ενώ η κατανομή της πίεσης στο εσωτερικό της κοιλότητας εκείνη την στιγμή έχει όπως στην Εικόνα 5- 8. Στο τέλος της φάσης συμπίεσης οι περιοχές με τηγμένο πυρήνα διακρίνονται στην Εικόνα 5- 9 και η κατανομή της πίεσης φαίνεται στην Εικόνα 5- 10.

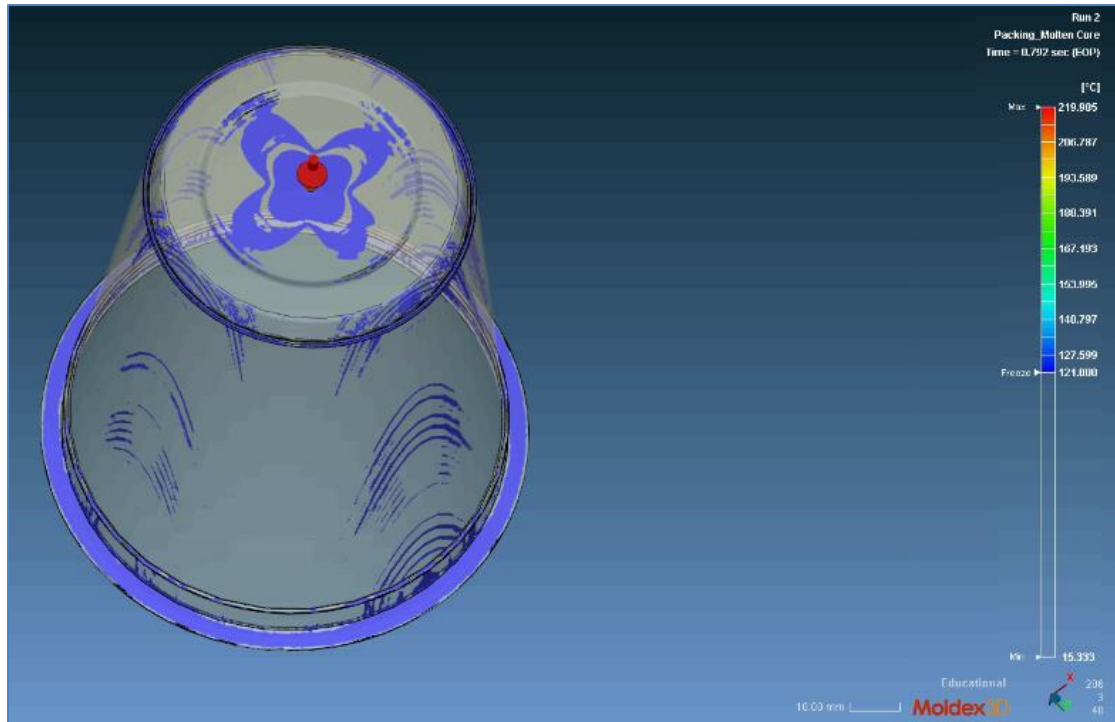


Εικόνα 5- 7: Η εικόνα του τηγμένου πυρήνα στα 0.5 s της φάσης συμπίεσης, Προσομοίωση 2

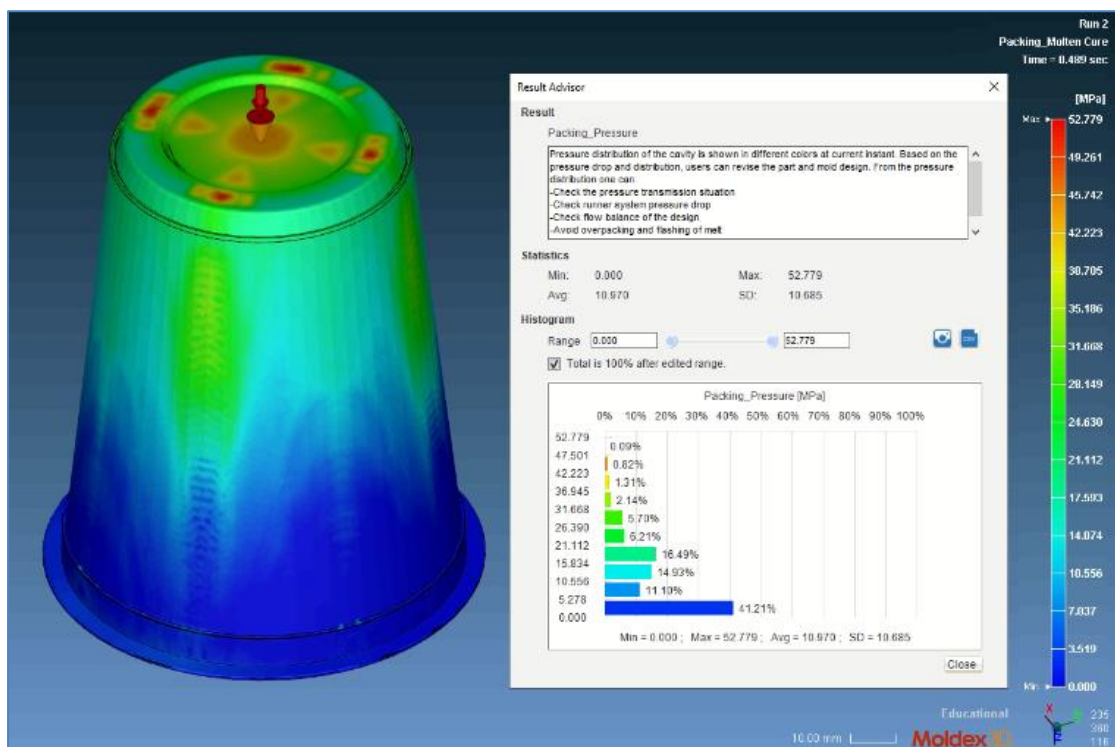


Εικόνα 5- 8: Η διαμόρφωση της κατανομής της πίεσης στο εσωτερικό της κοιλότητας την χρονική στιγμή 0.5 s της φάσης συμπίεσης, Προσομοίωση 2





Εικόνα 5- 9: Τα τμήματα του τεμαχίου που παραμένουν τηγμένα με το πέρας της φάσης συμπίεσης, Προσομοίωση 2



Εικόνα 5- 10: Κατανομή πίεσης στο εσωτερικό της κοιλότητας διαμόρφωσης με το πέρας της φάσης συμπίεσης, Προσομοίωση 2

Σε ένα δεύτερο επίπεδο, καθίσταται σαφές ότι η επιλογή του υλικού είναι ζωτικής σημασίας για την κατεργασία. Για τους τρεις ποιοτικούς παράγοντες που

εξετάστηκαν στην πρωταρχική αυτή διερεύνηση, το υλικό και στις τρεις περιπτώσεις κατέχει την πρώτη θέση. Μάλιστα, αναφορικά με τον ποιοτικό παράγοντα του βάρους τεμαχίου φαίνεται να κατέχει την αποκλειστικότητα ανάμεσα στους υπόλοιπους παράγοντες ελέγχου, καθώς επιδρά με ποσοστό 95% (Πίνακας 5- 9) επί του αποτελέσματος. Εμπειρικά είναι γνωστό ότι με δεδομένη την αναλογία Μήκους ροής – Πάχους (*L/T Ratio*), όπως προκύπτει από τον σχεδιασμό του τεμαχίου, η επιλογή ενός υλικού με MFI45 θα ήταν μια εύκολη, πρώτη λύση. Παρόλ' αυτά, υλικά με μεγαλύτερο MFI διευκολύνουν το «ease of fill». Κάτι τέτοιο επιβεβαιώνεται και από το αυξημένο βάρος των τεμαχίων στις προσομοιώσεις του Πίνακας 5- 5.

Συμπληρωματικά, κρίνεται ότι ο ποιοτικός παράγοντας της δύναμης σύσφιξης φέρει κάπως παραπλανητικά αποτελέσματα. Τα υλικά με μεγαλύτερο MFI, ακριβώς επειδή επιτυγχάνουν ευκολότερη πλήρωση, παρουσιάζουν και μικρότερη πτώση πίεσης στο ακροφύσιο και στην πύλη εισόδου. Επομένως, εντός της κοιλότητας διαμόρφωσης επικρατούν μεγαλύτερες πιέσεις, οπότε και χρειάζονται μεγαλύτερες δυνάμεις σύσφιξης. Εφόσον όλα τα αποτελέσματα της δύναμης σύσφιξης είναι μέσα στα περιθώρια ασφαλείας της μηχανής, σε αυτό το πρώτο στάδιο διερεύνησης δεν θα δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανάλυση των αποτελεσμάτων για τον ποιοτικό αυτό παράγοντα.

Ακόμη, συστηματικό ρόλο παίζει και η θερμοκρασία του τήγματος αναφορικά με όλους τους ποιοτικούς παράγοντες. Κατατάσσεται ανάμεσα στους τέσσερις σημαντικότερους παράγοντες ελέγχου και για τους τρεις εξεταζόμενους ποιοτικούς παράγοντες. Γενικά, η θερμοκρασία των 240 °C τείνει να φέρει τα καλύτερα συνδυαστικά αποτελέσματα. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του τήγματος, τόσο μικρότερο γίνεται το ιξώδες του, οπότε και επιτυγχάνεται καλύτερη πλήρωση της κοιλότητας. Ωστόσο, μεγάλες θερμοκρασίες τήγματος όπως είναι γνωστό απαιτούν και μεγαλύτερους χρόνους ψύξης, ώστε το υλικό να στερεοποιηθεί και να έρθει σε θερμοκρασία κατάλληλη για εξόλκευση. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται και περισσότερη κατανάλωση ενέργειας, επομένως το κόστος για την παραγωγή του τεμαχίου αυξάνεται.

Από την αντίθετη μεριά, η θερμοκρασία του καλουπιού φαίνεται να μην έχει κάποια ιδιαίτερη επίδραση στους εξεταζόμενους ποιοτικούς παράγοντες, τουλάχιστον για τα στάδια της πλήρωσης και συμπίεσης. Καταληκτικά, τα άνω όρια των πιέσεων φαίνεται και αυτά να παίζουν κάποιο, μικρό βέβαια, ρόλο.

### **5.3. ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**

Σκοπός του δεύτερου σχεδιασμού πειραμάτων είναι η περαιτέρω διερεύνηση των τεσσάρων, πιο σημαντικών για την κατεργασία παραγόντων. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της ανάλυσης και τα συμπεράσματα του πρώτου σχεδιασμού, η παρούσα διεργασία θα εξελιχθεί ως εξής. Αρχικά, κρίνεται απαραίτητη η

ανεξαρτητοποίηση της μελέτης από το πολυμερές υλικό. Δεδομένου ότι και τα τρία υλικά διασφαλίζουν την λειτουργικότητα του τεμαχίου ως προς την μηχανική αντοχή και τις θερμικές ιδιότητες, γνωρίζοντας δε ότι υλικά με μεγαλύτερο MFI έχουν και αυξημένο κόστος, αποφασίζεται να επιλεγεί υλικό με MFI80, με ιδιότητες που φαίνονται στην Εικόνα 5- 11. Η θερμοκρασία του τήγματος φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα, οπότε και επιλέγεται ως ένας από τους τέσσερις παράγοντες ελέγχου του δεύτερου σχεδιασμού. Αντίθετα, η θερμοκρασία του καλουπιού φαίνεται αμελητέα σε σχέση με τους υπόλοιπους παράγοντες, οπότε και θα παραμείνει σταθερή στην φάση αυτή. Από την ανάλυση του πρώτου σχεδιασμού, η θερμοκρασία καλουπιού επιλέγεται να ανέρχεται στους 20 (°C) για τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων.

Οι χρόνοι των δύο σταδίων κρίνεται απαραίτητο να εξετασθούν περαιτέρω. Προκειμένου να μειωθεί η εμφάνιση της αποκοπής της διανομής του υλικού στο εσωτερικό της κοιλότητας, το προς εξέταση εύρος τους μειώνεται. Όπως ανέφερθηκε και νωρίτερα, οι μεσαίες τιμές τείνουν να έχουν καλύτερα αποτελέσματα, οπότε προς αυτή την κατεύθυνση θα κινηθεί και ο δεύτερος σχεδιασμός.

PROPERTIES	VALUE	UNIT	TEST METHOD
<b>General</b>			
Melt Flow Rate (230 °C; 2.16 kg)	80	g/10 min	ISO 1133
Density	905	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183
<b>Mechanical</b>			
Flexural Modulus	1250	MPa	ISO 178
Charpy Impact Strength Notched (23 °C)	5	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
<b>Thermal</b>			
Heat Deflection Temperature 0.45MPa	90	°C	ISO 75
<b>Others</b>			
Shore Hardness	62	D Scale	ISO 868
ISPLEN® PB 300 A3M complies with the European Directives regarding materials intended for contact with foodstuffs. For further information, please contact our Technical Service and Development Laboratory or our Customer Care Service.			
<b>STORAGE</b>			
ISPLEN® PB 300 A3M should be stored in a dry atmosphere, on a paved, drained and not flooded area, at temperatures under 60°C and protected from UV radiation. Storage under inappropriate conditions could initiate degradation processes which may have a negative influence on the processability and the properties of the transformed product.			
September 2009			

Εικόνα 5- 11: Ιδιότητες του υλικού PB 300 A3M που θα χρησιμοποιηθεί κατά τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

Για την σωστή λειτουργία της μηχανής, και έχοντας πυξίδα τα αποτελέσματα του πρώτου σχεδιασμού πειραμάτων, επιλέγεται η μέγιστη πίεση έγχυσης να παραμείνει σταθερή στα 200 (MPa). Από την άλλη, η μέγιστη πίεση συμπίεσης, μιας και έχει σημαντική επίδραση στον ποιοτικό παράγοντα του τηγμένου πυρήνα, θα διερευνηθεί και σε αυτό το στάδιο μελέτης.

Με αυτά κατά νου, διαμορφώνονται οι Πίνακας 5- 12 και Πίνακας 5- 13 με τους παράγοντες ελέγχου και τα επίπεδα τους και τις σταθερές παραμέτρους κατεργασίας για τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων.

Πίνακας 5- 12: Παράγοντες ελέγχου για τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

Παράγοντες Ελέγχου	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	220	240	260
Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	40	60	80
Χρόνος Πλήρωσης (s)	0.19	0.22	0.25
Χρόνος Συμπίεσης (s)	0.45	0.50	0.65

Πίνακας 5- 13: Σταθερές παράμετροι προσομοίωσης για τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

Σταθεροί Παράγοντες Προσομοίωσης	Τιμή
Υλικό (g/10 min)	MF180
Μέγιστη Πίεση Πλήρωσης (MPa)	200
Θερμοκρασία Καλούπιού (°C)	20
Χρόνος Ψύξης (s)	1.6
Χρόνος που παραμένει ανοιχτό το καλούπι (s)	3.48
Θερμοκρασία Δωματίου (°C)	25

Οι ποιοτικοί παράγοντες που επιλέγονται να εξετασθούν κατά τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακας 5- 14. Στο στάδιο αυτό προστίθεται ο ποιοτικός παράγοντας του χρόνου κύκλου. Δεδομένου ότι το στάδιο της ψύξης δεν μελετάτε, ο χρόνος κύκλου θα διαφοροποιείται μόνο σε σχέση με τα στάδια πλήρωσης και συμπίεσης. Ο χρόνος ψύξης και ο χρόνος για τον οποίο το καλούπι παραμένει ανοιχτό αποτελούν το σταθερό παράγοντα στην εξής συνάρτηση χρόνου κύκλου έγχυσης.

$$t_{Total} = t_f + t_p + t_c + t_{m.o.} = t_f + t_p + 5.08$$

Πίνακας 5- 14: Ποιοτικοί παράγοντες προς εξέταση κατά τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

Ποιοτικοί Παράγοντες	Προσέγγιση	Ονομαστική Τιμή	Βαρύτητα
Δύναμη συγκράτησης (Tn)	Μικρότερη – η καλύτερη	87.5	35 %
Βάρος Τεμαχίου(g)	Ονομαστική	15.5 ±3%	35 %
Χρόνος Κύκλου έγχυσης (s)	Μικρότερη – η καλύτερη	4.5	20 %
Τηγμένος Πυρήνας	Μικρότερη – η καλύτερη	-	10 %

Επιλέγεται, για λόγους πληρότητας, να διεξαχθεί μια L27 ανάλυση Taguchi. Ο ορθογώνιος πίνακας κατασκευάστηκε με την βοήθεια του προγράμματος «Minitab». Οι συνδυασμοί των τεσσάρων παραγόντων ελέγχου για κάθε δοκιμή φαίνονται στον Πίνακας 5- 15.

Πίνακας 5- 15: Επίπεδα παραγόντων ελέγχου για τις προσομοιώσεις του δεύτερου σχεδιασμού πειραμάτων

Πείραμα	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
1	220	40	0.19	0.45
2	220	40	0.22	0.5
3	220	40	0.25	0.65
4	220	60	0.22	0.65
5	220	60	0.25	0.45
6	220	60	0.19	0.5
7	220	80	0.25	0.5
8	220	80	0.19	0.65
9	220	80	0.22	0.45
10	240	80	0.19	0.5
11	240	80	0.22	0.65
12	240	80	0.25	0.45
13	240	40	0.22	0.45
14	240	40	0.25	0.5
15	240	40	0.19	0.65
16	240	60	0.25	0.65
17	240	60	0.19	0.45
18	240	60	0.22	0.5
19	260	60	0.19	0.65
20	260	60	0.22	0.45
21	260	60	0.25	0.5
22	260	80	0.22	0.5
23	260	80	0.25	0.65
24	260	80	0.19	0.45
25	260	40	0.25	0.45
26	260	40	0.19	0.5
27	260	40	0.22	0.65

### 5.3.1. Εκτέλεση Δεύτερου Σχεδιασμού Πειραμάτων

Από τις προσομοιώσεις του δεύτερου σχεδιασμού πειραμάτων εξάγονται τα αποτελέσματα του Πίνακας 5- 16. Για πιο ευανάγνωστο πίνακα, η στήλη με τα αποτελέσματα του φαινομένου της άνισης κατανομής της πίεσης παραλείπεται. Αντ' αυτού, οι προσομοιώσεις που παρουσίασαν το φαινόμενο αυτό τονίζονται με πορτοκαλί χρώμα.

Πίνακας 5- 16: Αποτελέσματα δεύτερου Σχεδιασμού Πειραμάτων

Πείραμα	Δύναμη Συγκράτησης (Tn)	Βάρος Τεμαχίου (g)	Χρόνος Κύκλου Έγχυσης (s)
1	81.4	15.106	5.768
2	78.6	15.169	5.801
3	75.9	15.246	6.053
4	79.8	15.153	5.948
5	77.1	15.127	5.824
6	82.6	15.206	5.768
7	78.6	15.297	5.893
8	83.9	15.106	5.999
9	81.3	15.286	5.801
10	76.5	15.263	5.818
11	73.1	15.234	5.962
12	71.6	15.124	5.787
13	70.1	15.368	5.811
14	68.7	15.301	5.853
15	73.7	15.248	5.975
16	70	15.27	6.008
17	75.1	15.287	5.75
18	70.1	15.365	5.811
19	68.7	15.234	5.973
20	65.3	15.316	5.781
21	63.3	15.296	5.851
22	66.9	15.349	5.869
23	64.9	15.378	6.005
24	70.1	15.304	5.769
25	61.8	15.356	5.785
26	67.3	15.294	5.817
27	63.9	15.324	6.005

### 5.3.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων Δεύτερου Σχεδιασμού Πειραμάτων

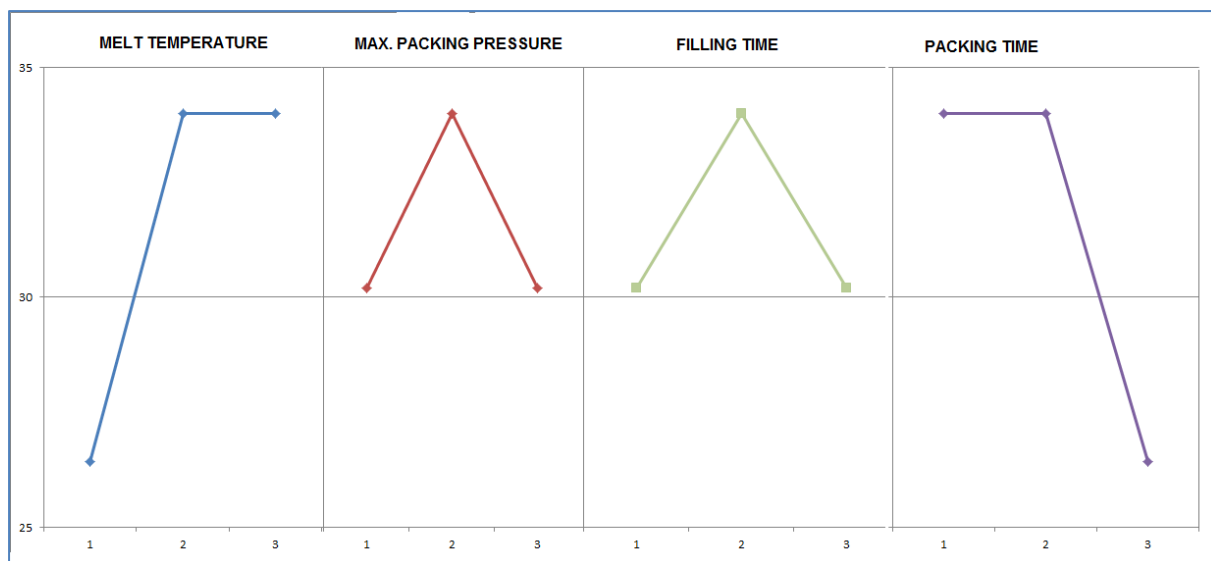
Ακριβώς με την ίδια μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων, αναλύονται τα αποτελέσματα του δεύτερου σχεδιασμού πειραμάτων.

#### 5.3.2.1. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Τηγμένος πυρήνας

Για κάθε επίπεδο, υπολογίζεται η επίδραση των τεσσάρων παραγόντων ελέγχου στην μέση απόκριση της αναλογίας S/N για τον πλασματικό ποιοτικό παράγοντα του τηγμένου πυρήνα. Έτσι, κατασκευάζεται ο Πίνακας 5- 17 με την ποσοτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων να αναγιγνώσκονται στην Εικόνα 5- 12. Στη συνέχεια, εκτελείται και η ανάλυση ANOVA, τα αποτελέσματα της οποίας παρατίθενται στον Πίνακα 5- 18.

Πίνακας 5- 17: Μέση απόκριση της αναλογίας S/N του ποιοτικού παράγοντα Τηγμένος Πυρήνας για τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Επίπεδο 1	26.428	30.204	30.204	33.979
Επίπεδο 2	33.980	33.980	33.979	33.979
Επίπεδο 3	33.979	30.204	30.204	26.428
Δέλτα	7.551	3.775	3.775	7.551
<b>Βαθμός</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>



Εικόνα 5- 12: Ποσοτική αναπαράσταση των λόγων S/N του παράγοντα τηγμένου πυρήνα κατά τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

Πίνακας 5- 18: Ανάλυση ANOVA για τον ποιοτικό παράγοντα του τηγμένου πυρήνα στον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Χρόνος Συμπίεσης (s)	
Contr. of Level 1	0.509	0.150	0.150	0.181	
Contr. of Level 2	0.181	0.110	0.110	0.181	
Contr. of Level 3	0.181	0.150	0.150	0.509	<b>Σφάλμα</b>
SS	0.640	0.178	0.178	0.640	0.142
Variance	0.320	0.089	0.089	0.320	0.008
<b>Contribution %</b>	<b>36</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>36</b>	

### 5.3.2.2. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Δύναμη σύσφιξης

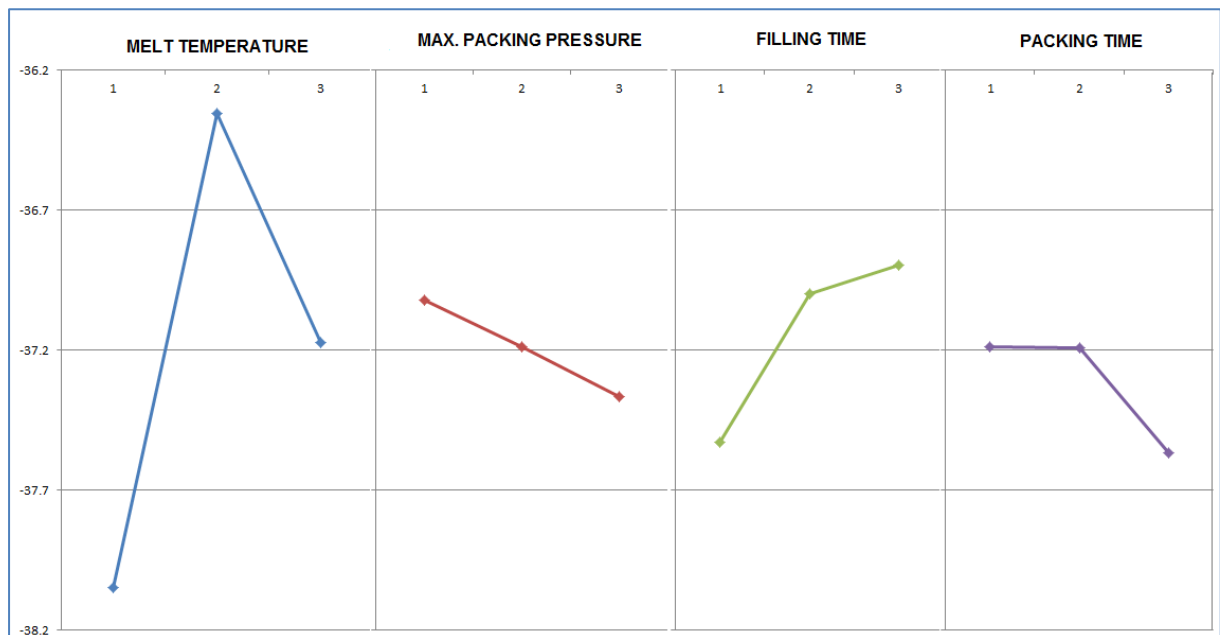
Ομοίως, κατασκευάζονται οι Πίνακας 5- 19 και Πίνακας 5- 20 με την μέση απόκριση της αναλογίας Σήματος/Θορύβου και την ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων ελέγχου στον προς εξέταση ποιοτικό παράγοντα της δύναμης σύσφιξης. Στην Εικόνα 5- 13, απεικονίζεται ποσοτικά το αποτέλεσμα του Πίνακας 5- 19.

Πίνακας 5- 19: Αποτελέσματα ανάλυσης της αναλογίας S/N στον παράγοντα της δύναμης σύσφιξης για τον δεύτερο σχεδιασμό

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Επίπεδο 1	-38.048	-37.024	-37.531	-37.190
Επίπεδο 2	-36.358	-37.189	-37.001	-37.194
Επίπεδο 3	-37.174	-37.367	-36.898	-37.567
Δέλτα	1.69	0.343	0.632	0.377
<b>Βαθμός</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Πίνακας 5- 20: Ανάλυση διακύμανσης για τον ποιοτικό παράγοντα της δύναμης σύσφιξης

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Χρόνος Συμπίεσης (s)	
Contr. of Level 1	57412.95	45710.44	51272.05	47547.98	
Contr. of Level 2	47002.24	47451.36	47031.15	47538.53	
Contr. of Level 3	38966.76	49417.29	44366.4	47509.47	Σφάλμα
SS	839.02	36.16	126.67	53.05	7.39
Variance	419.51	18.08	63.34	26.53	0.41
<b>Contribution %</b>	<b>78.98</b>	<b>3.4</b>	<b>11.92</b>	<b>4.99</b>	



Εικόνα 5- 13: Ποσοτική αναπαράσταση του δείκτη S/N της δύναμης σύσφιξης



### 5.3.2.3. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Βάρος τεμαχίου

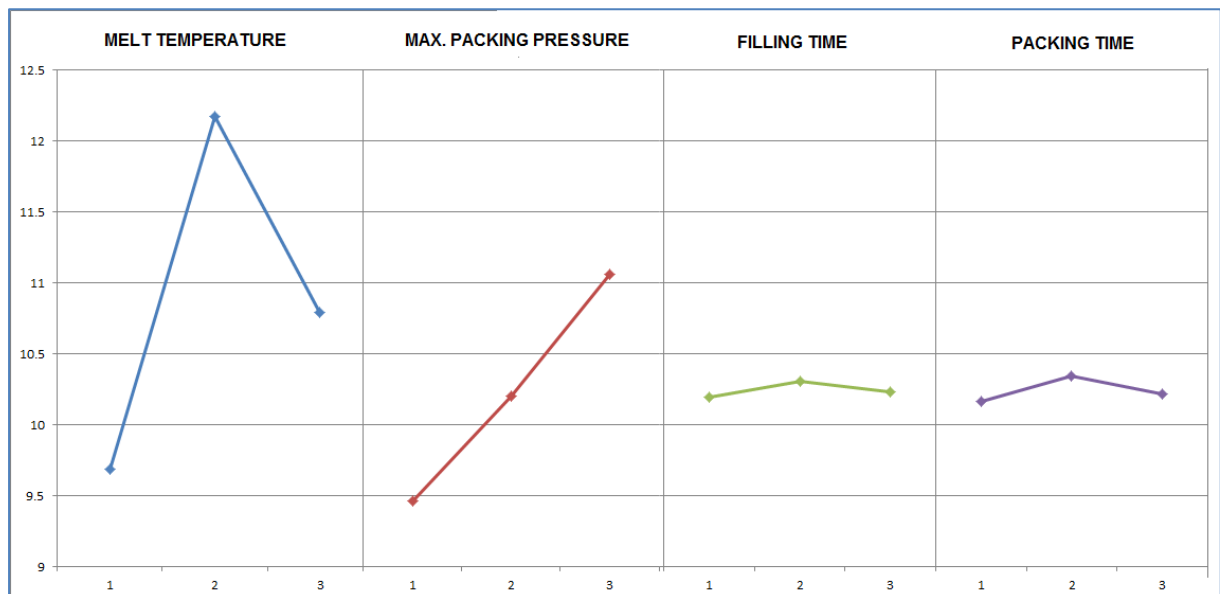
Η μέση απόκριση της αναλογίας Σήματος/Θορύβου φαίνεται στον Πίνακα 5- 21, ενώ η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων στην Εικόνα 5- 14. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης, με την ποσοστιαία συνεισφορά των παραγόντων παρατίθενται στον Πίνακα 5- 22.

Πίνακας 5- 21: Μέση απόκριση της αναλογίας S/N για το βάρος τεμαχίου κατά τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Επίπεδο 1	9.68	9.46	10.19	10.16
Επίπεδο 2	12.17	10.2	10.3	10.34
Επίπεδο 3	10.79	11.06	10.23	10.21
Δέλτα	2.49	1.6	0.12	0.18
<b>Βαθμός</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>

Πίνακας 5- 22: Ανάλυση ANOVA για το βάρος τεμαχίου στον δεύτερο σχεδιασμό

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Χρόνος Συμπίεσης (s)	
Contr. of Level 1	0.553	1.034	0.891	0.886	
Contr. of Level 2	0.933	0.882	0.883	0.882	
Contr. of Level 3	1.215	0.733	0.869	0.877	<b>Σφάλμα</b>
SS	0.06	0.008	0.002	0.005	0.005
Variance	0.03	0.004	0.001	0.002	0.0002
<b>Contribution %</b>	<b>74.99</b>	<b>9.86</b>	<b>2.97</b>	<b>5.94</b>	



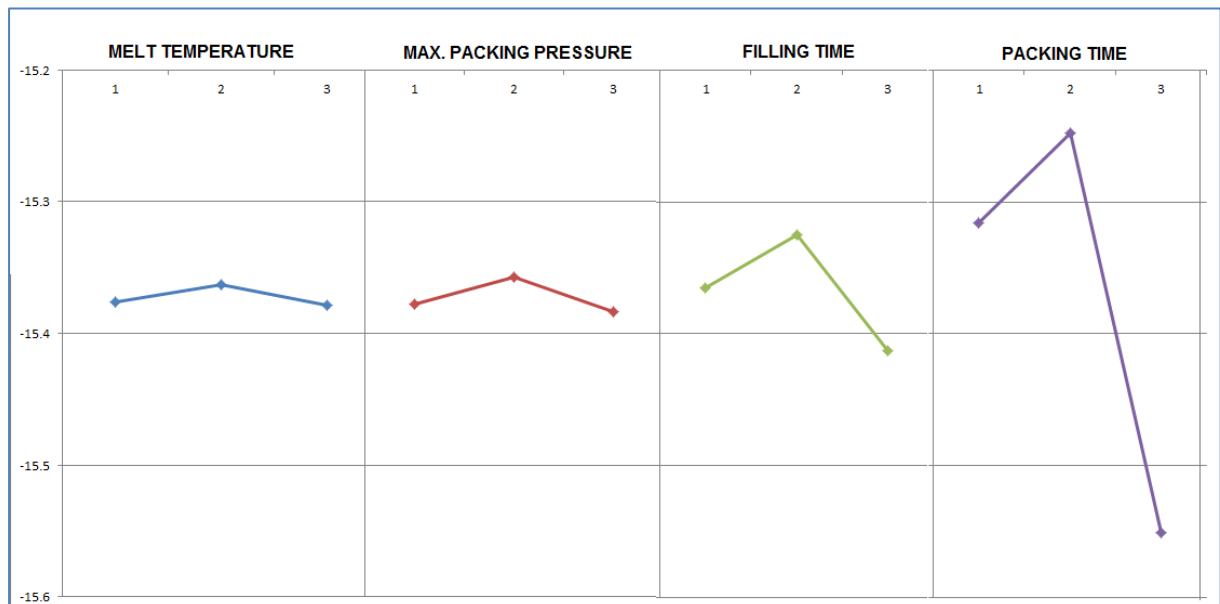
Εικόνα 5- 14: Ποσοτική αναπαράσταση των λόγων S/N για το βάρος τεμαχίου στον δεύτερο σχεδιασμό

#### 5.3.2.4. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Χρόνος κύκλου έγχυσης

Ακολουθώντας την ίδια διεργασία, συμπληρώνεται ο Πίνακας 5- 23 με την μέση απόκριση της αναλογίας S/N για τον παράγοντα του κύκλου έγχυσης, τα αποτελέσματα της οποίας αναπαρίστανται στην Εικόνα 5- 15. Ο Πίνακας 5- 24 καλύπτει την ανάλυση διακύμανσης για τον εν λόγω ποιοτικό παράγοντα.

Πίνακας 5- 23: Λόγος Σήματος/Θορύβου για τον κύκλο έγχυσης στον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Επίπεδο 1	-15.38334366	-15.38413153	-15.36165433	-15.39805709
Επίπεδο 2	-15.36944864	-15.36958282	-15.3953946	-15.3742063
Επίπεδο 3	-15.37601897	-15.37509692	-15.37176234	-15.35654788
Δέλτα	0.013895027	0.01454871	0.033740277	0.041509211
<b>Βαθμός</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>



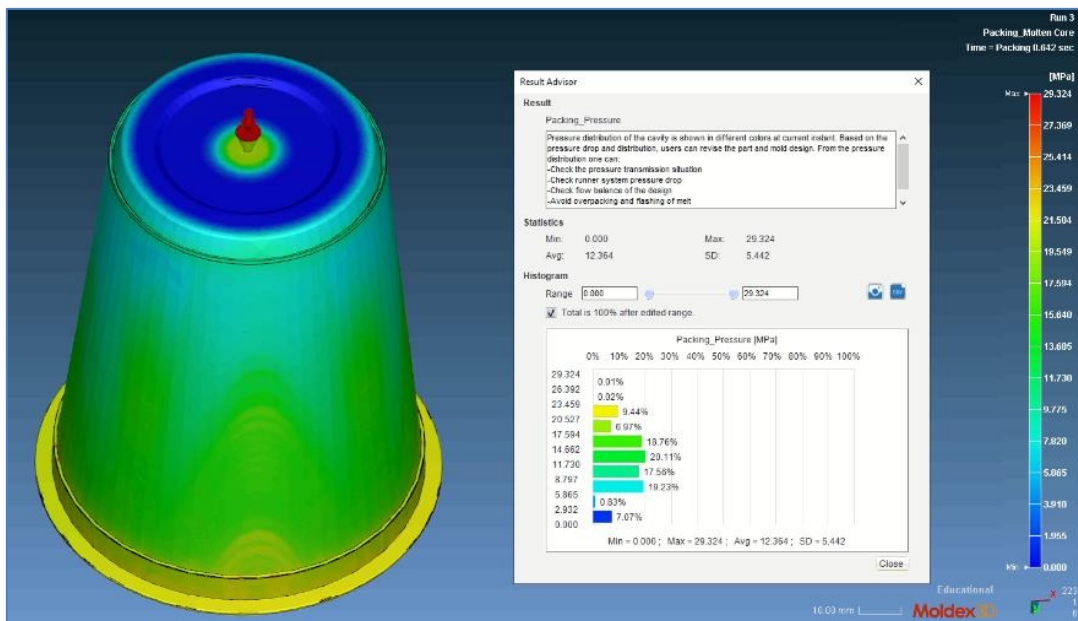
Εικόνα 5- 15: Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S/N για τον κύκλο έγχυσης

Πίνακας 5- 24: Ανάλυση διακύμανσης για τον κύκλο έγχυσης κατά τον δεύτερο σχεδιασμό

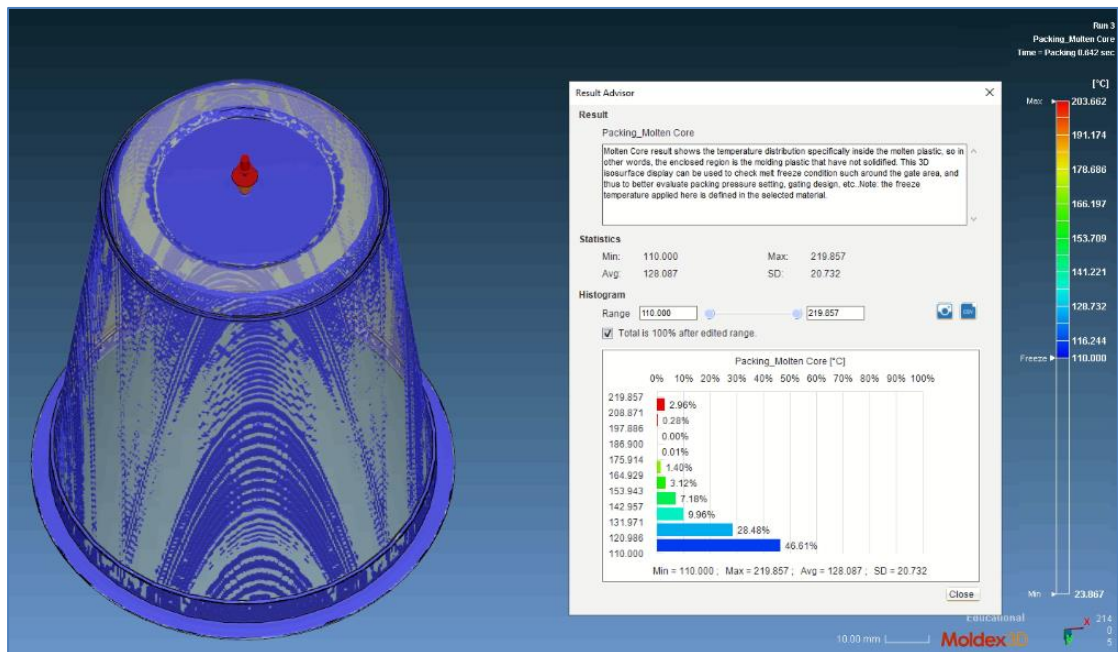
	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Χρόνος Συμπίεσης (s)	
Contr. of Level 1	310.4057	310.5584	307.8543	301.3233	
Contr. of Level 2	309.4667	308.7518	309.6309	306.0284	
Contr. of Level 3	310.40567	310.9697	312.80064	323.1366	<b>Σφάλμα</b>
SS	0.0004	0.0022	0.0141	0.2107	0.009
Variance	0.0002	0.0011	0.007	0.1053	0.001
<b>Contribution %</b>	<b>0.2</b>	<b>0.95</b>	<b>6</b>	<b>89.82</b>	

### 5.3.2.5. Συμπεράσματα

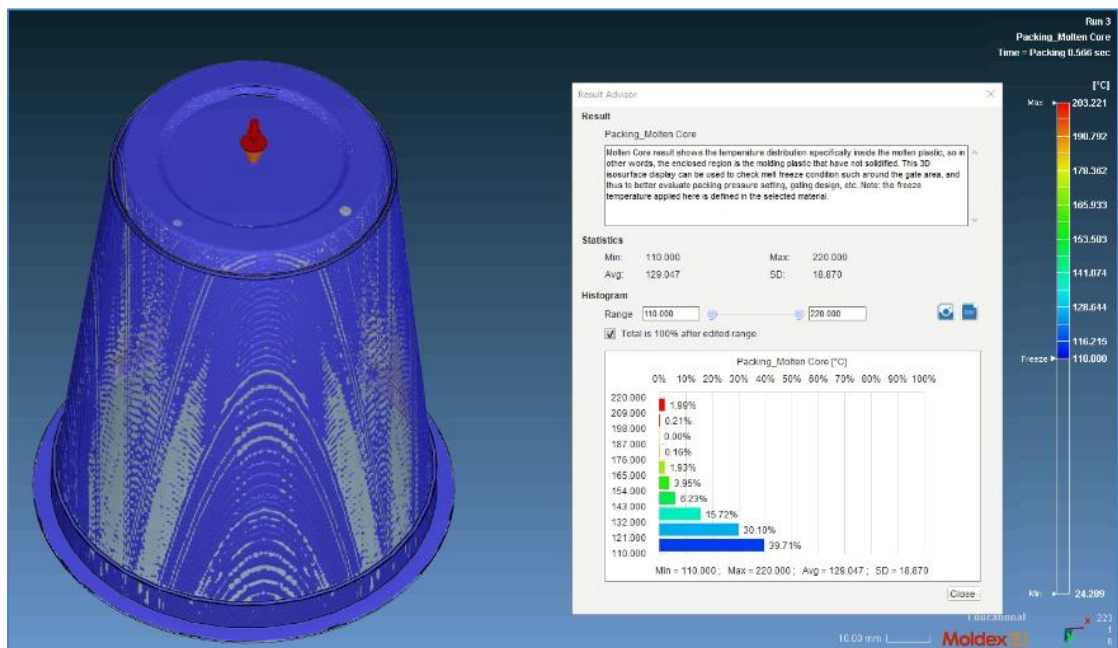
Καταρχάς, άξιο παρατήρησης είναι ότι, κατά τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων, μόνο 2 από τις 27 προσομοιώσεις εμφάνισαν αποκοπή της διανομής υλικού στο εσωτερικό της κοιλότητας, σε αντίθεση με τις 19 από τις 27 του πρώτου σχεδιασμού. Επομένως ο σχεδιασμός του δεύτερου σετ πειραμάτων ήταν επιτυχημένος. Οι δύο δοκιμές με το φαινόμενο αυτό έχουν δύο κοινά χαρακτηριστικά, την χαμηλότερη θερμοκρασία υλικού και τον μεγαλύτερο χρόνο συμπίεσης. Συμπεραίνει λοιπόν κανείς ότι με αύξηση της θερμοκρασίας, ή μείωση του χρόνου συμπίεσης, η εμφάνιση του φαινομένου εκλείπει. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται και από τους Πίνακες 5- 17 και Πίνακα 5- 18, καθώς διακρίνεται ότι οι παράγοντες που επιδρούν έντονα στον ποιοτικό παράγοντα αυτό είναι οι δύο προαναφερθέντες. Οι τιμές των παραγόντων ελέγχου που τείνουν να φέρουν καλύτερα αποτελέσματα, όπως παρατηρείται από την Εικόνα 5- 12, είναι και οι μεσαίας τάξης τιμές που εξετάζονται. Ενδεικτικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 3. Κατά το τέλος της φάσης συμπίεσης, η κατανομή της πίεσης στο κομμάτι (Εικόνα 5- 16) είναι εν γένει καλή. Συνάμα, η περιοχή γύρω από την πύλη εισόδου παραμένει τηγμένη και έχει αποκοπεί σε σχέση με το υπόλοιπο τεμάχιο που έχει ήδη στερεοποιηθεί (Εικόνα 5- 17). Το φαινόμενο αυτό, ένα δέκατο του δευτερολέπτου νωρίτερα, έχει ήδη αρχίσει να εξελίσσεται και η εικόνα στο εσωτερικό της κοιλότητας διαμορφώνεται όπως στην Εικόνα 5- 18. Το φαινόμενο της στερεοποίησης του υλικού γύρω από την πύλη αρχίζει να λαμβάνει χώρα μόνο προς το τέλος της φάσης συμπίεσης και η κατανομή της πίεσης κρίνεται σχετικά ικανοποιητική. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι έχει γίνει καλή επιλογή πολυμερούς υλικού, με στοχευμένες τιμές για τους χρονικούς παράγοντες που εξετάζουμε.



Εικόνα 5- 16: : Κατανομή πίεσης στο τέλος της φάσης συμπίεσης για την προσομοίωση 3 του δεύτερου σχεδιασμού πειραμάτων



Εικόνα 5- 17: Η εικόνα της θερμοκρασίας που επικρατεί στον πυρήνα του τεμαχίου στο τέλος της φάσης συμπίεσης (0.65 s) για την τρίτη προσομοίωση του δεύτερου σχεδιασμού



Εικόνα 5- 18: Η εικόνα του τηγμένου πυρήνα στα 0.55 s της φάσης συμπίεσης της τρίτης δοκιμής κατά τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων

Γενικά, κρίνεται έντονη η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από την θερμοκρασία. Για τους τρεις από τους τέσσερις ποιοτικούς παράγοντες που εξετάζουμε, η θερμοκρασία κατέχει την πρωταρχική θέση με ποσοστιαία συνεισφορά που αγγίζει και το 80 % για την δύναμη συγκράτησης. Η έντονη αυτή διακύμανση μπορεί να

αιτιολογηθεί από το γεγονός ότι το θερμοκρασιακό φάσμα που εξετάζεται είναι αρκετά ευρύ. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η περαιτέρω διερεύνηση του. Μάλιστα, για τη θερμοκρασία των 240 °C εντοπίζονται και οι μεγαλύτεροι λόγοι Σήματος/Θορύβου. Οι παρατηρήσεις αυτές εναρμονίζονται πλήρως με τα αποτελέσματα που προέκυψαν και από τον πρώτο σχεδιασμό πειραμάτων.

Αναφορικά με τον ποιοτικό παράγοντα του κύκλου έγχυσης, οι ελεγχόμενες μεταβλητές που διαδραματίζουν κάποιο ρόλο φαίνεται να είναι μόνο τα χρονικά διαστήματα της πλήρωσης και συμπίεσης, με το δεύτερο μάλιστα να έχει και την μεγαλύτερη επίδραση της τάξης των 90%. Ο χρόνος έγχυσης επιδρά μόνο κατά 10% στο τελικό παράγοντα. Τα αποτελέσματα αυτά φαντάζουν λογικά, καθώς πρόκειται γενικά για έναν πολύ μικρό χρόνο κύκλο έγχυσης. Επομένως, το στάδιο της κατεργασίας με την μεγαλύτερη διάρκεια, δηλαδή η φάση συμπίεσης στην παρούσα εργασία, θα έχει και την συντριπτική επιρροή. Επίσης, να σημειωθεί ότι ο χρόνος συμπίεσης εξετάζεται με ακρίβεια σε φάσμα του δέκατου του δευτερολέπτου, σε αντίθεση με την μεταβολή του χρόνου πλήρωσης, η οποία είναι της τάξης του εκατοστού του δευτερολέπτου.

Τέλος, σε σχέση με τους υπόλοιπους παράγοντες ελέγχου, πλην της θερμοκρασίας τήγματος, ανάλογα με το ποιοτικό παράγοντα που εξετάζεται η σημαντικότητα διαφέρει. Για το βάρος τεμαχίου, ο δεύτερος σημαντικότερος παράγοντας, με επίδραση της τάξης του 10%, είναι η μέγιστη πίεση συμπίεσης, ενώ οι χρόνοι συμπίεσης και έγχυσης ακολουθούν με μικρή συμμετοχή στα 6% και 3%. Από την άλλη, στον ποιοτικό παράγοντα της δύναμης σύσφιξης ο χρόνος έγχυσης εμφανίζεται σαν δεύτερος πιο σημαντικός παράγοντας, με συμμετοχή 12% στο μετρήσιμο αποτέλεσμα. Ο χρόνος συμπίεσης και η μέγιστη πίεση συμπίεσης φαίνεται να έχουν την ίδια μικρή επιρροή, της τάξης του 5%.

#### **5.4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΣ ΤΡΙΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**

Κατά τον δεύτερο σχεδιασμό πειραμάτων, αποτυπώθηκε η συντριπτική εξάρτηση των ποιοτικών παραγόντων από την θερμοκρασία τήγματος. Κρίνεται λοιπόν σκόπιμο, αν όχι απαραίτητο, να διεξαχθεί ένα μικρότερης κλίμακας πείραμα, προκειμένου να μελετηθεί καλύτερα και η επίδραση των λοιπών παραγόντων. Όπως προτείνεται από τον προμηθευτή και έχει άλλωστε διαπιστωθεί από τις προηγούμενες αναλύσεις, η θερμοκρασία των 240 °C τείνει να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Οπότε, προς ετούτη την κατεύθυνση μειώνεται το θερμοκρασιακό εύρος που εξετάζεται, ενώ για τους υπόλοιπους τρεις παράγοντες θεωρείται ότι δεν χρειάζεται να αλλάξει κάτι. Στον Πίνακα 5- 25 αναγράφονται τα επίπεδα των παραγόντων ελέγχου, τα οποία και θα χρησιμοποιηθούν κατά τον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων.

Πίνακας 5- 25: Παράγοντες ελέγχου για τον διερευνητικό τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

Παράγοντες Ελέγχου	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	235	240	245
Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	40	60	80
Χρόνος Πλήρωσης (s)	0.19	0.22	0.25
Χρόνος Συμπίεσης (s)	0.45	0.50	0.65

Οι ποιοτικοί παράγοντες που θα εξετασθούν στην παρούσα φάση της εργασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5- 26. Αναμένεται, καθώς το θερμοκρασιακό εύρος μειώνεται, να μην εμφανιστεί το φαινόμενο της αποκοπής της διανομής υλικού. Για τον λόγο αυτό, ο «πλασματικός» παράγοντας του τηγμένου πυρήνα που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της εργασίας εξαιρείται από το τελευταίο στάδιο. Οι σταθερές παράμετροι της κατεργασίας παραμένουν ως έχουν στον Πίνακα 5- 13.

Πίνακας 5- 26: Ποιοτικοί παράγοντες για τον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

Ποιοτικοί Παράγοντες	Προσέγγιση	Ονομαστική Τιμή	Βαρύτητα
Δύναμη συγκράτησης (Tn)	Μικρότερη – η καλύτερη	87.5	40 %
Βάρος Τεμαχίου(g)	Ονομαστική	15.5 ±3%	40 %
Χρόνος Κύκλου έγχυσης (s)	Μικρότερη – η καλύτερη	4.5	20 %

Αποφασίζεται να πραγματοποιηθεί ανάλυση με L9 Taguchi. Ο ορθογώνιος πίνακας κατασκευάστηκε με χρήση του προγράμματος «Minitab». Οι προσομοιώσεις με τους συνδυασμούς των παραμέτρων εισόδου αναγράφονται στον Πίνακα 5- 27.

Πίνακας 5- 27: Προσομοιώσεις και επίπεδα παραμέτρων ελέγχου για κάθε μία στον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

Πείραμα	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
1	235	0.19	40	0.45
2	235	0.22	60	0.5
3	235	0.25	80	0.65
4	240	0.19	60	0.65
5	240	0.22	80	0.45
6	240	0.25	40	0.5
7	245	0.19	80	0.5
8	245	0.22	40	0.65
9	245	0.25	60	0.45

#### 5.4.1. Εκτέλεση Τρίτου Σχεδιασμού Πειραμάτων

Με την εκτέλεση των εννιά δοκιμών που συγκροτούν τον τρίτο σχεδιασμό, διαμορφώνεται ο Πίνακας 5- 28, με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Πίνακας 5- 28: Αποτελέσματα ποιοτικών παραγόντων για τον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

Πείραμα	Δύναμη Συγκράτησης (Tn)	Βάρος Τεμαχίου (g)	Χρόνος Κύκλου Έγχυσης (s)
1	74.8	15.161	5.73
2	73.4	15.203	5.864
3	73.1	15.223	6.003
4	75.1	15.177	5.975
5	73.1	15.345	5.811
6	68.7	15.341	5.853
7	73.9	15.305	5.817
8	69.7	15.198	6.002
9	67.9	15.243	5.838

#### 5.4.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων Διερευνητικού Τρίτου Σχεδιασμού Πειραμάτων

Με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και για τους δύο προηγούμενους σχεδιασμούς πειραμάτων , πραγματοποιείται και η ανάλυση των αποτελεσμάτων για τον τρίτο σχεδιασμό. Να σημειωθεί ότι και στις τρεις αναλύσεις που ακολουθούν οι βαθμοί ελευθερίας του σφάλματος, όπως προκύπτει από το αντίστοιχο κεφάλαιο του θεωρητικού υποβάθρου αναφορικά με την ανάλυση διακύμανσης, είναι 0. Επομένως ο όρος του σφάλματος δεν υπολογίζεται.

##### 5.4.2.1. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Δύναμη σύσφιξης

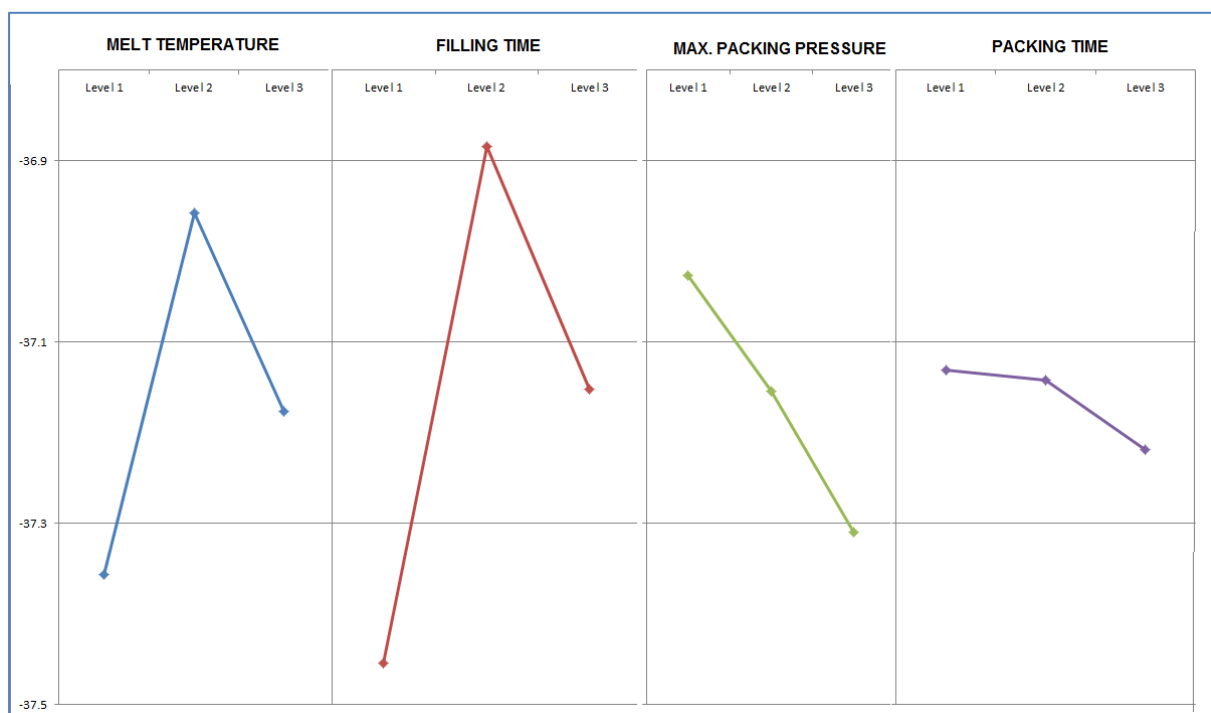
Για κάθε επίπεδο, υπολογίζεται η επίδραση του κάθε παράγοντα ελέγχου στη μέση απόκριση της αναλογίας S/N για τον ποιοτικό παράγοντα της δύναμης συγκράτησης (Πίνακας 5- 29) και η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5- 19. Επιπλέον, εκτελέστηκε και η ανάλυση της διακύμανσης, τα αποτελέσματα της οποίας παρατίθενται στον Πίνακα 5- 30.

Πίνακας 5- 29: Μέση απόκριση της αναλογίας S/N του ποιοτικού παράγοντα δύναμη συγκράτησης στον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Επίπεδο 1	-37.357	-37.455	-37.027	-37.131
Επίπεδο 2	-36.958	-36.885	-37.155	-37.142
Επίπεδο 3	-37.177	-37.152	-37.310	-37.219
Δέλτα	0.398	0.570	0.283	0.087
<b>Βαθμός</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>

Πίνακας 5- 30: Ανάλυση ANOVA της δύναμης συγκράτησης κατά τον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Contr. of Level 1	16324.56	16695.48	15151.41	15527.53
Contr. of Level 2	15681.87	15580.81	15609.65	15552
Contr. of Level 3	14910.75	14653.84	16148	15826.80
SS	16.06	29.01	7.95	5.21
Variance	8.03	14.50	3.97	2.61
<b>Contribution %</b>	<b>27.64</b>	<b>49.92</b>	<b>13.68</b>	<b>9</b>



Εικόνα 5- 19: Ποσοτικό γράφημα της αναλογίας S/N για την δύναμη συγκράτησης στον τρίτο DOE

#### 5.4.2.2. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Βάρος τεμαχίου

Αντιστοίχως, στους Πίνακες 5- 31 και Πίνακας 5- 32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την μέση απόκριση του δείκτη S/N και την ανάλυση ANOVA αντίστοιχα. Στην Εικόνα 5- 20 αναπαρίστανται γραφικά τα αποτελέσματα του Πίνακας 5- 31.

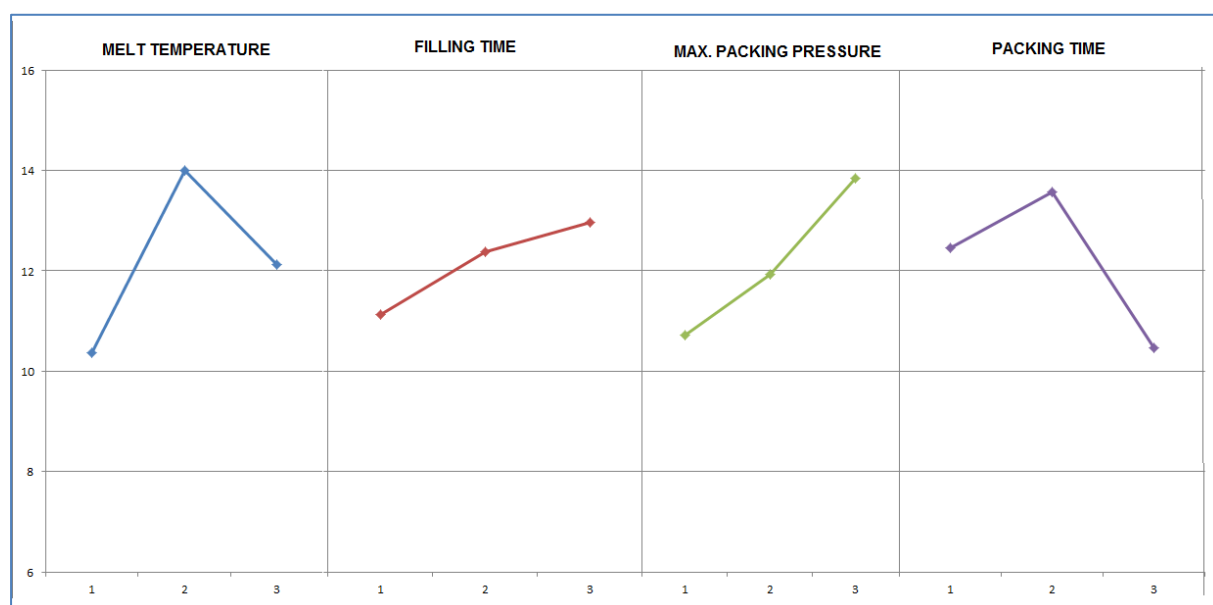
Πίνακας 5- 31: Μέση απόκριση του δείκτη S/N για το βάρος τεμαχίου στον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
Επίπεδο 1	10.364	11.137	10.721	12.464
Επίπεδο 2	13.994	12.379	11.923	13.572
Επίπεδο 3	12.134	12.975	13.848	10.455
Δέλτα	3.630	1.838	3.127	3.117
<b>Βαθμός</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>3</b>



Πίνακας 5- 32: Ανάλυση ANOVA για το βάρος τεμαχίου στον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
<i>Contr. of Level 1</i>	0.278	0.245	0.213	0.188
<i>Contr. of Level 2</i>	0.135	0.190	0.256	0.141
<i>Contr. of Level 3</i>	0.190	0.160	0.131	0.271
SS	0.013	0.005	0.011	0.011
Variance	0.006	0.002	0.005	0.005
<b>Contribution %</b>	<b>32.85</b>	<b>11.76</b>	<b>28.06</b>	<b>27.33</b>



Εικόνα 5- 20: Γραφική αναπαράσταση της αναλογίας S/N του βάρους τεμαχίου στον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

#### 5.4.2.3. Απόκριση ποιοτικού παράγοντα: Χρόνος κύκλου έγχυσης

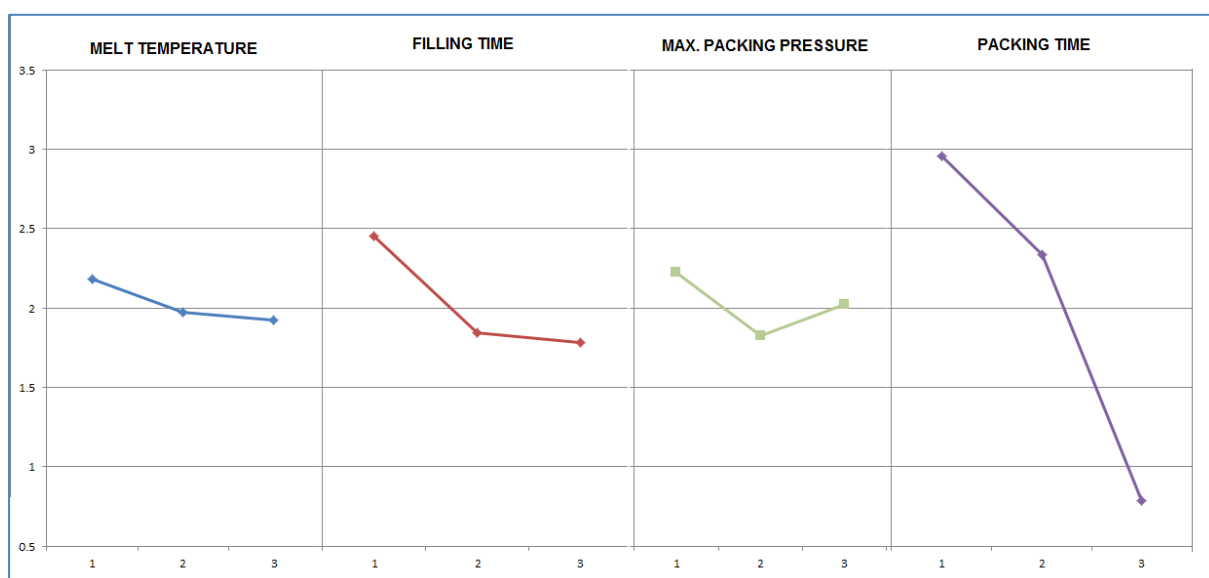
Τέλος, για τον ποιοτικό παράγοντα του χρόνου κύκλου έγχυσης, κατασκευάζεται ο Πίνακας 5- 33 με την μέση απόκριση της αναλογίας Σήματος/Θορύβου, με το ποσοτικό γράφημα των αποτελεσμάτων να φαίνεται στην Εικόνα 5- 21. Εκτελείται και η ανάλυση της διακύμανσης, τα αποτελέσματα της οποίας διαμορφώνουν τον Πίνακα 5- 34.

Πίνακας 5- 33: Μέση απόκριση της αναλογίας S/N του βάρους τεμαχίου στον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
<i>Επίπεδο 1</i>	2.184	2.452	2.228	2.957
<i>Επίπεδο 2</i>	1.974	1.847	1.828	2.334
<i>Επίπεδο 3</i>	1.921	1.780	2.023	0.789
Δέλτα	0.263	0.672	0.400	2.168
<b>Βαθμός</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

Πίνακας 5- 34: Ανάλυση Διακύμανσης για τον χρόνο κύκλου έγχυσης στον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

	Θερμοκρασία Τήγματος (°C)	Χρόνος Πλήρωσης (s)	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης (MPa)	Χρόνος Συμπίεσης (s)
<i>Contr. of Level 1</i>	1.852	1.736	1.833	1.525
<i>Contr. of Level 2</i>	1.918	1.980	1.980	1.754
<i>Contr. of Level 3</i>	1.947	2.007	1.906	2.503
SS	0.001	0.006	0.001	0.065
Variance	0.000	0.003	0.001	0.032
<b>Contribution %</b>	<b>0.9</b>	<b>8.2</b>	<b>1.9</b>	<b>90.0</b>



Εικόνα 5- 21: Ποσοτική αναπαράσταση της αναλογίας S/N για τον χρόνο κύκλου έγχυσης στον τρίτο σχεδιασμό πειραμάτων

#### 5.4.2.4. Συμπεράσματα από τον τρίτο Σχεδιασμό πειραμάτων

Καταρχάς, χρήσιμο θα ήταν να επισημανθεί ότι, κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων του τρίτου σχεδιασμού, σε καμία προσομοίωση δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της αποκοπής της διανομής υλικού. Επαληθεύεται λοιπόν ότι με αύξηση της θερμοκρασίας η εμφάνιση του φαινομένου βελτιώνεται. Επιπλέον, η εξάρτηση των ποιοτικών παραγόντων από την θερμοκρασία του πολυμερούς υλικού μειώθηκε αισθητά. Η θερμοκρασία τήγματος παραμένει στους πρώτους δύο παράγοντες με την μεγαλύτερη επίδραση για τον βάρος και την δύναμη σύσφιξης, ωστόσο συμμετέχει πλέον με πολύ μικρότερα ποσοστά. Συμπεραίνοντας, θα μπορούσε να πει κανείς ότι η επιλογή του εύρους των παραμέτρων ελέγχου ήταν επιτυχημένη.

Πιο συγκεκριμένα, η εικόνα για τον ποιοτικό παράγοντα του κύκλου έγχυσης παρέμεινε σχετικά ίδια. Το ποσοστό επιρροής του χρόνου συμπίεσης υπολογίστηκε ίδιο, ενώ διαφοροποιήθηκαν ελαφρώς τα ποσοστά των υπολοίπων παραμέτρων. Η

σειρά σημαντικότητας είναι όμως ίδια. Εφόσον οι παράμετροι ελέγχου που αφορούν τους χρόνους για τους οποίους διαρκούν τα στάδια της πλήρωσης και συμπίεσης παρέμειναν αμετάβλητα, το αποτέλεσμα που προέκυψε από την ανάλυση είναι λογικό.

Για τον ποιοτικό παράγοντα του βάρους τεμαχίου, φαίνεται ότι όλοι οι παράμετροι ελέγχου συμβάλλουν στο αποτέλεσμα. Μάλιστα, η θερμοκρασία τήγματος παραμένει η παράμετρος με την μεγαλύτερη επίδραση, ωστόσο φαίνεται τώρα ισοδύναμη με την μέγιστη πίεση συμπίεσης και τον χρόνο συμπίεσης, με ποσοστό επίδρασης της τάξης του 30% η καθεμία. Ο χρόνος πλήρωσης έχει την πιο μικρή συνεισφορά στον παράγοντα αυτό, με την συνεισφορά του να αγγίζει τα 12%.

Από την άλλη, για τον ποιοτικό παράγοντα της δύναμης σύσφιξης, ο παράγοντας με την σημαντικότερη επίδραση είναι πλέον ο χρόνος πλήρωσης, με ποσοστό της τάξης του 50%. Η τιμή μάλιστα 0.22 s για τον χρόνο πλήρωσης φαίνεται να είναι προτιμότερη. Η θερμοκρασία τήγματος έρχεται σε δεύτερη θέση και συνεισφέρει με ποσοστό 28%, ενώ ακολουθεί η μέγιστη πίεση συμπίεσης με 14%. Ο χρόνος συμπίεσης είναι ο παράγοντας με την μικρότερη επίδραση, με ποσοστό συμμετοχής που φτάνει το 9%.

Να σημειωθεί επιπλέον ότι η μικρή διαφορά ανάμεσα στα επίπεδα 1 και 2 που ορίστηκαν για τον χρόνο συμπίεσης αντικατροπτίζεται και στα εν γένει αποτελέσματα, μιας και τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τα επίπεδα αυτά βγαίνουν παραπλήσια. Σε γενικές γραμμές, η βέλτιστη τιμή για την θερμοκρασία φαίνεται να είναι οι 240 °C, κάτι που συνιστά άλλωστε και ο προμηθευτής του υλικού. Αναφορικά με τους χρόνους, δεν θα ήταν ανυπόστατο να ειπωθεί ότι οι μεσαίες τιμές που εξετάστηκαν, δηλαδή 0.22 s και 0.5 s για τον χρόνο πλήρωσης και συμπίεσης αντίστοιχα, τείνουν σε καλύτερα αποτελέσματα. Για τον παράγοντα ελέγχου της μέγιστης πίεσης έγχυσης δεν μπορεί να γίνει κάποια βάσιμη πρόβλεψη, καθώς ανά εξεταζόμενο ποιοτικό παράγοντα το βέλτιστο επίπεδό του διαφέρει. Σε κάθε περίπτωση, οι βέλτιστες τιμές για τους παράγοντες ελέγχου θα καθοριστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

### 6.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Μπορεί η πρωτογενή ανάλυση των αποτελεσμάτων να έδωσε μια γενική εικόνα ως προς τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας,, ωστόσο οι βέλτιστες τιμές των ποιοτικών παραγόντων μπορεί να προκύπτουν από διαφορετικές τιμές των μεταβλητών. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας συνάρτησης βελτιστοποίησης, βάση της οποίας θα προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες εισόδου. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η συνάρτηση της οποίας επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση και στην οποία συμμετέχουν οι ποιοτικοί παράγοντες του Πίνακα 5- 26 με την αντίστοιχη βαρύτητα που σημειώνεται. Σε κάθε εξεταζόμενο ποιοτικό παράγοντα, αντιστοιχεί ένας όρος, ο οποίος υπολογίζεται για κάθε προσομοίωση. Προκύπτει από την διαίρεση της τιμής του παράγοντα κατά την προσομοίωση αυτή με την μέγιστη τιμή που έλαβε κατά την εκτέλεση του σχεδιασμού πειραμάτων και πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας. Προκύπτει λοιπόν η εξής αντικειμενική συνάρτηση.

$$F = 40 \frac{Clam. Force(Tn)}{75.1} + 40 \frac{Abs. Dev. from Target Weight(g)}{0.339} + 20 \frac{Cycle Time(s)}{0.923}$$

Επομένως, για τους εφτά παράγοντες ελέγχου που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, συγκεντρώνονται οι βέλτιστες τιμές στον Πίνακα 6- 1.

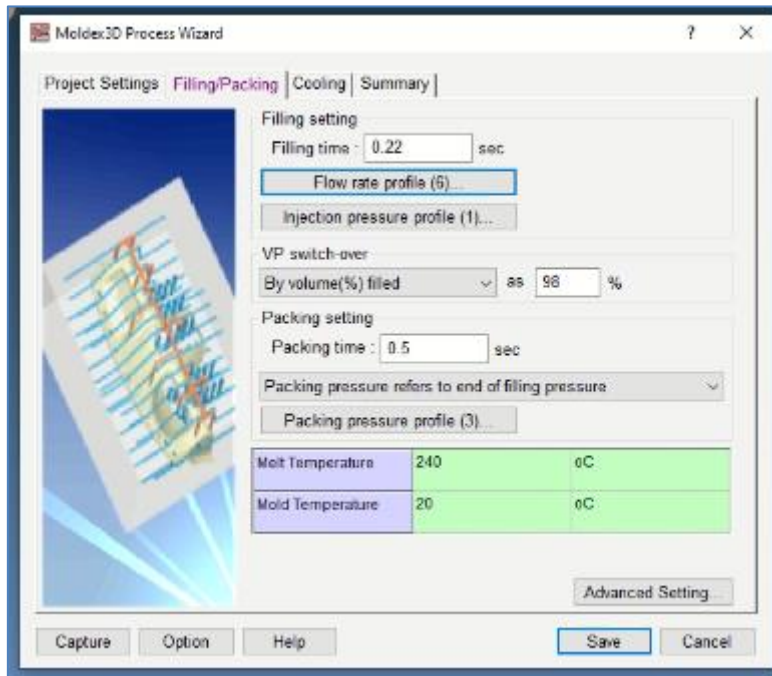
Πίνακας 6- 1: Βέλτιστες συνθήκες προσομοίωσης

Παράγοντας Ελέγχου	Τιμή
Υλικό	MF180
Θερμοκρασία Πολυμερούς	240
Θερμοκρασία Καλουπιού	20
Μέγιστη Πίεση Έγχυσης	200
Χρόνος Έγχυσης	0.22
Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης	60
Χρόνος Συμπίεσης	0.50

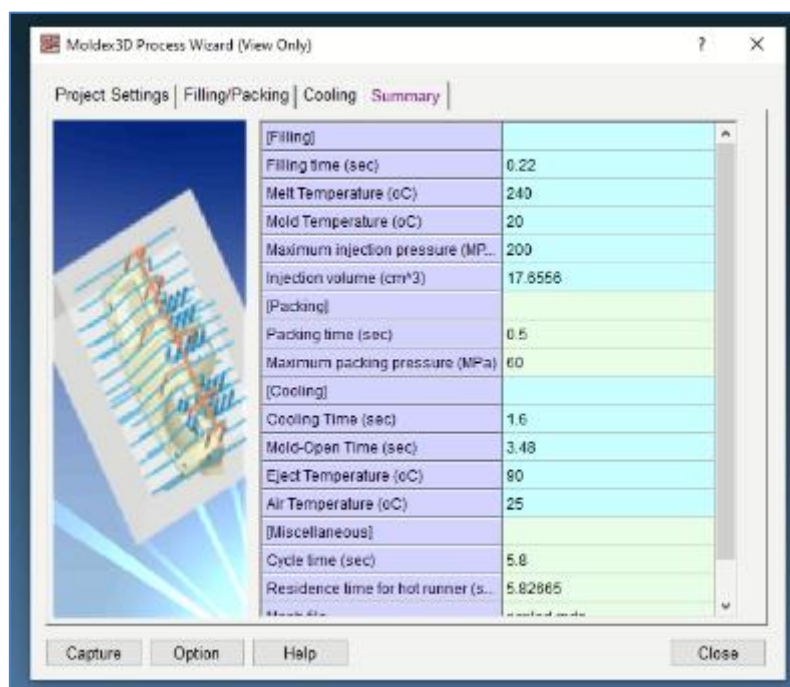
### 6.2. ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Χρησιμοποιούνται οι βέλτιστες συνθήκες προσομοίωσης που έχουν προκύψει από την ανάλυση (Πίνακας 6- 1), σε συνδυασμό με τις σταθερές παραμέτρους που έχουν οριστεί νωρίτερα (Πίνακας 5- 4). Από το περιβάλλον του λογισμικού, η παραμετροποίηση της διαδικασίας φαίνεται στις Εικόνα 6- 1 και Εικόνα 6- 2. Τα αποτελέσματα αναφορικά με τους ποιοτικούς παράγοντες της δύναμης συγκράτησης και του βάρους τεμαχίου προκύπτουν από την ανάλυση για το στάδιο της συμπίεσης (Εικόνα 6- 3). Ο χρόνος για τα δύο αυτά στάδια προκύπτει 0.73 s.

Εντοπίζονται φυσαλίδες στα σημεία όπου αλλάζει η κατεύθυνση της ροής, όπως φαίνονται στην Εικόνα 6- 4. Τέλος, αναμένεται μια ογκομετρική συρρίκνωση της τάξης των 1.6% κατά μέσο όρο, όπως προέκυψε από μια πρώτη ανάλυση στρέβλωσης (Εικόνα 6- 5), ενώ στο γύσο δεν παρατηρείται κάποια παραμόρφωση (Εικόνα 6- 6).



Εικόνα 6- 1: Παράμετροι των φάσεων έγχυσης και συμπίεσης για την επιβεβαιωτική προσομοίωση



Εικόνα 6- 2: Γενική επισκόπηση των παραμέτρων προσομοίωσης για τον επιβεβαιωτικό έλεγχο

```

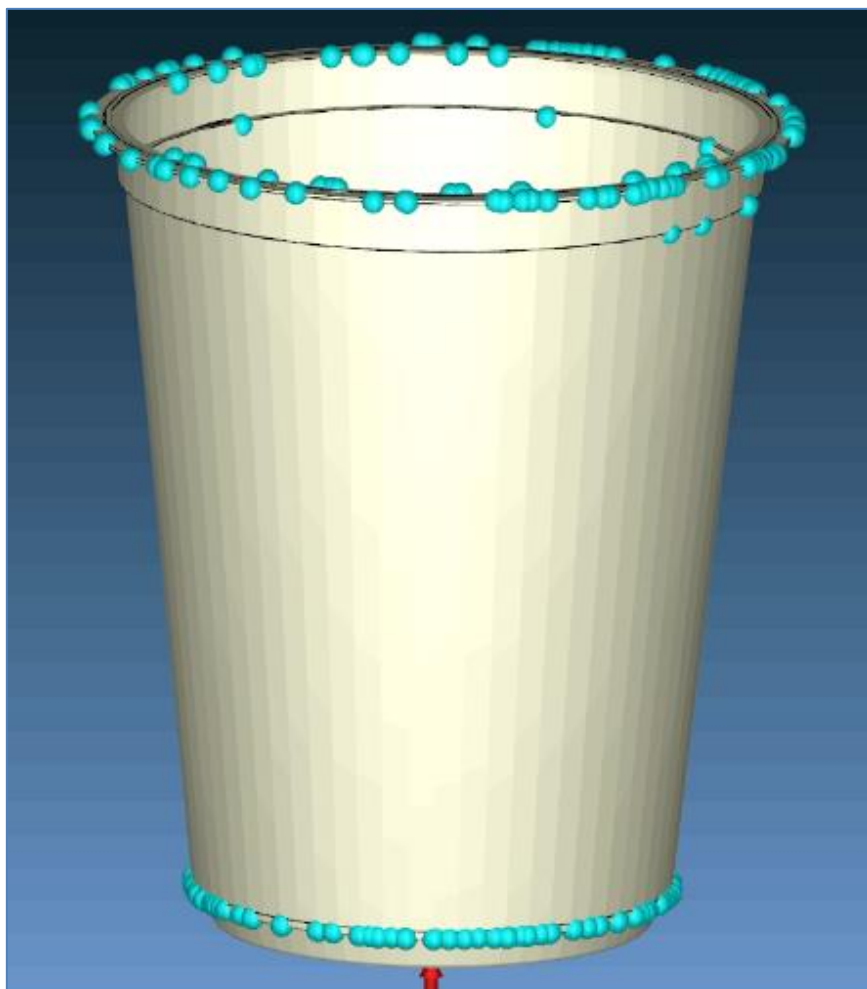
*Final2728.igg - Notepad
File Edit Format View Help
No Time(sec) Pres(MPa) Q(cc/sec) Fill(%) CPU(sec)
-----
<Summary>
CPU Time for Pack Analysis =      1921 sec
Mold-Opening Direction   =      Z-axis
Clamping Force at EOP    =          0.8 Ton
Max Clamping Force during packing phase =      70.1 Ton

Part Weight of Cavity #1 = 15.365 g
Total Weight(Cold runner + Parts) = 15.365 g
</Summary>

<Application_Information>
-----
| MPI Rank | Name          | ID   | Owner | Owner Domain | Consumed CPU Time |
-----
| 0        | Mdx3DPack.exe | 14388 | athan | DESKTOP-COMPJE7 | 1905 sec |
-----

```

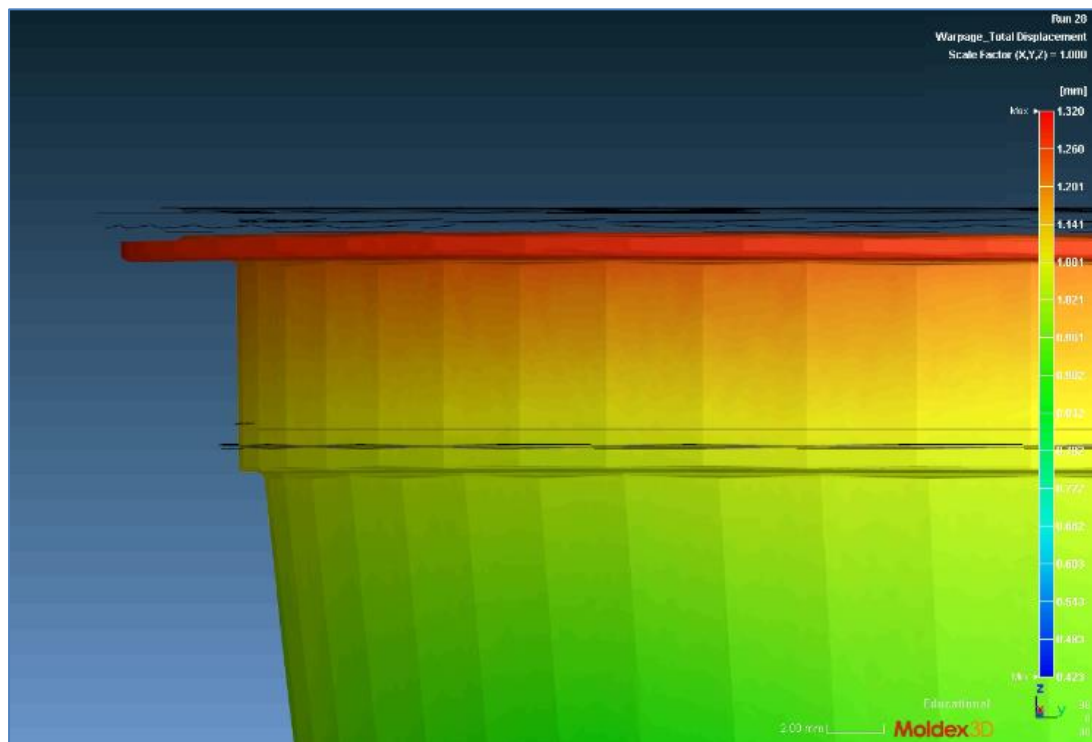
Εικόνα 6- 3: Δύναμη σύσφιξης και τελικό βάρος τεμαχίου



Εικόνα 6- 4: Φυσαλίδες αέρα στο τεμάχιο όπως προέκυψαν από την επιβεβαιωτική προσομοίωση

```
Final2728.Igw - Notepad
File Edit Format View Help
>>> Solving...
>>> Done! ( Residual = 4.488521e-05 )(Time = 53 sec)
>>> Parallel computation: Post-processing...
<Part_Shrinkage_Ratio>
  Part Shrinkage Ratio X = 1.69%
  Part Shrinkage Ratio Y = 1.71%
  Part Shrinkage Ratio Z = 1.58%
</Part_Shrinkage_Ratio>
>>> Done!
<Application_Information>
-----
Ln 1, Col 1      100%  Windows (CRLF)  UTF-8
```

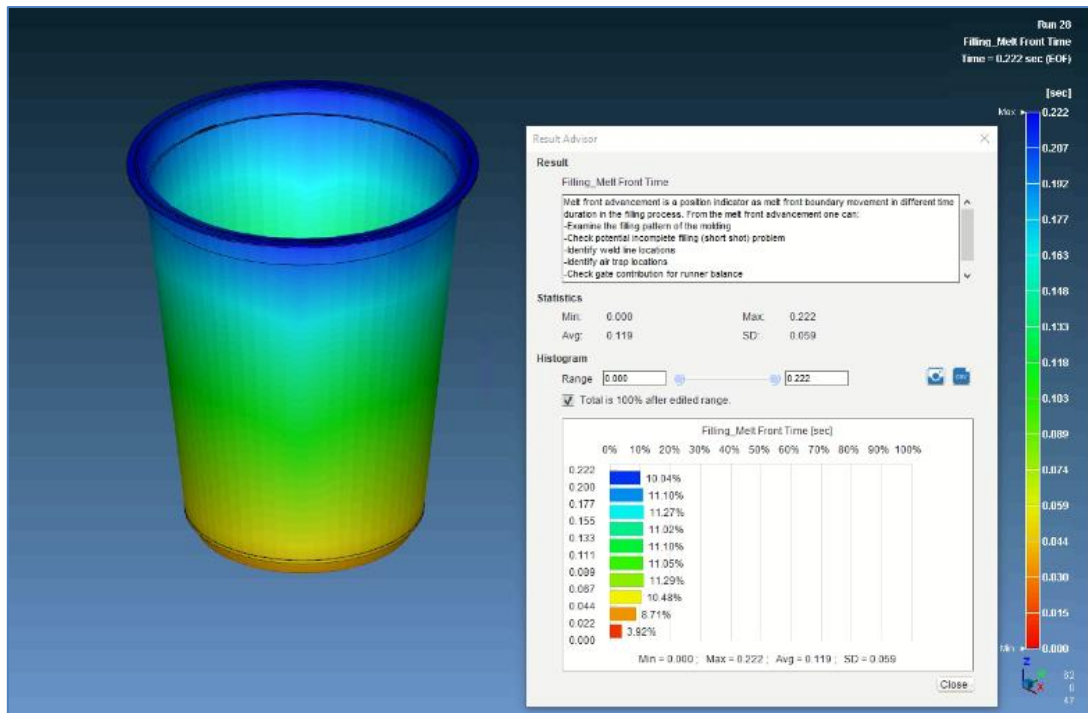
Εικόνα 6- 5: Προβλεπόμενη ογκομετρική συρρίκνωση



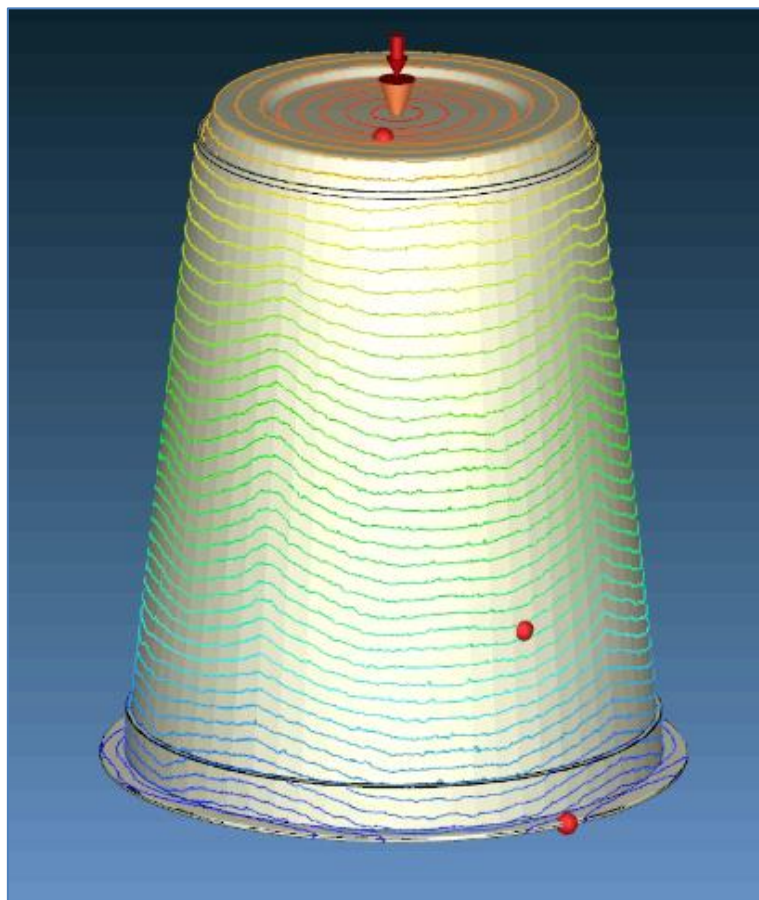
Εικόνα 6- 6: Τελική παραμόρφωση τεμαχίου

### 6.2.1. Στάδιο Πλήρωσης

Όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, επιτυγχάνεται μια ισορροπημένη πλήρωση της κοιλότητας (Εικόνα 6- 7), χωρίς ιδιαίτερη αντίσταση στη ροή, μιας και οι ισοπαραμετρικές καμπύλες του μετώπου ροής της Εικόνα 6- 8 είναι ομοιόμορφες. Το προφίλ της ροής του υλικού διακρίνεται στην Εικόνα 6- 9.

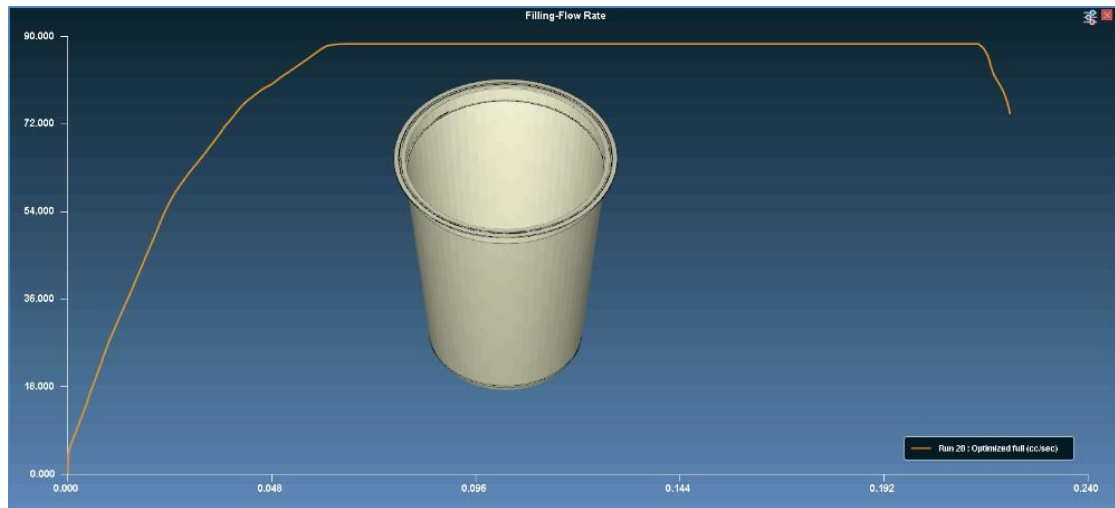


Εικόνα 6- 7: Εικόνα μετώπου ροής για την φάση της πλήρωσης



Εικόνα 6- 8: Ισοπαραμετρικές καμπύλες πίεσης στην φάση της έγχυσης

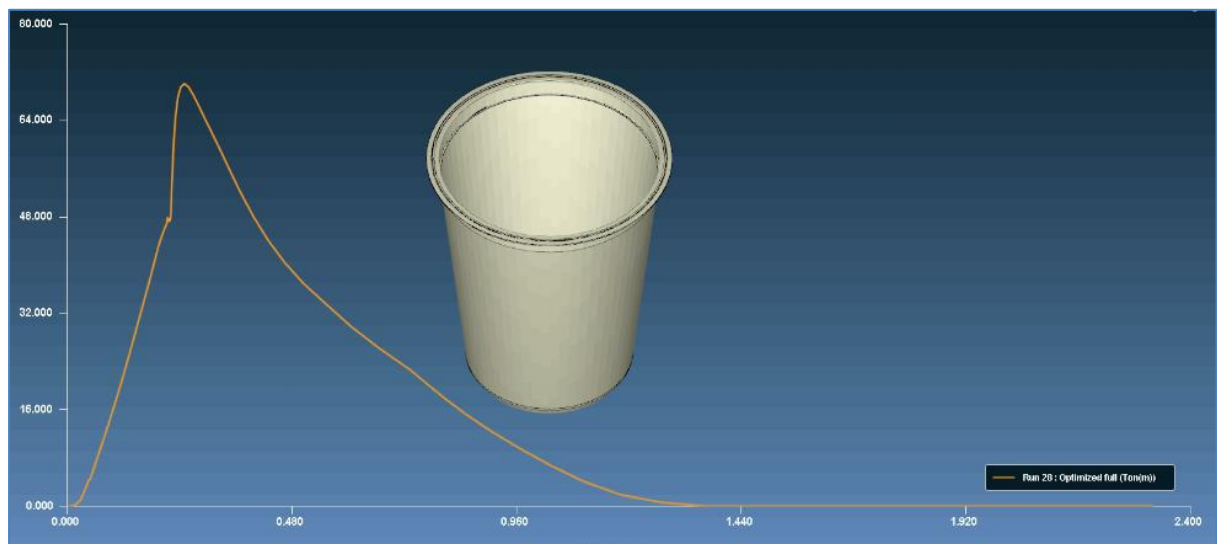




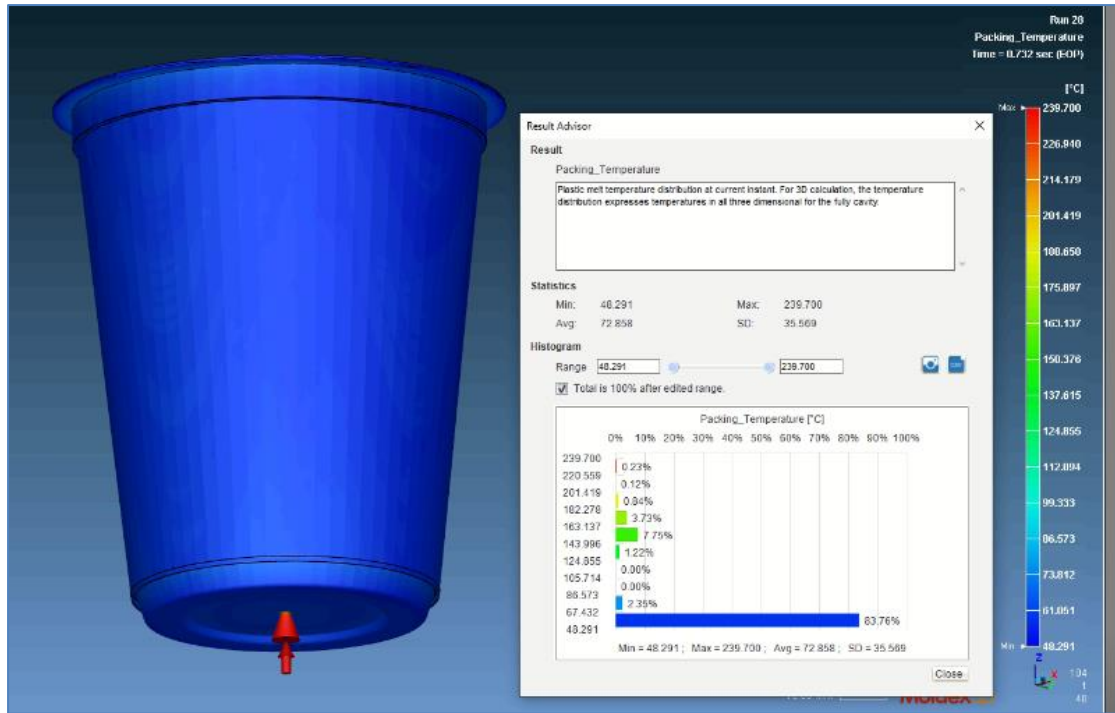
Εικόνα 6- 9: Προφίλ ροής πολυμερούς υλικού

### 6.2.2. Στάδιο Συμπίεσης

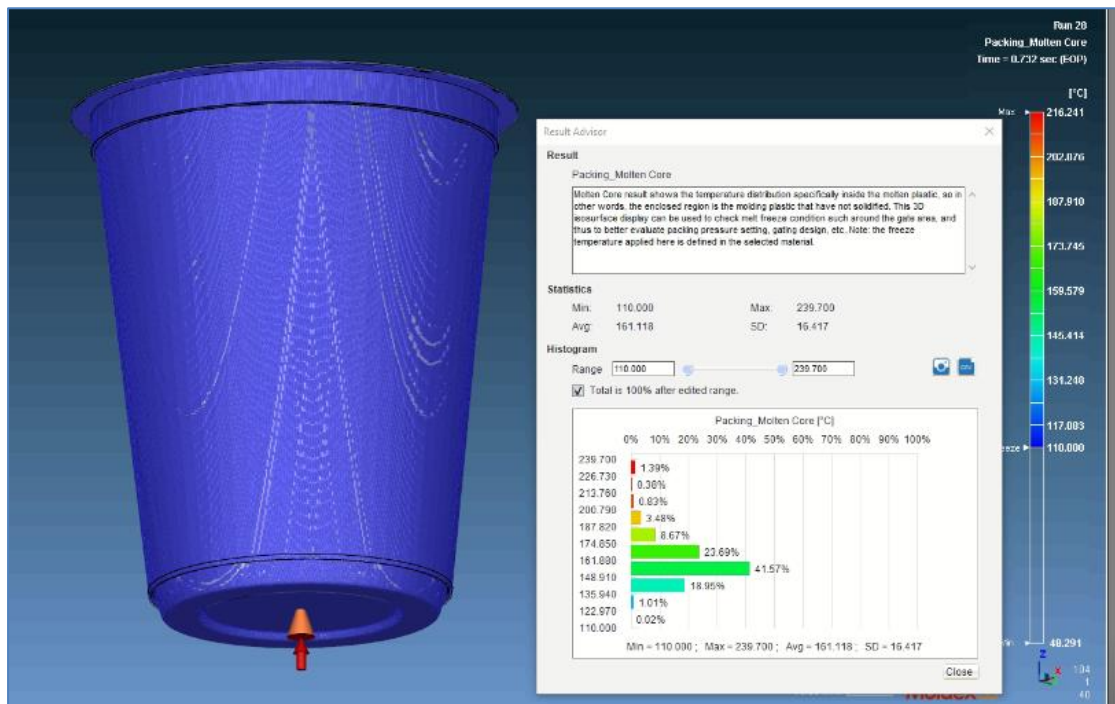
Το προφίλ της δύναμης συγκράτησης φαίνεται στην Εικόνα 6- 10. Υπενθυμίζεται ότι η μέγιστη τιμή του είναι στους 70.1 (Tn). Ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό του τεμαχίου έχει ήδη στερεοποιηθεί, περί το 80% (Εικόνα 6- 11), ενώ ο πυρήνας παραμένει εξ ολοκλήρου τηγμένος (Εικόνα 6- 12). Η κατανομή της πίεσης στο τέλος της φάση της συμπίεσης στο εσωτερικό της κοιλότητας είναι ομοιόμορφη (Εικόνα 6- 13), ενώ η πίεση στο κάθετο κανάλι φαίνεται στην Εικόνα 6- 14.



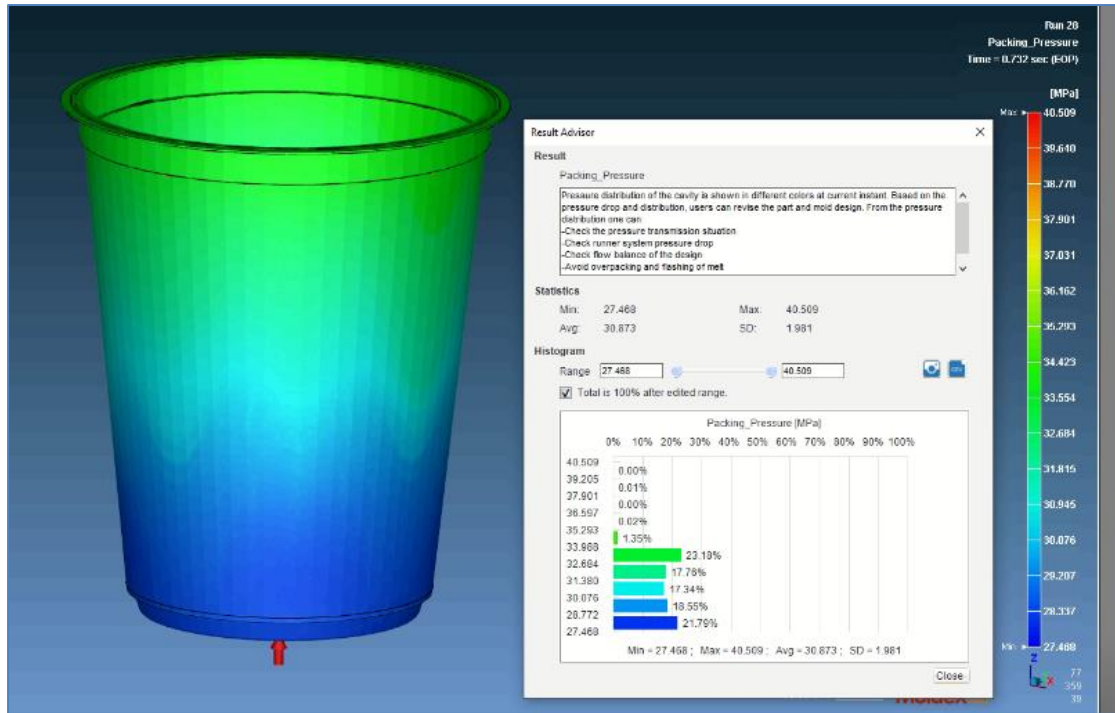
Εικόνα 6- 10: Προφίλ δύναμης συγκράτησης για την επιβεβαιωτική προσομοίωση



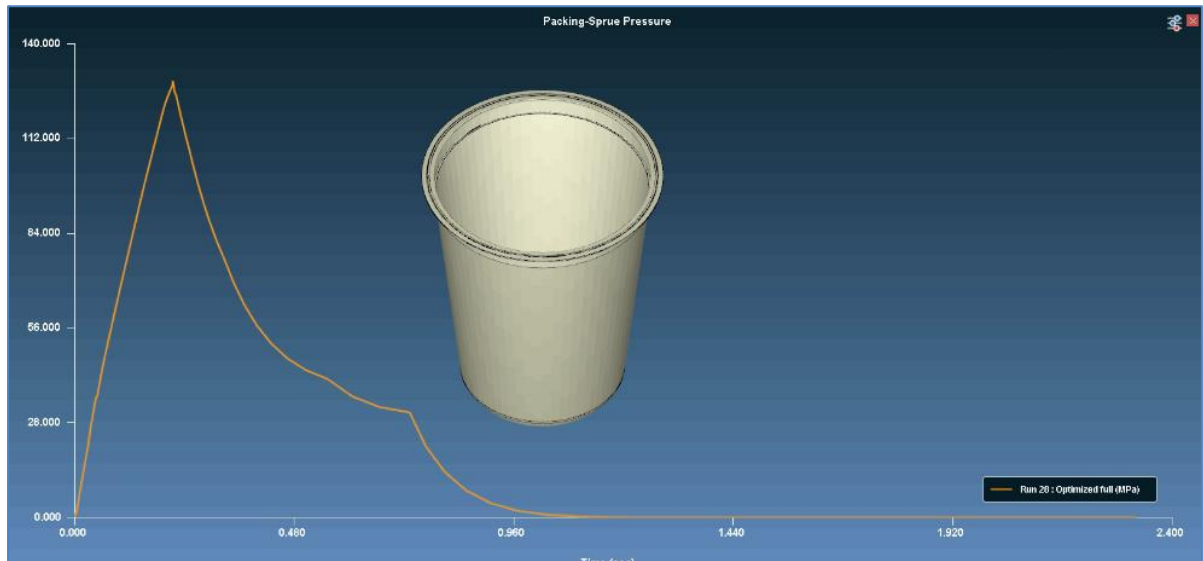
Εικόνα 6- 11: Θερμοκρασία τεμαχίου στο τέλος της φάσης συμπίεσης



Εικόνα 6- 12: Τηγμένος πυρήνας στο τέλος της συμπίεσης



Εικόνα 6- 13: Κατανομή πίεσης στην κοιλότητα με το πέρας της συμπίεσης



Εικόνα 6- 14: Καμπύλη πίεσης στο κάθετο κανάλι

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΝΟΨΗ

### 7.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν οι παράμετροι κατεργασίας χύτευσης με έγχυση για δοχείο συσκευασίας τροφίμων από πολυπροπυλένιο. Σε ένα πρώτο επίπεδο, κατέσται σαφές πόσο σημαντικά εργαλεία είναι για έναν μηχανικό τα λογισμικά προσομοίωσης των κατεργασιών. Αναφορικά με την κατεργασία της χύτευσης με έγχυση, οπτικοποιείται το μοτίβο πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης και μπορούν να προβλεφθούν αρκετές κατασκευαστικές ατέλειες. Έτσι, αποκτάται μια γενική εποπτεία της κατεργασίας και ο μηχανικός μπορεί να προβεί στις απαραίτητες ενέργειες για την βελτιστοποίηση της.

Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος Taguchi αποδείχτηκε ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη και βελτιστοποίηση ενός προβλήματος. Είναι μια χρονικά συμφέρουσα στατιστική μέθοδος, δεδομένου του διαχειρήσιμου αριθμού πειραμάτων που απαιτεί, με αξιόπιστες όμως πληροφορίες για τη μελέτη της επίδρασης των παραγόντων κατεργασίας. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αποδείχτηκε η ζωτική σημασία της κατάλληλης επιλογής του πολυμερούς υλικού για την κατεργασία και την σωστή παραμετροποίησή της. Πράγματι, υλικά με μεγαλύτερο MFI διευκολύνουν την πλήρωση της κοιλότητας, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας τήγματος κρίνεται μια οικονομικά μη αποδεκτή λύση αντιμετώπισής τους. Επιβεβαιώθηκε επίσης η εξάρτηση της κατεργασίας από τους χρόνους των σταδίων της κατεργασίας, με την θερμοκρασία του καλουπιού να μην διαδραματίζει ιδιαίτερο ρόλο στις φάσεις που εξετάστηκαν. Τέλος, υπολογίστηκε η κατάλληλη τάξη των παραμέτρων κατεργασίας για την βελτιστοποίηση του γενικότερου αποτελέσματος αναφορικά με το βάρος τεμαχίου, την δύναμη σύσφιξης και του χρόνου έγχυσης.

### 7.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Οπωσδήποτε, στα πλαίσια του σκοπού της παρούσας εργασίας, κατά τον σχεδιασμό πειραμάτων θα έχει ενδιαφέρον και η εξέταση των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων. Συμπληρωματικά, για την πληρέστερη διερεύνηση του τεμαχίου θα μπορούσαν να διενεργηθούν και προσομοιώσεις που αφορούν στο στάδιο της ψύξης. Δεδομένου ότι ο χρόνος της ψύξης καλύπτει και το μεγαλύτερο ποσοστό του κύκλου έγχυσης, θα ήταν χρήσιμο να μελετηθεί και το στάδιο αυτό, για την ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση του χρόνου έγχυσης. Επίσης, με τον κατάλληλο σχεδιασμό του δικτύου ψύξης θα υπάρξει και πιο έγκυρη εικόνα αναφορικά με την προβλεπόμενη παραμόρφωση του τελικού τεμαχίου (ογκομετρική συρρίκνωση, στρέβλωση). Ακόμη θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον η μελέτη ολόκληρου του καλουπιού στο λογισμικό Moldex3D για τον εντοπισμό τυχόν αποκλίσεων από την προσομοίωση του μεμονωμένου τεμαχίου.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμη η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με την πραγματικότητα. Αυτό θα μπορούσε να γίνει σε δύο κατευθύνσεις. Αρχικά, το λογισμικό δίνει την δυνατότητα διεξαγωγής των προσομοιώσεων σε κατάσταση λειτουργίας πραγματικής μηχανής έγχυσης (Machine Mode), κάτι που απαιτεί πληροφορίες αναφορικά με τις ρυθμίσεις του τεχνικού εξοπλισμού (που στην παρούσα φάση εξέλιπαν). Κατά δεύτερον, θα μπορούσε να διενεργηθούν πειράματα σε πραγματικό χρόνο, ώστε η βελτιστοποίηση να γίνει με εξόδους πραγματικές τιμές μετρήσεων. Κάτι τέτοιο θα ήταν βέβαια αρκετά κοστοβόρο, ειδικά εφόσον πρόκειται για ένα τεμάχιο χωρίς ιδιαίτερες κατασκευαστικές απαιτήσεις.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering*, 9. ed., SI version. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.
- [2] A. Whelan and J. P. Goff, *Injection molding of thermoplastics materials*. in v. 2: Pocket guides to plastics. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [3] Δημήτρης Ι. Παντελής, *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*, 2nd ed. Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2008.
- [4] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing engineering and technology*, Seventh edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.
- [5] Jay Shoemaker, "Moldflow Design Guide- A Resource for plastic engineers." Moldflow Corporation, 2006.
- [6] D. V. Rosato, D. V. Rosato, M. G. Rosato, and D. V. Rosato, Eds., *Injection molding handbook*, 3rd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [7] R. Brooks, "2.30 - Injection Molding Based Techniques," in *Comprehensive Composite Materials*, A. Kelly and C. Zweben, Eds., Oxford: Pergamon, 2000, pp. 999–1028. doi: 10.1016/B0-08-042993-9/00189-3.
- [8] H. Rees, *Understanding injection mold design*. in Hanser understanding books. Munich: Hanser [u.a.], 2001.
- [9] Bayer Material Science, "Part and Mold Design- A Design Guide." 2000.
- [10] 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," *Mater. Today Proc.*, vol. 78, pp. 656–661, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.070.
- [11] A. Shenoy and D. R. Saini, "Melt Flow Index: More Than Just a Quality Control Rheological Parameter. Part I," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 6, pp. 1–58, Mar. 1986, doi: 10.1002/adv.1986.060060101.
- [12] P. J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [13] R. K. Roy, *A primer on the Taguchi method*. Dearborn, Mich: Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- [14] S. S. Teklehaimanot, "Simulation and Design of a plastic injection mold," 2012. <http://www.theseus.fi/handle/10024/41114> (accessed Jun. 16, 2023).
- [15] Σαπουνάς Ισίδωρος, "Βελτιστοποίηση παραμέτρων κατεργασίας στη χύτευση πολυμερών με έγχυση με την βοήθεια προσομοίωσης." Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.

- [16] 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 Syst. Appl.*, vol. 36, no. 7, pp. 10752–10759, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2009.02.017.
- [17] M. Kavade, "Parameter Optimization of Injection Molding of Polypropylene by using Taguchi Methodology," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 4, pp. 49–58, Jan. 2012, doi: 10.9790/1684-0444958.
- [18] G. Trotta, S. Cacace, and Q. Semeraro, "Optimizing process parameters in micro injection moulding considering the part weight and probability of flash formation," *J. Manuf. Process.*, vol. 79, pp. 250–258, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.04.048.
- [19] C.-W. Su *et al.*, "Optimization process parameters and adaptive quality monitoring injection molding process for materials with different viscosity," *Polym. Test.*, vol. 109, p. 107526, May 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107526.