



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Βελτιστοποίηση σχεδιασμού καλουπιού χύτευσης πλαστικού με έγχυση με
χρήση αριθμητικής προσομοίωσης και τεχνικών Taguchi**

Δημήτριος Τζιάτζιος

Επιβλέπων Καθηγητής : Γεώργιος – Χριστόφορος Βοσνιάκος

ΑΘΗΝΑ 2019

.....
Δημήτριος Β. Τζιάτζιος

Διπλωματούχος Μηχανικός Παραγωγής & Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης

Copyright © Δημήτριος Β. Τζιάτζιος, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Οι κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται σε εκείνα τα τελικά προϊόντα τα οποία παράγονται μέσω της τεχνολογίας χύτευσης με έγχυση δομικού υλικού (injection molding) απασχολούν κατά κόρον τους μηχανικούς παραγωγής που εργάζονται στις σχετικές βιομηχανικές μονάδες. Και αυτό γιατί σε όσα τελικά προϊόντα έγχυσης εντοπίζονται διάφορες τέτοιες ατέλειες, αυτομάτως τίθεται επί τάπητος το ζήτημα της υποβαθμισμένης ποιότητας η οποία καθιστά τα προϊόντα αυτά μη λειτουργικά και μη χρηστικά. Άλλωστε, αποτελεί κοινό τόπο ότι οι κατασκευαστικές φύσεως ατέλειες σε οιοδήποτε προϊόν καθιστούν επισφαλή τη μηχανική του αντοχή, καθώς επίσης αλλοιώνουν την αισθητική φυσιογνωμία του. Κατά συνέπεια, για την αποσόβηση των φαινομένων αυτών πραγματοποιούνται κατ' εξακολούθηση πολλές δοκιμές σε πραγματικό χρόνο έως ότου υπάρξει κατάληξη σε εκείνες τις συνθήκες που παραμετροποιούν όσο το δυνατόν καλύτερα την κατασκευαστική διεργασία.

Οπωσδήποτε, η μέθοδος δοκιμής και σφάλματος αποτελεί μια κλασική μέθοδο αντιμετώπισης των κατασκευαστικών ατελειών στα τελικά προϊόντα έγχυσης εδώ και δεκαετίες. Ωστόσο, πρόκειται για μία μέθοδο χρονοβόρα, μιας και απαιτείται η διεκπεραίωση πολλών επαναληπτικών δοκιμών, δαπανηρή έως και οικονομικά ασύμφορη σε κάποιες περιπτώσεις, αφού αυξάνεται δραματικά ο όγκος του απορριπτέου υλικού (scrap), εμπειρική και πολλές φορές αυθαίρετη με αποτέλεσμα η μαθηματική επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων να είναι ανέφικτη. Επομένως, εκεί που οι παραδοσιακές μέθοδοι φτάνουν στα όριά τους σε ό,τι αφορά τη βελτιστοποίηση, η τεχνολογία των Πεπερασμένων Στοιχείων και τα εργαλεία της Στατιστικής μπορούν να δώσουν τη λύση.

Σε αυτά τα πλαίσια, το λογισμικό Moldex3D έχει ενσωματώσει όλα εκείνα τα εργαλεία που απαιτούνται για την προσομοίωση της κατασκευαστικής διαδικασίας της έγχυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων αλλά και το εργαλείο σχεδιασμού πειραμάτων με μαθηματικές μεθόδους. Ασφαλώς, με την αποτελεσματική χρησιμοποίηση αυτών των εργαλείων, μία εταιρεία κατασκευής προϊόντων έγχυσης καταφέρνει να εξοικονομήσει χρόνο και κόστος, να περιορίσει το αποτύπωμά της στο περιβάλλον διά της εξοικονόμησης υλικών πόρων και, εν τέλει, να εξασφαλίσει τη βιωσιμότητά της διά της παραγωγής βέλτιστων τελικών προϊόντων και της γρήγορης διοχέτευσης αυτών στο εμπόριο.

Εντός των ορίων εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας υπήρξε μια ευρεία συνεργασία με την κατασκευαστική εταιρεία "SPEK Metalplastic S.A." για τη μελέτη περίπτωσης ενός εκ των βιομηχανικών προϊόντων έγχυσης που λανσάρει στην αγορά. Σε πρώτη φάση, μελετήθηκε το συγκεκριμένο προϊόν έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D και έγινε μια επαλήθευση ως προς τις κατασκευαστικές ατέλειες που παρουσιάζει το πραγματικό τελικό προϊόν. Ακολούθως, με τη βοήθεια των εργαλείων προσομοίωσης του λογισμικού προτάθηκαν κάποιες τροποποιήσεις τόσο στο καλούπι όσο και στην παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας που στόχο είχαν τον περιορισμό ή την ολοκληρωτική εξάλειψη των κατασκευαστικών ατελειών. Τέλος, αξιοποιώντας το εργαλείο σχεδιασμού πειραμάτων που διαθέτει το λογισμικό και συγκεκριμένα το εργαλείο που εφαρμόζει τη μέθοδο Taguchi, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή των παραπάνω τροποποιήσεων.

Abstract

The structural defects identified in those finished products produced by injection molding technology are one of the main issues production engineers working in the relevant industrial units concern about. That is because in the final injection products such various defects are detected, the issue of degraded quality is automatically raised which renders these products inoperable and useless. After all, it is commonly known that structural defects of any product render its mechanical strength uncertain, as well as tamper with its aesthetic profile. Consequently, many real-time tests are repeatedly performed to eliminate these phenomena until the conditions that best optimize the manufacturing process are reached.

Certainly, the trial and error method has been a classic method of dealing with manufacturing defects in finished injection products for decades. However, this is a time-consuming method, as it requires many repetitive tests, costly to economically unprofitable in some cases, since the volume of scrap material is dramatically increased, empirical and sometimes arbitrary, so as mathematical optimization results to be impossible. Therefore, where traditional methods reach their limits in terms of optimization, Finite Element technology and Statistics tools can provide the solution.

In this context, Moldex3D software has incorporated all those tools to simulate the manufacturing injection process through finite elements as well as mathematical experiment design tools. Of course, by effectively using these tools, an injection molding company manages to save time and cost, reduce its footprint on the environment by saving material resources and ultimately ensure its viability by producing optimum end products and rapidly channeling them into commerce.

Within the scope of this postgraduate thesis there has been a wide collaboration with the manufacturing company "SPEK Metalplastic S.A." to study the case of one of the industrial injection products launched in the market. Initially, this injection product was studied in the Moldex3D software and a verification of the defects present in the actual end product was made. Subsequently, with the help of software simulation tools, some modifications were proposed both to the mold and to the customization of the manufacturing process aimed at limiting or completely eliminating the defects. Finally, by utilizing the experimental design tools available within the software and specifically by utilizing the tool that implements the Taguchi method, the results obtained from the application of the above modifications were optimized.

Στη Μαρία, τον Άρη, τη Γεωργία και τον Alex

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος Σχημάτων.....	15
Κατάλογος Πινάκων	27
1 Εισαγωγή	29
1.1 Σκοπός Εργασίας	29
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	29
1.3 Δομή Εργασίας.....	31
2 Η Τεχνολογία Χύτευσης με Έγχυση Δομικού Υλικού (Injection Molding)	33
2.1 Περιγραφή της Κατασκευαστικής Διαδικασίας	33
2.2 Μηχανές Έγχυσης.....	37
2.3 Γενικά Περί των Πολυμερών Δομικών Υλικών	40
2.3.1 Θερμοσκληραινόμενα, Θερμοπλαστικά και Ελαστομερή Πολυμερή.....	44
2.3.2 Κρυσταλλικά και Μη Κρυσταλλικά Πολυμερή.....	44
2.3.3 Ρεολογικές Ιδιότητες των Πολυμερών.....	46
2.3.4 Θερμικές Ιδιότητες των Πολυμερών.....	46
2.3.5 Μηχανικές Ιδιότητες των Πολυμερών.....	48
2.4 Παράμετροι Σχεδιασμού Τελικού Προϊόντος Έγχυσης – Καλουπιού	48
2.4.1 Σχεδιασμός του Τελικού Προϊόντος Έγχυσης	49
2.4.2 Σχεδιασμός του Καλουπιού του Τελικού Προϊόντος Έγχυσης.....	52
2.4.2.1 Σχεδιασμός του Συστήματος Διανομής.....	54
2.4.2.2 Σχεδιασμός των Πυλών Εισόδου	60
2.4.2.3 Σχεδιασμός του Συστήματος Εξαέρωσης.....	72
2.4.2.3.1 Μη Τυποποιημένες Λύσεις Εξαερισμού.....	73
2.4.2.3.2 Εναλλακτικές Λύσεις Εξαερισμού	74
2.4.2.4 Σχεδιασμός του Συστήματος Ψύξης.....	78
2.4.2.5 Σχεδιασμός του Συστήματος Εξόλκευσης.....	84
3 Συνήθεις Κατασκευαστικές Ατέλειες των Τελικών Προϊόντων Έγχυσης.....	86
3.1 Γραμμές Συγκόλλησης (Weld Lines).....	86
3.2 Σημάδια / Γραμμές Ροής (Flow Marks / Lines).....	89
3.3 Ελλιπής Πλήρωση (Short Shot)	91
3.4 Εγκλωβισμένες Φυσαλίδες Αέρος (Air-Traps).....	92
3.4.1 Βαθουλώματα / Ρουφήγματα / Τραβήγματα (Sink Marks).....	94
3.4.2 Σημάδια Καύσης (Burn Marks)	95
3.4.3 Κενά (Voids)	97

3.5	Το Φαινόμενο της «Εκτόξευσης» ή Φαινόμενο Πίδακα (Jetting).....	99
3.6	Πρόεκταμα (Flash / Spew)	100
3.7	Αποκόλληση ή Αποελασματοποίηση (Delamination)	102
3.8	Ψαθυρότητα (Brittleness).....	104
3.9	Ογκομετρική Συρρίκνωση (Volumetric Shrinkage)	106
3.10	Στρέβλωση ή Παραμόρφωση (Warpage).....	107
3.11	Συχνές Δυσλειτουργίες στη Ροή του Τήγματος	108
3.11.1	Επιβράδυνση ή Παύση Ροής (Flow Hesitation)	108
3.11.2	Διατμητική Τάση (Shear Stress)	110
3.11.3	Υπερβολική Συμπύεση του Πολυμερούς Τήγματος (Overpacking)	111
3.11.4	Το Φαινόμενο Γρήγορης Ροής (Racetrack Effect).....	112
3.11.5	Υπορροή (Underflow).....	113
3.12	Άλλα Προβλήματα	114
3.12.1	Μεμονωμένα Σημεία Αυξημένου Θερμικού Φορτίου (Hot Spots)	114
3.12.2	Υπερβολικά Μεγάλη Χρονική Διάρκεια του Κύκλου Έγχυσης	114
3.13	Συγκεντρωτική Παράθεση Ατελειών – Τρόπων Αντιμετώπισης.....	115
4	Προσομοίωση Ροής σε Καλούπια Έγχυσης με Χρήση της Τεχνολογίας των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	121
4.1	Το Λογισμικό Moldex3D.....	121
4.2	Το Προς Μελέτη Προϊόν Έγχυσης.....	121
4.2.1	Πρώτο Εναλλακτικό Σενάριο Τροφοδοσίας της Κοιλότητας Μορφοποίησης του Καλουπιού.....	130
4.2.2	Δεύτερο Εναλλακτικό Σενάριο Τροφοδοσίας της Κοιλότητας Μορφοποίησης του Καλουπιού – Το Επικρατέστερο	133
4.3	Μελέτη του Προϊόντος Έγχυσης στο Λογισμικό Moldex3D με το Επικρατέστερο Σενάριο Τροφοδοσίας της Κοιλότητας Μορφοποίησης ..	134
4.3.1	Προ-επεξεργασία	135
4.3.2	Διεργασία.....	141
4.3.2.1	Παραμετροποίηση της Κατασκευαστικής Διαδικασίας.....	141
4.3.2.2	Παραμετροποίηση της Υπολογιστικής Διαδικασίας	151
4.3.3	Μετα-επεξεργασία	154
4.3.3.1	Τα Πρωτογενή Αποτελέσματα της Προσομοίωσης της Φάσης Πλήρωσης στο Λογισμικό Moldex3D	154
4.3.3.2	Τα Πρωτογενή Αποτελέσματα της Προσομοίωσης της Φάσης Συμπύεσης στο Λογισμικό Moldex3D	186
4.3.3.3	Τα Πρωτογενή Αποτελέσματα της Προσομοίωσης της Φάσης Ψύξης στο Λογισμικό Moldex3D	194
4.3.3.4	Τα Πρωτογενή Αποτελέσματα της Προσομοίωσης της Στρέβλωσης στο Λογισμικό Moldex3D	200

5	Σχεδιασμός και Εκτέλεση Πειραμάτων.....	204
5.1	Σχεδιασμός Πειραμάτων – Θεωρητικό Υπόβαθρο	204
5.1.1	Μέθοδοι Σχεδιασμού Πειραμάτων	206
5.1.2	Η Μέθοδος Taguchi.....	208
5.1.2.1	Εύρωστος Σχεδιασμός	212
5.1.2.2	Συνάρτηση Απώλειας Ποιότητας : Η Προσέγγιση Taguchi.....	212
5.2	Το εργαλείο Moldex3D Expert	216
5.2.1	Σχεδιασμός Πειραμάτων με Χρήση του Εργαλείου Moldex3D Expert	216
5.2.2	Ανάλυση των Αποτελεσμάτων	236
5.2.2.1	Αποτελέσματα Εκτέλεσης Σχεδιασμού Πειραμάτων (DOE Run Results)	236
5.2.2.2	Απόκριση Ποιότητας (Quality Response).....	237
5.2.2.3	Απόκριση Αναλογίας S / N (S / N Ratio Response)	243
5.2.2.4	Καμπύλες Απόκρισης (Response Curves).....	248
5.2.2.5	Βέλτιστος Σχεδιασμός (Optimized Design)	272
6	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	279
6.1	Συμπεράσματα	279
6.2	Μελλοντική Εργασία	279
	Βιβλιογραφία	281
	Παράρτημα Α	283

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1. Κατανομή του χρόνου σε έναν πλήρη κύκλο έγχυσης	35
Σχήμα 2-2. Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας παραγωγής injection molding ...	36
Σχήμα 2-3. Διαδοχικές φάσεις του πολυμερούς δομικού υλικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού	36
Σχήμα 2-4. Τυπική μηχανή έγχυσης με μονάδα έγχυσης παλινδρομούντος κοχλία	38
Σχήμα 2-5. Μηχανικές και υδραυλικές μονάδες σύσφιξης.....	40
Σχήμα 2-6. Συμπεριφορά μη κρυσταλλικών και κρυσταλλικών / ημι-κρυσταλλικών πολυμερών δομικών υλικών κατά τη θέρμανσή τους και τη μετάβαση από την στερεή κατάσταση στην κατάσταση τήξης.....	45
Σχήμα 2-7. Το μοτίβο ροής του πολυμερούς τήγματος αναλόγως της γεωμετρίας και της μεταβλητότητας του πάχους των τοιχωμάτων του εκάστοτε προϊόντος έγχυσης..	49
Σχήμα 2-8. Το κακό, το καλό και το καλύτερο σχεδιαστικό σενάριο ενός προϊόντος έγχυσης	50
Σχήμα 2-9. Λανθασμένος σχεδιασμός ενός προϊόντος έγχυσης και προτάσεις βελτίωσής του	51
Σχήμα 2-10. Απεικόνιση σε τομή των δύο ξεχωριστών μερών του καλουπιού ενός προϊόντος έγχυσης, του παραγόμενου εξαρτήματος και του συστήματος ψύξης του καλουπιού.....	53
Σχήμα 2-11. Σκίτσο ενός καλουπιού σε απλοϊκή μορφή	54
Σχήμα 2-12. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό σύστημα διανομής σε ένα καλούπι.....	54
Σχήμα 2-13. Οι συνηθέστερες διατομές των αγωγών διανομής	57
Σχήμα 2-14. Σκαριφηματική απόδοση τυπικών διατάξεων ζυγοσταθμισμένων δρομέων	58
Σχήμα 2-15. Σκαριφηματική απόδοση ενός τυπικού θερμού συστήματος διανομής.....	58
Σχήμα 2-16. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου sprue.	61
Σχήμα 2-17. Σκαριφηματική απόδοση μιας κοινής πύλης εισόδου τύπου edge	62
Σχήμα 2-18. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου overlap	62
Σχήμα 2-19. Σκαριφηματικές αποδόσεις τυπικών πυλών εισόδου τύπου fan.....	63
Σχήμα 2-20. Σκαριφηματική απόδοση μιας κοινής πύλης εισόδου τύπου film.....	64
Σχήμα 2-21. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου pin	65
Σχήμα 2-22. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου tunnel	66
Σχήμα 2-23. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου tunnel με πείρο εξόλκευσης	66
Σχήμα 2-24. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου cashew	67
Σχήμα 2-25. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου cashew με πείρο εξόλκευσης.....	67
Σχήμα 2-26. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής θερμής πύλης εισόδου τύπου valve	68
Σχήμα 2-27. Η ισορροπία της ροής στις κοιλότητες μορφοποίησης ενός καλουπιού	69
Σχήμα 2-28. Μεταβλητότητα της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς τήγματος στην περιοχή πλησίον της τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού και στις πιο απομακρυσμένες περιοχές	70
Σχήμα 2-29. Τοποθέτηση της πύλης εισόδου στο λεπτότερο τοίχωμα του προς μορφοποίηση αντικειμένου και τοποθέτηση της πύλης εισόδου στο παχύτερο τοίχωμά του : Διαφορές ως προς την αποδοτικότητα της συμπίεσης	70

Σχήμα 2-30. Το σώμα μιας εξωτερικής βαλβίδας εξαερισμού που φιλοξενεί τον οδηγό για τον ολισθητήρα και περιέχει μεγάλα κανάλια εξαερισμού συνδεδεμένα στην περιοχή εξαερισμού μεταξύ του σώματος και του ολισθητήρα.....	74
Σχήμα 2-31. Εξωτερικός εξαερισμός του καλουπιού στην πλευρά του δρομέα	75
Σχήμα 2-32. Οι πύλες εισόδου τύπου tunnel ή cashew επιτρέπουν την αυτόματη περικοπή των πλαστικών προεξοχών κατά την εξόλκευση του αντικειμένου στην περίπτωση του εξωτερικού εξαερισμού του καλουπιού	76
Σχήμα 2-33. Κανάλι εξωτερικού εξαερισμού σχεδιασμένο στο τελευταίο σημείο πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.....	76
Σχήμα 2-34. Εσωτερική βαλβίδα εξαέρωσης που μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού	77
Σχήμα 2-35. Σκαριφηματική απόδοση των μερών που απαρτίζουν ένα τυπικό σύστημα ψύξης ενός καλουπιού	79
Σχήμα 2-36. Σκαριφηματική απόδοση του τρόπου λειτουργίας ενός κοινού διαφράγματος (straight baffle).....	80
Σχήμα 2-37. Λεπίδα διαχωρισμού που χρησιμοποιείται σε κοινά διαφράγματα	80
Σχήμα 2-38. Σκαριφηματική απόδοση ενός τυπικού διαφράγματος έλικας (σε τομή)	81
Σχήμα 2-39. Λεπίδα διαχωρισμού που χρησιμοποιείται στα σπιράλ διαφράγματα	81
Σχήμα 2-40. Σκαριφηματική απόδοση του τρόπου λειτουργίας ενός κοινού ψύκτη (bubbler)	82
Σχήμα 2-41. Σκαριφηματική απόδοση ενός κοινού ψύκτη (σε τομή)	82
Σχήμα 2-42. Σκαριφηματική απόδοση των αποστάσεων που τηρούνται κατά την τοποθέτηση των καναλιών ψύξης σε ένα καλούπι.....	83
Σχήμα 2-43. Σύνδεση καναλιών ψύξης σε σειρά και παράλληλα	84
Σχήμα 2-44. Σκαριφηματική απόδοση συμβατικής ψύξης καλουπιού μη αυθαίρετης γεωμετρίας και σύμμορφης ψύξης καλουπιού αυθαίρετης γεωμετρίας στηριζόμενης στο περίγραμμα του μορφοποιημένου αντικειμένου	84
Σχήμα 3-1. Τελικό προϊόν έγχυσης με εμφανή γραμμή συγκόλλησης (weld line) στην εξωτερική του επιφάνεια.....	87
Σχήμα 3-2. Διαδοχικά στιγμιότυπα από τη συνένωση δύο διαφορετικών μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης ενός καλουπιού που οδηγεί στον σχηματισμό γραμμής συγκόλλησης στο τελικό προϊόν έγχυσης.....	87
Σχήμα 3-3. Εμφάνιση γραμμών συγκόλλησης στη γωνία ενός προϊόντος έγχυσης και απόκρυψη της ατέλειας μετά από ανατοποθέτηση / επανασχεδιασμό τόσο του συστήματος διανομής όσο και των πυλών εισόδου	88
Σχήμα 3-4. Μεγαλύτερη γωνία συνάντησης των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος που συνεπάγεται λιγότερο έντονες γραμμές συγκόλλησης στο τελικό προϊόν έγχυσης και μικρότερη γωνία συνάντησης των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος που συνεπάγεται περισσότερο έντονες γραμμές συγκόλλησης αντίστοιχα	89
Σχήμα 3-5. Γραμμές ροής (flow lines) στην εξωτερική επιφάνεια ενός παραχθέντος προϊόντος έγχυσης.....	90
Σχήμα 3-6. Περίπτωση ατελούς πλήρωσης (short shot) σε τελικό προϊόν έγχυσης.....	91
Σχήμα 3-7. Βαθουλώματα (sink marks) στην εξωτερική επιφάνεια ενός παραχθέντος προϊόντος έγχυσης.....	94
Σχήμα 3-8. Σημάδια καύσης (burn marks) στην εξωτερική επιφάνεια ενός παραχθέντος προϊόντος έγχυσης.....	95
Σχήμα 3-9. Διαφανές προϊόν έγχυσης στα εσωτερικά στρώματα της εξωτερικής επιφάνειας του οποίου έχει σχηματιστεί κενό λόγω παγιδευμένου αέρα.....	97

Σχήμα 3-10. Τομή ενός προϊόντος έγχυσης σε ένα από τα παχύτερα τοιχώματά του όπου εσωτερικά έχουν δημιουργηθεί κενά αέρος (vacuum voids)	98
Σχήμα 3-11. Προϊόν έγχυσης στην εξωτερική επιφάνεια του οποίου είναι εμφανές το φαινόμενο πίδακα (jetting).	99
Σχήμα 3-12. Σκαριφηματική απόδοση της ανάπτυξης του φαινομένου της «εκτόξευσης» (jetting) και της εξάλειψής του κατόπιν διορθώσεων στις πύλες εισόδου.....	100
Σχήμα 3-13. Παρουσία προεκτάματος (flash/spew) σε προϊόν έγχυσης υπό τη μορφή λεπτού χείλους.....	101
Σχήμα 3-14. Αποφλοίωση υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια ενός προϊόντος έγχυσης ..	102
Σχήμα 3-15. Τομή ψαθυρού προϊόντος έγχυσης στο οποίο έχει δημιουργηθεί ρωγμή, γεγονός το οποίο καθιστά το προϊόν επιρρεπές σε θραύση	105
Σχήμα 3-16. Προϊόν έγχυσης αρχικά σχεδιασμένο και με εμφανή στρέβλωση (κάμψη) μετά την εξόλκευσή του.....	107
Σχήμα 3-17. Επιβράδυνση ροής και εξάλειψη του φαινομένου έπειτα από κατάλληλη τοποθέτηση των πυλών εισόδου.....	109
Σχήμα 3-18. Υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος (overpacking) σε περιοχή της κοιλότητας μορφοποίησης με σύντομο χρόνο πλήρωσης	111
Σχήμα 3-19. Απεικόνιση του φαινομένου γρήγορης ροής (racetrack effect) όπως ακριβώς αναπτύσσεται σε μία κοιλότητα μορφοποίησης μεταβλητού πάχους κατά την έγχυση πολυμερούς τήγματος.....	112
Σχήμα 3-20. Περιγραφή του φαινομένου της υποροής (underflow).....	113
Σχήμα 3-21. Μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) διεσπαρμένα εσωτερικά σε όλη την έκταση του στερεοποιημένου πολυμερούς που παρατείνουν τη χρονική διάρκεια του κύκλου έγχυσης και ενδέχεται να οδηγήσουν το τελικό προϊόν έγχυσης σε κατά τόπους σκεβρώσεις.....	114
Σχήμα 4-1. Το καζανάκι “SABRINA” μέγιστων διαστάσεων 446.00 x 140.67 x 326.50 mm x mm x mm και όγκου V = 1185.57 cc.....	122
Σχήμα 4-2. Το καζανάκι “SABRINA” μέγιστων διαστάσεων 446.00 x 140.67 x 326.50 mm x mm x mm και όγκου V = 1185.57 cc.....	122
Σχήμα 4-3. Το καζανάκι “SABRINA” μέγιστων διαστάσεων 446.00 x 140.67 x 326.50 mm x mm x mm και όγκου V = 1185.57 cc.....	123
Σχήμα 4-4. Γραμμές συγκόλλησης (weld lines) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης όπου το μέτωπο ροής «σπάει» σε επιμέρους μέτωπα	124
Σχήμα 4-5. Βαθουλώματα (sink marks) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης με αυξημένο πάχος (π.χ. νεύρα στήριξης).....	124
Σχήμα 4-6. Γραμμές ροής (flow lines) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης όπου τα επιμέρους μέτωπα ροής συγχωνεύονται	125
Σχήμα 4-7. Φαινόμενο πίδακα (jetting) που εκδηλώθηκε πέριξ της περιοχής τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού κατά την έγχυση του πολυμερούς τήγματος	126
Σχήμα 4-8. Επαλήθευση στο λογισμικό Moldex3D της εμφάνισης γραμμών συγκόλλησης (weld lines) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης όπου το μέτωπο ροής «σπάει» σε επιμέρους μέτωπα ή εκεί όπου αναπτύσσεται το φαινόμενο πίδακα	127
Σχήμα 4-9. Επαλήθευση στο λογισμικό Moldex3D της εμφάνισης βαθουλωμάτων (sink marks) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης με αυξημένο πάχος ..	128
Σχήμα 4-10. Επαλήθευση στο λογισμικό Moldex3D της εμφάνισης γραμμών ροής (flow lines) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης όπου τα επιμέρους μέτωπα ροής συγχωνεύονται ή εκεί όπου αναπτύσσεται το φαινόμενο πίδακα..	128

Σχήμα 4-11. Επαλήθευση στο λογισμικό Moldex3D της εμφάνισης του φαινομένου πίδακα (jetting) στο πραγματικό προϊόν έγχυσης στην περιοχή πέριξ της τροφοδοσίας	129
Σχήμα 4-12. Αυξημένη στρέβλωση (warpage) του τελικού προϊόντος έγχυσης κυρίως στις κάτω γωνίες	130
Σχήμα 4-13. Πρώτο εναλλακτικό σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού	131
Σχήμα 4-14. Εμφάνιση τεσσάρων πρόσθετων γραμμών συγκόλλησης (weld lines) στην περιοχή του μορφοποιημένου αντικειμένου που εμπίπτει στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού εξαιτίας των πυλών εισόδου τύπου cashew.....	131
Σχήμα 4-15. Εμφάνιση τεσσάρων πρόσθετων βαθουλωμάτων (sink marks) στην περιοχή του μορφοποιημένου αντικειμένου που εμπίπτει στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού εξαιτίας των πυλών εισόδου τύπου cashew	132
Σχήμα 4-16. Αυξημένη στρέβλωση (warpage) του τελικού προϊόντος έγχυσης στο μέσον των κάτω ακμών της πρόσοψης και της πίσω όψης.....	132
Σχήμα 4-17. Δεύτερο εναλλακτικό σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού το οποίο είναι και το επικρατέστερο για την τελική μελέτη και βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής του εν λόγω προϊόντος έγχυσης ...	133
Σχήμα 4-18. Ψυχρή πύλη εισόδου τύπου sprue μήκους $L = 80$ mm με μικρή διάμετρο $d = 9$ mm, μεγάλη διάμετρο $D = 18$ mm και όγκο $V = 11.82$ cc.....	136
Σχήμα 4-19. Σχεδιασμός του συστήματος ψύξης του καλουπιού	137
Σχήμα 4-20. Σύστημα ψύξης καλουπιού αποτελούμενο από κανάλια ψύξης και εύκαμπτους σωλήνες διαμέτρου $D = 14$ mm	137
Σχήμα 4-21. Σχεδιασμός καλουπιέρας μέγιστων διαστάσεων $600.00 \times 290.00 \times 480.00$ mm x mm x mm	138
Σχήμα 4-22. Δημιουργία 3D πλέγματος για το μοντέλο του προϊόντος έγχυσης, το σύστημα διανομής, το σύστημα ψύξης του καλουπιού και την καλουπιέρα.	139
Σχήμα 4-23. Τομή 3D πλέγματος του μοντέλου του προϊόντος έγχυσης, του συστήματος διανομής, του συστήματος ψύξης και της καλουπιέρας	140
Σχήμα 4-24. Σύνθετες ρυθμίσεις για τη δημιουργία 3D πλέγματος με διαφορετική πλεγματική δομή για καθένα από τα υπάρχοντα στοιχεία του καλουπιού (προϊόν έγχυσης, πύλη εισόδου τύπου sprue, σύστημα ψύξης και καλουπιέρα)	141
Σχήμα 4-25. Καθορισμός παραμέτρων της κατασκευαστικής διεργασίας στην καρτέλα Project Settings	143
Σχήμα 4-26. Το προφίλ της ταχύτητας ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όπως καθορίζεται στο λογισμικό Moldex3D.....	144
Σχήμα 4-27. Το προφίλ της ασκούμενης πίεσης επί του πολυμερούς τήγματος κατά την έγχυσή του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όπως καθορίζεται στο λογισμικό Moldex3D	145
Σχήμα 4-28. Το προφίλ της ασκούμενης πίεσης επί του πολυμερούς τήγματος κατά την συμπίεσή του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όπως καθορίζεται στο λογισμικό Moldex3D	146
Σχήμα 4-29. Καθορισμός παραμέτρων στην καρτέλα Filling/Packing Settings.....	147
Σχήμα 4-30. Καθορισμός παραμέτρων στην καρτέλα Cooling Settings	149
Σχήμα 4-31. Καθορισμός παραμέτρων στην καρτέλα Cooling Channel/Heating Rod ...	150
Σχήμα 4-32. Συνοπτική παράθεση της παραμετροποίησης της κατασκευαστικής διεργασίας.....	150

Σχήμα 4-33. Καθορισμός παραμέτρων στην καρτέλα Flow / Pack Settings.....	152
Σχήμα 4-35. Επιλογή του Enhanced λύτη για τον υπολογισμό της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης στην καρτέλα Warp Settings	153
Σχήμα 4-36. Ιξωδοελαστικότητα πολυμερούς στην υγρή και την στερεή φάση του και αλληλοσυσχέτιση των φάσεων ως προς την ιξωδοελαστικότητα.....	153
Σχήμα 4-37. Μη ισοσκελισμένο σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού που επιφέρει μια σειρά προβληματικών καταστάσεων όπως είναι ο σχηματισμός σημαδιών ροής (flow marks) ή γραμμών συγκόλλησης (weld lines) και η παγίδευση φυσαλίδων αέρος (air-traps).....	155
Σχήμα 4-38. Απεικονιστικός έλεγχος του μοτίβου του μετώπου ροής σε περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης όπου το πάχος είναι διαφορετικό με τη βοήθεια των ισοπαραμετρικών καμπυλών (iso-curves)	157
Σχήμα 4-39. Πιθανή επιβράδυνση ή παύση στη ροή του πολυμερούς τήγματος στο μικρότερο κενό μεταξύ ίδιων διαδοχικών ισοπαραμετρικών καμπυλών.....	158
Σχήμα 4-40. Συνεχής μεταβολή της πυκνότητας των ισοπαραμετρικών καμπυλών, γεγονός το οποίο αποτελεί ένδειξη σχηματισμού γραμμών/σημαδιών ροής (flow lines/marks) στην εξωτερική επιφάνεια του επικείμενου προϊόντος έγχυσης	158
Σχήμα 4-41. Το μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D	159
Σχήμα 4-42. Γραμμές συγκόλλησης (weld lines) που θα δημιουργηθούν στο τελικό προϊόν έγχυσης μόνο εκεί όπου η γεωμετρία του «σπάει» αναγκαστικά το μέτωπο ροής σε επιμέρους μέτωπα.....	160
Σχήμα 4-43. Εξάλειψη του φαινομένου πίδακα (jetting) σε σχέση με το αρχικό σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού	160
Σχήμα 4-44. Περιοχές ενός προϊόντος έγχυσης όπου πιθανόν εγκλωβίζονται φυσαλίδες αέρος μετά την προσομοίωση της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D..	161
Σχήμα 4-45. Σημεία στο προϊόν έγχυσης που μελετάται από τα οποία θεωρητικά θα εκλυόταν στην ατμόσφαιρα ο παγιδευμένος αέρας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού	161
Σχήμα 4-46. Οι γραμμές συγκόλλησης σε ένα προϊόν έγχυσης όπως ακριβώς προκύπτουν μετά την προσομοίωση της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D	162
Σχήμα 4-47. Οι πέντε γραμμές συγκόλλησης στο προϊόν έγχυσης που μελετάται όπως ακριβώς προκύπτουν μετά την προσομοίωση της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D	163
Σχήμα 4-48. Η μέση τιμή της γωνίας συνάντησης (θ) των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος στις γραμμές συγκόλλησης για το προϊόν έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος	163
Σχήμα 4-49. Η μέση θερμοκρασία των γραμμών συγκόλλησης του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος	164
Σχήμα 4-50. Η κατανομή της πίεσης στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος	168
Σχήμα 4-51. Η κατανομή της θερμοκρασίας στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος	169
Σχήμα 4-52. Η κατανομή της θερμοκρασίας του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος κατά την έγχυσή του στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος	171
Σχήμα 4-53. Η κατανομή της διατμητικής τάσης στο πολυμερές τήγμα	172
Σχήμα 4-54. Η κατανομή του ρυθμού διάτμησης στο πολυμερές τήγμα	174

Σχήμα 4-55. Ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας με εξαίρεση τις κάτω γωνίες του προϊόντος έγχυσης όπου θα υπάρξει και η μεγαλύτερη στρέβλωση.....	176
Σχήμα 4-56. Πλήρης τομογραφία των γραμμών συγκόλλησης προκειμένου να εξεταστεί επακριβώς η μορφή των επιμέρους πεπερασμένων στοιχείων στις αντίστοιχες περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου.	177
Σχήμα 4-57. Γραφική απεικόνιση της αναλογίας του στερεοποιημένου στρώματος πολυμερούς	178
Σχήμα 4-58. Η απόσταση που κάθε σωματίδιο του πολυμερούς τήγματος διανύει κατά την είσοδο του τήγματος στην κοιλότητα μορφοποίησης	181
Σχήμα 4-59. Διέλευση των σωματιδίων του πολυμερούς τήγματος από μία πύλη εισόδου τύπου sprue	182
Σχήμα 4-60. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου στη φάση πλήρωσης.....	184
Σχήμα 4-61. Απότομη μεταβολή σχετικά στην αρχή της καμπύλης της πίεσης που υποδηλώνει την είσοδο του πολυμερούς τήγματος στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού.....	184
Σχήμα 4-62. Διάγραμμα δύναμης σύσφιξης – χρόνου στη φάση πλήρωσης.....	185
Σχήμα 4-63. Μέγιστη και ελάχιστη συρρίκνωση του χυτευμένου πολυμερούς	188
Σχήμα 4-64. Μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού μετά το πέρας της φάσης συμπίεσης	189
Σχήμα 4-65. Η αναλογία ψύξης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού στο τέλος της φάσης συμπίεσης	190
Σχήμα 4-66. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου στη φάση συμπίεσης.....	191
Σχήμα 4-67. Διάγραμμα δύναμης σύσφιξης – χρόνου στη φάση συμπίεσης.....	192
Σχήμα 4-68. Η θέση του κεντροειδούς της δύναμης σύσφιξης του καλουπιού (clamping force) ως προς το κεντροειδές της καλουπιέρας (moldbase) στη φάση συμπίεσης.....	192
Σχήμα 4-69. Πιθανές θέσεις βαθουλωμάτων στο τελικό προϊόν έγχυσης.....	193
Σχήμα 4-70. Η κατανομή της θερμοκρασίας στο στερεοποιημένο πολυμερές εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με την ολοκλήρωση της φάσης ψύξης.....	195
Σχήμα 4-71. Η αποδοτικότητα του συστήματος ψύξης του καλουπιού του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος	198
Σχήμα 4-72. Η στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης μετά την εξόλκευσή του από το καλούπι	201
Σχήμα 4-73. Χρήση της εντολής Export Deformed Model για εξαγωγή της παραμορφωμένης γεωμετρίας του μοντέλου.....	203
Σχήμα 5-1. Ο σχεδιασμός πειραμάτων ως σύστημα ελέγχου.....	204
Σχήμα 5-2. Οι στατικές ή δυναμικές αποκρίσεις ενός συστήματος μπορούν να αποτελούν μέτρηση, αριθμηση ή οποιαδήποτε ανθρώπινη αίσθηση.....	205
Σχήμα 5-3. Γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης απώλειας ποιότητας σύμφωνα με την προσέγγιση Taguchi.	213
Σχήμα 5-4. Ονομαστική προσέγγιση – η πιο καλή (Nominal – the best)	213
Σχήμα 5-5. Μικρή προσέγγιση – η καλύτερη (Small – the better)	214
Σχήμα 5-6. Μεγάλη προσέγγιση – η καλύτερη (Large – the better).....	215
Σχήμα 5-7. Δημιουργία εξειδικευμένης ανάλυσης βάσει της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης.	217
Σχήμα 5-8. Επιλογή μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων και μεθόδου Taguchi στα πλαίσια της βελτιστοποίησης της εξειδικευμένης ανάλυσης.....	218

Σχήμα 5-9. Quality Factor – Filling.....	221
Σχήμα 5-10. Quality Factor – Packing	222
Σχήμα 5-11. Quality Factor – Cooling.....	222
Σχήμα 5-12. Quality Factor – Warpage	222
Σχήμα 5-13. Η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος και τί αντιπροσωπεύει στο λογισμικό Moldex3D	225
Σχήμα 5-14. Σκαριφηματική απόδοση της στρωτής και της τυρβώδους ροής του ψυκτικού μέσου.....	232
Σχήμα 5-15. Control Factors.....	234
Σχήμα 5-16. Ορθογώνια διάταξη Taguchi L27.....	235
Σχήμα 5-17. Συνοπτική επισκόπηση της διαδικασίας σχεδιασμού πειραμάτων	236
Σχήμα 5-18. Αποκρίσεις ποιότητας σε κάθε ανάλυση για κάθε ποιοτικό παράγοντα	237
Σχήμα 5-19. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”	238
Σχήμα 5-20. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).....	238
Σχήμα 5-21. Ποσοτικό γράφημα μέσης απόκρισης ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου	239
Σχήμα 5-22. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	239
Σχήμα 5-23. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).....	239
Σχήμα 5-24. Ποσοτικό γράφημα μέσης απόκρισης ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου	240
Σχήμα 5-25. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	240
Σχήμα 5-26. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).....	241
Σχήμα 5-27. Ποσοτικό γράφημα μέσης απόκρισης ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου	241
Σχήμα 5-28. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	242
0Σχήμα 5-29. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).....	242
Σχήμα 5-30. Ποσοτικό γράφημα μέσης απόκρισης ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Warpage – Total Displacement” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου	243
Σχήμα 5-31. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”	243
Σχήμα 5-32. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).....	244
Σχήμα 5-33. Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου.....	244

Σχήμα 5-34. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.....	245
Σχήμα 5-35. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).....	245
Σχήμα 5-36. Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου.....	246
Σχήμα 5-37. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.....	246
Σχήμα 5-38. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).....	246
Σχήμα 5-39. Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου.....	247
Σχήμα 5-40. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.....	247
Σχήμα 5-41. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).....	248
Σχήμα 5-42. Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου.....	248
Σχήμα 5-43. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.....	249
Σχήμα 5-44. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.....	249
Σχήμα 5-45. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.....	250
Σχήμα 5-46. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.....	250
Σχήμα 5-47. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.....	251
Σχήμα 5-48. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.....	251
Σχήμα 5-49. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.....	252
Σχήμα 5-50. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.....	252
Σχήμα 5-51. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.....	253

Σχήμα 5-52. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”	253
Σχήμα 5-53. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”	254
Σχήμα 5-54. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”	254
Σχήμα 5-55. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	255
Σχήμα 5-56. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	255
Σχήμα 5-57. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	256
Σχήμα 5-58. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	256
Σχήμα 5-59. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	257
Σχήμα 5-60. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	257
Σχήμα 5-61. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	258
Σχήμα 5-62. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	258
Σχήμα 5-63. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	259
Σχήμα 5-64. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	259
Σχήμα 5-65. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	260
Σχήμα 5-66. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	260
Σχήμα 5-67. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	261
Σχήμα 5-68. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	261

Σχήμα 5-69. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	262
Σχήμα 5-70. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	262
Σχήμα 5-71. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	263
Σχήμα 5-72. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	263
Σχήμα 5-73. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	264
Σχήμα 5-74. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	264
Σχήμα 5-75. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	265
Σχήμα 5-76. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	265
Σχήμα 5-77. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	266
Σχήμα 5-78. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	266
Σχήμα 5-79. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	267
Σχήμα 5-80. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	267
Σχήμα 5-81. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	268
Σχήμα 5-82. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	268
Σχήμα 5-83. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	269
Σχήμα 5-84. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	269
Σχήμα 5-85. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	270

Σχήμα 5-86. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	270
Σχήμα 5-87. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	271
Σχήμα 5-88. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	271
Σχήμα 5-89. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	272
Σχήμα 5-90. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	272
Σχήμα 5-91. Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”	274
Σχήμα 5-92. Προσδοκώμενες και πραγματικές τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”	275
Σχήμα 5-93. Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	275
Σχήμα 5-94. Προσδοκώμενες και πραγματικές τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”	276
Σχήμα 5-95. Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	276
Σχήμα 5-96. Προσδοκώμενες και πραγματικές τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”	277
Σχήμα 5-97. Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	278
Σχήμα 5-98. Προσδοκώμενες και πραγματικές τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”	278
Σχήμα A-1. Ιξώδες του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri	284
Σχήμα A-2. Ογκομετρικές ιδιότητες του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.....	285
Σχήμα A-3. Θερμοχωρητικότητα του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.....	285
Σχήμα A-4. Θερμική αγωγιμότητα του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.....	286
Σχήμα A-5. Ιξωδοελαστικότητα του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.....	286
Σχήμα A-6. Structure VE του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri	286

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Συνήθη πολυμερή δομικά υλικά : Χαρακτηριστικά γνωρίσματα και παραγόμενα προϊόντα έγχυσης	41
Πίνακας 2-2. Προτεινόμενα εύρη τιμών για τις διαμέτρους των αγωγών διανομής για μικρής έως μεσαίας τάξης μεγέθους προϊόντα έγχυσης με βάση το πολυμερές που χρησιμοποιείται.....	56
Πίνακας 2-3. Αναλογίες μεταξύ της διαμέτρου και του μήκους των αγωγών διανομής αναφορικά με το μέγεθος του ιξώδους του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς.....	56
Πίνακας 2-4. Προτεινόμενος αριθμός πυλών εισόδου προς τοποθέτηση σε ένα καλούπι συναρτήσει της εκάστοτε μέγιστης αναλογίας μήκους ροής (L/t)	71
Πίνακας 3-1. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών	116
Πίνακας 3-2. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών	117
Πίνακας 3-3. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών	118
Πίνακας 3-4. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών	119
Πίνακας 3-5. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών	120
Πίνακας 4-1. Τα ακολουθούμενα βήματα για τη μελέτη ενός προϊόντος έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D	134
Πίνακας 5-1. Παράδειγμα πλήρως παραγοντικής ορθογώνιας διάταξης τεσσάρων παραγόντων σε δύο επίπεδα.	207
Πίνακας 5-2. Ορθογώνια διάταξη Taguchi μονού επιπέδου για οκτώ πειράματα με επτά παράγοντες ελέγχου και δύο επίπεδα έκαστος ($L_8(2^7)$)	209
Πίνακας 5-3. Ορθογώνια διάταξη Taguchi διπλού επιπέδου για δεκαοκτώ πειράματα με οκτώ παράγοντες ελέγχου όπου ο πρώτος παράγοντας έχει δύο επίπεδα και οι υπόλοιποι παράγοντες έχουν τρία επίπεδα ($L_{18}(2^1 \times 3^7)$)	210
Πίνακας 5-4. Τύπος ροής του ψυκτικού μέσου αναλόγως του αριθμού Reynolds.....	232
Πίνακας 5-5. Ελάχιστες, μέγιστες και βέλτιστες τιμές των έξι παραγόντων ελέγχου σύμφωνα με τον σχεδιασμό πειραμάτων με τη μέθοδο Taguchi.	273
Πίνακας A-1. Χαρακτηριστικά του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.....	283

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι σε πρώτη φάση η αξιολόγηση της ποιότητας ενός βιομηχανικού προϊόντος έγχυσης και σε δεύτερη φάση η ελαχιστοποίηση και η εξάλειψη των κατασκευαστικών ατελειών που εντοπίζονται σε αυτό και υποβαθμίζουν την ποιότητά του. Το όλο εγχείρημα έγινε σε συνεργασία με το τεχνικό κλιμάκιο της εταιρείας “SPEK Metalplastic S.A.” η οποία είναι η κατασκευάστρια εταιρεία του εν λόγω προϊόντος έγχυσης. Η τεχνολογία που εφαρμόζει η εταιρεία για την παραγωγή των προϊόντων έγχυσης σε πραγματικό χρόνο είναι η χύτευση με έγχυση δομικού υλικού (injection molding), μια τεχνολογία παραγωγής ιδιαίτερα διαδεδομένη σε ό,τι αφορά την κατασκευή πλαστικών εξαρτημάτων.

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας της συγκεκριμένης τεχνολογίας παραγωγής που απαιτεί για κάθε προϊόν έγχυσης την κατάλληλη παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας, καθίσταται δύσκολο έως απίθανο να προκύψει το βέλτιστο τελικό προϊόν με την πρώτη προσπάθεια από πλευράς ποιότητας, δηλαδή από πλευράς διαστασιολογικής ακρίβειας, χρηστικότητας και αισθητικής. Γενικά, ένα προϊόν έγχυσης εξασφαλίζει την επαναληψιμότητα της παραγωγής όταν είναι ποιοτικά άρτιο.

Σε αυτά τα πλαίσια, έγινε σε πρώτη φάση μια επαλήθευση των ατελειών που εντοπίζονται στο προϊόν έγχυσης σε πραγματικό χρόνο με τη βοήθεια του Moldex3D, ένα πανίσχυρο λογισμικό προσομοίωσης ροής σε καλούπια έγχυσης. Ακολούθως, εξετάστηκαν κάποια εναλλακτικά σενάρια τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, αποφασίστηκε εκείνο το σενάριο που βελτίωνε όσο το δυνατόν περισσότερο το προϊόν έγχυσης από ποιοτική άποψη και τέλος καταστρώθηκε η διαδικασία βελτιστοποίησης της κατασκευαστικής διεργασίας για το σενάριο αυτό με τη βοήθεια του εργαλείου Moldex3D Expert.

Το προηγμένο αυτό εργαλείο υπολογισμού και βελτιστοποίησης που διαθέτει ενσωματωμένο το λογισμικό Moldex3D χρησιμοποιεί μεθόδους σχεδιασμού πειραμάτων (Design of Experiments - DOE) και συγκεκριμένα τη μέθοδο Taguchi η οποία ανήκει στη κατηγορία κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού (fractional factorial design). Για την ανάλυση δε των δεδομένων από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση Taguchi και η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) μέσω του ίδιου εργαλείου.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν αρκετές πηγές αναλόγως της εκάστοτε θεματικής ενότητας. Συγκεκριμένα, για τη μελέτη του καλουπιού και των ατελειών που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης, αντλήθηκαν πληροφορίες από τις εξής πηγές :

- [13] D. V. Rosato, D. V. Rosato and M. G. Rosato, “Injection Molding Handbook”, *Springer Science + Business Media, LLC*, vol. 1, no. 3, pp. 151–368, 415–476 and 969–994, 2000.
- [14] D. Kazmer, “Injection Mold Design Engineer”, *Hanser Publications*, 2nd Edition, pp. 109–135, 141–175, 197–224, 246–278, 291–306, 317–323 and 470–481, 2016.
- [15] H. P. Heim, “Specialized Injection Molding Techniques”, *PLASTICS DESIGN LIBRARY (PDL), PDL HANDBOOK SERIES, Elsevier Inc.*, pp. 17–26, 2016.

- [16] H. Pruner and W. Nesch, “Understanding Injection Molds”, *Hanser Publications*, pp. 49–58 and 71–79, 2013.
- [17] H. Rees, “Understanding Injection Mold Design”, *Hanser Publications*, pp. 7–27, 48–71 and 83–91, 2001.
- [18] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar and F. Ehrig, “Training in Injection Molding, A Text and Workbook”, *Hanser Publications*, 2nd Edition, pp. 12–14, 20–25, 32–39, 43–53, 56–61 and 70–85, 2001.
- [19] G. Mennig and K. Stoeckhert, “Mold-Making Handbook”, *Hanser Publications*, 3rd Edition, pp. 301–329 and 349–376, 2013.
- [20] G. Menges, W. Michaeli and P. Mohren, “How to Make Injection Molds”, *Hanser Publications*, 3rd Edition, pp. 105–140, 143–156, 164–176, 180–192, 205–210, 242–248, 259–265, 312–318 and 335–348, 2001.
- [21] G. Menges, W. Michaeli and P. Mohren, “How to Make Injection Molds”, *Hanser Publications*, 3rd Edition, pp. 105–140, 143–156, 164–176, 180–192, 205–210, 242–248, 259–265, 312–318 and 335–348, 2001.

Επίσης, για τη μελέτη των μεθόδων σχεδιασμού πειραμάτων και συγκεκριμένα για τις τεχνικές Taguchi και ANOVA αντλήθηκαν πληροφορίες από τις εξής πηγές :

- [1] S. Kamaruddin, Z. A. Khan and S. H. Foong, “Application of Taguchi Method in the Optimization of Injection Moulding Parameters for Manufacturing Products from Plastic Blend”, *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 574–580, 2010.
- [2] L. D. Mahajan and P. N. Ulhe, “Analysis of Injection Molding Process to Reduce Defects (Short Shot) by using Taguchi Methodology”, *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, vol. 5, no. 6, pp. 113–119, 2018.
- [3] M. V. Kavade and S. D. Kadam, “Parameter Optimization of Injection Molding of Polypropylene by using Taguchi Methodology”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 49–58, 2016.
- [4] S. A. N. Mohamed, E. S. Zainudin, S. M. Sapuan, M. A. M. Deros and A. M. T. Arifin, “Integration of Taguchi-Grey Relational Analysis Technique in Parameter Process Optimization for Rice Husk Composite”, *BioResources*, vol. 14, no. 1, pp. 1111–1122, 2019.
- [5] A. Wavare and S. Ubale, “Parametric Investigation for PP Homopolymer (1110 MAS) in Plastic Injection Molding Process using Taguchi Method”, *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 4, no. 2, pp. 323–330, 2016.
- [6] N. Subramani, J. G. Murali, P. V. Rajan and C. G. Jose, “Optimization of Injection Moulding Mould Flow Analysis Using Taguchi Approach”, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 118, no. 11, pp. 241–248, 2018.
- [7] H. Radhwan, M. T. Mustafa, A. F. Annuar, H. Azmi, M. Z. Zakaria and A. N. M. Khalif, “An Optimization of Shrinkage in Injection Molding Parts by Using Taguchi Method”, *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, vol. 10, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [8] R. Hussin, R. M. Saad, R. Hussin and M. S. I. M. Dawi, “An Optimization of Plastic Injection Molding Parameters Using Taguchi Optimization Method”, *Asian Transactions on Engineering*, vol. 02, no. 05, pp. 75–79, 2012.

- [9] R. K. Roy, "A Primer On The Taguchi Method", *Society of Manufacturing Engineers*, pp. 19–27, 40–96 and 100–172, 1990.
- [10] P. J. Ross, "Taguchi Techniques for Quality Engineering", *Mc Graw-Hill*, 2nd Edition, pp. 23–27, 43–69, 91–167, 181–196, 203–213 and 245–255, 1996.
- [11] 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 Experiment Analysis", *Expert Systems with Applications*, no. 36, pp. 10753–10758, 2009.
- [12] B. Ozcelik and I. Sonat, "Warpage and Structural Analysis of Thin Shell Plastic in the Plastic Injection Molding", *Materials and Design*, no. 30, pp. 368–374, 2009.

Τέλος, για την εκμάθηση του λογισμικού Moldex3D και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, πολύτιμη ήταν η συμβολή του διαδικτυακού οδηγού χρήσης του προγράμματος.

1.3 Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία επιμερίζεται σε έξι κεφάλαια με το καθένα εξ αυτών να αποτελεί ξεχωριστή θεματική ενότητα με στόχο την καλύτερη οργάνωση και την πιο ομαλή ροή της. Το πρώτο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό ενώ τα επόμενα τρία χτίζουν το θεωρητικό υπόβαθρο του αναγνώστη το οποίο, άλλωστε, χρειάζεται να κάνει κτήμα του προκειμένου να είναι σε θέση να κατανοήσει το περιεχόμενο του πέμπτου κεφαλαίου. Πιο συγκεκριμένα :

Στο **πρώτο** κεφάλαιο, αποσαφηνίζεται ο σκοπός της εργασίας, περιγράφεται συνοπτικά το περιεχόμενο των επόμενων κεφαλαίων και γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της έρευνας αναφορικά με θέματα που άπτονται του σχεδιασμού καλουπιών, της προσομοίωσης της κατασκευαστικής διεργασίας injection molding μέσω πεπερασμένων στοιχείων και του σχεδιασμού πειραμάτων με χρήση της μεθόδου Taguchi.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο πραγματοποιείται μία μακροσκελής αναφορά στα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας παραγωγής injection molding, στα χρησιμοποιούμενα πολυμερή δομικά υλικά και στον τρόπο κατά τον οποίο σχεδιάζεται ένα προϊόν έγχυσης μαζί με το καλούπι του.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο παρατίθενται και σχολιάζονται διεξοδικά όλες οι κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης, ενώ προτείνονται τρόποι διόρθωσης ή / και εξάλειψης των ατελειών αυτών.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο εκπονείται η μελέτη περίπτωσης για ένα βιομηχανικό προϊόν έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D, ενώ εξετάζονται λεπτομερώς και σχολιάζονται εκτενώς τα πρωτογενή αποτελέσματα προσομοίωσης ενός πλήρους κύκλου έγχυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο γίνεται ξεχωριστή μνεία στον σχεδιασμό πειραμάτων ενώ, παράλληλα, διασαφηνίζονται οι αρχές της μεθόδου Taguchi. Ακολούθως, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία προκειμένου, σε πρώτη φάση, να αξιολογηθεί και έπειτα να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα του βιομηχανικού προϊόντος έγχυσης που μελετάται, παραθέτοντας και αναλύοντας τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

Το **έκτο** και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την εργασία, αλλά και την υποβολή πιθανών μελλοντικών προτάσεων για βελτίωση και εμπλουτισμό της έρευνας που πραγματοποιήθηκε.

2 Η Τεχνολογία Χύτευσης με Έγχυση Δομικού Υλικού (Injection Molding)

Στη σημερινή εποχή, τα πλαστικά σκεύη και εξαρτήματα χρησιμοποιούνται ευρέως και σε καθημερινή βάση τόσο για οικιακή όσο και για επαγγελματική ή βιομηχανική χρήση. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες παραγωγής όπως οι τεχνολογίες injection molding, extrusion, thermoforming, blow molding, compression molding κλπ. Ωστόσο, εκείνη που κερδίζει περισσότερο έδαφος στη βιομηχανική παραγωγή και παρουσιάζει αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον είναι η τεχνολογία *injection molding*. Πρόκειται περί μιας εξειδικευμένης διαδικασίας παραγωγής διακριτών πλαστικών εξαρτημάτων με πολλά πλεονεκτήματα έναντι των υπόλοιπων διαδικασιών που υπόκεινται στην ίδια κατηγορία. Μάλιστα, τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν την αναφερθείσα κατασκευαστική τεχνολογία ιδανική για μαζική παραγωγή τέτοιου είδους αγαθών. Ενδεικτικά, αξίζει να αναφερθούν ορισμένα εξ αυτών όπως :

- η δυνατότητα κατασκευής πλαστικών εξαρτημάτων πολυσύνθετης γεωμετρίας (δημιουργία νεύρων στήριξης, επιφανειών ελεύθερης μορφής, εσωτερικών ή εξωτερικών σπειρωμάτων, εσωτερικών ή εξωτερικών υποκοπών κλπ) σε ένα αυτοματοποιημένο στάδιο παραγωγής,
- η εξασφάλιση εξαιρετικών ανοχών διαστάσεων (*dimensional tolerances*) με αποτέλεσμα να απαιτούνται σπανίως περαιτέρω διεργασίες αποπεράτωσης του παραχθέντος προϊόντος,
- η πολύ καλή επαναληψιμότητα και η πολύ υψηλή αποδοτικότητα της παραγωγής,
- το χαμηλό κόστος παραγωγής για μεγάλο αριθμό παραγόμενων τεμαχίων και
- η δυνατότητα χρήσης πληθώρας πολυμερών δομικών υλικών όπως θερμοπλαστικά, θερμοσκληραινόμενα, ελαστομερή κλπ.

Μολονότι η τεχνική αυτή παρουσιάζει κάποια λίγα μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος κατασκευής των καλουπιών και το υψηλό ποσοστό των υπολειμμάτων της μορφοποίησης (scrap), υπολογίζεται ότι περίπου το ένα τρίτο των θερμοπλαστικών μορφοποιούνται μέσω αυτής, ενώ πάνω από το ήμισυ του εξοπλισμού της βιομηχανίας μορφοποίησης πολυμερών αποτελείται από μηχανές έγχυσης. Άλλωστε, δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία παραγωγής βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική, την αεροδιαστημική, την αμυντική βιομηχανία, τη βιομηχανία παραγωγής ημιαγωγών και λοιπών εξαρτημάτων ηλεκτρονικής, τις τηλεπικοινωνίες, την ιατρική κλπ.

2.1 Περιγραφή της Κατασκευαστικής Διαδικασίας

Με τον όρο *κύκλος έγχυσης* (*injection cycle*) νοείται η διαδικασία κατασκευής ενός εξαρτήματος μέσω της τεχνολογίας παραγωγής injection molding και αποτελείται από τις ακόλουθες επιμέρους διακριτές φάσεις (**Σχήμα 2-1**) :

- Στο εσωτερικό της χοάνης της μηχανής έγχυσης θερμαίνεται πολυμερές δομικό υλικό σε ένα υψηλό σημείο τήξης το οποίο είναι συγκεκριμένο για το εν λόγω υλικό και καθορίζεται από τον προμηθευτή του.
- Μέσω ενός προσαρμοσμένου στις εκάστοτε ανάγκες *συστήματος διανομής* (*runner system*) αποτελούμενο από *δίαυλο* (*sprue*), ψυχρούς ή θερμούς αγωγούς διανομής (*cool/hot runners*) και *δοχείο ψύξης* (*cold slug*) αντλείται τηκόμενο πολυμερές από τη χοάνη της μηχανής έγχυσης και διά των κατάλληλων ψυχρών ή θερμών πυλών

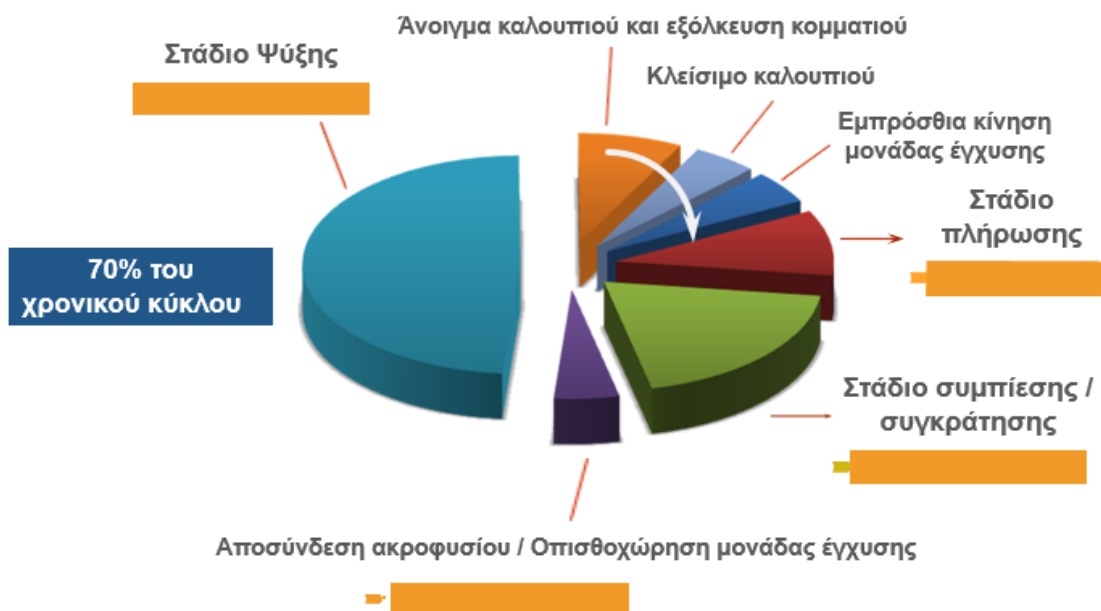
εισόδου (*cool/hot gates*) αυτό διοχετεύεται στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού του εν λόγω εξαρτήματος.

- Εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού το πολυμερές περνάει από τέσσερα διαδοχικά στάδια. Συγκεκριμένα πρόκειται για :
 - το στάδιο της *πλήρωσης* της κοιλότητας μορφοποίησης (*filling stage*), δηλαδή το γέμισμα αυτής με πολυμερές τήγμα λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του *ιξώδους* (*viscosity*) του τήγματος και των *ογκομετρικών ιδιοτήτων* (*PVT properties*) του πολυμερούς, με χρονική διάρκεια $t_f - t_0$. Σε αυτό το στάδιο η πίεση έγχυσης και η ογκομετρική συμπεριφορά του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς είναι αυτές που καθορίζουν τον προσανατολισμό του μορφοποιημένου τμήματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης και επηρεάζουν, εν τέλει, σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος έγχυσης.
 - το στάδιο της *συμπύεσης* του πολυμερούς τήγματος (*packing stage*), κοινώς το «σιδέρωμα» του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης, με χρονική διάρκεια $t_p - t_f$. Σε αυτό το στάδιο η πίεση έγχυσης αυξάνεται περαιτέρω συμπιέζοντας το τήγμα ούτως ώστε να επιτραπεί η μεταφορά επιπλέον τήγματος πολυμερούς με μικρότερο ρυθμό στις περιοχές που έχουν ήδη στερεοποιηθεί. Κάτι τέτοιο καθίσταται εφικτό εφόσον δεν έχουν φράξει οι πύλες εισόδου από στερεοποιημένο πολυμερές.
 - το στάδιο της *διατήρησης* της πίεσης συγκράτησης στο υδαρές πολυμερές εντός της κοιλότητας μορφοποίησης (*holding pressure stage*) με χρονική διάρκεια $t_d - t_p$. Σε αυτό το μεταβατικό στάδιο η πίεση έγχυσης σταματά να αυξάνεται και διατηρείται σταθερή. Τοιουτοτρόπως, ξεκινά η αναδιάταξη των αλυσίδων του πολυμερούς σχηματίζοντας μερικώς διατεταγμένες περιοχές, γεγονός το οποίο σηματοδοτεί την έναρξη της ανάπτυξης των μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος έγχυσης. Σημειώνεται δε ότι η διατήρηση της πίεσης συγκράτησης είναι απαραίτητη προκειμένου να αντισταθμιστούν τα φαινόμενα της *ογκομετρικής συρρίκνωσης* (*volumetric shrinkage*) και της *στρέβλωσης* (*warpage*) του πολυμερούς.
 - το στάδιο της *ψύξης* του υδαρούς πολυμερούς εντός της κοιλότητας μορφοποίησης (*cooling stage*) με χρονική διάρκεια $t_e - t_d$. Σε αυτό το στάδιο το πολυμερές τήγμα αρχίζει να ψύχεται ενώ έχει ήδη πραγματωθεί η στερεοποίησή του εντός του συστήματος διανομής και έχει αποσυνδεθεί το ακροφύσιο. Οποσδήποτε, είναι σημαντικό ο χρόνος ψύξης (*cooling time*) να είναι επαρκής ώστε να ψυχθεί το πολυμερές τόσο στις πύλες εισόδου όσο και στους δρομείς προκειμένου να αποσοβηθεί ο κίνδυνος διαρροής του τήγματος από την κοιλότητα μορφοποίησης προς την πλευρά του *στομίου έγχυσης*. Προφανώς, μόλις το πολυμερές τήγμα φτάσει στη θερμοκρασία μετάβασης σε στερεό, παύει η οποιαδήποτε κίνηση των μοριακών αλυσίδων.
- Το καλούπι ανοίγει και το παραχθέν εξάρτημα εξελκείται (*ejection*). Λεπτομερέστερα, με το πέρας της διαδικασίας ψύξης η *δύναμη σύσφιξης* (*clamping force*) εκτονώνεται, γεγονός το οποίο επιτρέπει το άνοιγμα του καλουπιού. Το κινητό μέρος του καλουπιού επιβάλλεται να έχει φτάσει στην ακραία θέση του προτού ενεργοποιηθούν οι *εξολκείς* (*ejectors*) που βρίσκονται σε αυτό ώστε να απομακρυνθεί το παραχθέν εξάρτημα ανεμπόδιστα. Το δε παραχθέν εξάρτημα εξαιτίας της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς δομικού υλικού είναι προσκολλημένο στα τοιχώματα του πυρήνα του καλουπιού. Επομένως, για να αφαιρεθεί επιτυχώς απαιτείται άσκηση

δύναμης διά των εξολκέων τέτοιας ώστε να αποκολληθεί πλήρως το εξάρτημα από τον πυρήνα.

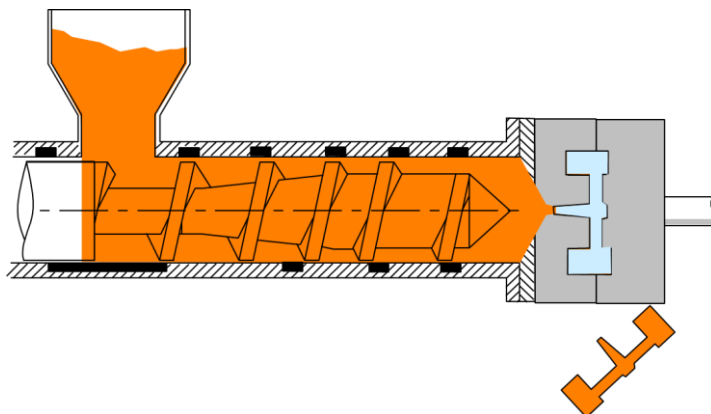
- Αφότου περαιωθεί η απομάκρυνση του παραχθέντος εξαρτήματος, το καλούπι κλείνει εκ νέου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται αλγοριθμικά σηματοδοτώντας την έναρξη ενός νέου κύκλου έγχυσης. Υπενθυμίζεται ότι ένας πλήρης κύκλος έγχυσης διαρκεί κάποια δευτερόλεπτα. Αυτή η χρονική διάρκεια εκφράζει τον συνολικό χρόνο που απαιτείται για την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος έγχυσης. Κάθε κύκλος ξεκινά με την έναρξη της έγχυσης του πολυμερούς τήγματος στο καλούπι και ολοκληρώνεται με την περαίωση της διαδικασίας ανοίγματος του καλουπιού. Επομένως, η συνολική χρονική διάρκεια του κύκλου έγχυσης περιγράφεται μαθηματικά από την Εξ. (1-1) :

$$t_{\text{κύκλου}} = t_{\text{πλήρωσης}} + t_{\text{συμπίεσης}} + t_{\text{ψύξης}} + t_{\text{εξόλκευσης}} \quad (1-1)$$

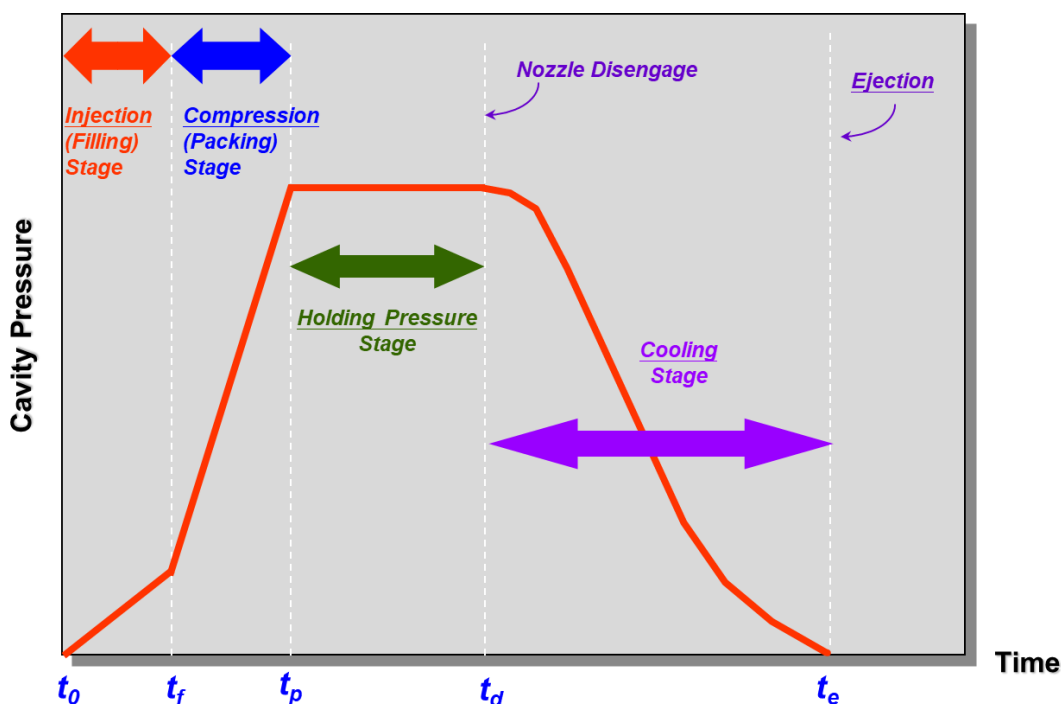


Σχήμα 2-1. Γραφική απόδοση της κατανομής του χρόνου σε έναν πλήρη κύκλο έγχυσης (cycle time) στην τεχνολογία παραγωγής injection molding.

Παρακάτω, στο **Σχήμα 2-2** που ακολουθεί εικονογραφείται η παραγωγή ενός προϊόντος έγχυσης με τη χρήση μιας τυπικής μηχανής έγχυσης, ενώ στο **Σχήμα 2-3** που έπεται, αποδίδονται οι επιμέρους διαδοχικές φάσεις από τις οποίες περνά το πολυμερές δομικό υλικό εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού κατά την εξέλιξη της κατασκευαστικής διεργασίας σε ποιοτικό διάγραμμα πίεσης – χρόνου.



Σχήμα 2-2. Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας παραγωγής injection molding.



Σχήμα 2-3. Οι τέσσερις διαδοχικές φάσεις του πολυμερούς δομικού υλικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όπως αποδίδονται σε ποιοτικό διάγραμμα πίεσης – χρόνου.

Εντούτοις, η κατασκευή του τελικού προϊόντος έγχυσης όχι μόνο δεν είναι τόσο απλή υπόθεση όσο φαίνεται ενδεχομένως εκ πρώτης όψεως αλλά είναι ιδιαίτερος πολύπλοκη. Αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί αν εξετάσει κανείς ενδελεχέστερα την κατασκευαστική διεργασία βήμα προς βήμα και συνυπολογίσει όλες τις παραμέτρους που υπεισέρχονται σε αυτή και επηρεάζουν το τελικό εξαγόμενο η καθεμία με τον δικό της τρόπο. Εξάλλου, αυτή καθ' αυτή η διεργασία χύτευσης με έγχυση δομικού υλικού συνδυάζει τον σχεδιασμό του εκάστοτε εξαρτήματος (part design) με τον σχεδιασμό του αντίστοιχου καλουπιού (mold design), την ρεολογική συμπεριφορά του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού (rheological behavior) και τις ανάλογες συνθήκες (process conditions) που αποφασίζεται να τηρηθούν κάθε φορά.

Όπως ειπώθηκε προηγούμενα, το πολυμερές δομικό υλικό κατά την έγχυσή του στην κοιλότητα μορφοποίησης περνάει από τις επιμέρους διαδοχικές φάσεις της πλήρωσης της κοιλότητας, της συμπίεσης του τήγματος, της διατήρησης της πίεσης συγκράτησης στο τήγμα και της ψύξης του τήγματος. Ασφαλώς, κάθε φάση διακρίνεται για τα δικά της στοιχεία δυναμικής συμπεριφοράς και τις δικές της ιδιαιτερότητες εν γένει. Για την ακρίβεια, οι τρεις πρώτες συνεπάγονται αλληλεπιδράσεις μεταξύ μη Νευτωνικού ρευστού (ρευστό μεταβλητού ιξώδους) και διαδικασιών μετάδοσης θερμότητας, ενώ η τελευταία συνεπάγεται προβλήματα στη μετάδοση θερμότητας μεταξύ «καλουπιέρας» και καναλιών ψύξης. Επιπλέον, η ανάπτυξη στερεοποιημένου οριακού στρώματος στο πολυμερές τήγμα, ήτοι η στερεοποίηση των ελεύθερων επιφανειακών στρωμάτων του μετώπου ροής (melt front) του τήγματος που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της έγχυσης και είναι απόρροια σημαντικών ογκομετρικών μεταβολών, περιπλέκει ακόμη περισσότερο την ανάλυση της κατασκευαστικής διεργασίας.

Φυσικό επακόλουθο των προαναφερθέντων αποτελεί η μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης τουλάχιστον μίας ατέλειας στο προϊόν έγχυσης μετά την εξόλκευσή του όπως στρέβλωση

(*warpage*), ογκομετρική συρρίκνωση (*volumetric shrinkage*), βαθουλώματα (*sink marks*), σημάδια από τη σύζευξη των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος (*weld lines*) κλπ. Προφανώς, η εμφάνιση τέτοιων ατελειών συνεπάγεται έλλειψη ακρίβειας στις διαστάσεις του προϊόντος και τις ανοχές αυτών, ανομοιογένεια και γενικά μη αποδεκτό αποτέλεσμα από πλευράς αντοχής ή αισθητικής.

Κατά συνέπεια, είναι απολύτως αναγκαίο ο σχεδιασμός του τελικού προϊόντος και του καλουπιού του, ο προσδιορισμός του πολυμερούς δομικού υλικού και η παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας και του τεχνικού εξοπλισμού να ενσωματωθούν και να ολοκληρωθούν σε μία ενιαία πλατφόρμα με τη βοήθεια της οποίας θα μπορεί να γίνει η σε βάθος μελέτη και ανάλυση της κατασκευής ενός προϊόντος έγχυσης. Τέτοιες πλατφόρμες αποτελούν τα εμπορικά **Computer Aided Engineering – CAE** λογισμικά όπως το Moldex3D, το MOLDFLOW, το SolidWorks Plastics κλπ.

2.2 Μηχανές Έγχυσης

Η μηχανή έγχυσης αποτελεί τον τεχνικό εξοπλισμό με τη βοήθεια του οποίου κατασκευάζονται σε πραγματικό χρόνο όλα τα προϊόντα έγχυσης. Οι μηχανές έγχυσης που κυκλοφορούν στο εμπόριο ενδέχεται να είναι *μηχανικές, υδραυλικές, ηλεκτρικές και υβριδικές*, δηλαδή ηλεκτρικές και υδραυλικές ταυτόχρονα. Κάθε μηχανή έγχυσης χαρακτηρίζεται από τη δύναμη σύσφιξης (*clamping force*) η οποία ασκείται στα δύο μέρη του καλουπιού προκειμένου αυτά να παραμένουν ερμητικά κλειστά ενόσω διαρκεί η διαδικασία της χύτευσης. Το εύρος των δυνάμεων κυμαίνεται μεταξύ **50** και **100.000** kN, με το πιο σύνηθες εύρος να κυμαίνεται από **100** έως **30.000** kN για το οποίο οι μηχανές έγχυσης κατασκευάζονται σε μικρές σειρές παραγωγής. Άλλες τεχνικές προδιαγραφές των μηχανών έγχυσης αποτελούν :

- η πίεση έγχυσης (*injection pressure*), το εύρος της οποίας κυμαίνεται από **120** έως **250** MPa,
- η διάμετρος του κοχλίου που κυμαίνεται από **f18** έως **f120** mm και
- η χωρητικότητα της χοάνης όπου αποθηκεύεται το πολυμερές τήγμα με το εύρος της να κυμαίνεται από **0.5** έως **5** kg.

Μια τυπική μηχανή έγχυσης που συναντάται συχνά σε καλουπατζίδικα και λοιπές μονάδες παραγωγής είναι αυτή του οριζόντιου τύπου η οποία αποτελείται κυρίως από τα ακόλουθα τέσσερα διακριτά μέρη :

❖ Μονάδα ελέγχου (*Control Unit*)

Ελέγχει όλες τις διατάξεις που σχετίζονται άμεσα με την κατασκευαστική διεργασία ώστε να διατηρούνται ορθές οι σχετικές λειτουργικές διαδικασίες στο σύνολό τους χωρίς να παρακωλύονται. Για το λόγο αυτό, όλες οι φυσικές τιμές μετρώνται από ειδικούς αισθητήρες οι οποίοι και ανατροφοδοτούν τη μονάδα ελέγχου προκειμένου αυτή με τη σειρά της να ελέγχει τις λειτουργίες της μηχανής. Οι σύγχρονες μηχανές έγχυσης διαθέτουν πληθώρα ψηφιακών υπολογιστικών συστημάτων τα οποία συνεπικουρούν τον έλεγχο της διεργασίας συνολικά μέσω κατάλληλου λογισμικού.

❖ Μονάδα έγχυσης ή Μονάδα πλαστικοποίησης (*Injection/Plasticating Unit*)

Οι κύριες λειτουργίες της μονάδας έγχυσης περιλαμβάνουν την *τήξη*, τη *μεταφορά*, τη *συσσώρευση* και την *έγχυση* του πολυμερούς δομικού υλικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, καθώς και τη σταδιακή ανάπτυξη πίεσης συγκράτησης στο υδαρές πολυμερές εντός της κοιλότητας (*packing pressure*). Σήμερα,

χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον είτε η μονάδα έγχυσης παλινδρομούντος κοχλία (*screw injection unit*) είτε η μονάδα έγχυσης εμβόλου (*plunger*).

Αναφορικά με τη λειτουργία της μονάδας του πρώτου τύπου (**Σχήμα 2-4**), ο ατέρμων κοχλίας περιστρέφεται και ταυτόχρονα μεταφέρει τήγμα πολυμερούς δομικού υλικού από τη χοάνη στην αιχμηρή απόληξή του. Τα πολυμερή δομικά υλικά τήκονται λόγω της θερμότητας που αναπτύσσεται τόσο από τις διατμητικές τάσεις (*shear stresses*) που συσσωρεύονται στο τήγμα λόγω της κίνησης του κοχλία όσο και από τους θερμαινόμενους ιμάντες που βρίσκονται εντός του *κυλίνδρου πλαστικοποίησης* διατεταγμένοι κατά μήκος του κοχλία και κάθετα ως προς αυτόν. Μόλις αυτή η φάση της *πλαστικοποίησης (barrel)* περατώνεται, ο κοχλίας σταματά να περιστρέφεται, μετακινείται προς τα εμπρός και, λειτουργώντας σαν έμβολο, ωθεί το πολυμερές τήγμα προς την έξοδο του κυλίνδρου πλαστικοποίησης ώστε να εγχυθεί ομοιόμορφα και με σταθερό ρυθμό εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλούπιού. Μάλιστα, για να διασφαλιστεί ότι το πολυμερές τήγμα δεν υποχωρεί προς τα πίσω υπάρχουν ειδικές *βαλβίδες ελέγχου ροής* στο άκρο του κοχλία ο οποίος μένει στην εμπρόσθια θέση του και διατηρεί την πίεση μέχρις ότου το πολυμερές τήγμα αρχίζει να στερεοποιείται στο καλούπι.



Σχήμα 2-4. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται αδρομερώς μια σύγχρονη τυπική μηχανή έγχυσης με μονάδα έγχυσης παλινδρομούντος κοχλία.

Απεναντίας, σε ό,τι αφορά τη λειτουργία της μονάδας του δεύτερου τύπου, μια προκαθορισμένη ποσότητα πολυμερούς εισέρχεται στον κύλινδρο πλαστικοποίησης μέσω της χοάνης τροφοδοσίας. Κατόπιν, το έμβολο ενεργοποιείται με υδραυλική πίεση και ωθεί το δομικό υλικό κατά μήκος του κυλίνδρου όπου θερμαίνεται και τήκεται υπό πίεση προκειμένου να εγχυθεί στο καλούπι. Για τη διευκόλυνση της τήξης των άτηκτων τμημάτων του, το πολυμερές ωθείται προς διέλευση από το λεπτό διάκενο μεταξύ διανομέα τύπου *τορπίλης* και κυλίνδρου. Εν συνεχεία, το πολυμερές τήγμα υπό την πίεση του εμβόλου περνά διαμέσου του ακροφυσίου και εγχύεται στο καλούπι. Να σημειωθεί ότι πρόκειται για τεχνολογία που προηγήθηκε της τεχνολογίας του παλινδρομούντος κοχλία και η οποία διακρίνεται για το μικρότερο κόστος εξοπλισμού.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να προστεθεί ότι είτε χρησιμοποιείται ο ένας τύπος μονάδας έγχυσης είτε ο άλλος, είναι εφικτό από διαφορετικές χοάνες να τροφοδοτηθούν συγχρόνως μέσα ενίσχυσης, χρώματα και λοιπά πρόσθετα. Στην περίπτωση αυτή, η μηχανή έγχυσης λειτουργεί και ως εξοπλισμός ανάμειξης. Ωστόσο, εξαιτίας του περιορισμένου μεγέθους των περισσότερων μηχανών έγχυσης (μικρό μήκος του κυλίνδρου πλαστικοποίησης) η ικανότητα τους ως προς την ανάμειξη είναι μικρή. Εξάλλου, αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πληρωτικά υλικά και λοιπά πρόσθετα αναμειγνύονται σε ξεχωριστή διαδικασία με τη χρήση εκβολέα ανάμειξης.

Μολαταύτα, εάν επιχειρηθεί η σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών τύπων μονάδας έγχυσης, εύκολα μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι μηχανές έγχυσης που διαθέτουν μονάδα έγχυσης παλινδρομούντος κοχλία πλεονεκτούν έναντι των αντιστοίχων που διαθέτουν μονάδα έγχυσης εμβόλου καθόσον διακρίνονται για :

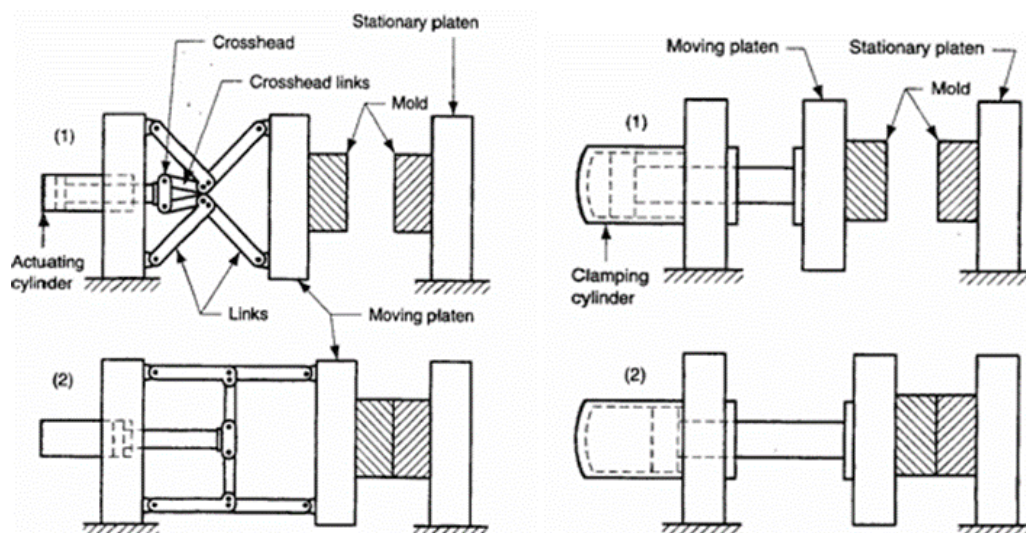
- ✓ την πιο ομοιόμορφη τήξη του πολυμερούς,
- ✓ την αποτελεσματικότερη ανάμειξη και διασπορά των προσθέτων στο πολυμερές τήγμα,
- ✓ τις χαμηλότερες πιέσεις έγχυσης,
- ✓ τις λιγότερες εσωτερικές παραμένουσες τάσεις (internal residual stresses) που αναπτύσσονται στα μορφοποιημένα αντικείμενα,
- ✓ τους συντομότερους κύκλους έγχυσης και
- ✓ το μεγαλύτερο εύρος στην ποσότητα έγχυσης σε σχέση με τη δυναμικότητα έγχυσης.

❖ Μονάδα καλουπιού ή απλά καλούπι (Mold Unit)

Περιλαμβάνει μια σειρά από επιμέρους εξαρτήματα τα οποία πρόκειται να αναλυθούν εκτενώς παρακάτω και συνιστά αναπόσπαστο κομμάτι της κατασκευαστικής διεργασίας καθότι προσδίδει στο παραγόμενο προϊόν έγχυσης την επιθυμητή μορφή του. Αδρομερώς, το καλούπι αποτελείται από δύο μέρη. Το ένα μέρος του καλουπιού (κινητή πλάκα) μπορεί να ολισθαίνει σε ράβδους από την κίνηση που παρέχει η μονάδα σύσφιξης είτε απευθείας μέσω υδραυλικού εμβόλου είτε μέσω υδραυλικού εμβόλου υποβοηθούμενο από αρθρωτούς βραχίονες. Το άλλο μέρος (σταθερή πλάκα) είναι ακλόνητο πάνω στη μηχανή έγχυσης. Με το κλείσιμο του καλουπιού ασκείται η απαραίτητη δύναμη σύσφιξης αναλογικά με το μέγεθος του καλουπιού και των τεμαχίων που αυτό παράγει ώστε να ασφαλιστεί και να στεγανοποιηθεί. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι το μέγεθος του καλουπιού δεν δύναται να έχει μεγαλύτερη επιφάνεια από αυτή που επιτρέπουν οι ράβδοι στήριξης της μηχανής έγχυσης.

❖ Μονάδα άσκησης πίεσης επί του κλειστικού συστήματος του καλουπιού ή αλλιώς Μονάδα σύσφιξης του καλουπιού (Clamping Unit)

Η μονάδα σύσφιξης του καλουπιού είναι είτε μηχανική (**Σχήμα 2-5**), είτε υδραυλική (**Σχήμα 2-5**), είτε και τα δύο και αποτελεί τη μεγαλύτερη μονάδα μιας μηχανής έγχυσης. Χρησιμοποιείται είτε για να ανοίγει είτε για να κλείνει το καλούπι όταν αυτό απαιτείται, αλλά και για να το διατηρεί κλειστό και ακλόνητο στη θέση του κόντρα στην πίεση έγχυσης που ασκείται κατά την κατασκευαστική διεργασία. Προφανώς, η ασκούμενη δύναμη εφαρμογής ανά επιφάνεια εφαρμογής του κλειστικού συστήματος του καλουπιού επιβάλλεται να είναι μεγαλύτερη της πίεσης έγχυσης (injection pressure) ώστε να μην υπάρχει διαρροή πολυμερούς δομικού υλικού στο επίπεδο διαχωρισμού των επιφανειών του καλουπιού, κάτι το οποίο θα οδηγήσει το παραγόμενο προϊόν έγχυσης σε αστοχία (δημιουργία προεκτάματος).



Σχήμα 2-5. Μηχανική μονάδα σύσφιξης (αριστερά) και υδραυλική μονάδα σύσφιξης (δεξιά) κατά το άνοιγμα (πάνω) και το κλείσιμο (κάτω) του καλουπιού.

Επισημαίνεται δε ότι οι πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την έγχυση του πολυμερούς τήγματος είναι της τάξεως των **200** έως **1200** bar. Κατά συνέπεια, οι πιέσεις αυτές είναι αναγκαίο να συνυπολογιστούν κατά τον σχεδιασμό ενός καλουπιού ώστε αφενός μεν να εφαρμοστεί η απαραίτητη δύναμη σύσφιξης της κινητής με τη σταθερή πλάκα του, αφετέρου δε να εξασφαλιστούν τα κατάλληλα πάχη αυτών των μεταλλικών πλακών προκειμένου να αντέξουν το φορτίο των δυνάμεων που τους ασκούνται.

2.3 Γενικά Περί των Πολυμερών Δομικών Υλικών

Αναντίρρητα, τα πολυμερή παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα μηχανικών ιδιοτήτων. Αναλόγως της επεξεργασίας που υφίστανται, τα πολυμερή μπορούν να είναι είτε μαλακά και ελαστικά είτε σκληρά και δύσκαμπτα. Σημειώνεται δε ότι η επεξεργασία τους αποτελεί σχετικά εύκολη και οικονομική διαδικασία. Άλλωστε, η πλειονότητα των πολυμερών μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία σε θερμοκρασιακό περιβάλλον κάτω των **400 °C**. Έτσι, είναι δυνατή η παραγωγή σύνθετων πλαστικών εξαρτημάτων χωρίς να απαιτείται η κατανάλωση υπερβολικής ενέργειας. Πέραν τούτου, κατά την επεξεργασία είναι δυνατή η προσθήκη πρόσθετων, όπως ενισχυτικά υλικά, πλαστικοποιητές, επιβραδυντές καύσης, χρωστικές, σταθεροποιητές κλπ, προκειμένου να τροποποιηθούν οι ιδιότητες του επεξεργαζόμενου υλικού και να βελτιωθούν οι επιδόσεις του τελικού προϊόντος.

Η πυκνότητα των πολυμερών δομικών υλικών κυμαίνεται από **0.8** έως **2.2** g / cm³. Με άλλα λόγια, τα πολυμερή είναι ελαφρύτερα σε σχέση με τα κοινά υλικά όπως οι χάλυβες και τα κεραμικά. Επομένως, το βάρος των πλαστικών τελικών προϊόντων γίνεται αυτομάτως μικρότερο εν συγκρίσει με το βάρος των μεταλλικών ή των κεραμικών τελικών προϊόντων. Επίσης, δεδομένου ότι πολλές κατηγορίες πολυμερών όπως τα θερμοπλαστικά μπορούν να τήκονται κατ' επανάληψη, καθίσταται δυνατή η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίησή τους. Προφανώς, κάτι τέτοιο συνεπάγεται τη μείωση του συσσωρευμένου όγκου των πλαστικών απορριμμάτων στο περιβάλλον.

Μεταξύ των άλλων, οι θερμικές και ηλεκτρικές αγωγιμότητες των πολυμερών είναι χαμηλές. Ως εκ τούτου, αυτές οι ιδιότητές τους τα αναδεικνύουν σε καλούς θερμικούς και ηλεκτρικούς μονωτές. Από την άλλη πλευρά, η κακή θερμική αγωγιμότητα των πολυμερών θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε κάποιες δυσκολίες στην έγχυση ή ελαττώματα στο μορφοποιημένο αντικείμενο, όπως μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου

(hot spots) ή σημάδια καύσης (burn marks). Επιπλέον, τα πολυμερή είναι αδρανή στα χημικά, πράγμα που σημαίνει ότι δεν είναι επιρρεπή σε τοξικές και διαβρωτικές ουσίες. Τούτο το χαρακτηριστικό είναι ο λόγος για τον οποίο τα πολυμερή χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην παραγωγή δοχείων όπου μπορούν να αποθηκεύονται άκρως επικίνδυνες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον χημικές ουσίες (π.χ. απολυμαντικά, απορρυπαντικά, βαφές, παράγωγα πετρελαίου κλπ).

Οπωσδήποτε, το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό επηρεάζει διαφορετικά την κατασκευαστική διεργασία injection molding. Συγκεκριμένα, ο τύπος του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου πολυμερούς ενίοτε επιβάλλει επιμέρους σχεδιαστικές τροποποιήσεις τόσο στο προς μορφοποίηση αντικείμενο όσο και στο αντίστοιχο καλούπι. Οι δυνατότητες δε που χαρακτηρίζουν το υλικό αναφορικά με το μήκος ροής είναι εκείνες που μεταβάλουν τον αριθμό και τη θέση των πυλών εισόδου στο καλούπι. Είναι προφανές ότι τα φυσικά μεγέθη που παραμετροποιούν την κατασκευαστική διεργασία (χρόνος πλήρωσης, χρόνος συμπίεσης, χρόνος ψύξης, θερμοκρασία τήγματος, θερμοκρασία καλουπιού κλπ) ποικίλουν αναλόγως του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς. Κάνοντας μία σύνοψη, στον κάτωθι **Πίνακα 2-1** παρατίθενται τα συνηθέστερα πολυμερή δομικά υλικά που συναντώνται στη βιομηχανική παραγωγή και χρησιμοποιούνται ευρέως στην τεχνολογία παραγωγής injection molding, τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα καθενός εξ αυτών, καθώς και τα προϊόντα έγχυσης που μπορούν να παραχθούν αναλόγως του υλικού που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Πίνακας 2-1. Συνοπτική παράθεση των συνηθέστερων πολυμερών δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία παραγωγής injection molding, των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων αυτών, καθώς και των κοινών προϊόντων έγχυσης που παράγονται με τη χρήση των υλικών αυτών.

Πολυμερές δομικό υλικό	Χαρακτηριστικά γνωρίσματα	Παραγόμενα προϊόντα έγχυσης
Πολυοξυμεθυλένιο (POM)	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή σκληρότητα Φυσική – αδιαφανής λευκότητα Χαμηλό – μεσαίο κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Γρανάζια ✓ Ρουλεμάν ✓ Βρύσες ✓ Βαλβίδες αερολυμάτων (aérosol)
Πολυμεθακρυλικός μεθυλεστέρας (PMMA)	<ul style="list-style-type: none"> • Διαύγεια • Ευθραυστότητα • Χαμηλό – μεσαίο κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Φακοί ✓ Ανακλαστήρες ✓ Περιβλήματα φωτισμού αυτοκινήτων
Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρένιο (ABS)	<ul style="list-style-type: none"> • Σκληρότητα • Αδιαφάνεια • Χαμηλό – μεσαίο κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ακουστικά τηλεφώνων ✓ Περιβλήματα ηλεκτρικών σκουπών
(CA)	<ul style="list-style-type: none"> • Διαύγεια • Σκληρότητα • Ευελιξία έως ακαμψία • Υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Κουφώματα ✓ Λαβές κατσαβιδιών

Πολυμερές δομικό υλικό	Χαρακτηριστικά γνωρίσματα	Παραγόμενα προϊόντα έγχυσης
Νάιλον 6 (PA6)	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή σκληρότητα Σχεδόν αδιαφανής λευκότητα Μεσαίο – υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Θήκες ✓ Ρουλεμάν ✓ Κουρτινόξυλα ✓ Χτένες
Νάιλον 66 (PA66)	<ul style="list-style-type: none"> Ακαμψία Σκληρότητα Σχεδόν αδιαφανής λευκότητα Μεσαίο – υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Μοχλοί ✓ Περιβλήματα ✓ Λαβές
Νάιλον 11 & Νάιλον 12 (PA11 & PA12)	<ul style="list-style-type: none"> Ακαμψία Σκληρότητα Αδιαφάνεια έως διαύγεια Πολύ υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Φίλτρα αέρος ✓ Μάσκες ασφαλείας ✓ Πλαίσια γυαλιών
Τερεφθαλικό πολυβουτυλένιο & Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PBT & PET)	<ul style="list-style-type: none"> Ακαμψία Ευστάθεια Μεσαίο – υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ηλεκτρικές πρίζες ✓ Περιβλήματα εξαρτημάτων
Πολυανθρακικό (PC)	<ul style="list-style-type: none"> Διαύγεια Υψηλή σκληρότητα Ανθεκτικότητα Υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Φωτιστικά οδών & αυτοκινητοδρόμων ✓ Κράνη ασφαλείας
Χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (LDPE)	<ul style="list-style-type: none"> Σκληρότητα Ευκαμψία Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Κουζινικά σκεύη ✓ Καλύμματα σφράγισης ✓ Πώματα
Υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE)	<ul style="list-style-type: none"> Ακαμψία Σκληρότητα Αδιαφανής λευκότητα Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Καθίσματα / Καρέκλες ✓ Κιβώτια γάλακτος
Πολυαιθεροσουλφόνη (PES)	<ul style="list-style-type: none"> Σκληρότητα Πολύ υψηλή ανθεκτικότητα στις χημικές ουσίες Πολύ υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Βαλβίδες επένδυσης

Πολυμερές δομικό υλικό	Χαρακτηριστικά γνωρίσματα	Παραγόμενα προϊόντα έγχυσης
Πολυπροπυλένιο (PP)	<ul style="list-style-type: none"> • Ακαμψία • Σκληρότητα • Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Κιβώτια μπίρας ✓ Χειρολαβές
Οξειδίο Πολυφαινυλενίου (PPO)	<ul style="list-style-type: none"> • Σκληρότητα • Ευστάθεια • Υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ηλεκτρικά εξαρτήματα που απαιτούν αυστηρές ανοχές
Σουλφίδιο Πολυφαινυλενίου (PPS)	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύ καλή θερμική μόνωση • Πολύ υψηλή μηχανική αντοχή • Πολύ υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Εξαρτήματα για συστήματα καυσίμων ✓ Ρουλεμάν
Πολυστυρένιο γενικού σκοπού (GPPS)	<ul style="list-style-type: none"> • Διαύγεια • Ευθραυστότητα • Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Συσκευασίες καλλυντικών ✓ Περιβλήματα στυλογράφων
Πολυστυρένιο υψηλής πίεσεως (HIPS)	<ul style="list-style-type: none"> • Διαύγεια • Σκληρότητα • Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Δοχεία τροφίμων ✓ Καρούλια κλωστοϋφαντουργίας (cotton reels) ✓ Παιχνίδια ✓ Διάφοροι εξοπλισμοί
Πολυβινυλοχλωρίδιο μη πλαστικοποιημένο (UPVC)	<ul style="list-style-type: none"> • Σκληρότητα • Διαύγεια έως αδιαφάνεια • Ακαμψία • Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Εξαρτήματα εξωτερικών εφαρμογών (υδρορροές, αποχετεύσεις κλπ)
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	<ul style="list-style-type: none"> • Σκληρότητα • Διαύγεια έως αδιαφάνεια • Ευκαμψία • Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Πέλματα (σόλες) υποδημάτων ✓ Ηλεκτρικά μονωμένα μέρη
Στυρένιο – Ακρυλονιτρίλιο (SAN)	<ul style="list-style-type: none"> • Διαύγεια • Ευθραυστότητα • Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Εξοπλισμός πικνίκ (καρέκλες, τραπέζια κλπ)
Θερμοπλαστικά ελαστομερή (TPE & TPR)	<ul style="list-style-type: none"> • Σκληρότητα • Ευκαμψία • Υψηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ηλεκτρικά μονωμένα μέρη ✓ Καπάκια

2.3.1 Θερμοσκληραινόμενα, Θερμοπλαστικά και Ελαστομερή Πολυμερή

Τα πολυμερή μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με διάφορα κριτήρια. Όταν αυτά κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τη χημική τους δομή, τότε διακρίνονται τρεις κατηγορίες πολυμερών : τα *θερμοσκληραινόμενα* (*thermoset*), τα *ελαστομερή* (*elastomers*) και τα *θερμοπλαστικά* (*thermoplastics*).

Αφενός, θερμοσκληραινόμενα καλούνται εκείνα τα πολυμερή δομικά υλικά που έχουν ισχυρή πλεγματική μοριακή δομή και γι' αυτό αδυνατούν να επανατηχθούν αφού στερεοποιηθούν. Τα δε ελαστομερή είναι εκείνα τα πολυμερή δομικά υλικά τα οποία εμφανίζουν ελαφρώς πλεγματική μοριακή δομή με ασθενείς διαμοριακές δυνάμεις και διαθέτουν ιξωδοελαστικότητα (*viscoelasticity*). Αυτή η μοριακή δομή των ελαστομερών σε συνδυασμό με την ιξωδοελαστικότητά τους επιτρέπουν σχεδόν την πλήρη έκταση των μορίων τους. Μολονότι τα ελαστομερή δεν δύνανται να τηχθούν εκ νέου ή να διαλυθούν σε διαλύτες εφόσον έχουν υποστεί βουλκανισμό, εντούτοις είναι εφικτό να διογκωθούν σε οργανικούς διαλύτες.

Αφετέρου, θερμοπλαστικά (από το «θερμός» = θερμότητα και «πλαστικό» = διαμορφώσιμο) καλούνται εκείνα τα πολυμερή που δεν έχουν καθόλου πλεγματική μοριακή δομή και γι' αυτό μπορούν να τήκονται κατ' επανάληψη σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και να διαλύονται σε πολλούς διαλύτες. Οι μοριακές αλυσίδες στα θερμοπλαστικά συγκρατούνται μεταξύ τους με διαμοριακές δυνάμεις και φυσικές αναμειξεις. Σίγουρα, αυτές οι μάλλον ασθενείς δυνάμεις συγκόλλησης υπερνικούνται κατά τη θέρμανση των υλικών αυτών. Επομένως, τα θερμοπλαστικά έχουν την ικανότητα να ρέουν καθώς οι μοριακές αλυσίδες σπάνε οπότε τα μόρια καταφέρνουν να ολισθαίνουν μεταξύ τους με ευκολία. Βέβαια, επειδή οι διαμοριακές δυνάμεις εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως ο τύπος και ο αριθμός των κλάδων ή των πλευρικών αλυσίδων, οι μηχανικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών ποικίλλουν από μία μαλακή και όλκιμη σε μία σκληρή και ψαθυρή κατάσταση σε θερμοκρασία δωματίου.

2.3.2 Κρυσταλλικά και Μη Κρυσταλλικά Πολυμερή

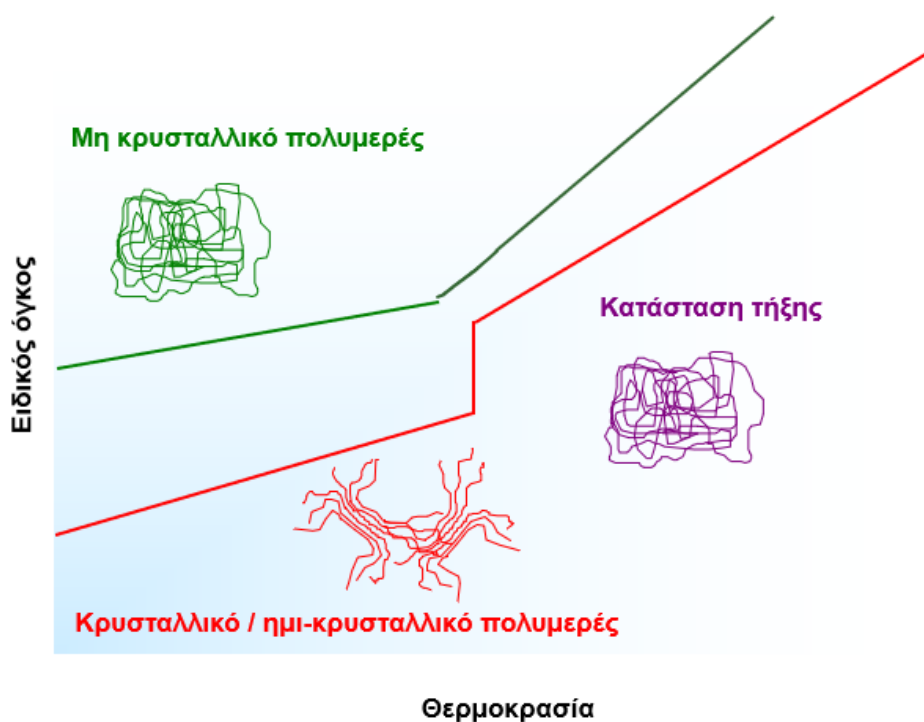
Ως προς τη μικροδομή, τα θερμοπλαστικά μπορούν περαιτέρω να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες : τα *μη κρυσταλλικά* (*non-crystalline*) ή *άμορφα* (*amorphous*) και τα *κρυσταλλικά* (*crystalline*) θερμοπλαστικά.

Από τη μία πλευρά, τα άμορφα θερμοπλαστικά, όπως το πολυστυρένιο (PS) ή ο πολυμεθακρυλικός μεθυλεστέρας (PMMA), είναι μη δομημένα και δεν έχουν σημαντικό σημείο τήξης. Αφενός, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του άμορφου πολυμερούς υπό σταθερή πίεση, προκαλείται δόνηση στα μόριά του η οποία αναγκάζει το πολυμερές να γίνει πιο μαλακό και πιο όλκιμο. Με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του, το πολυμερές υπερβαίνει τη θερμοκρασία ροής και εισέρχεται στην κατάσταση τήξης (**Σχήμα 2-6**). Εν πάσει περιπτώσει, τα άμορφα πολυμερή δεν έχουν ξεχωριστό σημείο τήξης αλλά μαλακώνουν και παρουσιάζουν μεταβολή στον ειδικό όγκο τους εντός μιας περιοχής θερμοκρασιών. Αφετέρου, μειώνοντας τη θερμοκρασία του άμορφου θερμοπλαστικού και δεδομένου ότι απουσιάζουν οι αυστηρά διατεταγμένες μοριακές αλυσίδες, η μικροδομή του υλικού δεν μεταβάλλεται με την αλλαγή φάσης και η τάση επαναφοράς των μορίων στην αρχική τους κατάσταση είναι μικρή. Κατά συνέπεια, η συρρίκνωση του υλικού, ήτοι η διαφορά στον ειδικό όγκο μεταξύ της υγρής και της στερεής φάσης του, είναι επίσης μικρή. Γενικά, η γραμμική συρρίκνωση και η ογκομετρική συρρίκνωση των άμορφων πολυμερών κυμαίνεται από **0.5** έως **0.8** % και από **0.4** έως **0.6** % αντίστοιχα.

Από την άλλη πλευρά, τα μόρια των κρυσταλλικών / ημι-κρυσταλλικών θερμοπλαστικών, όπως το πολυαιθυλένιο (PE) ή το πολυπροπυλένιο (PP), έχουν ενσωματωμένη αρκετή κινητικότητα και ευελιξία στη χημική τους δομή ώστε να σχηματίζουν καθορισμένες και όχι

τυχαίες μοριακές διατάξεις. Η δε κινητικότητα των μοριακών αλυσίδων συνεχίζει να αυξάνεται με τη θέρμανση του πολυμερούς υπό σταθερή πίεση. Συγκεκριμένα, τα μόρια στις άμορφες περιοχές είναι τα πρώτα που μετατοπίζονται, ενώ με την υπέρβαση της θερμοκρασίας τήξης του κρυσταλλίτη, οι διαμοριακές δυνάμεις εντός των κρυσταλλικών περιοχών αδυνατούν πλέον να εμποδίσουν την ολίσθηση ολόκληρων των μοριακών αλυσίδων. Έτσι, οι κρυσταλλικές περιοχές αρχίζουν σιγά - σιγά να τήκονται και να προκαλούν μια βηματική μεταβολή στον ειδικό όγκο καθώς οι δομημένες μοριακές δομές έχουν πλέον καταστραφεί (**Σχήμα 2-6**). Σε καμία περίπτωση η εν λόγω μεταβολή δεν επηρεάζει τη μάζα του πολυμερούς η οποία παραμένει αμετάβλητη.

Ωστόσο, με την ψύξη του κρυσταλλικού / ημι-κρυσταλλικού θερμοπλαστικού κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης, τα μόρια του υλικού οργανώνονται με τρόπο πιο ομαλό σχηματίζοντας κρυσταλλίτες, δηλαδή ισχυρές κρυσταλλικές δομές. Καθώς οι μοριακές αλυσίδες του πολυμερούς κατά μήκος της ροής του τήγματος είναι ήδη περισσότερο εκτεταμένες, η τάση επαναφοράς στην αρχική τους κατάσταση κατά την ψύξη του υλικού γίνεται δικαιολογημένα μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό οδηγεί το πολυμερές σε αύξηση της πυκνότητάς του και κατ' επέκταση σε ανισότροπη συρρίκνωση, μεγαλύτερη κατά την κατεύθυνση της ροής του τήγματος και μικρότερη στην κατεύθυνση ούσα κάθετη στη ροή. Γενικά, τόσο η γραμμική όσο και η ογκομετρική συρρίκνωση των μη πληρωμένων κρυσταλλικών / ημι-κρυσταλλικών πολυμερών μπορεί να είναι έως και πέντε φορές μεγαλύτερες από εκείνες των μη πληρωμένων άμορφων πολυμερών ακριβώς λόγω της κρυστάλλωσης των πρώτων που οδηγεί σε μεγάλη μείωση του ειδικού όγκου τους. Λόγου χάρη, η συρρίκνωση του κρυσταλλικού πολυαιθυλενίου (PE) είναι **2 %**, ενώ η συρρίκνωση του μη κρυσταλλικού πολυστυρενίου (PS) είναι **0.6 %**.



Σχήμα 2-6. Συμπεριφορά μη κρυσταλλικών και κρυσταλλικών / ημι-κρυσταλλικών πολυμερών δομικών υλικών κατά τη θέρμανσή τους και τη μετάβασή τους από την στερεή κατάσταση στην κατάσταση τήξης.

Συμπερασματικά, δεδομένου ότι η μικροδομή των διαφορετικών πολυμερών δομικών υλικών δεν είναι πάντα η ίδια, κάθε πολυμερές επιδεικνύει διαφορετική συμπεριφορά ως προς τις ογκομετρικές ιδιότητές του (PVT properties). Επί παραδείγματι, σε κανονικές

συνθήκες, ο ειδικός όγκος (όγκος ανά μονάδα βάρους πολυμερούς ή αντίστροφη πυκνότητα πολυμερούς) τόσο των κρυσταλλικών ή ημι-κρυσταλλικών όσο και των μη κρυσταλλικών πολυμερών θα πρέπει να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της θερμικής διαστολής υπό ισοβαρείς συνθήκες. Αντιθέτως, ο ειδικός όγκος αυτών θα πρέπει να μειώνεται με την αύξηση της πίεσης λόγω της επίδρασης της συμπιεστότητας υπό ισοθερμική κατάσταση.

2.3.3 Ρεολογικές Ιδιότητες των Πολυμερών

Μία από τις σημαντικότερες ρεολογικές ιδιότητες των πολυμερών δομικών υλικών είναι το ιξώδες (viscosity) ή αλλιώς η επιφανειακή τάση, που ορίζεται ως ένα μέτρο αντίστασης του ρευστού πολυμερούς στη ροή ή στην παραμόρφωσή του υπό εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Το ιξώδες μετριέται με ιξωδόμετρα με τα πιο συνηθισμένα όργανα μέτρησης να είναι το *τριχοειδές ιξωδόμετρο* (για μέτρια έως υψηλή ταχύτητα διάτμησης) και τα *περιστροφικά ροόμετρα* (για χαμηλό εύρος διακύμανσης της ταχύτητας διάτμησης). Η ιδιότητα του ιξώδους είναι αναμφισβήτητα κρίσιμη για το μοτίβο πλήρωσης (filling pattern). Και αυτό γιατί η διαφορά κάθε πολυμερούς ως προς την ευαισθησία του ρευστού στο ρυθμό διάτμησης και στη θερμοκρασία οδηγεί σε διαφορετικό επίπεδο αντίστασης του ρευστού στη ροή, επηρεάζοντας έτσι τον τρόπο πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

2.3.4 Θερμικές Ιδιότητες των Πολυμερών

Οι σημαντικότερες εκ των θερμικών ιδιοτήτων των πολυμερών δομικών υλικών είναι οι ακόλουθες :

- *Θερμική αγωγιμότητα (Thermal conductivity)*

Πρόκειται για ένα μέτρο του ρυθμού μετάδοσης της θερμικής ενέργειας από περιοχές υψηλής θερμοκρασίας σε περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας με ατομική ή μοριακή διέγερση. Με άλλα λόγια, αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας του υλικού να μεταδίδει θερμότητα με αγωγή από υψηλή σε χαμηλή θερμοκρασία. Σχετίζεται στενά με τη μικροδομή του υλικού και επηρεάζεται από μια σειρά φυσικών ιδιοτήτων αυτού όπως η κρυσταλλικότητα, η πυκνότητα, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, το μοριακό βάρος, κλπ. Σε κάθε περίπτωση, η θερμική αγωγιμότητα είναι μια βασική παράμετρος για την πρόβλεψη του ρυθμού ροής της θερμότητας και της κατανομής της θερμοκρασίας.

Γενικά, τα πολυμερή έχουν χαμηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας και επομένως είναι καλοί θερμικοί μονωτές. Άλλωστε, στα πλαστικά εξαρτήματα εμφανίζονται μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) εξαιτίας αυτής της κακής θερμικής αγωγιμότητας των πολυμερών. Για την ακρίβεια, η θερμική αγωγιμότητα των πολυμερών είναι περίπου **300** έως **1000** φορές χαμηλότερη από αυτή των μετάλλων, αν και μπορεί να αυξηθεί κατά βούληση με την ενσωμάτωση μεταλλικών πρόσθετων. Τα κρυσταλλικά και ημι-κρυσταλλικά πολυμερή παρουσιάζουν κάπως υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα άμορφα πολυμερή λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας και της μικρότερης απόστασης μεταξύ των μορίων τους.

Σημειωτέον ότι η θερμοκρασία δεν έχει σχεδόν καμία επίδραση στη θερμική αγωγιμότητα των άμορφων πολυμερών. Από την άλλη πλευρά, η θερμική αγωγιμότητα των κρυσταλλικών / ημι-κρυσταλλικών πολυμερών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι το σημείο τήξης και είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία στην κατάσταση τήξης. Για τα περισσότερα πολυμερή δε, η θερμική αγωγιμότητα σπάνια αλλάζει κατά περισσότερο από **10 %** από **0** έως **100 °C** και μπορεί να θεωρηθεί ως μια σταθερά στην περιοχή επεξεργασίας.

- *Ειδική θερμότητα – Θερμοχωρητικότητα (Specific heat – Heat capacity)*

Ως ειδική θερμότητα ορίζεται η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας της μονάδας μάζας του υλικού κατά 1°C ή 1 K . Μικροσκοπικά, η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για την επίτευξη συγκεκριμένης αύξησης της θερμοκρασίας εξαρτάται από δονητικές και περιστροφικές κινήσεις διεγερμένες μέσα στο υλικό. Επομένως, η ειδική θερμότητα καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη χημική δομή και όχι από τη μικροδομή, ενώ δεν παρατηρείται ευρεία διακύμανσή της μεταξύ των πολυμερών. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ειδική θερμότητα δεν είναι τίποτε άλλο πέρα από το μέτρο της θερμικής απόκρισης του υλικού στην εφαρμοζόμενη θερμική ενέργεια. Τα περισσότερα θερμοπλαστικά έχουν μεγαλύτερες τιμές ειδικής θερμότητας, ήτοι απαιτούν μεγαλύτερη ποσότητα θερμικής ενέργειας προκειμένου να αυξήσουν τη θερμοκρασία τους.

Γενικά, η θερμοχωρητικότητα των άμορφων πολυμερών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αντιθέτως, τα κρυσταλλικά / ημι-κρυσταλλικά πολυμερή παρουσιάζουν ασυνέχεια στην ειδική θερμότητα στο σημείο τήξης. Και αυτό γιατί αφενός μεν απαιτείται μια επιπλέον λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης για την τήξη των μεμονωμένων κρυσταλλιτών, αφετέρου δε η θερμοκρασία παραμένει αμετάβλητη κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης.

- *Συντελεστής θερμικής διαστολής (Thermal expansion coefficient)*

Προσδιορίζει τη θερμική διαστολή του μήκους ανά μονάδα αύξησης της θερμοκρασίας.

- *Θερμική διάχυση (Thermal diffusion)*

Πρόκειται για μια παράμετρο που προσδιορίζεται από την θερμική αγωγιμότητα, την ειδική θερμότητα και την πυκνότητα του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού και είναι σημαντική για τον υπολογισμό της ψύξης του.

- *Θερμοκρασίες μετάβασης (Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και σημείο τήξης)*

Πρόκειται για χαρακτηριστικά σημεία των μεταβάσεων φάσης.

Συγκεκριλαιωτικά, όλες οι παραπάνω ιδιότητες αποτελούν εξίσου σημαντικές παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν τα οικονομικά της επεξεργασίας των πολυμερών δομικών υλικών. Και αυτό διότι κάθε παράμετρος επιδρά καθοριστικά στις απαιτήσεις που υπάρχουν τόσο για τη θέρμανση όσο και για την ψύξη των υλικών στα πλαίσια της κατασκευαστικής διεργασίας injection molding.

2.3.5 Μηχανικές Ιδιότητες των Πολυμερών

Το μέτρο ελαστικότητας, δηλαδή το μέτρο του Young, ορίζεται ως ο λόγος της τάσης εφελκυσμού προς την παραμόρφωση εφελκυσμού σε μια δοκιμή εφελκυσμού στην οποία ένα δοκίμιο επιμηκύνεται προς μία κατεύθυνση (Εξ. (1-2)). Αφενός μεν η τάση εφελκυσμού ορίζεται ως η δύναμη εφελκυσμού ανά μονάδα επιφάνειας εγκάρσιας διατομής, αφετέρου δε η εφελκυστική παραμόρφωση ορίζεται ως η επιμήκης μετατόπιση του αρχικού μήκους του δοκιμίου. Τονίζεται ότι η παραμόρφωση είναι αδιάστατη από τον ορισμό της. Επομένως, η μονάδα του μέτρου ελαστικότητας είναι η ίδια με εκείνη της τάσης εφελκυσμού, δηλαδή σε όρους δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας. Το μέτρο ελαστικότητας είναι ένα μέτρο της ακαμψίας του υλικού. Εν ολίγοις, όσο υψηλότερη είναι η

τιμή του, τόσο πιο ανθεκτικό είναι το υλικό που πρόκειται να υποστεί εφελκυσμό. Γενικά, η μεγάλη τιμή του μέτρου ελαστικότητας υποδεικνύει ότι το υλικό είναι άκαμπτο και αντέχει στην επιμήκυνση (παραμόρφωση).

$$Y = (F / A_0) / (\Delta L / L_0) \quad (1-2)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται στην περιοχή ελαστικής παραμόρφωσης, δηλαδή εκεί όπου η σχέση τάσης - παραμόρφωσης είναι γραμμική και μπορεί να περιγραφεί από το νόμο του Hooke. Βέβαια, εάν η εξωτερική φόρτιση εφαρμόζεται συνεχώς στο δοκίμιο, τότε προκύπτει σημείο απόκλισης από όπου η παραμόρφωση αρχίζει πλέον να γίνεται πλαστική. Η πλαστική παραμόρφωση συνεπάγεται τη δημιουργία λαιμού (necking), ήτοι μια στένωση μικρότερης διατομής σε μια περιοχή του καταπονούμενου δοκιμίου, που οδηγεί τελικά το δοκίμιο σε αστοχία εφόσον η εξωτερική τάση εξακολουθεί να ασκείται επ' αυτού.

Σε ότι αφορά τα πολυμερή δομικά υλικά, σε γενικές γραμμές, αυτά είναι μη γραμμικά. Τούτο σημαίνει ότι η κλίση της καμπύλης στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δύναται να μεταβάλλεται ως προς το επίπεδο της τάσης ή της παραμόρφωσης και τον ρυθμό εξέτασης. Η δε ιξωδοελαστική απόκριση του εκάστοτε πολυμερούς περιπλέκει περαιτέρω τη μηχανική συμπεριφορά του.

Επιπλέον, όταν ένα φορτίο εφελκυσμού εφαρμόζεται σε ένα αξονοσυμμετρικό δοκίμιο, η ράβδος αλλάζει στην αξονική διάσταση x καθώς και στις πλευρικές μη αξονικές διαστάσεις y και z . Οι αναλογίες της πλευρικής παραμόρφωσης προς την αξονική παραμόρφωση ορίζουν τους λόγους Poisson. Το αρνητικό πρόσημο στον ορισμό υποδηλώνει ότι οι πλευρικές παραμορφώσεις είναι αντίθετες προς την κατεύθυνση των αξονικών παραμορφώσεων. Μάλιστα, εάν το υλικό είναι ισότροπο, δηλαδή με ελαστικές ιδιότητες ίσες προς όλες τις κατευθύνσεις (όπως στην περίπτωση του μη πληρωμένου πολυμερούς), οι λόγοι Poisson είναι ίσοι. Διαφορετικά, όπως και στις περιπτώσεις ενισχυμένων πολυμερών με ίνες, πρέπει να μετρηθούν οι κύριες και οι δευτερεύουσες αναλογίες Poisson.

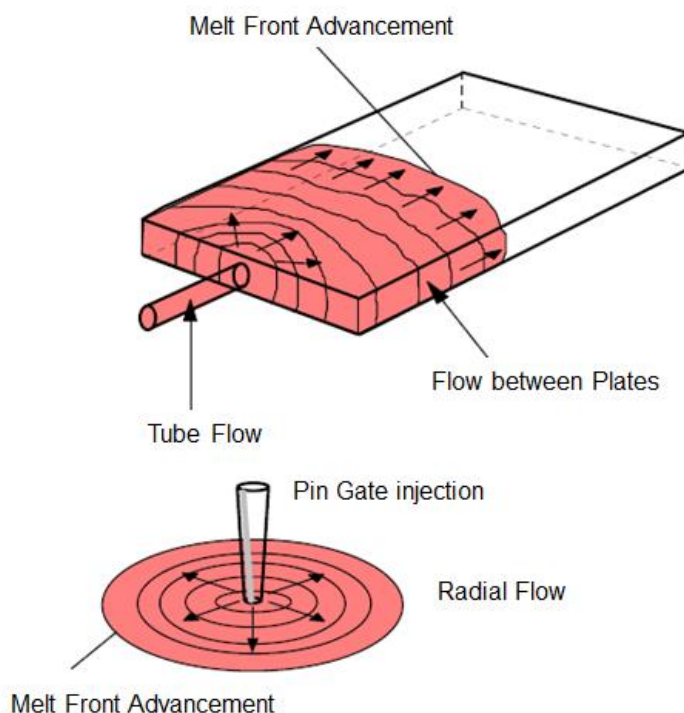
Με λίγα λόγια, ο λόγος Poisson είναι λόγος καταπόνησης και επομένως είναι αδιάστατος. Για ιδανικό ελαστικό υλικό ο λόγος Poisson ισούται με **0.25**. Εάν είναι μηδενικός, τότε δεν παρατηρείται πλευρική συστολή κατά την αξονική τάνυση. Συνοψίζοντας, ο λόγος Poisson αποτελεί μια μηχανική ιδιότητα που σχετίζεται τόσο με τις τιμές ελαστικής παραμόρφωσης και διατμητικής ισχύος όσο και με την αξιολόγηση της ογκομετρικής συρρίκνωσης του χυτευμένου πολυμερούς εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

2.4 Παράμετροι Σχεδιασμού Τελικού Προϊόντος Έγχυσης – Καλουπιού

Αποτελεί κοινό τόπο ότι ο βαθμός δυσκολίας στη σχεδίαση ενός προϊόντος αυξάνει αναλογικά με το πλήθος των παραμέτρων που πρέπει να συνυπολογίσει ο μηχανικός ώστε αυτό το οποίο δημιουργεί εικονικά να είναι, εν τέλει, απολύτως κατασκευάσιμο σε πραγματικό χρόνο. Άλλωστε, οι συνήθεις παράμετροι που λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν κατά τη σχεδίαση ενός προϊόντος είναι η *λειτουργικότητά* του, η *χρηστικότητά* του, οι *διαστάσεις* του ομού μετά των *ανοχών* του, η *αισθητική* του, το *συνολικό κόστος* του (κόστη σχεδίασης και παραγωγής) και το *οικολογικό αποτύπωμά* του. Εφόσον, βέβαια, κάποιο προϊόν πρόκειται να παραχθεί μέσω της τεχνολογίας παραγωγής injection molding, ο μηχανικός χρειάζεται επιπλέον να ενσωματώσει στη σχεδίαση του προϊόντος το υλικό κατασκευής του και, φυσικά, να χτίσει κατάλληλα το καλούπι του.

Δε χωρά καμία αμφιβολία ότι ο σχεδιασμός τόσο του προϊόντος έγχυσης όσο και του καλουπιού του επηρεάζουν πολλές παραμέτρους της κατασκευαστικής διεργασίας

injection molding όπως, για παράδειγμα, το *μοτίβο πλήρωσης (filling pattern)*, δηλαδή την κίνηση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού κατά το γέμισμα αυτής με υλικό (**Σχήμα 2-7**). Επομένως, ο προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων σχεδιασμού σε κάθε περίπτωση μπορεί να διευκολύνει την κατασκευαστική διεργασία και να βελτιώσει την παραγωγικότητα και την ποιότητα ενώ, παράλληλα, συμβάλλει στον σημαντικό περιορισμό του κόστους.



Σχήμα 2-7. Βασιζόμενο στη γεωμετρία και τη μεταβλητότητα του πάχους των τοιχωμάτων του εκάστοτε προϊόντος έγχυσης, το μοτίβο ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του αντίστοιχου καλουπιού ποικίλει. Γενικά, διακρίνονται δύο μοτίβα πλήρωσης : η *ροή μεταξύ πλακών* (πάνω) και η *ακτινική ροή* (κάτω). Προφανώς, η θέση της τροφοδοσίας επιδρά σημαντικά στον τρόπο με τον οποίο το πολυμερές τήγμα γεμίζει την κοιλότητα μορφοποίησης ενός καλουπιού. Αυτός είναι άλλωστε ο λόγος που ο καθορισμός της θέσης της τροφοδοσίας επιβάλλεται να είναι ο καλύτερος δυνατός, αν όχι ο βέλτιστος.

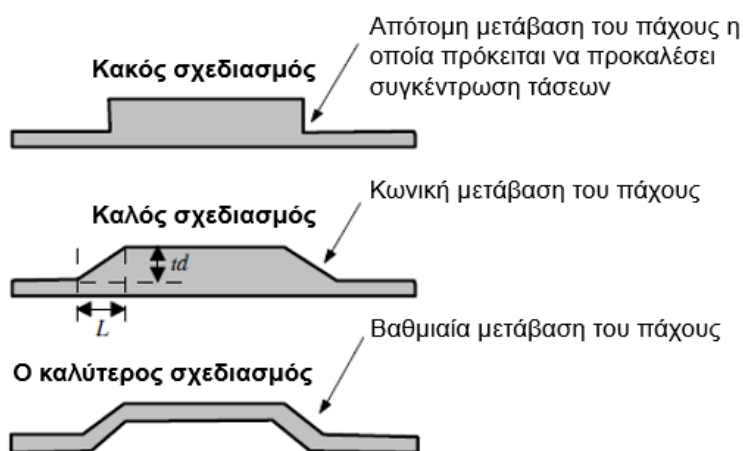
2.4.1 Σχεδιασμός του Τελικού Προϊόντος Έγχυσης

Ο σχεδιασμός του τελικού προϊόντος έγχυσης αποτελεί ένα από τα σημαντικά στάδια της κατασκευαστικής διεργασίας injection molding. Για τα τελικά προϊόντα έγχυσης, η σχεδίαση σχετίζεται άμεσα με τα πάχη των τοιχωμάτων τους. Κατά κοινή αναγνώριση, όταν σχεδιάζεται ή αναπτύσσεται οιοδήποτε προϊόν έγχυσης, ο μηχανικός επιζητά πάντα την εξασφάλιση της ομοιομορφίας του πάχους των τοιχωμάτων του προσβλέποντας στην καλύτερη δυνατή ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Για του λόγου το αληθές, εξετάζοντας προσεκτικά ένα τυχαίο προϊόν έγχυσης σε τρεις διαφορετικές σχεδιαστικές εκδοχές (**Σχήμα 2-8**), παρατηρείται ότι η αρχική σχεδίασή του (**Σχήμα 2-8** – πάνω) δεν είναι η ενδεδειγμένη δεδομένου ότι παρουσιάζει μια απότομη και ξαφνική μείωση του πάχους στο μέσον του. Αυτή η απότομη μείωση του πάχους ενέχει σοβαρό κίνδυνο συρρίκνωσης του υλικού σε εκείνες τις περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου που βρίσκονται πλησιέστερα σε αυτή τη μεταβολή. Σε κάθε περίπτωση, όταν

ένα προϊόν έγχυσης φέρει περιοχές μεταβλητού πάχους, οι φάσεις πλήρωσης, συμπίεσης, ανάπτυξης πίεσης συγκράτησης και ψύξης επηρεάζονται άμεσα. Φυσικά, το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να οδηγείται σε μη ομαλή στρέβλωση λόγω της ανομοιογενούς ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς δομικού υλικού στο σύνολό του.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η διατήρηση της ομοιογένειας του πάχους των προϊόντων έγχυσης σε όλη την έκτασή τους (**Σχήμα 2-8** – κάτω) είναι κάτι που επιδιώκεται πάντα. Ενίοτε, ωστόσο, είναι πολύ δύσκολο να αποφευχθεί εξ ολοκλήρου η ανομοιομορφία στα πάχη των τοιχωμάτων ενός προϊόντος έγχυσης εξαιτίας των περιορισμών που επιβάλλουν οι διάφορες απαιτήσεις ως προς τη γενική εμφάνισή του. Στην προκειμένη περίπτωση, εντούτοις, κρίνεται επιτακτικός ο εναλλακτικός σχεδιασμός του εξαρτήματος, όπως για παράδειγμα η κωνική μετάβαση από τα παχύτερα στα λεπτότερα τοιχώματά του (**Σχήμα 2-8** – μέσον), ούτως ώστε να μεταβληθεί το αρχικό σχέδιο και να αμβλυνθούν οι επιπτώσεις που απορρέουν από τις απότομες μειώσεις του πάχους των τοιχωμάτων του.



Σχήμα 2-8. Σκαριφηματική απόδοση του κακού, του καλού και του καλύτερου σχεδιαστικού σεναρίου ενός προϊόντος έγχυσης για την αποφυγή πρόκλησης μη ομαλής στρέβλωσης στο τελικό προϊόν.

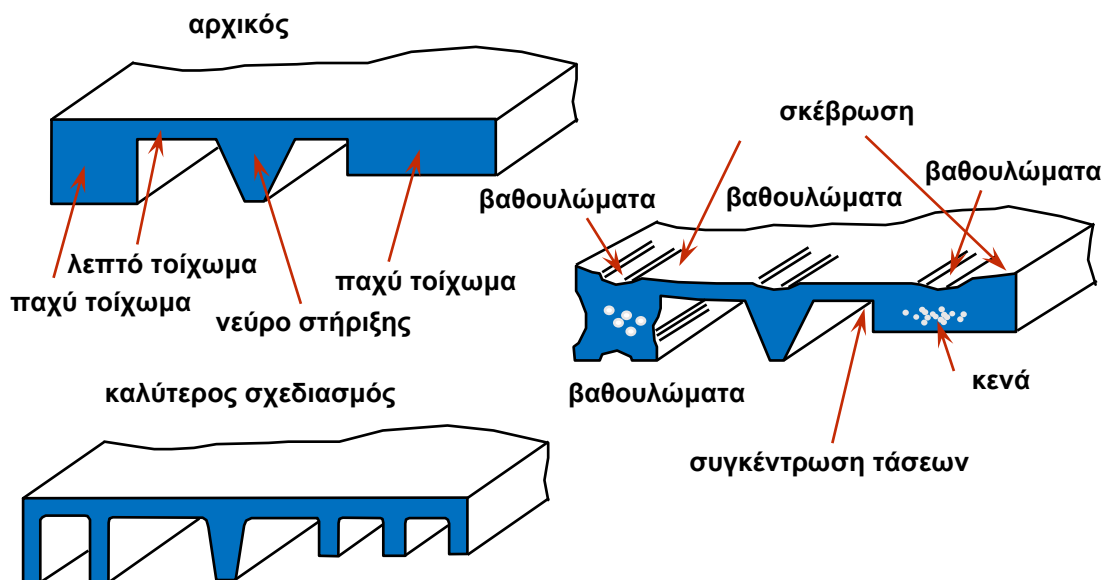
Παρ' όλα αυτά, εάν είναι φύσει αδύνατη η διατήρηση της ομοιομορφίας του πάχους στα προϊόντα έγχυσης ή τουλάχιστον η εξασφάλιση των κωνικών μεταβάσεων από τα παχύτερα στα λεπτότερα τοιχώματά τους, τότε θεωρείται επιβεβλημένη τουλάχιστον η λείανση των αιχμηρών ακμών που προκύπτουν από τις απότομες μεταβάσεις διά της προσθήκης των κατάλληλων στρογγυλεύσεων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η μετάβαση από τις παχύτερες στις λεπτότερες περιοχές των εξαρτημάτων γίνεται όσο το δυνατόν πιο ομαλά με αποτέλεσμα να διασφαλίζεται η σωστή πλήρωση των αντίστοιχων κοιλοτήτων μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα και να ενισχύεται η μηχανική αντοχή των τελικών προϊόντων.

Αναμφίβολα, η μηχανική αντοχή των τελικών προϊόντων έχει μεγάλη επίδραση στην κατασκευαστική διεργασία injection molding. Κατά κανόνα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η κατά το δυνατόν υψηλότερη μηχανική αντοχή ενός προϊόντος έγχυσης, θα πρέπει τα τοιχώματά του να είναι όσο το δυνατόν πιο λεπτά, χωρίς φυσικά η αντοχή να τίθεται τελικά εν αμφιβόλω. Σε αντίθεση με τα παχύτερα τοιχώματα, τα λεπτότερα τοιχώματα αφενός μεν πληρώνονται στο ακέραιο με πολυμερές τήγμα πολύ μικρότερης ποσότητας, αφετέρου δε απαιτούν πολύ λιγότερο χρόνο προκειμένου να στερεοποιηθεί το τήγμα. Επομένως, είναι προφανές ότι τα λεπτότερα τοιχώματα συντελούν στην περιστολή της

χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης που ακολούθως οδηγεί στην εξοικονόμηση του κόστους παραγωγής.

Τέλος, ξεχωριστή μνεία πρέπει να γίνει στα νεύρα στήριξης (ribs) καθώς σε πολλά προϊόντα έγχυσης με μεταβλητό πάχος χρησιμοποιούνται νεύρα για την υποστήριξη των λεπτότερων τοιχωμάτων τους. Μολοντούτο, αυτού του είδους ο σχεδιασμός ενδέχεται να οδηγήσει στη δημιουργία βαθουλωμάτων (sink marks) στην εξωτερική επιφάνεια των προϊόντων ή κενών (voids) στο εσωτερικό τους, εάν τα πάχη των νεύρων δεν είναι τα κατάλληλα (**Σχήμα 2-9** – πάνω). Προφανώς, το πολυμερές στα παχύτερα τοιχώματα στερεοποιείται με πιο αργό ρυθμό και συρρικνώνεται περισσότερο συγκριτικά με τα λεπτότερα τοιχώματα. Άλλωστε, όπως προαναφέρθηκε, η ανομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς οδηγεί νομοτελειακά ένα προϊόν έγχυσης σε μη ομαλή στρέβλωση. Άρα, προκειμένου να αποσοβηθεί κάτι τέτοιο είναι αναγκαίος ο κατάλληλος σχεδιασμός του προϊόντος με ομοιομορφία πάχους σε όλα τα τοιχώματά του και επαρκή στήριξη αυτών με νευρώσεις :

- πάχους ίσου από το $1/2$ έως τα $3/4$ του πάχους των τοιχωμάτων στα οποία πρόσκεινται (**Σχήμα 2-9** – κάτω) αναλόγως του ύψους της ογκομετρικής συρρίκνωσης του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού,
- ραδίων στη βάση τους ίσων από το $1/4$ έως το $1/2$ του πάχους των τοιχωμάτων στα οποία πρόσκεινται (**Σχήμα 2-9** – κάτω),
- μέγιστου ύψους ίσου με τα $3/2$ του πάχους των τοιχωμάτων στα οποία πρόσκεινται και
- κεκλιμένων επιφανειών υπό μικρή γωνία κλίσης (συνήθως από 0.5 έως 3°) καθώς η πλήρωση των νεύρων στήριξης με πολυμερές τήγμα γίνεται δύσκολη για κεκλιμένες επιφάνειες υπό μεγάλη γωνία κλίσης.



Σχήμα 2-9. Λανθασμένος σχεδιασμός ενός προϊόντος έγχυσης (πάνω – αριστερά, δεξιά και στο μέσον) που νομοτελειακά οδηγεί σε κατασκευαστικές ατέλειες (δεξιά). Εφόσον δεν καθίσταται επισφαλής η μηχανική αντοχή του προϊόντος έγχυσης και προκειμένου η πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού να γίνεται ευκολότερα και πιο αποδοτικά, είναι γενικά ωφέλιμο τα παχιά τοιχώματα να αντικαθίστανται από επιμέρους νεύρα στήριξης μικρότερου μήκους και πάχους (κάτω – αριστερά και δεξιά) ή από ένα ακόμη λεπτότερο και μακρύτερο νεύρο στήριξης στο μέσον.

2.4.2 Σχεδιασμός του Καλουπιού του Τελικού Προϊόντος Έγχυσης

Η παραγωγή απλών ή περίπλοκων τεμαχίων έγχυσης σε έναν κύκλο παραγωγής προϋποθέτει την χρήση ενός καλουπιού που περιέχει μία ή περισσότερες κοιλότητες μορφοποίησης. Η βασική δομή των καλουπιών αποτελείται από δύο μέρη, το *σταθερό* και το *κινητό* μέρος, τα οποία αποτελούνται ακολούθως από συναρμολογήσεις μεταλλικών πλακών. Οι *κοιλότητες* ή αλλιώς «*θηλυκά*» (*cavities*) και οι *πυρήνες* ή αλλιώς «*αρσενικά*» (*cores*) διαμορφώνονται σε ένθετα τεμάχια τα οποία προσαρμόζονται σε ειδικές εσοχές, τις επονομαζόμενες *ποκέτες* (*rockets*) ή αλλιώς *φωλιές* (*cages*) εντός των μεταλλικών πλακών. Παρά ταύτα, σε μερικές περιπτώσεις, επιλέγεται η απευθείας διαμόρφωση τόσο των κοιλοτήτων όσο και των πυρήνων επί των μεταλλικών πλακών.

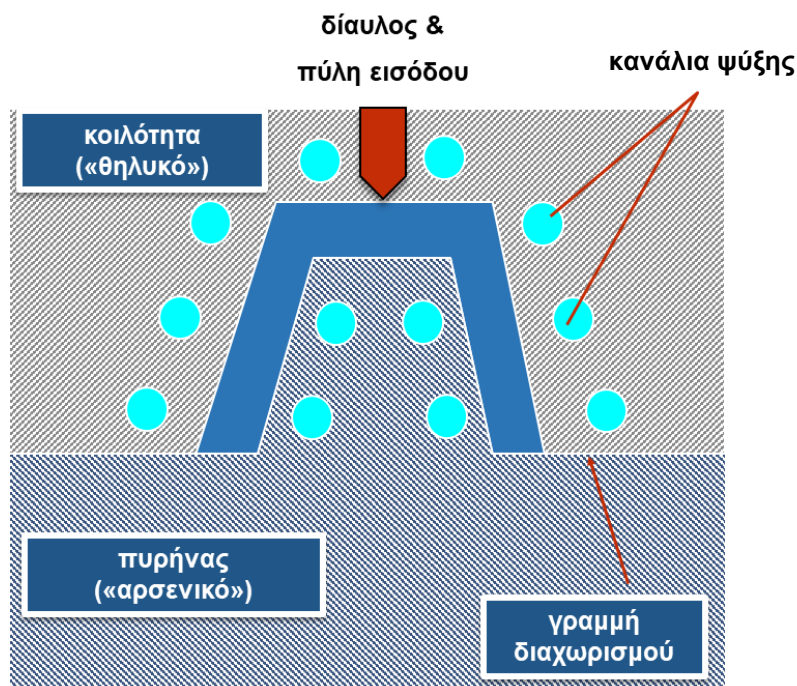
Οι απαιτήσεις που είναι αναγκαίο να εκπληρώνει ένα απόλυτα λειτουργικό καλούπι είναι η κατανομή του τηγμένου πολυμερούς, η διαμόρφωση και η ψύξη του τήγματος ή η πρόσδοση θερμότητας για ενεργοποίηση του μηχανισμού των θερμοσκληραινόμενων ή των ελαστομερών πολυμερών, η στερεοποίηση του τήγματος και η εξαγωγή του τελικού προϊόντος. Τούτες οι εργασίες επιτελούνται κατ' αντιστοιχία από :

- το σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού (*runner system*),
- την κοιλότητα μορφοποίησης (*cavity*) με το σύστημα εξαερισμού (*venting*) για την απαγωγή αερίων,
- το σύστημα εναλλαγής θερμότητας,
- το σύστημα ψύξης (*cooling system*),
- το σύστημα εξόλκευσης (*ejection system*),
- το σύστημα ευθυγράμμισης και τοποθέτησης,
- το σύστημα μεταφοράς δυνάμεων και
- το σύστημα μετάδοσης κίνησης.

Η εξαγωγή των τελικού προϊόντος, ειδικότερα, συνιστά μείζονος σημασίας ζήτημα για ένα καλούπι. Και αυτό γιατί από οικονομικής άποψης ο κύκλος παραγωγής θα πρέπει να είναι ο συντομότερος δυνατός, ενώ από την σκοπιά της ποιότητας η εξαγωγή, ιδίως των πολυσύνθετων τεμαχίων, επιβάλλεται να είναι αξιόπιστη χωρίς να προκαλεί φθορές τόσο στο τεμάχιο όσο και στην κοιλότητα ή τον πυρήνα του καλουπιού. Επομένως, το καλούπι καθορίζεται από την πολυπλοκότητα του προς εξαγωγή τεμαχίου και του συστήματος μέσω του οποίου αυτή επιτυγχάνεται (*σύστημα εξόλκευσης*). Προφανώς, όσο πιο δαιδαλώδες είναι το προς κατασκευή εξάρτημα, τόσο πιο δαπανηρό είναι το σύστημα εξόλκευσης καθώς απαιτείται ειδικός εξοπλισμός.

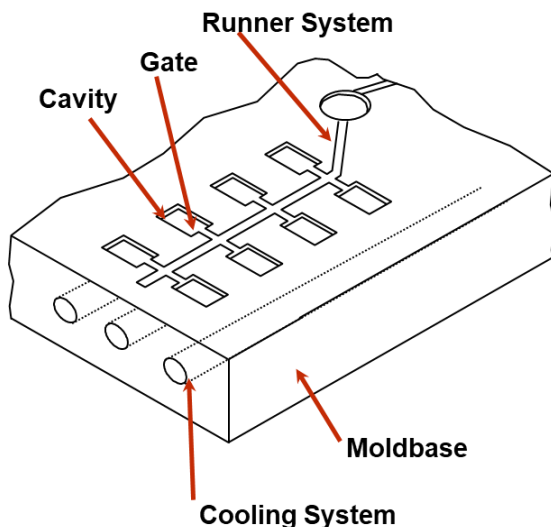
Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψιν τα ανωτέρω, τα πρωτεύοντα ζητήματα που απασχολούν έναν σχεδιαστή προϊόντων έγχυσης ως προς τον σχεδιασμό ενός καλουπιού είναι τα εξής :

- Πώς ακριβώς το καλούπι του τελικού προϊόντος θα χωριστεί σε δύο μέρη, τον πυρήνα («*αρσενικό*») και την κοιλότητα («*θηλυκό*») (**Σχήμα 2-10**);



Σχήμα 2-10. Απεικόνιση σε τομή των δύο ξεχωριστών μερών του καλουπιού ενός προϊόντος έγχυσης, του παραγόμενου εξαρτήματος και του συστήματος ψύξης του καλουπιού. Το παραγόμενο εξάρτημα σχηματίζεται μεταξύ των δύο μερών, δηλαδή στον κενό χώρο που προκύπτει μεταξύ «αρσενικού» και «θηλυκού» έπειτα από πλήρωσή του με πολυμερές τήγμα. Το «θηλυκό» μέρος που συχνά καλείται και *σταθερή πλάκα* καθορίζει την εξωτερική μορφή του παραγόμενου εξαρτήματος. Το «αρσενικό» μέρος που συχνά καλείται και *κινητή πλάκα* προσδιορίζει την αντίστοιχη εσωτερική. Η δε *γραμμή διαχωρισμού* (*parting line*) βρίσκεται εκεί όπου τα δύο μέρη συναντιούνται.

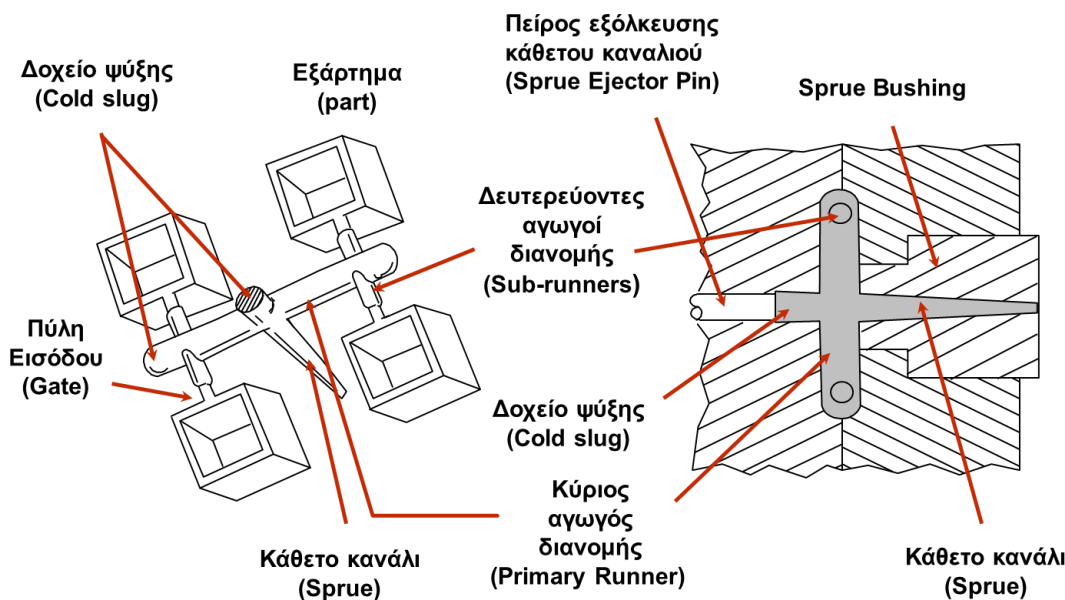
- Ποιος θα είναι ο αριθμός και ποια θα είναι η διάταξη (*layout*) των δύο ξεχωριστών μερών του καλουπιού, δηλαδή πόσα πανομοιότυπα τεμάχια από το τελικό εξάρτημα θα εξαχθούν μέσα από την ίδια «καλουπιέρα» (*mold base*) (**Σχήμα 2-11**);
- Πώς θα σχεδιαστεί το σύστημα διανομής του καλουπιού (*runner system*), πού ακριβώς θα τοποθετηθούν οι πύλες εισόδου (*gates*) και ποιες οι διαστάσεις και το σχήμα αυτών (**Σχήμα 2-11**);
- Πώς ακριβώς θα σχεδιαστεί το σύστημα ψύξης του καλουπιού (*cooling system*) ως προς τη διάταξη, το σχήμα και τις διαστάσεις (**Σχήμα 2-10** και **Σχήμα 2-11**);
- Πώς ακριβώς θα σχεδιαστεί η «καλουπιέρα» που θα περιβάλει όλα τα παραπάνω και με ποιον τρόπο θα συναρμολογηθούν τα επιμέρους εξαρτήματα αυτής (**Σχήμα 2-11**);
- Πώς θα σχεδιαστεί το σύστημα εξόλκευσης του καλουπιού (*ejection system*) για την απομάκρυνση του τελικού προϊόντος;
- Με ποιον τρόπο θα ασκείται η δύναμη σύσφιξης του καλουπιού (*clamping force*) κατά την έγχυση του πολυμερούς τήγματος και ποιο θα είναι το μέγεθος αυτής;
- Ποιο θα είναι το συνολικό κόστος κατασκευής του καλουπιού;



Σχήμα 2-11. Σκίτσο ενός καλουπιού σε απλοϊκή μορφή στο οποίο αποδίδονται οι κοιλότητες, οι πύλες εισόδου, το σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού, το σύστημα ψύξης και η «καλουπιέρα».

2.4.2.1 Σχεδιασμός του Συστήματος Διανομής

Το σύστημα διανομής (*runner system*) του πολυμερούς δομικού υλικού στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού είναι μια διάταξη ειδικά διαμορφώσιμη η οποία διασυνδέει τη μονάδα έγχυσης με το μορφοποιημένο αντικείμενο, απομακρύνεται από αυτό με την περαίωση της κατασκευαστικής διεργασίας και αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη (**Σχήμα 2-12**) :



Σχήμα 2-12. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό σύστημα διανομής σε ένα καλούπι.

❖ *Ακροφύσιο (Nozzle)*

Αποτελεί στοιχείο σύνδεσης της μονάδας έγχυσης με το καλούπι. Βρίσκεται στην απόληξη της μονάδας έγχυσης και εισχωρεί μέσω αυτής στην σταθερή πλάκα του καλουπιού. Θερμαίνεται από τον κύλινδρο πλαστικοποίησης και αποτελεί το σημείο από όπου το πολυμερές τήγμα διαχωρίζεται από το στερεοποιημένο πολυμερές στον δίαυλο με την περαίωση της φάσης ψύξης.

❖ *Δίαυλος ή Κάθετο κανάλι (Sprue)*

Αποτελεί στοιχείο επικοινωνίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με το ακροφύσιο. Επί της ουσίας πρόκειται περί ενός κάθετου καναλιού με μορφή κολουρου κώνου, η μεγαλύτερη βάση του οποίου βρίσκεται στο μέρος του καλουπιού. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται κατά την τοποθέτηση του καλουπιού στοχεύοντας στην απόλυτη ευθυγράμμιση μεταξύ του ακροφυσίου και του διαύλου. Στην ευθυγράμμιση αυτή συμβάλλει ο *δακτύλιος προσαρμογής (ring)*.

❖ *Αγωγοί διανομής ή Δρομείς (Runners)*

Αποτελούν στοιχείο επικοινωνίας του διαύλου με την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού καθώς μέσω αυτών διοχετεύεται το πολυμερές τήγμα στην κοιλότητα. Δεδομένου ότι κατά μήκος των αγωγών διανομής λαμβάνει χώρα ψύξη είναι αναγκαίο να έχουν το σωστό μέγεθος προκειμένου να διασφαλίζεται η συνεχής ροή του πολυμερούς τήγματος στο εσωτερικό τους και να πληρώνεται τελικά η κοιλότητα μορφοποίησης στο ακέραιο. Μια αρχική τιμή της διαμέτρου του δρομέα μπορεί να εκτιμηθεί ως :

$$D = (W^{0.5} L^{0.25}) / 3.7 \quad (1-3)$$

όπου :

D : η διάμετρος του δρομέα,

W : το βάρος του προϊόντος έγχυσης που μέλλεται να παραχθεί και

L : το μήκος του δρομέα.

Οποσδήποτε, τα χαρακτηριστικά της ροής του τήγματος (επιφανειακή τάση, αντοχή τήγματος κλπ), η θερμοκρασία και άλλα στοιχεία όπως οι απαιτήσεις για διαστατική ακρίβεια και ομοιογένεια του μορφοποιημένου αντικειμένου αποτελούν σημαντικές παραμέτρους που προσδιορίζουν τη διάμετρο και το μήκος των αγωγών διανομής. Για του λόγου το αληθές, εάν η διάμετρος των αγωγών είναι πολύ μικρή και το μήκος αυτών πολύ μεγάλο, τότε υπάρχει το ενδεχόμενο το πολυμερές τήγμα να στερεοποιηθεί προτού γεμίσει εντελώς η κοιλότητα μορφοποίησης. Στις περιπτώσεις δε που οι δρομείς έχουν μεγάλες διαστάσεις, υπάρχει η απαίτηση έγχυσης μεγάλης ποσότητας πολυμερούς τήγματος για τη μορφοποίηση ενός αντικειμένου, γεγονός το οποίο οδηγεί σε σημαντικούς όγκους πλαστικών απορριμμάτων.

Σε κάθε περίπτωση, η μεταβολή της διαμέτρου των δρομέων είναι συνάρτηση τριών παραγόντων : του μήκους των ίδιων των δρομέων, του όγκου του προϊόντος έγχυσης που επίκειται να παραχθεί και του μήκους ροής (flow length). Ειδικότερα δε για το μήκος ροής, αυτό ποικίλει αναλόγως του ιξώδους του εκάστοτε πολυμερούς δομικού υλικού που χρησιμοποιείται στην κατασκευαστική διεργασία, γεγονός το οποίο συνεπάγεται μεταβολή τόσο στη διάμετρο (**Πίνακας 2-2**) όσο και στο μήκος των δρομέων (**Πίνακας 2-3**). Σαφώς, οι κατάλληλοι δρομείς θα πρέπει να μην έχουν ούτε πολύ μικρή διάμετρο καθώς έτσι αυξάνεται δραματικά η πίεση έγχυσης (injection

pressure), αλλά ούτε και πολύ μεγάλη μιας και στην περίπτωση αυτή επιμηκύνουν άσκοπα τη χρονική διάρκεια του κύκλου έγχυσης (cycle time) με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται το συνολικό κόστος παραγωγής.

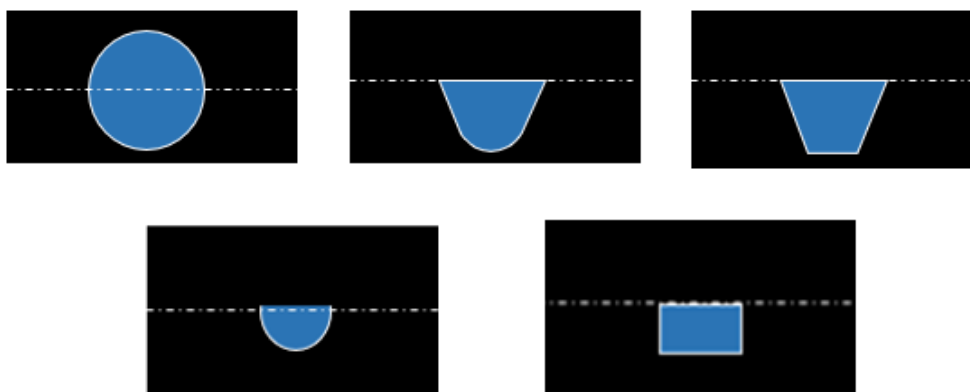
Πίνακας 2-2. Προτεινόμενα εύρη τιμών για τις διαμέτρους των αγωγών διανομής για μικρής έως μεσαίας τάξης μεγέθους προϊόντα έγχυσης με βάση το πολυμερές δομικό υλικό που επιλέγεται προς χρήση.

Πολυμερές δομικό υλικό	Συνιστώμενο εύρος τιμών για τις διαμέτρους των δρομέων σε mm (ή σε inches)
ABS	4,7 – 9,5 mm (0,187 – 0,375")
PA	1,5 – 9,5 mm (0,062 – 0,375")
PC	4,7 – 9,5 mm (0,187 – 0,375")
PE	1,5 – 9,5 mm (0,062 – 0,375")
PP	4,7 – 9,5 mm (0,187 – 0,375")
PPO	6,3 – 9,5 mm (0,250 – 0,375")
PS	3,1 – 9,5 mm (0,125 – 0,375")

Πίνακας 2-3. Αναλογίες μεταξύ της διαμέτρου και του μήκους των αγωγών διανομής αναφορικά με το μέγεθος του ιξώδους του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού.

Διάμετρος δρομέων σε mm	Μήκος δρομέων σε mm για πολυμερές με <u>χαμηλό</u> ιξώδες	Μήκος δρομέων σε mm για πολυμερές με <u>υψηλό</u> ιξώδες
3	100	50
6	200	100
9	280	150
12	330	175

Αναμφίβολα, σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί, η βέλτιστη ροή του πολυμερούς τήγματος εντός των αγωγών διανομής εξαρτάται άμεσα από το σχήμα και τις διαστάσεις αυτών. Κατά κοινή διαπίστωση, οι αγωγοί κυκλικής διατομής (**Σχήμα 2-13** – πάνω) δίνουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά ροής μια και εμφανίζουν τη μικρότερη πτώση πίεσης, τη μικρότερη αντίσταση στη ροή και τη μικρότερη απώλεια ενέργειας. Μολοντούτο, εξαιτίας του κόστους αλλά και της κατασκευαστικής περιπλοκότητας τέτοιων αγωγών διανομής, προτιμάται ο σχεδιασμός δρομέων με τραπεζοειδείς ή παραβολικές διατομές (**Σχήμα 2-13** – πάνω). Άλλες διατομές δρομέων λιγότερο συνηθισμένες είναι οι ημικυκλικές και οι ορθογωνικές (**Σχήμα 2-13** – κάτω).

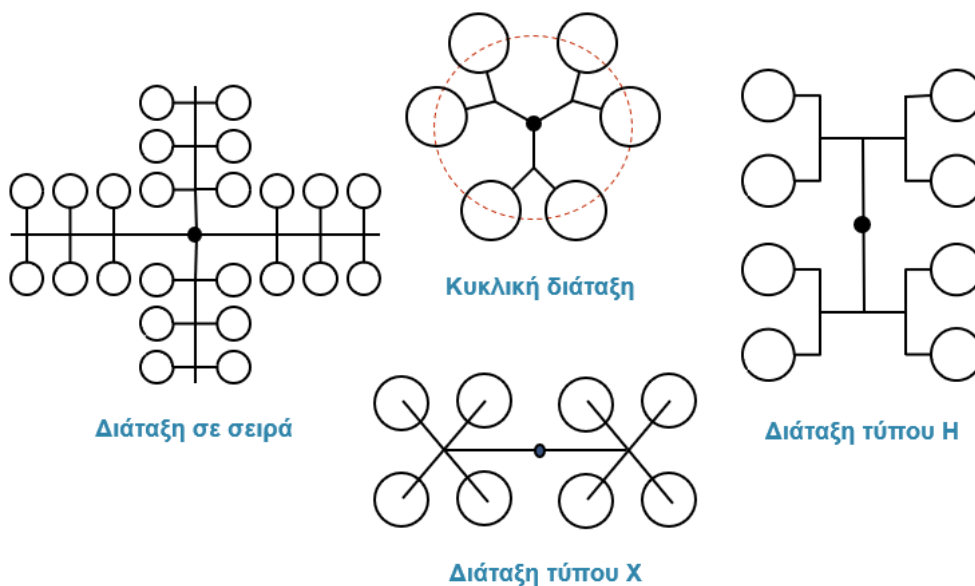


Σχήμα 2-13. Οι συνηθέστερες διατομές των αγωγών διανομής (από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω) : *κυκλικές, παραβολικές, τραπεζοειδείς, ημικυκλικές και ορθογωνικές.*

Επίσης, σε περιπτώσεις κατασκευής σύνθετων ή πολλαπλών προϊόντων έγχυσης μέσα στην ίδια μήτρα, οι αγωγοί διανομής διακλαδίζονται αποτελούμενοι από τον *κύριο* αγωγό και τους *δευτερεύοντες* αγωγούς οι οποίοι είναι όμοιοι με τον κύριο αλλά σχεδιασμένοι σε μικρότερη κλίμακα από αυτόν. Η τοποθέτηση δε των δευτερευόντων δρομέων συνηθίζεται να γίνεται υπό γωνία στην κατεύθυνση της ροής αποσκοπώντας στην ελαχιστοποίηση των διατμητικών τάσεων (shear stresses) που ασκούνται στο πολυμερές τήγμα.

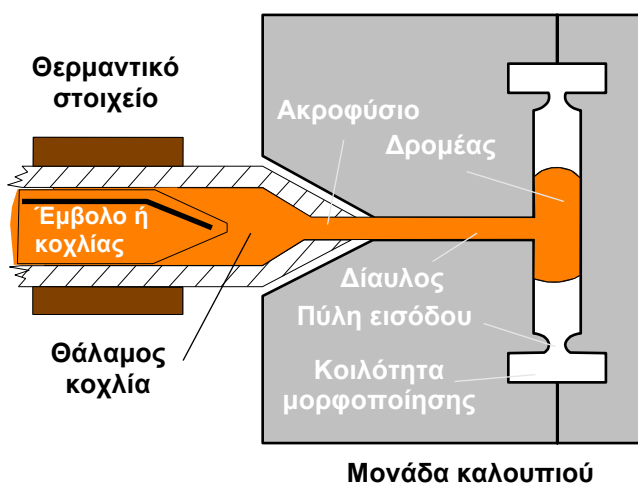
Ειδικότερα, κατά την κατασκευή πολλαπλών προϊόντων έγχυσης μέσα στην ίδια μήτρα (*multi-cavity molds*) επιζητείται η ομοιόμορφη διανομή του πολυμερούς τήγματος σε κάθε κοιλότητα μορφοποίησης προκειμένου να διασφαλιστούν τόσο η διαστατική ακρίβεια όσο και η ομοιογένεια των μορφοποιημένων αντικειμένων. Η βελτίωση των δύο αυτών χαρακτηριστικών είναι εφικτή εφόσον επιδιώκεται η συμμετρική τοποθέτηση των αγωγών διανομής μέσα στο καλούπι, κάτι το οποίο συνεπάγεται την ίδια πίεση έγχυσης σε κάθε κοιλότητα μορφοποίησης. Συνεπώς, απαραίτητες προϋποθέσεις για την επίτευξη ομοιομορφίας στην πλήρωση κάθε κοιλότητας μορφοποίησης αποτελούν :

- η διαφοροποίηση της διαμέτρου των δευτερευόντων αγωγών διανομής σε σχέση με την απόσταση αυτών από τον κύριο αγωγό και
- η χρήση ζυγοσταθμισμένων δρομέων (δρομείς ίδιου μεγέθους και ίδιου μήκους) μιας και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η πλήρωση κάθε κοιλότητας μορφοποίησης με τον ίδιο ρυθμό (**Σχήμα 2-14**).



Σχήμα 2-14. Σκαριφηματική απόδοση τυπικών διατάξεων ζυγοσταθμισμένων δρομέων.

Συμπληρωματικά με τα ήδη προαναφερθέντα, οι αγωγοί διανομής ενδέχεται να είναι είτε *ψυχροί* είτε *θερμοί*. Οι ψυχροί αγωγοί διανομής αποτελούν την πιο απλοϊκή μορφή δρομέων. Ωστόσο, οι **θερμοί αγωγοί διανομής (Σχήμα 2-15)** είναι πιο σύνθετοι. Και αυτό γιατί, ενίοτε, για να περιορισθεί η ποσότητα του απορριπτέου υλικού, το πολυμερές χρειάζεται να διατηρείται εντός των αγωγών διανομής σε ρευστή κατάσταση, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται με τη θέρμανση των αγωγών με ειδικά θερμαντικά στοιχεία.



Σχήμα 2-15. Σκαριφηματική απόδοση ενός τυπικού θερμού συστήματος διανομής.

Ακριβέστερα, στην περίπτωση των θερμών δρομέων ο σχεδιασμός της αντίστοιχης μήτρας είναι τέτοιος ώστε το περιεχόμενό τους να παραμένει στη ρευστή κατάσταση κατά την απομάκρυνση του παραχθέντος αντικειμένου από το καλούπι. Ακολούθως, στον επόμενο κύκλο έγχυσης, το εναπομείναν ρευστό πολυμερές εντός των αγωγών συμπαρασύρεται από το φρέσκο πολυμερές τήγμα και μεταφέρεται στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλούπιου. Εν τοιαύτη περιπτώσει, το μέγεθος των αγωγών

διανομής πρέπει να συνδυάζεται με την ποσότητα πολυμερούς που απαιτείται να εγχυθεί εντός της κοιλότητας μορφοποίησης ώστε αυτή να γεμίσει πλήρως με υλικό.

Μολαταύτα, η προσθήκη θερμαντικών στοιχείων στο σύστημα διανομής του καλουπιού συνεπάγεται την αύξηση του συνολικού κόστους κατασκευής του καλουπιού περίπου κατά **30 %** καθώς η δομή του και συνεπώς η διαδικασία κατασκευής του γίνονται πλέον πολυσύνθετες. Βέβαια, το γεγονός αυτό αντισταθμίζεται από την βελτίωση της απόδοσης της διεργασίας μορφοποίησης, ιδιαίτερα για μεγάλους όγκους παραγωγής. Τούτο μεταφράζεται σε :

- ✓ μειωμένους χρόνους έγχυσης που παραπέμπουν σε κύκλους έγχυσης μικρότερης χρονικής διάρκειας,
- ✓ αποφυγή απώλειας πίεσης, γεγονός το οποίο οδηγεί σε καλύτερη και ευκολότερη πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα καθώς δεν δημιουργεί την ανάγκη για άσκηση μεγαλύτερης πίεσης έγχυσης στο τήγμα (injection pressure) και, κατ' επέκταση, μεγαλύτερης δύναμης για τη σύσφιξη του καλουπιού (clamping force),
- ✓ αυξημένη ελευθερία κινήσεων αναφορικά με την οριοθέτηση της κατάλληλης περιοχής τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού,
- ✓ εναποθήκευση μεγάλου ποσοστού του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού που υπό άλλες συνθήκες (χρήση ψυχρών δρομέων) θα πεταγόταν ως scrap,
- ✓ εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων και, εν τέλει,
- ✓ ποιοτικότερα τελικά προϊόντα έγχυσης χωρίς κατασκευαστικές ατέλειες, όπως γραμμές συγκόλλησης (weld lines), βαθουλώματα (sink marks), επιφάνειες μειωμένης στιλπνότητας (low gloss matter), στρέβλωση (warpage), παραμένουσες τάσεις (residual stresses) κλπ.

❖ *Δοχείο ψύξης (Cold slug) – Επεκτάσεις δρομέων (Cold-well extensions)*

Αποτελούν προεκτάσεις του διαύλου και των δρομέων αντίστοιχα οι οποίες σχεδιάζονται στο σύστημα διανομής και συγκεκριμένα εκεί όπου η ροή του πολυμερούς τήγματος αλλάζει κατεύθυνση. Χάρη σε αυτές τις προεκτάσεις δεσμεύεται εκείνο το τμήμα της ροής του πολυμερούς τήγματος το οποίο έρχεται σε άμεση επαφή με τον ψυχρό αέρα του κάθετου καναλιού και των δρομέων, ψύχεται ταχύτερα εν συγκρίσει με το υπόλοιπο ρεύμα του ρευστού και εν τέλει στερεοποιείται. Η δέσμευση αυτή είναι επιτακτική προκειμένου να αποσοβείται ο κίνδυνος παρεμπόδισης της σταθερής ροής του πολυμερούς τήγματος εντός των δρομέων και κατ' επέκταση ο κίνδυνος φραγής της εισόδου του τήγματος στην κοιλότητα μορφοποίησης από το ήδη στερεοποιημένο πολυμερές.

Αναντίρρητα, το σύστημα διανομής επηρεάζει την κατανομή τόσο της πίεσης όσο και της θερμοκρασίας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψιν όλα όσα προαναφέρθηκαν, ένα βέλτιστο σύστημα διανομής σε κάθε περίπτωση θα πρέπει :

- ✓ να εξισορροπεί τόσο την πλήρωση (filling) της κοιλότητας μορφοποίησης ενός καλουπιού με πολυμερές τήγμα όσο και την συμπίεση (packing) του τήγματος εντός της κοιλότητας, ήτοι όλες οι περιοχές της κοιλότητας που βρίσκονται μακριά από την περιοχή της τροφοδοσίας να γεμίζουν με πολυμερές τήγμα κατά τον ίδιο χρόνο,

- ✓ να ελαχιστοποιεί τα προβλήματα που οφείλονται είτε στην πλήρωση (filling) της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα είτε στην συμπίεση (packing) του τήγματος εντός της κοιλότητας (π.χ. ανισοροπία ροής εξαιτίας πιθανής διαμητρικής θέρμανσης, πτώση πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης, μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου που επιμηκύνουν χρονικά τον κύκλο έγχυσης κλπ),
- ✓ να διασφαλίζει ότι η πίεση έγχυσης (injection pressure) είναι αρκετή για να εξουδετερώνει την υψηλή αντίθλιψη (back pressure) και
- ✓ να διασφαλίζει τη διανομή περισσότερης ποσότητας τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης κατά τη φάση της πλήρωσής της με πολυμερές τήγμα χωρίς να στερεοποιείται πρόωρα προκειμένου να αντισταθμιστεί η επερχόμενη ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς δομικού υλικού.

2.4.2.2 Σχεδιασμός των Πυλών Εισόδου

Οι ψυχρές ή θερμές πύλες εισόδου (cool/hot gates) χρησιμοποιούνται σε καλούπια από κοινού με ψυχρούς ή θερμούς δρομείς (cool/hot runners) αντίστοιχα, κάτι το οποίο επιτρέπει την κατασκευή πολλαπλών κοιλοτήτων μορφοποίησης μέσα στην ίδια μήτρα. Για την ακρίβεια, πρόκειται για μικρές στενώσεις που διασυνδέουν το παραγόμενο εξάρτημα με το σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στο καλούπι (runner system). Σε κάθε περίπτωση το σχήμα τους επιβάλλεται να είναι τέτοιο που να εξασφαλίζει την παραμονή του πολυμερούς τήγματος στην κοιλότητα μορφοποίησης και να αποτρέπει την επαναφορά του, ιδίως κατά την φάση της συμπίεσής του (packing).

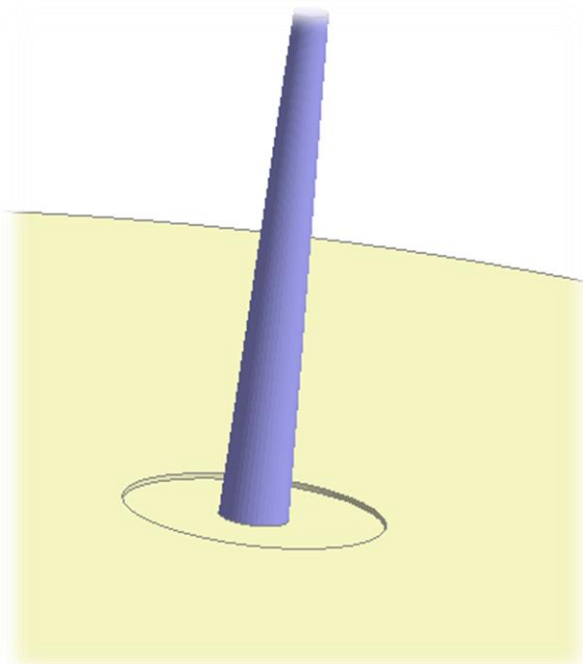
Κατά την εξόλκευση του τελικού προϊόντος ή μετά το πέρας αυτής, οι πύλες εισόδου αφαιρούνται από το παραχθέν αντικείμενο. Στη μεν πρώτη περίπτωση αυτό γίνεται αυτόματα, ωστόσο στη δεύτερη αυτό πραγματοποιείται έπειτα από παρέμβαση του καλουπιατζή. Συνεπώς, προκειμένου οι πύλες εισόδου να απομακρυνθούν εύκολα αφήνοντας όσο το δυνατόν μικρότερο ίχνος επί του παραχθέντος αντικειμένου και προκαλώντας την ελάχιστη δυνατή παραμόρφωσή του στην περιοχή που εμπίπτει στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης, είναι αναγκαίο το μέγεθός τους να είναι μικρό. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα και αναλόγως τόσο των εκάστοτε κατασκευαστικών αναγκών που ανακύπτουν κατά την παραγωγή ενός προϊόντος έγχυσης όσο και των σχεδιαστικών ιδιαιτεροτήτων που αυτό εμφανίζει, συναντώνται διάφοροι τύποι πυλών εισόδου προς χρήση εκ των οποίων οι επικρατέστεροι είναι οι ακόλουθοι :

- ❖ *Πύλες εισόδου που απομακρύνονται από το τελικό προϊόν έγχυσης κατόπιν παρέμβασης (manually trimmed gates)*

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται οι εξής τύποι πυλών εισόδου :

- *Sprue (Direct) gate*

Ο συγκεκριμένος τύπος πύλης εισόδου (**Σχήμα 2-16**) χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε καλούπια με μεμονωμένες συμμετρικές κοιλότητες μορφοποίησης καθώς τις τροφοδοτεί εύκολα με πολυμερές τήγμα τοποθετούμενη είτε κεντρικά είτε στις παχύτερες περιοχές αυτών. Σε κάθε περίπτωση δεν προαπαιτείται η ύπαρξη κάποιου παραδοσιακού συστήματος διανομής (runner system) ή κάποιας συμβατικής πύλης εισόδου στο καλούπι. Και αυτό γιατί η τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης εξασφαλίζεται άμεσα από την πύλη εισόδου τύπου sprue που λειτουργεί σαν κάθετο κανάλι. Επίσης, η γεωμετρία των πυλών εισόδου αυτού του τύπου είναι κωνική ούτως ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία της εξόλκευσης.



Σχήμα 2-16. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου **sprue**. Ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν, η εν λόγω πύλη εισόδου ενδέχεται να είναι είτε ψυχρή είτε θερμή.

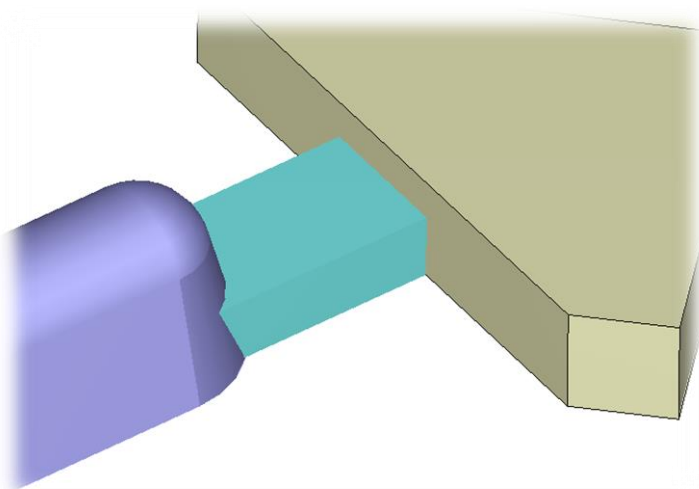
Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι πύλες εισόδου τύπου sprue είναι ιδανικές για την παραγωγή μεγάλων προϊόντων έγχυσης με παχιά τοιχώματα, ιδίως δε όταν το χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό παρουσιάζει αυξημένο ιξώδες κατά την έγχυσή του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Αφενός, στα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση τους συγκαταλέγονται η χαμηλή απώλεια πίεσης και η αποτελεσματική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Αφετέρου, ως μειονεκτήματα θεωρούνται η επιμήκυνση της χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης και η συναντώμενη δυσκολία στην απομάκρυνση της πύλης εισόδου από το παραχθέν προϊόν έγχυσης χωρίς την πρόσθετη μετα-επεξεργασία του.

Προφανώς, μετά την απομάκρυνση της πύλης εισόδου τύπου sprue από το τελικό προϊόν έγχυσης, το ίχνος που θα αφηθεί επ' αυτού στην περιοχή που εμπίπτει στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης (gate mark) θα είναι αναπόφευκτα μεγεθυμένο. Επίσης, πρόκειται για μια πύλη εισόδου που όταν χρησιμοποιείται, εντείνει τον κίνδυνο εμφάνισης σημαδιών/γραμμών ροής (flow marks/lines) στο τελικό προϊόν έγχυσης.

- *Side/Edge/Overlap gate*

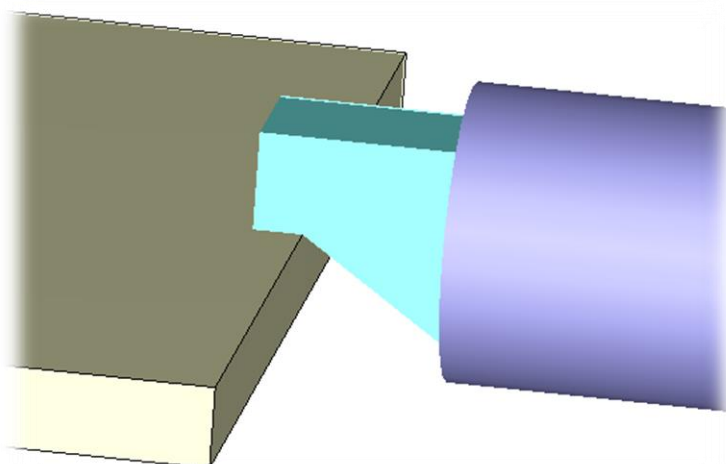
Η πλευρική πύλη εισόδου (τύπου **side**) και η πύλη εισόδου τύπου **edge** (**Σχήμα 2-17**) αποτελούν πύλες εισόδου γενικής μορφής που είθισται να χρησιμοποιούνται όταν η αυτόματη απομάκρυνσή των κατά την εξόλκευση του παραχθέντος προϊόντος έγχυσης είναι πρακτικά ανέφικτη ή ανεπιθύμητη. Συνήθως, είναι ορθογωνικής διατομής και τοποθετούνται είτε στην γραμμή διαχωρισμού (parting line) του καλουπιού (πύλη εισόδου τύπου side) είτε σε κάποια ακμή του προς μορφοποίηση αντικειμένου (πύλη εισόδου τύπου edge). Το τυπικό πάχος αυτών κυμαίνεται από το **50** % έως το **70** % του πάχους των τοιχωμάτων του προς

μορφοποίηση αντικειμένου. Γενικά, οι παχύτερες πύλες εισόδου τύπου side ή τύπου edge χρησιμοποιούνται όταν παρίσταται η ανάγκη για καλύτερη συμπίεση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού



Σχήμα 2-17. Σκαριφηματική απόδοση μιας κοινής πύλης εισόδου τύπου **edge**. Ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν, η εν λόγω πύλη εισόδου ενδέχεται να είναι είτε ψυχρή είτε θερμή.

Παραλλαγή των ανωτέρω δύο τύπων αποτελεί η πύλη εισόδου τύπου overlap (**Σχήμα 2-18**) με τη διαφορά ότι η τελευταία επικαλύπτει τις επιφάνειες ή τα τοιχώματα του προς μορφοποίηση αντικειμένου. Εξάλλου, χάρη σε αυτή την ιδιαιτερότητα της εν λόγω πύλης εισόδου μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου πίδακα (jetting) στην εξωτερική επιφάνεια του τελικού προϊόντος έγχυσης.



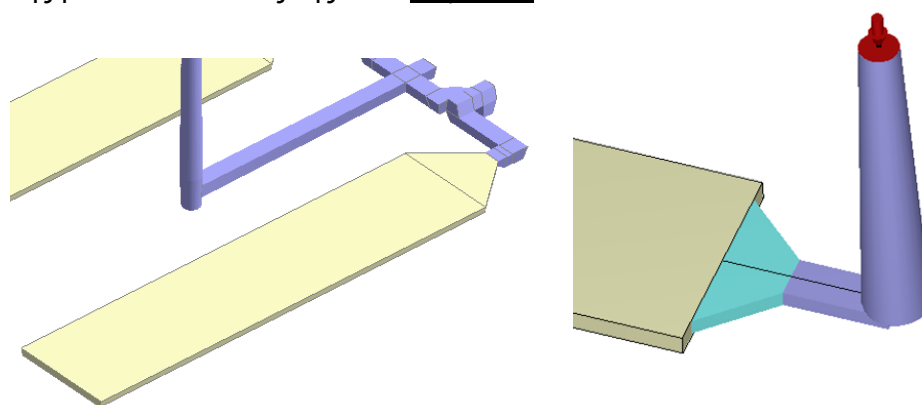
Σχήμα 2-18. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου **overlap**.

Για καθέναν από τους προαναφερθέντες τρεις τύπους πυλών εισόδου, τα πλεονεκτήματα εντοπίζονται στο ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καλούπια με πολλαπλές κοιλότητες μορφοποίησης και στην εύκολη μηχανουργική καταργασία τους. Επίσης, η απομάκρυνση των πυλών εισόδου από το τελικό

προϊόν έγχυσης είναι σχετικά εύκολη διαδικασία, αν και υπάρχει η πιθανότητα να αφήσουν τελικά ψεγάδια σε αυτό.

- *Fan gate*

Πρόκειται για έναν τύπο πύλης εισόδου που επιφέρει την ομοιομορφία στο μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος κατά την έγχυσή του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Ως εκ τούτου, θεωρείται ιδανικός τύπος πύλης εισόδου προς χρήση για την παραγωγή επίπεδων προϊόντων έγχυσης μεγάλου πλάτους, μικρού πάχους και υψηλών απαιτήσεων ως προς τη διαστατική ακρίβειά τους (**Σχήμα 2-19**). Κατά περιπτώσεις, μπορεί να αντικαταστήσει τους πιο περιοριστικούς τύπους πυλών εισόδου (π.χ. «υπόγειες» πύλες εισόδου τύπου tunnel ή cashew, πύλες εισόδου τύπου edge ή tab κλπ). Ωστόσο, απαιτεί πρόσθετες διαδικασίες για την απομάκρυνση της πύλης από το τελικό προϊόν έγχυσης μια και το πλάτος της είναι αυξημένο.



Σχήμα 2-19. Σκαριφηματικές αποδόσεις τυπικών πυλών εισόδου τύπου **fan**. Το σύννηθες πάχος των πυλών εισόδου αυτού του είδους κυμαίνεται από το **70 %** έως το **80 %** του πάχους των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικείμενου. Για την εξασφάλιση πιο αργής ροής, το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από το **50 %** έως το **70 %**.

Ο συγκεκριμένος τύπος πύλης εισόδου :

- ✓ βελτιώνει τον γραμμικό προσανατολισμό της ροής του πολυμερούς τήγματος,
- ✓ μειώνει τον κίνδυνο εμφάνισης του φαινομένου πίδακα (jetting) στην εξωτερική επιφάνεια του τελικού προϊόντος έγχυσης,
- ✓ μειώνει την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων στο μορφοποιημένο αντικείμενο πλησίον της περιοχής που εμπίπτει στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης και
- ✓ μειώνει τον ρυθμό διάτμησης (shear rate) του πολυμερούς τήγματος ενόσω αυτό διέρχεται από την πύλη.

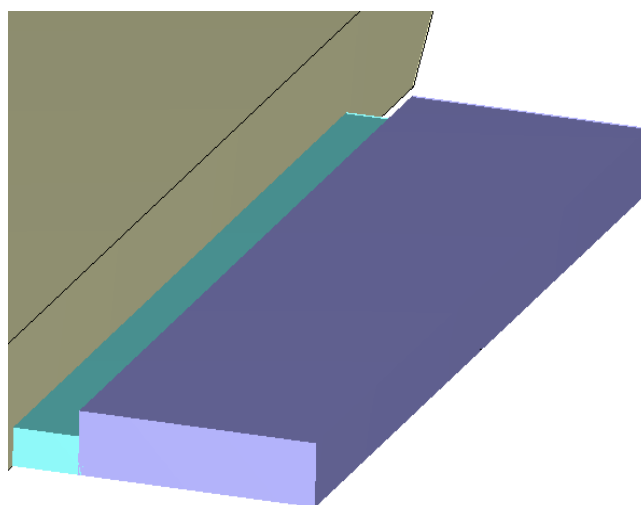
- *Disk gate*

Οι πύλες εισόδου τύπου **disk** είναι κατ' ουσίαν πύλες εισόδου τύπου fan κυκλικής διατομής. Κατά συνέπεια, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κυκλικών δίσκων και λοιπών αξονοσυμμετρικών προϊόντων έγχυσης με μεγάλο μήκος. Πλεονεκτούν κυρίως ως προς τη μείωση των εμφανιζόμενων γραμμών συγκόλλησης (weld lines) στο μορφοποιημένο αντικείμενο, ωστόσο

υστερούν αναφορικά με την απαιτούμενη παρέμβαση για την απομάκρυνσή τους από το τελικό προϊόν έγχυσης. Επίσης, ευθύνονται για την επιδείνωση της στρέβλωσης (warpage) των τελικών προϊόντων έγχυσης στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται fiber πολυμερή δομικά υλικά κατά τη διαδικασία της έγχυσης.

- *Film gate*

Η πύλη εισόδου τύπου **film** (**Σχήμα 2-20**) παρέχει ομοιόμορφο προφίλ ροής κατά την έγχυση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Ως επί το πλείστον, οι πύλες εισόδου αυτού του τύπου τοποθετούνται σε μεγάλα και επίπεδα προϊόντα έγχυσης όπου η στρέβλωση επιβάλλεται να είναι η ελάχιστη δυνατή. Γενικά, περιορίζουν την ανάπτυξη υπολειμματικών τάσεων στο εσωτερικό του παραχθέντος προϊόντος έγχυσης απαιτώντας, εντούτοις, πρόσθετη μετα-επεξεργασία για την απομάκρυνσή τους από αυτό.



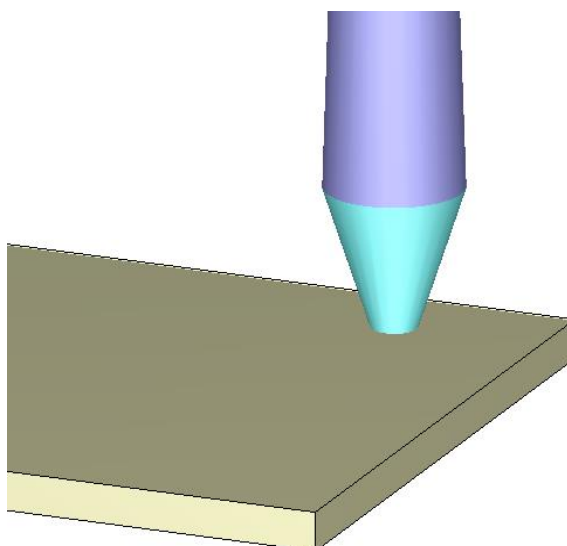
Σχήμα 2-20. Σκαριφηματική απόδοση μιας κοινής πύλης εισόδου τύπου **film**.

- ❖ Πύλες εισόδου που απομακρύνονται αυτόματα από το τελικό προϊόν έγχυσης (*automatically trimmed gates*)

Σε αυτή την κατηγορία εμπίπτουν οι κάτωθι τύποι πυλών εισόδου :

- *Pin gate*

Αυτός ο τύπος πύλης εισόδου (**Σχήμα 2-21**) είναι ο πλέον κατάλληλος προς χρήση για την παραγωγή μικρής κλίμακας προϊόντων έγχυσης των οποίων τα τοιχώματα είναι λεπτά. Άλλωστε, η χρήση του ενδείκνυται όταν απαιτούνται πολλαπλές πύλες εισόδου ανά εξάρτημα προκειμένου να εξασφαλιστεί η συμμετρική πλήρωση της εκάστοτε κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα ή για να μειωθούν οι μεγάλες διαδρομές ροής και να διασφαλιστεί η συμπίεση του τήγματος σε όλες τις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης.



Σχήμα 2-21. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου **pin**. Επί του πρακτέου, η προτεινόμενη διάμετρος των πυλών εισόδου αυτού του τύπου κυμαίνεται από το **40 %** έως το **80 %** του πάχους των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου, ενώ το μήκος τους ποικίλει από **0.5** έως **1 mm**.

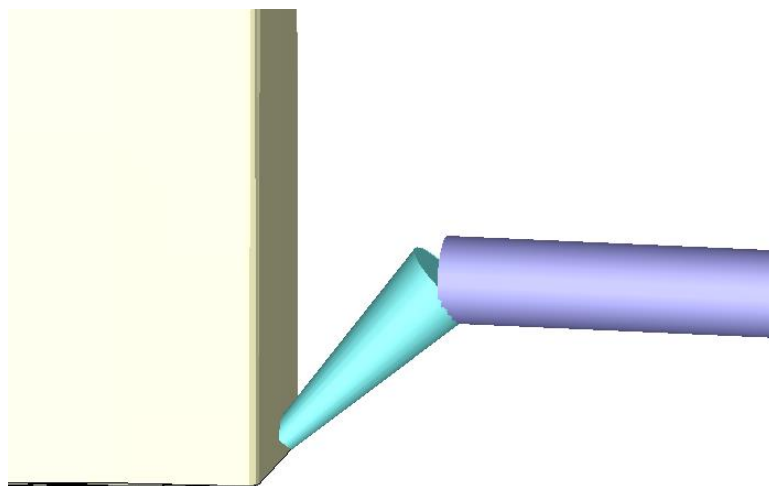
Αναμφισβήτητα, οι πύλες εισόδου αυτού του τύπου υπερτερούν έναντι των υπολοίπων ως προς :

- ✓ την ευελιξία αναφορικά με την τοποθέτησή τους στο προς μορφοποίηση αντικείμενο,
- ✓ την αυτόματη απομάκρυνσή τους από το τελικό προϊόν έγχυσης κατά το άνοιγμα του καλουπιού,
- ✓ την ελαχιστοποίηση του ίχνους που αφήνουν επί του τελικού προϊόντος έγχυσης μετά την απομάκρυνσή τους από αυτό και
- ✓ το χαμηλό κόστος κατασκευής.

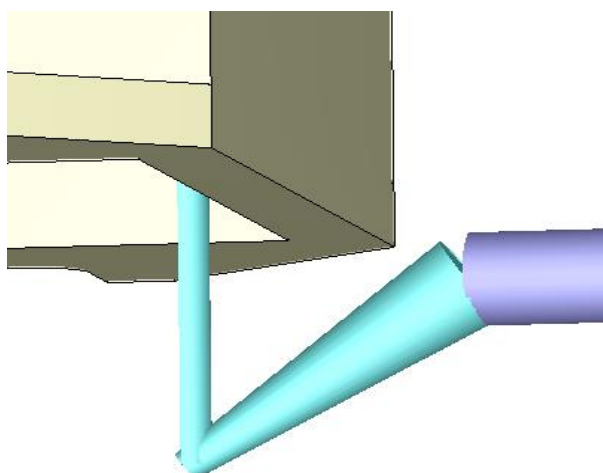
Εντούτοις, από την χρήση τους προκύπτουν και κάποια προβλήματα, όπως η κακή συμπίεση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, η μεγέθυνση της διαδρομής ανοίγματος του καλουπιού και η αυξημένη ανάγκη για τακτική συντήρησή τους.

- *Submarine (Tunnel) gate*

Μία πύλη εισόδου τύπου **tunnel** έχει κωνικό σχήμα, με το μικρότερο άκρο του κώνου να συνδέεται με το προς μορφοποίηση αντικείμενο (**Σχήμα 2-22**). Συνήθως, αυτές οι πύλες εισόδου χρησιμοποιούνται σε τυποποιημένες μήτρες ψυχρού δρομέα δύο πλακών όπου παρέχεται η αυτόματη απομάκρυνση των πυλών από το παραχθέν προϊόν έγχυσης κατά την εξόλκευσή του. Πέραν τούτων, χάρη στην αυτόματη απομάκρυνσή τους μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν σε μια ευρεία γκάμα καλουπιών με διάφορους τύπους αγωγών διανομής (runners). Παρ' όλα αυτά, αυτού του τύπου οι πύλες εισόδου είναι δυσκολότερο να κατασκευαστούν μέσω μηχανουργικής κατεργασίας, ενώ το μικρό άνοιγμα του καλουπιού μπορεί να προκαλέσει πρώωρη στερεοποίηση του πολυμερούς τήγματος εντός της πύλης εισόδου.



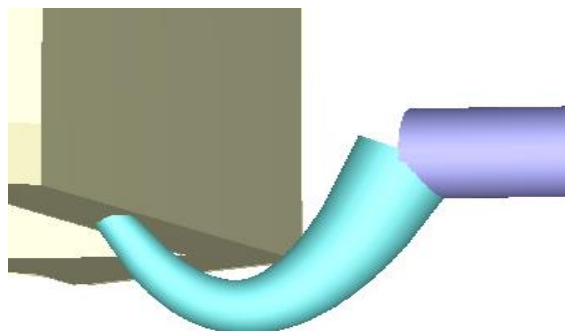
Σχήμα 2-22. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου **tunnel**. Ως παραλλαγή αυτού του τύπου θεωρείται η πύλη εισόδου τύπου tunnel συνοδευόμενη από έναν πείρο εξόλκευσης (ejection pin) προκειμένου να ελαχιστοποιείται το ίχνος από την απομάκρυνση της πύλης επί του τελικού προϊόντος έγχυσης (**Σχήμα 2-23**).



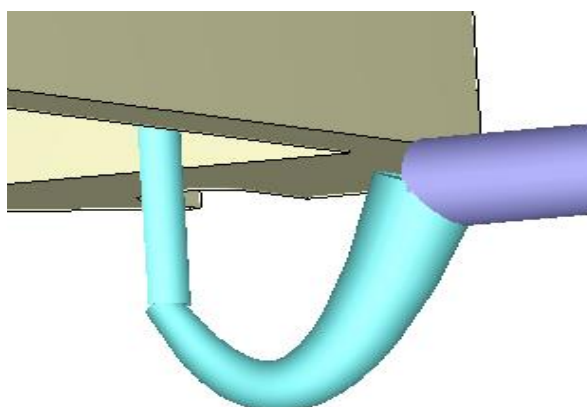
Σχήμα 2-23. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου **tunnel** με πείρο εξόλκευσης.

- *Cashew (Banana) gate*

Οι πύλες εισόδου τύπου **cashew** (**Σχήμα 2-24**) χρησιμοποιούνται για να τοποθετηθούν σε εκείνες τις περιοχές του προς μορφοποίηση αντικειμένου οι οποίες δε δύνανται να προσεγγιστούν από τις τυπικές πύλες εισόδου τύπου **tunnel**. Ωστόσο, το καμπύλο σχήμα των πυλών εισόδου τύπου cashew απαιτεί το χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό να υπόκειται σε σημαντική παραμόρφωση κατά την εξόλκευση του παραχθέντος αντικειμένου. Εξάλλου, αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο είναι απαραίτητο το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο πολυμερές να έχει καλή ολκιμότητα, δηλαδή να είναι εύπλαστο.



Σχήμα 2-24. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου **cashew**. Ως παραλλαγή αυτού του τύπου θεωρείται η πύλη εισόδου τύπου **cashew** συνοδευόμενη από έναν πείρο εξόλκευσης (ejection pin) προκειμένου να ελαχιστοποιείται το ίχνος από την απομάκρυνση της πύλης επί του τελικού προϊόντος έγχυσης (**Σχήμα 2-25**).



Σχήμα 2-25. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής πύλης εισόδου τύπου **cashew** με πείρο εξόλκευσης.

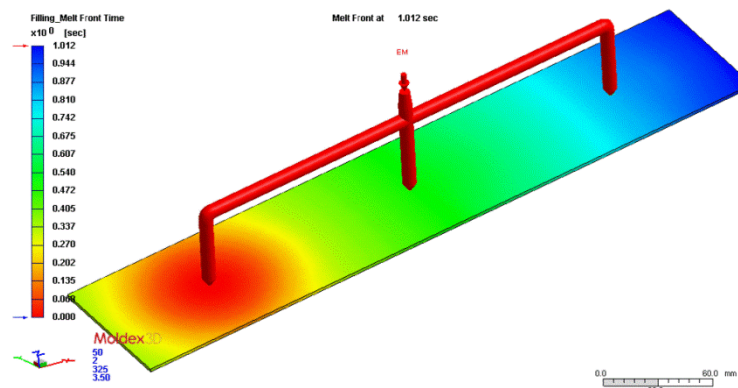
Ομολογουμένως, οι πύλες εισόδου αυτού του τύπου βρίσκουν εφαρμογή στην παραγωγή προϊόντων έγχυσης των οποίων η αισθητική απαίτηση είναι υψηλή. Επίσης, όταν τα παραχθέντα προϊόντα έγχυσης παρουσιάζουν προβλήματα συναρμολόγησης εξαιτίας της χρήσης πυλών εισόδου τύπου **edge**, τότε στους επικείμενους κύκλους έγχυσης ενδείκνυται η αντικατάσταση αυτών των πυλών εισόδου με πύλες εισόδου τύπου **cashew**.

Κοντά στα υπόλοιπα, όπως συμβαίνει και με τις πύλες εισόδου τύπου **tunnel**, οι πύλες εισόδου τύπου **cashew** προτιμώνται για την αυτόματη απομάκρυνσή τους από το παραχθέν προϊόν έγχυσης. Οποσδήποτε, η μηχανουργική κατεργασία των πυλών εισόδου τύπου **cashew** με ή χωρίς πείρο εξόλκευσης δεν είναι εύκολη υπόθεση με αποτέλεσμα να υπάρχει η ανάγκη για χρησιμοποίηση ξεχωριστών ενθέτων στο καλούπι.

- *Valve gate*

Οι θερμές πύλες εισόδου τύπου **valve** συνοδεύονται από θερμούς αγωγούς διανομής (**Σχήμα 2-26**) οι οποίοι παρέχουν σε αυτές κατ' εξακολούθηση έλεγχο προκειμένου να διατηρείται στο εσωτερικό τους η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) στους επιθυμητούς °C. Χάρη σε αυτή τη δυνατότητα

είναι εφικτό από τη μία να εξαλειφθούν οι γραμμές συγκόλλησης (weld lines) και οι γραμμές ροής (flow lines) από το μορφοποιούμενο αντικείμενο και από την άλλη να μειωθεί η πίεση έγχυσης (injection pressure) με αποτέλεσμα την πιο ομαλή πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα.

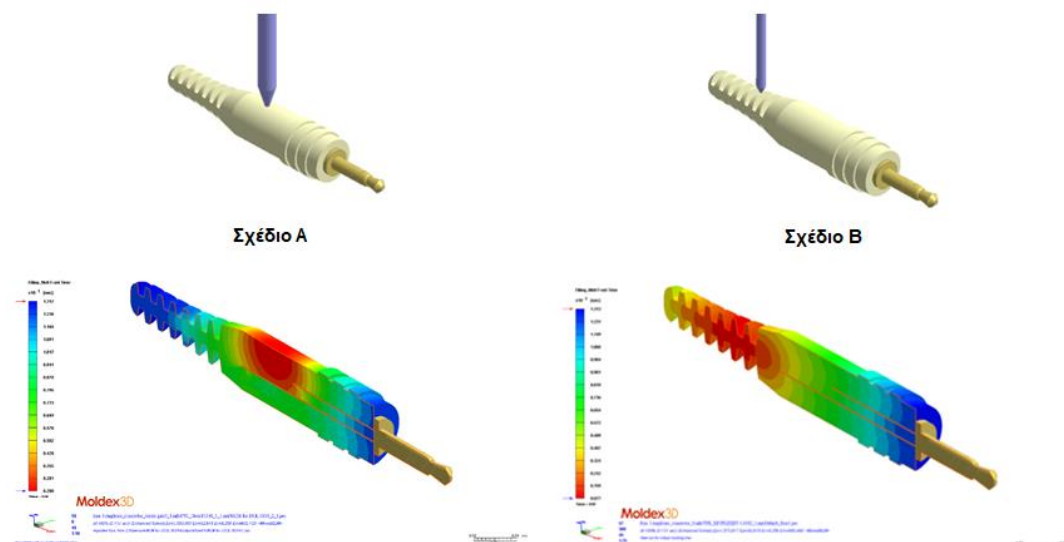


Σχήμα 2-26. Σκαριφηματική απόδοση μιας τυπικής θερμής πύλης εισόδου τύπου valve.

Οι εν λόγω πύλες εισόδου χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή μεγάλων προϊόντων έγχυσης με υψηλές αισθητικές απαιτήσεις, ιδίως δε όταν το χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό κατά την έγχυση είναι αυξημένου ιξώδους. Παρ' όλα αυτά, πρόκειται για πύλες εισόδου περίπλοκης δομής με την διαδικασία κατασκευής τους να είναι αυξημένης δυσκολίας και το αντίστοιχο κόστος αρκετά έως πολύ υψηλό.

Σε γενικές γραμμές, οι πύλες εισόδου επηρεάζουν σημαντικά το παραγόμενο προϊόν έγχυσης αναλόγως του τύπου, του μεγέθους και της τοποθέτησης αυτών στο καλούπι του. Εξάλλου, αυτός είναι ο λόγος που τόσο η επιλογή των κατάλληλων πυλών εισόδου όσο και η ορθή τοποθέτησή τους στο εκάστοτε καλούπι αποτελούν κάθε φορά κομβικής σημασίας ζητήματα. Αποτελεί δε κοινό τόπο ότι ο βέλτιστος σχεδιασμός των πυλών εισόδου είναι πολύ σημαντικός όχι μόνο για τον έλεγχο του μοτίβου πλήρωσης (filling pattern), δηλαδή για τον έλεγχο της κίνησης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού κατά το γέμισμά της με υλικό, αλλά και για την διασφάλιση της διαστατικής ακρίβειας του παραγόμενου προϊόντος έγχυσης. Γι' αυτό, άλλωστε, πριν τον σχεδιασμό των πυλών εισόδου και την τοποθέτηση αυτών στο καλούπι συυπολογίζονται :

- το μήκος ροής (L),
- η ισορροπία της ροής (flow balance), όπως επιχειρείται παραδείγματος χάριν για την κοιλότητα μορφοποίησης που αντιστοιχεί στο προϊόν έγχυσης στο **Σχήμα 2-27**, καθώς αυτή επηρεάζει την στρέβλωση του τελικού προϊόντος,

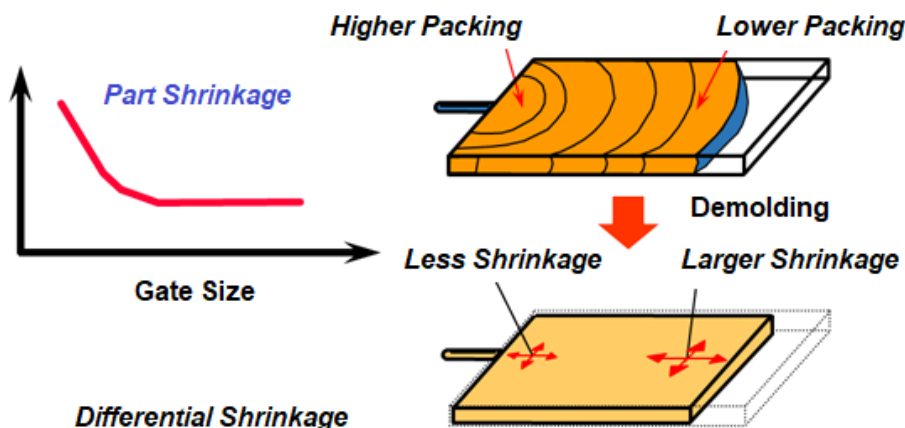


Σχήμα 2-27. Η κοιλότητα μορφοποίησης που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο προϊόν έγχυσης πληρώνεται με πολυμερές τήγμα πιο ισορροπημένα όταν η πύλη εισόδου τοποθετείται στο καλούπι σύμφωνα με το σχέδιο A (αριστερά) από ότι με το σχέδιο B (δεξιά). Στην πρώτη περίπτωση, δεδομένου ότι η πίεση του πολυμερούς τήγματος κατανέμεται ομαλά σε όλη την έκταση της κοιλότητας μορφοποίησης, η ογκομετρική συρρίκνωση του μορφοποιημένου αντικειμένου αναμένεται μικρότερη και πιο ομοιόμορφη. Κατά συνέπεια, η επικείμενη στρέβλωση του τελικού προϊόντος θα είναι αντιστοίχως μικρότερης έκτασης και πιο ομοιογενής σε αντίθεση με τη δεύτερη περίπτωση.

- η επίδραση στη συμπίεση του πολυμερούς τήγματος (packing effect) που μεταφράζεται σε ανάγκη για όψιμη στερεοποίηση του τήγματος τόσο εντός των πυλών εισόδου (frozen gates) όσο και εντός του συστήματος διανομής,
- οι τυχόν παύσεις ή επιβραδύνσεις της ροής (flow hesitation) και
- η εμφάνιση του τελικού προϊόντος έγχυσης.

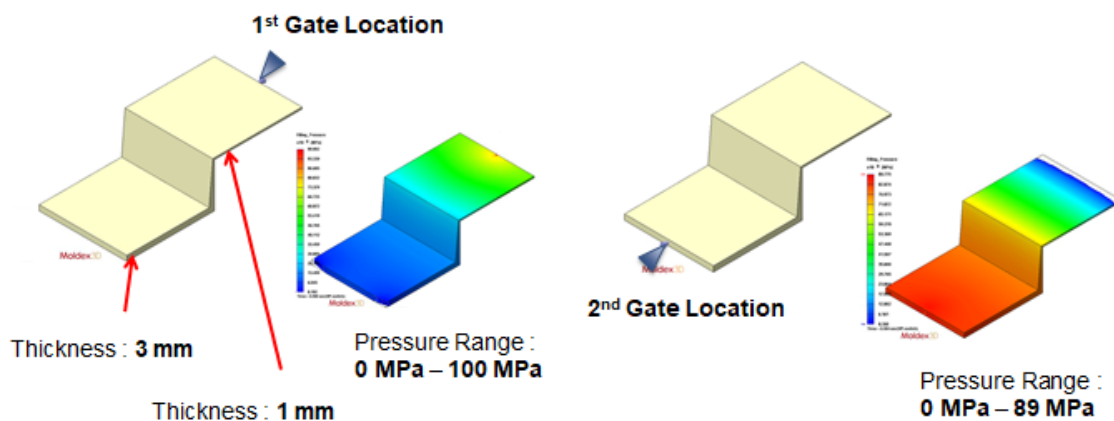
Τέλος, αξίζει να γίνουν οι κάτωθι σχετικές παρατηρήσεις, μερικές εκ των οποίων είναι καθαρά εμπειρικές :

- 1) Όσο μικρότερες είναι οι πύλες εισόδου, τόσο γρηγορότερα αυτές ψύχονται. Όταν μία πύλη εισόδου τελικά παγώνει, τότε είναι αδύνατο να προστεθεί επιπλέον τήγμα πολυμερούς στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού ενόσω η φάση της βαθμιαίας ανάπτυξης πίεσης συγκράτησης (packing pressure) στο υδαρές πολυμερές βρίσκεται σε εξέλιξη. Κάτι τέτοιο έχει ως άμεση συνέπεια το τελικό προϊόν έγχυσης να παρουσιάζει συρρίκνωση μεγαλύτερου βαθμού. Αντιθέτως, όσο μεγαλύτερες είναι οι πύλες εισόδου, τόσο αργότερα αυτές ψύχονται, γεγονός το οποίο συντελεί στην αύξηση της χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης.
- 2) Εντός της κοιλότητας μορφοποίησης οι περιοχές του πολυμερούς τήγματος που βρίσκονται πιο κοντά στις πύλες εισόδου συμπιέζονται καλύτερα και συνεπακόλουθα συρρικνώνονται λιγότερο στο τελικό προϊόν έγχυσης εν αντιθέσει με ό,τι συμβαίνει στις πιο απομακρυσμένες περιοχές (**Σχήμα 2-28**). Συνεπώς, αυτή η μεταβλητότητα της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς τήγματος είναι η γενεσιουργός αιτία εμφάνισης στρέβλωσης στο τελικό προϊόν έγχυσης.



Σχήμα 2-28. Μεταβλητότητα της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς τήγματος στην περιοχή πλησίον της τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού και στις πιο απομακρυσμένες περιοχές.

- 3) Η τοποθέτηση των πυλών εισόδου ενδείκνυται να γίνεται σε εκείνα τα τοιχώματα του προς μορφοποίηση αντικειμένου που έχουν το μεγαλύτερο πάχος. Και αυτό γιατί μέσω της συγκεκριμένης τακτικής αφενός μεν μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα της συμπίεσης (packing efficiency), αφετέρου δε αποσοβείται ο κίνδυνος εμφάνισης *ελλιπούς πλήρωσης (short shot)* εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα που εικονογραφείται στο **Σχήμα 2-29** και αποτυπώνει τι ακριβώς συμβαίνει όταν ή τοποθέτηση μιας πύλης εισόδου γίνεται στα λεπτότερα τοιχώματα του προς μορφοποίηση αντικειμένου και τι ακριβώς συμβαίνει στην αντίθετη περίπτωση που είναι και η ενδεδειγμένη.



Σχήμα 2-29. Τοποθέτηση της πύλης εισόδου στο λεπτότερο τοίχωμα του προς μορφοποίηση αντικειμένου (πάχος 1 mm – αριστερά) και τοποθέτηση της πύλης εισόδου στο παχύτερο τοίχωμά του (πάχος 3 mm – δεξιά). Στην πρώτη περίπτωση η κατανομή της πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού δεν είναι ομοιόμορφη εξαιτίας της πτώσης πίεσης στην κοιλότητα μορφοποίησης που οφείλεται στην ταχύτερη ψύξη του πολυμερούς τήγματος στο λεπτότερο τοίχωμα. Τουναντίον, στη δεύτερη περίπτωση η κατανομή της πίεσης γίνεται ομοιόμορφα οπότε και επιτυγχάνεται η βέλτιστη αποδοτικότητα της συμπίεσης.

- 4) Όταν δεν συντρέχει κάποιος σοβαρός λόγος, καλό είναι να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν λιγότερες πύλες εισόδου στο καλούπι. Και αυτό γιατί μειωμένος αριθμός

πυλών εισόδου συνεπάγεται αφενός μεν χαμηλότερο κατασκευαστικό κόστος για το καλούπι, αφετέρου δε λιγότερα μέτωπα ροής που οδηγούν νομοτελειακά σε λιγότερες γραμμές συγκόλλησης (weld lines) στο τελικό προϊόν έγχυσης.

Ως εκ τούτου, ένα ασφαλές κριτήριο επιλογής του κατάλληλου αριθμού πυλών εισόδου μπορεί να είναι η αναλογία μήκους ροής (flow length ratio). Πρόκειται για το πηλίκο του μήκους ροής (L) του πολυμερούς τήγματος προς το πάχος των τοιχωμάτων (t) του προς μορφοποίηση αντικειμένου και εκφράζεται σε ποσοστιαίες μονάδες. Δεδομένου ότι η αναλογία L/t για τα γενικά βιομηχανικά πολυμερή είναι περίπου **100** ποσοστιαίες μονάδες και εφόσον η μέγιστη αναλογία μήκους ροής υπερβαίνει αυτήν την τιμή μετρούμενη από την πύλη εισόδου έως την περιοχή της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού που γεμίζει τελευταία με υλικό, οι πύλες εισόδου δύνανται να προσαυξάνονται ως εξής :

Πίνακας 2-4. Προτεινόμενος αριθμός πυλών εισόδου προς τοποθέτηση σε ένα καλούπι συναρτήσει της εκάστοτε μέγιστης αναλογίας μήκους ροής (L/t). Γενικά, όσο περισσότερες είναι οι τοποθετούμενες πύλες εισόδου τόσο περισσότερο μειώνεται το μήκος ροής.

Μέγιστη αναλογία μήκους ροής (L/t)	Πάχος τοιχωμάτων προϊόντος έγχυσης	Παραγωγή προϊόντος έγχυσης	Αριθμός πυλών εισόδου
< 100 ποσοστιαίες μονάδες (μικρό μήκος ροής)	Μεγάλο	Εύκολη	1
100 έως 200 ποσοστιαίες μονάδες (μεσαίο μήκος ροής)	Κανονικό	Σχετικά εύκολη	2
200 έως 300 ποσοστιαίες μονάδες (μεγάλο μήκος ροής)	Μικρό	Δύσκολη, ανάγκη ειδικών θεωρήσεων	3
300 έως 400 ποσοστιαίες μονάδες (πολύ μεγάλο μήκος ροής)	Πολύ μικρό	Πολύ δύσκολη, ανάγκη ειδικού εξοπλισμού	4

Σημειωτέον ότι το μέγιστο μήκος ροής που μπορεί να επιτευχθεί για ένα συγκεκριμένο πολυμερές δομικό υλικό εξαρτάται από την παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Υπό σταθερή ταχύτητα ροής (flow rate), θερμοκρασία καλουπιού (mold temperature) και θερμοκρασία πολυμερούς τήγματος (melt temperature), το μήκος ροής αυξάνεται καθώς η πίεση έγχυσης (injection pressure) αυξάνεται λόγω της αυξανόμενης δύναμης που ασκείται για την πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα. Από την άλλη, διατηρώντας την πίεση έγχυσης σταθερή, το μήκος ροής μπορεί επίσης να αυξηθεί έπειτα από αύξηση των θερμοκρασιών καλουπιού και τήγματος. Με την αύξηση αυτών των θερμοκρασιών, διευκολύνεται η ροή του τήγματος λόγω της μείωσης του ιξώδους του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς.

Συνεπώς, κατά τον σχεδιασμό ενός προϊόντος έγχυσης, πέραν του πάχους των τοιχωμάτων του που αναφέρθηκε προηγουμένα, πρέπει να λαμβάνονται επίσης

υπόψιν το πολυμερές δομικό υλικό που επίκειται να χρησιμοποιηθεί κατά την έγχυση σε συνδυασμό με την κατάλληλη παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας και τον ιδανικό αριθμό των πυλών εισόδου που τοποθετούνται στην αντίστοιχη κοιλότητα μορφοποίησης.

2.4.2.3 Σχεδιασμός του Συστήματος Εξαέρωσης

Ο κατάλληλος εξαερισμός αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική παραγωγή ποιοτικών προϊόντων έγχυσης. Κατά τη διαδικασία της έγχυσης, ο αέρας που ενυπάρχει ήδη στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού χρειάζεται έναν άμεσο τρόπο διαφυγής από αυτό καθώς σε αντίθετη περίπτωση το πολυμερές τήγμα συμπιέζει και παγιδεύει αυτόν τον αέρα εντός της κοιλότητας. Ένας συνδυασμός πίεσης, τήξης και υψηλής θερμοκρασίας δύναται να προκαλέσει αυτανάφλεξη του οξυγόνου προκαλώντας τοιουτοτρόπως καύσεις, σημάδια μειωμένης στιλπνότητας και ρωγμές πίεσης στο τελικό προϊόν έγχυσης. Ο κακός εξαερισμός από κοινού με το φαινόμενο της αυτανάφλεξης του οξυγόνου δύνανται επίσης να προκαλέσουν φθορά στο καλούπι στις περιοχές πέριξ της γραμμής διαχωρισμού του με αποτέλεσμα την κατά τόπους διόγκωση του τελικού προϊόντος έγχυσης (δημιουργία προεκτάματος).

Από την άλλη πλευρά, η μείωση της ταχύτητας ροής (flow rate) δίδει μεγαλύτερο χρονικό περιθώριο στον αέρα ώστε να διαφύγει από την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού μέσω των αεραγωγών. Μολοντούτο, κάτι τέτοιο ενδέχεται να οδηγήσει σε λειψά αντικείμενα εξαιτίας της ανεπαρκούς πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης. Και αυτό γιατί καθώς η ταχύτητα ροής επιβραδύνεται, η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος μειώνεται και το ιξώδες του αυξάνεται προκαλώντας την πρώιμη στερεοποίηση του τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης χωρίς αυτή να έχει γεμίσει πλήρως με πολυμερές.

Επιπρόσθετα, η ακατάλληλη πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης μπορεί επίσης να παγιδεύει θύλακες αέρος μεταξύ δύο μετώπων ροής. Οι αναλύσεις ροής μέσω πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα λογισμικά που μπορούν να προβλέψουν τα κρίσιμα σημεία στα οποία είναι πιθανό να εμφανιστούν σημεία εγκλωβισμένου αέρα, μπορούν να συντελέσουν στην σωστή τοποθέτηση των σημείων εξαερισμού στο καλούπι.

Πιο συγκεκριμένα, ο τυπικός εξαερισμός του καλουπιού περιλαμβάνει περάσματα μεταξύ των μηχανικών στοιχείων του καλουπιού μέσω των οποίων μπορεί να διαφύγει ο αέρας. Για παράδειγμα, τυπικές θέσεις εξαερισμού μπορεί να τοποθετούνται μεταξύ :

- ✓ των γραμμών διαχωρισμού ή/και
- ✓ των εξολκέων ή/και
- ✓ των πείρων ή/και
- ✓ των στοιχείων ολίσθησης όπως οι ολισθητήρες και τα έκκεντρα.

Όταν, μάλιστα, οι διαχωριστικές γραμμές και τα συρόμενα στοιχεία δεν επιτρέπουν επαρκή εξαερισμό, η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού μπορεί να χωριστεί σε ένθετα για να αυξηθεί ο αριθμός των πιθανών περιοχών εξαερισμού. Παρά ταύτα, η επιφανειακή τάση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς περιορίζει το συνιστώμενο μέγεθος των αεραγωγών που πρέπει να χρησιμοποιούνται σε ένα καλούπι. Εξάλλου, ο ισχύων γενικός κανόνας είναι ότι όσο χαμηλότερο είναι το ιξώδες του πολυμερούς, τόσο μικρότερο είναι το συνιστώμενο άνοιγμα εξαερισμού. Στην πραγματικότητα, τα βιομηχανικά πρότυπα για το μέγεθος του εξαερισμού καθορίζονται από το προς έγχυση υλικό στο καλούπι. Κοντά στα άλλα, το ιξώδες είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του

πολυμερούς τήγματος γι' αυτό και το ιξώδες του υλικού που ρέει σε μια μικρή εξαέρωση αλλάζει σε συμφωνία με την πίεση έγχυσης.

Συν τοις άλλοις, τα αέρια που παράγονται κατά τη διαδικασία της έγχυσης επηρεάζουν επίσης τον εξαερισμό. Υλικά όπως το πολυαμίδιο (PA), το σουλφίδιο του πολυφαινυλενίου (PPS), η πολυαιθερική κετόνη (PEEK), το πολυανθρακικό (PC) με ίνες γυαλιού, το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), το πολυοξυμεθυλένιο (POM) και υλικά με επιβραδυντική καύση παράγουν αέρια κατά τη χύτευση. Αυτή η παραγωγή αερίων δημιουργεί ελαιώδεις αποθέσεις που μολύνουν τις αύλακες, τα κανάλια και την εξωτερική επιφάνεια της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού, προκαλώντας ελαττώματα στο τελικό προϊόν έγχυσης.

2.4.2.3.1 Μη Τυποποιημένες Λύσεις Εξαερισμού

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν κάποιες οδηγίες αναφορικά με τον σχεδιασμό και την μηχανουργική καταργασία των αεραγωγών με γνώμονα τη βελτιστοποίηση του συστήματος εξαερισμού ενός καλουπιού, τα τυπικά συστήματα εξαερισμού προσφέρουν περιορισμένη ικανότητα εξαερισμού με χαμηλή απόδοση. Εντούτοις, υπάρχουν μερικές μη τυποποιημένες λύσεις εξαερισμού οι οποίες δύνανται να συνεπικουρούν τον εξαερισμό της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με τελικό στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του καλουπιού.

Παράδειγμα μιας τέτοιας λύσης αποτελεί η εισαγωγή πορωδών πυροσυσσωματωμένων υλικών στην κοιλότητα μορφοποίησης προκειμένου αυτά να λειτουργούν ως εξαερισμός. Κάτι τέτοιο, ωστόσο, μειώνει την πίεση έγχυσης (injection pressure) και συνεπακόλουθα περιορίζει τον ρυθμό αποβολής σκάρτου υλικού (scrap). Υπογραμμίζεται δε ότι όσο πυκνότερο είναι το πορώδες υλικό, τόσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα εξαερισμού.

Οπωσδήποτε, οι κατάλληλοι αγωγοί εξαέρωσης χρειάζεται να κατασκευάζονται έτσι ώστε να μπορούν να δεσμεύουν τα αέρια. Ο δε συχνός καθαρισμός των αεραγωγών κρίνεται απαραίτητος καθώς οι εναποθέσεις αερίων συσσωρεύουν και εμποδίζουν μερικώς ή τελείως την απομάκρυνση από την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού τόσο του αέρα που προϋπάρχει σε αυτή όσο και των αερίων που παράγονται κατά την έγχυση του πολυμερούς δομικού υλικού στο εσωτερικό της.

Ακόμη, η τεχνολογία κενού καταφέρνει να αφαιρεί τον αέρα από την κοιλότητα μορφοποίησης προτού εκκινήσει η διαδικασία της έγχυσης. Αν και αυτό αντιμετωπίζει το πρόβλημα ανάντη, προκαλεί επίσης περιορισμούς στην εφαρμογή και την απόδοση. Επί παραδείγματι, για να απαχθεί ο αέρας από την κοιλότητα μορφοποίησης και να δημιουργηθεί κενό (μη ύπαρξη αέρος εντός της κοιλότητας), η κοιλότητα πρέπει να είναι πλήρως σφραγισμένη. Βέβαια, κάτι τέτοιο είναι δαπανηρό και ενίοτε ανέφικτο σε καλούπια με συρόμενα στοιχεία. Παρότι η τεχνολογία κενού μπορεί να λύσει προβλήματα αέρα, δεν είναι το ίδιο αποτελεσματική ως προς την αντιμετώπιση των αερίων που παράγονται κατά την πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα. Τούτο συμβαίνει διότι η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει πριν την πλήρωση, οπότε τα αέρια δεν μπορούν να βρουν οδό διαφυγής από την κοιλότητα μορφοποίησης.

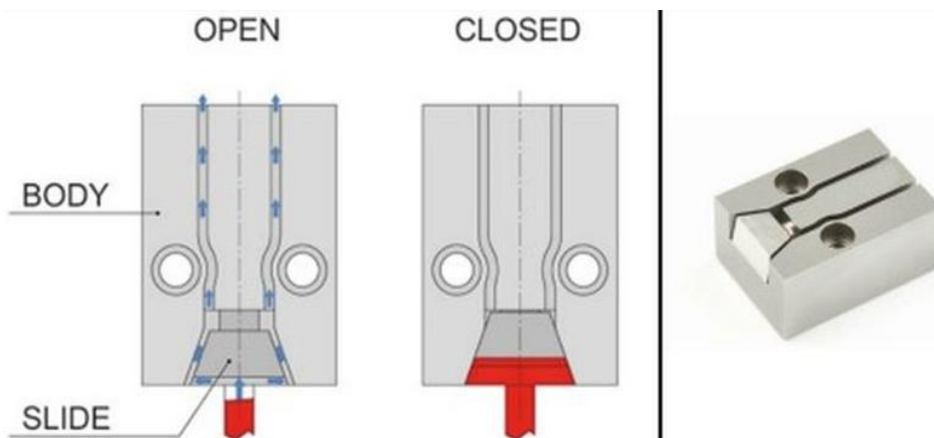
Τέλος, ένα σύστημα υπερχείλισης, ήτοι μια περιοχή συνδεδεμένη με την κοιλότητα μορφοποίησης μέσω ενός διαύλου, μπορεί να δημιουργηθεί με μηχανουργική καταργασία μιας πύλης εξόδου (gate) η οποία συνδέει το τελευταίο σημείο πληρώσεως της κοιλότητας με έναν ψυχρό δρομέα που καταλήγει σε μια περιοχή εξαερισμού με ένα άνοιγμα διαμέτρου περίπου **0.1 mm**. Κατόπιν, ένα αυλάκι κατεργάζεται γύρω από τον εξαερισμό για τη συλλογή των αερίων και την απομάκρυνση αυτών από το καλούπι. Κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα, ο αέρας μπορεί να ρέει μέσα από την πύλη, τον ψυχρό δρομέα, την οπή εξαερισμού και την

αύλακα εξαερισμού. Το δε πολυμερές παγώνει στην οπή και αφαιρείται μετά από κάθε κατασκευαστικό κύκλο. Ο σχεδιαστής του καλουπιού μπορεί αρχικά να θέσει το ύψος του εξαερισμού ίσο με **0.1 mm** και το μήκος αυτού ίσο με **10 mm** και ακολούθως να ρυθμίσει τις τιμές αυτές ανάλογα με τις προκείμενες ανάγκες. Σε αυτό το σημείο υπογραμμίζεται ότι το κύριο πλεονέκτημα ενός συστήματος υπερχειλίσης είναι η δυνατότητα υπέρβασης των ορίων εξαέρωσης. Τέλος, η πιθανή πρόκληση προεκτάματος (flash) στην περιοχή υπερχειλίσης δεν πρέπει να συνιστά πρόβλημα, αφού θα αποκοπεί από την κοιλότητα μορφοποίησης με το πέρας του κύκλου της έγχυσης.

2.4.2.3.2 Εναλλακτικές Λύσεις Εξαερισμού

Οι δυναμικές βαλβίδες εξαερισμού εν αντιθέσει με τις αντίστοιχες στατικές είναι ένα εναλλακτικό σύστημα εξαερισμού που μπορεί να είναι είτε εξωτερικό (σύνδεση μέσω ενός καναλιού στον ψυχρό δρομέα του καλουπιού εφόσον αυτός υπάρχει) είτε ενσωματωμένο στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού. Τέτοιου είδους βαλβίδες είναι σχεδιασμένες κατά τέτοιον τρόπο που να επιτρέπουν τόσο στον εγκλωβισμένο ατμοσφαιρικό αέρα όσο και στα παραγόμενα αέρια κατά την έγχυση να εγκαταλείπουν ταχέως την κοιλότητα μορφοποίησης. Για την ακρίβεια, αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός αγωγού εξαερισμού λίγων τετραγωνικών χιλιοστών τα οποία, εντούτοις, είναι αρκετά μεγάλα ώστε να ξεπεράσουν τα γεωμετρικά όρια των τυποποιημένων αυλακώσεων εξαερισμού.

Αναφορικά με την εξωτερική βαλβίδα εξαέρωσης του καλουπιού, αυτή αποτελείται από ένα σώμα που στεγάζει έναν οδηγό για έναν ολισθητήρα. Τόσο το σώμα όσο και ο οδηγός έχουν σχεδιαστεί για να εγγυώνται ένα κωνικό κλείσιμο όταν κινείται το ολισθαίνον στοιχείο. Ένα ελατήριο διατηρεί τον ολισθητήρα σε ανοικτή θέση για να δημιουργήσει έναν αυξημένο όγκο εξαερισμού για την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού. Το σώμα περιλαμβάνει επίσης μεγάλα κανάλια εξαερισμού συνδεδεμένα στην περιοχή εξαερισμού μεταξύ του σώματος και του ολισθητήρα (**Σχήμα 2-30**).



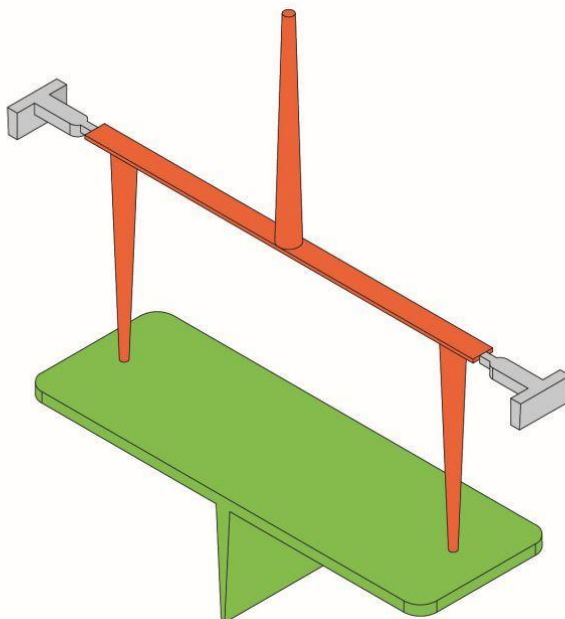
Σχήμα 2-30. Το σώμα μιας εξωτερικής βαλβίδας εξαερισμού που φιλοξενεί τον οδηγό για τον ολισθητήρα και περιέχει μεγάλα κανάλια εξαερισμού συνδεδεμένα στην περιοχή εξαερισμού μεταξύ του σώματος και του ολισθητήρα. Αριστερά : Σκαριφηματική απόδοση της διάταξης (σε τομή). Δεξιά : Η πραγματική διάταξη.

Η βαλβίδα εξαερισμού συνδέεται με την κοιλότητα μορφοποίησης ή τον ψυχρό δρομέα με μια αυλακώση που επιτρέπει στα αέρια να ρέουν από την κοιλότητα μορφοποίησης στη βαλβίδα. Όταν το εγχυμένο πολυμερές τήγμα φτάσει στα σημεία εξαερισμού, ασκεί πίεση στην ολίσθηση συμπιέζοντας το ελατήριο, οπότε προκαλείται κωνικό κλείσιμο και εμποδίζεται το τήγμα να εισέλθει στη βαλβίδα. Οι αυλακώσεις εξαερισμού στο σώμα της βαλβίδας συνδέονται με τον ανοιχτό χώρο εξαερισμού με μηχανουργικά κατεργασμένα

κανάλια. Αυτά τα κανάλια πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθύγραμμα ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση εξαερισμού της βαλβίδας. Η ίδια η βαλβίδα μπορεί να τοποθετηθεί σε διαφορετικές θέσεις στο καλούπι ώστε να εξασφαλιστούν διάφορα οφέλη και να αυξηθεί, εν τέλει, η απόδοση του καλουπιού.

Το κύριο πλεονέκτημα του εξωτερικού εξαερισμού του καλουπιού στην πλευρά του δρομέα είναι η ικανότητα απαγωγής των αερίων κατά τη διάρκεια της έγχυσης του πολυμερούς τήγματος στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης. Εκεί, το πολυμερές τήγμα ασκεί συνήθως πίεση στα αέρια και με μια εξωτερική προσέγγιση εξαερισμού, τα αέρια ρέουν φυσικά εκεί όπου η οπισθέλκουσα δύναμη είναι χαμηλότερη. Για παράδειγμα, η αντίσταση στη ροή στο τέλος του ψυχρού δρομέα είναι πολύ χαμηλή συγκριτικά με την αντίσταση στη ροή μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης όπου ο αριθμός των αεραγωγών είναι περιορισμένος.

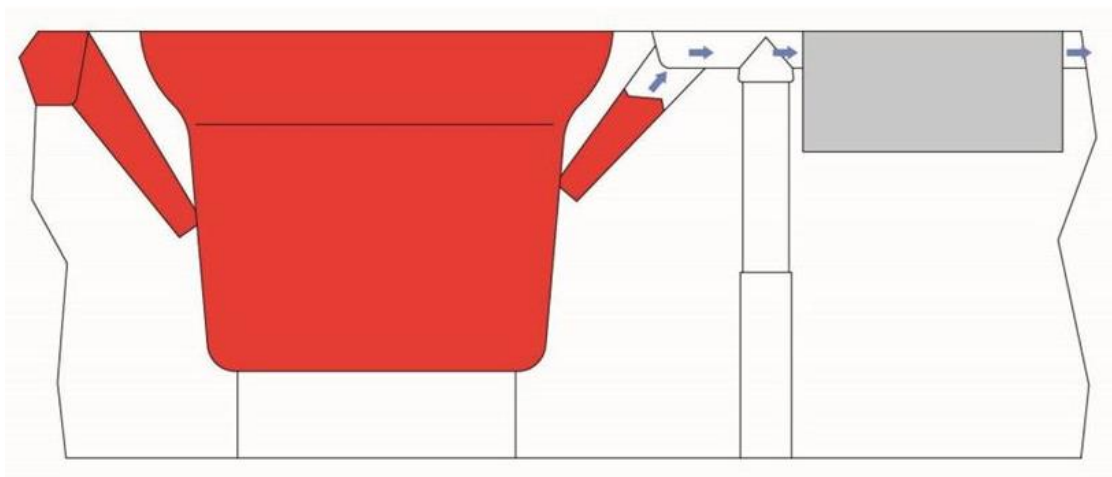
Ο εξαερισμός στην πλευρά του δρομέα μπορεί επίσης να μειώσει την αντίθλιψη του αέρα, επειδή ο αέρας στον κάθετο κανάλι (sprue) αλλά και στον ψυχρό δρομέα αποβάλλεται εντελώς αντί να συμπιεστεί μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης. Σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli, η αύξηση στην ταχύτητα ενός ρευστού συμβαίνει ταυτόχρονα με μια μείωση στην πίεσή του. Επομένως, βάσει αυτής της αρχής, η ταχύτητα του αέρα που ρέει διαμέσου του ψυχρού δρομέα (χωρίς αντίθετη πίεση) προς τη βαλβίδα έχει ως αποτέλεσμα την κατάθλιψη και την αναρρόφηση του αέρα από την κοιλότητα μορφοποίησης στον ψυχρό δρομέα. Τα οφέλη από το γεγονός αυτό μπορούν να μεταβληθούν σημαντικά αναλόγως των διαστάσεων του ψυχρού δρομέα και του κάθετου καναλιού σε σχέση με τον όγκο του παραγόμενου αντικειμένου (**Σχήμα 2-31**).



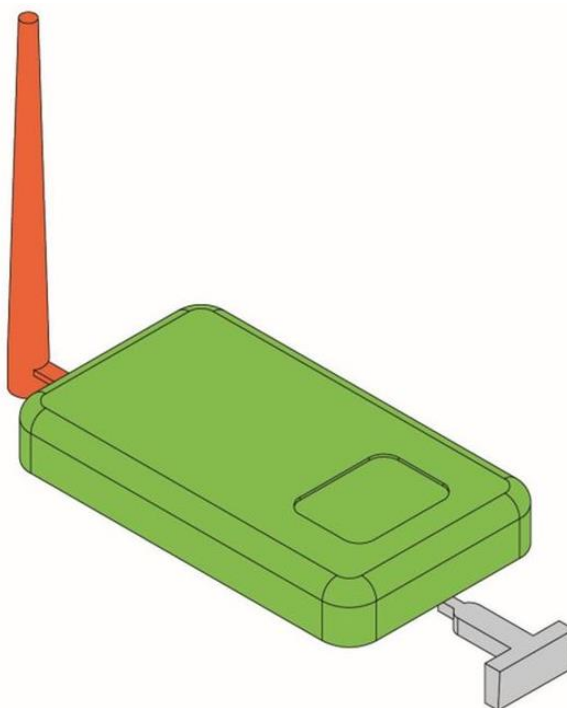
Σχήμα 2-31. Η ικανότητα απαγωγής των αερίων κατά τη διάρκεια της χύτευσης είναι το κύριο πλεονέκτημα του εξωτερικού εξαερισμού του καλουπιού στην πλευρά του δρομέα. Έτσι, στο παράδειγμα του σχήματος τα αέρια ωθούνται μέσα στους αεραγωγούς και όχι μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού όπου βρίσκεται το πολυμερές τήγμα.

Εκτός από την πλευρά του δρομέα, μια άλλη επιλογή για τον εξωτερικό εξαερισμό του καλουπιού είναι στο τελευταίο σημείο πληρώσεως της κοιλότητας μορφοποίησης όπου ενώ το τήγμα ρέει προς τα εμπρός στην κοιλότητα, ο αέρας και τα αέρια εκρέουν διαμέσου της βαλβίδας. Χάρη στην χαμηλή αντίθλιψη της πίεσης του αέρα στην κοιλότητα μορφοποίησης, είναι επιτρεπτή η καλύτερη διαχείριση των παραμέτρων έγχυσης,

βελτιστοποιώντας έτσι τον χρόνο πλήρωσης (filling time), την αισθητική και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου αντικειμένου. Ωστόσο, ο εξωτερικός εξαερισμός οδηγεί στη δημιουργία μικρού προεκτάματος (flash) στο παραχθέν αντικείμενο η οποία χρειάζεται αργότερα να αφαιρεθεί. Βέβαια, μια πύλη εισόδου τύπου tunnel ή cashew επιτρέπει την αυτόματη απομάκρυνση αυτής της προεξοχής κατά την εξόλκευση του αντικειμένου (**Σχήμα 2-32** και **Σχήμα 2-33**).

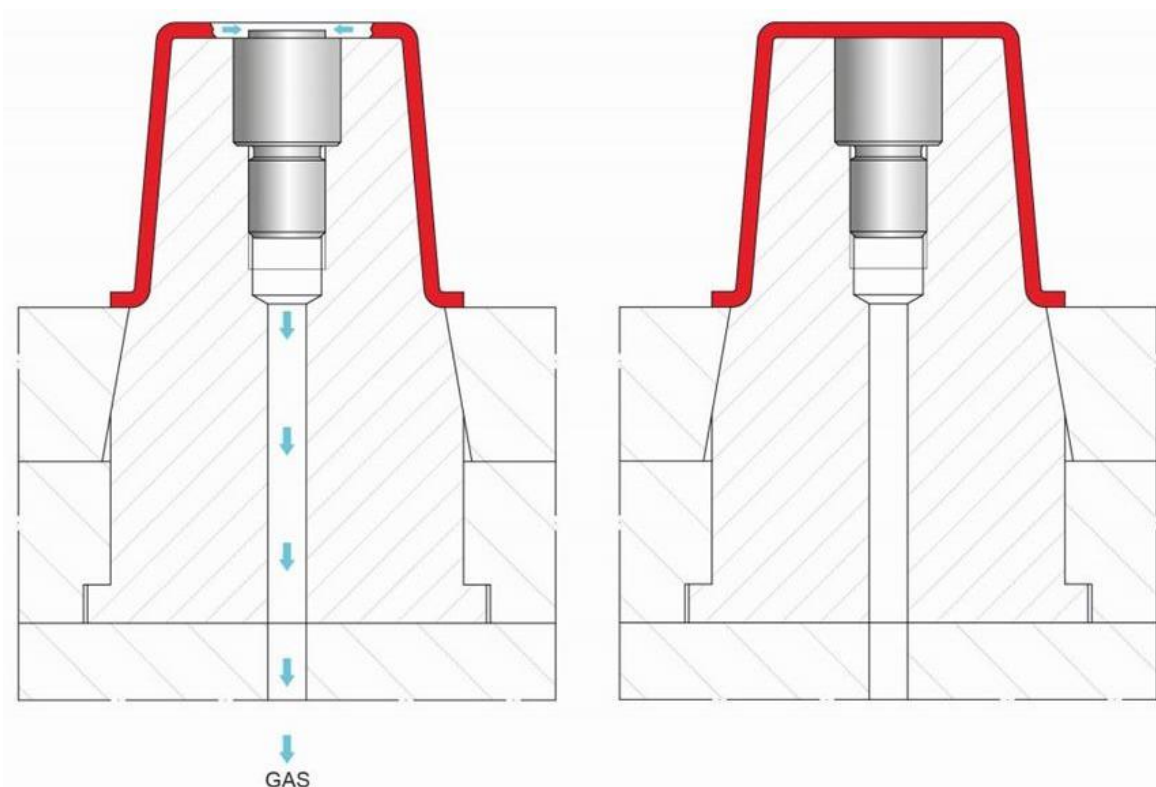


Σχήμα 2-32. Στην περίπτωση του εξωτερικού εξαερισμού του καλουπιού στο τελευταίο σημείο πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης, μια πύλη εισόδου τύπου tunnel ή cashew μπορεί να επιτρέψει την αυτόματη περικοπή οιασδήποτε πλαστικής προεξοχής κατά την εξόλκευση του αντικειμένου.



Σχήμα 2-33. Ένα σωστά σχεδιασμένο κανάλι εξωτερικού εξαερισμού στο τελευταίο σημείο πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού μπορεί να επιτρέψει τη μέγιστη απόδοση του εξαερισμού.

Στον αντίποδα, μια εσωτερική βαλβίδα εξαέρωσης δύναται να τοποθετηθεί μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού και να επιτρέπει στα αέρια να διαφεύγουν από μια οπή εξαερισμού που κλείνει αυτόματα κάτω από την πίεση του εγχυμένου πολυμερούς τήγματος. Αυτός ο τύπος βαλβίδας αποτελείται από ένα εξωτερικό περίβλημα, έναν ολισθαίνοντα άξονα και έναν κεντρικό πείρο που χρησιμεύει για να κλείσει την οπή εξαερισμού (Σχήμα 2-34).



Σχήμα 2-34. Μια εσωτερική βαλβίδα εξαέρωσης του καλουπιού μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης η οποία επιτρέπει στα αέρια να διαφεύγουν από μια οπή εξαερισμού που κλείνει αυτόματα κάτω από την πίεση του εγχυμένου πολυμερούς τήγματος.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα, ένα ελατήριο κατάλληλου μήκους, διαμέτρου και προφόρτισης ωθεί τον ολισθαίνοντα άξονα προς τα εμπρός σε ανοικτή θέση. Ενόσω ο ολισθαίνων άξονας βρίσκεται σε αυτή την ανοικτή θέση, τα αέρια μπορούν να ρέουν μέσω της κεντρικής οπής και κατά μήκος των μεγάλων εσωτερικών διαύλων εξαερισμού. Όταν το εγχυμένο τήγμα συναντά τη βαλβίδα, αυτό ασκεί πίεση στην επιφάνεια του άξονα συμπιέζοντας το ελατήριο και κλείνοντας τη βαλβίδα. Μεταβαίνοντας στην κλειστή θέση, ο κεντρικός πείρος σφραγίζει την οπή εξαερισμού εξασφαλίζοντας ότι το πολυμερές τήγμα δεν γεμίζει τη βαλβίδα. Εξάλλου, η σωστή λειτουργία της βαλβίδας κατοχυρώνεται έπειτα από ακριβή διαστασιολόγηση της οπής εξαερισμού, της ζώνης ασφαλείας και της προφόρτισης του ελατηρίου. Αυτές οι παράμετροι επιτρέπουν στη βαλβίδα να κλείσει πριν το πολυμερές τήγμα γεμίσει τα μεγάλα κανάλια εξαερισμού.

Ο σχεδιασμός αυτού του τύπου βαλβίδας απαιτεί ο ολισθαίνων άξονας να κολληθεί στην κοιλότητα μορφοποίησης ενώ η βαλβίδα βρίσκεται σε ανοικτή θέση. Το γεγονός αυτό εγγυάται ότι τα κανάλια εξαερισμού παραμένουν ανοικτά. Ο κεντρικός άξονας μετακινείται προς τα πάνω και προς τα κάτω για μια καθορισμένη διαδρομή ούτως ώστε να ταιριάζει στο πάχος των τοιχωμάτων του μορφοποιούμενου αντικειμένου. Όσο πιο σύντομη είναι η

διαδρομή, τόσο μεγαλύτερο είναι το σχηματισθέν προέκταμα στο παραχθέν αντικείμενο. Αυτή η διαδρομή του άξονα μπορεί επίσης να επηρεάσει το μοτίβο πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης. Όσο λεπτότερο είναι το μορφοποιούμενο αντικείμενο, τόσο μικρότερη είναι η διαδρομή. Το πάχος των τοιχωμάτων και οι αισθητικές απαιτήσεις που συνοδεύουν το προς μορφοποίηση αντικείμενο καθορίζουν επίσης το απαραίτητο συνολικό μέγεθος της εσωτερικής βαλβίδας εξαερισμού.

2.4.2.4 Σχεδιασμός του Συστήματος Ψύξης

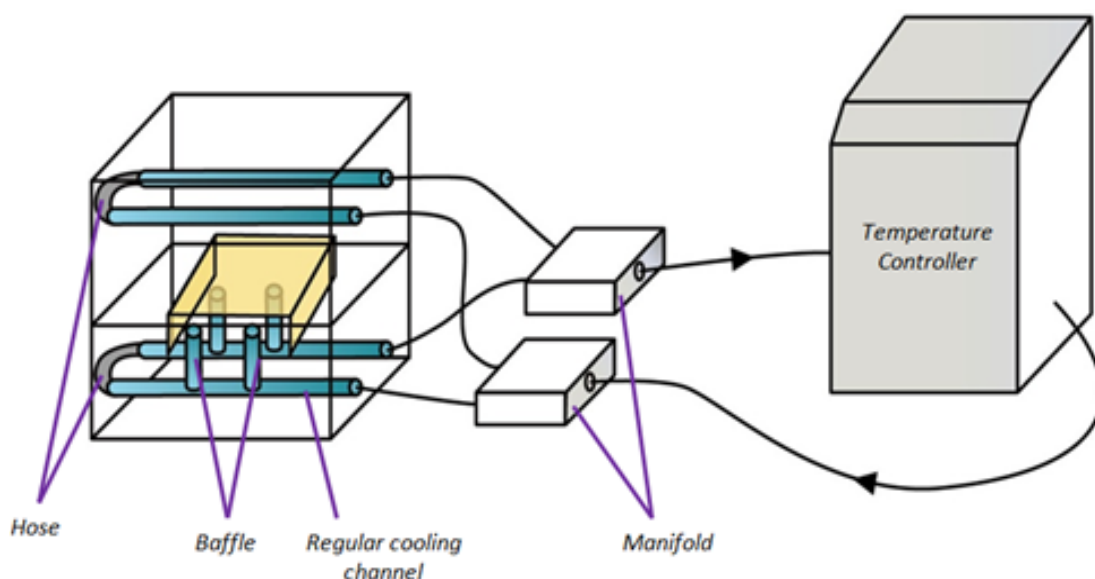
Η ψύξη του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (cooling) διενεργείται με κυκλοφορία ψυχρού μέσου, συνήθως νερού ή λαδιού, μέσα από ειδικά διαμορφωμένα κανάλια ψύξης (cooling channels). Γενικά, η περισσότερη θερμική ενέργεια της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού απάγεται από τα κανάλια ψύξης σε ποσοστό περίξ του **70 %**, με το υπόλοιπο **30 %** της θερμότητας να διαχέεται στο περιβάλλοντα χώρο. Εν πάση περιπτώσει, η φάση της ψύξης απαιτεί το μεγαλύτερο χρόνο ολοκλήρωσης έναντι των υπολοίπων φάσεων της κατασκευαστικής διεργασίας injection molding καταλαμβάνοντας περί το **50** με **70 %** της χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης.

Σαφέστατα, η ψύξη του τήγματος έχει άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα του τελικού προϊόντος έγχυσης. Συνεπώς, τόσο η γεωμετρία όσο και η διάταξη των καναλιών ψύξης είναι βαρύνουσας σημασίας καθότι προσδιορίζουν τον τρόπο ψύξης και κατ' επέκταση τη θερμική συστολή και τον ρυθμό κρυστάλλωσης του μορφοποιημένου αντικειμένου. Σε γενικές γραμμές, ο μηχανικός κατά τον σχεδιασμό του συστήματος ψύξης του καλουπιού έχει κατά νου να τηρεί την αρχή της γρήγορης και συγχρόνως ομοιογενούς ψύξης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης, στον βαθμό βεβαίως που είναι εφικτό να πληρούνται αμφότερες οι εν λόγω προδιαγραφές.

Κατά κοινή αναγνώριση, ως αποδοτικό κρίνεται εκείνο το σύστημα ψύξης που συντελεί στην περιστολή της χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης, αυξάνει την παραγωγικότητα και φυσικά αποφέρει οικονομικά οφέλη από την άριστη ποιότητα του εξαγόμενου τελικού προϊόντος. Τουναντίον, ένα σύστημα ψύξης κρίνεται ως μη αποδοτικό όταν ευθύνεται τόσο για την χρονική προσαύξηση του κύκλου έγχυσης, γεγονός το οποίο μοιραία επιβραδύνει την παραγωγικότητα, όσο και για την εμφάνιση φαινομένων αυξημένης συρρίκνωσης και έντονης στρέβλωσης στο παραχθέν προϊόν έγχυσης. Επομένως, ένα σύστημα ψύξης κατάλληλα σχεδιασμένο :

- ✓ διατηρεί την απαιτούμενη θερμοκρασία του καλουπιού (mold temperature),
- ✓ στηρίζεται σε συμμετρικά κανάλια ψύξης και
- ✓ επιτυγχάνει κατά το δυνατόν μικρότερους χρόνους ψύξης (cooling times).

Οπωσδήποτε, ένα σύστημα ψύξης μπορεί να κατασκευαστεί με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους αναλόγως των αναγκών που δημιουργούν η γεωμετρία του προϊόντος έγχυσης που επίκειται να παραχθεί και, ασφαλώς, η δομή του αντίστοιχου καλουπιού. Παρά ταύτα, τα δομικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται ένα τυπικό σύστημα ψύξης είναι κυρίως τα εξής (**Σχήμα 2-35**) :



Σχήμα 2-35. Σκαριφηματική απόδοση των μερών που απαρτίζουν ένα τυπικό σύστημα ψύξης ενός καλουπιού.

❖ *Ελεγκτής θερμοκρασίας καλουπιού (Mold temperature controller)*

Πρόκειται περί μιας διάταξης η οποία χρησιμοποιείται για να ελέγχει τη θερμοκρασία του καλουπιού (mold temperature) μέσω της ανταλλαγής θερμότητας του ψυκτικού μέσου που ρέει μεταξύ του καλουπιού και του ελεγκτή θερμοκρασίας.

❖ *Συνήθη κανάλια ψύξης (Regular cooling channels)*

Βρίσκονται στο εσωτερικό της καλουπιέρας και κατασκευάζονται έπειτα από τις κατάλληλες διατρήσεις των μεταλλικών πλακών της. Ο σκοπός τους δεν είναι άλλος πέρα από τη διατήρηση της θερμοκρασίας του καλουπιού (mold temperature).

❖ *Πολλαπλή εισαγωγή (Manifold)*

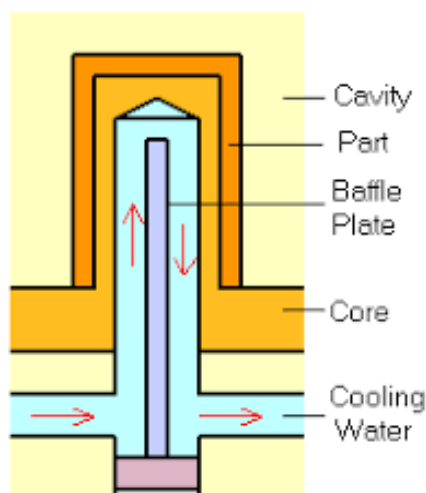
Πρόκειται περί μιας διάταξης που χρησιμοποιείται για τη συνένωση πολλών διαφορετικών συνηθών καναλιών ψύξης σε ένα. Κατά κανόνα, η πολλαπλή εισαγωγή τοποθετείται μεταξύ της καλουπιέρας και του ρυθμιστή θερμοκρασίας του καλουπιού.

❖ *Εύκαμπτοι σωλήνες ή Λάστιχα (Hoses)*

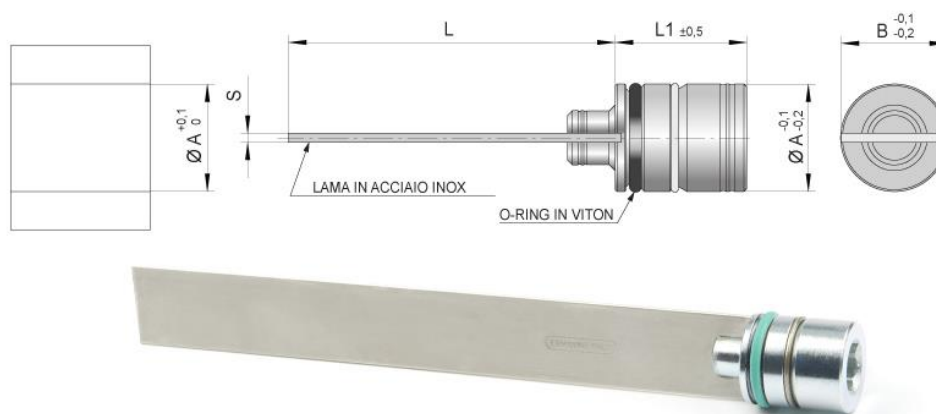
Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση διαφορετικών συνηθών καναλιών ψύξης εξωτερικά της καλουπιέρας. Γενικά, ένα λάστιχο λειτουργεί και ως θερμομόνωση.

❖ *Διαφράγματα – προαιρετικά (Baffles – optional)*

Πρόκειται για κανάλια ψύξης διατυπημένα κάθετα σε μια κύρια γραμμή ψύξης, με ένα μεταλλικό έλασμα (λεπίδα) στο εσωτερικό τους που ουσιαστικά τα χωρίζει σε δύο επιμέρους κανάλια ημικυκλικής διατομής (**Σχήμα 2-36** και **Σχήμα 2-37**). Έτσι, η ροή του ψυκτικού μέσου εκτρέπεται από την κύρια γραμμή ψύξης στη μία πλευρά του διαφράγματος, κινείται κατά μήκος της λεπίδας διαχωρισμού ώσπου περιστρέφεται περίξ της ακραίας αιχμής της, διέρχεται από την έτερη πλευρά του διαφράγματος και, ακολούθως, επανέρχεται στην κύρια γραμμή ψύξης.



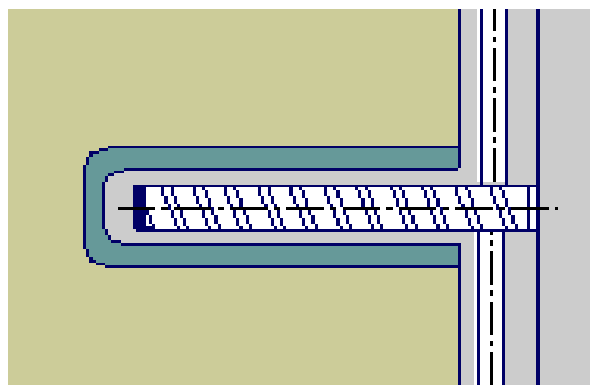
Σχήμα 2-36. Σκαριφηματική απόδοση του τρόπου λειτουργίας ενός κοινού διαφράγματος (straight baffle).



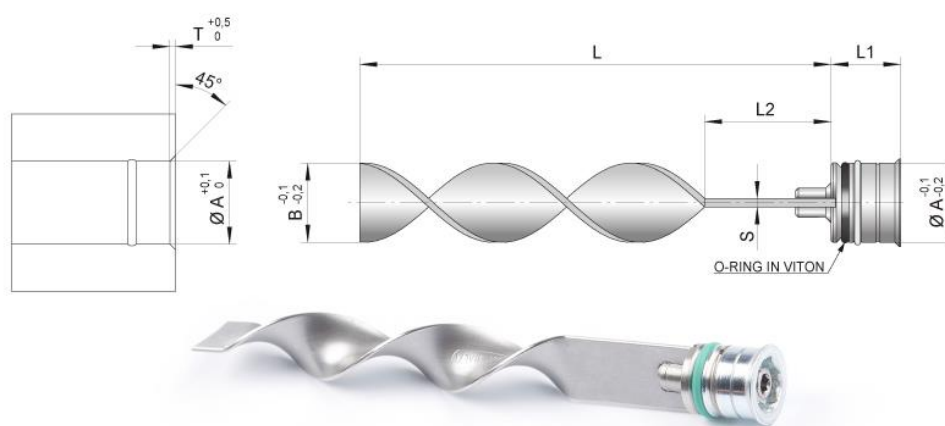
Σχήμα 2-37. Λεπίδα διαχωρισμού που χρησιμοποιείται σε κοινά διαφράγματα.

Πρόκειται για μία μορφή ψύξης που παρέχει μέγιστες διατομές για το ψυκτικό υγρό, αλλά είναι δύσκολο να τοποθετηθεί η λεπίδα διαχωρισμού ακριβώς στο κέντρο. Το δε αποτέλεσμα της ψύξης και συγκεκριμένα η κατανομή της θερμοκρασίας στη μία πλευρά του πυρήνα μπορεί να διαφέρει σε σχέση με την άλλη πλευρά, γεγονός το οποίο συνιστά μειονέκτημα του διαφράγματος. Βέβαια, το μειονέκτημα αυτό είναι δυνατό να εξαλειφθεί εφόσον η λεπίδα διαχωρισμού ελίσσεται.

Στο *διάφραγμα έλικας* (*helix baffle*), για παράδειγμα, μεταφέρεται το ψυκτικό μέσο από το ένα ημικυκλικό κανάλι στο άλλο με τη βοήθεια μιας λεπίδας διαχωρισμού που έχει τη μορφή έλικας (**Σχήμα 2-38**). Πρόκειται για έναν τύπο λεπίδας διαχωρισμού ιδιαίτερα χρήσιμο για διαφράγματα με διάμετρο από **12** έως **50** mm μιας και καθιστά την κατανομή της θερμοκρασίας πολύ ομοιογενή. Άλλος τύπος διαφράγματος με ελίσσόμενη λεπίδα διαχωρισμού είναι το *σπιδάλ διάφραγμα* (*spiral baffle*). Η ελίσσόμενη λεπίδα διαχωρισμού που χρησιμοποιείται σε αυτού του είδους τα διαφράγματα είναι όπως αυτή που εξεικονίζεται στο **Σχήμα 2-39** παρακάτω.



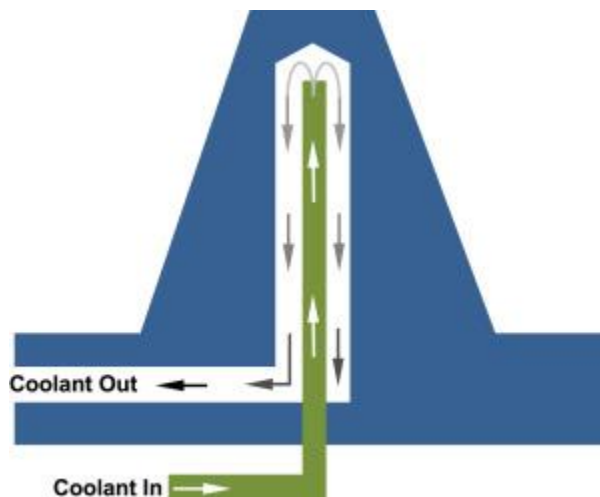
Σχήμα 2-38. Σκαριφηματική απόδοση ενός τυπικού διαφράγματος έλικας (σε τομή).



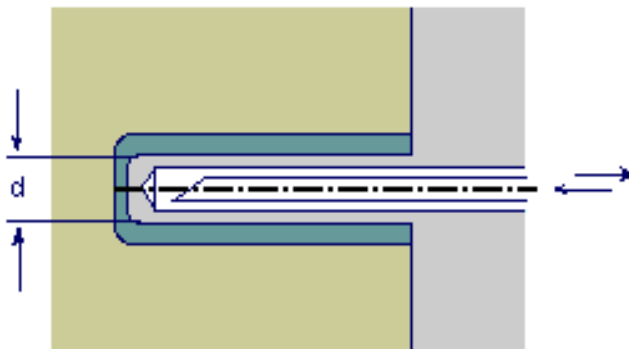
Σχήμα 2-39. Λεπίδα διαχωρισμού που χρησιμοποιείται στα σπирάλ διαφράγματα.

❖ Ψύκτες – προαιρετικά (*Bubblers* – optional)

Λειτουργούν παρόμοια με τα διαφράγματα με τη διαφορά ότι η λεπίδα διαχωρισμού στο εσωτερικό αντικαθίσταται με ένα μικρό σωλήνα. Το ψυκτικό μέσο ρέει στον πυθμένα του σωλήνα, ανεβαίνει προς τα πάνω και εξέρχεται από αυτόν εκτοξευόμενο σαν πίδακας. Έπειτα, το ψυκτικό ρέει προς τα κάτω γύρω από το εξωτερικό του σωλήνα για να συνεχίσει τη ροή του μέσω των καναλιών ψύξης (**Σχήμα 2-40** και **Σχήμα 2-41**).



Σχήμα 2-40. Σκαριφηματική απόδοση του τρόπου λειτουργίας ενός κοινού ψύκτη (bubbler).



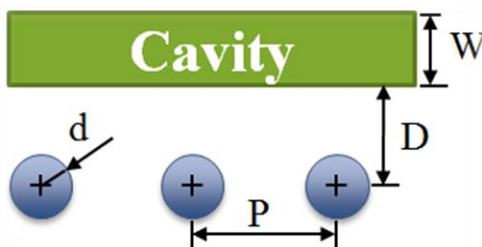
Σχήμα 2-41. Σκαριφηματική απόδοση ενός κοινού ψύκτη (σε τομή). Μέχρι μία διάμετρο 4 mm, η εσωτερική σωλήνωση του ψύκτη πρέπει να είναι λοξόμητη στο άνω άκρο ώστε να διευρύνεται η διατομή της εξόδου.

Εν πάσει περιπτώσει, τόσο οι ψύκτες όσο και τα διαφράγματα αποτελούν τμήματα των κύριων γραμμών ψύξης που στόχο έχουν την εκτροπή της ροής του ψυκτικού σε περιοχές που κανονικά θα είχαν έλλειψη ψύξης λόγω αδυναμίας κατασκευής καναλιών ψύξης με κατεργασίες αφαίρεσης υλικού (διάτρηση, φραιζάρισμα). Ως τέτοιες περιοχές λογίζονται, επί παραδείγματι, οι πυρήνες των καλουπιών. Εξάλλου, ειδικά για τους λεπτούς πυρήνες, αυτή είναι η πιο αποτελεσματική μορφή ψύξης.

Καθώς οι ψύκτες, όπως και τα διαφράγματα, περιορίζουν τις περιοχές ροής του ψυκτικού μέσου, η αντίσταση στη ροή του αυξάνεται. Επομένως, θα πρέπει να μεριμνάται ο κατάλληλος σχεδιασμός του μεγέθους αυτών των διατάξεων. Γι' αυτό, τόσο οι εσωτερικές όσο και οι εξωτερικές διαμέτροι στους ψύκτες θα πρέπει να ρυθμίζονται κατά τρόπο τέτοιο που η αντίσταση στη ροή του ψυκτικού μέσου και στις δύο διατομές να είναι ίση. Τούτο επιτυγχάνεται όταν ο λόγος της εσωτερικής διαμέτρου προς την αντίστοιχη εξωτερική γίνεται ίσος με **0.707**.

Μολαταύτα, ο σχεδιασμός των καναλιών ψύξης πραγματοποιείται πάντα στο τέλος, εφόσον έχει προηγηθεί ο σχεδιασμός της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού, του συστήματος τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές δομικό υλικό και του συστήματος εξόλκευσης που το καλούπι διαθέτει για την απομάκρυνση του παραχθέντος αντικειμένου. Εξάλλου, για τον κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος ψύξης ενός καλουπιού λαμβάνονται υπόψιν απαραίτητως :

- η απόσταση P μεταξύ των κέντρων των καναλιών ψύξης και η απόσταση D μεταξύ της επιφάνειας της κοιλότητας του καλουπιού και των κέντρων των καναλιών ψύξης (Σχήμα 2-42).



Σχήμα 2-42. Σκαριφηματική απόδοση των αποστάσεων που τηρούνται κατά την τοποθέτηση των καναλιών ψύξης σε ένα καλούπι.

Από τη μία όψη, η πολύ κοντινή τους απόσταση επιδρά αρνητικά στο μορφοποιημένο αντικείμενο διά της δημιουργίας μεμονωμένων ψυχρών σημείων (cold spots) διεσπαρμένων στη μάζα του αντικειμένου. Από την άλλη όψη, η μακρινή τους απόσταση έχει ανεπαρκή αποτελέσματα ψύξης. Κατά εμπειρικό κανόνα, η ικανοποιητική απόσταση που είναι καλό να τηρείται μεταξύ των κέντρων των καναλιών ψύξης (βήμα) κυμαίνεται από **2** έως **3** φορές τη διάμετρο d του καναλιού ($P = 2 \sim 3 \cdot d$), με τη συνήθη τηρούμενη απόσταση να ισούται με **2,5** φορές τη διάμετρο του καναλιού. Κατά αντίστοιχο εμπειρικό κανόνα, η ικανοποιητική απόσταση που είναι καλό να τηρείται μεταξύ της επιφάνειας της κοιλότητας του καλουπιού και των κέντρων των καναλιών ψύξης (βάθος) κυμαίνεται από **1,5** έως **3** φορές τη διάμετρο d του καναλιού ($D = 1,5 \sim 3 \cdot d$), με τη συνήθη τηρούμενη απόσταση να ισούται με **2,25** φορές τη διάμετρο του καναλιού.

Σε ό,τι δε αφορά την τιμή της διαμέτρου του καναλιού ψύξης, αυτή προκύπτει αναλόγως του πάχους των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου. Για προϊόντα έγχυσης με τοιχώματα πάχους :

- κάτω των **2** mm, η προτεινόμενη διάμετρος του καναλιού κυμαίνεται από **8** έως **10** mm,
- κάτω των **4** mm, η προτεινόμενη διάμετρος του καναλιού κυμαίνεται από **10** έως **12** mm και
- κάτω των **6** mm, η προτεινόμενη διάμετρος του καναλιού κυμαίνεται από **12** έως **15** mm.

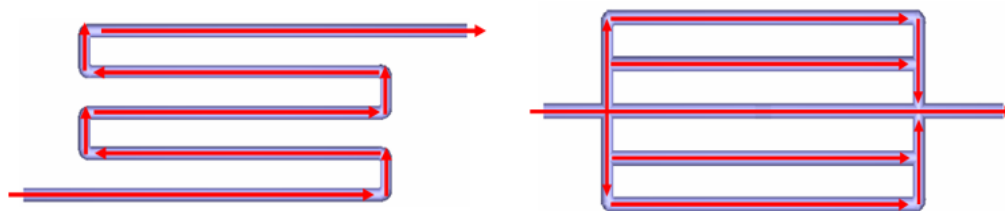
Παρ' όλα αυτά, δεν πρέπει να λησμονείται ότι κάθε προϊόν έγχυσης αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση με τις δικές της ιδιομορφίες και ότι το εκάστοτε καλούπι έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και απαιτήσεις ως προς την ψύξη (π.χ. κρίσιμα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του προϊόντος, όπως λεπτές νευρώσεις ή/και περιοχές αυξημένου πάχους, περιορισμοί χώρου στις φόρμες κλπ). Κατά συνέπεια, οι προαναφερθείσες αποστάσεις P και D και η διάμετρος d των καναλιών ψύξης χρειάζεται να τροποποιούνται κατά το δοκούν.

- η διάταξη και το πλήθος των καναλιών ψύξης, ο τρόπος της μεταξύ τους σύνδεσης καθώς και ο αριθμός των περιστροφών που αυτά κάνουν πέραν του μορφοποιημένου αντικειμένου.

Από τη μία πλευρά, μια σειρά από πολλά κανάλια ψύξης είναι προτιμότερη για το λόγο ότι καταφέρνει να ψύχει το μορφοποιημένο αντικείμενο ομοιόμορφα και, συγχρόνως, να το διατηρεί ακέραιο στην επιθυμητή θερμοκρασία. Από την άλλη πλευρά, η πληθώρα των καναλιών ψύξης ενδέχεται να προκαλέσει πτώση της πίεσης κατά μεγάλο ποσοστό. Βάσει αυτών των εξακριβώσεων, ο αριθμός των καναλιών αυξάνεται συνήθως στο κέντρο του καλουπιού ή στις περιοχές όπου το πολυμερές είναι πολύ θερμό, ήτοι στις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού που γεμίζουν πρώτες με υλικό.

Η δε σύνδεση των καναλιών ψύξης είναι βαρύνουσας σημασίας καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα της ψύξης. Συγκεκριμένα, όταν τα κανάλια ψύξης συνδέονται σε σειρά (**Σχήμα 2-43** – αριστερά), τότε η απόσταση ροής γίνεται αυτομάτως μεγαλύτερη, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει ευκολότερα σε ανομοιογενή ψύξη του πολυμερούς αλλά και σε αύξηση στην αντίσταση της ροής του

τήγματος. Επιπλέον, τα εν σειρά συνδεδεμένα κανάλια ψύξης μπορεί να φράξουν πιο εύκολα και ο καθαρισμός τους γίνεται δυσκολότερος. Αντιθέτως, όταν τα κανάλια ψύξης συνδέονται παράλληλα (**Σχήμα 2-43** – δεξιά), όλα αυτά τα προβλήματα εκλείπουν. Αυτός είναι άλλωστε ο λόγος που προτιμάται η παράλληλη έναντι της εν σειρά σύνδεσης.

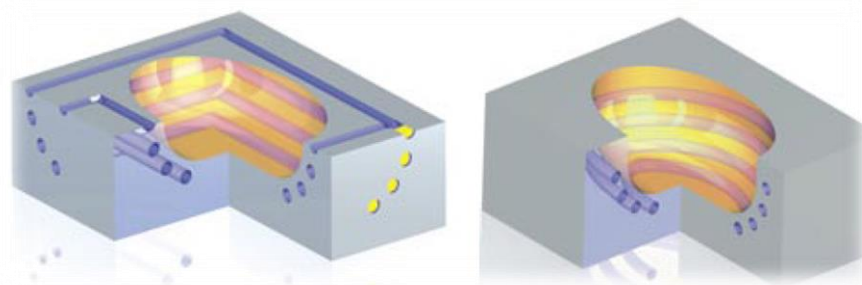


Σύνδεση καναλιών ψύξης σε σειρά

Παράλληλη σύνδεση καναλιών ψύξης

Σχήμα 2-43. Σύνδεση καναλιών ψύξης σε σειρά (αριστερά) και παράλληλα (δεξιά). Συγκρίνοντας τις δύο διατάξεις ψύξης, η παράλληλη σύνδεση των καναλιών ψύξης είναι προτιμώτερη έναντι της αντίστοιχης σύνδεσης σε σειρά.

Ένας άλλος τύπος ψύξης πιο αυθαίρετης διαμόρφωσης που ακολουθεί το περίγραμμα του εκάστοτε προϊόντος έγχυσης (**Σχήμα 2-44**) είναι η σύμμορφη ψύξη (*conformal cooling*). Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα ψύξης, η σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να αυξήσει αποτελεσματικά την αποδοτικότητα της ψύξης για προϊόντα έγχυσης με πολυσύνθετη γεωμετρία καθώς μειώνει τη διακύμανση της ταχύτητας ψύξης σε όλη την έκταση του μορφοποιημένου αντικειμένου. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης και την καλύτερευση της ποιότητας του τελικού προϊόντος.



Σχήμα 2-44. Σκαριφηματική απόδοση συμβατικής ψύξης καλούπιού μη αυθαίρετης γεωμετρίας (αριστερά) και σύμμορφης ψύξης καλούπιού αυθαίρετης γεωμετρίας στηριζόμενης στο περίγραμμα του μορφοποιημένου αντικειμένου (δεξιά). Η κατασκευή της σύμμορφης ψύξης σε ένα καλούπι είναι εφικτή μόνο με μεθόδους 3D printing (π.χ. μέθοδος Selective Laser Sintering – SLS).

2.4.2.5 Σχεδιασμός του Συστήματος Εξόλκευσης

Για τη διευκόλυνση της απομάκρυνσης των μορφοποιημένων αντικειμένων από το καλούπι μετά την ολοκλήρωση της κατασκευαστικής διεργασίας χρησιμοποιείται το σύστημα εξόλκευσης. Το σύστημα εξόλκευσης, το οποίο διαμορφώνεται κατάλληλα ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση, αποτελείται από βελόνες οι οποίες εδράζονται στην πλάκα εξόλκευσης. Όταν το καλούπι ανοίγει, το σύστημα εξόλκευσης μετατοπίζεται προς το κινητό τμήμα του με τις βελόνες να διαπερνούν της μικρής διαμέτρου οπές του και να απομακρύνουν το μορφοποιημένο αντικείμενο αποκολλώντας το από τον πυρήνα.

Στην πλειονότητά τους τα καλούπια διαθέτουν ενσωματωμένο σύστημα εξόλκευσης στο κινητό τμήμα. Το εν λόγω σύστημα απαρτίζεται από δύο πλάκες εξολκείων, ήτοι την πλάκα *εκτίναξης* (άνω πλάκα) και την πλάκα *επαναφοράς* (κάτω πλάκα). Η πλάκα επαναφοράς είναι συνδεδεμένη με την κινητή πλάκα. Στη δε πλάκα εκτίναξης υπάρχουν πείροι που συνδέουν τον μηχανισμό της εκτίναξης και οι οποίοι ενεργοποιούνται από ελεγκτή (controller) που ελέγχει τον χρόνο και την ταχύτητα της εκτίναξης, καθώς και το μήκος της διαδρομής εξόλκευσης.

Από την άλλη πλευρά, τα καλούπια που διαθέτουν ανάστροφο σύστημα εξόλκευσης έχουν τα αντίστοιχα μέρη του συστήματος στη σταθερό τμήμα του καλουπιού. Μέσω ανεξάρτητων μηχανισμών εξόλκευσης λειτουργούν οι πείροι με τη βοήθεια είτε ελατηρίων είτε υδραυλικών κυλίνδρων. Αυτή η διαμόρφωση διευκολύνει την άμεση εξόλκευση του μορφοποιημένου αντικειμένου ελαττώνοντας τα προβλήματα εμφάνισης σημαδιών από τους εξολκείς. Δεν παύει, ωστόσο, να αποτελεί μια ιδιαίτερα δαπανηρή λύση εν συγκρίσει με το πρώτο σύστημα εξόλκευσης.

3 Συνήθεις Κατασκευαστικές Ατέλειες των Τελικών Προϊόντων Έγχυσης

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, στα τελικά προϊόντα που έχουν παραχθεί μέσω της τεχνολογίας παραγωγής injection molding, κάνουν συχνά την εμφάνισή τους διάφορες κατασκευαστικές ατέλειες. Οι ατέλειες αυτές οφείλονται συνήθως στον ακατάλληλο σχεδιασμό του τελικού προϊόντος ή/και του καλουπιού αυτού, στο ακατάλληλο χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό και στην λανθασμένη παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας (π.χ. λανθασμένες ρυθμίσεις τεχνικού εξοπλισμού).

Αναντίρρητα, η ύπαρξη μιας μεμονωμένης ατέλειας και φυσικά ο συνδυασμός περισσότερων ατελειών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα, τη λειτουργικότητα και την αισθητική των προϊόντων έγχυσης. Συν τοις άλλοις, τα τελικά προϊόντα που έχουν ατέλειες είναι αρκετά έως πολύ κοστοβόρα για μια επιχείρηση λόγω της αδυναμίας διάθεσής τους προς πώληση στο εμπόριο με αποτέλεσμα να επιστρέφονται πίσω στον κατασκευαστή τους ως προϊόντα μη χρηστικά (scrap).

Ακολούθως, καταγράφονται οι συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εμφανίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης, αναλύονται οι λόγοι της εμφάνισής τους σε αυτά και προτείνονται κάποιες ενδεικτικές λύσεις για την εξάλειψή τους ή τον περιορισμό των επιπτώσεών τους. Υπογραμμίζεται δε ότι κάποιες εκ των ατελειών μπορούν να αποσοβηθούν παραμετροποιώντας κατάλληλα την κατασκευαστική διεργασία, εντούτοις άλλες απαιτούν τον μερικό ή ολικό επανασχεδιασμό του τελικού προϊόντος ή/και του καλουπιού αυτού.

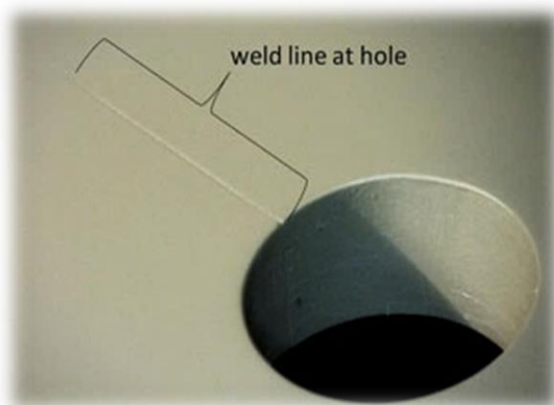
Καθώς οι διορθωτικές παρεμβάσεις στο τελικό προϊόν και πολύ περισσότερο στο αντίστοιχο καλούπι είναι εξαιρετικά δαπανηρές και χρονοβόρες, καλό είναι αποτελούν έσχατη λύση για τη διόρθωση των όποιων σφαλμάτων ανακύπτουν και να ακολουθούν μετά την κατάλληλη αναρρύθμιση των παραμέτρων της κατασκευαστικής διεργασίας. Ασφαλώς, για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος κρίνεται επιβεβλημένο η οποιαδήποτε επιχειρούμενη βελτιωτική κίνηση να εναρμονίζεται εξ ολοκλήρου με τις αντίστοιχες συστάσεις των κατασκευαστών και των προμηθευτών του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου υλικοτεχνικού εξοπλισμού οι οποίες αναγράφονται σε ειδικούς καταλόγους, τεχνικά εγχειρίδια κλπ.

Τέλος, δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός ότι η επίλυση ενός προβλήματος ενδέχεται συχνά να προκαλέσει άλλα προβλήματα στην κατασκευαστική διεργασία injection molding. Συνεπώς, για κάθε διορθωτική ενέργεια που επιλέγεται απαιτείται και η ενδελεχής εξέταση όλων των σχετικών πτυχών των προδιαγραφών σχεδιασμού του καλουπιού.

3.1 Γραμμές Συγκόλλησης (Weld Lines)

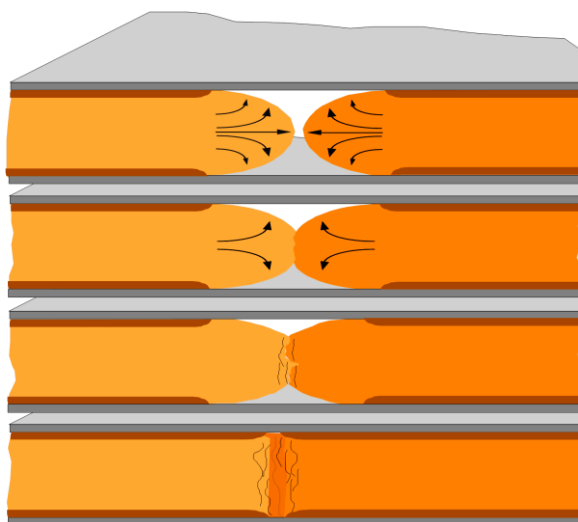
Οι γραμμές συγκόλλησης (*weld lines*) αποτελούν μια συχνή κατασκευαστική ατέλεια που κάνει την εμφάνισή της ως χαρακιά σε σχήμα ευθείας ή καμπύλης γραμμής στην εξωτερική επιφάνεια πολλών προϊόντων έγχυσης. Σχετίζονται άμεσα με τις πύλες εισόδου και τον τρόπο που αυτές έχουν τοποθετηθεί στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού και είναι απότοκος της σύγκρουσης και της συνένωσης των διαφορετικών μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης κατά την έγχυση του δομικού υλικού (**Σχήμα 3-1**). Γενικά, ένα μέτωπο ροής «σπάει» σε περισσότερα μέτωπα όχι μόνο όταν ο αριθμός των πυλών εισόδου είναι αυξημένος, αλλά και όταν το πολυμερές τήγμα συναντά κατά την έγχυσή του εντός της κοιλότητας

μορφοποίησης κάποιο εμπόδιο (π.χ. οπές) ή μεταβαλλόμενες διατομές που δύνανται να προκαλούν παύσεις ή επιβραδύνσεις στην ομαλή ροή του τήγματος (flow hesitation).



Σχήμα 3-1. Τελικό προϊόν έγχυσης με εμφανή γραμμή συγκόλλησης (weld line) στην εξωτερική του επιφάνεια.

Πιο συγκεκριμένα, όπως σκιαγραφείται και στα διαδοχικά στιγμιότυπα στο **Σχήμα 3-2** που ακολουθεί, για κάποιον από τους προαναφερθέντες λόγους το μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος έχει χωριστεί σε δύο διαφορετικά μέτωπα με κυρτές επιφάνειες εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Όταν τα μέτωπα ροής τελικά συναντιούνται, οι κυρτές τους επιφάνειες συγκρούονται και γίνονται επίπεδες. Εφόσον οι συνθήκες που παραμετροποιούν την έγχυση (θερμοκρασίες, πιέσεις, ταχύτητα ροής κλπ) δεν είναι οι κατάλληλες, τότε οι αιχμές των επίπεδων πλέον επιφανειών των μετώπων ροής παραμένουν κυρτές και, τοιουτοτρόπως, προκύπτει η γραμμή συγκόλλησης. Σύμφωνα δε με το τελευταίο στιγμιότυπο στο **Σχήμα 3-2**, ο προσανατολισμός των μορίων του πολυμερούς στην περιοχή της γραμμής συγκόλλησης είναι κάθετος προς τις κατευθύνσεις των μετώπων ροής του τήγματος.



Σχήμα 3-2. Διαδοχικά στιγμιότυπα από τη συνένωση δύο διαφορετικών μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης ενός καλουπιού που οδηγεί στον σχηματισμό γραμμής συγκόλλησης στο τελικό προϊόν έγχυσης.

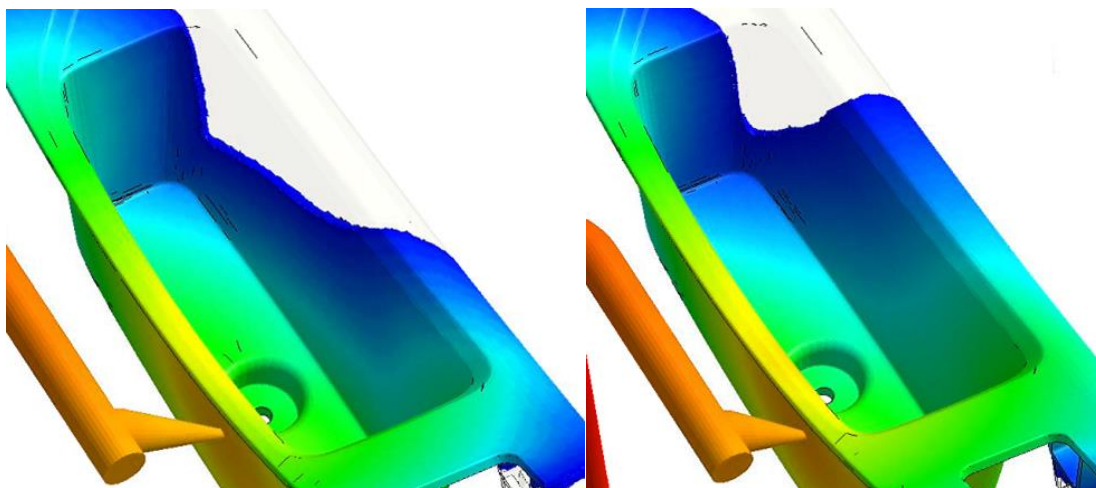
Αποτελεί κοινή παραδοχή ότι όσο λιγότερες πύλες εισόδου τοποθετούνται στην κοιλότητα μορφοποίησης ενός καλουπιού, τόσο λιγότερες γραμμές συγκόλλησης εμφανίζονται στο

αντίστοιχο παραχθέν προϊόν έγχυσης. Ωστόσο, για τη μορφοποίηση μεγάλων ή σύνθετων εξαρτημάτων αποτελεί μονόδρομο η τοποθέτηση περισσότερων πυλών εισόδου. Τούτο συμβαίνει αφενός μεν για να εξασφαλίζεται η απόλυτη και ομαλή πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές δομικό υλικό μειώνοντας το μήκος ροής του τήγματος (*melt flow length*), αφετέρου δε για να είναι η εν λόγω ατέλεια το λιγότερο δυνατό εμφανής.

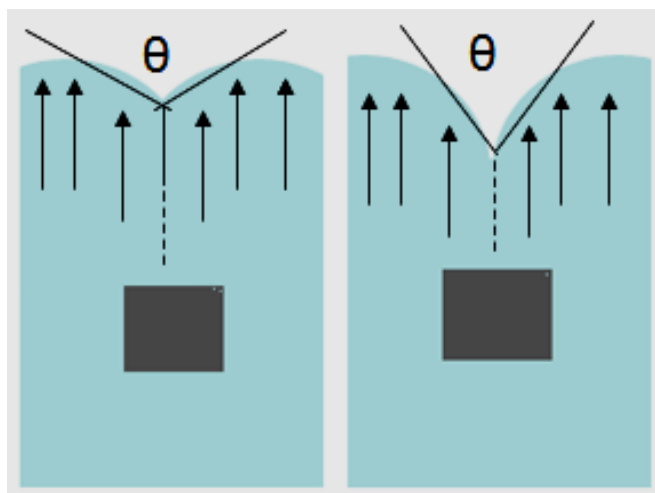
Αναμφίβολα, ο εκάστοτε σχεδιαστής προϊόντων έγχυσης χρειάζεται να μεριμνά για την αποφυγή των γραμμών συγκόλλησης καθότι αυτές μπορούν να υποβαθμίσουν τη μηχανική αντοχή του τελικού προϊόντος σε ποσοστό που κυμαίνεται από **40** έως **90** %. Πέραν τούτου, το τελικό αποτέλεσμα ενδέχεται να είναι αισθητικά μη αποδεκτό δεδομένης της μεταβολής στη στιλπνότητα ή του αποχρωματισμού που παρατηρείται σε εκείνες τις περιοχές της εξωτερικής επιφάνειας του προϊόντος όπου εντοπίζονται οι γραμμές συγκόλλησης.

Κατά κοινή αναγνώριση, η ολοκληρωτική εξάλειψη των γραμμών συγκόλλησης είναι συνήθως αρκετά δύσκολη έως και ακατόρθωτη σε πολλές περιπτώσεις. Συνεπώς, το κύριο μέλημα του σχεδιαστή των προϊόντων έγχυσης πρέπει να είναι η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη ελάττωση των γραμμών συγκόλλησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε τροποποιώντας τον σχεδιασμό του συστήματος διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στην κοιλότητα μορφοποίησης (runner system) είτε μειώνοντας τη διάμετρο του δρομέα ή των δρομέων του συστήματος ώστε η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος να αυξηθεί από την θερμότητα που παράγεται λόγω της αυξημένης αναπτυσσόμενης τριβής (frictional heating).

Παρά ταύτα, εάν η περαιτέρω ελάττωση των γραμμών συγκόλλησης δεν καθίσταται εφικτή, αντενδείκνυται η μεταφορά τους στα λιγότερο κρίσιμα σημεία του εκάστοτε προϊόντος έγχυσης διά της μετατόπισης των πυλών εισόδου στα λιγότερο κρίσιμα σημεία του (**Σχήμα 3-3**) ή της τροποποίησης του πάχους των τοιχωμάτων του. Για να είναι δε όσο το δυνατόν λιγότερο έντονες, καλό είναι η σύζευξη των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης να γίνεται με τη μεγαλύτερη δυνατή γωνία συνάντησης (θ) (**Σχήμα 3-4**).



Σχήμα 3-3. Εμφάνιση γραμμών συγκόλλησης (weld lines) στη γωνία ενός προϊόντος έγχυσης (αριστερά) και απόκρυψη της ατέλειας (δεξιά) μετά από ανατοποθέτηση / επανασχεδιασμό τόσο του συστήματος διανομής (runner system) όσο και των πυλών εισόδου (gates).



Σχήμα 3-4. Μεγαλύτερη γωνία συνάντησης των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος ($\theta > 135^\circ$) που συνεπάγεται λιγότερο έντονες γραμμές συγκόλλησης στο τελικό προϊόν έγχυσης (αριστερά) και μικρότερη γωνία συνάντησης των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος ($\theta < 135^\circ$) που συνεπάγεται περισσότερο έντονες γραμμές συγκόλλησης αντίστοιχα (δεξιά).

Ασφαλώς, αμφότερες οι προαναφερθείσες τακτικές αποφυγής των ατελειών αυτών μπορούν να τελεσφορήσουν με την κατάλληλη τοποθέτηση των πυλών εισόδου στην κοιλότητα μορφοποίησης (π.χ. τοποθέτηση υπό καθορισμένη γωνία). Σε περιπτώσεις που επιλέγεται να αποφευχθεί η ανατοποθέτηση των πυλών εισόδου ή ο επανασχεδιασμός τους, προκρίνεται ως λύση αντιμετώπισης των γραμμών συγκόλλησης η βελτίωση της μηχανικής αντοχής αυτών μέσω αύξησης :

- ✓ της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) για την αποτροπή της μερικής στερεοποίησής του συνυπολογίζοντας ότι μια καλή συγχώνευση των μετώπων ροής λαμβάνει χώρα όταν η θερμοκρασία του τήγματος δεν είναι χαμηλότερη από 20°C κάτω από την αντίστοιχη θερμοκρασία έγχυσης (injection temperature) ή/και
- ✓ της θερμοκρασίας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature) ή/και
- ✓ της πίεσης έγχυσης (injection pressure) ή/και της ταχύτητας ροής (flow rate) ή/και της πίεσης συμπίεσης (packing pressure) ώστε να περιοριστεί η ψύξη του πολυμερούς τήγματος προτού γεμίσει πλήρως με αυτό η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού.

3.2 Σημάδια / Γραμμές Ροής (Flow Marks / Lines)

Τα σημάδια ή οι γραμμές ροής (*flow marks/lines*) αποτελούν κοινή κατασκευαστική ατέλεια των προϊόντων έγχυσης και εντοπίζονται, ως επί το πλείστον, στις περιοχές πέριξ των πυλών εισόδου ή/και τις περιοχές με μειωμένη διατομή. Διακρίνονται ως κυκλικά μοτίβα στην πρώτη περίπτωση ή ως ρινωτά ή κυματιστά μοτίβα στη δεύτερη περίπτωση και η σπιλπνότητά τους είναι σαφώς υποβαθμισμένη εν συγκρίσει με τη γυαλάδα που εμφανίζει το προϊόν έγχυσης στο σύνολό του (**Σχήμα 3-5**). Οι γραμμές ροής τυπικά δεν επηρεάζουν την ακεραιότητα των προϊόντων έγχυσης, όμως όταν αυτές εντοπίζονται σε ορισμένα καταναλωτικά αγαθά με υψηλής ποιότητας τελική επιφάνεια, όπως για παράδειγμα ένας κοινός σκελετός γυαλιών ηλίου, συνήθως είναι μη αποδεκτές κυρίως για λόγους αισθητικής.



Σχήμα 3-5. Γραμμές ροής (flow lines) στην εξωτερική επιφάνεια ενός παραχθέντος προϊόντος έγχυσης.

Λεπτομερέστερα, κατά την έγχυση του πολυμερούς τήγματος ψυχρό πολυμερές δύναται να ρέει εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με αποτέλεσμα το μερικώς στερεοποιημένο πολυμερές να παίρνει τη μορφή των γραμμών ροής. Οπωσδήποτε, αιτίες εμφάνισης του συγκεκριμένου φαινομένου συνιστούν η χαμηλή θερμοκρασία του τήγματος (melt temperature), η χαμηλή θερμοκρασία της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature), η χαμηλή πίεση συμπίεσης (packing pressure) και η χαμηλή ταχύτητα ροής (flow rate). Μάλιστα, η εν λόγω ατέλεια είναι ιδιαίτερα έντονη όταν τα τοιχώματα του μορφοποιημένου αντικειμένου είναι μεταβλητού πάχους ή όταν σε αυτό υπάρχουν πολλές κυρτώσεις και σύνθετα περιγράμματα που εξαναγκάζουν σε αλλαγή κατεύθυνσης τη ροή του πολυμερούς τήγματος και, κατά συνέπεια, μεταβάλλουν την ταχύτητα ροής.

Προκειμένου να προλαμβάνεται η εμφάνιση σημαδιών / γραμμών ροής στα τελικά προϊόντα έγχυσης και έπειτα από κατάλληλη αξιολόγηση της εκάστοτε περίπτωσης, συνιστώνται :

- ✓ η αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature), της θερμοκρασίας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature) και της πίεσης έγχυσης (injection pressure) στο βέλτιστο επίπεδο ώστε να διασφαλίζεται ότι η κοιλότητα μορφοποίησης πληρώνεται στο ακέραιο με πολυμερές τήγμα χωρίς να προκύπτει είτε η ταχεία στερεοποίηση του τήγματος σε λάθος σημεία εξαιτίας μεταβολών στην ταχύτητα της ροής εντός της κοιλότητας είτε η ανεπαρκής συμπίεσή του,
- ✓ η διατήρηση του ομοιόμορφου πάχους των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου προσθέτοντας στρογγυλεύσεις και λειάνσεις στις αιχμηρές ακμές των παχύτερων τοιχωμάτων του προκειμένου να μην προκαλούνται αιφνιδίως άσκοπες αλλαγές στην κατεύθυνση και την ταχύτητα της ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού,
- ✓ η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου ούτως ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα ροής (flow rate) και να προληφθεί η πρώιμη ψύξη του πολυμερούς τήγματος (early cooling),
- ✓ η ανατοποθέτηση των πυλών εισόδου με σκοπό τη δημιουργία μεγαλύτερης απόστασης μεταξύ αυτών και των καναλιών ψύξης στοχεύοντας στην αποτροπή της

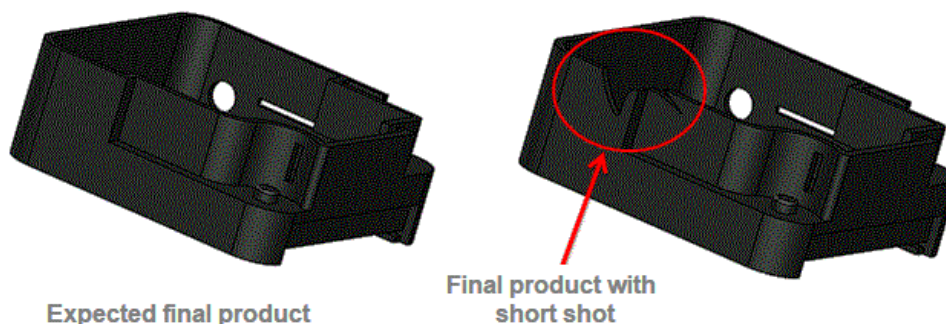
- ταχείας ψύξης του πολυμερούς τήγματος κατά τη διάρκεια της ροής του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού και
- ✓ η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τόσο του δοχείου ψύξης (cold slug) όσο και των επεκτάσεων των δρομέων (cold-well extensions) στο σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στο καλούπι (runner system) αποσκοπώντας στην παγίδευση του ψυχρού τήγματος, με το ενδεδειγμένο μήκος αυτών να ισούται με την τιμή της διαμέτρου των αγωγών διανομής.

3.3 Ελλιπής Πλήρωση (Short Shot)

Πρόκειται για μια κατασκευαστική ατέλεια κατά την οποία ορισμένες περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού δεν πληρώνονται εντελώς με πολυμερές τήγμα με αποτέλεσμα να προκύπτουν μη ολοκληρωμένα αντικείμενα μετά το πέρας της φάσης ψύξης (**Σχήμα 3-6**). Η ελλιπής πλήρωση οφείλεται συνήθως :

- στη χαμηλή πίεση έγχυσης (injection pressure) και τη χαμηλή ταχύτητα ροής (flow rate),
- στην ανεπαρκή πίεση συμπίεσης (packing pressure),
- στο υπερβολικά μεγάλο ιξώδες (viscosity) του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς,
- στη μειωμένη ρευστότητα του πολυμερούς τήγματος η οποία οδηγεί σε επιβράδυνση ή παύση της ροής του (flow hesitation) και οφείλεται συνήθως σε ιδιαίτερα στενές ή φραγμένες πύλες εισόδου από στερεοποιημένο πολυμερές καθώς και στην εσφαλμένη τοποθέτηση αυτών στο καλούπι,
- στις χαμηλές θερμοκρασίες τήγματος (melt temperature), καλουπιού (mold temperature) και ψυκτικού μέσου εντός των καναλιών ψύξης (coolant temperature), καθμία από τις οποίες δεν επιτρέπει στο πολυμερές τήγμα να προλάβει να γεμίσει ολόκληρη την κοιλότητα μορφοποίησης προτού αυτό ψυχθεί και στερεοποιηθεί,
- στην ανεπαρκή τροφοδοσία της διαδικασίας έγχυσης με πολυμερές τήγμα,
- στην ανεπαρκή εξαέρωση που οδηγεί στη δημιουργία εγκλωβισμένων φυσαλίδων αέρος (air-traps) στο μορφοποιημένο αντικείμενο,
- στον λανθασμένο σχεδιασμό του τελικού εξαρτήματος ή/και του καλουπιού αυτού (εξαρτήματα με λεπτά τοιχώματα ή εξαρτήματα με μεγάλο μήκος που καθιστούν αδύνατη τη ροή του πολυμερούς τήγματος από το ένα άκρο της κοιλότητας μορφοποίησης στο άλλο χωρίς την πρώιμη στερεοποίηση του τήγματος) και
- στον λανθασμένο σχεδιασμό της παραγωγικής διαδικασίας γενικότερα.

Μολαταύτα, κάποιες φορές η ατέλεια αυτή επιδιώκεται σκοπίμως ώστε να ελεγχθεί επακριβώς και να αποσαφηνιστεί εντελώς το μοτίβο πλήρωσης (filling pattern), ήτοι η κίνηση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού κατά το γέμισμά της με υλικό.



Σχήμα 3-6. Περίπτωση ατελούς πλήρωσης (short shot) σε τελικό προϊόν έγχυσης.

Προκειμένου να αποφεύγεται αυτού του είδους η ατέλεια στα τελικά προϊόντα έγχυσης και κατόπιν λεπτομερούς εξέτασης της εκάστοτε περίπτωσης, ενδείκνυνται :

- ✓ η αύξηση τόσο της πίεσης έγχυσης (injection pressure) όσο και της πίεσης συμπίεσης (packing pressure),
- ✓ η αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) ή/και της θερμοκρασίας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature) ώστε να μειωθεί το ιξώδες του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς και να καταστεί ευκολότερη η ροή του τήγματος εντός του καλουπιού,
- ✓ η αύξηση της ταχύτητας ροής (flow rate) έτσι ώστε να αναπτυχθούν περισσότερες διατμητικές τάσεις (shear stresses) στο πολυμερές τήγμα οι οποίες δύνανται να μειώσουν το ιξώδες του υλικού και να καταστήσουν πιο εύκολη τη ροή του τήγματος εντός του καλουπιού,
- ✓ η επαναληπτική αύξηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου (coolant temperature) εντός των καναλιών ψύξης κατά 5°C κάθε φορά,
- ✓ η μείωση της δύναμης σύσφιξης του καλουπιού (clamping force),
- ✓ η παροχή επαρκέστερης εξαέρωσης στις περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου όπου εγκλωβίζονται φυσαλίδες αέρος (air-traps),
- ✓ η εξάλειψη των εγκλωβισμένων φυσαλίδων αέρα διά της μετακίνησής τους είτε προς τα σημεία εξαερισμού είτε προς τα σημεία όπου προστίθενται οι εξογκείς,
- ✓ η αύξηση του πάχους των λεπτών τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου,
- ✓ η προσθήκη νεύρων στήριξης (ribs) σε εκείνες τις περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου όπου ξεκινά η πρώιμη στερεοποίηση του πολυμερούς τήγματος με το πάχος των νεύρων να ισούται από το $1/2$ έως τα $3/4$ του συνολικού πάχους του αντικειμένου,
- ✓ η αύξηση του μεγέθους των διαστάσεων των πυλών εισόδου και των αγωγών διανομής,
- ✓ η αλλαγή της θέσης των πυλών εισόδου στοχεύοντας στην αποφυγή παύσεων ή επιβραδύνσεων της ροής (flow hesitation) και
- ✓ η αντικατάσταση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού με ένα πολυμερές μικρότερου ιξώδους και αυξημένης ρευστότητας στην περίπτωση που όλα τα παραπάνω δεν επιφέρουν κάποια ουσιαστική βελτίωση στην υπάρχουσα προβληματική κατάσταση.

3.4 Εγκλωβισμένες Φυσαλίδες Αέρος (Air-Traps)

Οι εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρος (air-traps) είναι αέρια που παγιδεύονται στη μάζα του πολυμερούς δομικού υλικού είτε κατά την συγχώνευση δύο μετώπων ροής ενόσω η πλαστικοποίηση ή η αναρρόφηση βρίσκονται σε εξέλιξη είτε κατά την ανάπτυξη του φαινομένου της «εκτόξευσης» (jetting) κατά τη διάρκεια της έγχυσης. Η συσσώρευση των παγιδευμένων φυσαλίδων αέρα παρατηρείται κατά κόρον στα νεύρα στήριξης (ribs), στα σπειρώματα (threads) ή στις ανεπαρκώς αεριζόμενες προεξοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου ως προς τα ονομαστικά τοιχώματά του.

Ασφαλώς, ο εγκλωβισμός των αερίων στο εσωτερικό των προϊόντων έγχυσης είναι συνάρτηση κάποιων παραγόντων όπως :

- η κακή γεωμετρία του καλουπιού που μεταφράζεται σε :

- ακατάλληλο σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού (runner system) αποτελούμενο από μη συμμετρικούς και ισοσκελισμένους δρομείς που οδηγούν με τη σειρά τους σε μη συμμετρικά και ισοσταθμισμένα μέτωπα ροής ή/και
- προβληματική κοιλότητα ή/και προβληματικό πυρήνα που ευθύνονται για παύσεις ή επιβραδύνσεις στη ροή του πολυμερούς τήγματος (flow hesitation) καθώς και για την εκδήλωση του φαινομένου γρήγορης ροής (racetrack effect) κυρίως στις περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου με μικρό πάχος
- η υπερβολική αποσυμπίεση (decompression) του πολυμερούς τήγματος,
- η υποβάθμιση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού από άλλους παράγοντες (π.χ. υπερθέρμανση) και
- το ελλιπές, το ανύπαρκτο ή το λανθασμένο εν γένει σύστημα εξαερισμού (venting) του καλουπιού.

Ειδικότερα, το κατάλληλο σύστημα εξαερισμού σε ένα καλούπι αποτρέπει το πολυμερές τήγμα να εγκλωβίσει κατά την εισχώρησή του στην κοιλότητα μορφοποίησης μέρος του αέρα που υπάρχει ήδη σε αυτή. Τούτος είναι άλλωστε ο λόγος που κρίνεται αναγκαία τόσο η επάρκεια των σημείων εξαέρωσης του καλουπιού όσο και η τοποθέτηση αυτών στην κατάλληλη θέση. Ωστόσο, συχνά παρατηρείται η ταχεία φραγή των σημείων εξαέρωσης από πρώιμα στερεοποιημένο πολυμερές είτε λόγω του μικρού μεγέθους αυτών είτε εξαιτίας των ανάρμοστων συνθηκών έγχυσης. Στην περίπτωση αυτή η κοιλότητα μορφοποίησης εξακολουθεί να γεμίζει με πολυμερές τήγμα ενώ παραμένει εγκλωβισμένος αέρας. Το φαινόμενο αυτό συνήθως οδηγεί στην εκδήλωση τουλάχιστον μίας εκ των κάτωθι κατασκευαστικών ατελειών στο μορφοποιημένο αντικείμενο :

- Ο εγκλωβισμένος αέρας ενδέχεται να διασκορπίζεται στο διάστημα μεταξύ των ελεύθερων επιφανειών της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού και της επιφάνειας του μορφοποιημένου αντικειμένου επί της οποίας σχηματίζεται ενίοτε μια κηλίδα, άλλες φορές περισσότερο έντονη και άλλες λιγότερο.
- Λόγω της δυναμικής που προσδίδει η γεωμετρία του μορφοποιημένου αντικειμένου στην κοιλότητα μορφοποίησης, ο αέρας δύναται να μετακομίζει στο εσωτερικό της μάζας των τοιχωμάτων του αντικειμένου όπου το πολυμερές τήγμα είναι πιο μαλακό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται είτε βαθουλώματα (*sink marks*) στην ελεύθερη επιφάνειά του, ήτοι μικρής έκτασης κρατήρες ή κοιλότητες που ομοιάζουν με σπήλαια, είτε κενά αέρος (*vacuum voids*) στο εσωτερικό του.
- Ο αέρας μπορεί να παραμένει εγκλωβισμένος στο ίδιο σημείο, γεγονός το οποίο επιφέρει το φαινόμενο της καύσης (*burn marks*) Ασφαλώς, η ανάπτυξη του φαινομένου αυτού επιτείνεται όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για κάτι τέτοιο (υπερθέρμανση παγιδευμένου αέρα).
- Όταν δεν εκδηλώνεται το φαινόμενο της καύσης, η παρουσία αέρα στο συγκεκριμένο σημείο είναι ικανή να παρακωλύει τόσο την απόλυτη πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα όσο και την επακόλουθη συμπίεση του τήγματος προκαλώντας έτσι τη δημιουργία κενών (*voids*) στο τελικό προϊόν.

Αναμφίβολα, ο έλεγχος για την παρουσία εγκλωβισμένων φυσαλίδων αέρος χρειάζεται να είναι τακτικός και ενδελεχής διότι η παρουσία τους στα τελικά προϊόντα έγχυσης τα καθιστά επιρρεπή σε δυναμικές καταπονήσεις μια και συντελεί στη σημαντική υποτίμηση της μηχανικής τους αντοχής. Κοντά στα υπόλοιπα, η εν λόγω ατέλεια αποτελεί αισθητικό ελάττωμα ιδιαίτερα έντονο σε ημιδιαφανή ή τελείως διαφανή αντικείμενα.

3.4.1 Βαθουλώματα / Ρουφήγματα / Τραβήγματα (Sink Marks)

Τα *βαθουλώματα* (*sink marks*) είναι περιορισμένης έκτασης κρατήσεις ή κοιλότητες που αναπτύσσονται στις περιοχές των προϊόντων έγχυσης με αυξημένο πάχος (**Σχήμα 3-7**). Ασφαλώς, δεν αποτελούν μόνο οπτικό ελάττωμα διά της αντανάκλασης φωτός σε διαφορετικές κατευθύνσεις, αλλά επιδρούν αρνητικά και στη μηχανική αντοχή των προϊόντων έγχυσης. Η δημιουργία των βαθουλωμάτων είναι συχνά απότοκος της ανεπαρκούς αντιστάθμισης του πολυμερούς δομικού υλικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού κατά τη διάρκεια της συμπίεσης του τήγματος (packing stage) ή της αυξημένης ανομοιομορφίας του πάχους των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου εξαιτίας των πολλών και διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών από τα οποία αποτελείται.



Σχήμα 3-7. Βαθουλώματα (sink marks) στην εξωτερική επιφάνεια ενός παραχθέντος προϊόντος έγχυσης.

Παρά ταύτα, η εμφάνιση των βαθουλωμάτων οφείλεται ως επί το πλείστον στην υψηλή ογκομετρική συρρίκνωση που υφίστανται οι εσωτερικές στιβάδες του στερεοποιημένου πολυμερούς ενόσω διαρκεί η ψύξη του τήγματος. Η ογκομετρική συρρίκνωση δε ποικίλει αναλόγως του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου πολυμερούς. Κατά κοινή διαπίστωση, όσο περισσότερο συρρικνώνεται ένα πολυμερές (π.χ. πολυπροπυλένιο), τόσο ευκολότερο είναι να προκληθούν μεγάλης τάξης μεγέθους βαθουλώματα στα τελικά προϊόντα έγχυσης, ακόμη και στα λεπτά νεύρα στήριξης (ribs) που ενδεχομένως διαθέτουν.

Πιο συγκεκριμένα, με το πέρας της βαθμιαίας ανάπτυξης πίεσης συγκράτησης (packing pressure) στο πολυμερές τήγμα εντός της κοιλότητας μορφοποίησης ξεκινά η σταθερή ψύξη του με αποτέλεσμα οι εξωτερικές στιβάδες του τήγματος να αρχίζουν να στερεοποιούνται. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μεταβολές στον όγκο του πολυμερούς που ευθύνονται για τη συρρίκνωσή του και τη στροφή των στερεοποιημένων εξωτερικών στρωμάτων του προς τα εσωτερικά μη στερεοποιημένα στρώματα δημιουργώντας, έτσι, βαθούλωμα. Εντούτοις, εάν το εξωτερικό στρώμα του μορφοποιημένου αντικειμένου έχει επαρκή αντοχή ώστε να ανθίσταται στην έλξη της ογκομετρικής συρρίκνωσης, επίκειται η δημιουργία κενών αέρος (vacuum voids) στο εσωτερικό, κάτι το οποίο ενίοτε δεν εκδηλώνεται ως πρόβλημα άμεσα σχετιζόμενο με την αισθητική εμφάνιση του προϊόντος έγχυσης.

Οπωσδήποτε, ο σχηματισμός των βαθουλωμάτων επιτείνεται όταν ο χρόνος συμπίεσης (packing time) είναι πολύ σύντομος ή/και όταν ο χρόνος ψύξης (cooling time) από κοινού

με τον μηχανισμό ψύξης (cooling system) δεν επαρκούν για την πλήρη ψύξη του πολυμερούς τήγματος και την συνακόλουθη σκλήρυνση του ενόσω αυτό βρίσκεται εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Συνυπολογίζοντας επομένως όλα όσα προαναφέρθηκαν, για τον περιορισμό της εμφάνισης βαθουλωμάτων στα προϊόντα έγχυσης στο ελάχιστο δυνατό, προτείνονται :

- ✓ η μείωση του πάχους των παχύτερων τοιχωμάτων του προϊόντος έγχυσης που θα κατοχυρώσει την ταχύτερη ψύξη τους,
- ✓ η μείωση της θερμοκρασίας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature),
- ✓ η μείωση της θερμοκρασίας του ακροφυσίου (nozzle temperature),
- ✓ η αύξηση της ταχύτητας ροής του πολυμερούς τήγματος (flow rate) προκειμένου να μειωθεί το ιξώδες του υλικού,
- ✓ η αύξηση της πίεσης συμπίεσης (packing pressure) και οι παρατεταμένοι χρόνοι συμπίεσης (packing time) και ψύξης (cooling time) ώστε να επιτυγχάνεται η επαρκέστερη ψύξη και σκλήρυνση του πολυμερούς,
- ✓ η αύξηση της αποδοτικότητας της ψύξης (cooling efficiency),
- ✓ η τοποθέτηση των πυλών εισόδου στα παχύτερα τοιχώματα του προϊόντος έγχυσης που αποτελούν και τις προβληματικότερες των περιοχών του ώστε να εξασφαλιστεί η συμπίεση του πολυμερούς τήγματος σε αυτές προτού ψυχθούν τα λεπτότερα τοιχώματα ή φράξουν οι πύλες εισόδου από στερεοποιημένο πολυμερές και
- ✓ η παροχή αποτελεσματικού συστήματος εξαερισμού στο καλούπι (venting) για την καλύτερη απαγωγή των εγκλωβισμένων αερίων στην ατμόσφαιρα.

3.4.2 Σημάδια Καύσης (Burn Marks)

Η καύση εμφανίζεται σε κάποιες περιοχές της εξωτερικής επιφάνειας των προϊόντων έγχυσης ή σε ορισμένες ακμές αυτών υπό τη μορφή σημαδιών αποχρωματισμού, με το σύνηθες χρώμα τους να είναι το μαύρο ή το χρώμα της σκουριάς (**Σχήμα 3-8**). Πρόκειται για κατασκευαστική ατέλεια η οποία δεν επηρεάζει την ακεραιότητα ενός προϊόντος έγχυσης, εκτός εάν το πολυμερές έχει υποστεί καύση σε βαθμό αλλοίωσης ή υποβάθμισης.



Σχήμα 3-8. Σημάδια καύσης (burn marks) στην εξωτερική επιφάνεια ενός παραχθέντος προϊόντος έγχυσης.

Ομολογουμένως, η εμφάνιση των σημαδιών καύσης (burn marks) οφείλεται στην υποτίμηση των ιδιοτήτων του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς είτε λόγω υπερβολικής θέρμανσής του, είτε εξαιτίας της ασυνήθιστα υψηλής ταχύτητας ροής (flow rate), είτε λόγω του ακατάλληλου σχεδιασμού του συστήματος διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού (runner system). Σημάδια καύσης μπορούν επίσης να προκληθούν από την υπερθέρμανση του αέρα που εξακολουθεί να βρίσκεται παγιδευμένος στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού εξαιτίας της εκτεταμένης συμπίεσής του. Στην περίπτωση δε που η συμπίεση είναι απότομη και αποτελεί προϊόν άσκησης υψηλών πιέσεων, τότε εκλύεται μεγάλο ποσό θερμότητας σε μικρή επιφάνεια την οποία και χαράσσει.

Ως γνωστόν, τα βασικά δομικά στοιχεία ενός πολυμερούς είναι ο άνθρακας (C) και το υδρογόνο (H). Όμως, με την παρουσία οξυγόνου (O₂) λόγω του εγκλωβισμένου αέρα στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης που δεν έχει απαχθεί στην ατμόσφαιρα εξαιτίας της ανεπάρκειας του συστήματος εξαερισμού, προκαλείται χημική αντίδραση που οδηγεί το υλικό σε έντονη επιφανειακή αυτανάφλεξη (burn). Εντούτοις, η καύση του πολυμερούς όταν το σύστημα εξαερισμού του καλουπιού είναι ελλιπές ή ανύπαρκτο δεν είναι νομοτέλεια· υπάρχουν περιπτώσεις που το μορφοποιημένο αντικείμενο δεν εμφανίζει σημάδια καύσης. Κάτι τέτοιο παρατηρείται όταν :

- η γεωμετρία της κοιλότητας μορφοποίησης είναι τέτοια που εξαναγκάζει τον εγκλωβισμένο αέρα στο εσωτερικό της σε διάχυση και όχι σε συσσώρευση σε συγκεκριμένα σημεία,
- η πίεση έγχυσης (injection pressure) ή/και η ταχύτητα ροής (flow rate) δεν είναι μεγάλης τάξης μεγέθους ώστε να προκαλέσουν καύση του πολυμερούς ή
- ο εγκλωβισμένος αέρας μεταναστεύει στο εσωτερικό της μάζας του μορφοποιημένου αντικειμένου και εμφανίζεται στο πλησιέστερο σημείο όπου το τοίχωμα είναι παχύτερο και το τήγμα καθυστερεί να ψυχθεί.

Ασφαλώς, για την αποτροπή της κατά τόπους εμφάνισης σημαδιών καύσης στην εξωτερική επιφάνεια ή στις ακμές των προϊόντων έγχυσης προτείνονται διάφορες προληπτικές ενέργειες, όπως :

- ✓ μείωση τόσο της ταχύτητας ροής (flow rate) όσο και της πίεσης έγχυσης (injection pressure) ή της πίεσης συμπίεσης (packing pressure) ούτως ώστε να περιοριστεί ο κίνδυνος εγκλωβισμού αέρος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού,
- ✓ εξάλειψη των εγκλωβισμένων φυσαλίδων αέρος (air-traps) διά της μετακίνησής τους είτε προς τα σημεία εξαερισμού είτε προς τα σημεία όπου προστίθενται οι εξολκείς,
- ✓ μείωση της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) και της θερμοκρασίας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature) προκειμένου να αποτραπεί η υπερθέρμανση τόσο του τήγματος όσο και του τυχόν παγιδευμένου αέρα εντός της κοιλότητας μορφοποίησης (προσοχή στην επιδείνωση των εσωτερικών παραμενουσών τάσεων που προκαλείται από μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας του τήγματος),
- ✓ τροποποίηση στον σχεδιασμό είτε του συστήματος διανομής είτε του προς μορφοποίηση αντικειμένου επιδιώκοντας το βέλτιστο αποτέλεσμα ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διατμητικές τάσεις (shear stresses) που επιδεινώνουν την υπερθέρμανση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς και συντείνουν στην ποιοτική υποβάθμισή του,
- ✓ μεγέθυνση τόσο των πυλών εισόδου όσο και των σημείων εξαερισμού του καλουπιού και επιλογή προς χρησιμοποίηση εκείνων των πολυμερών που διακρίνονται από

χαμηλό ιξώδες, διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο ότι ο παγιδευμένος αέρας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού δύναται να απαχθεί στην ατμόσφαιρα ταχύτερα και

- ✓ μείωση της χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης (cycle time) έτσι ώστε τυχόν παγιδευμένος αέρας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης αλλά και το πολυμερές τήγμα να μην έχουν πιθανότητες υπερθέρμανσης.

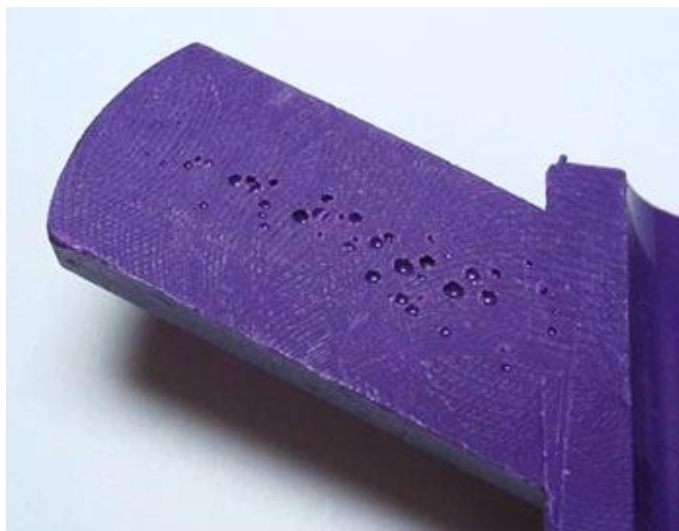
3.4.3 Κενά (Voids)

Τα *κενά (voids)* αποτελούν μια χαρακτηριστική κατασκευαστική ατέλεια των προϊόντων έγχυσης και εντοπίζονται :

- είτε στις ενδότερες στιβάδες της εξωτερικής επιφάνειας των προϊόντων λόγω της ύπαρξης παγιδευμένων θυλάκων αέρος (air-traps) που παρακωλύουν τόσο την απόλυτη πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα όσο και την επακόλουθη συμπίεση του τήγματος (**Σχήμα 3-9**).
- είτε στο εσωτερικό των παχύτερων τοιχωμάτων των προϊόντων ως *κενά αέρος (vacuum voids)* εξαιτίας των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά την ψύξη και προκαλούν την ανομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς δομικού υλικού και κατ' επέκταση την ανομοιογενή στερεοποίησή του (**Σχήμα 3-10**).



Σχήμα 3-9. Διαφανές προϊόν έγχυσης στα εσώτερα στρώματα της εξωτερικής επιφάνειας του οποίου έχει σχηματιστεί κενό λόγω παγιδευμένου αέρα.



Σχήμα 3-10. Τομή ενός προϊόντος έγχυσης σε ένα από τα παχύτερα τοιχώματά του όπου εσωτερικά έχουν δημιουργηθεί κενά αέρος (vacuum voids).

Σε κάθε περίπτωση, ο σχηματισμός κενών δύναται να επιδεινωθεί όταν η πίεση συμπίεσης (packing pressure) δεν καθίσταται αρκετή ώστε αφενός μεν να συμπιεστεί το πολυμερές τήγμα εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού στον απαραίτητο βαθμό, αφετέρου δε να αποβληθεί ο αέρας που ενδεχομένως βρίσκεται παγιδευμένος στην κοιλότητα. Από την άλλη πλευρά, η μη σωστή ευθυγράμμιση κινητού και σταθερού μέρους του καλουπιού επιτείνει τη δημιουργία κενών. Κατά συνέπεια, δεδομένης της αρνητικής επίδρασής τους στη συνολική δομή των προϊόντων έγχυσης, κρίνεται αναγκαία η πρόληψη της εμφάνισης κενών μέσω :

- ✓ της τοποθέτησης των πυλών εισόδου σε εκείνες τις περιοχές του μορφοποιούμενου αντικειμένου όπου το πάχος είναι αυξημένο στοχεύοντας έτσι στην εξασφάλιση της συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος στις περιοχές αυτές προτού ψυχθούν τα λεπτότερα τοιχώματα του αντικειμένου και φράξουν οι πύλες εισόδου με στερεοποιημένο πολυμερές,
- ✓ της διατήρησης της ομοιομορφίας του πάχους των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου, όπου αυτό καθίσταται εφικτό, με παράλληλη προσθήκη νεύρων στήριξης (ribs) πάχους ίσου από το **1/2** έως τα **3/4** του συνολικού πάχους του αντικειμένου καθώς τα παχύτερα τοιχώματα στα προϊόντα έγχυσης από μόνα τους δεν κατοχυρώνουν πάντα τη μέγιστη μηχανική αντοχή,
- ✓ της παροχής αποτελεσματικότερου συστήματος εξαερισμού στο καλούπι (venting) στοχεύοντας στην καλύτερη απαγωγή των εγκλωβισμένων αερίων στην ατμόσφαιρα,
- ✓ της επιλογής προς χρησιμοποίηση ενός πολυμερούς δομικού υλικού με χαμηλότερο ιξώδες μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ποσότητα τυχόν παγιδευμένου αέρα διά της ευκολότερης και ταχύτερης απαγωγής του στην ατμόσφαιρα,
- ✓ της αύξησης τόσο της πίεσης συμπίεσης (packing pressure) όσο και του χρόνου συμπίεσης (packing time) ώστε να επιτραπεί μεγαλύτερη συμπίεση του πολυμερούς τήγματος ενόσω το δεύτερο στάδιο της κατασκευαστικής διεργασίας (packing stage) βρίσκεται σε εξέλιξη,
- ✓ της μείωσης της ταχύτητας ροής (flow rate) ή/και της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) και
- ✓ της απόλυτης ευθυγράμμισης του κινητού μέρους του καλουπιού με το αντίστοιχο σταθερό.

3.5 Το Φαινόμενο της «Εκτόξευσης» ή Φαινόμενο Πίδακα (Jetting)

Το φαινόμενο της «εκτόξευσης» ή φαινόμενο πίδακα (*jetting*) αναφέρεται σε μια κατάσταση κατά την οποία το πολυμερές τήγμα αποτυγχάνει να προσκολληθεί στην εξωτερική επιφάνεια της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού λόγω της υψηλής ταχύτητας ροής (flow rate) που οδηγεί στην ανάπτυξη *τυρβώδους ροής* (*turbulent flow*). Όντας ρευστό, το πολυμερές στερεοποιείται σε μια κατάσταση όπου κάνουν την εμφάνισή τους κυματοειδείς ή ελικοειδείς πτυχές του ρεύματος εκτόξευσης στην ελεύθερη επιφάνεια του προϊόντος έγχυσης (**Σχήμα 3-11**). Είναι μάλιστα ιδιαίτερα έντονες πέριξ των περιοχών όπου είναι τοποθετημένες οι πύλες εισόδου. Το φαινόμενο αναπτύσσεται κυρίως όταν η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) είναι πολύ χαμηλή και το ιξώδες του υπερβολικά υψηλό, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την αντίσταση στη ροή του (flow resistance) εντός της κοιλότητας μορφοποίησης.



Σχήμα 3-11. Προϊόν έγχυσης στην εξωτερική επιφάνεια του οποίου είναι εμφανές το φαινόμενο πίδακα (jetting).

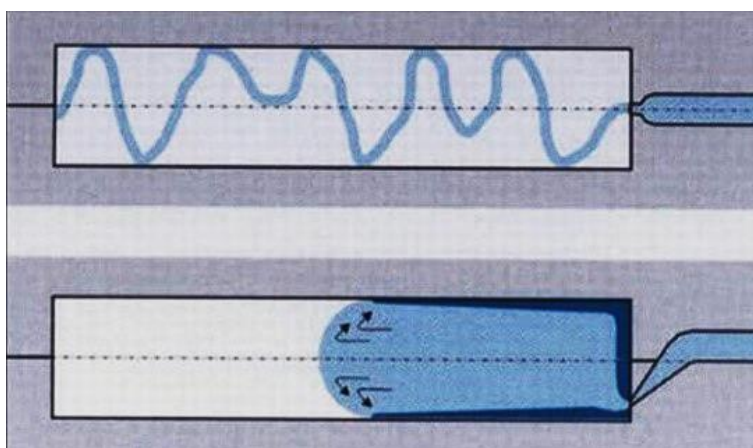
Ακριβέστερα, όταν το πολυμερές έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα της μήτρας, ψύχεται ταχέως και το ιξώδες αυξάνεται. Το υλικό που ρέει πίσω από αυτό το παχύρρευστο πολυμερές ωθεί όλο και περισσότερο το παχύρρευστο πολυμερές στην κοιλότητα μορφοποίησης δημιουργώντας, έτσι, μια παχύρρευστη «σερπαντίνα» η οποία ναι μεν εφάπτεται στα εξωτερικά τοιχώματα της κοιλότητας αλλά μόνο σε ορισμένα σημεία. Εν συνεχεία, το κύριο μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος ακολουθεί αλλά η παχύρρευστη «σερπαντίνα» αποτυγχάνει να συγχωνευθεί πλήρως με αυτό δεδομένου ότι η μάζα της δεύτερης έχει μεγαλύτερο ιξώδες σε σχέση με τη μάζα του πρώτου. Συνεπώς, κάνουν την εμφάνισή τους σημάδια στην επιφάνεια του τελικού προϊόντος τα οποία χαρακτηρίζονται από μειωμένη στιλπνότητα ή μεταβολή στο χρώμα, δηλαδή αποχρωματισμό. Ενδέχεται, βέβαια, στα όρια της τραχείας αυτής επιφάνειας που δημιουργείται να σημειωθούν αυλακώσεις οι οποίες ομοιάζουν με γραμμές συγκόλλησης (weld lines).

Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι το φαινόμενο πίδακα οδηγεί στην υποβάθμιση της μηχανικής αντοχής ενός προϊόντος έγχυσης και την εκδήλωση πολλών επιφανειακών και εσωτερικών ατελειών, η αντιμετώπισή του κρίνεται αναγκαία και είναι δυνατό να επιτευχθεί με :

- ✓ αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature),

- ✓ αύξηση της θερμοκρασίας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature),
- ✓ αύξηση του μεγέθους των πυλών εισόδου έτσι ώστε η ταχύτητα ροής (flow rate) να γίνεται πιο αργή όταν το πολυμερές τήγμα διέρχεται μέσα από αυτές και μόλις ξεκινά η διάχυσή του στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού σταδιακά να αυξάνεται,
- ✓ τοποθέτηση των πυλών εισόδου στα παχύτερα τοιχώματα του προϊόντος έγχυσης και
- ✓ βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των πυλών εισόδου χρησιμοποιώντας πύλες εισόδου τύπου :
 - overlap ή submarine προκειμένου να εξασφαλιστεί η επάρκεια στην επαφή μεταξύ του πολυμερούς τήγματος και των εξωτερικών τοιχωμάτων της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού ή
 - tab ή fan ούτως ώστε η ροή του πολυμερούς τήγματος να επιβραδύνεται βαθμιαία με αποκλίνουσα περιοχή ροής μειώνοντας τοιουτοτρόπως τις διατμητικές τάσεις (shear stresses) που ασκούνται στο τήγμα αλλά και την ταχύτητα διάτμησης (shear rate).

Όπως παρατηρείται και στο **Σχήμα 3-12** που ακολουθεί, μετά την τοποθέτηση των βελτιστοποιημένων σχεδιαστικά πυλών εισόδου στα παχύτερα τοιχώματα του προϊόντος έγχυσης, το φαινόμενο πίδακα εξαλείφεται.



Σχήμα 3-12. Σκαριφηματική απόδοση της ανάπτυξης του φαινομένου της «εκτόξευσης» (πάνω) και της εξάλειψής του (κάτω) κατόπιν διορθώσεων στις πύλες εισόδου.

3.6 Προέκταμα (Flash / Spew)

Το *προέκταμα* (*flash/spew*) είναι επακόλουθο της περίσσειας χυτευμένου πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού η οποία υπερβαίνει τα όρια που καθορίζει η γεωμετρία της κοιλότητας. Συνεπώς, κατά τη διαδικασία της έγχυσης αυτή η παραπανίσια ποσότητα πολυμερούς τήγματος θα βρεθεί εκτός της κοιλότητας μορφοποίησης και θα στερεοποιηθεί προσκολλώμενη στο κυρίως μορφοποιημένο αντικείμενο υπό τη μορφή προεξοχής ή λεπτού χείλους (**Σχήμα 3-13**).



Σχήμα 3-13. Παρουσία προεκτάματος (flash/spew) σε προϊόν έγχυσης υπό τη μορφή λεπτού χείλους. Στις περιπτώσεις που δεν καθίσταται εφικτή η ανακατασκευή του προϊόντος βελτιώνοντας τις συνθήκες έγχυσης, προτιμάται η αποκοπή του προεκτάματος από το υπόλοιπο προϊόν με μηχανική επεξεργασία.

Σε γενικές γραμμές, το προέκταμα κάνει την εμφάνισή του περιφερειακά του μορφοποιημένου αντικείμενου και συγκεκριμένα στα σημεία όπου το κινητό και το σταθερό μέρος του καλουπιού εφάπτονται (γραμμή διαχωρισμού - *parting line*). Μολοντούτο, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να το συναντήσει κανείς και σε άλλα σημεία όπου το πολυμερές τήγμα βρίσκει διάκενα εντός των οποίων δύναται να εισχωρήσει. Τέτοια κενά, για παράδειγμα, είναι εκείνα που αφήνουν οι βελόνες των εξολκέων ή η κακή εφαρμογή του κινητού μέρους του καλουπιού με το αντίστοιχο σταθερό. Τα δε αίτια που προκαλούν το προέκταμα εντοπίζονται :

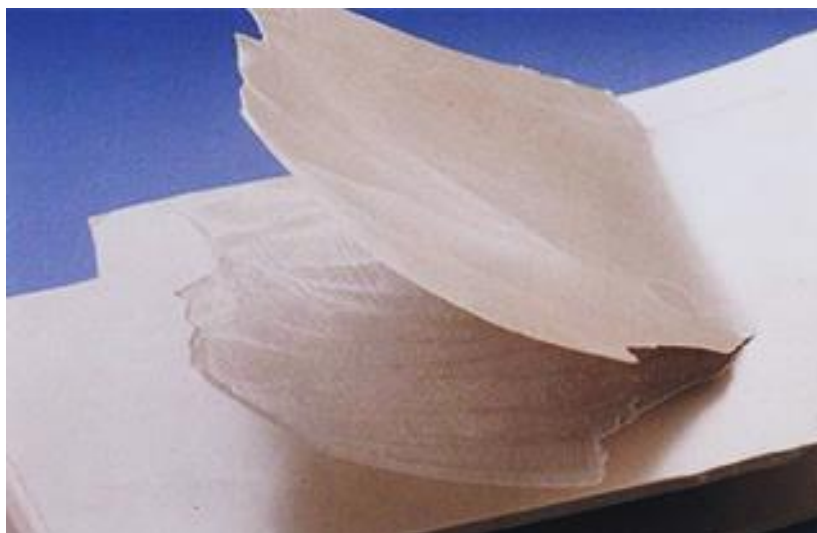
- στις ακατάλληλες συνθήκες έγχυσης όπως η υψηλή ταχύτητα ροής (flow rate) και η υψηλή πίεση συμπίεσης (packing pressure) που οδηγεί σε υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος (overpacking),
- στο χαμηλό ιξώδες του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού,
- στο αναποτελεσματικό λόγω ακατάλληλου σχεδιασμού σύστημα εξαερισμού του καλουπιού (venting),
- στο χαμηλό φορτίο της δύναμης σύσφιξης του καλουπιού (clamping force) και
- στην κακή εφαρμογή, τη φθορά ή/και τον κακό σχεδιασμό των οινωδών στοιχείων του καλουπιού, όπως η κοιλότητα, ο πυρήνας και τα λοιπά αποσπώμενα εξαρτήματα.

Αναντίρρητα, η παρουσία του προεκτάματος σαν κατασκευαστική ατέλεια αποτελεί όχι μόνο οπτική, αλλά και λειτουργική επιβάρυνση. Και αυτό γιατί εξαιτίας του προεκτάματος ελλοχεύει σοβαρός κίνδυνος να προκύψουν διάφορα ζητήματα στην κατασκευαστική διεργασία όπως, για παράδειγμα, η αποτροπή της απομάκρυνσης του μορφοποιημένου αντικείμενου από το καλούπι κατά την εξόλκευση. Στην περίπτωση αυτή το μορφοποιημένο αντικείμενο εξακολουθεί να παραμένει εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού καθιστώντας επισφαλή την εύρυθμη λειτουργία του επόμενου κύκλου έγχυσης. Πράγματι, με την έναρξή του αυξάνονται οι πιθανότητες πρόκλησης ποικίλων βλαβών τόσο στην κοιλότητα και τον πυρήνα του καλουπιού όσο και στη μηχανή έγχυσης γενικότερα. Συνεπώς, για την αποτροπή της εκδήλωσης του φαινομένου του προεκτάματος ενδείκνυται :

- ✓ η αύξηση της δύναμης σύσφιξης του καλουπιού (clamping force) προκειμένου να διασφαλίζεται ότι σταθερό και κινητό μέρος παραμένουν ερμητικά κλειστά κατά τη διάρκεια της έγχυσης (η δύναμη σύσφιξης πρέπει να είναι σαφώς μεγαλύτερη της πίεσης έγχυσης),
- ✓ η σωστή συναρμολόγηση και εφαρμογή όλων των εξαρτημάτων του καλουπιού,
- ✓ ο τακτικός καθαρισμός, η σωστή συντήρηση και η έγκαιρη αντικατάσταση της κοιλότητας του καλουπιού όταν αυτή έχει φτάσει πλέον στο τέλος της ωφέλιμης διάρκειας ζωής της (προφανώς το ίδιο ισχύει και για όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα),
- ✓ η επιλογή προς χρησιμοποίηση ενός πολυμερούς δομικού υλικού με υψηλότερο ιξώδες, μειώνοντας τοιουτουρόπως τον κίνδυνο διαρροής του τήγματος πέραν των ορίων που καθορίζει η γεωμετρία της κοιλότητας μορφοποίησης,
- ✓ η επαρκής παροχή εξαερισμού στο καλούπι (venting) και
- ✓ η υιοθέτηση των βέλτιστων συνθηκών έγχυσης, δηλαδή να μην τίθενται υπερβολικά υψηλές τιμές σε συγκεκριμένα φυσικά μεγέθη όπως :
 - η ταχύτητα ροής (flow rate),
 - η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature),
 - η θερμοκρασία της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature),
 - η πίεση έγχυσης (injection pressure) και
 - η πίεση συμπίεσης (packing pressure).

3.7 Αποκόλληση ή Αποελασματοποίηση (Delamination)

Η αποκόλληση ή αποελασματοποίηση (delamination) αποτελεί επιφανειακό κατασκευαστικό ελάττωμα των προϊόντων έγχυσης ιδιαίτερα σοβαρό για το λόγο ότι υποβαθμίζει δραματικά τη μηχανική αντοχή αυτών. Συνήθως, η αποελασματοποίηση διακρίνεται στην εξωτερική επιφάνεια ενός παραχθέντος προϊόντος έγχυσης ως επικαλύψεις υλικού έτοιμες να αποκολληθούν από την υπόλοιπη επιφάνεια. Με άλλα λόγια, οι επικαλύψεις αυτές δεν είναι τίποτε άλλο πέρα από λεπτά επιφανειακά στρώματα πολυμερούς διαχωρισμένα κατά τέτοιον τρόπο ώστε να προκύπτει αποφλοίωση του υλικού (**Σχήμα 3-14**).



Σχήμα 3-14. Αποφλοίωση υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια ενός προϊόντος έγχυσης.

Η πιο κοινή αιτία εμφάνισης της αποελασμάτωσης είναι η μόλυνση των σφαιριδίων του πολυμερούς τήγματος με κάποιο ξένο υλικό που συνηθίζεται να αποκαλείται

μολυσματικός παράγοντας (contaminant). Ακριβέστερα, ο μολυσματικός παράγοντας λειτουργεί ως τοπικό σφάλμα παγιδευμένο στο εσωτερικό του χυτευμένου πολυμερούς με το οποίο αδυνατεί να συνδεθεί σωστά και να αφομοιωθεί. Κατά συνέπεια, το φαινόμενο του *διαχωρισμού* εντείνεται επιδρώντας αρνητικά όχι μόνο στην ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας ενός προϊόντος έγχυσης αλλά, όπως προαναφέρθηκε, και στη μηχανική αντοχή αυτού.

Εκτός από το πολυμερές δομικό υλικό που τροφοδοτείται στην χοάνη μιας μηχανής έγχυσης, μολυσματικό παράγοντα μπορούν επίσης να αποτελέσουν οι τυχόν πρόσθετοι *παράγοντες απελευθέρωσης* που καλύπτουν τόσο την κοιλότητα όσο και τον πυρήνα του καλουπιού. Υπογραμμίζεται ότι αν και ο ρόλος των παραγόντων απελευθέρωσης είναι σημαντικός καθότι συνεισφέρουν στην ευκολότερη απομάκρυνση του μορφοποιημένου αντικείμενου από το καλούπι, εντούτοις, η κατάχρηση αυτών επιτείνει το φαινόμενο της αποελασματοποίησης.

Συν τοις άλλοις, η υπερβολική υγρασία που ενδεχομένως επικρατεί εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού λόγω ακατάλληλης προθέρμανσης πριν από την έναρξη του κύκλου έγχυσης, μπορεί επίσης να προκαλέσει αποελασματοποίηση. Στην πραγματικότητα, τα εναπομείναντα σταγονίδια νερού στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης μετατρέπονται σε ατμό όταν ξεκινά η θέρμανσή της με αποτέλεσμα ο ατμός αυτός να εξαπλώνεται σε όλη την έκταση του πολυμερούς τήγματος. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την αναπόδραστη παρέμβαση στη μοριακή σύνδεση του πολυμερούς προκαλώντας κενές περιοχές μεταξύ των μορίων οι οποίες είναι εξαιρετικά αδύναμες και εύθραυστες. Προφανώς, όταν το πολυμερές τήγμα ψυχθεί ολομερώς και συρρικνωθεί, τότε παρατηρείται τράβηγμα στις κενές περιοχές που έχουν δημιουργηθεί και τελικά αποκόλληση υλικού στην εξωτερική επιφάνεια του παραχθέντος εξαρτήματος.

Κοντά στα υπόλοιπα και δεδομένου ότι η κοιλότητα μορφοποίησης πληρώνεται με επάλληλες στρώσεις πολυμερούς τήγματος, εάν η ταχύτητα ροής (flow rate) είναι πολύ αργή, τότε τα στρώματα πολυμερούς στερεοποιούνται προτού συμπιεστούν και συγχωνευθούν εντελώς. Κατά συνέπεια, η ασθενής αυτή συνένωση των στρωμάτων πολυμερούς ευθύνεται με τη σειρά της για την επιδείνωση του φαινομένου της αποελασμάτωσης ενόσω το μορφοποιημένο αντικείμενο ψύχεται και συρρικνώνεται. Στην περίπτωση δε που η ταχύτητα ροής είναι πολύ υψηλή, τότε η αποελασματοποίηση προκαλείται από άλλους παράγοντες που οδηγούν στην υποβάθμιση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς (π.χ. καύση).

Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη αιχμηρών ακμών τόσο στο προς μορφοποίηση αντικείμενο όσο και στο σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στην κοιλότητα μορφοποίησης (runner system) αποτελεί επίσης σημαντική αιτία πρόκλησης αποκόλλησης υλικού στο τελικό προϊόν έγχυσης. Τούτο συμβαίνει διότι οι αιχμηρές ακμές ασκούν ισχυρές διατμητικές τάσεις (shear stresses) στο πολυμερές τήγμα, το διαχωρίζουν σε πολλαπλά μέτωπα και παρεμποδίζουν την ορθή επανένωση και συγχώνευσή τους. Κατά συνέπεια, μετά την ψύξη και τη συρρίκνωση του τήγματος κάνουν την εμφάνισή τους αποκολλήσεις υλικού στην εξωτερική επιφάνεια του παραχθέντος προϊόντος και συγκεκριμένα στις περιοχές πλησίον των αιχμηρών ακμών του.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα όσα προαναφέρθηκαν, καλό είναι να εξετάζονται κάποιες βελτιωτικές ενέργειες ως προς την πρόληψη της εμφάνισης της εν λόγω ατέλειας στην εξωτερική επιφάνεια των προϊόντων έγχυσης όπως :

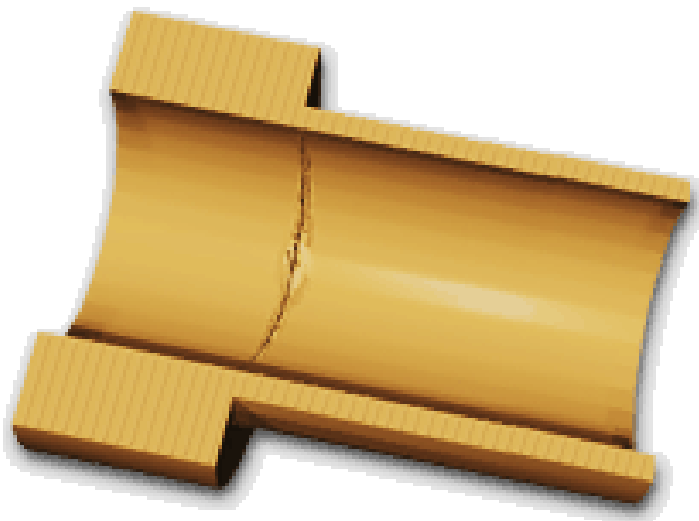
- ✓ η αύξηση της θερμοκρασίας του καλουπιού (mold temperature) και της θερμοκρασίας του τήγματος (melt temperature) εφόσον αμφοτέρες είναι εξαιρετικά χαμηλές ώστε η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των εξωτερικών τοιχωμάτων της κοιλότητας και του

πυρήνα του καλουπιού και της εξωτερικής στιβάδας του ρευστού να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη,

- ✓ η σωστή προθέρμανση του καλουπιού (mold preheat) και η πλήρης αφύγρανση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά η ασυνήθιστα υψηλή υγρασία που πιθανόν επικρατεί στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης,
- ✓ η οριακή αύξηση (περίπου 2 % της αρχικής τιμής) της πολύ χαμηλής ταχύτητας ροής (flow rate) ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος πρώιμης στερεοποίησης των στρωμάτων του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης που οδηγεί σε αποκόλληση υλικού,
- ✓ η μείωση της πολύ υψηλής ταχύτητας ροής για να αποτραπεί η αποκόλληση υλικού από την επερχόμενη υποτίμηση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς,
- ✓ η διατήρηση της πίεσης συγκράτησης (packing pressure) έως την ολομερή στερεοποίηση του πολυμερούς τήγματος εντός των πυλών εισόδου ώστε να διασφαλιστεί ότι όλα τα στρώματα πολυμερούς έχουν συγχωνευθεί πλήρως μεταξύ τους μετά την απαραίτητη συμπίεση που έχουν υποστεί,
- ✓ η κατάλληλη διαχείριση και αποθήκευση των χρησιμοποιούμενων πολυμερών δομικών υλικών προκειμένου να προληφθεί η μόλυνση αυτών από διάφορους εξωγενείς παράγοντες, ακαθαρσίες κλπ,
- ✓ η αποφυγή ανάμιξης διαφορετικών πολυμερών δομικών υλικών τα οποία αδυνατούν να αναμιχθούν και να συγχωνευθούν μεταξύ τους κατάλληλα και
- ✓ ο επανασχεδιασμός του καλουπιού εστιάζοντας :
 - 1) στην επιδιόρθωση του ακροφυσίου ή του συστήματος εξόλκευσης ούτως ώστε να περιοριστεί η εξάρτηση ενός καλουπατζή από τους παράγοντες απελευθέρωσης,
 - 2) στη λείανση των αιχμηρών ακμών τόσο του προς μορφοποίηση αντικειμένου όσο και του συστήματος διανομής διά της προσθήκης των κατάλληλων κάθε φορά στρογγυλεύσεων και
 - 3) στη μεγέθυνση των πυλών εισόδου προκειμένου, αν όχι να εξαλείφονται, τουλάχιστον να περιορίζονται αισθητά οι υπερβολικές διατμητικές τάσεις (shear stresses) που ασκούνται στο πολυμερές τήγμα.

3.8 Ψαθυρότητα (Brittleness)

Η ψαθυρότητα ή ευθραυστότητα (brittleness) ενός προϊόντος έγχυσης είναι η τάση που εμφανίζει το προϊόν προς ρηγμάτωση ή θραύση έπειτα από άσκηση κάποιας δύναμης με σχετικά χαμηλό ή πολύ χαμηλό φορτίο (**Σχήμα 3-15**). Απορρέει από το μικρότερο μήκος της μοριακής αλυσίδας και κατ' επέκταση το χαμηλότερο μοριακό βάρος. Ως εκ τούτου, η φυσική ακεραιότητα του προϊόντος είναι ουσιαστικά μικρότερη από την προδιαγραφή.



Σχήμα 3-15. Τομή ψαθυρού προϊόντος έγχυσης στο οποίο έχει δημιουργηθεί ρωγμή, γεγονός το οποίο καθιστά το προϊόν επιρρεπές σε θραύση.

Σε γενικές γραμμές, η ψαθυρότητα ενός προϊόντος έγχυσης εντείνεται όταν :

- υποβαθμίζεται το χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό (material degradation) είτε εξαιτίας του υπερβολικά υψηλού μεγέθους της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) ή/και της ταχύτητας ροής (flow rate) είτε εξαιτίας του ακατάλληλου σχεδιασμού του συστήματος διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στο καλούπι (runner system),
- αναπτύσσονται ισχυρές υπολειμματικές τάσεις στο εσωτερικό του (residual stresses),
- τα χρησιμοποιούμενα πολυμερή δομικά υλικά δεν διαθέτουν τη βέλτιστη κρυσταλλικότητα,
- αναμειγνύονται ασύμβατα μεταξύ τους πολυμερή δομικά υλικά και λοιπά πρόσθετα,
- οι γραμμές συγκόλλησης (weld lines) διακρίνονται για τη μειωμένη αντοχή τους στις καταπονήσεις ή/και,
- επικρατούν ακατάλληλες συνθήκες αφύγρανσης του πολυμερούς (λόγου χάρη υπερβολική αφύγρανση που είτε απομακρύνει τα πτητικά μέσα από το πολυμερές καθιστώντας το πιο ευαίσθητο στην επεξεργασία είτε υποβαθμίζει το δομικό υλικό μειώνοντας το μοριακό του βάρος).

Προκειμένου να εκλείπει η ψαθυρότητα από ένα προϊόν έγχυσης, καλό είναι :

- ✓ να ρυθμίζονται καταλλήλως οι συνθήκες αφύγρανσης του πολυμερούς προτού αυτό εγχυθεί εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού λαμβάνοντας υπόψιν τις οδηγίες των προμηθευτών των αντίστοιχων δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται,
- ✓ να επιλέγεται διαφορετικό πολυμερές δομικό υλικό προς χρησιμοποίηση,
- ✓ να βελτιστοποιείται ο σχεδιασμός του συστήματος διανομής προκειμένου να μην αναπτύσσονται υπερβολικές διαμητικές τάσεις στο πολυμερές τήγμα και το υπερθερμαίνουν περαιτέρω οδηγώντας το σε υποβάθμιση,
- ✓ να τροποποιείται η σχεδίαση του κοχλία σε συμμόρφωση με τις υποδείξεις των προμηθευτών του αντίστοιχου υλικοτεχνικού εξοπλισμού ούτως ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού που αναπότρεπτα επιφέρει την υποτίμησή του,

- ✓ να επιλέγονται μηχανές έγχυσης με μικρότερο μέγεθος βολής καθότι η ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού στο εσωτερικό τέτοιων μηχανών περιορίζει την υποβάθμισή του,
- ✓ να μειώνονται οι εσωτερικές παραμένουσες τάσεις και
- ✓ να ενισχύεται η αντοχή των γραμμών συγκόλλησης διά της αύξησης των θερμοκρασιών του πολυμερούς τήγματος και του καλουπιού (melt/mold temperature) εντός των επιτρεπόμενων ορίων χωρίς, φυσικά, να υπερθερμαίνεται το χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό.

3.9 Ογκομετρική Συρρίκνωση (Volumetric Shrinkage)

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, η ογκομετρική συρρίκνωση (volumetric shrinkage) του πολυμερούς δομικού υλικού είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την απόκλιση των διαστάσεων του τελικού προϊόντος έγχυσης ως προς τις αντίστοιχες που προδιαγράφονται από την γεωμετρία του καλουπιού. Η ογκομετρική συρρίκνωση είναι ένα φαινόμενο που εκφράζεται σε ποσοστιαίες μονάδες και πάντα αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Οι συνήθειες τύποι της ογκομετρικής συρρίκνωσης είναι :

- η συρρίκνωση διαμέσου του πάχους του μορφοποιημένου αντικειμένου,
- η συρρίκνωση από περιοχή σε περιοχή του μορφοποιημένου αντικειμένου και
- η συρρίκνωση παράλληλα και κάθετα στη διάταξη των μορίων του πολυμερούς δομικού υλικού.

Επί του πρακτέου, εξαιτίας των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τόσο οι συνθήκες λειτουργίας όσο και η γεωμετρία του καλουπιού είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί ομοιόμορφη και ισοτροπική ογκομετρική συρρίκνωση. Κατά συνέπεια, στη μάζα του αντικειμένου εμφανίζονται ανεξάρτητες ως προς το σημείο και ως προς την κατεύθυνση ογκομετρικές συρρικνώσεις. Μάλιστα, οι λόγοι που οδηγούν ένα εξάρτημα σε τέτοιου είδους ανισότροπη συρρίκνωση είναι κυρίως :

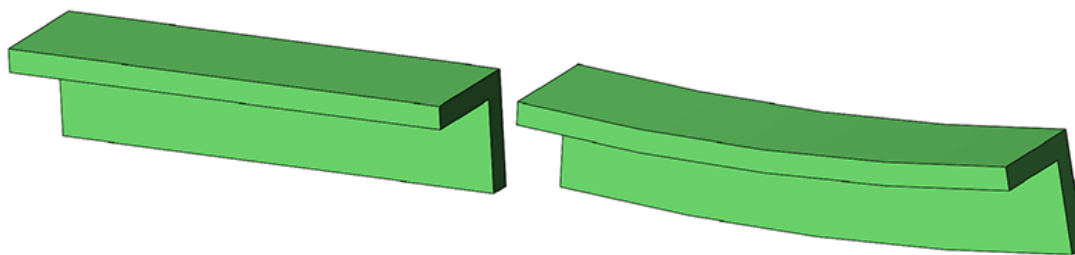
- η σχεδίαση της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού,
- οι τοπικές διαφορές συρρίκνωσης λόγω ανομοιογενούς ψύξης η οποία με τη σειρά της συνήθως οφείλεται :
 - στις διακυμάνσεις των θερμοκρασιών πολυμερούς τήγματος και καλουπιού (melt & mold temperatures) που ενδεχομένως λαμβάνουν χώρα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου της έγχυσης ή/και
 - στην ανεπάρκεια της πίεσης συμπίεσης (packing pressure) ή/και
 - στην ανεπάρκεια του χρόνου συμπίεσης (packing time) ή/και
 - στην ανεπάρκεια του χρόνου ψύξης (cooling time) ή/και
 - στον τοπικά ή συνολικά ελλιπή ή τελείως εσφαλμένο σχεδιασμό του συστήματος ψύξης του καλουπιού που ευθύνεται για τη σποραδική μεταβλητότητα της ταχύτητας ψύξης (cooling rate) του πολυμερούς τήγματος.
- οι ανισότροπες ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς και
- οι διαφορές στον βαθμό κρυσταλλικότητας σε διαφορετικά και ανεξάρτητα μεταξύ τους σημεία της μάζας.

Σε ό,τι αφορά τον βαθμό συρρίκνωσης, αυτός εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων όπως είναι η θερμοκρασία του υλικού, ο βαθμός κρυσταλλικότητας κλπ. Αναλόγως του βαθμού της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς δομικού υλικού το παραχθέν προϊόν έγχυσης μέλλεται να παρουσιάσει και την αντίστοιχη κάμψη όπου η κοίλη πλευρά

του θα είναι εκείνη που εφάπτεται στα θερμά τοιχώματα της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού. Ακόμα και στην περίπτωση που τα τοιχώματα του καλουπιού έχουν την ίδια θερμοκρασία δεν είναι διόλου απίθανο να προκύψει ένα παραμορφωμένο αντικείμενο που η γεωμετρία του δεν είναι η κατάλληλη ώστε να επιτραπεί η ομοιογενής ψύξη του.

3.10 Στρέβλωση ή Παραμόρφωση (Warpage)

Ως *στρέβλωση* ή *παραμόρφωση* (*warpage*) νοείται η απόκλιση της μορφής ενός προϊόντος έγχυσης από την αντίστοιχη μορφή που στοιχειοθετούν οι γεωμετρίες της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (**Σχήμα 3-16**). Συνηθίζεται ο όρος της στρέβλωσης να χρησιμοποιείται για να εκφράσει είτε τη σκέβρωση ενός προϊόντος έγχυσης, είτε την κάμψη αυτού, είτε τη μεταβολή στο μέγεθος των γωνιών του.



Σχήμα 3-16. Προϊόν έγχυσης αρχικά σχεδιασμένο (αριστερά) και με εμφανή στρέβλωση (κάμψη) μετά την εξόλκευσή του (δεξιά).

Ομολογουμένως, γενεσιουργές αιτίες κάθε προαναφερθείσας έκφανσης της στρέβλωσης αποτελούν τόσο οι *ασκούμενες εξωτερικές δυνάμεις* όσο και οι *εσωτερικές παραμένουσες τάσεις* (*internal residual stresses*). Στη μεν πρώτη περίπτωση η παραμόρφωση ενός προϊόντος έγχυσης ενδεχομένως οφείλεται στον τρόπο εξόλκευσής του ή στους λανθασμένους χειρισμούς του καλουπατζή κατά την απομάκρυνση του προϊόντος από το καλούπι και την αποθήκευσή του. Αντιθέτως, στη δεύτερη περίπτωση η παραμόρφωση ενός προϊόντος έγχυσης είναι απόρροια των εσωτερικών παραμενουσών τάσεων, όπως αυτές εξελίσσονται σε όλη την έκταση της μάζας του πολυμερούς.

Ασφαλώς, η απομάκρυνση του αντικείμενου από τον καλουπατζή δεν πρέπει να πραγματοποιείται αν προηγουμένως δεν έχει λάβει χώρα *ισορροπία τάσεων* στη μάζα του προϊόντος. Ακόμη και εάν ένα αντικείμενο φαινομενικά διατηρεί τις διαστάσεις και τη μορφή του μετά την απομάκρυνσή του από το καλούπι, ελλοχεύει ο κίνδυνος μεταγενέστερης εμφάνισης στρέβλωσης. Και αυτό γιατί οι ιδιαιτερότητες που χαρακτηρίζουν την χύτευση εγκλωβίζουν τάσεις στη μάζα του αντικείμενου οι οποίες συν τω χρόνω είναι δυνατόν να εκδηλωθούν και να οδηγήσουν σε παραμόρφωση. Η όλη κατάσταση δε επιδεινώνεται και με τη μεταβολή ορισμένων παραμέτρων, όπως είναι η εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων αλλά κυρίως η αύξηση της θερμοκρασίας η οποία επιτρέπει στους προσανατολισμένους μακρομοριακούς δεσμούς να χαλαρώσουν και να οδηγήσουν σε παραμορφωτική συρρίκνωση.

Οπωσδήποτε, ένα παραχθέν προϊόν έγχυσης στο οποίο έχει εκδηλωθεί στρέβλωση δεν μπορεί να είναι αποδεκτό όχι μόνο από πλευράς αισθητικής αλλά και από πλευράς χρηστικότητας. Και αυτό γιατί πολλά προϊόντα έγχυσης προορίζονται για συναρμολογήσεις στις οποίες προκαλούν προβλήματα, όπως παρεμβατικές γεωμετρίες, παραβίαση ανοχών ή κενά. Επομένως, για την αποσόβηση της εμφάνισης στρέβλωσης στα τελικά προϊόντα έγχυσης συνιστώνται :

- ✓ η αύξηση της πίεσης συμπίεσης (*packing pressure*) στο βέλτιστο επίπεδο καθώς η πολύ υψηλή πίεση συμπίεσης απαιτεί ακόμα υψηλότερη δύναμη σύσφιξης ως

αντιστάθμιση με αποτέλεσμα να συμπιέζεται υπερβολικά το πολυμερές τήγμα (overpacking) και να εντείνονται οι παραμένουσες τάσεις στο εσωτερικό των εξαρτημάτων,

- ✓ η αύξηση και η διατήρηση τόσο της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) όσο και της θερμοκρασίας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature) στο βαθμό που το πολυμερές τήγμα να έχει τη σωστή ροή εντός της κοιλότητας μορφοποίησης,
- ✓ η αύξηση της θερμοκρασίας του ακροφυσίου (nozzle temperature) ώστε η ροή του πολυμερούς τήγματος να μην επιβραδύνεται κατά τη διέλευση του τήγματος μέσα από το ακροφύσιο και στερεοποιείται έτσι πρόωρα,
- ✓ η αύξηση του χρόνου συμπίεσης (packing time) ή/και του χρόνου ψύξης (cooling time) παρά την χρονική επιβάρυνση του κύκλου έγχυσης (cycle time) στοχεύοντας στην αποφυγή της ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων που παραμένουν στο μορφοποιημένο αντικείμενο,
- ✓ η επαναληπτική αυξομείωση της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου (coolant temperature) εντός των καναλιών ψύξης κατά $\pm 5^\circ \text{C}$ κάθε φορά,
- ✓ η μείωση της θερμοκρασίας εξόλκευσης (ejection temperature) ώστε το μορφοποιημένο αντικείμενο να είναι όσο στερεό χρειάζεται για να ανθίσταται σε εξωτερικές ασκούμενες δυνάμεις όπως είναι η δύναμη εξόλκευσης (ejection force) και η δύναμη ανοίγματος του καλουπιού (mold open force),
- ✓ η διατήρηση της ομοιόμορφιας του πάχους των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου όπου αυτή καθίσταται εφικτή προκειμένου το πολυμερές να ρέει ομαλά προς μία μόνο κατεύθυνση επηρεάζοντας, τοιουτοτρόπως, την κατανομή τόσο της πίεσης όσο και των υπολειμματικών τάσεων,
- ✓ η αντικατάσταση των τοιχωμάτων μεγάλου πάχους που είναι επιρρεπή σε στρέβλωση με αντίστοιχα τοιχώματα μικρότερου πάχους των οποίων η στήριξη μπορεί να ενισχυθεί με την προσθήκη άκαμπτων νεύρων στήριξης (ribs).
- ✓ η βελτιστοποίηση του μεγέθους και του σχήματος των πυλών εισόδου (π.χ. πύλες εισόδου τύπου fan),
- ✓ η ανατοποθέτηση των πυλών εισόδου στα παχύτερα τοιχώματα του προς μορφοποίηση αντικειμένου,
- ✓ ο επανασχεδιασμός του συστήματος ψύξης του καλουπιού αναδιατάσσοντας τα κανάλια ψύξης ή/και τροποποιώντας την υπάρχουσα γεωμετρία τους ούτως ώστε η αποδοτικότητα της ψύξης (cooling efficiency) πρώτα να κατανεμηθεί ισομερώς και εν συνεχεία να αυξηθεί εφόσον παρίσταται ανάγκη και
- ✓ η αποφυγή χρησιμοποίησης εκείνων των πολυμερών που έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να συρρικνωθούν και να παραμορφωθούν λόγω του έντονου προσανατολισμού των μορίων τους, όπως τα κρυσταλλικά ή τα ημι-κρυσταλλικά πολυμερή.

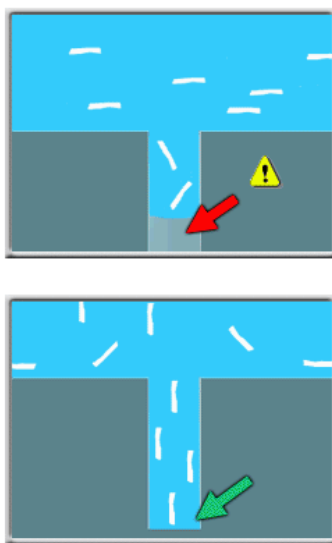
3.11 Συχνές Δυσλειτουργίες στη Ροή του Τήγματος

3.11.1 Επιβράδυνση ή Παύση Ροής (Flow Hesitation)

Η επιβράδυνση ή η παύση της ροής του πολυμερούς τήγματος (*flow hesitation*) λαμβάνουν χώρα κατά μήκος μιας συγκεκριμένης διαδρομής ροής και δύνανται να οδηγήσουν σε ασύμμετρα και μη προβλέψιμα μοτίβα ροής. Για του λόγου το αληθές, όταν το πολυμερές τήγμα εισέρχεται σε μία κοιλότητα μορφοποίησης γεμίζει τόσο τα λεπτά όσο

και τα παχιά τμήματα αυτής τείνοντας, ωστόσο, να γεμίζει πρώτα τα παχύτερα τμήματα καθότι η εν λόγω διαδρομή είναι λιγότερο ανθεκτική στη ροή του τήγματος. Κάτι τέτοιο ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα να σταματήσει ή να επιβραδυνθεί σημαντικά η ροή του τήγματος στο λεπτό τμήμα (**Σχήμα 3-17**).

Λεπτομερέστερα, ενώ το τήγμα αρχίζει να ψύχεται και η ροή του να επιβραδύνεται, η επιφανειακή τάση του αρχίζει να αυξάνεται. Ακολουθώντας, αυτό το υψηλότερο ιξώδες αναστέλλει περαιτέρω τη ροή του τήγματος προκαλώντας ακόμη ταχύτερη ψύξη με αποτέλεσμα το πρόβλημα να αυτο-πολλαπλασιάζεται. Ασφαλώς, είτε η επιβράδυνση είτε η παύση της ροής μπορούν να συμβούν αμφότερες τόσο στα νεύρα στήριξης (ribs) όσο και στα λεπτά τοιχώματα των παραγόμενων προϊόντων.



Σχήμα 3-17. Επιβράδυνση ροής (πάνω) και εξάλειψη του φαινομένου (κάτω) έπειτα από κατάλληλη τοποθέτηση των πυλών εισόδου που δεν αφήνει περιθώρια δημιουργίας εναλλακτικών διαδρομών ροής και εξασφαλίζει τη συνεχή ροή του τήγματος χωρίς επιβραδύνσεις ή παύσεις στο λεπτό τμήμα της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

Αναμφίβολα, πρόκειται για μια ροϊκή δυσλειτουργία που είναι ικανή να μειώσει την ποιότητα του παραγόμενου αντικειμένου εξαιτίας των διακυμάνσεων στην όψη της επιφάνειας, της κακής συμπίεσης, των υψηλών τάσεων και του ανομοιόμορφου προσανατολισμού των μορίων του πολυμερούς. Εάν, μάλιστα, η επιβράδυνση ή η παύση της ροής του πολυμερούς τήγματος επιτρέψουν στο μέτωπο ροής να παγώσει τελείως, τότε κάποια συγκεκριμένα μέρη της κοιλότητας μορφοποίησης ενδέχεται να παραμείνουν άδεια με αποτέλεσμα να προκύπτουν αντικείμενα μη ολοκληρωμένα λόγω ελλιπούς πλήρωσης (short shot).

Ασφαλώς, με την προβολή των αποτελεσμάτων που προέρχονται από αναλύσεις ροής μέσω πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα των αποτελεσμάτων *χρόνου πλήρωσης (filling time)* και *θερμοκρασίας πλήρωσης (filling temperature)* είναι δυνατό να εξηγηθούν γιατί παρατηρούνται επιβραδύνσεις ή παύσεις στη ροή του πολυμερούς τήγματος. Ακριβέστερα, η γραφική παράσταση χρόνου πλήρωσης δείχνει επιβράδυνση ή παύση της ροής του τήγματος σε ένα μικρό διάστημα μεταξύ των χρονικών περιγραμμάτων πλήρωσης, ενώ η γραφική παράσταση θερμοκρασίας πλήρωσης θα δείξει την αντίστοιχη επιβράδυνση ή παύση στις περιοχές με χαμηλή θερμοκρασία και μεγάλη κλίση θερμοκρασίας.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα όσα προαναφέρθηκαν, οι διορθωτικές κινήσεις προς την κατεύθυνση της αποτροπής της επιβράδυνσης ή της παύσης της ροής του πολυμερούς τήγματος κατά την έγχυσή του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού είναι οι ακόλουθες :

- ✓ μετακίνηση της πύλης ή των πυλών εισόδου μακριά από την περιοχή όπου παρατηρείται η εν λόγω δυσλειτουργία στη ροή του τήγματος ούτως ώστε να μην δημιουργούνται εναλλακτικές διαδρομές ροής και ο κύριος όγκος της κοιλότητας μορφοποίησης να γεμίζει προτού το τήγμα φτάσει στην προβληματική περιοχή,
- ✓ μετακίνηση της πύλης ή των πυλών εισόδου σε μια θέση που είναι εφικτό να ασκήσει μεγαλύτερη πίεση όταν προκύπτει είτε επιβράδυνση είτε παύση στη ροή του τήγματος, φροντίζοντας παράλληλα τα λεπτά νεύρα ή εξογκώματα να είναι τα τελευταία σημεία πλήρωσης προκειμένου όλη η πίεση έγχυσης να εφαρμόζεται στα σημεία αυτά,
- ✓ αύξηση του πάχους σε εκείνα τα τοιχώματα του παραγόμενου αντικειμένου που αντιστοιχούν στις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όπου προκλήθηκε επιβράδυνση ή παύση ροής του τήγματος ώστε να μειωθεί η αντίσταση στη ροή του (flow resistance),
- ✓ επιλογή προς χρησιμοποίηση ενός πολυμερούς δομικού υλικού με χαμηλότερο ιξώδες, ήτοι ένα υλικό με υψηλότερο δείκτη ροής (*melt flow index – MFI*),
- ✓ αύξηση της ταχύτητας ροής του πολυμερούς τήγματος (flow rate) και
- ✓ αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) ή/και της θερμοκρασίας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature) έτσι ώστε το υγρό πολυμερές να ρέει ευκολότερα στις λεπτές περιοχές του παραγόμενου αντικειμένου.

3.11.2 Διατμητική Τάση (Shear Stress)

Η διατμητική τάση (*shear stress*) είναι η τάση στην οποία υπόκειται το πολυμερές τήγμα καθώς αυτό ρέει εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Η ανάπτυξη της διατμητικής τάσης οφείλεται στην αυξανόμενη τριβή μεταξύ των επάλληλων στρωμάτων πολυμερούς που ρέουν στην κοιλότητα. Οποσδήποτε, η διατμητική τάση γίνεται μεγαλύτερη με την αύξηση της ταχύτητας ροής του πολυμερούς τήγματος (flow rate) ή την αύξηση του ιξώδους του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού.

Αναμφίβολα, η διάτμηση του πολυμερούς τήγματος είναι απαραίτητη για την ομαλή εξέλιξη της διαδικασίας της έγχυσης καθότι είναι εκείνη που τήκει το χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό και το οδηγεί εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Η διάτμηση λαμβάνει χώρα καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας και, δεδομένου ότι πραγματοποιείται με τον σωστό τρόπο, εξασφαλίζει την επιτυχή χύτευση. Στην αντίθετη περίπτωση, ωστόσο, εξαιτίας της διάτμησης δύνανται να προκληθεί υποβάθμιση του υλικού εξαιτίας των ρωγμών που δημιουργούνται.

Γενικά, οι υψηλότερες τιμές διάτμησης εμφανίζονται όταν η σχετική κίνηση μεταξύ των επάλληλων στρωμάτων του πολυμερούς τήγματος είναι η μεγαλύτερη. Κάτι τέτοιο παρατηρείται συνήθως στις περιοχές πλησίον της τροφοδοσίας ή κοντά στα τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Για του λόγου το αληθές, η υψηλότερη διάτμηση εκδηλώνεται είτε πέριξ της πύλης ή των πυλών εισόδου λόγω της αυξημένης ταχύτητας ροής είτε στο τέλος της ροής εάν χρησιμοποιείται σταθερός ρυθμός ροής.

Από την άλλη πλευρά, ο ρυθμός διάτμησης στο κέντρο της ροής είναι πολύ χαμηλότερος λόγω του ότι υπάρχει μικρή διαφορά μεταξύ της ταχύτητας του κεντρικού στρώματος και

των ταχυτήτων των άλλων στρώσεων. Συνεπώς, η κατάλληλη γεωμετρία και το ανάλογο μέγεθος των επιμέρους στοιχείων του συστήματος διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στο καλούπι (ακροφύσιο, δίαυλος, δρομείς, δοχείο ψύξης, επεκτάσεις δρομέων) και φυσικά των πυλών εισόδου αποτελούν κομβικής σημασίας παράγοντες για την όξυνση ή την άμβλυνση του φαινομένου της διάτμησης.

Όπως προαναφέρθηκε, η υπερβολική διατμητική τάση προκαλεί τη θραύση των μορίων και κατά συνέπεια την υποβάθμιση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού. Η μέγιστη δύναμη διατμήσεως που είναι σε θέση να αντέξει ένα υλικό εκτιμάται γενικά στο **1 %** της αντοχής εφελκυσμού. Κατά συνέπεια, όταν η εσωτερική διατμητική τάση ξεπερνά αυτό το όριο, προκρίνεται ο περιορισμός αυτής διά :

- ✓ της μείωσης της ταχύτητας ροής (flow rate),
- ✓ της αύξησης του πάχους των λεπτότερων τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου και
- ✓ της αποφυγής τόσο των μεταβολών στον προσανατολισμό της ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης όσο και της ανομοιόμορφης συρρίκνωσης κατά την ψύξη του.

3.11.3 Υπερβολική Συμπύεση του Πολυμερούς Τήγματος (Overpacking)

Η υπερβολική συμπύεση του πολυμερούς τήγματος (overpacking) εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού λαμβάνει χώρα όταν μία διαδρομή ροής συμπιέζεται με επιπλέον πολυμερές δομικό υλικό ενώ άλλα μονοπάτια ροής εξακολουθούν να γεμίζουν (**Σχήμα 3-18**). Πρόκειται για ένα φαινόμενο που αναπτύσσεται σε εκείνα τα τμήματα της κοιλότητας μορφοποίησης με τον συντομότερο χρόνο πλήρωσης (filling time). Πράγματι, ενώ τα συντομότερα μονοπάτια ροής έχουν ήδη γεμίσει με πολυμερές τήγμα, αυτά τελούν υπό συμπύεση με περαιτέρω υλικό καθώς η συμπλήρωση των υπόλοιπων μονοπατιών με πολυμερές βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη. Κατά συνέπεια, η εν λόγω ασκούμενη πίεση επιφέρει σε κάποιες εκ των περιοχών της κοιλότητας μορφοποίησης υψηλότερη πυκνότητα και χαμηλότερη συρρίκνωση.



Σχήμα 3-18. Υπερβολική συμπύεση του πολυμερούς τήγματος (overpacking) σε περιοχή της κοιλότητας μορφοποίησης με σύντομο χρόνο πλήρωσης (αριστερά). Υπογραμμίζεται ότι ο χρόνος πλήρωσης μεταβάλλεται λόγω ανομοιογένειας τόσο στο μήκος των διαδρομών ροής όσο και στο πάχος των τοιχωμάτων του μορφοποιούμενου αντικειμένου.

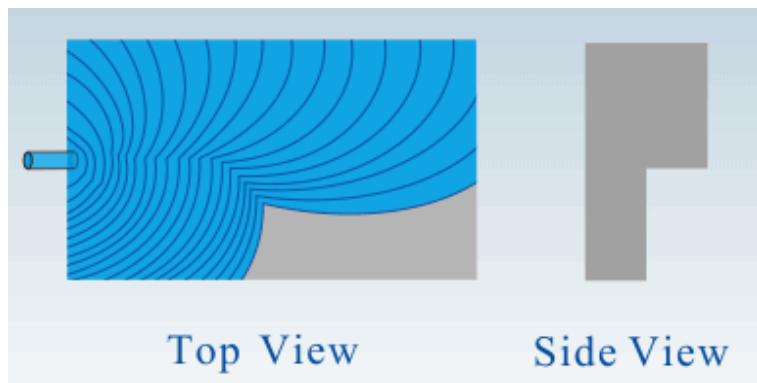
Οποσδήποτε, η υπερβολική συμπύεση του πολυμερούς τήγματος αποτελεί μία προβληματική κατάσταση η οποία μπορεί να προκαλέσει μια σειρά από επιπλοκές στο μορφοποιημένο αντικείμενο όπως την παραμόρφωσή του (warpage) εξαιτίας της

ανομοιόμορφης συρρίκνωσης του πολυμερούς δομικού υλικού, την αύξηση του βάρους του λόγω περίσσειας υλικού, την ανομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας σε όλη την έκτασή του και το προέκταμα (flash) που πιθανόν να σχηματιστεί επί της εξωτερικής του επιφάνειας. Βεβαίως, κύριο μέλημα για την αντιμετώπιση του εν λόγω φαινομένου είναι ο άμεσος εντοπισμός και η ισοστάθμιση εκείνων των διαδρομών ροής που δεν περατώνονται ταυτόχρονα με την πρώτη διαδρομή. Κάτι τέτοιο καθίσταται εφικτό εφόσον:

- ✓ υπάρχει μετακίνηση της πύλης ή των πυλών εισόδου σε μια θέση που θα καθορίσει διαδρομές ροής παρόμοιου μήκους,
- ✓ προηγηθεί διαχωρισμός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού σε επιμέρους νοητά τμήματα στο ελάχιστο δυνατό και κατόπιν τοποθετηθεί μία πύλη εισόδου σε κάθε τμήμα,
- ✓ αφαιρεθούν εκείνες οι πύλες εισόδου που κρίνονται εν γένει περιττές και
- ✓ αυξηθεί ή μειωθεί το πάχος των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου κατά το δοκούν ώστε να επέρχεται εξισορρόπηση στην αντίσταση της ροής (flow resistance) του πολυμερούς τήγματος σε κάθε μονοπάτι ροής.

3.11.4 Το Φαινόμενο Γρήγορης Ροής (Racetrack Effect)

Το φαινόμενο γρήγορης ροής (*racetrack effect*) λαμβάνει χώρα όταν το μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος σπάζει σε περισσότερα μέτωπα διερχόμενο πρώτα μέσα από τις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με αυξημένο πάχος, ενώ οι λεπτότερες περιοχές πληρώνονται τελευταίες με υλικό μετά την επανένωση των μετώπων ροής (**Σχήμα 3-19**). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το μεγάλο μήκος της διαδρομής ροής ευθύνεται για τον σχηματισμό περιττών γραμμών συγκόλλησης (weld lines) και τον εγκλωβισμό θυλάκων αέρος (air-traps) στα τελικά προϊόντα έγχυσης.



Σχήμα 3-19. Απεικόνιση του φαινομένου γρήγορης ροής (racetrack effect) όπως ακριβώς αναπτύσσεται σε μία κοιλότητα μορφοποίησης μεταβλητού πάχους κατά την έγχυση πολυμερούς τήγματος.

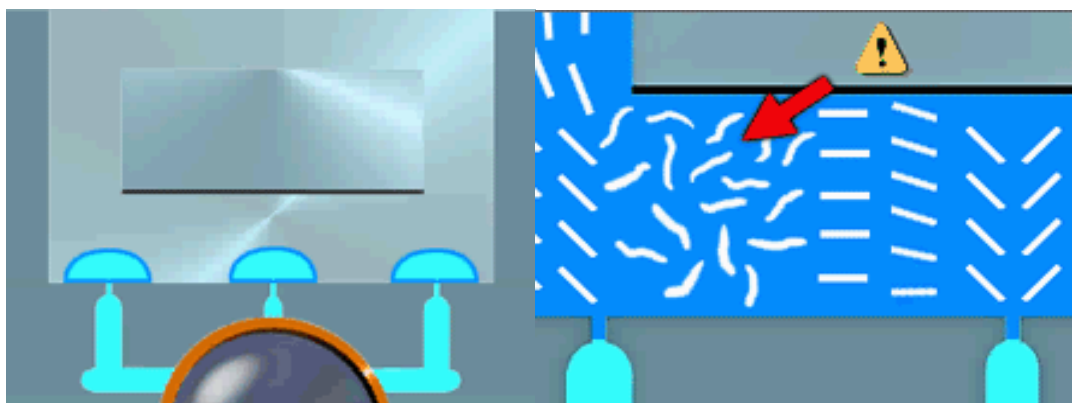
Ασφαλώς, πρόκειται για ένα φαινόμενο που πηγάζει από τη μικρότερη αντίσταση που προβάλλουν τα παχύτερα τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης στη ροή του πολυμερούς τήγματος (flow resistance) σε αντίθεση με τα λεπτότερα τοιχώματα. Μολονότι οι μεγάλες διακυμάνσεις στο πάχος των τοιχωμάτων ενός προϊόντος έγχυσης είναι συνήθως υπαίτιες για την πρόκληση διαφόρων ατελειών στο τελικό προϊόν εξαιτίας των δυσλειτουργιών που επιφέρουν στη ροή, πολλές φορές αυτές κρίνονται κατασκευαστικά επιβεβλημένες και σχεδιαστικά άφευκτες.

Εντούτοις, στην περίπτωση της εκδήλωσης του φαινομένου γρήγορης ροής πρόκειται για μια δυσλειτουργία στη ροή του πολυμερούς τήγματος που οφείλεται ξεκάθαρα στις μη

ισοσκελισμένες διαδρομές ροής. Και αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι όταν το πολυμερές τήγμα φτάνει ταυτόχρονα σε όλες τις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης, τότε δεν παρατηρείται ανάπτυξη του εν λόγω φαινομένου.

3.11.5 Υπορροή (Underflow)

Η *υπορροή (underflow)* αποτελεί μια ροϊκή δυσλειτουργία κατά την οποία η κατεύθυνση της ροής ενός μετώπου ροής αναστρέφεται. Όπως εξεικονίζεται και στο **Σχήμα 3-20**, πρόκειται για ένα φαινόμενο που παρατηρείται κατά τη συνάντηση δύο μετώπων ροής που προέρχονται αμφότερα από διαφορετικές κατευθύνσεις. Τα μέτωπα αυτά σταματούν στιγμιαία οπότε μία εκ των ροών αντιστρέφεται και ρέει προς τα πίσω μεταξύ των εξωτερικών στερεοποιημένων στρωμάτων του πολυμερούς. Έτσι, κατά την αναστροφή της ροής τα στερεοποιημένα στρώματα πολυμερούς τήκονται εκ νέου λόγω της *διατμητικής θέρμανσης (shear heating)* που αναπτύσσεται. Ασφαλώς, αυτή η αναστροφή της ροής υποβαθμίζει την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος έγχυσης τόσο ως προς την αντοχή όσο και ως προς την αισθητική εμφάνισή του.



Σχήμα 3-20. Η κεντρική πύλη εισόδου προορίζεται να γεμίσει με πολυμερές τήγμα πολύ μικρότερο όγκο της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού εν αντιθέσει με τις άλλες δύο πύλες εισόδου (αριστερά). Ενώ η περιοχή της κοιλότητας μορφοποίησης που εμπίπτει στην κεντρική πύλη εισόδου έχει ήδη πληρωθεί με πολυμερές τήγμα, οι υπόλοιπες περιοχές εξακολουθούν να γεμίζουν. Συνεπώς, το μέτωπο ροής από την αριστερή πύλη εισόδου έχει χαμηλότερη πίεση από την αντίστοιχη στο κέντρο. Όταν τα δύο μέτωπα ροής συναντιούνται, το αριστερό μέτωπο ροής αντιστρέφει την κατεύθυνση όπως δείχνει και το κόκκινο βέλος (δεξιά).

Για τον εντοπισμό των πιθανών περιοχών όπου δύναται να αναπτυχθεί το φαινόμενο της υπορροής, είναι απαραίτητη η επιθεώρηση του μοτίβου πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (filling pattern). Η εμφάνιση του αποτελέσματος στο **100 %** του χρόνου πλήρωσης δεν υποδεικνύει σε καμία περίπτωση την παρουσία υπορροής. Για το λόγο αυτό προτείνονται αρχικά η ενδελεχής εξέταση του μοτίβου πλήρωσης από την αρχή έως το τέλος παρακολουθώντας την οποιαδήποτε συνάντηση των μετώπων ροής και εν συνεχεία ο έλεγχος της γεωμετρίας της κοιλότητας μορφοποίησης που περιβάλλει την εκάστοτε περιοχή συνάντησης. Εφόσον οι δέουσες αλλαγές στη γεωμετρία των περιοχών συνάντησης των μετώπων ροής είναι εφικτές, καλό είναι να υλοποιούνται.

3.12 Άλλα Προβλήματα

3.12.1 Μεμονωμένα Σημεία Αυξημένου Θερμικού Φορτίου (Hot Spots)

Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού επηρεάζεται από τη θέση των καναλιών ψύξης που αυτό διαθέτει σε σχέση με την επιφάνεια της κοιλότητας. Προφανώς, για απλά προϊόντα έγχυσης σταθερού πάχους, η ομοιόμορφη απόσταση μεταξύ των καναλιών ψύξης συνεπάγεται ομοιογενή ψύξη του μορφοποιημένου αντικειμένου. Ωστόσο, τα περισσότερα προϊόντα έγχυσης ποικίλλουν σε πάχος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών, όπως οι γωνίες και οι νευρώσεις, μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση μεμονωμένων σημείων αυξημένου θερμικού φορτίου (*hot spots*) διεσπαρμένων εσωτερικά σε όλη την έκταση του στερεοποιημένου πολυμερούς (**Σχήμα 3-21**).



Σχήμα 3-21. Μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου (*hot spots*) διεσπαρμένα εσωτερικά σε όλη την έκταση του στερεοποιημένου πολυμερούς που παρατείνουν τη χρονική διάρκεια του κύκλου έγχυσης και ενδέχεται να οδηγήσουν το τελικό προϊόν έγχυσης σε κατά τόπους σκεβρώσεις.

Σίγουρα, ο επανασχεδιασμός της γεωμετρίας του καλουπιού ή η ανατοποθέτηση των πυλών εισόδου μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό της εμφάνισης των σημείων με αυξημένο θερμικό φορτίο. Επίσης, η αναδιάταξη των καναλιών ψύξης διά της μετατόπισής τους πλησιέστερα στα παχύτερα τοιχώματα, τις νευρώσεις ή τις γωνίες των προϊόντων έγχυσης ή/και ο εμπλουτισμός του συστήματος ψύξης του εκάστοτε καλουπιού με επιπλέον κανάλια αποτελούν αμφότερα μέτρα πρόληψης της εμφάνισης τυχόν σημείων αυξημένου θερμικού φορτίου.

3.12.2 Υπερβολικά Μεγάλη Χρονική Διάρκεια του Κύκλου Έγχυσης

Η χρονική διάρκεια ενός κύκλου έγχυσης (*cycle time*) είναι ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος έγχυσης. Μετριέται από την έναρξη της έγχυσης του πολυμερούς τήγματος μέχρι το πέρας της διαδικασίας ανοίγματος του καλουπιού. Αναντίρρητα, η παρατεταμένη διάρκεια του κύκλου της έγχυσης αποτελεί την κύρια αιτία επιβράδυνσης της παραγωγικότητας και της συνεπακόλουθης αύξησης του κόστους.

Ασφαλώς, πάντοτε λαμβάνει χώρα ένας συμβιβασμός μεταξύ της ομοιόμορφης ψύξης για την εξασφάλιση της καλύτερης δυνατής ποιότητας ενός προϊόντος έγχυσης και της

γρήγορης ψύξης για την μερική ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής. Ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται το εκάστοτε παραγόμενο προϊόν έγχυσης, καθορίζεται εάν η ταχύτητα αντιβαίνει της ποιότητας και τούμπαλιν οπότε μειώνεται ή αυξάνεται η διάρκεια του κύκλου έγχυσης αντιστοίχως.

Σε γενικές γραμμές, οι κατασκευαστικοί κύκλοι αυξημένης χρονικής διάρκειας δύνανται να προκληθούν από τις κάτωθι συνθήκες :

- υψηλή θερμοκρασία τήγματος (melt temperature) ή υψηλή θερμοκρασία του καλουπιού (mold temperature),
- κακή σχεδίαση του συστήματος ψύξης του καλουπιού (cooling system),
- υπερβολικοί χρόνοι πλήρωσης και συμπίεσης (filling/packing time) και
- υψηλή ταχύτητα έγχυσης (flow rate) που επιφέρει αύξηση στον χρόνο ψύξης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (cooling time).

Προκειμένου να μειωθεί η χρονική διάρκεια του κύκλου έγχυσης προτείνονται κάποια διορθωτικά μέτρα τα οποία πρέπει να αξιολογούνται σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις ποιότητας και κόστους που υπάρχουν για το εκάστοτε προϊόν έγχυσης. Συγκεκριμένα, τα μέτρα αυτά είναι :

- ✓ η βελτιστοποίηση των χρόνων πλήρωσης και συμπίεσης (filling/packing time),
- ✓ η βελτιστοποίηση του συστήματος ψύξης του καλουπιού (cooling system) και
- ✓ η αλλαγή της γεωμετρίας του προς μορφοποίηση αντικειμένου ούτως ώστε αυτό να ψυχθεί γρηγορότερα και πιο ομοιόμορφα.

3.13 Συγκεντρωτική Παράθεση Ατελειών – Τρόπων Αντιμετώπισης

Παρακάτω, συγκεντρώνονται σε πίνακες όλες οι συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης καθώς και τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν από τον μηχανικό στα πλαίσια της αντιμετώπισης των ατελειών αυτών (**Πίνακας 3-1**, **Πίνακας 3-2**, **Πίνακας 3-3**, **Πίνακας 3-4** και **Πίνακας 3-5**).

Πίνακας 3-1. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών.

Ατέλειες	Θερμοκρασία Τήγματος (Melt Temperature)	Θερμοκρασία Καλουπιού (Mold Temperature)	Πίεση Έγχυσης (Injection Pressure)	Πίεση Συμπίεσης (Packing Pressure)
Γραμμές Συγκόλλησης (Weld Lines)	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση
Σημάδια / Γραμμές Ροής (Flow Marks / Lines)	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση
Ελλιπής Πλήρωση (Short Shot)	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση
Βαθουλώματα (Sink Marks)	Μείωση	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση
Καύση (Burn Marks)	Μείωση	Μείωση	Μείωση	Μείωση
Κενά (Voids)	Μείωση	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση
Φαινόμενο Πίδακα (Jetting)	Αύξηση	Αύξηση		
Προέκταμα (Flash)	Μείωση	Μείωση	Μείωση	Μείωση
Αποελασμάτωση (Delamination)	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση
Στρέβλωση (Warpage)	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση στο βέλτιστο επίπεδο

Πίνακας 3-2. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών.

Ατέλειες	Ταχύτητα Ροής (Flow Rate)	Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (Coolant Temperature)	Χρόνος Συμπίεσης (Packing Time)	Χρόνος Ψύξης (Cooling Time)
Γραμμές Συγκόλλησης (Weld Lines)	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση
Σημάδια / Γραμμές Ροής (Flow Marks / Lines)	Αύξηση ύστερα από <u>μεγέθυνση</u> της διατομής του ακροφυσίου			
Ελλιπής Πλήρωση (Short Shot)	Αύξηση	Αύξηση (επαναληπτικά κατά 5° C / φορά)		
Βαθουλώματα (Sink Marks)	Αύξηση		Αύξηση	Αύξηση
Καύση (Burn Marks)	Μείωση			
Κενά (Voids)	Μείωση		Αύξηση	
Φαινόμενο Πίδακα (Jetting)	Περιορισμός της απότομης αύξησης			
Προέκταμα (Flash)	Μείωση			
Αποελασμάτωση (Delamination)	Οριακή αύξηση 2 % για πολύ χαμηλές αρχικές τιμές ή μείωση των αντίστοιχων υψηλών			
Στρέβλωση (Warpage)		Αυξομείωση (επαναληπτικά κατά ± 5° C / φορά)	Αύξηση	Αύξηση

Πίνακας 3-3. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών.

Ατέλειες	Δύναμη Σύσφιξης (Clamping Force)	Ανατοποθέτηση Πυλών Εισόδου (Reposition Of Gates)	Επανασχεδιασμός Πυλών Εισόδου (Redesign of Gates)
Γραμμές Συγκόλλησης (Weld Lines)		Συνίσταται εφόσον το προϊόν έγχυσης δεν είναι <u>μεγάλο</u> ή <u>σύνθετο</u>	Συνίσταται εφόσον είναι εφικτός
Σημάδια / Γραμμές Ροής (Flow Marks / Lines)		Συνίσταται	Συνίσταται εφόσον είναι εφικτός
Ελλιπής Πλήρωση (Short Shot)	Μείωση	Συνίσταται	Αύξηση του μεγέθους των διαστάσεων της πύλης ή των πυλών εισόδου
Βαθουλώματα (Sink Marks)		Συνίσταται στα <u>παχύτερα</u> τοιχώματα του προϊόντος έγχυσης	
Καύση (Burn Marks)			Μεγέθυνση της πύλης ή των πυλών εισόδου
Κενά (Voids)		Συνίσταται στα <u>παχύτερα</u> τοιχώματα του προϊόντος έγχυσης	
Φαινόμενο Πίδακα (Jetting)		Συνίσταται στα <u>παχύτερα</u> τοιχώματα του προϊόντος έγχυσης	Μεγέθυνση της πύλης ή των πυλών εισόδου ή/και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού επιλέγοντας πύλες εισόδου τύπου tab, fan, overlap ή submarine
Προέκταμα (Flash)	Αύξηση (πάντα <u>μεγαλύτερη</u> της πίεσης έγχυσης)		
Αποελασμάτωση (Delamination)			Μεγέθυνση της πύλης ή των πυλών εισόδου
Στρέβλωση (Warpage)		Συνίσταται στα <u>παχύτερα</u> τοιχώματα του προϊόντος έγχυσης	Βελτιστοποίηση του μεγέθους και του σχήματος της πύλης ή των πυλών εισόδου

Πίνακας 3-4. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών.

Ατέλειες	Επανασχεδιασμός Συστήματος Διανομής (Redesign of Runner System)	Πάχος Τοιχωμάτων Παραγόμενου Αντικειμένου	Προσθήκη Νεύρων Στήριξης στο Προς Μορφοποίηση Αντικείμενο
Γραμμές Συγκόλλησης (Weld Lines)	Τροποποίηση σχεδιασμού ή μείωση της διαμέτρου του δρομέα ή των δρομέων του συστήματος	Τροποποίηση	
Σημάδια / Γραμμές Ροής (Flow Marks / Lines)	Βελτιστοποίηση σχεδιασμού (δοχείο ψύξης, επεκτάσεις δρομέων)	Διατήρηση της ομοιομορφίας του πάχους προσθέτοντας στρογγυλεύσεις / λειάνσεις στις αιχμηρές ακμές	
Ελλιπής Πλήρωση (Short Shot)	Αύξηση του μεγέθους των διαστάσεων του αγωγού ή των αγωγών διανομής του συστήματος	Αύξηση του πάχους των <u>λεπτότερων</u> τοιχωμάτων	Συνίσταται στις περιοχές όπου παρατηρείται <u>πρώιμη</u> στερεοποίηση του πολυμερούς
Βαθουλώματα (Sink Marks)		Μείωση του πάχους των <u>παχύτερων</u> τοιχωμάτων	
Καύση (Burn Marks)	Τροποποίηση σχεδιασμού		
Κενά (Voids)		Διατήρηση της ομοιομορφίας του πάχους	Συνίσταται
Φαινόμενο Πίδακα (Jetting)			
Προέκταμα (Flash)			
Αποελασμάτωση (Delamination)	Προσθήκη στρογγυλεύσεων / λειάνσεων στις αιχμηρές ακμές	Προσθήκη στρογγυλεύσεων / λειάνσεων στις αιχμηρές ακμές	
Στρέβλωση (Warpage)		Διατήρηση της ομοιομορφίας του πάχους	Συνίσταται

Πίνακας 3-5. Συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται στα τελικά προϊόντα έγχυσης και μέτρα αντιμετώπισης αυτών.

Ατέλειες	Παροχή Εξαερισμού (Venting)	Αντικατάσταση Χρησιμοποιούμενου Πολυμερούς Δομικού Υλικού	Προθέρμανση Καλουπιού (Mold Preheat)
Γραμμές Συγκόλλησης (Weld Lines) Σημάδια / Γραμμές Ροής (Flow Marks / Lines)			Ενδείκνυται
Ελλιπής Πλήρωση (Short Shot)	Απαραίτητα αποτελεσματικότερη για την απαγωγή εγκλωβισμένων θυλάκων αέρος (air-traps)	Συνίσταται με διαφορετικό πολυμερές <u>χαμηλότερου</u> ιξώδους	
Βαθουλώματα (Sink Marks)	Απαραίτητα αποτελεσματικότερη για την απαγωγή εγκλωβισμένων θυλάκων αέρος (air-traps)		
Καύση (Burn Marks)	Μεγέθυνση των σημείων εξαερισμού	Συνίσταται με διαφορετικό πολυμερές <u>χαμηλότερου</u> ιξώδους	
Κενά (Voids)	Απαραίτητα αποτελεσματικότερη για την απαγωγή εγκλωβισμένων θυλάκων αέρος (air-traps)	Συνίσταται με διαφορετικό πολυμερές <u>χαμηλότερου</u> ιξώδους	
Φαινόμενο Πίδακα (Jetting)			
Πρόεκταμα (Flash)	Απαραίτητα αποτελεσματικότερη	Συνίσταται με διαφορετικό πολυμερές <u>υψηλότερου</u> ιξώδους	
Αποελασμάτωση (Delamination) Στρέβλωση (Warpage)			Απαιτείται

4 Προσομοίωση Ροής σε Καλούπια Έγχυσης με Χρήση της Τεχνολογίας των Πεπερασμένων Στοιχείων

4.1 Το Λογισμικό Moldex3D

Μία ενιαία πλατφόρμα στην οποία ενοποιούνται ο σχεδιασμός του τελικού προϊόντος έγχυσης και του αντίστοιχου καλουπιού, ο καθορισμός του πολυμερούς δομικού υλικού και η παραμετροποίηση τόσο της κατασκευαστικής διεργασίας όσο και του χρησιμοποιούμενου τεχνικού εξοπλισμού είναι το λογισμικό *Moldex3D*. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο και αυτόνομο CAE σύστημα προσαρμοσμένο ειδικά στην τεχνολογία παραγωγής injection molding. Αξιοποιώντας την τεχνολογία της ανάλυσης μέσω *Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements Analysis - FEA)*, το λογισμικό μπορεί να παρέχει στον εκάστοτε μηχανικό ποικίλες πληροφορίες ως προς τον εντοπισμό και την εξάλειψη πιθανών προβλημάτων κατά την κατασκευαστική διεργασία στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση ενός νέου προϊόντος έγχυσης.

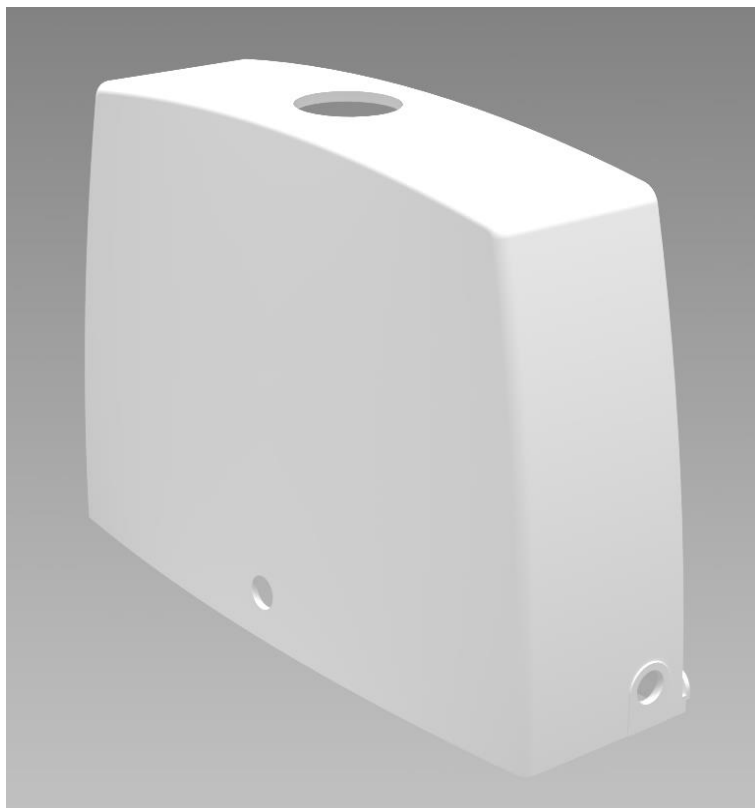
Είναι αλήθεια ότι με την εκπόνηση πολλαπλών πειραμάτων σε πραγματικό χρόνο, ο μηχανικός έχει μια γενική επόπτευση των προβλημάτων που εμφανίζονται σε ένα προϊόν έγχυσης που επίκειται να παραχθεί. Μια τέτοια χρονοβόρα τακτική, ωστόσο, συνεπάγεται αυξημένο οικονομικό κόστος, πολλές φορές στα όρια του μη αποδεκτού. Αντιθέτως, με τη χρήση CAE συστημάτων όπως το *Moldex3D*, ο μηχανικός είναι σε θέση να μελετά και να αναλύει εις βάθος το εκάστοτε προϊόν έγχυσης που μέλλεται να παραχθεί. Με άλλα λόγια, αυτό σημαίνει ότι ο μηχανικός είναι σε θέση :

- ✓ να εντοπίζει τις οιοσδήποτε σχεδιαστικές ανεπάρκειες του προϊόντος ώστε να τις απαλείψει προσεχώς,
- ✓ να διασφαλίζει την ομαλή διεκπεραίωση και τη βελτιστοποίηση των φάσεων της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του αντίστοιχου καλουπιού με πολυμερές τήγμα, της συμπίεσης του τήγματος και της ψύξης του υλικού και
- ✓ να εξετάζει τη συμπεριφορά του τελικού προϊόντος έγχυσης μετά την απομάκρυνσή του από το καλούπι (π.χ. στρεβλώσεις λόγω ανάπτυξης ισχυρών υπολειμματικών τάσεων στο εσωτερικό του).

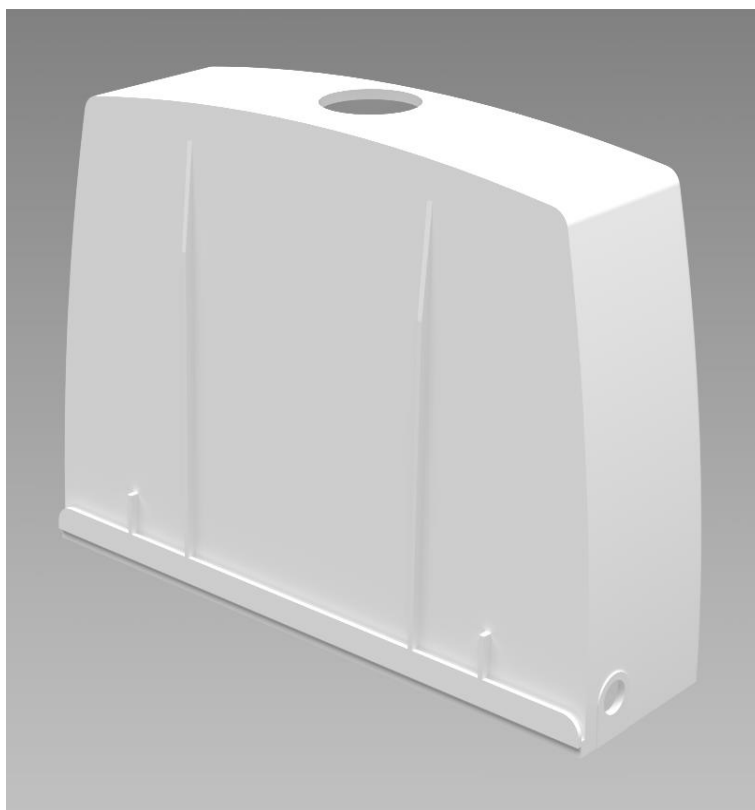
Σαφώς, από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι η μελέτη ενός προϊόντος έγχυσης μέσω της παραδοσιακής μεθόδου δοκιμής και σφάλματος δεν είναι πλέον απαραίτητη, γεγονός το οποίο συνεπάγεται εξοικονόμηση κόστους και ταχύτερη διάθεση των εμπορευμάτων στην αγορά.

4.2 Το Προς Μελέτη Προϊόν Έγχυσης

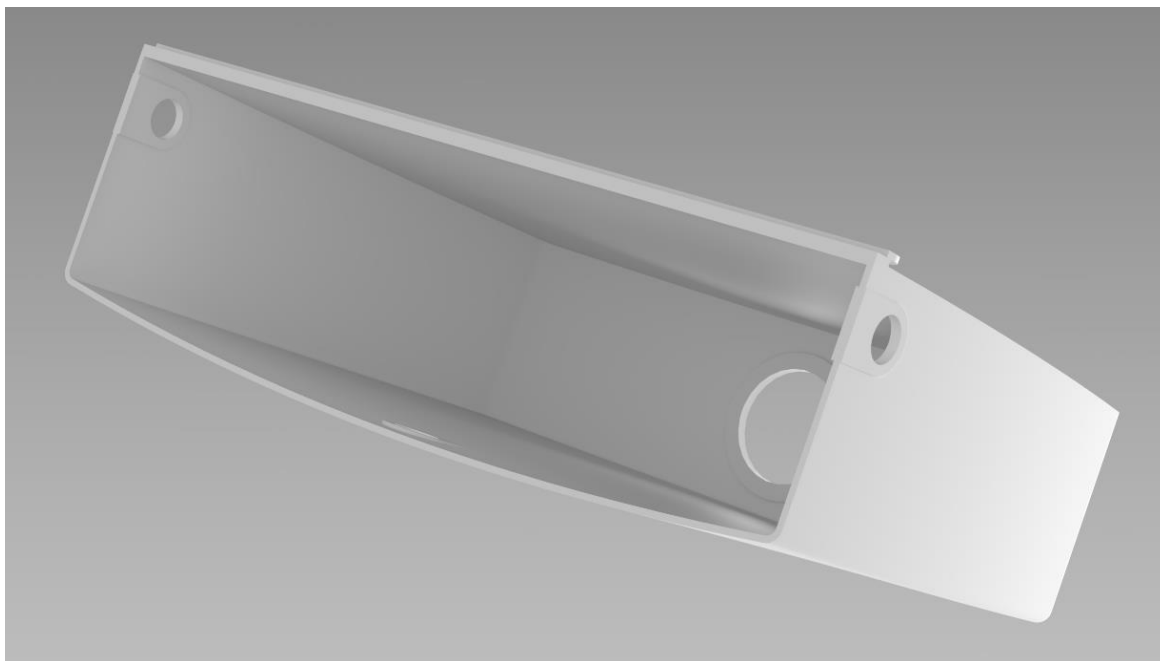
Το προϊόν έγχυσης το οποίο μελετάται στην παρούσα διατριβή είναι το καζανάκι “SABRINA” (**Σχήμα 4-1**, **Σχήμα 4-2** και **Σχήμα 4-3**) που αποτελεί μια ευγενική χορηγία της εταιρείας “SPEK Metalplastic S.A.”. Πρόκειται για ένα καταναλωτικό αγαθό που χρησιμοποιείται ευρέως σε χώρους υγιεινής για την αποθήκευση και απάντληση ύδατος. Κατασκευάζεται μαζικά στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις της εταιρείας μέσω της τεχνολογίας παραγωγής injection molding χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη το πολυστυρένιο (PS) HIPS EDISTIR SR550 της Eurora Polimeri, ένα πολυμερές δομικό υλικό υψηλής πίεσεως.



Σχήμα 4-1. Το καζανάκι “SABRINA” μέγιστων διαστάσεων **446.00 x 140.67 x 326.50 mm** x mm x mm και όγκου $V = 1185.57$ cc. Μια ευγενική χορηγία της εταιρείας “SPEK Metalplastic S.A.”.



Σχήμα 4-2. Το καζανάκι “SABRINA” μέγιστων διαστάσεων **446.00 x 140.67 x 326.50 mm** x mm x mm και όγκου $V = 1185.57$ cc. Μια ευγενική χορηγία της εταιρείας “SPEK Metalplastic S.A.”.



Σχήμα 4-3. Το καζανάκι “SABRINA” μέγιστων διαστάσεων **446.00 x 140.67 x 326.50 mm** x mm x mm και όγκου $V = 1185.57$ cc. Μια ευγενική χορηγία της εταιρείας “SPEK Metalplastic S.A.”.

Οι κατασκευαστικές ατέλειες που εντοπίζονται κατ’ επανάληψη στο παραχθέν προϊόν έγχυσης σε πραγματικό χρόνο μετά και τη διεκπεραίωση κάποιων επαναλαμβανόμενων κύκλων έγχυσης είναι συγκεκριμένες και οφείλονται :

- στο είδος της τροφοδοσίας (πρωτίστως) το οποίο απαρτίζεται από :
 - έναν ειδικά σχεδιασμένο κυκλικό δακτύλιο με στρογγυλεύσεις στις αιχμηρές ακμές του ο οποίος τοποθετείται εσωτερικά στην κύρια σπή του προϊόντος και
 - τέσσερις πύλες εισόδου τύπου tunnel οι οποίες τοποθετούνται επί του κυκλικού δακτυλίου υπό γωνία κλίσης 60° ως προς τον άξονα εξόλκευσης του παραχθέντος προϊόντος (άξονας Z) και συνδέονται με ένα σύστημα διανομής αποτελούμενο από τέσσερις αγωγούς διανομής (runners), ένα κάθετο κανάλι (sprue) και ένα δοχείο ψύξης (cold slug) κατά τέτοιον τρόπο ώστε να σχηματίζεται ένας άτυπος κώνος.
- στις μη βέλτιστες συνθήκες που παραμετροποιούν την κατασκευαστική διεργασία (δευτερευόντως), όπως οι χρόνοι πλήρωσης, συμπίεσης και ψύξης, οι θερμοκρασίες πολυμερούς τήγματος και ψύξης, οι πιέσεις έγχυσης και συμπίεσης, οι ρυθμοί ροής και ψύξης κλπ.

Κάποιες εκ των ατελειών αυτών είναι οι γραμμές συγκόλλησης (weld lines) σε εκείνες τις περιοχές του προϊόντος όπου το μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος «σπάει» είτε αναγκαστικά λόγω της γεωμετρίας του προϊόντος (**Σχήμα 4-4**), είτε λόγω των πολλών πυλών εισόδου που έχουν τοποθετηθεί στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού, είτε λόγω ανάπτυξης του φαινομένου πίδακα (jetting). Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρούνται επίσης κάποια βαθουλώματα (sink marks) στα παχύτερα τοιχώματα του

προϊόντος (**Σχήμα 4-5**) αλλά και σχετικά έντονες γραμμές ροής (flow lines) εκεί όπου τα τέσσερα μέτωπα ροής συγχωνεύονται, ήτοι στις τέσσερις κάθετες πλευρές του προϊόντος (**Σχήμα 4-6**), αλλά και εκεί όπου αναπτύσσεται το φαινόμενο πίδακα.



Σχήμα 4-4. Γραμμές συγκόλλησης (weld lines) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης όπου το μέτωπο ροής «σπάει» σε επιμέρους μέτωπα.



Σχήμα 4-5. Βαθουλώματα (sink marks) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης με αυξημένο πάχος (π.χ. νεύρα στήριξης).



Σχήμα 4-6. Γραμμές ροής (flow lines) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης όπου τα επιμέρους μέτωπα ροής συγχωνεύονται.

Σημειωτέον ότι ο ειδικά σχεδιασμένος κυκλικός δακτύλιος τοποθετήθηκε σκοπίμως σε εκείνη την περιοχή του προϊόντος προκειμένου η είσοδος του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης να γίνεται όσο το δυνατόν πιο ομαλά και άρα οι γραμμές ροής να γίνουν λιγότερο έντονες ή και να εξαλειφθούν εντελώς. Η τακτική αυτή πέτυχε εν μέρει τον στόχο της καθώς οι γραμμές ροής μπορεί να μην εξαλείφθηκαν, ωστόσο έγιναν λιγότερο έντονες συγκριτικά με πριν.

Μολαταύτα, η κύρια κατασκευαστική ατέλεια που προέκυψε χρησιμοποιώντας αυτό το είδος της τροφοδοσίας ήταν ένα έντονο κυματιστό μοτίβο πέριξ του κυκλικού δακτυλίου που διακρίνεται στο παραχθέν προϊόν έγχυσης από τη μειωμένη στιλπνότητα της εξωτερικής επιφάνειας στη συγκεκριμένη περιοχή και τις μικρές σχηματισθείσες γραμμές συγκόλλησης και γραμμές ροής (**Σχήμα 4-7**). Πρόκειται για φαινόμενο πίδακα (jetting) το οποίο αυτομάτως υποβαθμίζει ποιοτικά και αισθητικά το τελικό προϊόν. Η εν λόγω ατέλεια οφείλεται κυρίως στο μικρό πάχος της στένωσης του κυκλικού δακτυλίου (**1.6 mm**) σε σχέση με το μέσο πάχος του προϊόντος (**3.13 mm**) που προκαλεί αύξηση στην ταχύτητα ροής (flow rate) του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης.



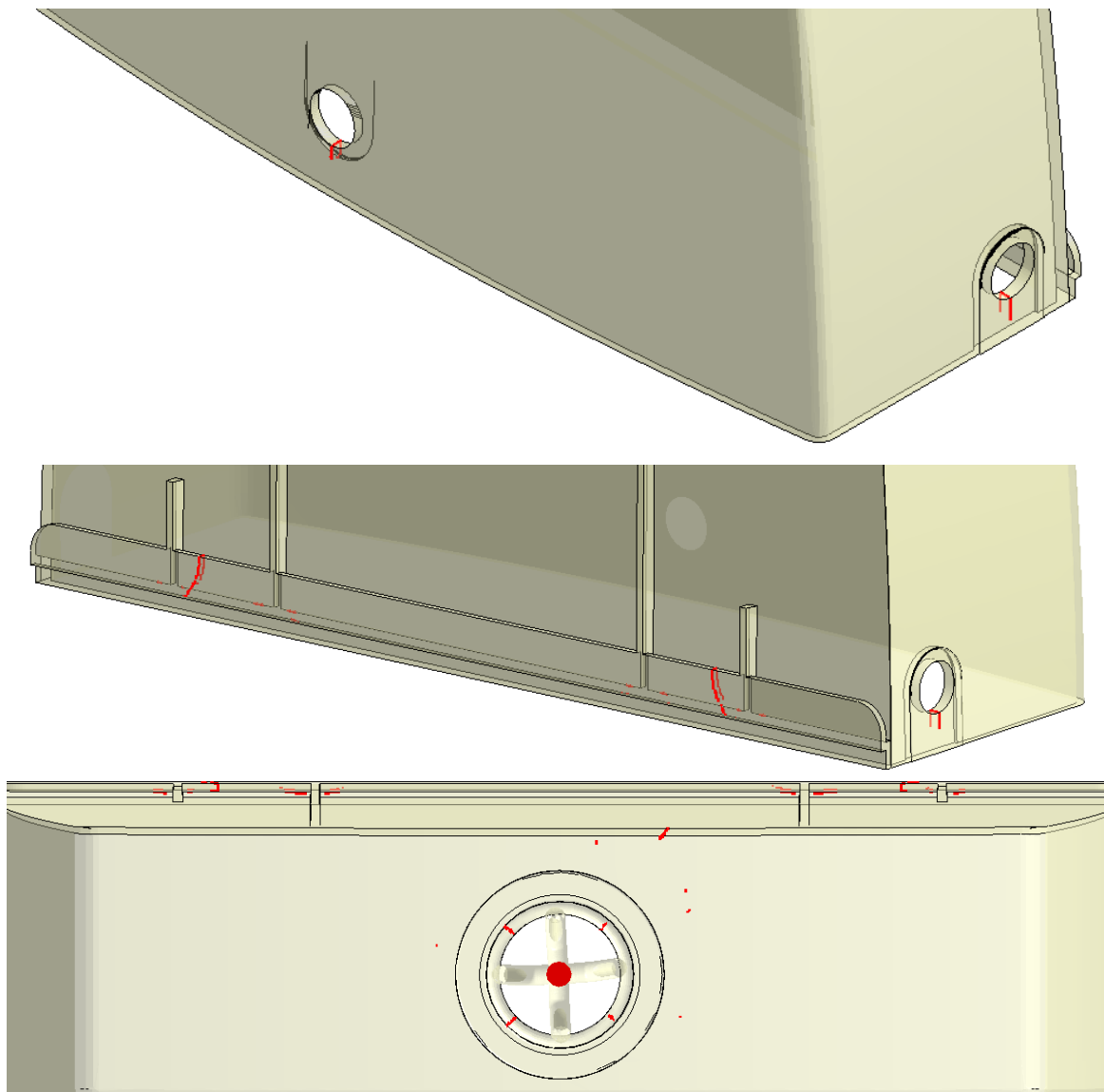
Σχήμα 4-7. Φαινόμενο πίδακα (jetting) που εκδηλώθηκε πέριξ της περιοχής τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού κατά την έγχυση του πολυμερούς τήγματος και αποτυπώθηκε ως κυματιστό μοτίβο μειωμένης στιλπνότητας στην αντίστοιχη περιοχή της εξωτερικής επιφάνειας του πραγματικού προϊόντος έγχυσης.

Από αυτό το σημείο και έπειτα, χρησιμοποιώντας τα αρχικά δεδομένα της κατασκευάστριας εταιρείας ως δεδομένα εισαγωγής (input), πραγματοποιήθηκε καταρχάς η πρώτη προσομοίωση του κύκλου έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D ώστε να γίνει μια εικονική επαλήθευση όλων των ανωτέρω κατασκευαστικών ατελειών που προέκυψαν στο τελικό προϊόν σε πραγματικό χρόνο. Πράγματι, από τις προσομοιώσεις των φάσεων πλήρωσης, συμπίεσης και ψύξης αλλά και από την προσομοίωση της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος υπήρξε απόλυτη ταύτιση ως προς τον εντοπισμό των κατασκευαστικών ατελειών.

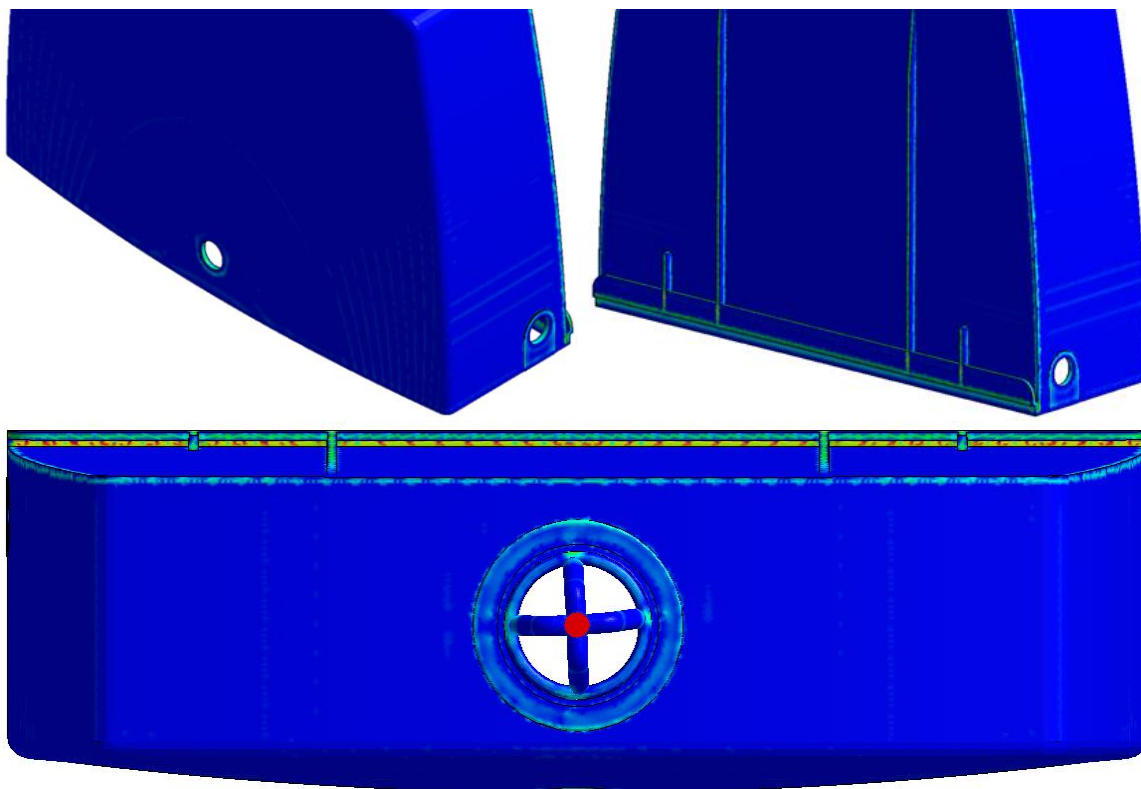
Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν κάποιες προσπάθειες βελτίωσης της υφιστάμενης κατάστασης διατηρώντας στο ακέραιο τη γεωμετρία τόσο του προϊόντος έγχυσης όσο και του συστήματος τροφοδοσίας του καλουπιού, αλλά μεταβάλλοντας τις συνθήκες που παραμετροποιούν την κατασκευαστική διεργασία. Οι συνθήκες αυτές μεταβλήθηκαν στο σύνολό τους βάσει των προτεινόμενων ρυθμίσεων του λογισμικού Moldex3D για το συγκεκριμένο προϊόν έγχυσης. Μολονότι οι σχετικές προτάσεις του λογισμικού ήταν κοντά στις αρχικές εκτιμήσεις της κατασκευάστριας εταιρείας, εντούτοις οι εν λόγω συνθήκες επιδέχονταν περαιτέρω βελτίωση στα πλαίσια του εφικτού, πράγμα το οποίο και έγινε.

Εν τέλει, μετά από αρκετές προσομοιώσεις του κύκλου έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D με ελαφρώς παραλλαγμένα δεδομένα κάθε φορά, αυτό το οποίο επετεύχθη ήταν να βελτιωθούν αλλά όχι να εξαλειφθούν όλες οι παραπάνω ατέλειες πλην του φαινομένου πίδακα το οποίο ούτε βελτιώθηκε και, φυσικά, ούτε εξαλείφθηκε (**Σχήμα 4-8, Σχήμα 4-9, Σχήμα 4-10, Σχήμα 4-11 και Σχήμα 4-12**). Αυτός ήταν και ο λόγος που, κοντά στα υπόλοιπα, επιχειρήθηκε επιπλέον μία τροποποίηση στο πάχος της στένωσης του κυκλικού δακτυλίου από το 1.6 mm στα 3 mm, ήτοι το ανώτατο όριο του πάχους που θα μπορούσε δυνητικά να έχει η στένωση αυτή σύμφωνα με τους κατασκευαστικούς περιορισμούς του καλουπιού του προϊόντος έγχυσης. Με βάση τα εξαγόμενα της

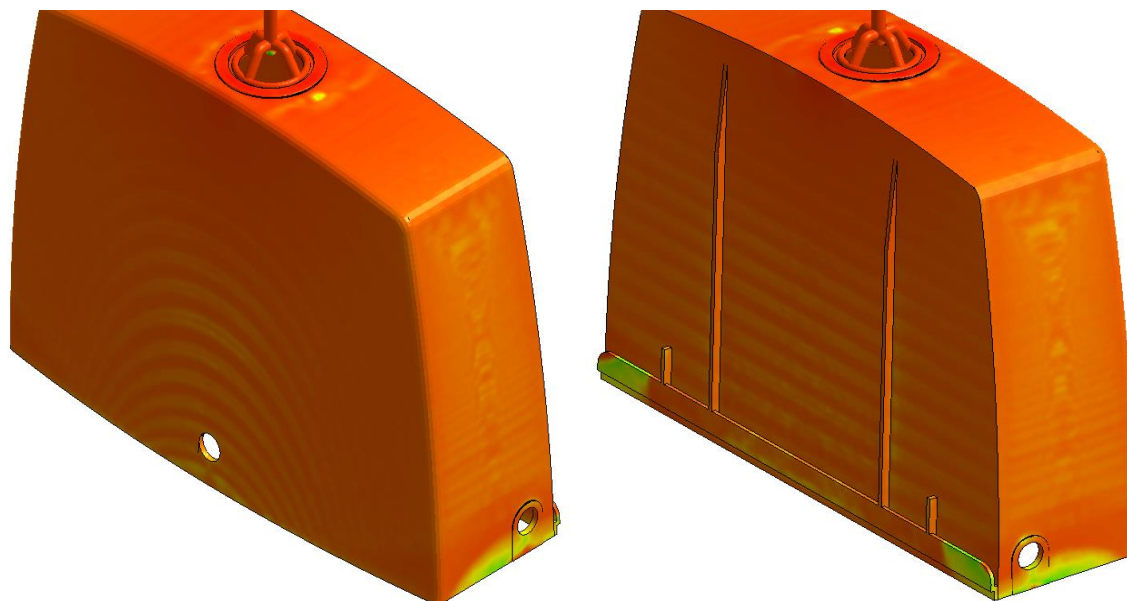
τελευταίας προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D, το αποτέλεσμα αυτής της διορθωτικής ενέργειας ήταν απλά μια μικρή περιστολή του φαινομένου πίδακα συνοδευόμενη από περιορισμό της έκτασης του κυματιστού μοτίβου πέριξ του κυκλικού δακτυλίου σε μικρό βαθμό. Κατά συνέπεια, η αναζήτηση εναλλακτικού σεναρίου τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού κρίθηκε αναπόφευκτη.



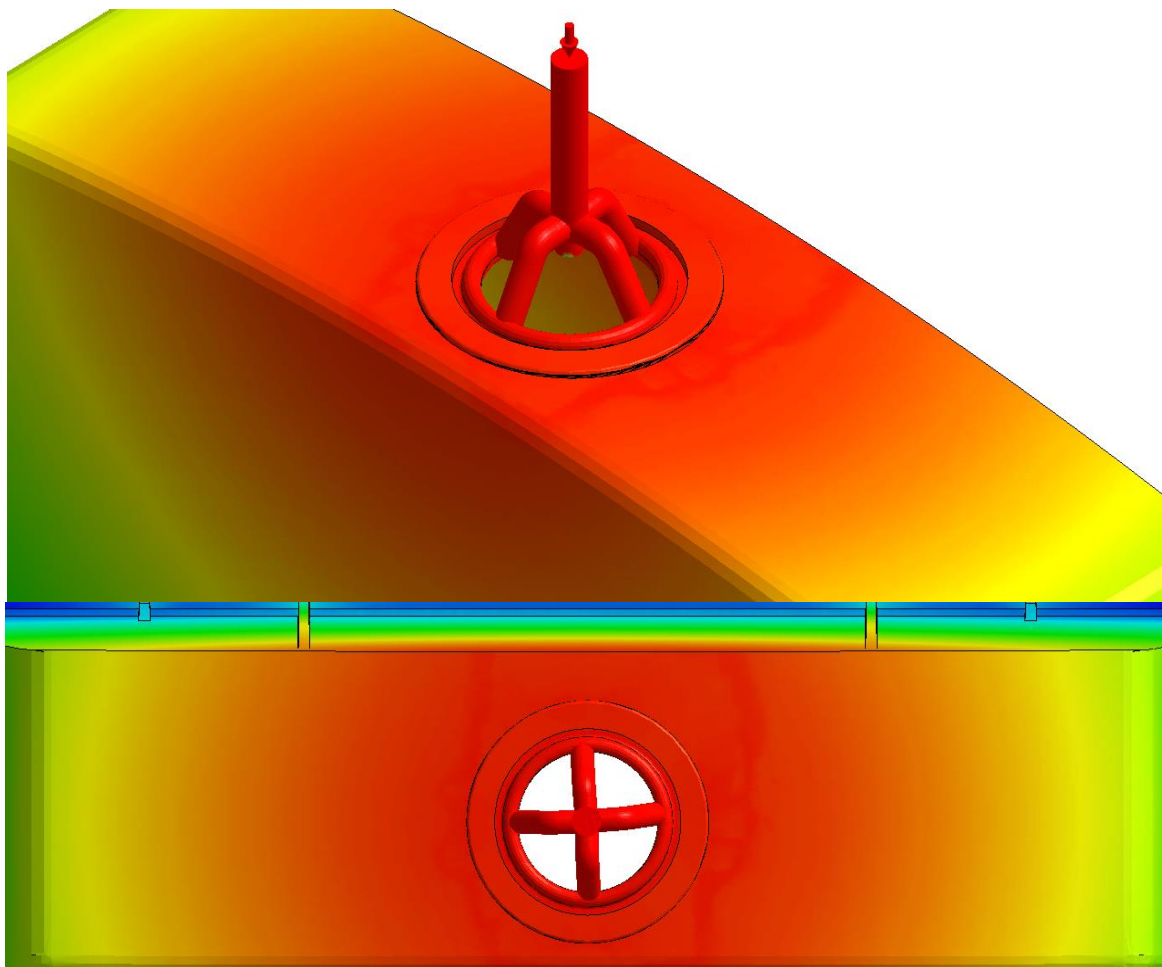
Σχήμα 4-8. Επαλήθευση στο λογισμικό Moldex3D της εμφάνιση γραμμών συγκόλλησης (weld lines) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης όπου το μέτωπο ροής «σπάει» σε επιμέρους μέτωπα (πάνω – μέσον) ή εκεί όπου αναπτύσσεται το φαινόμενο πίδακα (περιοχή τροφοδοσίας – κάτω).



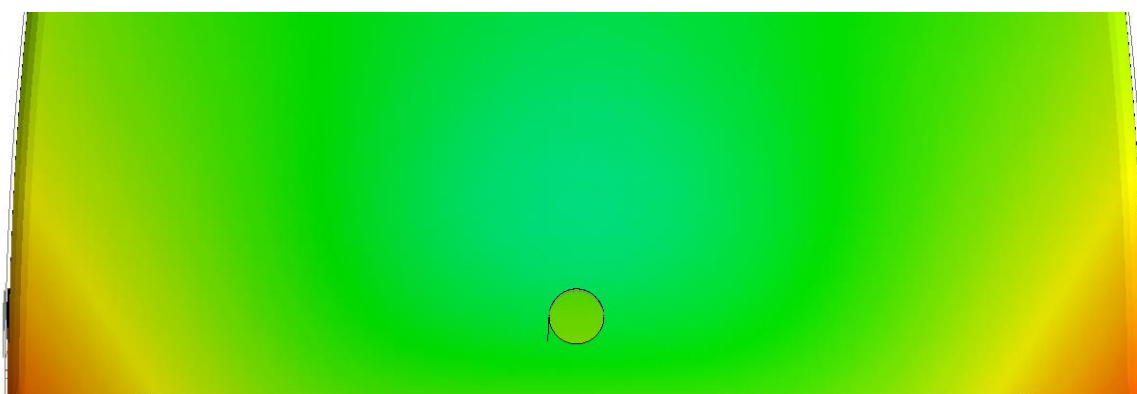
Σχήμα 4-9. Επαλήθευση στο λογισμικό Moldex3D της εμφάνισης βαθουλωμάτων (sink marks) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης με αυξημένο πάχος όπως είναι τα νεύρα στήριξης (μέγιστη εκτόπιση **0.106 mm**).

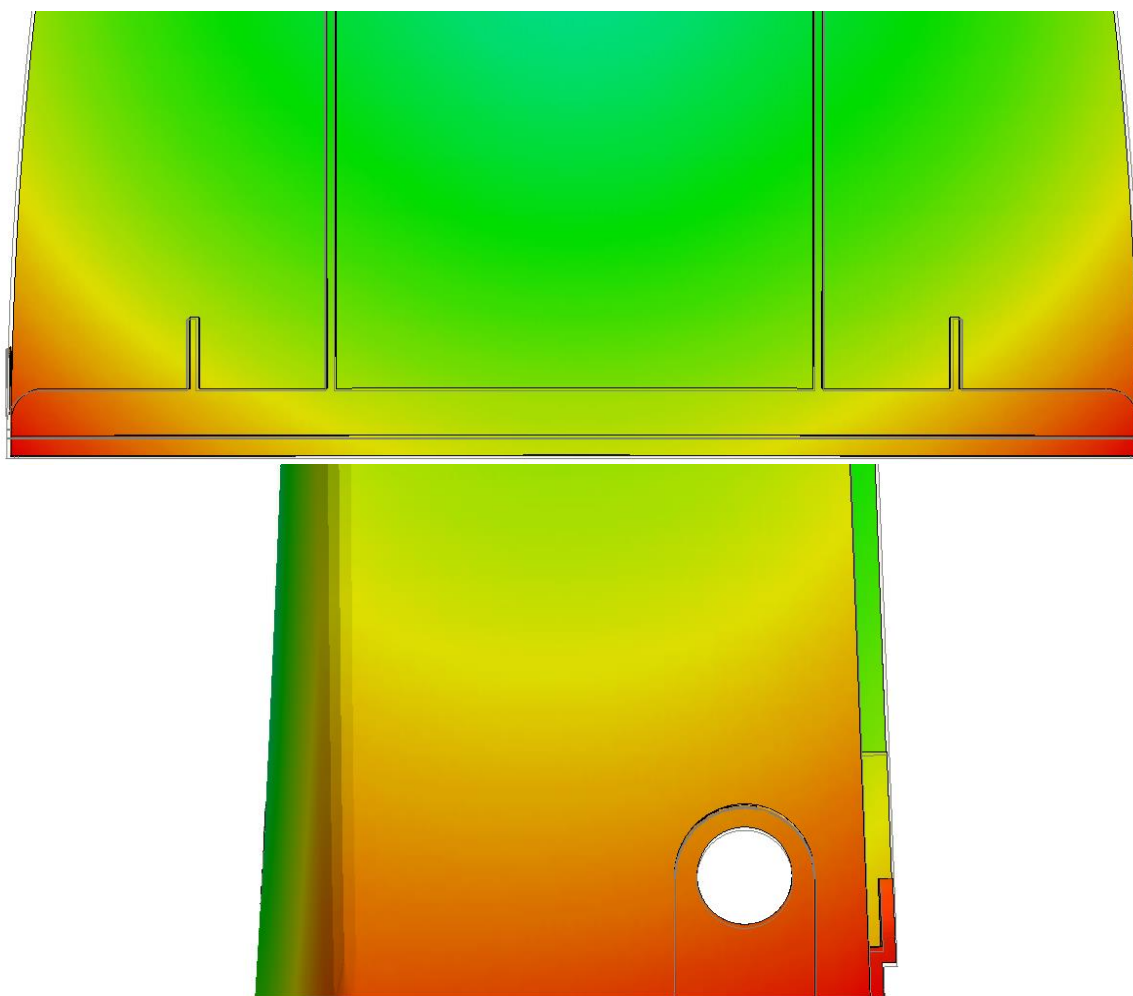


Σχήμα 4-10. Επαλήθευση στο λογισμικό Moldex3D της εμφάνισης γραμμών ροής (flow lines) σε περιοχές του πραγματικού προϊόντος έγχυσης όπου τα επιμέρους μέτωπα ροής συγχωνεύονται ή εκεί όπου αναπτύσσεται το φαινόμενο πίδακα (περιοχή τροφοδοσίας).



Σχήμα 4-11. Επαλήθευση στο λογισμικό Moldex3D της εμφάνισης του φαινομένου πίδακα (jetting) που εκδηλώθηκε περίξ της περιοχής τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού κατά την έγχυση του πολυμερούς τήγματος και αποτυπώθηκε ως κυματιστό μοτίβο μειωμένης στιλπνότητας στην αντίστοιχη περιοχή της εξωτερικής επιφάνειας του πραγματικού προϊόντος έγχυσης.

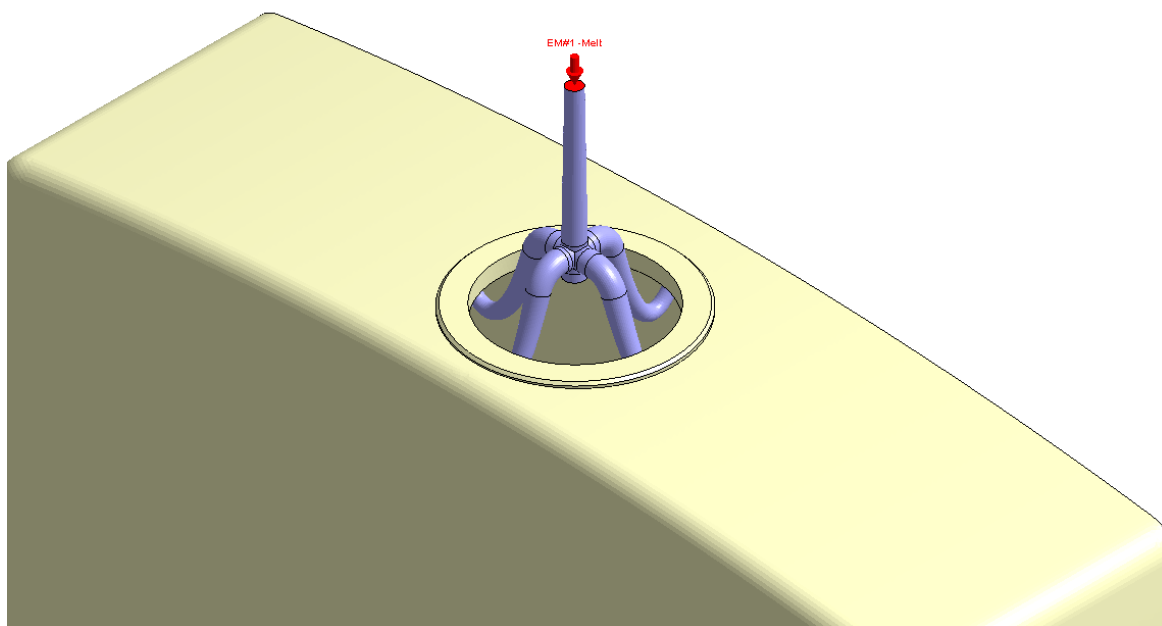




Σχήμα 4-12. Αυξημένη στρέβλωση (warpage) του τελικού προϊόντος έγχυσης στις γωνίες (μέγιστη εκτόπιση **2.009** mm στις κάτω γωνιές).

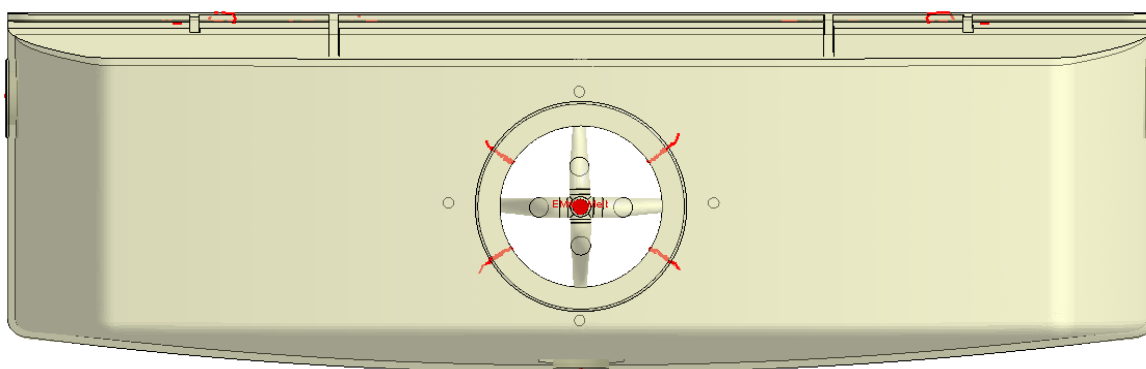
4.2.1 Πρώτο Εναλλακτικό Σενάριο Τροφοδοσίας της Κοιλότητας Μορφοποίησης του Καλούπιού

Το πρώτο εναλλακτικό σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλούπιού περιλαμβάνει την απομάκρυνση του ειδικά σχεδιασμένου κυκλικού δακτυλίου από το εσωτερικό της κύριας οπής του προϊόντος και την αντικατάσταση των τεσσάρων πυλών εισόδου τύπου tunnel από πύλες εισόδου τύπου cashew. Η κλίση των νέων πυλών εισόδου καθώς και ο τρόπος σύνδεσής τους με το σύστημα διανομής τροποποιείται ελάχιστα ώστε η αρχικά σχηματισθείσα κωνοειδής μορφή του συστήματος τροφοδοσίας που περιγράφηκε παραπάνω να παραμείνει κατά το δυνατόν αμετάβλητη. Ωστόσο, τα κάτω λεπτότερα άκρα των καινούργιων πυλών εισόδου εδράζονται πλέον απευθείας στα εσωτερικά τοιχώματα του προϊόντος έγχυσης περίξ της κύριας οπής (**Σχήμα 4-13**). Η επινόηση αυτή έγινε στα πλαίσια των προσπαθειών για την εξάλειψη του φαινομένου πίδακα που εμφανίζεται κατά την έγχυση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του έντονου κυματιστού μοτίβου στο τελικό προϊόν περίξ της περιοχής που εμπίπτει στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης.

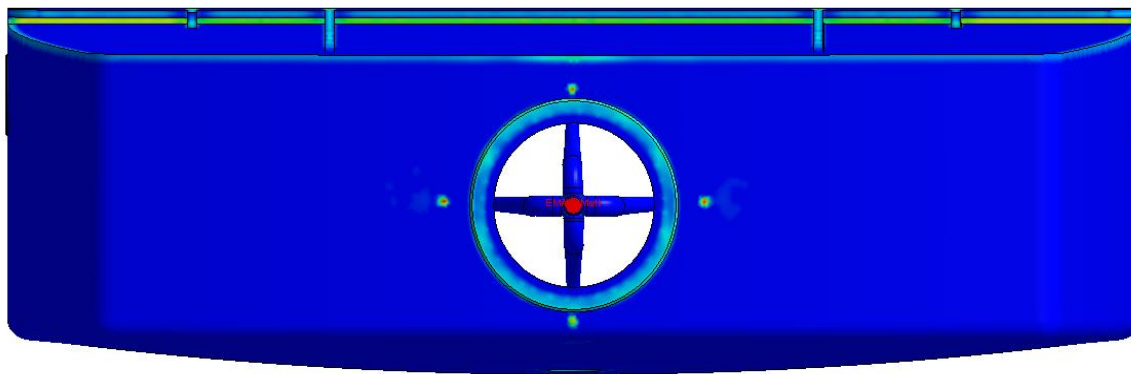


Σχήμα 4-13. Πρώτο εναλλακτικό σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

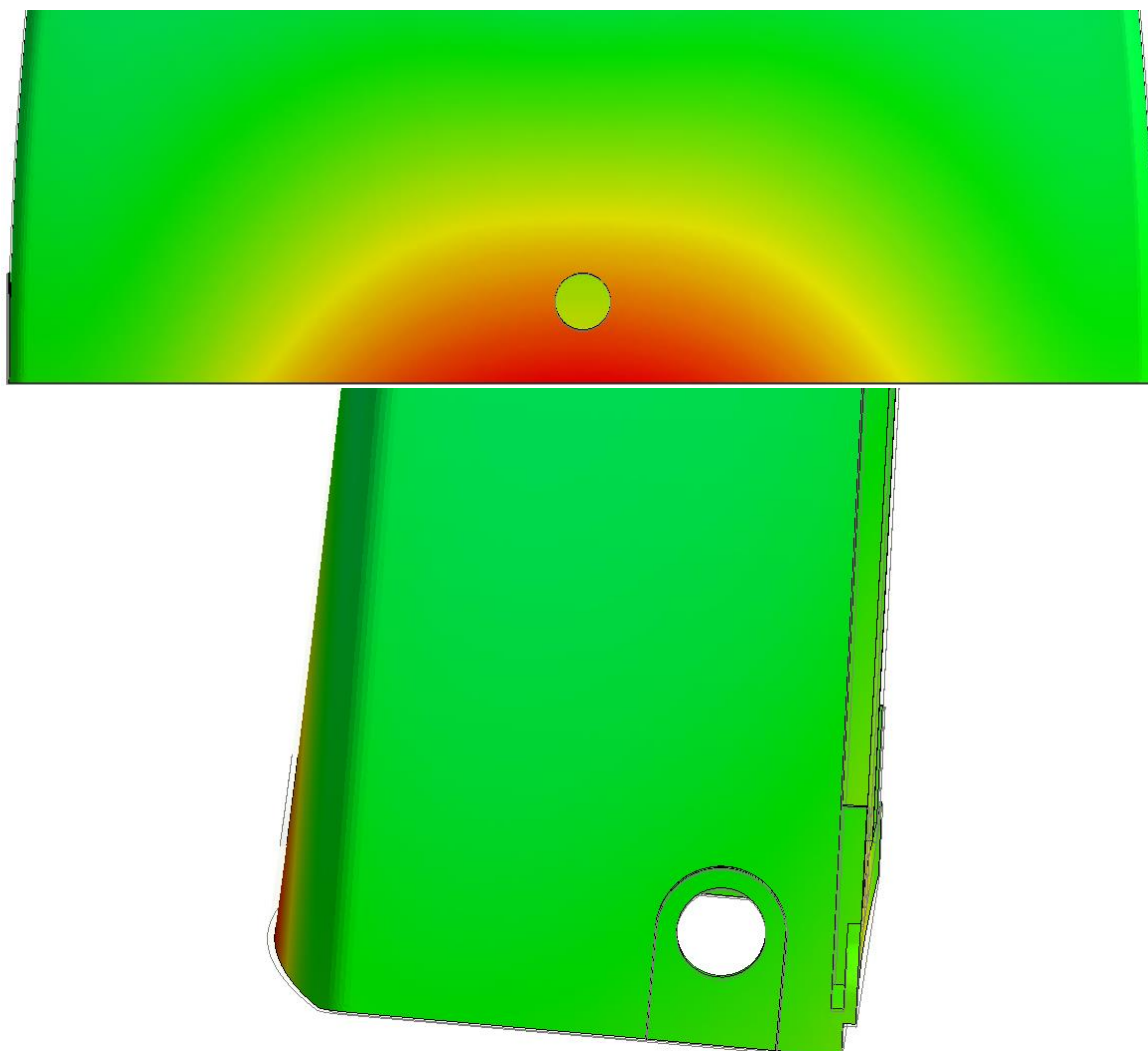
Πράγματι, το φαινόμενο πίδακα εξαλείφθηκε, ωστόσο προέκυψαν άλλα ζητήματα όπως η εμφάνιση πρόσθετων γραμμών συγκόλλησης (weld lines) και βαθουλωμάτων (sink marks) σε κρίσιμα σημεία που μέχρι πρότινος δεν υπήρχαν (**Σχήμα 4-14**, **Σχήμα 4-15**), καθώς και η αυξημένη στρέβλωση του τελικού προϊόντος σε σημεία που έως πρότινος ήταν ελάχιστη (**Σχήμα 4-16**). Σε συνδυασμό δε με τη δυσκολία που συναντάται συχνά στη μηχανουργική κατεργασία τέτοιων πυλών εισόδου, ιδίως στον πυρήνα του καλουπιού («αρσενικό»), αλλά και το ενδεχόμενο τα ίχνη που θα παραμείνουν επί του τελικού προϊόντος μετά την απομάκρυνση των πυλών εισόδου να είναι έντονα, η επιλογή ενός δεύτερου εναλλακτικού σεναρίου τροφοδοσίας κρίνεται επιβεβλημένη.



Σχήμα 4-14. Εμφάνιση τεσσάρων πρόσθετων γραμμών συγκόλλησης (weld lines) στην περιοχή του μορφοποιημένου αντικείμενου που εμπίπτει στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού εξαιτίας των πυλών εισόδου τύπου cashew.



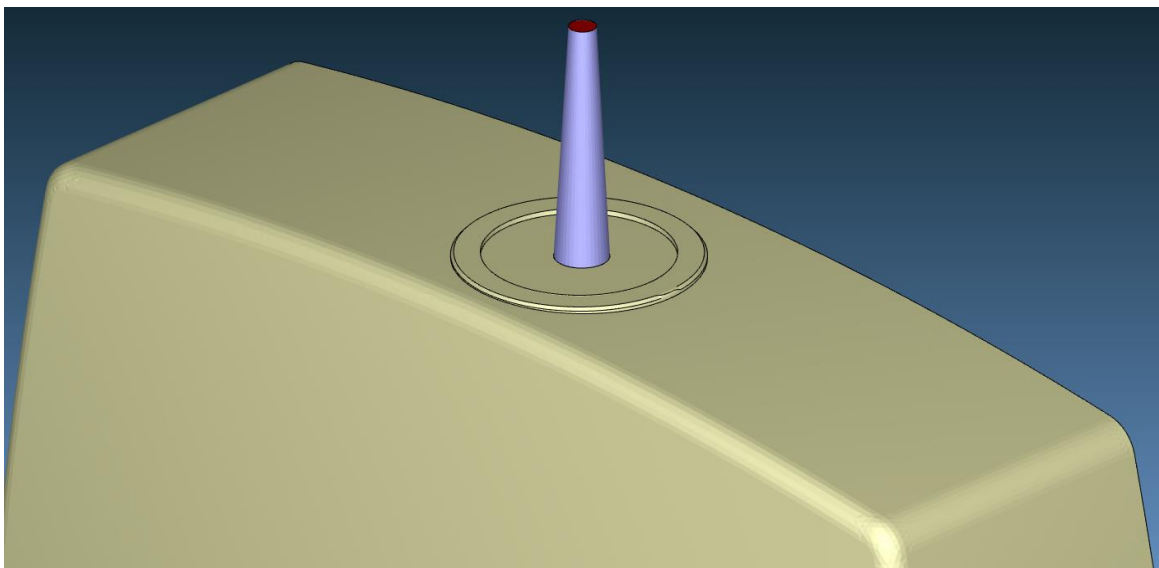
Σχήμα 4-15. Εμφάνιση τεσσάρων πρόσθετων βαθουλωμάτων (sink marks) στην περιοχή του μορφοποιημένου αντικειμένου που εμπίπτει στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης του καλούπιού εξαιτίας των πυλών εισόδου τύπου cashew (μέγιστη εκτόπιση **0.144 mm**).



Σχήμα 4-16. Αυξημένη στρέβλωση (warpage) του τελικού προϊόντος έγχυσης στις γωνίες (μέγιστη εκτόπιση **1.746 mm** στο μέσον των κάτω ακμών της πρόσοψης και της πίσω όψης).

4.2.2 Δεύτερο Εναλλακτικό Σενάριο Τροφοδοσίας της Κοιλότητας Μορφοποίησης του Καλουπιού – Το Επικρατέστερο

Το δεύτερο εναλλακτικό σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (**Σχήμα 4-17**) περιλαμβάνει την αντικατάσταση του ειδικά σχεδιασμένου κυκλικού δακτυλίου που έχει τοποθετηθεί στο εσωτερικό της κύριας οπής του προϊόντος με έναν κυκλικό δίσκο μέγιστου πάχους 3 mm. Στην άνω ελεύθερη επιφάνεια του κυκλικού δίσκου τοποθετείται μία μοναδική πύλη εισόδου τύπου sprue, στην κάτω ελεύθερη επιφάνεια τοποθετείται ένα δοχείο ψύξης (cold slug), ενώ οι αγωγοί διανομής (runners) εκλείπουν. Με την ολοκλήρωση του κύκλου έγχυσης και την εξόλκευση του παραχθέντος προϊόντος, ο κυκλικός δίσκος αφαιρείται με πρόσθετη μηχανική επεξεργασία. Συνεπώς, δε συντρέχει κανένας λόγος ανησυχίας για τυχόν μεγάλο ίχνος επί του τελικού προϊόντος μετά την απομάκρυνση της πύλης εισόδου καθώς αυτή αφαιρείται μαζί με τον κυκλικό δίσκο.



Σχήμα 4-17. Δεύτερο εναλλακτικό σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού το οποίο είναι και το επικρατέστερο για την τελική μελέτη και βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής του εν λόγω προϊόντος έγχυσης.

Το ιδανικό μέγεθος τόσο της συγκεκριμένης πύλης εισόδου όσο και του πάχους του κυκλικού δίσκου καθορίστηκαν αποκλειστικά και μόνο πραγματοποιώντας σχετικές δοκιμές και εκτελώντας τις αντίστοιχες προσομοιώσεις του κύκλου έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D. Τούτο συνέβη διότι οι υπεύθυνοι της κατασκευάστριας εταιρείας δεν είχαν κάποια συγκεκριμένη πρόταση επί των διαστάσεων καθώς αυτού του τύπου η πύλη εισόδου αποτελεί ένα νέο σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού του εν λόγω προϊόντος έγχυσης. Άλλωστε, πρόκειται για ένα σενάριο πλήρως υλοποιήσιμο εφόσον, βέβαια, προηγηθεί μια μετατροπή στο καλούπι η οποία δεν είναι ιδιαίτερα δαπανηρή συγκριτικά με την αντίστοιχη απαιτούμενη μετατροπή στο πρώτο εναλλακτικό σενάριο.

Ορίζοντας τις συνθήκες που παραμετροποιούν την κατασκευαστική διεργασία ομοίως με τα προηγούμενα σενάρια τροφοδοσίας, τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις του κύκλου έγχυσης ήταν ούτως ή άλλως αρκούντως ικανοποιητικά, με άλλες κατασκευαστικές ατέλειες να βελτιώνονται περαιτέρω (π.χ. γραμμές συγκόλλησης, βαθουλώματα, ογκομετρική συρρίκνωση κλπ) και άλλες να εξαλείφονται παντελώς (π.χ. φαινόμενο πίδακα). Εξαιτίας του μεγάλου μήκους ροής που οφείλεται στο αυξημένο βάθος του εν λόγω προϊόντος έγχυσης, το τελικό πάχος του κυκλικού δίσκου ανήλθε στα

3 mm ενώ οι καταληκτικές διαστάσεις της πύλης εισόδου τύπου sprue που θα αναφερθούν στη συνέχεια είναι συγκεκριμένες. Έτσι, εξασφαλίστηκε κατ' ελάχιστο η πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα στο ακέραιο χωρίς την εμφάνιση short shots ή flow hesitations. Από εκεί και πέρα, η βελτιστοποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας για το εν λόγω σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης είναι κάτι που θα μελετηθεί και θα διερευνηθεί προσεχώς.

4.3 Μελέτη του Προϊόντος Έγχυσης στο Λογισμικό Moldex3D με το Επικρατέστερο Σενάριο Τροφοδοσίας της Κοιλότητας Μορφοποίησης

Η μελέτη του εν λόγω προϊόντος έγχυσης όπως και κάθε προϊόντος έγχυσης ως προς τη συμπεριφορά της ροής του πολυμερούς τήγματος κατά την έγχυσή του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του αντίστοιχου καλουπιού γίνεται σε τρία διαδοχικά στάδια στο λογισμικό Moldex3D : α) *Προ-επεξεργασία (Pre-process)*, β) *Διεργασία (Process)* και γ) *Μετα-επεξεργασία (Post-Process)*. Σε καθένα από τα στάδια αυτά εκτελούνται κάποια συγκεκριμένα βήματα τα οποία περιγράφονται συνοπτικά στον κάτωθι **Πίνακα 4-1**.

Πίνακα 4-1. Τα ακολουθούμενα βήματα για τη μελέτη ενός προϊόντος έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D.

	Προ-επεξεργασία (Pre-process)	Διεργασία (Process)	Μετα-επεξεργασία (Post-process)
Βήμα 1^ο	<u>Εισαγωγή</u> 3D μοντέλου προϊόντος έγχυσης σε ηλεκτρονική μορφή (stl, step, parasolid κλπ), <u>έλεγχος</u> για τυχόν ατέλειες στο εισαχθέν αρχείο (π.χ. κενά μεταξύ των επιφανειών, αλληλοεπικάλυψη επιφανειών κλπ) και <u>επιδιόρθωση</u> αυτών με τη βοήθεια σχετικών εργαλείων	Δημιουργία νέου project και φόρτωση του εξαχθέντος 3D πλέγματος	Φόρτωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων
Βήμα 2^ο	<u>Σχεδιασμός</u> του συστήματος διανομής του καλουπιού (runner system) και των πυλών εισόδου (gates) ή <u>εισαγωγή</u> αντίστοιχων αρχείων σε ηλεκτρονική μορφή (stl, step, parasolid κλπ)	Καθορισμός πολυμερούς δομικού υλικού (εισαγωγή από τη βιβλιοθήκη του Moldex3D ή την προσωπική βιβλιοθήκη του χρήστη)	<u>Επισκόπηση</u> και <u>ανάλυση</u> των αποτελεσμάτων πλήρωσης (<i>Filling Results</i>)
Βήμα 3^ο	<u>Σχεδιασμός</u> του συστήματος ψύξης του καλουπιού (cooling system) και της καλουπιέρας (moldbase) ή <u>εισαγωγή</u> αντίστοιχων αρχείων σε ηλεκτρονική μορφή (stl, step, parasolid κλπ)	Παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διαδικασίας	<u>Επισκόπηση</u> και <u>ανάλυση</u> των αποτελεσμάτων συμπίεσης (<i>Packing Results</i>)

	Προ-επεξεργασία (Pre-process)	Διεργασία (Process)	Μετα-επεξεργασία (Post-process)
<u>Βήμα 4^ο</u>	Δημιουργία 3D πλέγματος για <u>μοντέλο προϊόντος έγχυσης</u> και <u>σύστημα διανομής</u> (eDesign Mesh) ή Δημιουργία 3D πλέγματος για <u>μοντέλο προϊόντος έγχυσης</u> , <u>σύστημα διανομής</u> , <u>σύστημα ψύξης καλουπιού</u> και <u>καλουπιέρα</u> (BLM Solid Mesh)	Παραμετροποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας	<u>Επισκόπηση</u> και <u>ανάλυση</u> των αποτελεσμάτων ψύξης (<i>Cooling Results</i>)
<u>Βήμα 5^ο</u>	<u>Εξαγωγή</u> και <u>αποθήκευση</u> συνολικού 3D πλέγματος	Επιλογή του είδους της προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων και υλοποίηση	<u>Επισκόπηση</u> και <u>ανάλυση</u> των αποτελεσμάτων στρέβλωσης (<i>Warpage Results</i>)

4.3.1 Προ-επεξεργασία

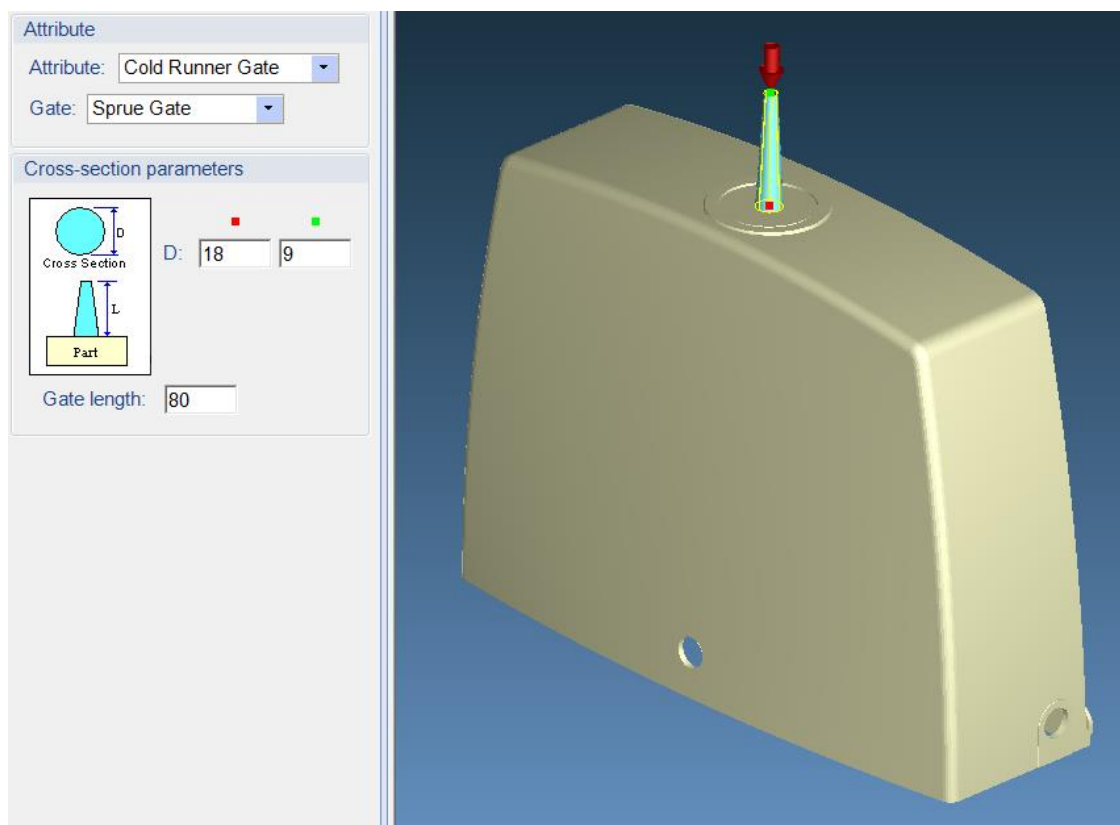
Το πρώτο στάδιο είναι η προ-επεξεργασία των σημαντικότερων στοιχείων του καλουπιού του προς μελέτη προϊόντος έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D. Για την επιτυχή διεκπεραίωσή της, τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής :

Βήμα 1^ο

- Εισαγωγή του 3D μοντέλου του προϊόντος έγχυσης σε ηλεκτρονική μορφή (step), έλεγχος για τυχόν ατέλειες στο εισαχθέν αρχείο (π.χ. κενά μεταξύ των επιφανειών, αλληλοεπικάλυψη επιφανειών κλπ) και επιδιόρθωση αυτών με τη βοήθεια σχετικών εργαλείων.

Βήμα 2^ο

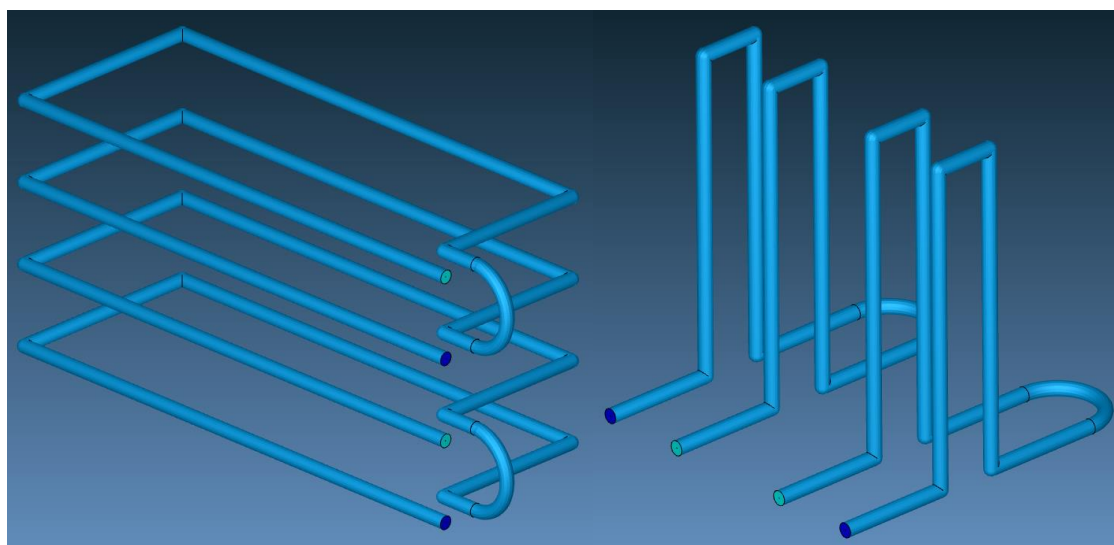
- Σχεδιασμός της ψυχρής πύλης εισόδου τύπου sprue στο κέντρο της άνω ελεύθερης επιφάνειας του κυκλικού δίσκου (**Σχήμα 4-18**).



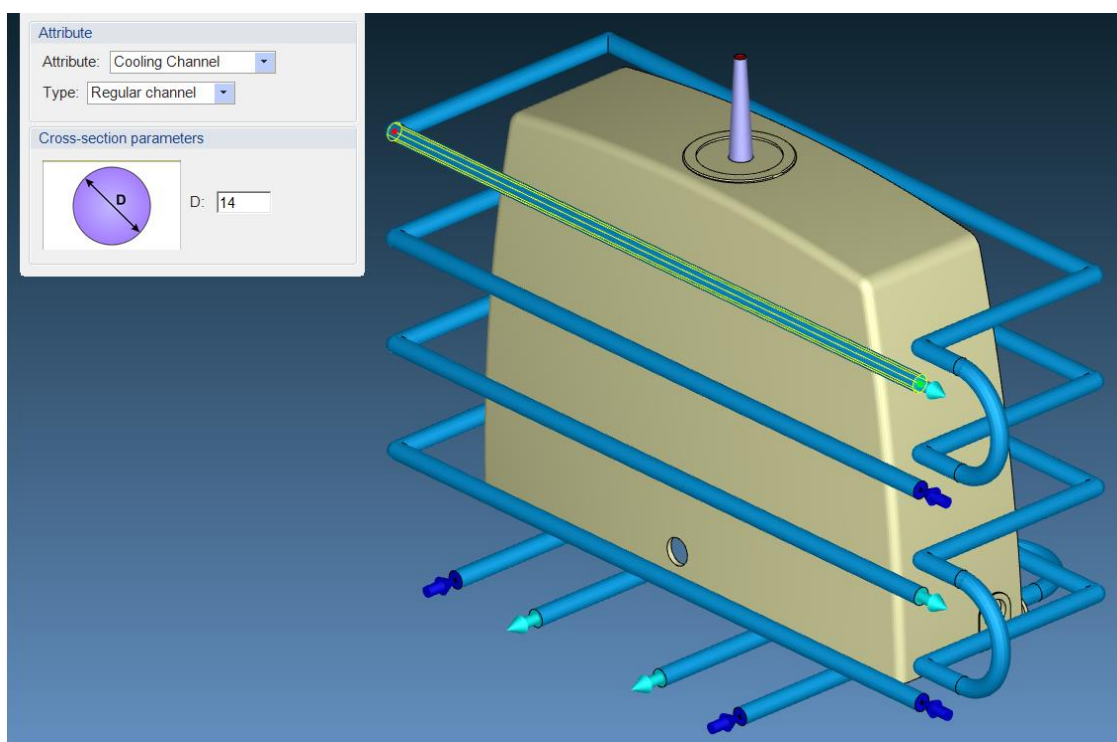
Σχήμα 4-18. Ψυχρή πύλη εισόδου τύπου sprue μήκους $L = 80$ mm με μικρή διάμετρο $d = 9$ mm, μεγάλη διάμετρο $D = 18$ mm και όγκο $V = 11.82$ cc.

Βήμα 3°

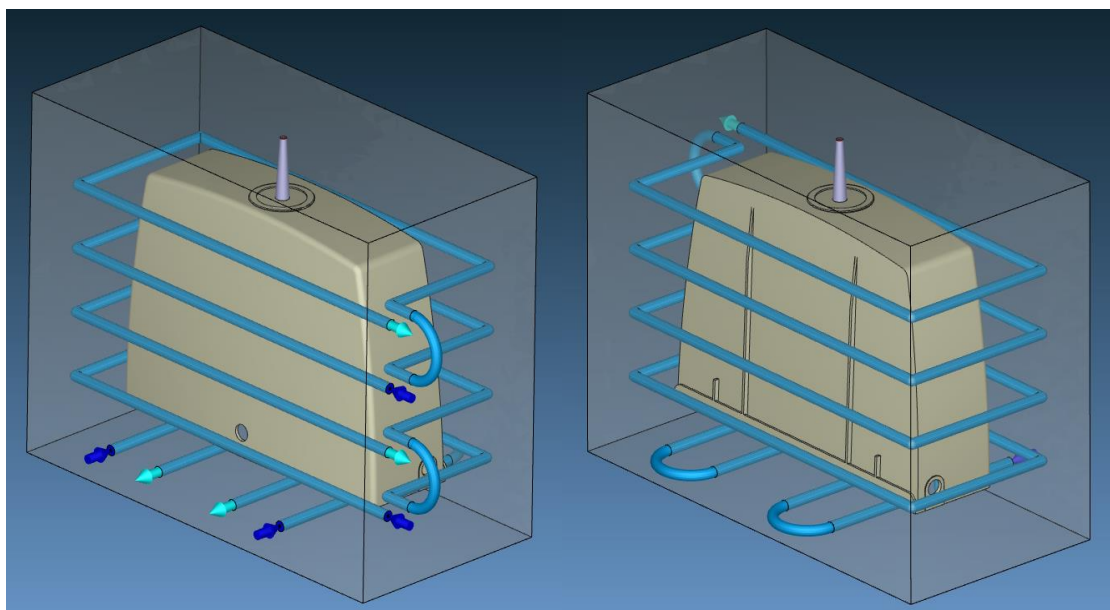
- Σχεδιασμός του συστήματος ψύξης του καλουπιού (γεωμετρία καναλιών ψύξης, τρόπος σύνδεσης των καναλιών ψύξης, καθορισμός της εισροής του ψυκτικού μέσου στα κανάλια ψύξης και της εκροής του από αυτά) και της καλουπιέρας (**Σχήμα 4-19**, **Σχήμα 4-20** και **Σχήμα 4-21**).



Σχήμα 4-19. Στο σταθερό μέρος του καλούπιου («θηλυκό») έχουν σχεδιαστεί εκατέρωθεν των δύο μεγάλων κάθετων πλευρών του προϊόντος έγχυσης τέσσερα ίδιας διαμέτρου κανάλια ψύξης τα οποία είναι μεταξύ τους παράλληλα και κάθετα στην κατεύθυνση εξόλκευσης του τελικού προϊόντος, ισαπέχουν το ένα από το άλλο και ανά δύο ενώνονται εσωτερικά στο «θηλυκό» με κανάλια ίδιας διαμέτρου (αριστερά). Στο αντίστοιχο κινητό μέρος έχουν σχεδιαστεί ανάμεσα στις δύο μεγάλες κάθετες πλευρές του προϊόντος έγχυσης τέσσερα ίδιας διαμέτρου κανάλια ψύξης τα οποία είναι παράλληλα τόσο μεταξύ τους όσο και ως προς την κατεύθυνση εξόλκευσης του τελικού προϊόντος, ενώ ανά δύο ισαπέχουν και ενώνονται εσωτερικά στο «αρσενικό» με κανάλια ίδιας διαμέτρου (δεξιά). Επίσης, τόσο στο «αρσενικό» όσο και στο «θηλυκό» τα κανάλια ψύξης ενώνονται ανά δύο εξωτερικά της καλούπιέρας με εύκαμπτους αγωγούς, δηλαδή λάστιχα (hoses).



Σχήμα 4-20. Σύστημα ψύξης καλούπιου αποτελούμενο από κανάλια ψύξης και εύκαμπτους σωλήνες διαμέτρου $D = 14$ mm.



Σχήμα 4-21. Σχεδιασμός καλουπιέρας μέγιστων διαστάσεων **600.00 x 290.00 x 480.00** mm x mm x mm.

Βήμα 4^ο

- Δημιουργία και εξαγωγή του συνολικού 3D πλέγματος που μπορούν να πραγματοποιηθούν επιλέγοντας έναν από τους ακόλουθους τύπους 3D πλέγματος που υποστηρίζει το λογισμικό Moldex3D :

- *eDesign Mode*

Ο συγκεκριμένος τύπος 3D πλέγματος υποστηρίζει την *κυβική* προσέγγιση του πλέγματος σε όλη την έκταση τόσο του μοντέλου του προϊόντος έγχυσης όσο και του συστήματος διανομής. Στα πλεονεκτήματά του συγκαταλέγονται :

- ✓ η ευκολία και η απλοϊκότητα στη χρήση του και
- ✓ η πολύ γρήγορη προ-επεξεργασία της ανάλυσης.

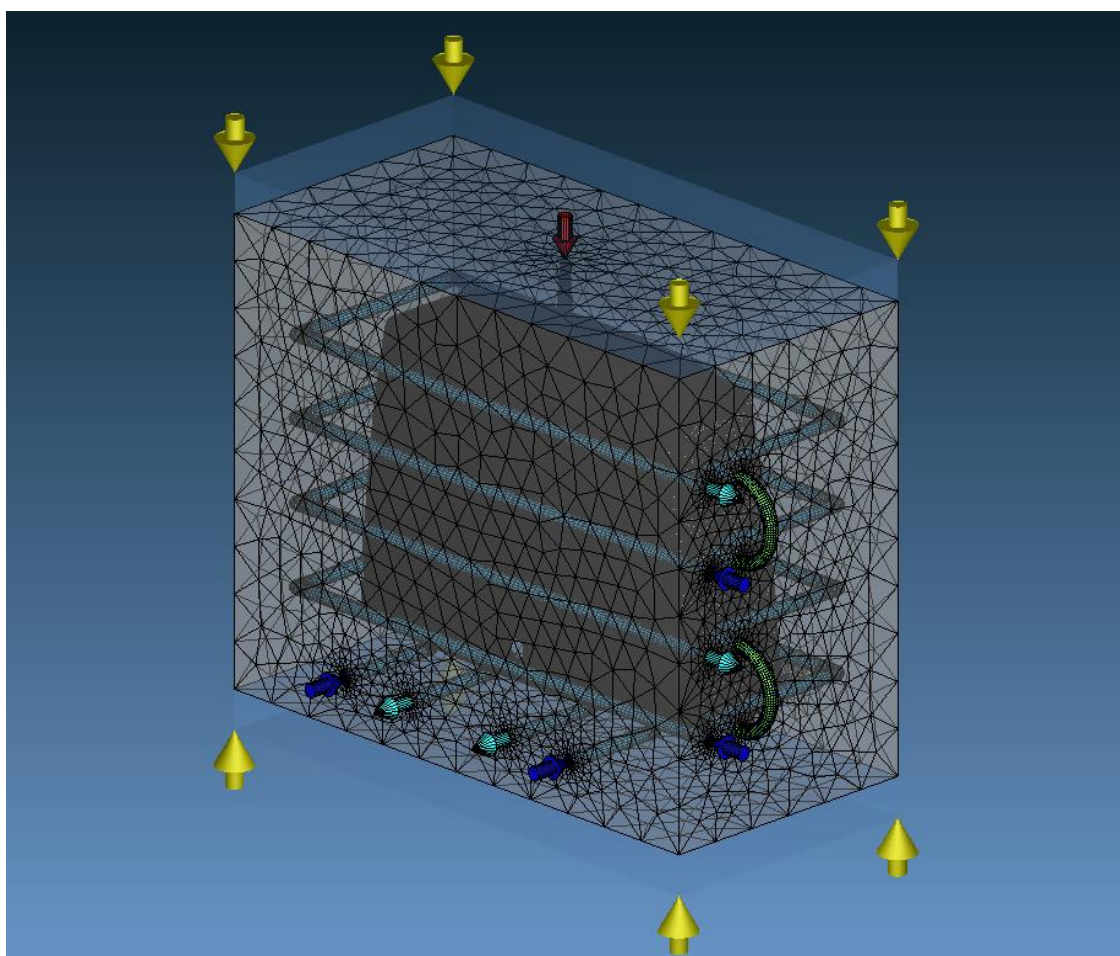
- *Solid Mode (Boundary Layer Mesh Mode)*

Ο εν λόγω τύπος 3D πλέγματος υποστηρίζει αφενός μεν την *πρισματική* προσέγγιση του πλέγματος στις εξωτερικές στιβάδες του μοντέλου του προϊόντος έγχυσης, αφετέρου δε την *τετραεδρική* προσέγγιση στον πυρήνα του. Επίσης, είναι εφικτή η πλεγματοποίηση και των υπόλοιπων σημαντικών στοιχείων του καλουπιού (σύστημα διανομής, σύστημα ψύξης και καλουπιέρα) και μάλιστα με διαφορετική πλεγματική δομή μέσω πληθώρας επιλογών. Επομένως, τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου 3D πλέγματος είναι εμφανώς περισσότερα. Συγκεκριμένα, ως πλεονεκτήματα λογίζονται :

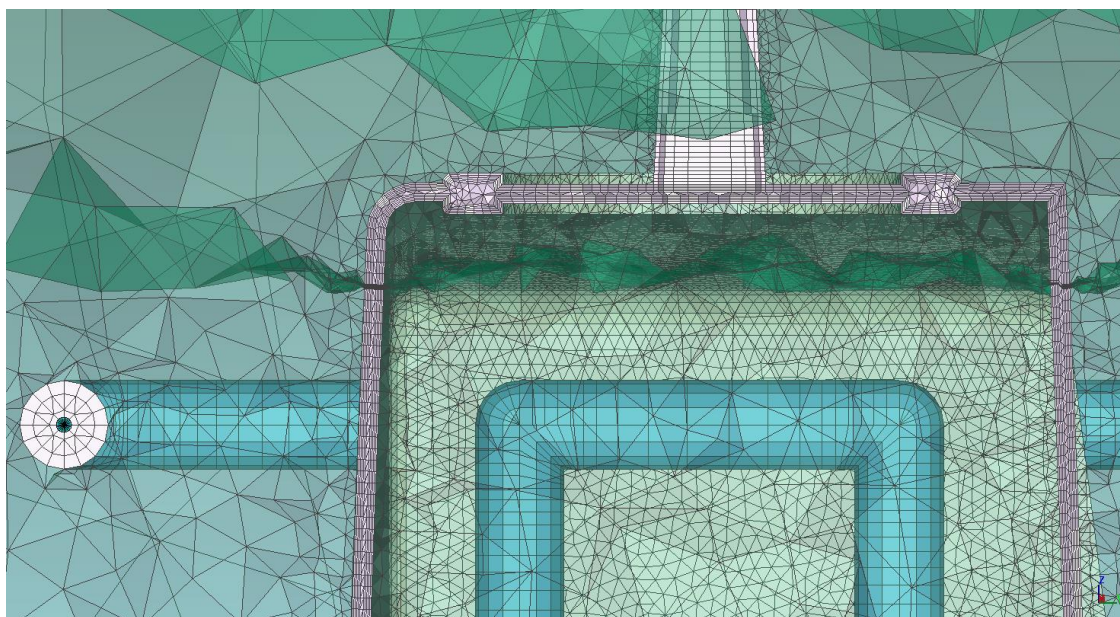
- ✓ η μείωση των ασκούμενων διατμητικών τάσεων (shear stresses) στο πολυμερές τήγμα σε μεγάλο βαθμό,

- ✓ η επίδραση της ιξώδους θέρμανσης (*viscous heating*) στο πολυμερές τήγμα και η βελτίωση στην ακρίβεια του υπολογισμού της,
- ✓ η βελτίωση στην ακρίβεια του υπολογισμού της πίεσης,
- ✓ η βελτίωση στην πρόβλεψη της στρέβλωσης (*warpage*) και των βαθουλωμάτων (*sink marks*) στο τελικό προϊόν και
- ✓ το γεγονός ότι αποτελεί ιδανικό εργαλείο για τη δημιουργία 3D πλεγμάτων για πολυσύνθετα εξαρτήματα και εξαρτήματα με τοιχώματα πολύ μικρού πάχους.

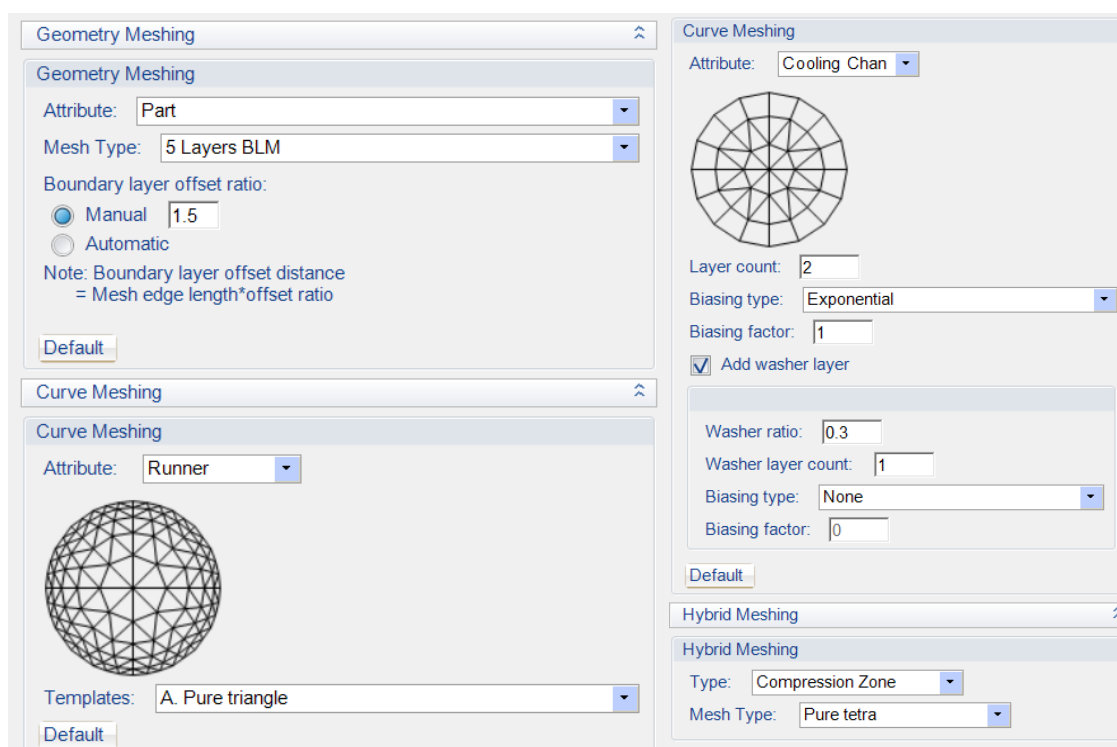
Επί του παρόντος, εξάγεται ο δεύτερος τύπος 3D πλέγματος για την εξασφάλιση μεγαλύτερης ακρίβειας στα αποτελέσματα της επικείμενης προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (**Σχήμα 4-22** και **Σχήμα 4-23**).



Σχήμα 4-22. Δημιουργία 3D πλέγματος για το μοντέλο του προϊόντος έγχυσης, το σύστημα διανομής (πύλη εισόδου τύπου sprue), το σύστημα ψύξης του καλουπιού και την καλουπιέρα.



Σχήμα 4-23. Τομή 3D πλέγματος του μοντέλου του προϊόντος έγχυσης, του συστήματος διανομής (πύλη εισόδου τύπου sprue), του συστήματος ψύξης και της καλούπιέρας. Η διαφορετική πλεγματική δομή αυτών των επιμέρους στοιχείων του καλούπιού μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω κατάλληλων ρυθμίσεων (**Σχήμα 4-24**).



Model Details	
Item	Value
Part mesh node count	1,267,794
Part mesh element count	2,739,754
Part mesh volume	1185.57 (cc)
Runner mesh node count	7,865
Runner mesh element count	12,800
Runner mesh volume	11.82 (cc)

Σχήμα 4-24. Σύνθετες ρυθμίσεις για τη δημιουργία 3D πλέγματος με διαφορετική πλεγματική δομή για καθένα από τα υπάρχοντα στοιχεία του καλουπιού (προϊόν έγχυσης, πύλη εισόδου τύπου sprue, σύστημα ψύξης και καλουπιέρα). Μόνο το 3D πλέγμα του μοντέλου του προϊόντος έγχυσης για πέντε στρώματα πρισματικής προσέγγισης εκατέρωθεν της τετραεδρικής προσέγγισης του πυρήνα του αποτελείται από **2.739.754** πεπερασμένα στοιχεία. Αν σε αυτόν τον αριθμό προστεθούν τα πεπερασμένα στοιχεία των 3D πλεγμάτων της πύλης εισόδου (**12.800**), του συστήματος ψύξης και της καλουπιέρας, τότε το συνολικό στερεό πλέγμα (solid mesh) αριθμεί συνολικά περί τα **5.182.517** πεπερασμένα στοιχεία, αριθμός αρκούτσως ικανοποιητικός για μια ρεαλιστική προσομοίωση του κύκλου έγχυσης.

Βήμα 5^ο

- Εξαγωγή και αποθήκευση του συνολικού 3D πλέγματος, καθορισμός πολυμερούς δομικού υλικού και συνέχεια της μελέτης του προϊόντος έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D στο επόμενο στάδιο.

4.3.2 Διεργασία

4.3.2.1 Παραμετροποίηση της Κατασκευαστικής Διαδικασίας

Το επόμενο στάδιο της μελέτης του προϊόντος έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D μετά και τον καθορισμό του πολυμερούς δομικού υλικού είναι η παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Επιλέγοντας το εργαλείο **Process Wizard**, εμφανίζεται μια σειρά από παραμέτρους τις οποίες ο μηχανικός είναι απαραίτητο να καθορίσει επακριβώς. Οι εν λόγω παράμετροι εντάσσονται στις τέσσερις ξεχωριστές ομάδες **Project Settings, Filling/Packing Settings, Cooling Settings** και **Summary**. Σημειωτέον ότι οι αρχικές προσομοιώσεις τόσο των φάσεων πλήρωσης, συμπίεσης και ψύξης όσο και της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης έγιναν σε συμφωνία με τις υποδείξεις του λογισμικού. Εν ολίγοις, αυτό σημαίνει ότι το λογισμικό Moldex3D δύναται να προκαθορίζει αυτόματα όλες τις παραμέτρους σε κάθε ομάδα βάσει :

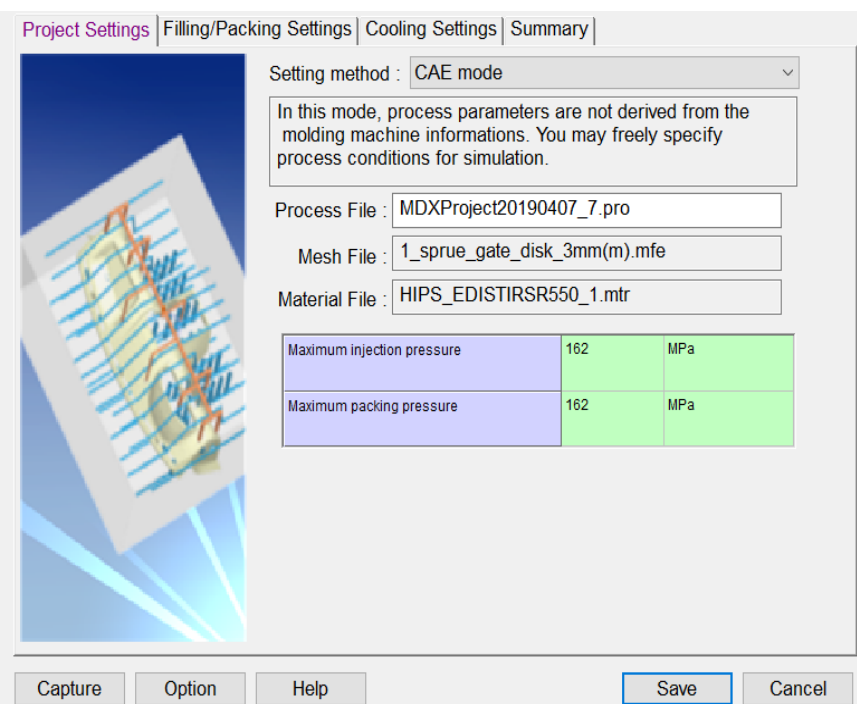
- ο της γεωμετρίας των σημαντικότερων στοιχείων του καλουπιού, δηλαδή του προϊόντος έγχυσης από το οποίο προκύπτουν η κοιλότητα (cavity) και ο πυρήνας (core), του συστήματος διανομής, του συστήματος ψύξης και της καλουπιέρας,
- ο της σχετικής προ-επεξεργασίας των σημαντικότερων στοιχείων του καλουπιού που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο στάδιο της μελέτης και περιλαμβάνει αφενός τη διόρθωση τυχόν γεωμετρικών ατελειών των στοιχείων και αφετέρου την πλεγματοποίηση των στοιχείων και
- ο των ιδιοτήτων του πολυμερούς που έχει καθοριστεί.

Αναντίρρητα, πρόκειται για μια σημαντική δυνατότητα του λογισμικού να προβλέπει την παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Κάτι τέτοιο διευκολύνει το έργο του μηχανικού που δεν είναι άλλο από τη βελτιστοποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Σε πρώτη φάση, εκμεταλλευόμενος αυτή τη δυνατότητα, ο μηχανικός είναι σε θέση να κατανοήσει ποια είναι η ενδεδειγμένη τάξη μεγέθους της τιμής που πρέπει να λάβει κάθε παράμετρος και έπειτα να διερευνήσει τα περιθώρια βελτίωσης αυτών, συνυπολογίζοντας ταυτόχρονα όλα τα δεδομένα που έχει στη διάθεσή του και μεριμνώντας για την ικανοποίηση όλων των υπαρχόντων περιορισμών.

Επομένως, διά της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος και μετά από κάποιον ικανοποιητικό αριθμό δοκιμών, ο μηχανικός μπορεί να καταλήξει κατά την κρίση του στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για τον ίδιο. Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία που θα αναλυθούν εκτενώς στο 5^ο κεφάλαιο, ο μηχανικός εξασφαλίζει τη μαθηματική βελτιστοποίηση των λύσεων που έχει εντοπίσει για την επίλυση των διαφόρων κατασκευαστικών ζητημάτων της περίπτωσης που μελετά. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, κατόπιν πολλών δοκιμών προκειμένου να ληφθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα αναφορικά με την περιστολή ή την εξάλειψη των κατασκευαστικών ατελειών του προϊόντος έγχυσης που μελετάται, οι παράμετροι σε κάθε ομάδα καθορίζονται ως εξής :

- Project Settings

Εδώ επιλέγεται αρχικά η μέθοδος σεταρίσματος της κατασκευαστικής διεργασίας βάσει της οποίας θα δομηθούν οι προσομοιώσεις των φάσεων πλήρωσης, συμπίεσης και ψύξης αλλά και της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης ώστε μετά την εκτέλεσή τους να προκύψουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Για πρακτικούς λόγους απορρίφθηκε το ενδεχόμενο οι παράμετροι της διεργασίας να αντιστοιχιστούν άμεσα με τις σχετικές ρυθμίσεις κάποιας πραγματικής μηχανής έγχυσης. Έτσι, δεδομένης της απόφασης που λήφθηκε οι εν λόγω παράμετροι να είναι απόρροια των δοθισών διαστάσεων, του δοθέντος όγκου και του επιλεχθέντος υλικού του προϊόντος έγχυσης, η μέθοδος σεταρίσματος που επιλέγεται είναι η **CAE mode**. Τέλος, οριοθετούνται οι μέγιστες πιέσεις έγχυσης και συμπίεσης (maximum injection/packing pressure) στα **162 MPa** έκαστη (**Σχήμα 4-25**).

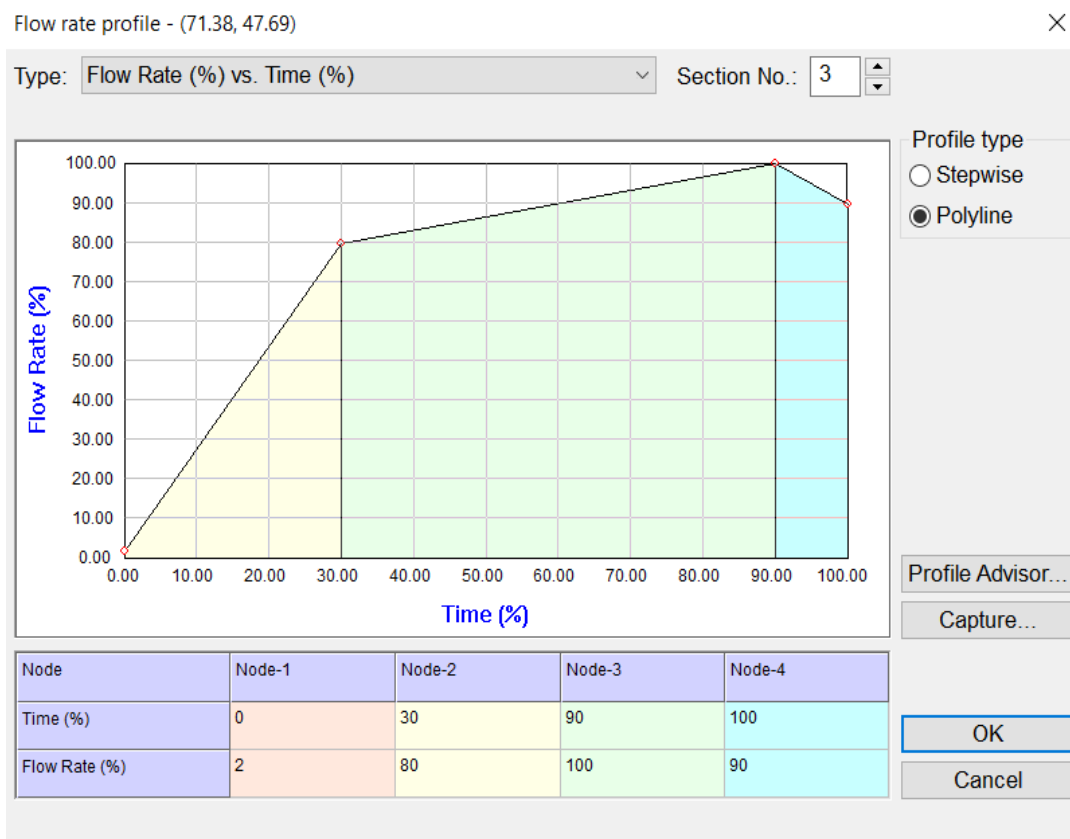


Σχήμα 4-25. Καθορισμός παραμέτρων της κατασκευαστικής διεργασίας στην καρτέλα **Project Settings**.

- **Filling/Packing Settings**

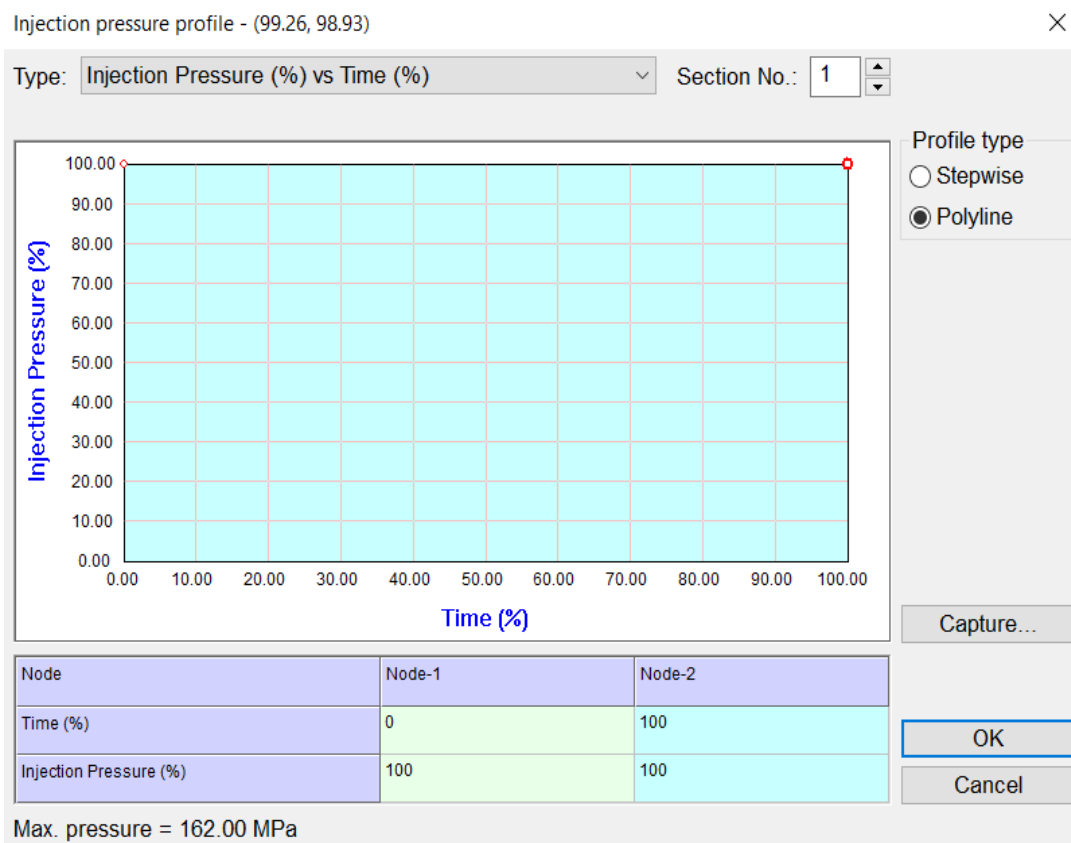
Εδώ προσδιορίζονται (**Σχήμα 4-29**) :

- ο χρόνος πλήρωσης (filling time) στα 4.5 sec : Πρόκειται για τον χρόνο που απαιτείται για να γεμίσει πλήρως η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές δομικό υλικό το οποίο ευρίσκεται σε ρευστή, «μη συμπιεστή» μορφή. Βάσει του χρόνου πλήρωσης και του συνολικού όγκου της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, ήτοι το άθροισμα των όγκων του παραγόμενου προϊόντος έγχυσης και της ψυχρής πύλης εισόδου τύπου sprue, μια συγκεκριμένη ογκομετρική ταχύτητα ροής προωθείται στον λύτη ροής του Moldex3D. Ωστόσο, ο υπολογισμένος χρόνος του μετώπου ροής (melt front time) που συμπίπτει με το πέρας της διαδικασίας πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα ενδέχεται να διαφέρει από τον αρχικώς ορισμένο χρόνο πλήρωσης εάν :
 - το χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό ευρίσκεται σε ρευστή, «συμπιεστή» μορφή. Και αυτό γιατί λόγω της υψηλής πίεσης του ακροφυσίου ενόσω διαρκεί η πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα αλλά και εξαιτίας της χαμηλής πίεσης του μετώπου ροής του τήγματος, η συμπιεστότητα του υλικού προκαλεί μεταβολή της πυκνότητας του τήγματος. Αυτό θα αυξήσει ελαφρώς τον χρόνο του μετώπου ροής στο τέλος της φάσης πλήρωσης.
 - η απαιτούμενη πίεση έγχυσης υπερβαίνει το προκαθορισμένο προφίλ. Εάν η απαιτούμενη πίεση έγχυσης υπερβεί το προκαθορισμένο προφίλ πίεσης, ο ρυθμός ροής μειώνεται αναλόγως. Ως αποτέλεσμα, ο χρόνος του μετώπου ροής στο τέλος της φάσης πλήρωσης θα είναι μεγαλύτερος.
 - το ποσοστό μετάβασης (VP switchover) είναι κάτω του 100 %. Ποσοστό μετάβασης που ανέρχεται στο **100 %** σημαίνει ότι δεν έχει τεθεί σε λειτουργία ο έλεγχος της ταχύτητας ροής του πολυμερούς τήγματος και τις πίεσης που ασκείται επ' αυτού. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν είναι ρεαλιστικό δεδομένου ότι η μηχανή έγχυσης χρειάζεται ένα μαξιλάρι ασφαλείας για να αποφευχθεί ο κίνδυνος πρόκλησης ζημιάς. Γι' αυτό η συνιστώμενη ρύθμιση του ποσοστού μετάβασης είναι περί το **98 %** παρά τη μικρή απόκλιση ανάμεσα στον αρχικά καθορισμένο χρόνο πλήρωσης και τον υπολογισμένο από το σύστημα χρόνο του μετώπου ροής στο τέλος της φάσης πλήρωσης.
- το προφίλ της ταχύτητας ροής (flow rate profile) : Χωρίζεται σε τρία τμήματα όπου η ταχύτητα ροής είτε αυξάνεται (επιτάχυνση) είτε μειώνεται (επιβράδυνση) ως προς το αντίστοιχο ποσοστό του χρόνου πλήρωσης των **4.5 sec** που ρυθμίστηκε προηγούμενα, ξεκινώντας από το **0** και φθάνοντας σταδιακά στο **100 %** (**Σχήμα 4-26**).



Σχήμα 4-26. Το προφίλ της ταχύτητας ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όπως καθορίζεται στο λογισμικό Moldex3D.

- ο το προφίλ της πίεσης έγχυσης (injection pressure profile) : Εφόσον η πίεση έγχυσης στα αποτελέσματα της προσομοίωσης της φάσης πλήρωσης δεν φτάνει στα όρια της αρχικά ορισμένης μέγιστης πίεσης έγχυσης για διάφορους λόγους (γεωμετρία προϊόντος έγχυσης ή/και γεωμετρία συστήματος διανομής του καλουπιού που επιφέρουν πτώση πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης), δεν παρίσταται η ανάγκη τροποποίησης του προφίλ της πίεσης έγχυσης από το **100 %** σε χαμηλότερα ποσοστά (**Σχήμα 4-27**).

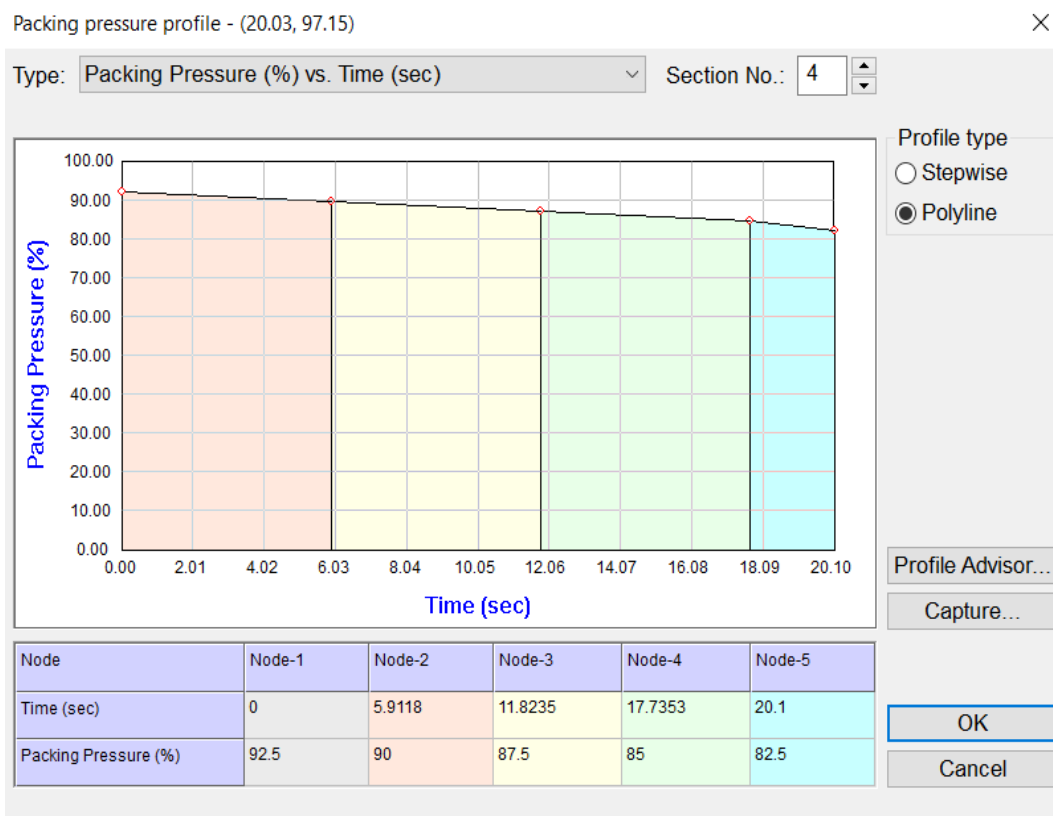


Σχήμα 4-27. Το προφίλ της ασκούμενης πίεσης επί του πολυμερούς τήγματος κατά την έγχυσή του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όπως καθορίζεται στο λογισμικό Moldex3D.

- ο το ποσοστό μετάβασης (VP Switchover) : Διασφαλίζει την ομαλή μετάβαση από την φάση της πλήρωσης στην φάση της συμπίεσης. Με άλλα λόγια, ομαλή μετάβαση σημαίνει ταυτόχρονος έλεγχος της ταχύτητας ροής και της πίεσης έγχυσης. Το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από το **0** έως το **100** % του όγκου πλήρωσης. Προφανώς, όσο μικρότερη είναι η τιμή που λαμβάνει, τόσο ανεπαρκέστερα πληρώνεται η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα, πράγμα το οποίο σημαίνει μη ολοκληρωμένη συμπίεση του τήγματος λόγω πτώσης πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης και, τελικά, εκδήλωση παραμόρφωσης στο τελικό προϊόν έγχυσης μετά την εξόλκευσή του. Εντούτοις, όταν η τιμή του εν λόγω ποσοστού μεγιστοποιείται, η ταχύτητα ροής του πολυμερούς τήγματος και η πίεση εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού ξεπερνούν τα μέγιστα επιτρεπτά όρια του χρησιμοποιούμενου τεχνικού εξοπλισμού για τη φάση της πλήρωσης. Τούτο οφείλεται στην αδράνεια του κοχλία που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής του σε υψηλές ταχύτητες. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, είναι σχεδόν βέβαιη η ανάπτυξη τάσεων στη ροή του τήγματος που αναπόδραστα θα οδηγήσουν στην αντιστροφή της ροής του τήγματος προς το σύστημα διανομής του καλουπιού με ό,τι αυτό συνεπάγεται για τη διαστατική ακρίβεια του τελικού προϊόντος (δημιουργία προεκτάματος, παραμόρφωση, ανεπιθύμητος προσανατολισμός μοριακών αλυσίδων, παραμένουσες τάσεις κλπ).

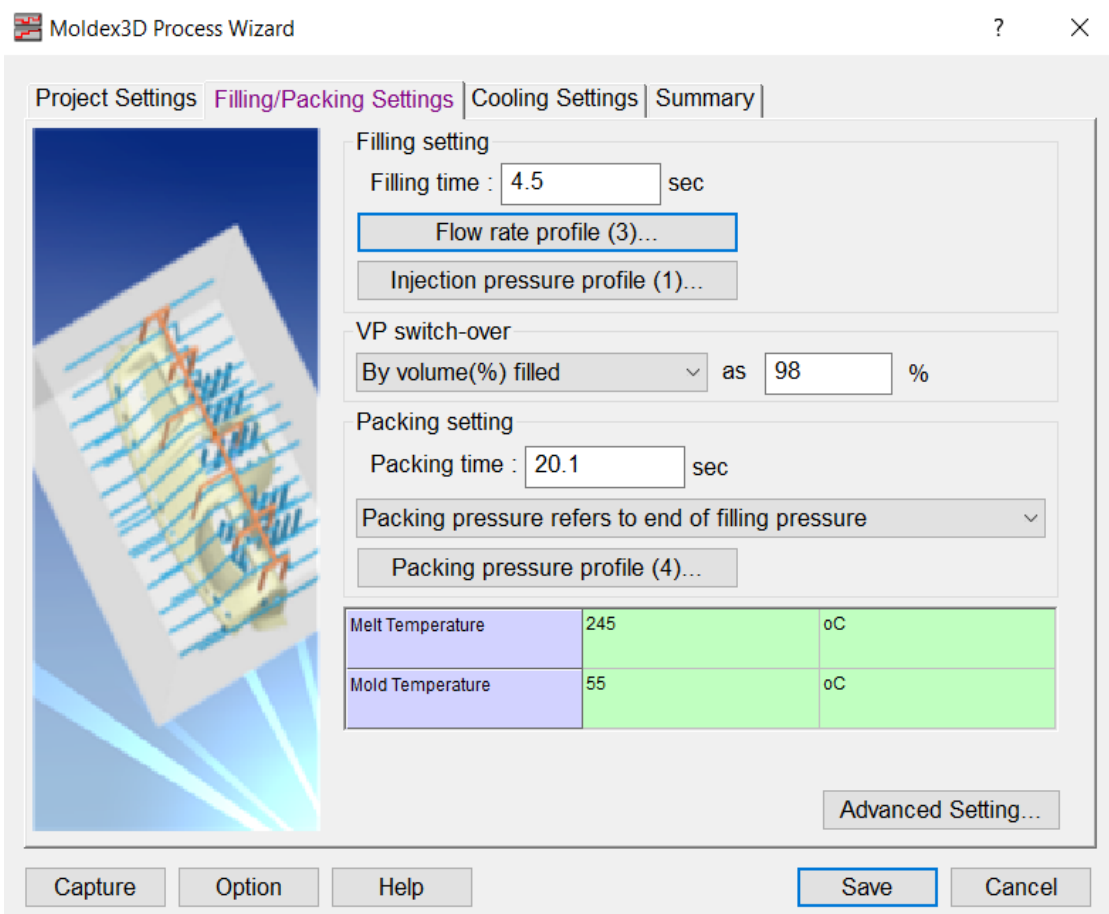
Για τον λόγο αυτό, η προεπιλεγμένη τιμή του συγκεκριμένου ποσοστού στο λογισμικό Moldex3D ανέρχεται στο **98 %**, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η μετάβαση γίνεται κατά τη διάρκεια της φάσης πλήρωσης και λίγο πριν την περαίωσή της.

- ο χρόνος συμπίεσης (packing time) στα **20.1 sec** : Καθορίζει τη διάρκεια της φάσης της συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.
- η αναφορά της πίεσης συμπίεσης (packing pressure reference) : Καθορίζει την αναφορά της πίεσης συμπίεσης είτε ως προς το τέλος της πίεσης πλήρωσης (filling pressure) είτε ως προς την πίεση της μηχανής έγχυσης. Δεδομένου ότι αποφασίστηκε για πρακτικούς λόγους οι παράμετροι της διεργασίας να μην αντιστοιχίζονται άμεσα με τις σχετικές ρυθμίσεις κάποιας πραγματικής μηχανής έγχυσης, η πίεση συμπίεσης έχει ως αναφορά το τέλος της πίεσης πλήρωσης.
- το προφίλ της πίεσης συμπίεσης (packing pressure profile) : Η αποδοτικότερη πίεση συμπίεσης ξεκινά συνήθως από το **80 %** της πίεσης που έχει αναπτυχθεί στο τέλος της φάσης πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα (End Of Filling stage – EOF) και μπορεί να φτάσει έως και το **100 %** αυτής. Με αυτό το δεδομένο, το προφίλ της πίεσης συμπίεσης χωρίζεται σε τέσσερα επιμέρους τμήματα όπου η πίεση συμπίεσης μειώνεται σταδιακά από το **92.5 %** της πίεσης έγχυσης τη χρονική στιγμή $t_0 = 0 \text{ sec}$ έως το **82.5 %** αυτής τη χρονική στιγμή $t_4 = 20.1 \text{ sec}$ (**Σχήμα 4-28**).



Σχήμα 4-28. Το προφίλ της ασκούμενης πίεσης επί του πολυμερούς τήγματος κατά την συμπίεσή του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όπως καθορίζεται στο λογισμικό Moldex3D.

- η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) στους 245 °C : Πρόκειται για την θερμοκρασία που έχει το πολυμερές τήγμα όταν αυτό εισέρχεται αρχικά στο 3D πλέγμα του συστήματος διανομής και έπειτα στο 3D πλέγμα της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (3D πλέγμα μοντέλου προϊόντος έγχυσης). Επί του πρακτέου, διαφέρει από τη θερμοκρασία του τήγματος εντός του κυλίνδρου πλαστικοποίησης (barrel temperature) και συγκεκριμένα από τη θερμοκρασία στο ακροφύσιο, καθώς η εν λόγω θερμοκρασία πιθανόν να αυξηθεί λόγω της ιξώδους θέρμανσης (viscous heating).
- η θερμοκρασία της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature) στους 55 °C : Εφαρμόζεται στην κατάσταση οριακής θερμοκρασίας μεταξύ της καλουπιέρας και του μορφοποιημένου αντικειμένου υποθέτοντας ότι η κατανομή της οριακής θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη. Σε κάθε περίπτωση, η θερμοκρασία του καλουπιού θα πρέπει να είναι υψηλότερη από τη χαμηλότερη θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού. Αλλιώς, θα εμφανιστεί ένα προειδοποιητικό μήνυμα για έλεγχο της ρύθμισης. Εφόσον, βέβαια, έχει προηγηθεί προσομοίωση της φάσης ψύξης στην αρχή του κύκλου έγχυσης, η θερμοκρασία καλουπιού από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της φάσης ψύξης θα χρησιμοποιηθεί ως θερμοκρασία καλουπιού στους επόμενους υπολογισμούς. Σημειωτέον ότι η θερμοκρασία του καλουπιού γενικά κατανέμεται μη ομοιόμορφα.



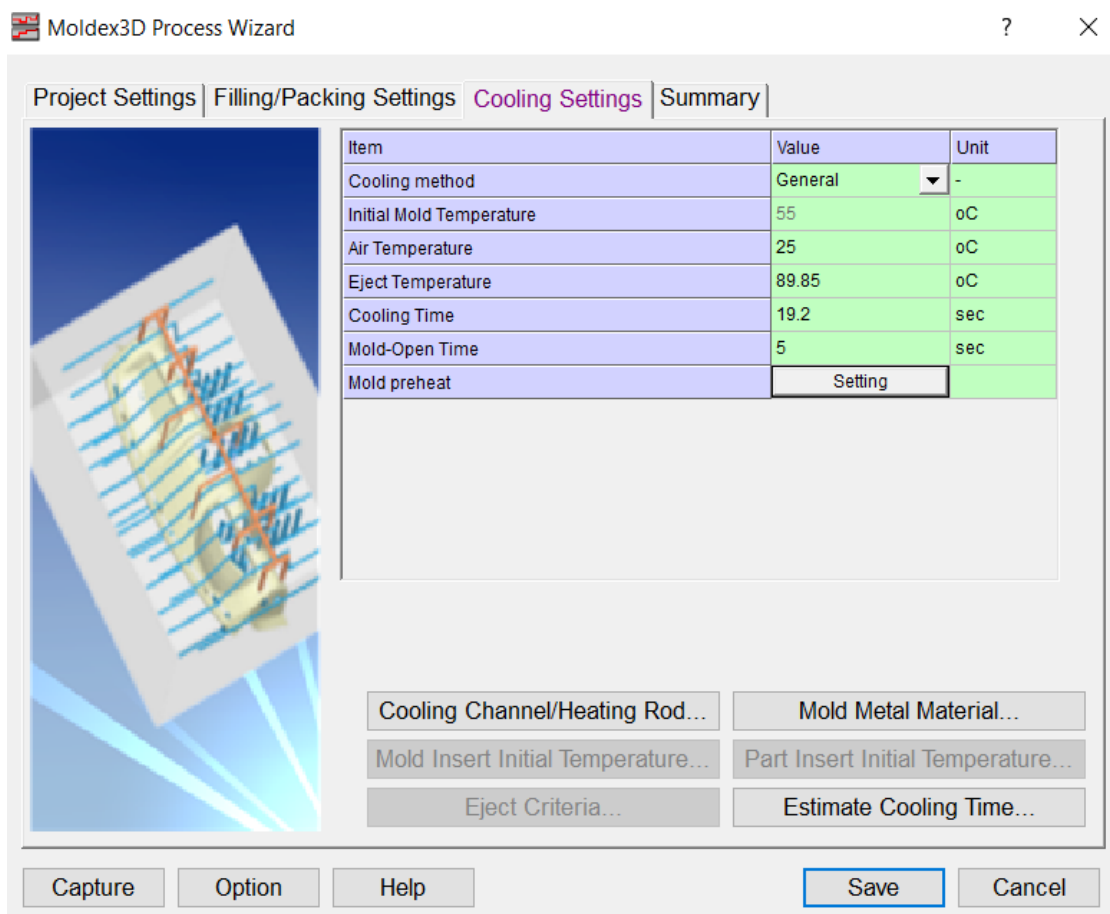
Σχήμα 4-29. Καθορισμός παραμέτρων στην καρτέλα **Filling/Packing Settings**.

- Cooling Settings

Εδώ προσδιορίζονται (**Σχήμα 4-30**) :

- η μέθοδος ψύξης (cooling method) : Στο λογισμικό Moldex3D υπάρχουν δύο τύποι προσομοίωσης της φάσης ψύξης. Αφενός, η *μέθοδος μέσου κύκλου (cycle average method)* η οποία υπολογίζει τη μέση θερμοκρασία καλουπιού (mold temperature) κατά τη διάρκεια ενός κύκλου έγχυσης παρέχοντας, έτσι, στον μηχανικό μια απλοποιημένη επιλογή ρύθμισης ψύξης. Αφετέρου, η *μεταβατική μέθοδος (transient method)* η οποία προσομοιώνει τις μεταβολές της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο σε έναν κύκλο έγχυσης ενεργοποιώντας πολλαπλά σημεία ελέγχου. Κατ' αυτόν τον τρόπο παρέχει στον μηχανικό μια σύνθετη επιλογή ρύθμισης ψύξης η οποία ναι μεν δίνει αποτελέσματα ψύξης μεγαλύτερης ακρίβειας, αλλά αυξάνει τον υπολογιστικό φόρτο του συστήματος. Επί του παρόντος, για λόγους απλοστευσης της διαδικασίας και επίστευσης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της φάσης ψύξης και δεδομένης της μικρής διακύμανσης της θερμοκρασίας καλουπιού, επιλέγεται η πρώτη μέθοδος ψύξης (**General**). Συνεπώς, γίνεται η παραδοχή ότι η θερμοκρασία κάθε καναλιού ψύξης και η ογκομετρική ταχύτητα ροής είναι αμετάβλητες.
- η αρχική θερμοκρασία καλουπιού (initial mold temperature) στους 55 °C : Η αρχική θερμοκρασία καλουπιού είναι η εφαρμοζόμενη ολική θερμοκρασία του καλουπιού. Η παραδοχή που γίνεται είναι ότι η αρχική συνολική θερμοκρασία του καλουπιού είναι ομοιόμορφη. Ωστόσο, εάν ο μηχανικός προσδιορίσει την ανάλυση μεταβατικής ψύξης (transient cooling analysis), η θερμοκρασία καλουπιού που υπολογίζεται από την ανάλυση μεταβατικής ψύξης θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως θερμοκρασία καλουπιού. Ως εκ τούτου, είναι γενικά μη ομοιόμορφη.
- η θερμοκρασία δωματίου (air temperature) στους 25 °C : Η θερμοκρασία δωματίου είναι επίσης η τελική θερμοκρασία του εξολκευμένου προϊόντος έγχυσης και επηρεάζει το αποτέλεσμα της στρέβλωσης αυτού.
- η θερμοκρασία εξόλκευσης (eject temperature) στους 89.85 °C : Η τιμή της θερμοκρασίας εξόλκευσης καθορίζεται ως κριτήριο για την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου ψύξης. Αυτή η τιμή πρέπει να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία καλουπιού (mold temperature).
- ο χρόνος ψύξης του καλουπιού (cooling time) στα 19.2 sec : Η τιμή του χρόνου ψύξης του καλουπιού μπορεί επίσης να εκτιμηθεί με τη χρήση της σύνθετης λειτουργίας **Estimate Cooling Time**.
- ο χρόνος ανοίγματος του καλουπιού (mold-open time) στα 5 sec.
- η προθέρμανση του καλουπιού (mold preheat) : Είναι διαθέσιμη όταν το μοντέλο περιέχει κανάλια ψύξης ή θερμαντικές ράβδους. Προκειμένου να επιτευχθεί μια πιο σταθερή θερμοκρασία καλουπιού (mold temperature), η προθέρμανση του καλουπιού είναι μια κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση της κοιλότητας μορφοποίησης πριν αρχίσει ένας κύκλος έγχυσης. Κατά την έγχυση, η θερμοκρασία του καλουπιού είναι μια κρίσιμη παράμετρος δεδομένου ότι επηρεάζει τη συμπεριφορά ροής του πολυμερούς τήγματος και, κατ' επέκταση, την ποιότητα του τελικού προϊόντος έγχυσης. Σίγουρα χρειάζεται ένα ορισμένο χρονικό διάστημα για να επιτευχθεί σταθερή θερμοκρασία καλουπιού, οπότε η πρόβλεψη για τον χρόνο προθέρμανσης του καλουπιού είναι ένας κρίσιμος παράγοντας επειδή θα επηρεάσει την ποιότητα του τελικού προϊόντος έγχυσης.

Ασφαλώς, η προσομοίωση της προθέρμανσης του καλουπιού στο λογισμικό Moldex3D μπορεί να βοηθήσει τον μηχανικό να εκτιμήσει τον χρόνο προθέρμανσης και να κατανοήσει το ιστορικό της προθέρμανσης του καλουπιού. Επί του παρόντος, η προθέρμανση δεν επιλέγεται καθώς μετά από πολλές δοκιμές δεν προέκυψε μεγάλη διακύμανση στη θερμοκρασία καλουπιού.



Σχήμα 4-30. Καθορισμός παραμέτρων στην καρτέλα **Cooling Settings**.

Επιπρόσθετα, στην καρτέλα “**Cooling Channel/Heating Rod**” μπορεί να οριστεί για κάθε κανάλι ψύξης η θερμοκρασία, η ταχύτητα ροής, η πίεση και το είδος του ψυκτικού μέσου, ενώ ο αντίστοιχος αριθμός Reynolds υπολογίζεται αυτόματα (**Σχήμα 4-31**).

Channel ID	T (oC)	Q (cm ³ /sec)	Coolant	D (mm)	Re
EC1 (Group 3)	55	120	Water	14	21369.1
EC2 (Group 4)	55	120	Water	14	21369.1
EC3 (Group 1)	55	120	Water	14	21369.1
EC4 (Group 2)	55	120	Water	14	21369.1

Cooling channel

Setting :

Channel ID	T (oC)	P (Bar)	Coolant	D (mm)
EC1 (Group 3)	55	5	Water	14
EC2 (Group 4)	55	5	Water	14
EC3 (Group 1)	55	5	Water	14
EC4 (Group 2)	55	5	Water	14

Σχήμα 4-31. Καθορισμός παραμέτρων στην καρτέλα **Cooling Channel/Heating Rod**.

- Summary

Εδώ παρατίθενται συνοπτικά οι τιμές που έχουν εκχωρηθεί προηγουμένως σε κάθε παράμετρο της κατασκευαστικής διεργασίας. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η τροποποίηση κάποιας εκ των παραμέτρων, ο μηχανικός ανατρέχει πίσω στην ομάδα όπου βρίσκεται η συγκεκριμένη παράμετρος για να πραγματοποιήσει την επιθυμητή τροποποίηση στην τιμή της. Πατώντας την επιλογή **Save** (Σχήμα 4-32), η παραμετροποιημένη κατασκευαστική διεργασία αποθηκεύεται.

Moldex3D Process Wizard

? X

Project Settings | Filling/Packing Settings | Cooling Settings | **Summary**

[Filling]	
Filling time (sec)	4.5
Melt Temperature (oC)	245
Mold Temperature (oC)	55
Maximum injection pressure (MPa)	162
Injection volume (cm ³)	1197.4
[Packing]	
Packing time (sec)	20.1
Maximum packing pressure (MPa)	162
[Cooling]	
Cooling Time (sec)	19.2
Mold-Open Time (sec)	5
Eject Temperature (oC)	89.85
Air Temperature (oC)	25
[Miscellaneous]	
Cycle time (sec)	48.8
Mesh file	1_sprue_gate_disk_3mm(m).mfe
Material file	HIPS_EDISTIRSR550_1.mtr

Capture Option Help Save Cancel

Σχήμα 4-32. Συνοπτική παράθεση της παραμετροποίησης της κατασκευαστικής διεργασίας.

4.3.2.2 Παραμετροποίηση της Υπολογιστικής Διαδικασίας

Εφόσον έχει παραμετροποιηθεί επιτυχώς η κατασκευαστική διεργασία, ακολουθεί η παραμετροποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας. Χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Computation Parameter** στο λογισμικό Moldex3D μπορούν να ρυθμιστούν μια σειρά πρόσθετων παραμέτρων αναφορικά με τη διαδικασία υπολογισμού των φάσεων ενός πλήρους κύκλου έγχυσης και της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης μετά την εξόλκευσή του από το καλούπι.

Αναλόγως της φάσης του κύκλου έγχυσης, μπορούν να ρυθμιστούν κατάλληλα οι αντίστοιχες παράμετροι υπολογισμού. Συγκεκριμένα :

- για τον υπολογισμό των φάσεων πλήρωσης και συμπίεσης (**Flow / Pack**) ρυθμίζονται οι κάτωθι παράμετροι ως εξής (**Σχήμα 4-33**) :

Αρχικά επιλέγεται ο **Viscoelastic - F** ως λύτης. Ο συγκεκριμένος λύτης ενδείκνυται για την προσομοίωση της ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού στην περίπτωση που απαιτείται η μελέτη της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς, κυρίως όταν υπάρχει διασταύρωση δύο μετώπων ροής. Τέτοια περίπτωση που η μελέτη της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς είναι απαραίτητη αποτελεί η ανερεύνηση τυχόν φαινομένων πίδακα (jetting) στο τελικό προϊόν έγχυσης.

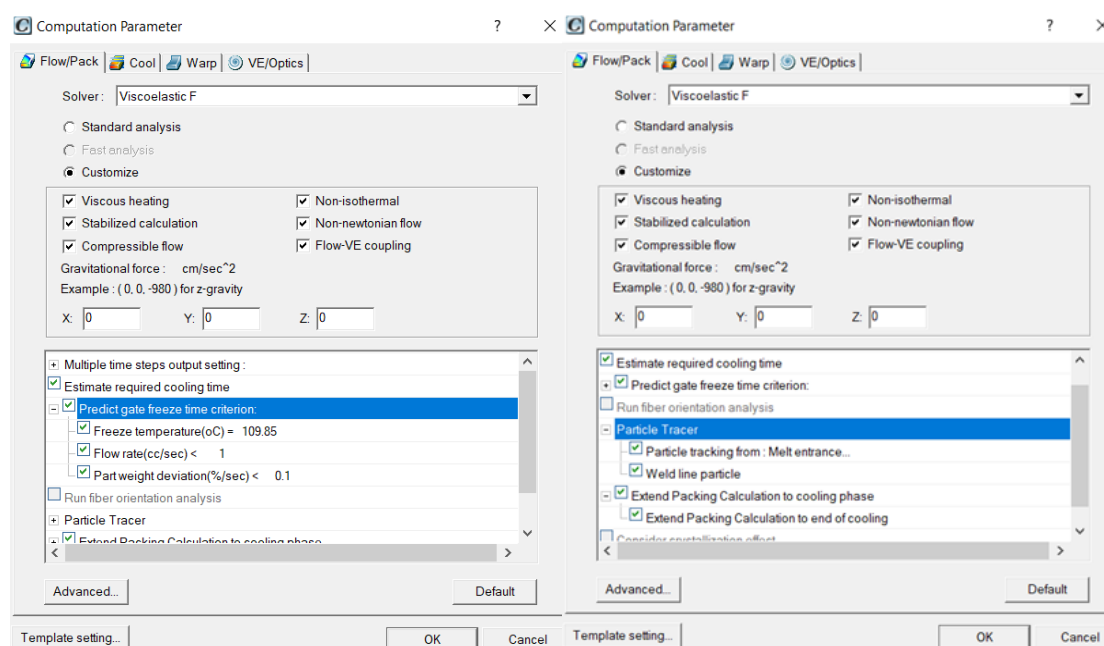
Ακολούθως, προσαρμόζεται το είδος της ανάλυσης στις απαιτήσεις της παρούσας μελέτης. Επομένως, τηρουμένων των θεωρήσεων που γίνονται ενεργοποιούνται :

- ✓ η ιξώδης θέρμανση (Viscous heating) προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η επίδρασή της στη θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature),
- ✓ ο σταθεροποιημένος υπολογισμός (Stabilized calculation) προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν αποκλίσεις στους υπολογισμούς και να διασφαλιστεί η ομαλή επιβράδυνση αυτών,
- ✓ η συμπιεστή ροή (Compressible flow) προκειμένου να συνυπολογιστεί η μεταβλητότητα στην πυκνότητα του πολυμερούς τήγματος που πηγάζει από την ασκούμενη πίεση επ' αυτού,
- ✓ η μη ισοθερμική ροή (Non-isothermal) προκειμένου να ληφθούν υπόψιν οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού και οι επιδράσεις αυτών στις ιδιότητες ροής του τήγματος,
- ✓ η μη νευτωνική ροή (Non-newtonian flow) προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η μεταβλητότητα του ιξώδους ανάλογα με τον διαφορετικό ρυθμό διάτμησης της ροής και
- ✓ η ροή ζεύγους VE (Flow VE coupling) προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η επίδραση της ιξωδοελαστικότητας στη συμπεριφορά της ροής του πολυμερούς τήγματος.

Επίσης, ενεργοποιείται η παράμετρος "**Particle Tracer**" (επιλογές "**Particle tracking from Melt entrance**" και "**Weld line particle**") προκειμένου να επιτραπεί στα σωματίδια του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού να σχεδιάσουν τη διαδρομή του τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού σε διαφορετικά χρονικά σημεία. Επεξηγηματικά, πρόκειται για μία επιπλέον δυνατότητα που διαθέτει το λογισμικό Moldex3D· με την ενεργοποίησή της εξάγονται κάποια πρόσθετα αποτελέσματα στις αναλύσεις των φάσεων πλήρωσης και συμπίεσης που με την ερμηνεία τους είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι παράγοντες που συμβάλλουν σε διάφορα κατασκευαστικά ζητήματα.

Ακόμη, ενεργοποιείται η παράμετρος “**Extend Packing Calculation to cooling phase**” ώστε ο υπολογισμός της συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού να συνεχιστεί και μετά την ολοκλήρωση της φάσης συμπίεσης (End Of Packing stage – EOP) και συγκεκριμένα μέχρις ότου η μέση θερμοκρασία (average temperature) εντός της κοιλότητας μορφοποίησης προσεγγίσει τη θερμοκρασία εξόλκευσης (eject temperature). Ειδικότερα δε ενεργοποιείται και η παράμετρος “**Extend Packing Calculation to end of cooling**” ώστε ο υπολογισμός της συμπίεσης να επεκταθεί έως το τέλος της φάσης ψύξης (End Of Cooling stage – EOC). Σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι, σε κάθε περίπτωση, η ενεργοποίηση της παραμέτρου “**Extend Packing Calculation to cooling phase**” σημαίνει ότι υπολογίζεται η μεταφορά μάζας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης κατά τη διάρκεια της φάσης ψύξης, γεγονός το οποίο παρέχει καλύτερες αρχικές συνθήκες για τη μελέτη της στρέβλωσης που ακολουθεί.

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι η επιλογή **Run fiber orientation analysis** είναι διαθέσιμη προς ενεργοποίηση μόνο όταν χρησιμοποιείται ένα fiber-filled πολυμερές δομικό υλικό (ινώδες πολυμερές του οποίου οι ίνες διατάσσονται κατά την έγχυση του υλικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με τέτοιο τρόπο ώστε ο προσανατολισμός τους να είναι συγκεκριμένος), ενώ η επιλογή **Consider crystallization effect** μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο όταν το χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό έχει κρυσταλλική ιδιότητα.

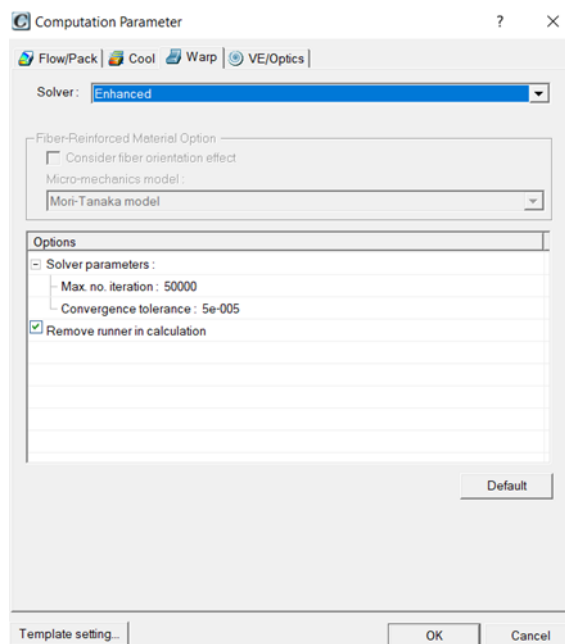


Σχήμα 4-33. Καθορισμός παραμέτρων στην καρτέλα **Flow / Pack Settings**.

- για τον υπολογισμό της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης (**Warp**) επιλέγεται ο **Enhanced** λύτης αντί του **Standard** (Σχήμα 4-35). Και αυτό γιατί ο πρώτος λύτης πλεονεκτεί έναντι του δεύτερου, προπαντός εάν πρόκειται για ιδιάζουσα περίπτωση εξαρτήματος (π.χ. προϊόν έγχυσης με τοιχώματα πολύ μικρού πάχους), αναφορικά με την ακριβή πρόβλεψη :

- ✓ της τάσης της παραμόρφωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης,
- ✓ του ρυθμού συρρίκνωσής του και

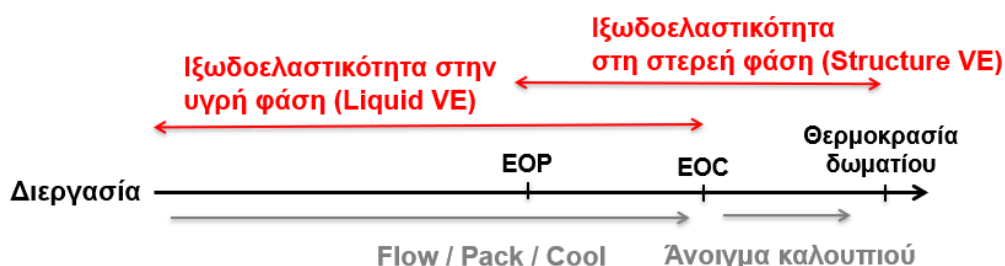
- ✓ των παραμενουσών τάσεων στο εσωτερικό του μετά την απομάκρυνσή του από το καλούπι.



Σχήμα 4-35. Επιλογή του **Enhanced** λύτη για τον υπολογισμό της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης στην καρτέλα **Warp Settings**.

Ακριβέστερα, ο **Enhanced** λύτης απαιτεί το εισαχθέν αρχείο του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού στην εκτέλεση της ανάλυσης της στρέβλωσης να περιέχει πληροφορίες αναφορικά με την ιξωδοελαστικότητα του πολυμερούς στην υγρή αλλά και την στερεή φάση του (Viscoelasticity – VE Liquid/Structure) προκειμένου να είναι σε θέση να ενισχύσει την ακρίβεια της προσομοίωσης της στρέβλωσης στο λογισμικό Moldex3D έπειτα από σύζευξη των ακόλουθων φυσικών φαινομένων :

- Ιξωδοελαστικότητα πολυμερούς στην υγρή και τη στερεή φάση (VE Liquid/Structure) : Εξαιτίας της δραματικής παραμόρφωσης του πολυμερούς ενόσω διαρκεί η φάση της ψύξης του τήγματος από υγρό σε ελαστικό και έπειτα σε στερεό, η ιξωδοελαστικότητα του πολυμερούς σε κάθε φάση του, υγρή ή στερεή (**Σχήμα 4-36**), βοηθά στην πρόβλεψη του συντελεστή του υλικού (modulus) συναρτήσει του χρόνου και της θερμοκρασίας, με την πιο περιεκτική εκτίμησή του να γίνεται από τον συνδυασμό των στοιχείων Maxwell ως παράλληλα ελατήρια (γενικευμένο μοντέλο Maxwell).



Σχήμα 4-36. Ιξωδοελαστικότητα πολυμερούς στην υγρή και την στερεή φάση του και αλληλοσυσχέτιση των φάσεων ως προς την ιξωδοελαστικότητα.

- Διακύμανση της θερμοκρασίας μετάβασης (transient temperature variation) : Λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς που εξαρτάται από το ιστορικό των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων, το μεταβατικό αποτέλεσμα ψύξης μπορεί να συνεισφέρει στην καλύτερη πρόβλεψη της μεταβολής της ιξωδοελαστικότητας του πολυμερούς.
- Επίδραση των περιορισμών εντός του καλουπιού (In-mold Constraint – IMC effect) : Προτού λάβει χώρα η εξόγκωσή του από το καλούπι, το προϊόν έγχυσης έχει ήδη παραμορφωθεί εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Ωστόσο, το προϊόν δεν μπορεί να παραμορφωθεί ελεύθερα στο καλούπι καθόσον ενυπάρχουν περιοριστικές επαφές μεταξύ του άκαμπτου καλουπιού (κοιλότητα και πυρήνας) και του πλαστικού εξαρτήματος. Έτσι, ο λύτης υποθέτει ότι υπάρχει μια διεπαφή επαφής μεταξύ της επιφάνειας του εξαρτήματος και των τοιχωμάτων της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού για την προσομοίωση της συμπεριφοράς αλληλεπίδρασης επαφής. Αυτή η συμπεριφορά προκαλεί επίσης μερική υπολειμματική τάση στο εσωτερικό του προϊόντος έγχυσης. Η δε εκτόπιση πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια που το πολυμερές εξακολουθεί να βρίσκεται εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, ήτοι μια περίοδος από τη λήξη της φάσης πλήρωσης/συμπίεσης (End Of Filling stage – EOF / End Of Packing stage – EOP) έως τη λήξη της φάσης ψύξης (End Of Cooling stage – EOC).

4.3.3 Μετα-επεξεργασία

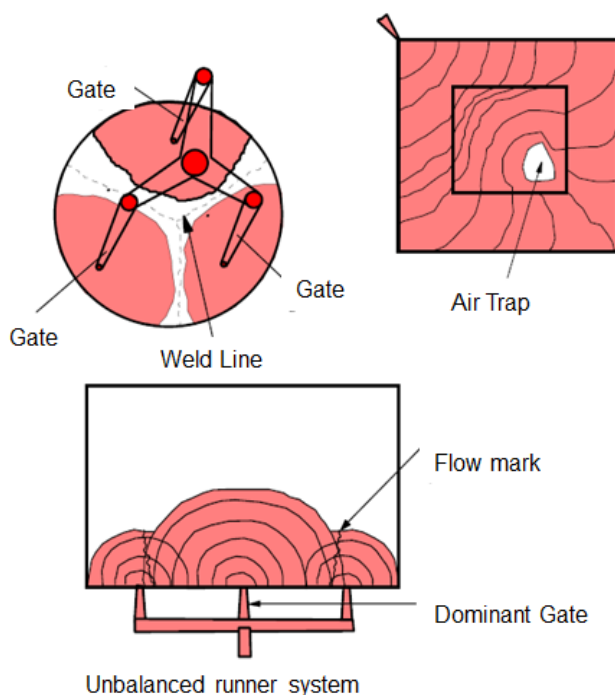
4.3.3.1 Τα Πρωτογενή Αποτελέσματα της Προσομοίωσης της Φάσης Πλήρωσης στο Λογισμικό Moldex3D

Μερικά από τα σημαντικά προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία της έγχυσης σχετίζονται με την φάση της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα (filling stage). Κοινά παραδείγματα τέτοιων προβλημάτων αποτελούν :

- η ελλιπής πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης (short shot),
- οι γραμμές συγκόλλησης (weld lines),
- οι περιοχές όπου εγκλωβίζονται φυσαλίδες αέρος (air-traps),
- ο ισοσκελισμός των αγωγών διανομής (runners) του συστήματος διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στο καλούπι (runner system),
- η εξισορρόπηση της ροής (flow balance),
- η καύση της εξωτερικής επιφάνειας του παραγόμενου αντικειμένου (burn marks) και
- ο σχεδιασμός των πυλών εισόδου.

Προσομοιώνοντας τη φάση της πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D, ο μηχανικός είναι σε θέση να οπτικοποιεί την πρόοδο του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος (melt front) και να παρατηρεί ή να προβλέπει ελλιπείς πληρώσεις της κοιλότητας μορφοποίησης ενός καλουπιού (short shots). Επιπρόσθετα, έχοντας τη δυνατότητα θέασης των μοτίβων πλήρωσης (filling patterns), οι τυχόν γραμμές συγκόλλησης (weld lines) και οι θέσεις όπου ενδεχομένως παγιδεύονται φυσαλίδες αέρος στο τελικό προϊόν (air-traps) μπορούν να προβλεφθούν και σε επόμενη προσομοίωση να απαλειφθούν, αφού προηγηθούν οι δέουσες διορθωτικές ενέργειες. Τέτοιες ενέργειες αποτελούν η κατάλληλη παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας ή/και ο βέλτιστος επανασχεδιασμός του προϊόντος έγχυσης αλλά και των επιμέρους στοιχείων του καλουπιού αυτού.

Πράγματι, μέσω της προσομοίωσης της φάσης της πλήρωσης είναι δυνατή η επιθεώρηση του σχεδιασμού τόσο των δρομέων (runners) όσο και των πυλών εισόδου (gates). Ειδικότερα δε στις περιπτώσεις πολλαπλών πυλών εισόδου, η εξισορρόπηση της ροής έχει σημαντική επίδραση στο μοτίβο ροής και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Για παράδειγμα, όπως ιχνογραφείται στο **Σχήμα 4-37**, το μη ισοσκελισμένο σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στο καλούπι (runner system) θα μπορούσε να επιφέρει μια σειρά προβληματικών καταστάσεων, όπως ο σχηματισμός σημαδιών ροής (flow marks) ή γραμμών συγκόλλησης (weld lines) και η παγίδευση φυσαλίδων αέρος (air-traps).



Σχήμα 4-37. Μη ισοσκελισμένο σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού που επιφέρει μια σειρά προβληματικών καταστάσεων όπως είναι ο σχηματισμός σημαδιών ροής (flow marks) ή γραμμών συγκόλλησης (weld lines) και η παγίδευση φυσαλίδων αέρος (air-traps).

Επί του παρόντος, με την προσομοίωση της φάσης της πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D, ο μηχανικός είναι ικανός να προβεί σε πλήρη γνωμάτευση της περίπτωσης που μελετά λαμβάνοντας υπόψιν και αξιολογώντας κατάλληλα όλα τα χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να συναχθούν από τα κάτωθι αποτελέσματα :

❖ **Melt Front Time**

Απεικονίζει την εκάστοτε θέση του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με υλικό. Σημειώνεται ότι ο εμφανιζόμενος χρόνος του μετώπου ροής (filling melt front time) είναι ο χρόνος πλήρωσης (filling time) όπως ακριβώς έχει υπολογιστεί στην προσομοίωση βάσει του σχετικού καθορισμού που έχει πραγματοποιηθεί κατά την παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας.

Σε γενικές γραμμές, ένα βελτιστοποιημένο αποτέλεσμα σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να δείχνει ισομερή συνεισφορά ροής από κάθε πύλη εισόδου, ενώ όλα τα μονοπάτια ροής θα πρέπει να καταλήγουν στα τοιχώματα της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού κατά τον ίδιο χρόνο. Σαφέστατα, πρόκειται για το πιο ωφέλιμο

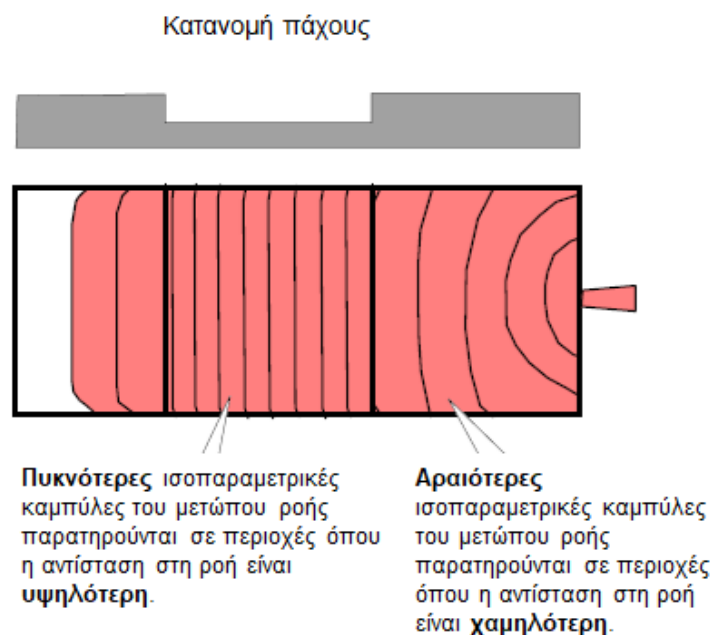
αποτέλεσμα που προκύπτει από την προσομοίωση της έγχυσης υλικού σε καλούπια διά της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων καθώς από αυτό μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για πιθανά προβλήματα όπως :

- οι γραμμές συγκόλλησης (*weld lines*), ψάχνοντας για περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου όπου δύο μέτωπα ροής συνενώνονται,
- η ελλιπής πλήρωση (*short shot*), αναζητώντας περιοχές στο μορφοποιημένο αντικείμενο που δεν έχουν γεμίσει πλήρως με πολυμερές δομικό υλικό (για πιο στοχευμένες σχετικές πληροφορίες μπορεί κανείς να ελέγξει και το αρχείο καταγραφής των δεδομένων υπολογισμού της φάσης πλήρωσης, δηλαδή το log file του συστήματος),
- η επιβράδυνση ή η παύση ροής (*flow hesitation*), ψάχνοντας για περιοχές του μορφοποιούμενου αντικειμένου όπου παρατηρείται αργή κίνηση του πολυμερούς τήγματος,
- η υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος (*overpacking*), αναζητώντας τα μονοπάτια ροής με τον συντομότερο χρόνο πλήρωσης,
- το φαινόμενο γρήγορης ροής (*racetrack effect*), ελέγχοντας εάν υπάρχουν δύο παρακείμενα μέτωπα ροής του πολυμερούς τήγματος εκ των οποίων το ένα ταξιδεύει με πολύ διαφορετική ταχύτητα απ' ό,τι το άλλο,
- η μη εξισορροπημένη ροή (*unbalanced flow*) του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού στην περίπτωση που υπάρχουν πολλαπλές πύλες εισόδου και δεν συνεισφέρουν όλες ισομερώς στην κατανομή του τήγματος και
- το «σπάσιμο» του μετώπου ροής σε επιμέρους μέτωπα και η διερεύνηση του μοτίβου ροής του τήγματος συνολικά (*filling pattern*), δηλαδή του τρόπου κατά τον οποίο το πολυμερές τήγμα ρέει εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

Σε ό,τι αφορά το μοτίβο ροής του τήγματος, η απαρχή της ανερεύνησής του γίνεται μόλις το τήγμα εισέρχεται στην κοιλότητα μορφοποίησης διαμέσου των πυλών εισόδου. Συγκεκριμένα, προκειμένου να ωθηθεί στην κοιλότητα ξεπερνώντας την αντίσταση της ροής, μεταφέρει τη μέγιστη πίεση έγχυσης πέριξ των πυλών εισόδου. Συνεπώς, στα αποτελέσματα της ανάλυσης της πίεσης πλήρωσης (*filling pressure*) θα πρέπει να παρατηρείται η υψηλότερη πίεση γύρω από την περιοχή της τροφοδοσίας. Ενώ το πολυμερές τήγμα ρέει προς την κοιλότητα μορφοποίησης, η πίεσή του ελαττώνεται εξαιτίας των τριβών που αναπτύσσονται. Αυτό σημαίνει ότι το μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος μεταφέρει τη χαμηλότερη πίεση. Ουσιαστικά, αυτές οι διαφορές πίεσης μεταξύ του μετώπου ροής και της περιοχής της τροφοδοσίας ωθούν το πολυμερές τήγμα να γεμίσει την κοιλότητα μορφοποίησης.

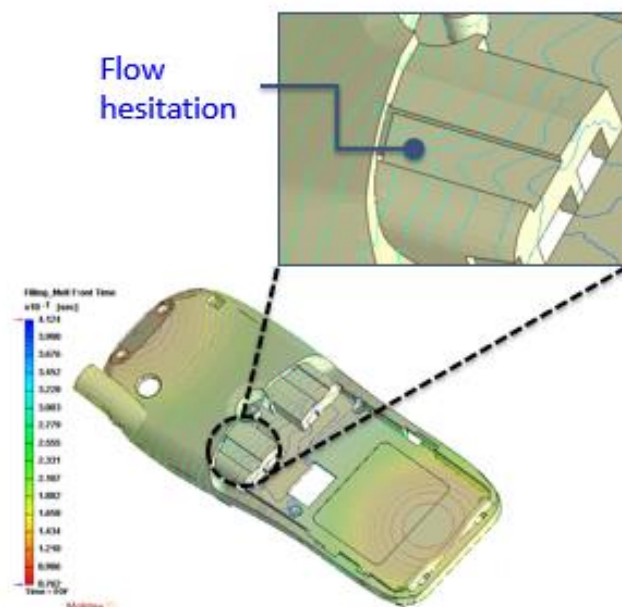
Στην περίπτωση δε που η κατανομή του πάχους των τοιχωμάτων του μορφοποιούμενου αντικειμένου είναι ανομοιόμορφη, όπως ιχνογραφείται και στο **Σχήμα 4-38**, το μοτίβο ροής του τήγματος μπορεί να διερευνηθεί με τη βοήθεια των ισοπαραμετρικών καμπυλών (*iso-curves*). Για του λόγου το αληθές, οι αραιότερες ισοπαραμετρικές καμπύλες του μετώπου ροής παρατηρούνται όταν το πολυμερές τήγμα διανύει μεγαλύτερη απόσταση και με μεγαλύτερη ταχύτητα διερχόμενο από τα παχύτερα τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης όπου η προβαλλόμενη αντίσταση στη ροή είναι χαμηλότερη. Στον αντίποδα, οι πυκνότερες ισοπαραμετρικές καμπύλες του μετώπου ροής παρατηρούνται όταν το πολυμερές τήγμα συναντά τα λεπτότερα τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης όπου η προβαλλόμενη αντίσταση στη ροή

είναι σαφώς υψηλότερη, με αποτέλεσμα αυτό να ρέει πιο αργά διανύοντας παράλληλα μικρότερη απόσταση.

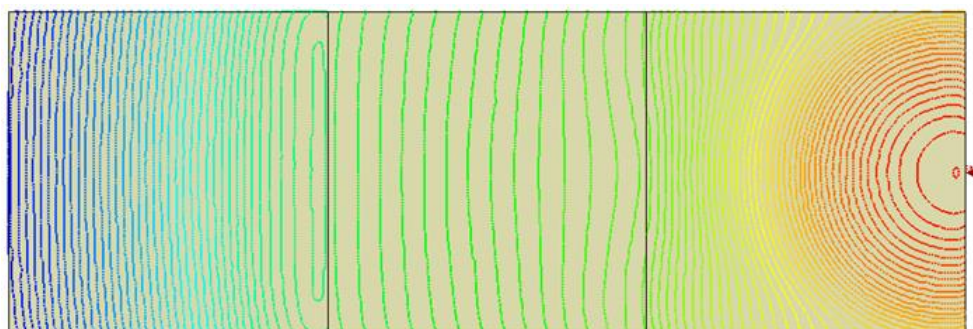


Σχήμα 4-38. Απεικονιστικός έλεγχος του μοτίβου του μετώπου ροής σε περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης όπου το πάχος είναι διαφορετικό με τη βοήθεια των ισοπαραμετρικών καμπυλών (iso-curves). Με τον τρόπο αυτό μπορούν να εντοπιστούν τυχόν επιβραδύνσεις ή παύσεις στη ροή του πολυμερούς τήγματος (flow hesitation).

Συμπληρωματικά με τα παραπάνω να αναφερθεί ότι η τυχόν διαφορά στο χρώμα των ισοπαραμετρικών καμπυλών σημαίνει ότι τα επιμέρους μέτωπα ροής του πολυμερούς τήγματος ευρίσκονται σε διαφορετική θέση. Επίσης, εάν τα κενά ανάμεσα σε ίδιες διαδοχικές ισοπαραμετρικές καμπύλες διαφέρουν σημαντικά, τότε επιβράδυνση ή παύση στη ροή του πολυμερούς τήγματος ενδεχομένως να σημειωθεί στο μικρότερο μεταξύ τους κενό (**Σχήμα 4-39**). Στη δε περίπτωση που η πυκνότητα των ισοπαραμετρικών καμπυλών μεταβάλλεται συνεχώς δραματικά, τότε αυτό συνιστά ένδειξη σχηματισμού γραμμών/σημαδιών ροής (flow lines/marks) στην εξωτερική επιφάνεια του επικείμενου προϊόντος έγχυσης (**Σχήμα 4-40**).

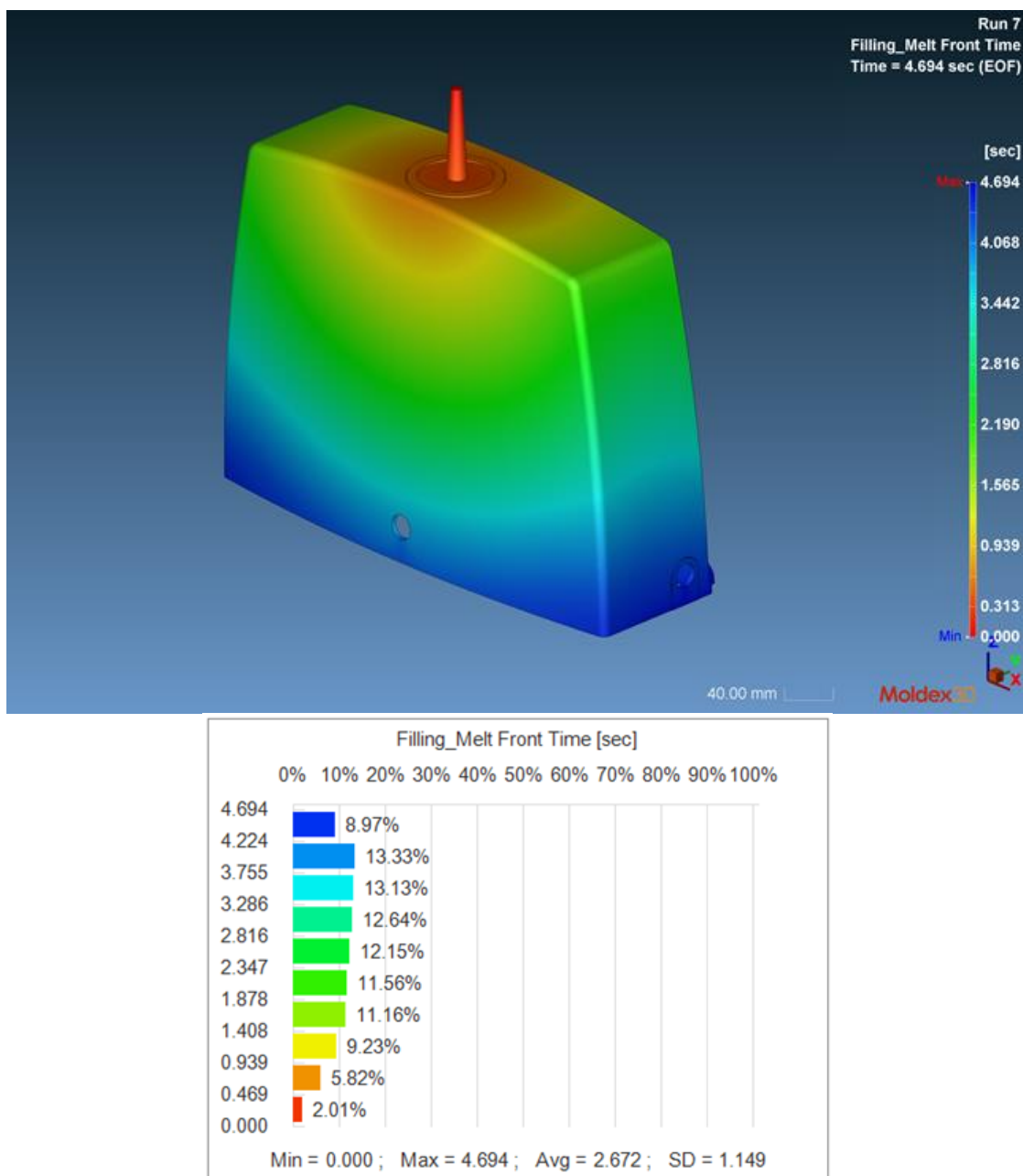


Σχήμα 4-39. Πιθανή επιβράδυνση ή παύση στη ροή του πολυμερούς τήγματος στο μικρότερο κενό μεταξύ ίδιων διαδοχικών ισοπαραμετρικών καμπυλών. Στην περιοχή αυτή η επιφανειακή τάση του πολυμερούς τήγματος είναι μεγαλύτερη και η ρευστότητα χαμηλότερη, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι εκεί το τήγμα μπορεί να στερεοποιηθεί πρόωρα.



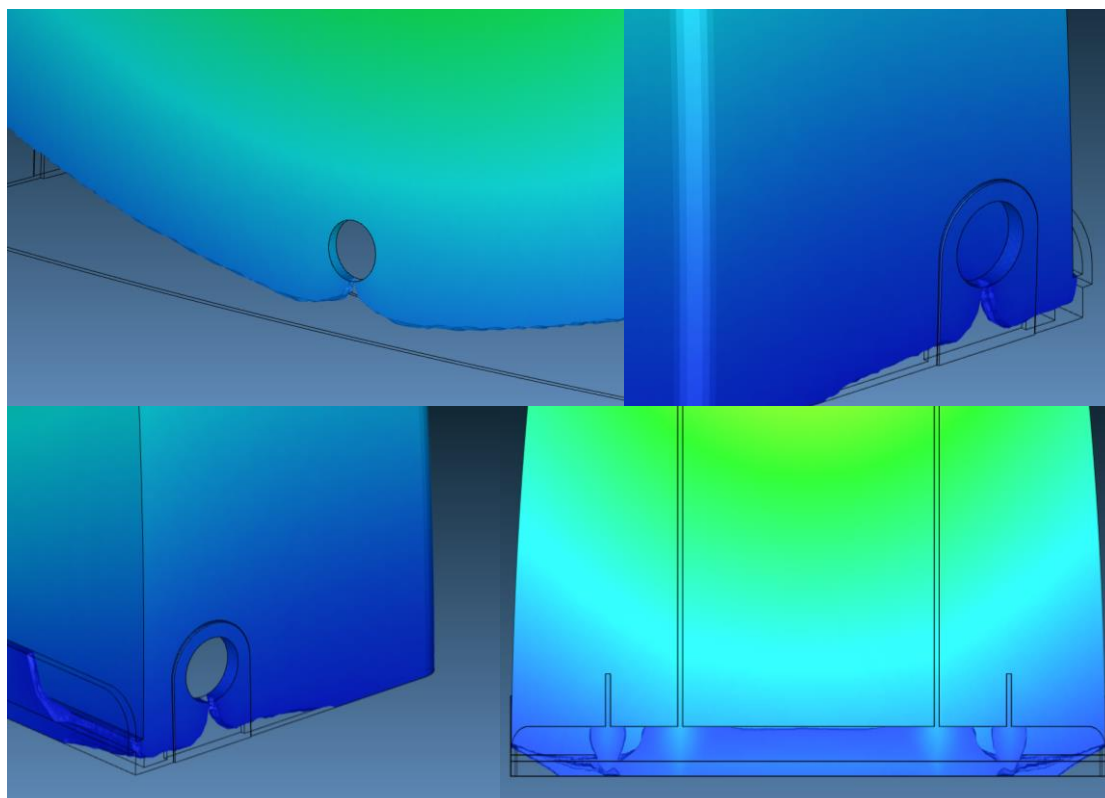
Σχήμα 4-40. Συνεχής μεταβολή της πυκνότητας των ισοπαραμετρικών καμπυλών, γεγονός το οποίο αποτελεί ένδειξη σχηματισμού γραμμών/σημαδιών ροής (flow lines/marks) στην εξωτερική επιφάνεια του επικείμενου προϊόντος έγχυσης.

Σε ό,τι αφορά το προϊόν έγχυσης που μελετάται στην παρούσα διατριβή, κάνοντας μια επισκόπηση του αποτελέσματος όπως αυτό προκύπτει από την εκτέλεση της προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης στο λογισμικό Moldex3D (**Σχήμα 4-41**) και λαμβάνοντας υπόψιν όλα όσα έχουν προαναφερθεί, προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα.



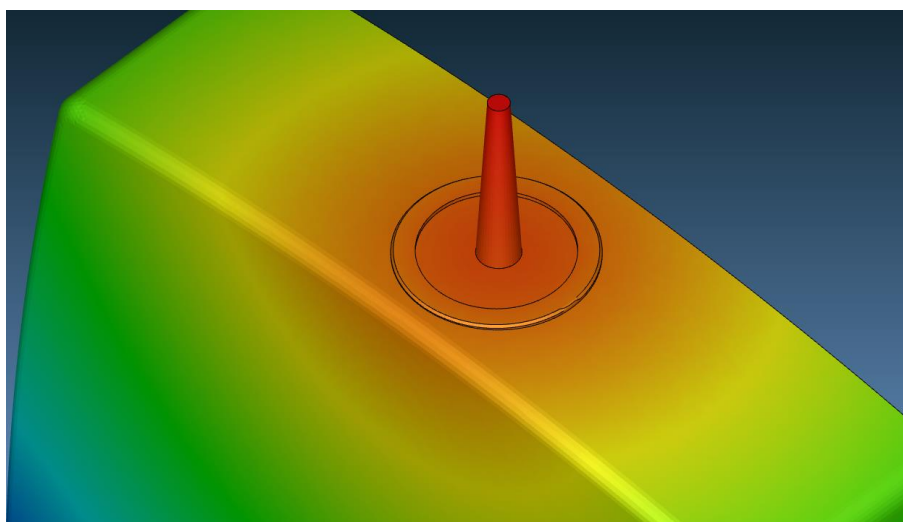
Σχήμα 4-41. Το μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D. Ο συνολικός πραγματικός χρόνος πλήρωσης ανέρχεται στα **4.694 sec**.

Πρώτον, η μία και μοναδική πύλη εισόδου τύπου sprue εξασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή του πολυμερούς τήγματος σε όλη την έκταση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού αποτρέποντας τη δημιουργία επιπλέον γραμμών συγκόλλησης (weld lines) στο τελικό προϊόν πέραν, φυσικά, εκείνων των γραμμών συγκόλλησης που αναγκαστικά σχηματίζονται εκεί όπου η γεωμετρία του προϊόντος επιβάλλει «σπάσιμο» του μετώπου ροής σε επιμέρους μέτωπα (**Σχήμα 4-42**)



Σχήμα 4-42. Γραμμές συγκόλλησης (weld lines) που θα δημιουργηθούν στο τελικό προϊόν έγχυσης μόνο εκεί όπου η γεωμετρία του «σπάει» αναγκαστικά το μέτωπο ροής σε επιμέρους μέτωπα.

Δεύτερον, στο προϊόν έγχυσης δεν παρατηρείται πέριξ της περιοχής που εμπίπτει στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης το κυματιστό μοτίβο που οφείλεται στην ανάπτυξη του φαινομένου πίδακα (jetting) και το οποίο ήταν ιδιαίτερα έντονο στην περίπτωση υλοποίησης του αρχικού σεναρίου τροφοδοσίας (**Σχήμα 4-43**). Υπενθυμίζεται ότι με την υλοποίηση αυτού του σεναρίου, ο ειδικός δακτύλιος ο οποίος είχε προστεθεί στο προϊόν έγχυσης καθιστούσε τη ροή του πολυμερούς τήγματος ιδιαίτερα τυρβώδη, επιτείνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το φαινόμενο πίδακα.

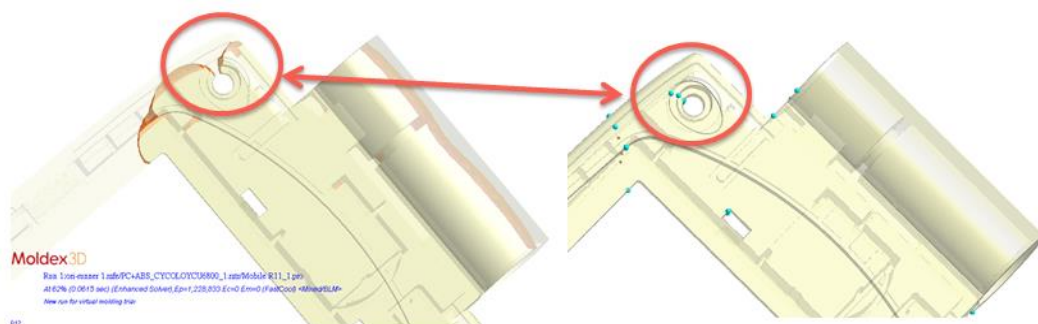


Σχήμα 4-43. Εξάλειψη του φαινομένου πίδακα (jetting) σε σχέση με το αρχικό σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

Τρίτον, παρατηρώντας το **Σχήμα 4-41**, δεν εντοπίζονται ελλειπώς πληρωμένες περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα (short shots, flow hesitation) καθώς μετά από αρκετές δοκιμές, τροποποιήθηκαν καταλλήλως τόσο οι αρχικές παράμετροι της κατασκευαστικής διεργασίας (θερμοκρασίες, πιέσεις, ταχύτητες κλπ) όσο και η πύλη εισόδου τύπου sprue ούτως ώστε να αποφευχθούν κάποιες μικρές ελλειπείς πληρώσεις που είχαν αρχικώς προκύψει πλησίον της γραμμής διαχωρισμού του καλουπιού (parting line).

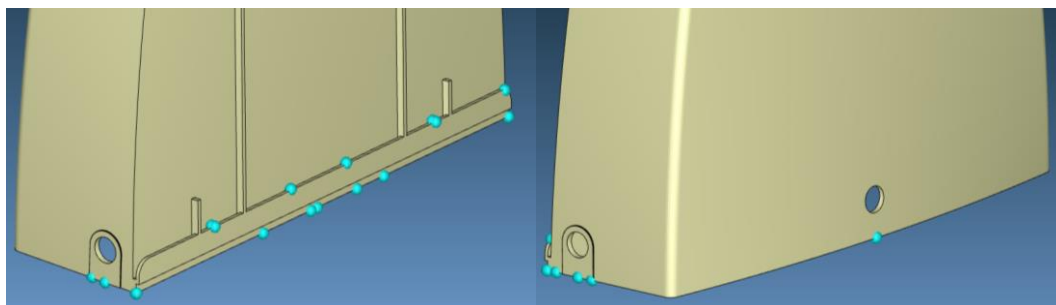
❖ Air Trap

Εμφανίζει τις θέσεις όπου πιθανόν εγκλωβίζονται φυσαλίδες αέρος (air-traps) στο τελικό προϊόν έγχυσης (**Σχήμα 4-44**) ή τα πιθανά σημεία όπου μπορούν να παρατηρηθούν σημάδια καύσης (burn marks).



Σχήμα 4-44. Περιοχές ενός προϊόντος έγχυσης όπου πιθανόν εγκλωβίζονται φυσαλίδες αέρος μετά την προσομοίωση της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D.

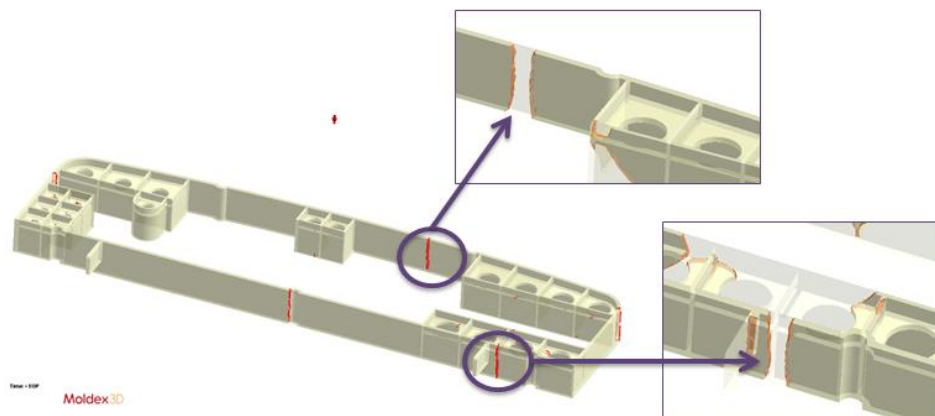
Αναφορικά με το προϊόν έγχυσης που μελετάται στην παρούσα διατριβή και δεδομένου ότι στην προσομοίωση του κύκλου έγχυσης δεν έχει συμπεριληφθεί η παράμετρος του εξαερισμού (venting), το λογισμικό Moldex3D εμφανίζει τα σημεία από όπου θεωρητικά θα εκλυόταν στην ατμόσφαιρα ο αέρας που βρίσκεται παγιδευμένος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Επί της ουσίας, πρόκειται για ένα σημαντικό αποτέλεσμα καθώς από την ερμηνεία του ο μηχανικός αντιλαμβάνεται πού ακριβώς χρειάζεται να τοποθετηθούν σημεία εξαερισμού στο καλούπι. Εν προκειμένω, με βάση το **Σχήμα 4-45**, οι εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρος (air-traps) που επίκειται να εκλυθούν στην ατμόσφαιρα εντοπίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές του προϊόντος έγχυσης.



Σχήμα 4-45. Σημεία στο προϊόν έγχυσης που μελετάται από τα οποία θεωρητικά θα εκλυόταν στην ατμόσφαιρα ο παγιδευμένος αέρας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

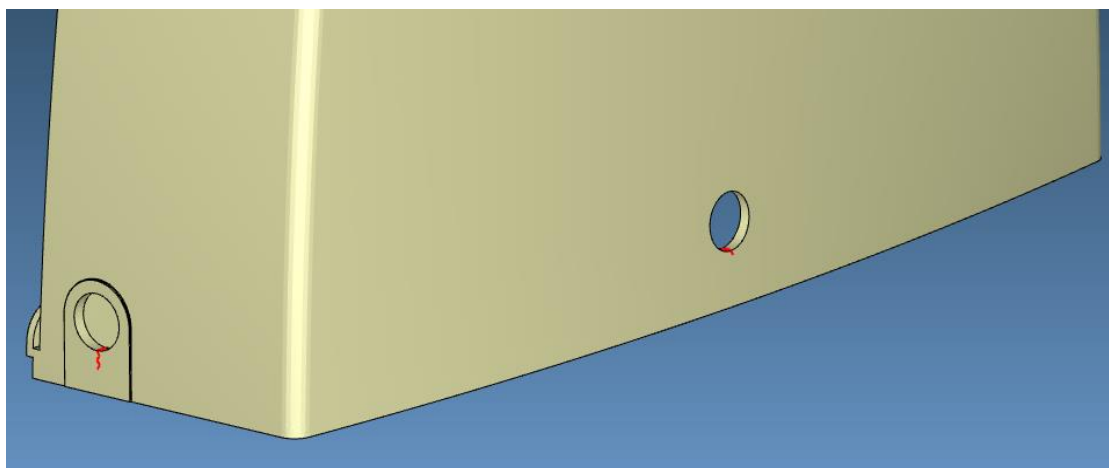
❖ **Weld Line**

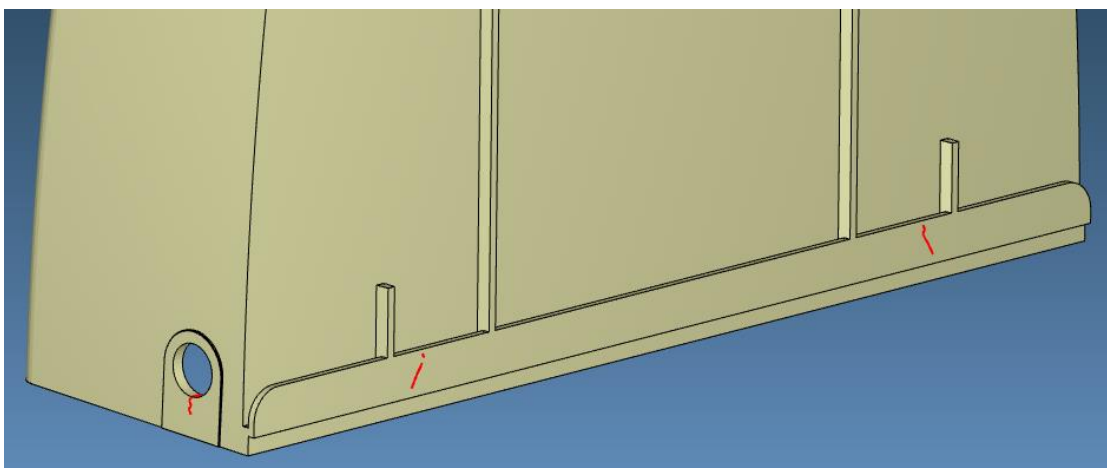
Εμφανίζει τις γραμμές συγκόλλησης που υποδηλώνουν πιθανές περιοχές του προϊόντος έγχυσης με ασθενέστερη δομή (**Σχήμα 4-46**). Όσο πιο σκούρα απεικονίζεται μια γραμμή συγκόλλησης, τόσο ασθενέστερη είναι η δομή της αντίστοιχης περιοχής.



Σχήμα 4-46. Οι γραμμές συγκόλλησης σε ένα προϊόν έγχυσης όπως ακριβώς προκύπτουν μετά την προσομοίωση της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D.

Ο ελάχιστος αριθμός γραμμών συγκόλλησης που μπορεί να επιτευχθεί στο προϊόν έγχυσης που μελετάται στην παρούσα διατριβή είναι πέντε. Όπως εξεικονίζονται στο **Σχήμα 4-47**, αυτές οι γραμμές συγκόλλησης εντοπίζονται σε εκείνες τις περιοχές του προϊόντος όπου η γεωμετρία του εξαναγκάζει το μέτωπο ροής του πολυμερούς τήγματος να «σπάσει» σε επιμέρους μέτωπα.

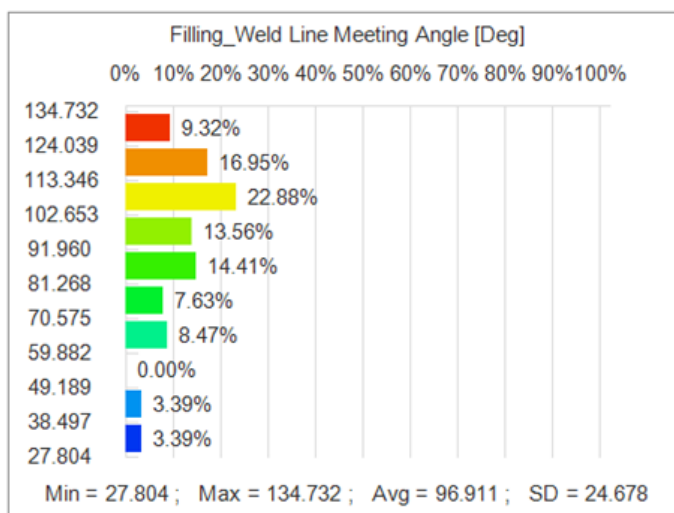




Σχήμα 4-47. Οι πέντε γραμμές συγκόλλησης στο προϊόν έγχυσης που μελετάται όπως ακριβώς προκύπτουν μετά την προσομοίωση της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D.

❖ *Weld Line Meeting Angle*

Προβάλλει την κατανομή της γωνίας συνάντησης (θ) των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος στις γραμμές συγκόλλησης. Η γωνία συνάντησης ποικίλει από 0° έως 135° ανάμεσα σε δύο μέτωπα ροής που συγχωνεύονται. Εάν η γωνία συνάντησης ανέρχεται στις 180° , τότε τα δύο μέτωπα ροής μπορούν να θεωρηθούν ως ένα, ενώ στην περίπτωση που είναι ίση με 0° , τότε τα δύο μέτωπα ροής συγκλίνουν μετωπικά. Γενικά, όσο μικρότερη είναι η γωνία συνάντησης, τόσο ασθενέστερη γίνεται η αντοχή ενός προϊόντος έγχυσης και τόσο εμφανέστερη είναι η γραμμή συγκόλλησης στο τελικό προϊόν μετά την εξόλκευσή του.

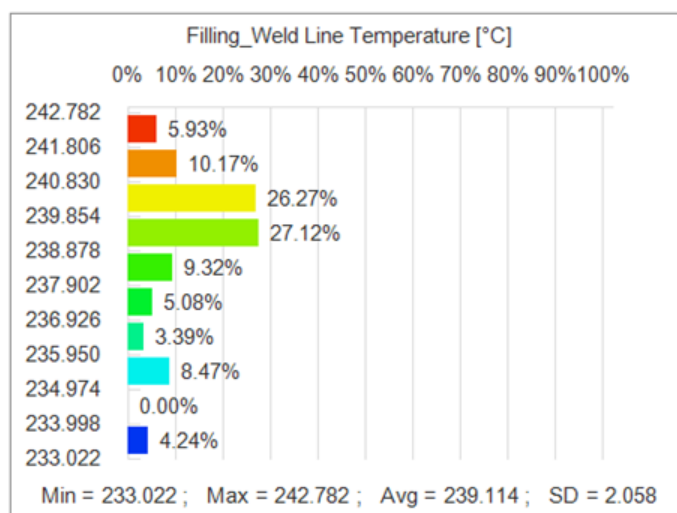


Σχήμα 4-48 . Η μέση τιμή της γωνίας συνάντησης (θ) των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος στις γραμμές συγκόλλησης για το προϊόν έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος ανέρχεται στις **96.911°**.

❖ *Weld Line Temperature*

Προβάλλει την κατανομή της θερμοκρασίας στις πιθανές γραμμές συγκόλλησης καθώς δύο μέτωπα ροής του πολυμερούς τήγματος συναντιούνται. Παρότι η αύξηση

της θερμοκρασίας στις γραμμές συγκόλλησης μπορεί να περιορίσει την εμφάνισή τους, συνίσταται αυτή η στρατηγική να επιχειρείται ως τελευταία εναλλακτική καθώς η αυξημένη θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος ενδέχεται να επιδεινώσει τη στρέβλωση του προϊόντος έγχυσης. Γενικά, όταν η θερμοκρασία των γραμμών συγκόλλησης είναι κατά μεγάλο ποσοστό μικρότερη ή ίση των **230 °C**, αυτό αποτελεί ένδειξη ότι πρέπει απαραίτητως να αυξηθεί. Εξετάζοντας δε το ραβδόγραμμα στο **Σχήμα 4-49** που ακολουθεί, παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία των γραμμών συγκόλλησης του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος ισούται με **239.114 °C**, δηλαδή μια θερμοκρασιακή τιμή αρκετά μεγαλύτερη των **230 °C**.



Σχήμα 4-49. Η μέση θερμοκρασία των γραμμών συγκόλλησης του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος ισούται με **239.114 °C**, ενώ η μικρότερη καταγεγραμμένη θερμοκρασία ξεπερνά επίσης τους **230 °C**.

❖ Gate Contribution

Εμφανίζει σε ποσοστιαίες μονάδες τη συνεισφορά του όγκου του χυτευμένου πολυμερούς από κάθε πύλη εισόδου στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού στο τρέχον χρονικό βήμα. Σημειώνεται ότι η εξισορρόπηση του ποσοστού αυτού είναι αναγκαία για τη λήψη βέλτιστων αποτελεσμάτων ροής. Ωστόσο, στην περίπτωση χρήσης πυλών εισόδου βαλβίδας (valve gates), το αποτέλεσμα Gate Contribution δεν εμφανίζεται και πρέπει να ελεγχθεί το εξαγόμενο με τη βοήθεια του αποτελέσματος **Particle Tracer**.

❖ Pressure

Εμφανίζει με διαφορετικά χρώματα την κατανομή της πίεσης του πολυμερούς τήγματος στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού την τρέχουσα χρονική στιγμή. Λαμβάνοντας υπόψιν το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι εφικτή μια σχεδιαστικά στοχευμένη αναθεώρηση τόσο του προς μορφοποίηση αντικειμένου όσο και του καλουπιού αυτού. Σημειώνεται δε ότι εφόσον υπάρχουν πολλαπλές πύλες εισόδου στο καλούπι, είναι πολύ πιθανό να παρατηρηθεί ανισομερής κατανομή της πίεσης εξαιτίας του διαφορετικού μήκους ροής (flow length) κάθε πύλης εισόδου.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα ευρήματα του συγκεκριμένου αποτελέσματος είναι δυνατό :

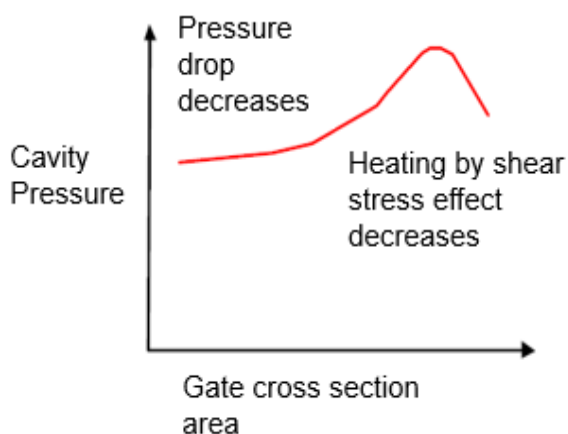
- να εξεταστεί η κατάσταση της μετάδοσης πίεσης.

Γενικά, οι δρομείς (runners) και οι πύλες εισόδου με ακατάλληλες διαστάσεις, όπως επίσης οι κοιλότητες μορφοποίησης με μεγάλη ανομοιομορφία στα πάχη των τοιχωμάτων τους περιορίζουν τη μετάδοση της πίεσης έγχυσης (injection pressure) στο εσωτερικό των κοιλότητων. Τέτοιου είδους περιορισμοί πιθανόν να οδηγήσουν στην ελλιπή πλήρωση της εκάστοτε κοιλότητα μορφοποίησης (short shot) καθώς η δύναμη που οδηγεί το πολυμερές τήγμα δεν είναι άλλη από την πίεση έγχυσης.

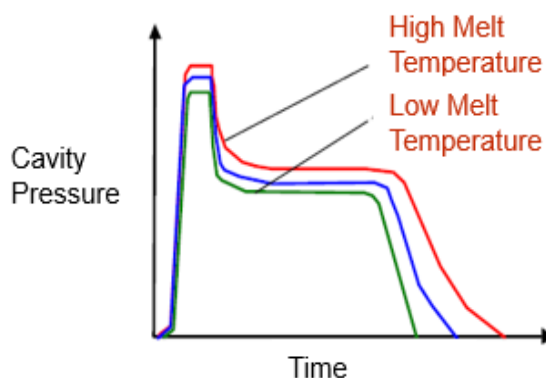
Πιο συγκεκριμένα, τα μήκη των αγωγών διανομής και των πυλών εισόδου επηρεάζουν τη μετάδοση της πίεσης στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλούπιού. Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα δεξιά, η πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης έχει ανάστροφη σχέση με το μήκος τόσο των αγωγών διανομής όσο και των πυλών εισόδου. Κατά κανόνα, όσο μεγαλύτερα είναι τα μήκη των αγωγών διανομής και των πυλών εισόδου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πτώση της πίεσης (pressure drop) στο σύστημα διανομής (runner system) με αποτέλεσμα η τελική πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης να είναι χαμηλότερη. Παρ' όλα αυτά, το αντίστροφο δεν ισχύει κατά κανόνα.



Πέραν των μηκών, καθοριστικής σημασίας είναι επίσης τα μεγέθη των αγωγών διανομής και των πυλών εισόδου. Εάν το μέγεθος των αγωγών διανομής είναι πολύ μικρό, θα προκληθεί μεγαλύτερη απώλεια πίεσης και προφανώς θα μειωθεί η πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης. Προκειμένου να επιδιορθωθεί το πρόβλημα αυτό, μπορούν σαφώς να μεγεθυνθούν οι πύλες εισόδου. Ωστόσο, εάν η διατομή κάθε πύλης εισόδου υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή, η διατμητική θέρμανση (shear heating) του πολυμερούς τήγματος διερχόμενου μέσα από κάθε πύλη θα μειωθεί προκαλώντας με τη σειρά της μείωση της θερμοκρασίας (melt temperature) και αύξηση του ιξώδους (viscosity) του τήγματος.

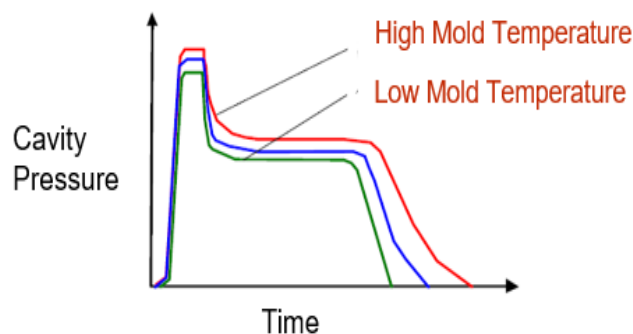


Συν τοις άλλοις, η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) επηρεάζει την πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης. Θέτοντας υψηλότερη τιμή στην θερμοκρασία του τήγματος είναι δυσκολότερο να φράξουν οι πύλες εισόδου από στερεοποιημένο πολυμερές, κάτι το οποίο συνεπάγεται μεγαλύτερο χρόνο πλήρωσης (filling time). Ακολουθως, καθώς ο χρόνος

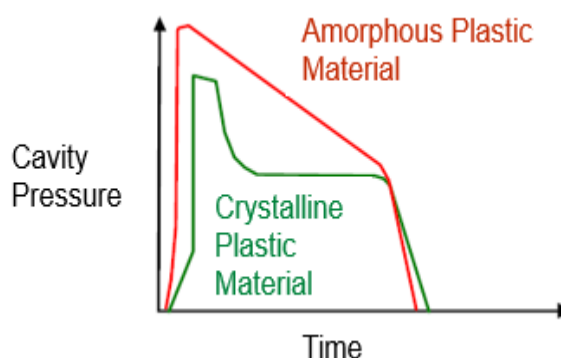


πλήρωσης είναι μεγαλύτερος, η πτώση της πίεσης (pressure drop) στο σύστημα διανομής γίνεται σαφώς μικρότερη και, εν τέλει, η πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης μεγαλύτερη.

Ομοίως με την θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος, η θερμοκρασία της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature) επιδρά επίσης στην πίεση εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Έτσι, για υψηλότερες τιμές της θερμοκρασίας του καλουπιού και δεδομένου ότι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πολυμερούς τήγματος και καλουπιού γίνεται μικρότερη, η κλιση της θερμοκρασίας είναι μικρότερη και η ταχύτητα ψύξης (cooling rate) πιο αργή. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε επιμήκυνση της χρονικής διάρκειας της μετάδοσης πίεσης και μικρότερη πτώση πίεσης (pressure drop) στο σύστημα διανομής που νομοτελειακά επιφέρουν υψηλότερη τελική πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης.



Εκτός των όσων έχουν ήδη αναφερθεί, η πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης επηρεάζεται διαφορετικά από τον εκάστοτε τύπο του πολυμερούς δομικού υλικού που χρησιμοποιείται κατά την κατασκευαστική διεργασία. Για την ακρίβεια άμορφα και κρυσταλλικά πολυμερή συμπεριφέρονται διαφορετικά στις αλλαγές πίεσης και θερμοκρασίας. Οι διαφορές αυτές είναι ευδιάκριτες ιδιαίτερα στις φάσεις της συμπύεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης (packing phase) και της μετέπειτα ψύξης του (cooling phase) όπου οι ογκομετρικές μεταβολές (PVT) που λαμβάνουν χώρα είναι σαφώς περισσότερες και μεγαλύτερες. Σε κάθε περίπτωση είναι γεγονός ότι χρησιμοποιώντας κρυσταλλικά πολυμερή η πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης είναι χαμηλότερη απ' ότι όταν χρησιμοποιούνται άμορφα πολυμερή.



- να υπολογιστεί η πτώση πίεσης (pressure drop) στο σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στο καλούπι (runner system).

Για να υπολογιστεί η πτώση πίεσης πρέπει να είναι ήδη γνωστές οι μέγιστες τιμές της πίεσης του πολυμερούς τήγματος με και χωρίς το σύστημα διανομής. Δεδομένου ότι οι τιμές αυτές είναι γνωστές, η πτώση πίεσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$(Μέγιστη\ πίεση\ με\ το\ σύστημα\ διανομής) - (Μέγιστη\ πίεση\ χωρίς\ το\ σύστημα\ διανομής) = (Πτώση\ πίεσης\ στο\ σύστημα\ διανομής)$$

Από προεπιλογή, το σύστημα διανομής απεικονίζεται στο παράθυρο γραφικών του Moldex3D. Επομένως, η μέγιστη πίεση που εμφανίζεται στην χρωματική παλέτα αριστερά είναι η μέγιστη πίεση συμπεριλαμβανομένου του συστήματος

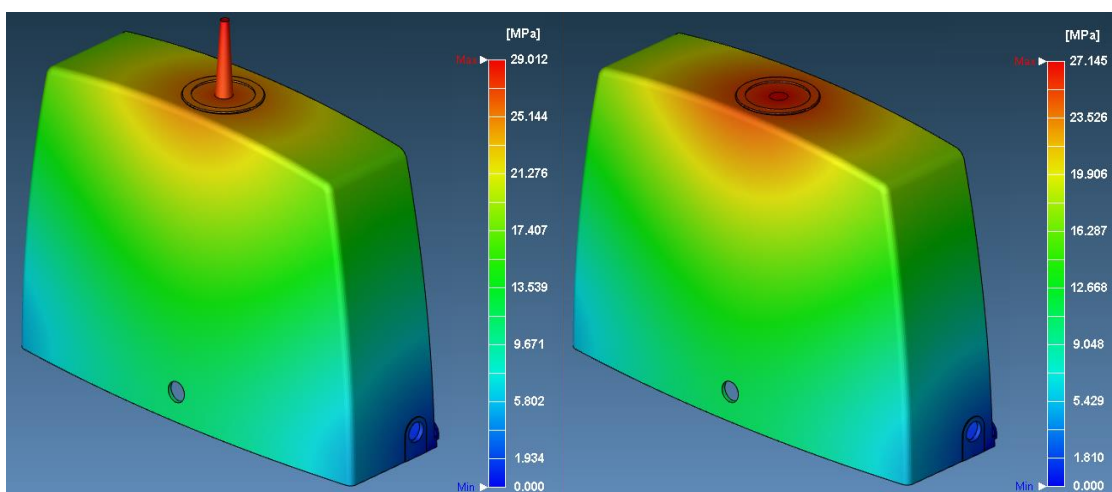
διανομής. Εφόσον αποκρυφθεί το σύστημα διανομής από το παράθυρο γραφικών, οι τιμές της πίεσης στην χρωματική παλέτα αριστερά ενημερώνονται στιγμιαία. Οπότε, η μέγιστη πίεση χωρίς το σύστημα διανομής είναι επίσης γνωστή (**Σχήμα 4-50**).

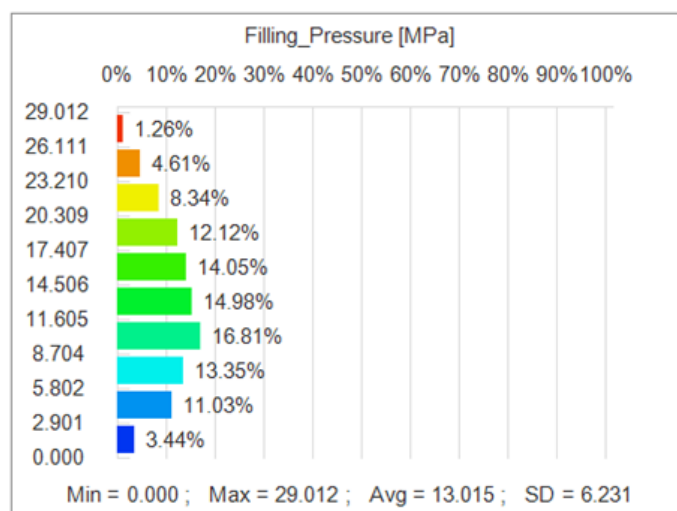
Βεβαίως, με την εκτίμηση της πτώσης πίεσης στο σύστημα διανομής επαληθεύεται ο επαρκής σχεδιασμός του. Επαρκές χαρακτηρίζεται ένα σύστημα διανομής όταν προλαμβάνει την υψηλή πτώση πίεσης και κατανέμει ομοιόμορφα την πίεση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

- να αποφευχθεί η υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος (overpacking) που μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση προεκτάματος (flash) στο τελικό προϊόν έγχυσης.

Όπως προαναφέρθηκε, τυχόν υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος είναι δυνατό να ανιχνευθεί στο αποτέλεσμα **Melt Front Time**. Ωστόσο, για την ακριβέστερη πρόβλεψη πιθανής υπερβολικής συμπίεσης του τήγματος, συνίσταται η ενδελεχής εξέταση και των πληροφοριών που δίδει το αποτέλεσμα **Pressure**.

Για την ακρίβεια, στο αποτέλεσμα **Pressure** χρειάζεται να ελεγχθεί η τιμή της πίεσης στην περιοχή όπου είναι πιθανότερο να εμφανιστεί η υπερβολική συμπίεση του τήγματος. Εάν η πίεση είναι σημαντικά υψηλότερη εν συγκρίσει με άλλες περιοχές, η πιθανότητα εμφάνισης υπερβολικής συμπίεσης του τήγματος στην περιοχή αυτή γίνεται αυτομάτως μεγαλύτερη (**Σχήμα 4-50**).





Σχήμα 4-50. Η κατανομή της πίεσης στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η πτώση πίεσης στην πύλη εισόδου τύπου sprue είναι μικρή και ανέρχεται στα $29.012 - 27.145 = 1.867$ MPa. Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα αυξημένης συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος μόνο στην περιοχή της τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης όπου και καταγράφεται η μεγαλύτερη πίεση (**29.012** MPa). Σε γενικές γραμμές, η κατανομή της πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης είναι ομοιόμορφη.

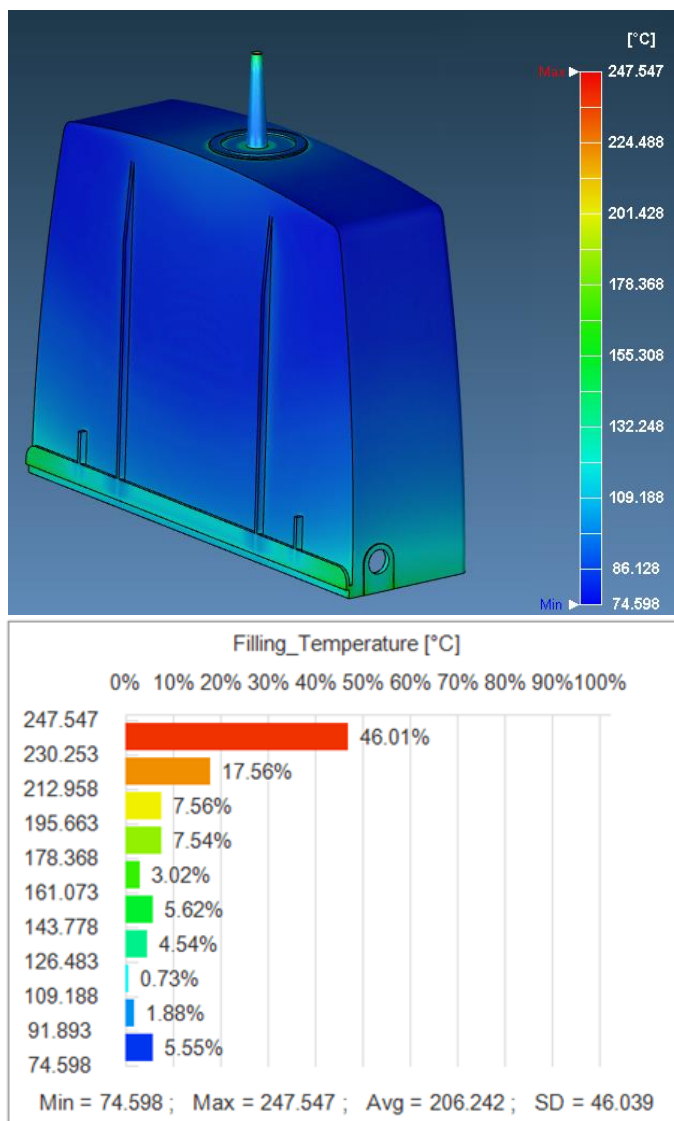
❖ *Temperature*

Εμφανίζει την κατανομή της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού την τρέχουσα χρονική στιγμή. Λαμβάνοντας υπόψιν το αποτέλεσμα αυτό είναι δυνατό να καθοριστούν οι περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου που εμφανίζουν υψηλή θερμοκρασία λόγω ανάπτυξης τριβών (frictional heating) και να ελεγχθεί η συμβατότητα της διακύμανσης της θερμοκρασίας με τις συνθήκες που παραμετροποιούν την κατασκευαστική διεργασία ή τις πιθανές σχεδιαστικές αλλαγές που έχουν υλοποιηθεί. Άλλωστε, αν η μέγιστη θερμοκρασία του πολυμερούς είναι υψηλότερη από την καθορισμένη εξαρχής θερμοκρασία του τήγματος (melt temperature), υποδηλώνεται ότι έχει παραχθεί σημαντική ποσότητα θερμότητας εξαιτίας της ιξώδους θέρμανσης του πολυμερούς τήγματος (viscous heating).

Πράγματι, πλησίον της πύλης ή των πυλών εισόδου και των περιοχών της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με μειωμένο πάχος, η αντίσταση της ροής γίνεται πολύ υψηλή. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος λόγω ανάπτυξης ισχυρών τριβών (frictional heating). Επομένως, αυτό που μπορεί να γίνει είναι ένας έλεγχος για τυχόν αύξηση της θερμοκρασίας του τήγματος κοντά στην περιοχή της τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης και στις περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου με μικρό πάχος. Από την άλλη πλευρά, όταν η θερμοκρασία του τήγματος (melt temperature) στο κέντρο και κατά μήκος του πάχους των τοιχωμάτων του μορφοποιημένου αντικειμένου είναι κοντά στη θερμοκρασία του καλουπιού (mold temperature), υποδεικνύει ότι το πολυμερές βρίσκεται σε κατάσταση στασιμότητας και σύντομα η θερμοκρασία του μειώνεται μέσω αγωγής στα ψυχρά τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης.

Προκειμένου δε να λάβουν τα βέλτιστα αποτελέσματα, οι σχεδιαστές των προϊόντων έγχυσης είτε τροποποιούν τον σχεδιασμό ενός προϊόντος, είτε αλλάζουν τις συνθήκες

που παραμετροποιούν την κατασκευαστική διεργασία, είτε κάνουν και τα δύο. Επί παραδείγματι, με την αλλαγή του πάχους των τοιχωμάτων ενός προϊόντος έγχυσης, η κατανομή της θερμοκρασίας επίσης θα μεταβληθεί καθότι τα παχύτερα τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού δυσχεραίνουν τη διάχυση της θερμότητας στο εσωτερικό της κοιλότητας.



Σχήμα 4-51. Η κατανομή της θερμοκρασίας στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος. Η μέγιστη θερμοκρασία του πολυμερούς είναι υψηλότερη από την καθορισμένη εξαρχής θερμοκρασία του τήγματος (melt temperature) κατά $247.547 - 245 = 2.547$ ° C, γεγονός το οποίο δικαιολογείται από την εντός λογικών πλαισίων παραγωγή ποσότητας θερμότητας εξαιτίας της ιξώδους θέρμανσης του πολυμερούς τήγματος (viscous heating). Επίσης, η κατανομή της θερμοκρασίας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης είναι κατά βάση ομοιόμορφη με τις περιοχές της τροφοδοσίας και των κάτω άκρων να διαφοροποιούνται ελάχιστα.

❖ **Melt Front Temperature**

Εμφανίζει την καταγεγραμμένη τιμή της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος την στιγμή που αυτό φτάνει στο δοθέν σημείο. Επί της ουσίας, η τιμή αυτή υποδηλώνει το

ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται και διαχέεται ενόσω τα επιμέρους στάδια της κατασκευαστικής διεργασίας βρίσκονται σε εξέλιξη. Σημειώνεται δε ότι οι τιμές της θερμοκρασίας που εμφανίζονται δεν αναφέρονται απαραίτητα στην ίδια χρονική στιγμή. Αξιοποιώντας τα στοιχεία που προκύπτουν από το συγκεκριμένο αποτέλεσμα μπορεί να αποτραπεί η εμφάνιση των κάτωθι κατασκευαστικών προβλημάτων στα τελικά προϊόντα έγχυσης :

- γραμμές συγκόλλησης (weld lines)

Αφού προσδιοριστούν οι περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου όπου ενδέχεται να εμφανιστούν γραμμές συγκόλλησης μέσω του αποτελέσματος **Melt Front Time**, έπειτα εξετάζεται η θερμοκρασία του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος κοντά στις περιοχές αυτές. Γενικά, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος, τόσο εντονότερες θα είναι οι γραμμές συγκόλλησης στο τελικό προϊόν έγχυσης.

- σημάδια/γραμμές ροής (flow marks/lines)

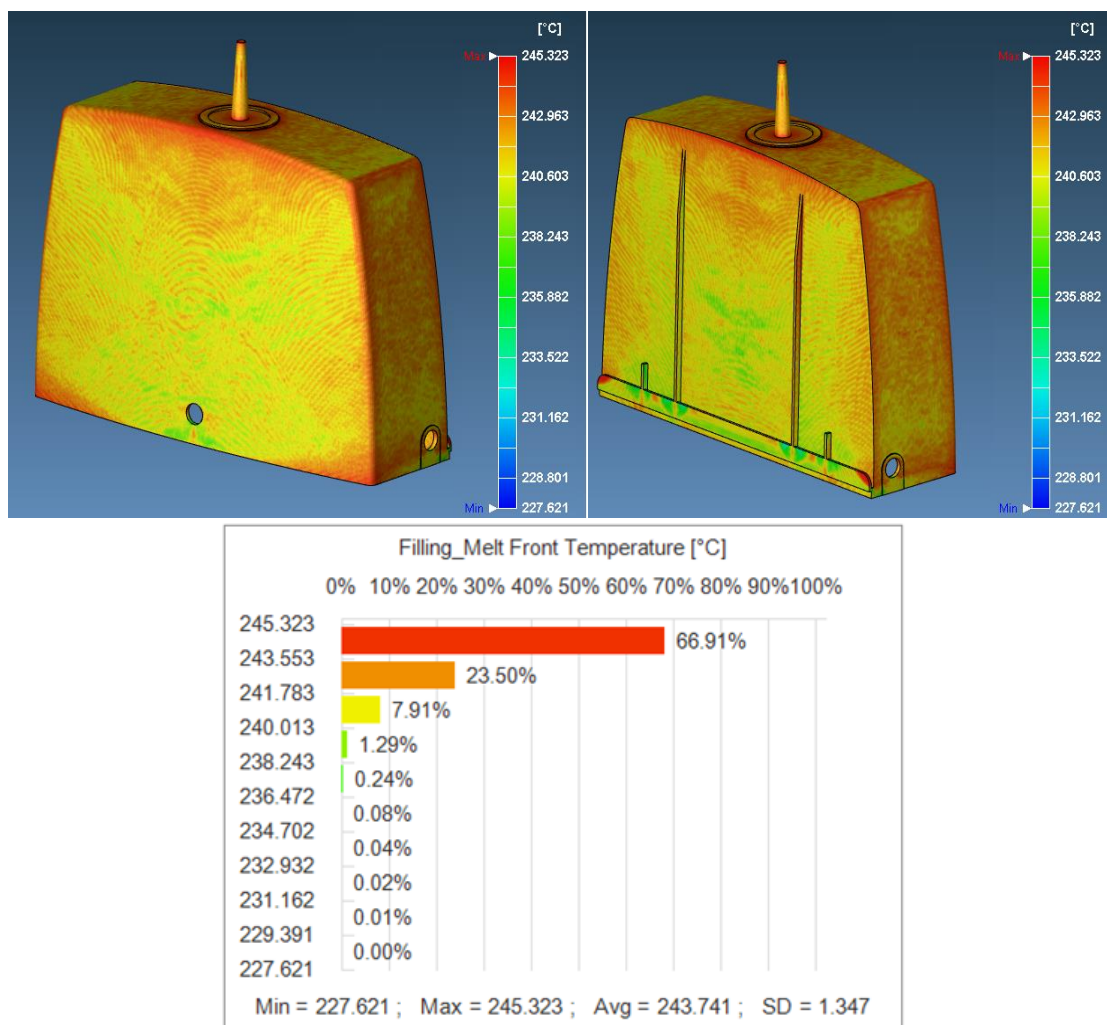
Προκειμένου να γίνει ένας έλεγχος αναφορικά με τον πιθανό σχηματισμό σημαδιών/γραμμών ροής στο τελικό προϊόν έγχυσης, αρκεί ο εντοπισμός τυχόν χαμηλής θερμοκρασίας του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος στους αγωγούς διανομής και στην περιοχή πλησίον της τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (**Σχήμα 4-52**).

- επιβραδύνσεις/παύσεις ροής (flow hesitation)

Αφού προσδιοριστούν τυχόν επιβραδύνσεις ή παύσεις ροής έπειτα από αξιολόγηση των πληροφοριών που δίδει το αποτέλεσμα **Melt Front Time**, τότε από το αποτέλεσμα **Melt Front Temperature** μπορεί να ελεγχθεί εάν οι εν λόγω δυσλειτουργίες της ροής οφείλονται στη χαμηλή θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος.

- υποβάθμιση του πολυμερούς δομικού υλικού (material degradation) εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας

Η υποβάθμιση του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού λαμβάνει χώρα όταν η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) υπερβαίνει το άνω όριο του θερμοκρασιακού εύρους κατά το οποίο το χρησιμοποιούμενο πολυμερές μπορεί να διατηρήσει τη δομική ακεραιότητά του.

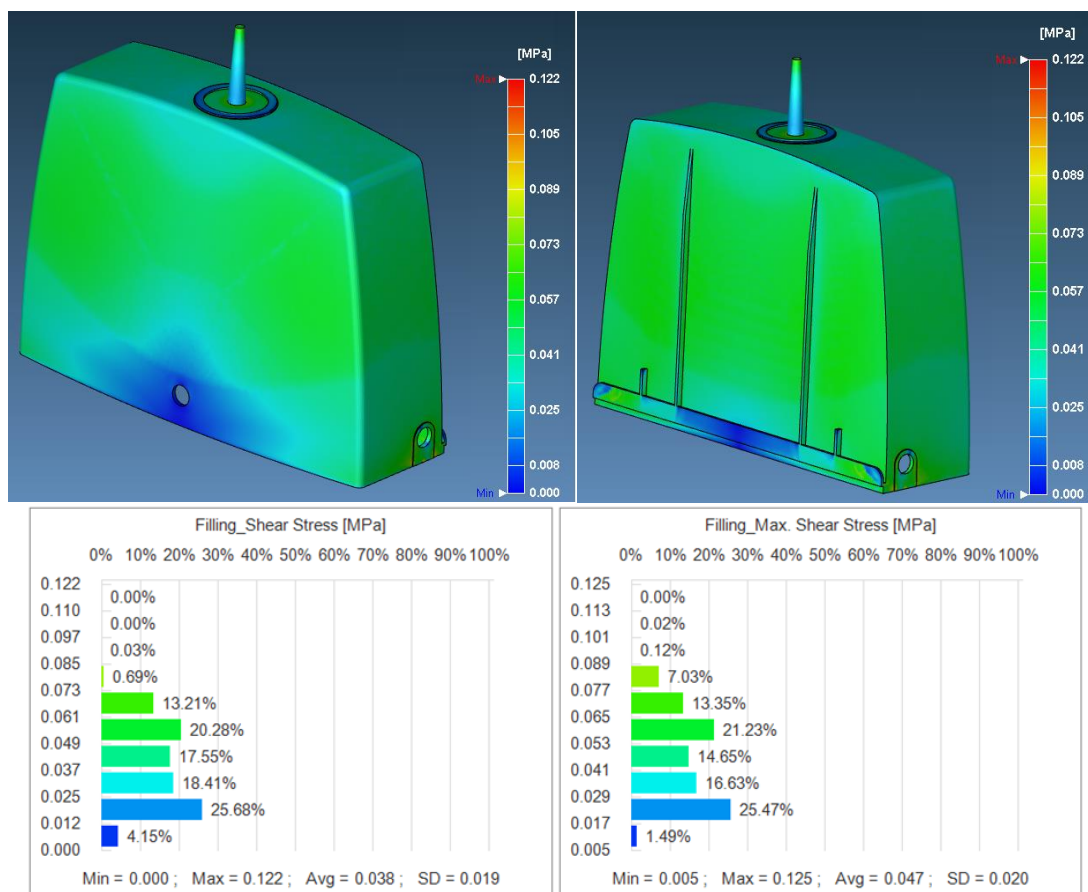


Σχήμα 4-52. Η κατανομή της θερμοκρασίας του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος κατά την έγχυσή του στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλούπιου του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος. Με βάση τα παραπάνω, από τις πέντε γραμμές συγκόλλησης, οι δύο στις πλαινές πλευρές του προϊόντος θα είναι λιγότερο έντονες σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις στη μπροστά και πίσω όψη του. Όσον αφορά τις γραμμές ροής, δε μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Από τη μία η μη ανίχνευση χαμηλής θερμοκρασίας στην περιοχή της τροφοδοσίας δεν υποδηλώνει τον σχηματισμό γραμμών ροής στο τελικό προϊόν. Από την άλλη, η μη ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας που παρατηρείται σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι πύλες εισόδου τύπου sprue είναι γενικά επιρρεπείς ως προς τη δημιουργία γραμμών ροής στο τελικό προϊόν χρειάζεται προσοχή και πιθανόν λήψη μέτρων όπως η αντικατάσταση της ψυχρής πύλης εισόδου με την αντίστοιχη θερμή.

❖ **Shear Stress**

Εμφανίζει με διαφορετικά χρώματα την κατανομή της διατμητικής τάσης του πολυμερούς τήγματος την τρέχουσα χρονική στιγμή. Στις βέλτιστες συνθήκες, η διατμητική τάση θα πρέπει να κατανέμεται ομαλά και να είναι η μικρότερη δυνατή. Σε αντίθετη περίπτωση, η διατμητική τάση ενδέχεται να προκαλέσει τη στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης και κατ' επέκταση διαστασιολογικά προβλήματα. Επίσης, η υπερβολικά υψηλή διατμητική τάση οδηγεί νομοτελειακά στην ανάπτυξη ισχυρών εσωτερικών τάσεων στο παραχθέν προϊόν έγχυσης.

Συμπληρωματικά με αυτό, το αποτέλεσμα **Max. Shear Stress** παραθέτει τη μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή της διατμητικής τάσης για κάθε πεπερασμένο στοιχείο του 3D πλέγματος του παραγόμενου αντικειμένου κατά τη διάρκεια της φάσης πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Σημειώνεται ότι οι μέγιστες τιμές της διατμητικής τάσης που εμφανίζονται δεν αναφέρονται απαραίτητα στην ίδια χρονική στιγμή. Ασφαλώς, διά του συγκεκριμένου αποτελέσματος μπορεί να καθοριστεί αν η μέγιστη διατμητική τάση στο τελικό προϊόν έγχυσης υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη διατμητική τάση.



Σχήμα 4-53. Η κατανομή της διατμητικής τάσης στο πολυμερές τήγμα είναι ομοιόμορφη ενώ το μέγεθός της δεν ξεπερνά τα **0.125 MPa**.

❖ **Shear Rate**

Απεικονίζει την κατανομή του ρυθμού διάτμησης στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού με διαφορετικά χρώματα την τρέχουσα χρονική στιγμή. Η κατανομή του ρυθμού διάτμησης σχετίζεται με τη μεταβολή της κλίσης της ταχύτητας και του προσανατολισμού των μορίων. Στην συγκεκριμένη ανάλυση μπορεί επίσης να σημειωθεί η ιξώδης θέρμανση του πολυμερούς τήγματος (viscous heating) στην περίπτωση που ο ρυθμός διάτμησης είναι υψηλός.

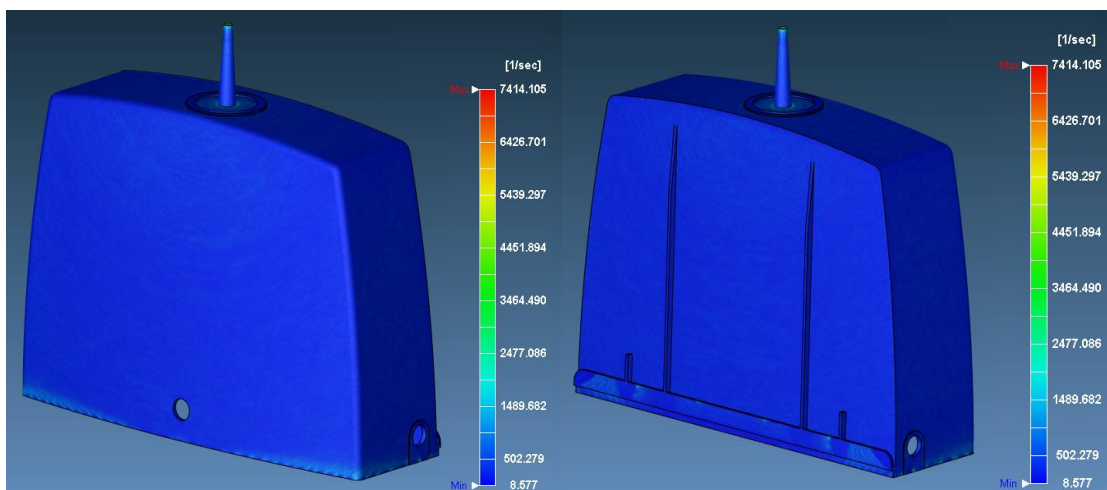
Η ταχύτητα ή ο ρυθμός διάτμησης εκφράζει τον ρυθμό της διατμητικής παραμόρφωσης του πολυμερούς δομικού υλικού ενώ η διαδικασία της έγχυσης βρίσκεται σε εξέλιξη. Μετριέται σε sec^{-1} και είναι πολύ σημαντική για τον σχεδιασμό και την ορθή χύτευση των προϊόντων έγχυσης. Με την αύξηση της ταχύτητας διάτμησης, οι μοριακές αλυσίδες που συνθέτουν το πολυμερές υπόκεινται σε

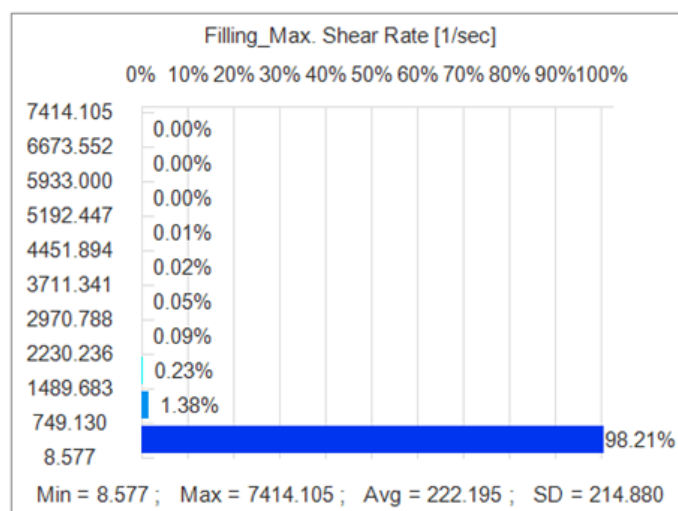
μεγαλύτερη πίεση. Εάν μάλιστα η ταχύτητα διάτμησης ενός πολυμερούς είναι πολύ υψηλή, οι μοριακές αλυσίδες του ενδέχεται να αποσπαστούν. Κάτι τέτοιο υποβαθμίζει την ποιότητα του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού και κατ' επέκταση μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

Γενικά, ο ρυθμός διάτμησης είναι ο μέγιστος εντός των αγωγών διανομής και της πύλης εισόδου του καλουπιού όπου και η ταχύτητα ροής του πολυμερούς τήγματος μεγιστοποιείται. Μάλιστα, ο υψηλός ρυθμός διάτμησης στα εξωτερικά τοιχώματα των αγωγών διανομής μειώνει το ιξώδες του πολυμερούς τήγματος λόγω της μη νευτωνικής συμπεριφοράς του ως ρευστό καθώς και της ανάπτυξης θερμότητας που οφείλεται στην ιξώδη τριβή. Καταφανώς, η ανάπτυξη θερμότητας λόγω τριβής οδηγεί σε αυξημένη θερμοκρασία στα εξωτερικά στρώματα εν αντιθέσει με τη θερμοκρασία του τήγματος στο κέντρο του αγωγού διανομής.

Ασφαλώς, ο ρυθμός διάτμησης και η διατμητική τάση σχετίζονται άμεσα. Σε κανονικές συνθήκες, ο ρυθμός διάτμησης θα πρέπει να είναι κάτω των **10.000** sec^{-1} . Σημειώνεται δε ότι οι μέγιστοι προτεινόμενοι ρυθμοί διάτμησης κυμαίνονται από **20.000** sec^{-1} (ακετάλη) έως **100.000** sec^{-1} (PP). Επί του πρακτέου, οι υψηλότερες τιμές σημαίνουν ότι περισσότερα cm^3 υλικού μπορούν να περάσουν από μια πύλη εισόδου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Συμπληρωματικά με αυτό, το αποτέλεσμα **Max. Shear Rate** παραθέτει τη μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή του ρυθμού διάτμησης για κάθε στοιχείο του 3D πλέγματος του παραγόμενου αντικειμένου κατά τη διάρκεια της φάσης πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Σημειώνεται ότι οι μέγιστες τιμές του ρυθμού διάτμησης που εμφανίζονται δεν αναφέρονται απαραίτητα στην ίδια χρονική στιγμή. Στην περίπτωση δε που το προφίλ του ρυθμού διάτμησης μεταβάλλεται συνεχώς δραματικά, τότε αυτό μεταφράζεται σε κατά τόπους έντονη χρωματική διακύμανση και αποτελεί ένδειξη σχηματισμού γραμμών/σημαδιών ροής (flow lines/marks) στην εξωτερική επιφάνεια του επικείμενου προϊόντος έγχυσης (**Σχήμα 4-54**).





Σχήμα 4-54. Η κατανομή του ρυθμού διάτμησης στο πολυμερές τήγμα είναι ως επί το πλείστον ομοιόμορφη με τη μέση τιμή του να ανέρχεται στα **222.195** sec^{-1} , μια τιμή πολύ κάτω των 10.000 sec^{-1} που είναι και το μέγιστο επιτρεπτό όριο σε κανονικές συνθήκες. Ωστόσο, κάποιες αμυδρές διχρωμίες σε όλη την έκταση του μορφοποιημένου αντικειμένου οι οποίες γίνονται εντονότερες στις κάτω γωνίες του ενισχύουν τις εκτιμήσεις που έγιναν και στο αποτέλεσμα **Melt Front Temperature** περί πιθανού σχηματισμού γραμμών ροής. Κατά συνέπεια, η λήψη μέτρων όπως η αντικατάσταση της ψυχρής πύλης εισόδου με την αντίστοιχη θερμή είναι κάτι που θα πρέπει να εξεταστεί.

❖ **Viscosity (log)**

Εμφανίζει την κατανομή του ιξώδους (viscosity) του πολυμερούς τήγματος την τρέχουσα χρονική στιγμή. Το ιξώδες, τουτέστιν η επιφανειακή τάση, είναι μια σημαντική ιδιότητα των ρευστών η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η αντίσταση στην ροή. Στα πολυμερή δομικά υλικά, η θερμοκρασία του τήγματος (melt temperature) και ο ρυθμός διάτμησης (shear rate) επηρεάζουν την τιμή του ιξώδους. Το ιξώδες είναι συνεχές για χαμηλό ρυθμό διάτμησης και μειώνεται όταν ο ρυθμός διάτμησης ή η θερμοκρασία αυξάνονται.

❖ **Total Velocity**

Η συνολική ταχύτητα εκφράζει το μήκος ή αλλιώς τη *νόρμα* του διανύσματος της ταχύτητας την τρέχουσα χρονική στιγμή. Αυτό το δεδομένο μπορεί να δώσει μια ιδέα αναφορικά με το πώς το πολυμερές τήγμα ρέει εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλούπιού την τρέχουσα χρονική στιγμή.

❖ **X, Y, Z Velocity**

Εμφανίζει τις συνιστώσες της ταχύτητας του πολυμερούς τήγματος στις διευθύνσεις X, Y, και Z του μορφοποιημένου αντικειμένου. Η αρνητική τιμή υποδηλώνει την ταχύτητα στην αντίθετη κατεύθυνση.

❖ **Velocity Vector**

Εμφανίζει το διάνυσμα της ταχύτητας του πολυμερούς τήγματος την τρέχουσα χρονική στιγμή.

❖ **Volumetric Shrinkage**

Απεικονίζει την κατανομή της ποσοστιαίας μεταβολής του όγκου του μορφοποιημένου αντικειμένου την τρέχουσα χρονική στιγμή λόγω αλλαγής των ογκομετρικών ιδιοτήτων (PVT properties) του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού καθώς αυτό ψύχεται σταδιακά. Η βαθμιαία ψύξη ξεκινά από υψηλής τάξεως θερμοκρασίες και πιέσεις και καταλήγει σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία δωματίου. Εφόσον η ρύθμιση “Extend Packing Calculation to end of cooling” ενεργοποιείται κατά την παραμετροποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας, τότε ο υπολογισμός της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς διενεργείται έπειτα από συνυπολογισμό των φάσεων συμπίεσης και ψύξης, με την τελική τιμή της συρρίκνωσης να αναφέρεται στο τέλος της φάσης ψύξης (End Of Cooling stage – EOC).

Όταν το ποσοστό αυτό λαμβάνει θετικές τιμές, τότε πρόκειται για ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς δομικού υλικού. Αντιθέτως, όταν λαμβάνει αρνητικές τιμές, τότε πρόκειται για ογκομετρική διαστολή του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς. Οποσδήποτε, η ογκομετρική διαστολή είναι η κύρια υπαίτια για τον σχηματισμό προεκτάματος (flash) στο μορφοποιημένο αντικείμενο, γεγονός το οποίο δημιουργεί προβλήματα κατά την εξόλκευση του τελικού προϊόντος έγχυσης από το καλούπι.

Ασφαλώς, στις βέλτιστες συνθήκες επιδιώκεται η εξασφάλιση της ομοιόμορφης ογκομετρικής συρρίκνωσης. Τονίζεται δε ότι η ομοιομορφία της ογκομετρικής συρρίκνωσης είναι βαρύνουσα σημασίας σε σχέση με το εύρος της. Σε γενικές γραμμές, η ανομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση προκαλείται τόσο από τη μη ομαλή κατανομή της πίεσης ή/και της θερμοκρασίας κατά τις φάσεις πλήρωσης και συμπίεσης όσο και από τη μη ομοιογενή ψύξη του πολυμερούς τήγματος. Σε κάθε περίπτωση, η ανομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση μπορεί να οδηγήσει :

- ο στον σχηματισμό βαθουλωμάτων (sink marks) και κενών (voids) στο τελικό προϊόν έγχυσης,
- ο στη στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης μετά την εξόλκευσή του και
- ο στην εκδήλωση εσωτερικής υπολειμματικής τάσης (residual stress) στο τελικό προϊόν έγχυσης εφόσον η τάση αυτή δεν μετασχηματίζεται σε παραμόρφωση.

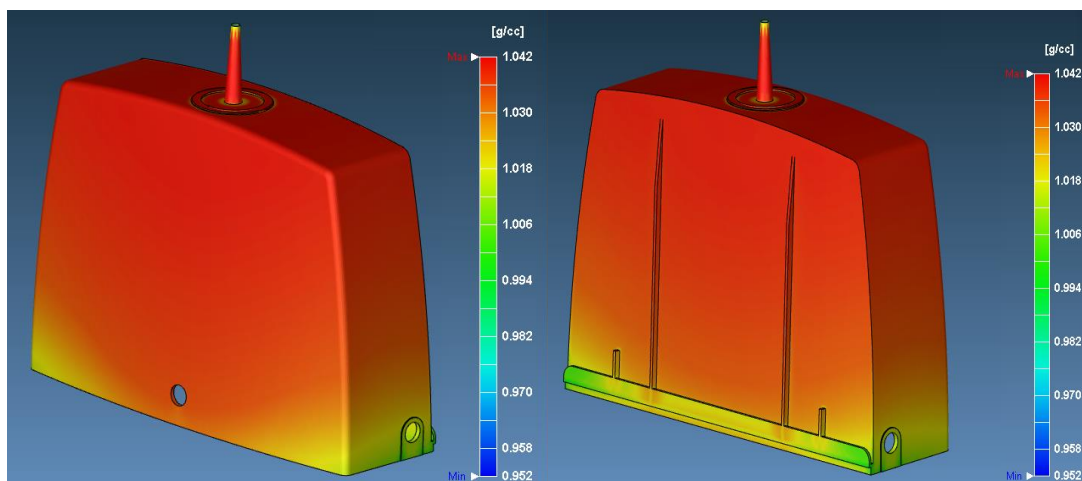
❖ **Cooling Time**

Εμφανίζει τον εκτιμώμενο χρόνο από το τέλος της φάσης πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλούπιού με πολυμερές τήγμα (End Of Filling stage – EOF) έως την χρονική στιγμή κατά την οποία η θερμοκρασία του μορφοποιημένου αντικειμένου συμπίπτει με την θερμοκρασία εξόλκευσής του από το καλούπι του (eject temperature). Συνεπώς, στο εν λόγω αποτέλεσμα οι εμφανιζόμενες με διαφορετικό χρώμα τιμές στην κατακόρυφη στήλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτης αναφορικά με την ύπαρξη μεμονωμένων σημείων αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) σε όλη την έκταση του χυτευμένου πολυμερούς, λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι παχύτερες περιοχές του αντικειμένου απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο ψύξης.

Σημειώνεται ότι αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση ο καθορισμός ενός λογικού χρόνου ψύξης (cooling time) στις ρυθμίσεις των συνθηκών της κατασκευαστικής διεργασίας ούτως ώστε ο υπολογισμός του εκτιμώμενου χρόνου ψύξης να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικός και ουσιώδης.

❖ **Density**

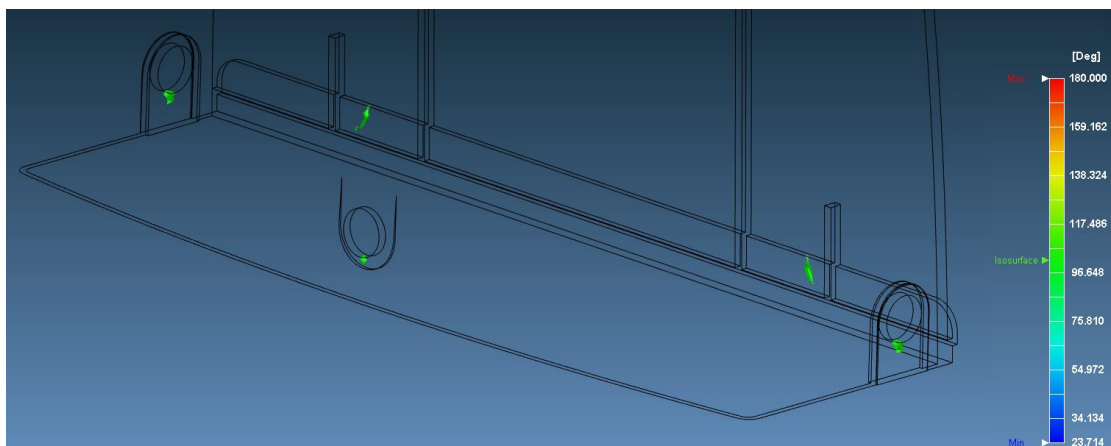
Εμφανίζει την κατανομή της πυκνότητας του πολυμερούς τήγματος την τρέχουσα χρονική στιγμή. Γενικά, οι περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου που έχουν ήδη ψυχθεί θα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα σε αντίθεση με τις περιοχές που εξακολουθούν να είναι υδαρείς οπότε και θα έχουν μικρότερη πυκνότητα. Πιθανό πρόβλημα εξαιτίας αυτής της ανομοιόμορφης κατανομής της πυκνότητας είναι η στρέβλωση (warpage) του τελικού προϊόντος έγχυσης. Επί του παρόντος, στο προϊόν έγχυσης που μελετάται η πυκνότητα κατανέμεται ομοιόμορφα με εξαίρεση τις κάτω γωνίες του όπου θα υπάρξει και η μεγαλύτερη στρέβλωση όπως θα διαπιστωθεί προσεχώς.



Σχήμα 4-55. Η κατανομή της πυκνότητας είναι ομοιόμορφη με εξαίρεση τις κάτω γωνίες του προϊόντος έγχυσης όπου θα υπάρξει και η μεγαλύτερη στρέβλωση όπως θα διαπιστωθεί προσεχώς.

❖ **Welding Angle**

Εκφράζει τη γωνία κατά την οποία συγχωνεύονται δύο μέτωπα ροής του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (**Σχήμα 4-56**). Με τη χρήση του εργαλείου Isosurface είναι δυνατή η πλήρης τομογραφία μιας γραμμής συγκόλλησης προκειμένου να εξεταστεί επακριβώς η μορφή των επιμέρους πεπερασμένων στοιχείων σε αυτή την περιοχή του μορφοποιημένου αντικειμένου. Υπογραμμίζεται ότι γωνία συνάντησης (θ) μικρότερη των 135° οδηγεί σε έντονες γραμμές συγκόλλησης (weld lines) που μειώνουν τη μηχανική αντοχή ενός προϊόντος έγχυσης κατά **40** έως **90** %.



Σχήμα 4-56. Πλήρης τομογραφία των γραμμών συγκόλλησης προκειμένου να εξεταστεί επακριβώς η μορφή των επιμέρους πεπερασμένων στοιχείων στις αντίστοιχες περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου.

❖ **Molten Core**

Εμφανίζει την ισοπαραμετρική επιφάνεια του στερεοποιημένου πολυμερούς τήγματος την τρέχουσα χρονική στιγμή. Σε αυτήν εμφανίζονται κατά τόπους εσώκλειστες περιοχές όπου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη συγκριτικά με τη θερμοκρασία του στερεοποιημένου πολυμερούς όπως αυτή καθορίστηκε κατά την παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Με απλά λόγια, με τα ευρήματα του εν λόγω αποτελέσματος μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με τις περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου όπου το υλικό εξακολουθεί να είναι υδαρές οπότε το αντικείμενο δεν μπορεί ακόμη να εξολκευθεί.

Γενικά, οι μεμονωμένες περιοχές αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) εμφανίζονται σε εκείνα τα τοιχώματα του μορφοποιημένου αντικειμένου των οποίων το πάχος είναι αυξημένο. Με το πέρας της φάσης της πλήρωσης, οι περιοχές αυτές είναι προφανώς πολλές και μεγάλες σε έκταση.

❖ **Frozen Layer Ratio**

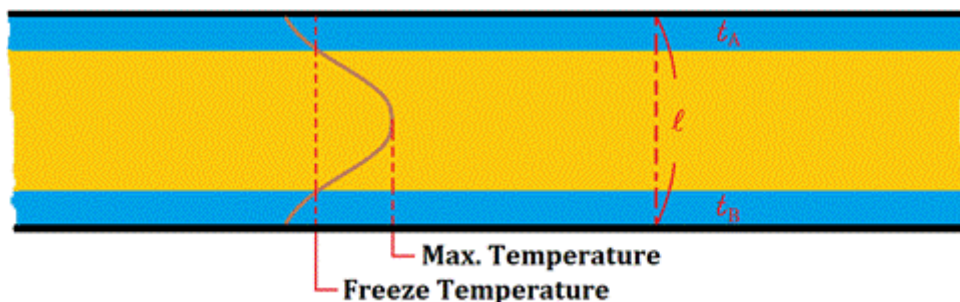
Εμφανίζει το ποσοστό του όγκου του στερεοποιημένου πολυμερούς πλησίον της επιφάνειας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού συνυπολογίζοντας το πάχος του μορφοποιημένου αντικειμένου την τρέχουσα χρονική στιγμή. Η τιμή αυτή θα φτάσει το **100 %** με την πάροδο του χρόνου, ήτοι :

$$((t_A + t_B) / l) 100\%,$$

όπου :

t_A είναι το πάχος του ανώτερου στερεοποιημένου στρώματος πολυμερούς, t_B είναι το πάχος του κατώτερου στερεοποιημένου στρώματος πολυμερούς και l είναι το πάχος της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

Στο κάτωθι **Σχήμα 4-57** αποδίδεται γραφικά η αναλογία του στερεοποιημένου στρώματος. Συγκεκριμένα, με μπλε χρώμα αποδίδεται το στερεοποιημένο πολυμερές και με κίτρινο το ρευστό πολυμερές.



Σχήμα 4-57. Γραφική απεικόνιση της αναλογίας του στερεοποιημένου στρώματος όπου με μπλε χρώμα αποδίδεται το στερεοποιημένο πολυμερές και με κίτρινο το ρευστό πολυμερές.

Χάριν αποσαφήνισης της περιγραφείσας διαδικασίας, καθώς το πολυμερές τήγμα ψύχεται κατά τη διεργασία της έγχυσης, η στερεοποίηση του πολυμερούς διακρίνεται από τις στερεοποιημένες στρώσεις του πλησίον των εξωτερικών επιφανειών της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού. Η αύξηση στο πάχος του στερεοποιημένου πολυμερούς μειώνει τη διατομή κατά μήκος της διαδρομής ροής και επιπλέον αυξάνει την αντίσταση στη ροή και την πίεση στο κάθετο κανάλι (sprue) του συστήματος διανομής του καλουπιού. Ασφαλώς, το παχύτερο στρώμα στερεοποιημένου πολυμερούς θα έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη πιθανότητα σχηματισμού βαθουλωμάτων (sink marks) αλλά συγχρόνως μεγαλύτερη πιθανότητα σχηματισμού κενών (voids) στο τελικό αντικείμενο, μια και το στερεοποιημένο πολυμερές έχει μεγαλύτερη αντοχή στην παραμόρφωση.

❖ **Max. Temperature**

Εμφανίζει τη μέγιστη θερμοκρασία στην κατεύθυνση του πάχους των τοιχωμάτων του μορφοποιημένου αντικειμένου την τρέχουσα χρονική στιγμή. Η μέγιστη θερμοκρασία υπολογίζεται παρεμβάλλοντας τις τιμές της θερμοκρασίας όλων των πεπερασμένων στοιχείων που βρίσκονται πλησιέστερα προς την πορεία κατά την κατεύθυνση του πάχους των τοιχωμάτων του αντικειμένου.

Το εν λόγω αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έναν γρήγορο έλεγχο αναφορικά με την πιθανότητα τοπικής συσσώρευσης θερμότητας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Η τοπική συσσώρευση θερμότητας προκαλείται από την ανομοιογενή ψύξη η οποία με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιογενή ογκομετρική συρρίκνωση. Σε αυτή την περίπτωση ενδείκνυται η τροποποίηση της διάταξης των καναλιών ψύξης με στόχο την εξισορρόπηση της ψύξης του μορφοποιημένου αντικειμένου.

❖ **Center Temperature**

Εμφανίζει την θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) στην περιοχή της γραμμής διαχωρισμού του καλουπιού κατά την κατεύθυνση του πάχους των τοιχωμάτων του μορφοποιημένου αντικειμένου την τρέχουσα χρονική στιγμή. Η εν λόγω θερμοκρασία υπολογίζεται από την παρεμβολή των τιμών θερμοκρασίας των κόμβων που σχηματίζουν το στοιχείο στο κέντρο της διαδρομής κατά την κατεύθυνση του πάχους των τοιχωμάτων του αντικειμένου. Πρόκειται για έναν δείκτη παροχής θερμικής ενέργειας του φρέσκου θερμού τήγματος του οποίου η τιμή αν είναι πολύ χαμηλή, τότε μπορούν να ταυτοποιηθούν τυχόν επιβραδύνσεις ή παύσεις στη ροή του τήγματος (flow hesitation), όπως επίσης ελλειπίες πληρώσεις της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (short shot).

❖ **Average Temperature**

Εμφανίζει τη μέση θερμοκρασία στην κατεύθυνση του πάχους των τοιχωμάτων του μορφοποιημένου αντικειμένου την τρέχουσα χρονική στιγμή. Κάθε τιμή της μέσης θερμοκρασίας που εμφανίζεται στην επιφάνεια της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού υπολογίζεται σταθμίζοντας τις τιμές της θερμοκρασίας σε ένα ορισμένο αριθμό μη ομοιόμορφα διαχωρισμένων σημείων κατά μήκος της κατεύθυνσης του πάχους των τοιχωμάτων του αντικειμένου· οι τιμές της θερμοκρασίας σε αυτά τα σημεία παρεμβάλλονται από τους παρακείμενους κόμβους τους.

Η εξίσωση για τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας λαμβάνει υπόψιν τις επιδράσεις της ψύξης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού και της ιξώδους θέρμανσης του πολυμερούς τήγματος (viscous heating). Επομένως, η μέση θερμοκρασία μπορεί να είναι αντιπροσωπευτική της θερμοκρασίας του μορφοποιημένου αντικειμένου. Εξάλλου, το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξεταστεί αν υπάρχουν τυχόν μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε σημάδια καύσης (burn marks) ή σε ελλιπή πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης (short shot) εξαιτίας επιβραδύνσεων ή παύσεων στη ροή του πολυμερούς τήγματος (flow hesitation) ή λόγω υπερβολικά γρήγορης ψύξης του καλουπιού.

❖ **Bulk Temperature**

Εμφανίζει την σταθμισμένης ταχύτητας μέση θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος στην κατεύθυνση του πάχους του προϊόντος έγχυσης την τρέχουσα χρονική στιγμή. Σε αυτό το αποτέλεσμα, η συνεισφορά της θερμοκρασίας από το στερεοποιημένο στρώμα πολυμερούς παραμελείται. Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να παρατηρηθεί η επίδραση της μεταφοράς θερμότητας και της ιξώδους θέρμανσης (viscous heating). Ως εκ τούτου, είναι δυνατό να καταδειχθεί πώς η μεταφορά θερμότητας επηρεάζει την κατανομή της θερμοκρασίας στις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όπου παρατηρούνται παύσεις στη ροή του τήγματος (flow hesitation) ή στις περιοχές όπου επιδρά άμεσα η ιξώδης θέρμανση. Γενικά, η κατανομή του κύριου όγκου της θερμοκρασίας δύναται να αντικατοπτρίζει την τάση της διαδρομής ροής και επομένως την πραγματική πορεία της μετάδοσης της πίεσης.

❖ **Max. Cooling Time**

Εμφανίζει τον μέγιστο χρόνο ψύξης στην κατεύθυνση του πάχους των τοιχωμάτων του μορφοποιημένου αντικειμένου την τρέχουσα χρονική στιγμή. Ο χρόνος ψύξης εκτιμάται από το τέλος της φάσης συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (End Of Packing stage – EOP) έως την χρονική στιγμή κατά την οποία η θερμοκρασία του μορφοποιημένου αντικειμένου συμπίπτει με την θερμοκρασία εξόλκευσής του από το καλούπι (eject temperature).

❖ **Max. Volume Shrinkage**

Εμφανίζει τη μέγιστη ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς δομικού υλικού σε όλη την έκταση του πάχους των τοιχωμάτων του μορφοποιημένου αντικειμένου την τρέχουσα χρονική στιγμή. Όταν μάλιστα εμφανίζονται κατά τόπους υψηλές θετικές τιμές, αυτό σημαίνει ότι είναι πιθανή η εμφάνιση βαθουλωμάτων (sink marks) ή κενών (voids) στο τελικό προϊόν έγχυσης σε συνάρτηση με το πάχος των στρωμάτων που έχουν ήδη ψυχθεί.

❖ **Average Velocity Vector**

Εμφανίζει το μέσο διάνυσμα της ταχύτητας κατά την κατεύθυνση του πάχους των τοιχωμάτων του μορφοποιημένου αντικειμένου την τρέχουσα χρονική στιγμή. Δίνει τη δυνατότητα γρήγορης επισκόπησης της ταχύτητας ροής σε όλη την έκταση του μορφοποιημένου αντικειμένου.

❖ **Particle Tracer (From Inlet)**

Εμφανίζει την κίνηση των σωματιδίων του πολυμερούς τήγματος που απελευθερώνονται κατά την εισροή του τήγματος στο σύστημα διανομής και κατ' επέκταση στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού (σχήμα). Μπορεί να απεικονίσει τη ροϊκή συμπεριφορά του τήγματος με συγκεκριμένες πληροφορίες (όπως λόγου χάρη η θερμοκρασία) που παρέχονται ταυτόχρονα.

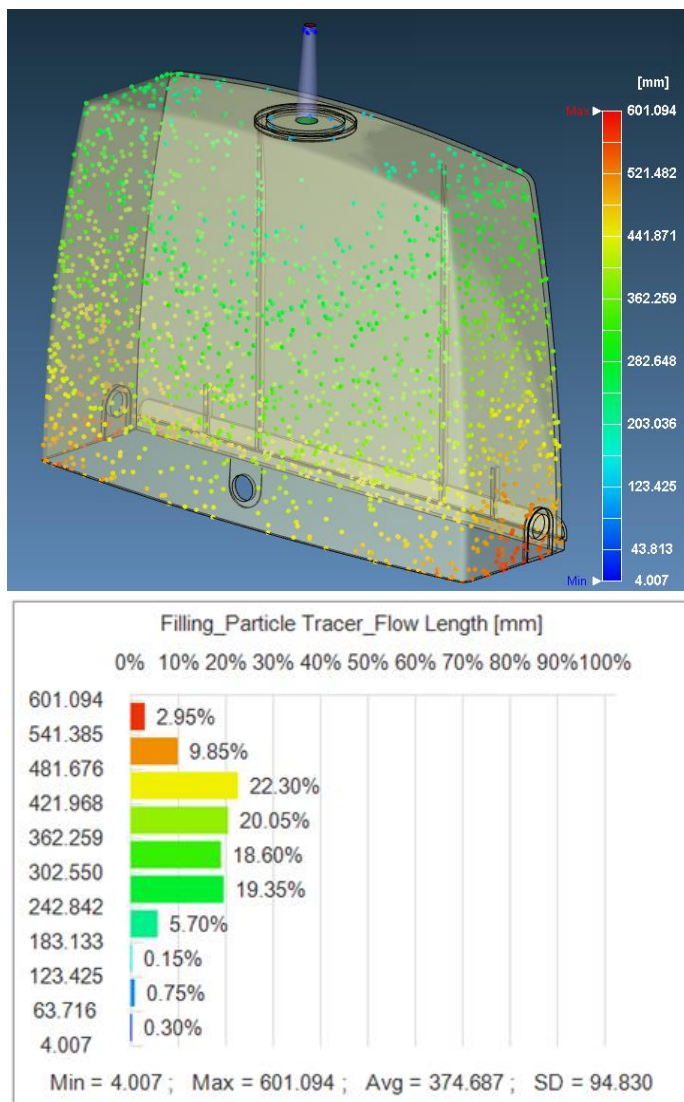
Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του εν λόγω αποτελέσματος συγκαταλέγονται :

- ✓ η γενική συμπεριφορά της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού ως προς την πλήρωσή της με πολυμερές τήγμα καθώς τα δεδομένα των σωματιδίων του τήγματος ενημερώνονται κάθε φορά,
- ✓ η οπτικοποίηση της διέλευσης του πολυμερούς τήγματος μέσα από το σύστημα διανομής του καλουπιού,
- ✓ η θέαση της επίδρασης τόσο της συμπιεστότητας (compressible flow) όσο και του στροβιλισμού της ροής (turbulent flow) στο τελικό αποτέλεσμα με την ολοκλήρωση των φάσεων της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα και της συμπίεσης του τήγματος στο εσωτερικό της κοιλότητας και
- ✓ η θέαση της αντιστροφής της ροής του πολυμερούς τήγματος προς το ακροφύσιο κατά τη φάση της συμπίεσης του τήγματος στο εσωτερικό της κοιλότητας μορφοποίησης ενώ η πίεση συγκράτησης (packing pressure) αλλάζει.

Ειδικότερα, οι σκοπίες από τις οποίες μπορεί να εξεταστεί το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι οι ακόλουθες :

- **Flow Length**

Δείχνει την απόσταση που κάθε σωματίδιο του πολυμερούς τήγματος διανύει κατά την είσοδο του τήγματος στην κοιλότητα μορφοποίησης.



Σχήμα 4-58. Η απόσταση που κάθε σωματίδιο του πολυμερούς τήγματος διανύει κατά την είσοδο του τήγματος στην κοιλότητα μορφοποίησης με το μέγιστο μήκος ροής να ανέρχεται στα **601.094** mm.

- **Total Velocity**

Δείχνει το μέγεθος της ταχύτητας κάθε σωματιδίου.

- **Pressure**

Δείχνει την πίεση κάθε σωματιδίου.

- **Temperature**

Δείχνει την θερμοκρασία κάθε σωματιδίου.

- **Elapsed Time**

Δείχνει την χρονική διάρκεια κατά την οποία ένα σωματίδιο έχει παραμείνει εντός της κοιλότητας μορφοποίησης αφού απελευθερώθηκε κατά την εισροή του τήγματος εντός της κοιλότητας.

- **Release Time**

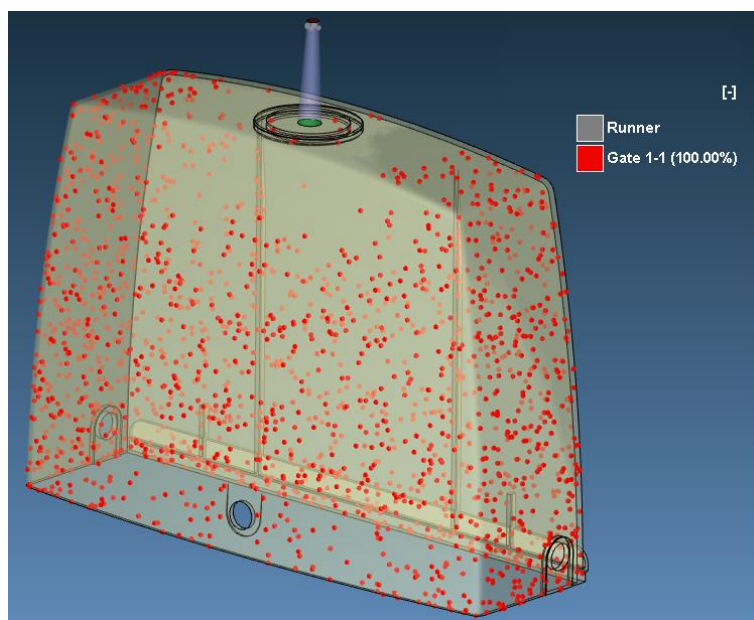
Δείχνει την συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά την οποία ένα σωματίδιο του τήγματος απελευθερώθηκε κατά την εισροή του τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Αυτή η τιμή υπολογίζεται αφαιρώντας την χρονική διάρκεια παραμονής του σωματιδίου εντός της κοιλότητας μορφοποίησης (elapsed time) από το χρονικό βήμα του τρέχοντος αποτελέσματος, δηλαδή :

Χρόνος απελευθέρωσης = (τρέχον χρονικό βήμα) - (χρόνος παραμονής σωματιδίου)

Για παράδειγμα, εάν ο χρόνος πλήρωσης (filling time) είναι 5 δευτερόλεπτα και η χρονική διάρκεια παραμονής του σωματιδίου εντός της κοιλότητας μορφοποίησης (elapsed time) ισούται με 2 δευτερόλεπτα, τότε ο χρόνος απελευθέρωσης του σωματιδίου (release time) θα είναι 3 δευτερόλεπτα.

- **Gate ID**

Δείχνει μέσα από ποια πύλη εισόδου διέρχεται κάθε σωματίδιο του τήγματος απεικονίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την συμβολή κάθε πύλης στο τελικό αποτέλεσμα (**Σχήμα 4-59**).



Σχήμα 4-59. Όλα τα σωματίδια του πολυμερούς τήγματος διέρχονται από τη μία και μοναδική πύλη εισόδου τύπου sprue η οποία και συμβάλλει αποκλειστικά στο τελικό αποτέλεσμα.

❖ Particle Tracer (Weldline)

Οπτικοποιεί τα φαινόμενα κίνησης των γραμμών συγκόλλησης (weld lines) που προκαλούνται από την ώθηση των μετώπων ροής του πολυμερούς τήγματος κατά τις μεταξύ τους συζεύξεις εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Σίγουρα, ως πλεονέκτημα του εν λόγω αποτελέσματος θεωρείται η δυνατότητα που δίδει στον μηχανικό για πιο στοχευμένη μελέτη των γραμμών συγκόλλησης (weld lines) και των υπορροών (underflows). Πιο συγκεκριμένα, οι σκοπιές από τις οποίες μπορεί να εξεταστεί το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι οι **Flow Length**, **Total Velocity**, **Pressure**, **Temperature**, **Elapsed Time** και **Release Time**.

❖ Flow Induced Residual Stress

- **Residual Stress XX / YY / ZZ / XY / XZ / YZ**

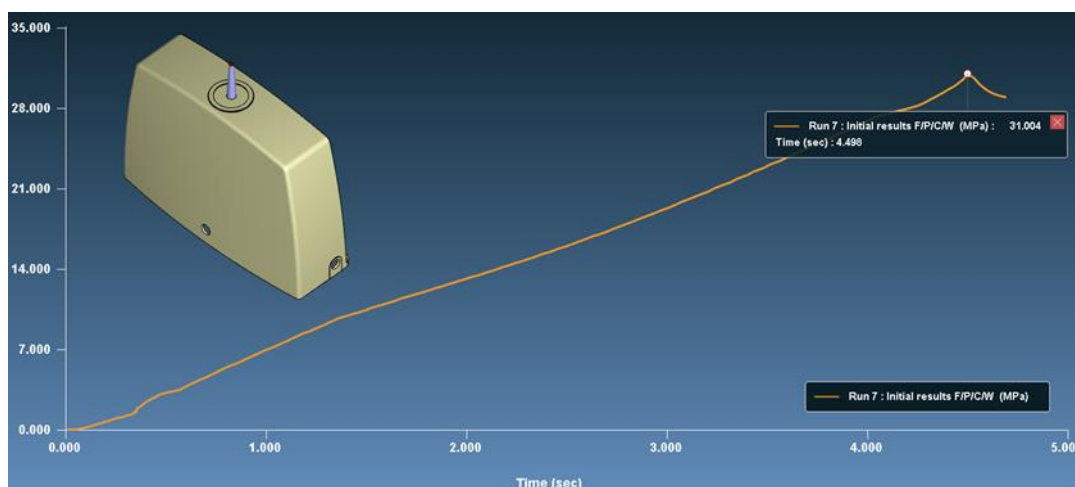
Απεικονίζει τις XX, YY, ZZ, XY, XZ και YZ συνιστώσες της θερμικής υπολειμματικής τάσης στο εσωτερικό του μορφοποιημένου αντικειμένου.

Η θερμικά επαγόμενη υπολειμματική τάση οφείλεται στην ανομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση. Υψηλότερη τιμή της θερμικής υπολειμματικής τάσης συνεπάγεται την πρόκληση κενών (voids) στο τελικό προϊόν έγχυσης. Επομένως, για την περιστολή της μπορεί, ανάμεσα στα υπόλοιπα, να τροποποιηθεί το σύστημα ψύξης του καλουπιού ώστε να εξαλειφθεί η ανομοιομορφία της ογκομετρικής συρρίκνωσης.

❖ XY Curve

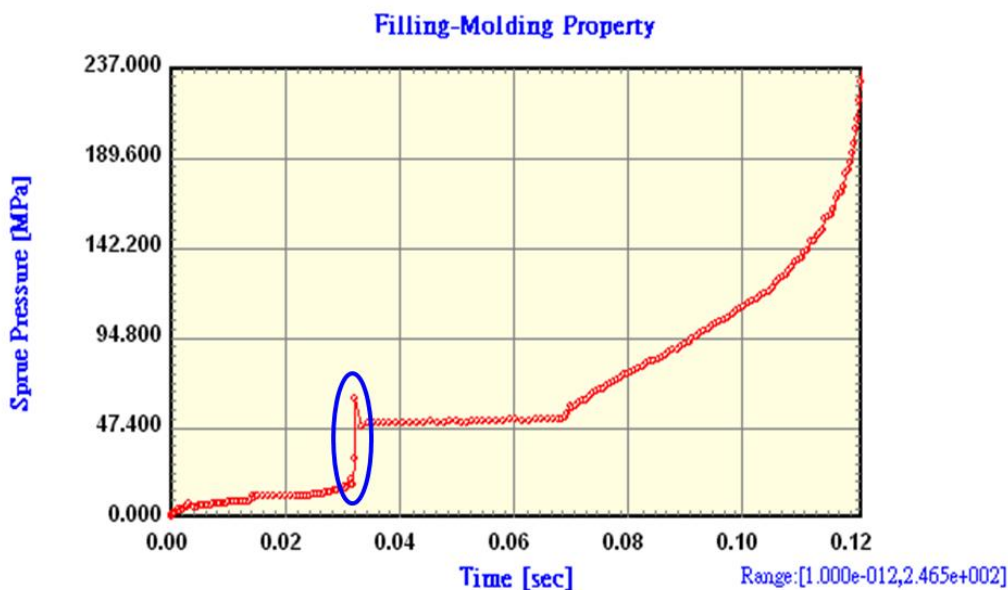
- **Sprue Pressure**

Απεικονίζει σε διάγραμμα πίεσης – χρόνου (MPa – sec) την ανάπτυξη της πίεσης στο κάθετο κανάλι (sprue) του συστήματος διανομής (runner system) του καλουπιού ενόσω διαρκεί η φάση της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα. Αναγιγνώσκοντας σωστά την καμπύλη του συγκεκριμένου διαγράμματος μπορεί να αποσαφηνιστεί πλήρως η τάξη μεγέθους της απαιτούμενης πίεσης έγχυσης (injection pressure) κατά τη φάση της πλήρωσης (**Σχήμα 4-60**).



Σχήμα 4-60. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου. Η καμπύλη πίεσης εξελίσσεται ομαλά χωρίς απότομες μεταβολές με τη μέγιστη πίεση έγχυσης να ισούται με **31.004 MPa** τη χρονική στιγμή **4.498 sec**.

Συνεπώς, στην περίπτωση που η καμπύλη της πίεσης δεν εξελίσσεται ομαλά καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας και αντ' αυτού παρατηρούνται απότομες μεταβολές, τότε είναι απαραίτητο να γίνει έλεγχος για την καταλληλότητα του συστήματος διανομής (πύλες εισόδου, αγωγοί διανομής κλπ). Εάν, ωστόσο, η καμπύλη της πίεσης είναι εν γένει ομαλή πλην μιας απότομης μεταβολής σχετικά στην αρχή (**Σχήμα 4-61**), τότε δεν συντρέχει λόγος ανησυχίας καθώς αυτή υποδηλώνει την είσοδο του πολυμερούς τήγματος στην κοιλότητα μορφοποίησης.

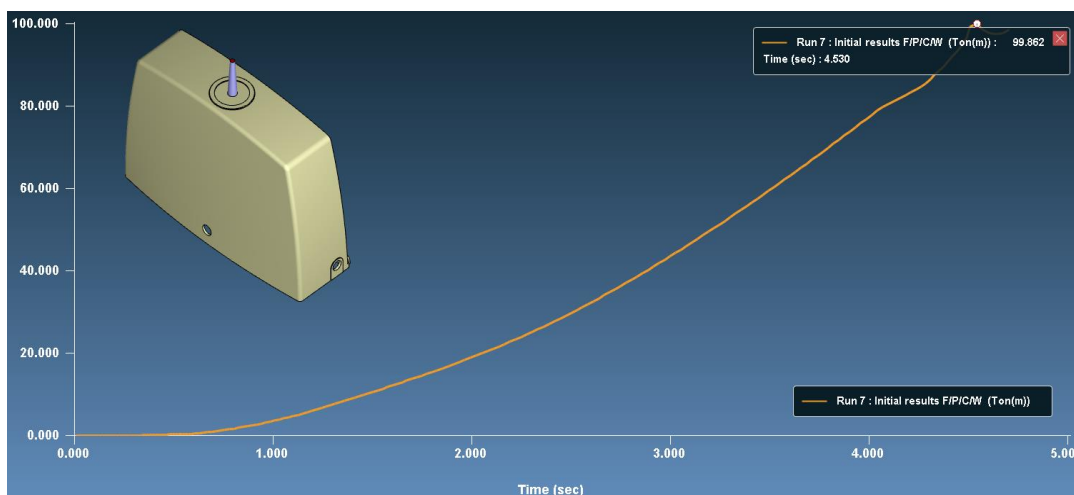


Σχήμα 4-61. Απότομη μεταβολή σχετικά στην αρχή της καμπύλης της πίεσης που υποδηλώνει την είσοδο του πολυμερούς τήγματος στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού.

Ακόμη, εάν η καμπύλη της πίεσης αυξάνεται δραματικά, τότε η διάμετρος των πυλών εισόδου (gates) είναι εξαιρετικά μικρή. Συμπληρωματικά με αυτή τη διαπίστωση, εφόσον η καμπύλη της πίεσης παραμένει στο επίπεδο της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης έγχυσης, τότε ενδεχομένως να προκύψει ελλιπής πλήρωση (short shot) της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα ή να σημειωθούν κατά τόπους επιβραδύνσεις ή παύσεις στη ροή του τήγματος (flow hesitation).

- **Clamping Force**

Εμφανίζει το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η κατανομή της δύναμης σύσφιξης (clamping force) του καλουπιού σε **Ton(m)** ενόσω διαρκεί η φάση της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα. Σημειώνεται ότι η τιμή αυτή είναι η υπολογιζόμενη απαιτούμενη δύναμη σύσφιξης και όχι η δύναμη που εξάγει η μηχανή έγχυσης.



Σχήμα 4-62. Διάγραμμα δύναμης σύσφιξης – χρόνου. Η καμπύλη πίεσης εξελίσσεται ομαλά χωρίς απότομες μεταβολές με τη μέγιστη δύναμη σύσφιξης να ισούται με **99.862 Ton(m)** τη χρονική στιγμή **4.530 sec**.

Εάν η καμπύλη της δύναμης σύσφιξης δεν εξελίσσεται ομάλα καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας, τότε είναι απαραίτητο να γίνει έλεγχος για την καταλληλότητα της μονάδας σύσφιξης του καλουπιού (clamping unit) καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος να εμφανιστεί προέκταμα (flash) στο τελικό προϊόν έγχυσης. Εξάλλου, σύμφωνα με την πρότερη εμπειρία, εάν η υπολογιζόμενη δύναμη σύσφιξης είναι μεγαλύτερη από το **70 %** της μέγιστης δύναμης σύσφιξης της μηχανής έγχυσης, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το πλαστικό τήγμα να συμπιεστεί εκτός της κοιλότητας μορφοποίησης και να προκληθεί προέκταμα.

- **Flow Rate**

Εμφανίζει το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η κατανομή της ταχύτητας ροής του πολυμερούς τήγματος (flow rate) στο κάθετο κανάλι (sprue) του συστήματος διανομής (runner system) σε **cc/sec** ενόσω διαρκεί η φάση της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, το πρώτο στάδιο πλήρωσης ελέγχεται από την ταχύτητα ροής που ορίζει ο χειριστής της μηχανής έγχυσης. Συνεπώς, σε αυτό το αποτέλεσμα, η ταχύτητα ροής συνήθως παραμένει στο επίπεδο της τιμής που έχει καθοριστεί κατά την παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας στο λογισμικό Moldex3D. Εάν η προκύπτουσα ταχύτητα ροής εμφανίζεται διαφορετικά, χρειάζεται να ελεγχθεί αν η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση έγχυσης είναι πολύ χαμηλή.

- **Volume Fraction**

Εμφανίζει το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η καμπύλη του κλάσματος όγκου (volume fraction) έναντι του χρόνου πλήρωσης. Το κλάσμα όγκου δεν είναι τίποτε άλλο πέρα από το ποσοστό του όγκου του πολυμερούς τήγματος με το οποίο η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού έχει ήδη γεμίσει και που με την πάροδο του χρόνου θα φτάσει το **100 %**. Επισημαίνεται δε ότι η κλίση της εν λόγω καμπύλης αντιπροσωπεύει την ταχύτητα ροής (flow rate).

- **Total Weight**

Εμφανίζει το γράφημα του συνολικού βάρους σε γραμμάρια (g) έναντι του χρόνου πλήρωσης. Το συνολικό βάρος ορίζεται ως το βάρος του πολυμερούς τήγματος στο εσωτερικό του συστήματος διανομής (runner system) και της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Καθώς το πολυμερές τήγμα εγχέεται εντός της κοιλότητας μορφοποίησης, το συνολικό βάρος του τήγματος αυξάνεται μέχρις ότου η κοιλότητα γεμίσει εντελώς.

- **Part Weight**

Εμφανίζει το γράφημα του βάρους του παραγόμενου αντικειμένου σε γραμμάρια (g) σε σχέση με τον χρόνο πλήρωσης. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να ελεγχθεί ο ίσος καταμερισμός της ροής σε πολλαπλές κοιλότητες μορφοποίησης εφόσον η προσομοίωση περιλαμβάνει περισσότερα από ένα προϊόντα έγχυσης.

- **Flow Rate Gate**

Εμφανίζει την γραφική παράσταση της ταχύτητας ροής του πολυμερούς τήγματος (flow rate) σε κάθε πύλη εισόδου σε **cc/sec** έναντι του χρόνου πλήρωσης. Από εδώ μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με τον ισοσκελισμό της ροής στα καλούπια όπου χρησιμοποιούνται πολλαπλές πύλες εισόδου (gates) ή τον ίσο καταμερισμό της ροής στις πολλαπλές κοιλότητες μορφοποίησης που ενδεχομένως αυτά διαθέτουν. Υπενθυμίζεται ότι η ισοσκελισμένη ροή που προϋποθέτει τον κατάλληλο σχεδιασμό των πυλών εισόδου είναι ένα από τα κλειδιά για την επίτευξη βελτιστοποιημένων αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση, ο ανορθόδοξος σχεδιασμός των πυλών εισόδου μπορεί να επιφέρει κατασκευαστικές ατέλειες στα τελικά προϊόντα έγχυσης όπως ελλιπή πλήρωση (short shot), στρέβλωση (warpage) κλπ.

4.3.3.2 Τα Πρωτογενή Αποτελέσματα της Προσομοίωσης της Φάσης Συμπίεσης στο Λογισμικό Moldex3D

Η προσομοίωση της φάσης της συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού στο λογισμικό Moldex3D, μεταξύ των άλλων, έχει ως στόχο :

- ✓ την επίτευξη αποδοτικού συστήματος τροφοδοσίας,
- ✓ τον σχεδιαστικό έλεγχο και την επαλήθευση των διαστάσεων του προϊόντος έγχυσης που επίκειται να παραχθεί,
- ✓ την περιστολή ορισμένων κατασκευαστικών ατελειών του τελικού προϊόντος έγχυσης, όπως το προέκταμα (flash) και τα βαθουλώματα (sink marks),
- ✓ την πρόβλεψη και την πρόληψη αισθητικών ελαττωμάτων στο τελικό προϊόν έγχυσης και
- ✓ την πρόβλεψη του χρόνου φραγής των πυλών εισόδου από στερεοποιημένο πολυμερές (gate freeze time), της απαιτούμενης δύναμης σύσφιξης (clamping force), της κατάλληλης πίεσης συμπίεσης (packing pressure) και του απαραίτητου χρόνου συμπίεσης (packing time) σε έναν κύκλο έγχυσης.

Από την σκοπιά της φάσης της συμπίεσης, αναφορικά με το προϊόν έγχυσης που μελετάται στην παρούσα διατριβή, αξίζει να γίνει ξεχωριστή μνεία για τα κάτωθι αποτελέσματα της προσομοίωσης :

❖ **Melt Front Time**

Αυτό το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της προσομοίωσης της φάσης της πλήρωσης. Σημειώνεται ότι ο εμφανιζόμενος χρόνος του μετώπου ροής (packing melt front time) είναι το άθροισμα των χρόνων πλήρωσης και συμπίεσης (filling/packing time) όπως ακριβώς έχουν υπολογιστεί στην προσομοίωση βάσει του σχετικού καθορισμού που έχει πραγματοποιηθεί κατά την παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Επί του παρόντος, για το προϊόν έγχυσης που μελετάται το άθροισμα των χρόνων πλήρωσης και συμπίεσης ανέρχεται σε **24.947 sec**.

❖ **Pressure**

Αυτό το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της προσομοίωσης της φάσης της πλήρωσης. Βέβαια, η κατανομή της πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού αναφέρεται στο τέλος της φάσης της συμπίεσης. Εν προκειμένω, αυτό για το οποίο πρέπει να μεριμνήσει ο μηχανικός είναι η αποφυγή της υπερβολικής συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος (overpacking) που μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση προεκτάματος (flash) στο τελικό προϊόν έγχυσης.

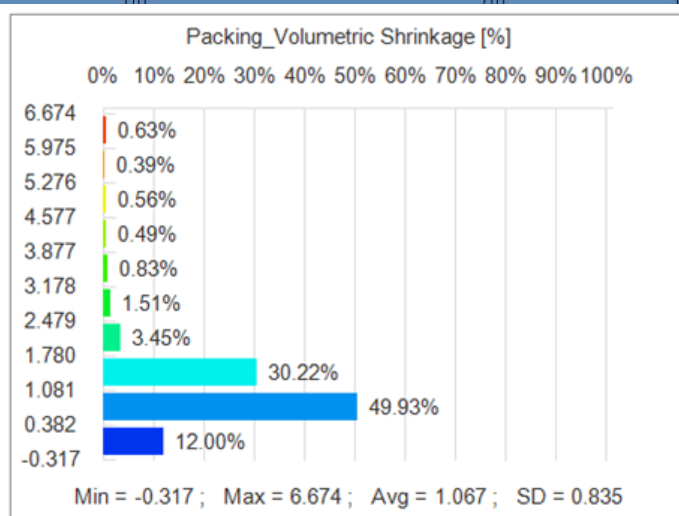
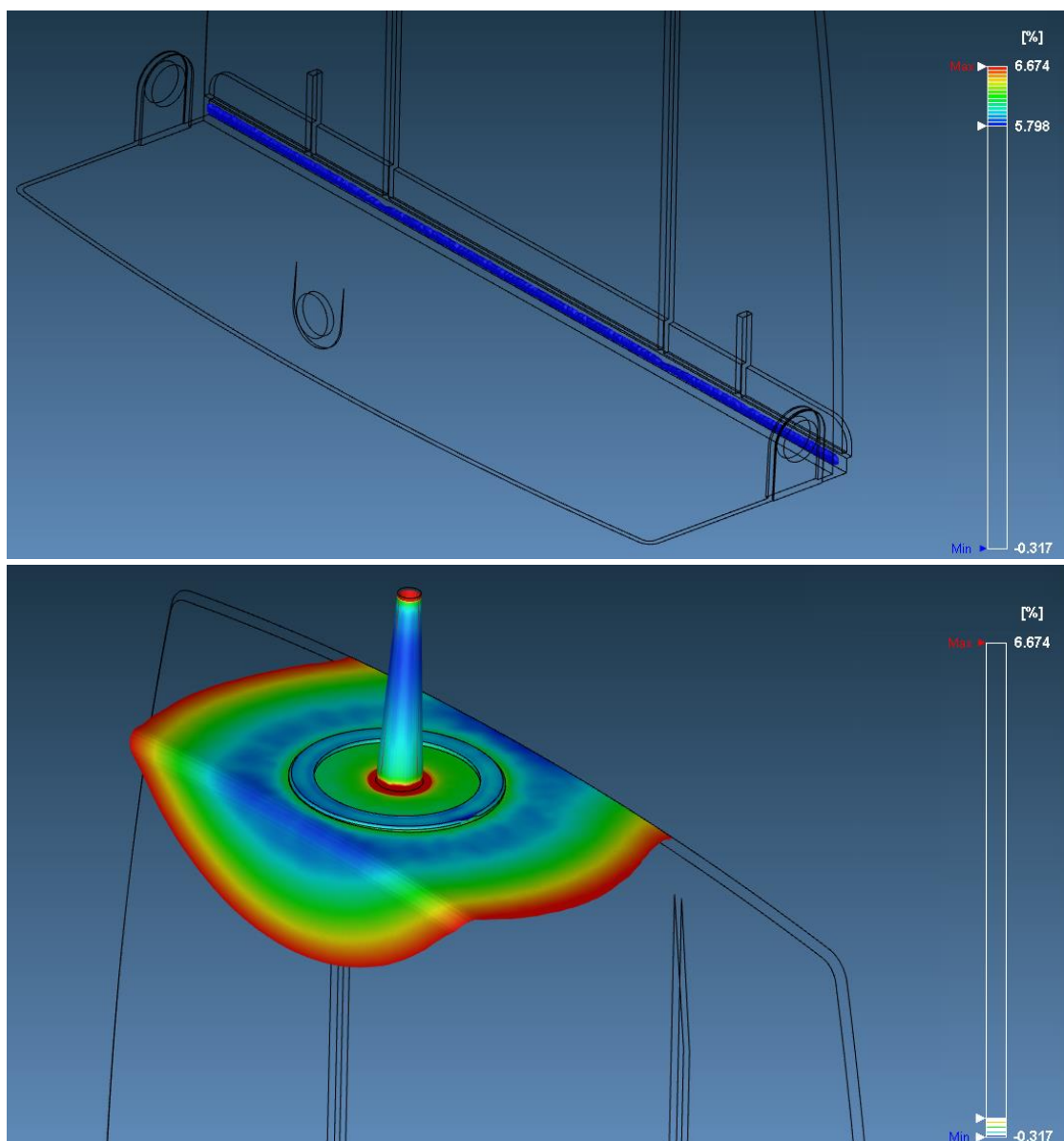
Όπως προαναφέρθηκε, τυχόν υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος είναι δυνατό να ανιχνευθεί στο αποτέλεσμα **Melt Front Time**. Ωστόσο, για την ακριβέστερη πρόβλεψη πιθανής υπερβολικής συμπίεσης του τήγματος, συνίσταται η ενδελεχής εξέταση και των πληροφοριών που δίνει το αποτέλεσμα **Pressure**. Και αυτό γιατί εάν η πίεση είναι σημαντικά υψηλότερη σε κάποιες συγκεκριμένες περιοχές του προϊόντος έγχυσης εν συγκρίσει με άλλες περιοχές, η πιθανότητα εμφάνισης υπερβολικής συμπίεσης του τήγματος σε αυτές τις περιοχές γίνεται αυτομάτως μεγαλύτερη.

❖ **Temperature**

Αυτό το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της προσομοίωσης της φάσης της πλήρωσης. Βέβαια, η κατανομή της θερμοκρασίας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού αναφέρεται στο τέλος της φάσης της συμπίεσης. Συγκρίνοντας τα δύο αποτελέσματα, αυτό που χρήζει άξιο παρατήρησης είναι το γεγονός ότι η θερμοκρασία στο τέλος της φάσης της συμπίεσης είναι χαμηλότερη.

❖ **Volumetric Shrinkage**

Η μεγαλύτερη εκτιμώμενη ποσοστιαία ογκομετρική συρρίκνωση του μορφοποιημένου αντικειμένου είναι της τάξεως του **6.674 %** και παρατηρείται σε εκείνες τις περιοχές του προϊόντος έγχυσης όπου το πάχος είναι αυξημένο (**Σχήμα 4-63** – πάνω). Προφανώς, αυτό συμβαίνει διότι στις παχύτερες διατομές συσσωρεύονται πιο εύκολα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας μια και η ψύξη του πολυμερούς τήγματος γίνεται δυσκολότερη στην ενδιάμεση περιοχή εν συγκρίσει με ό,τι συμβαίνει στις λεπτότερες διατομές. Επίσης, παρατηρείται αρνητική ογκομετρική συρρίκνωση της τάξεως του **0.317 %** στην περιοχή της τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (**Σχήμα 4-63** – κάτω). Οπωσδήποτε, το φαινόμενο αυτό πρέπει να παταχθεί καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος δημιουργίας προεκτάματος σε αυτή την περιοχή του τελικού προϊόντος με ό,τι αυτό συνεπάγεται για τη μηχανή έγχυσης αλλά και το ίδιο το προϊόν.

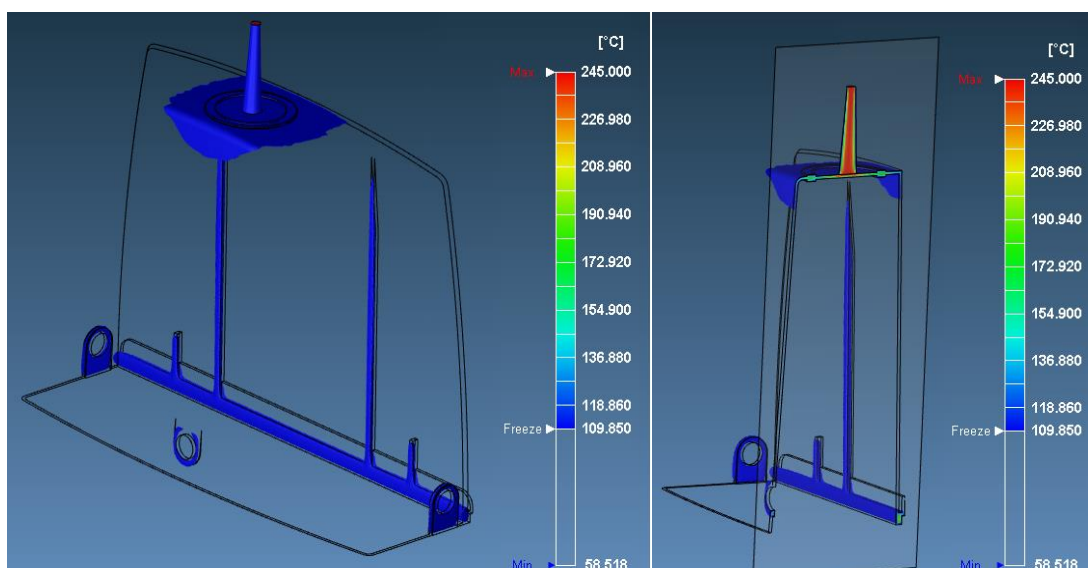


Σχήμα 4-63. Μέγιστη και ελάχιστη ογκομετρική συρρίκνωση του χυτευμένου πολυμερούς.

❖ **Molten Core**

Αυτό το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της προσομοίωσης της φάσης της πλήρωσης. Ωστόσο μόλις περαιώνεται η φάση της συμπίεσης και εφόσον η κατασκευαστική διεργασία έχει παραμετροποιηθεί κατάλληλα, οι περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου με αυξημένο θερμικό φορτίο θα πρέπει να είναι ελάχιστες (Σχήμα 4-64).

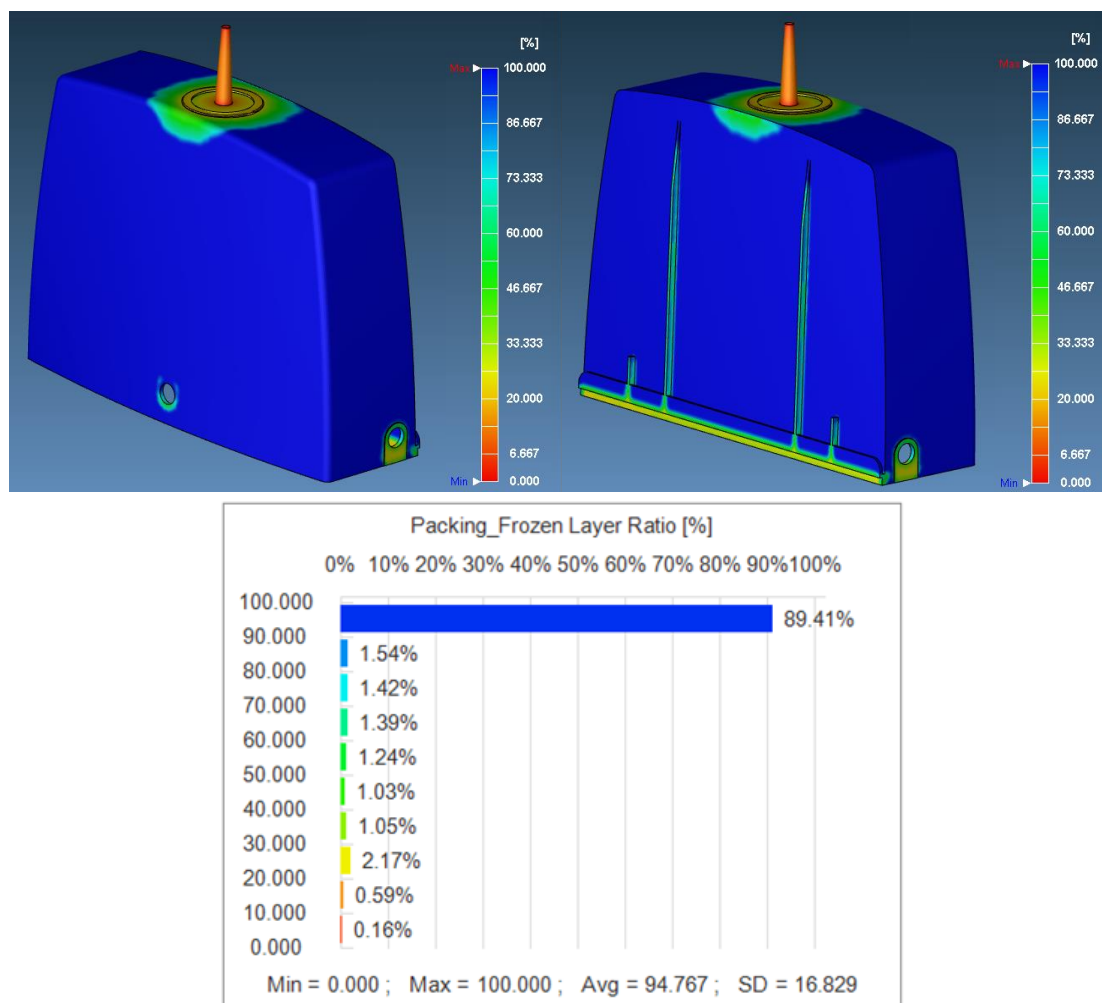
Ασφαλώς, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται στον χρόνο συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος (packing time) ώστε αυτός να είναι αποδοτικός. Ο αποδοτικός χρόνος συμπίεσης επιτυγχάνεται όταν στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα παρατηρείται ότι στερεοποιημένο πολυμερές παρεμβάλλεται μεταξύ της πύλης εισόδου και των περιοχών αυξημένου θερμικού φορτίου. Επί της ουσίας, αυτό σημαίνει ότι το πολυμέρες τήγμα δεν θα κινηθεί προς το ακροφύσιο του καλουπιού επιτείνοντας την ογκομετρική συρρίκνωση του υλικού (volumetric shrinkage). Σε αντίθετη περίπτωση, ο χρόνος συμπίεσης προφανώς δεν είναι αρκετός και χρειάζεται να αυξηθεί.



Σχήμα 4-64. Μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού μετά το πέρας της φάσης συμπίεσης. Παρατηρείται ότι η πύλη εισόδου δεν έχει φράξει ακόμη με στερεοποιημένο πολυμερές πράγμα το οποίο σημαίνει ότι χρειάζεται περαιτέρω αύξηση του χρόνου συμπίεσης καθώς στα τρέχοντα επίπεδα δεν θεωρείται αποδοτικός. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι οι πύλες εισόδου τύπου sprue μειονεκτούν ως προς την ταχύτητα στερεοποίησής τους λόγω γεωμετρίας. Συνεπώς, η αύξηση του χρόνου συμπίεσης δε μπορεί να γίνει στα πλαίσια της απόλυτης ικανοποίησης αυτού του περιορισμού. Και αυτό γιατί όσο αυξάνεται ο χρόνος συμπίεσης, τόσο περισσότερο επιβαρύνεται η χρονική διάρκεια του κύκλου έγχυσης με αποτέλεσμα να καθίσταται οικονομικά ασύμφορος από ένα σημείο και έπειτα.

❖ **Frozen Layer Ratio**

Αυτό το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της προσομοίωσης της φάσης της πλήρωσης. Συγκρίνοντας τα δύο αποτελέσματα, η αναλογία ψύξης στο τέλος της φάσης συμπίεσης, εφόσον ο χρόνος συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος (packing time) είναι επαρκής, θα πρέπει να είναι συντριπτικά μεγαλύτερη φτάνοντας το **100 %** σε όλες σχεδόν τις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.



Σχήμα 4-65. Η αναλογία ψύξης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού στο τέλος της φάσης συμπίεσης φτάνει στο **100 %** εκτός από τις περιοχές αυξημένου πάχους και την περιοχή της τροφοδοσίας.

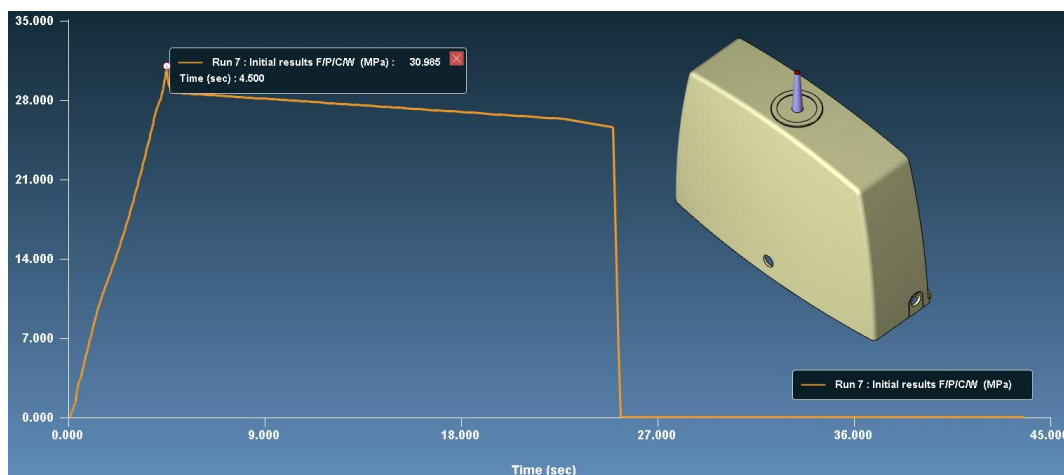
❖ *Max. Volume Shrinkage*

Αυτό το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της προσομοίωσης της φάσης της πλήρωσης. Συγκρίνοντας τα δύο αποτελέσματα, η μέγιστη ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς δομικού υλικού κατά τη φάση της συμπίεσης θα πρέπει να είναι αισθητά μικρότερη σε όλη την έκταση του μορφοποιημένου αντικειμένου πλην των περιοχών αυξημένου πάχους και των περιοχών που εμπίπτουν στην τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

❖ *XY Curve*

• *Sprue Pressure*

Απεικονίζει σε διάγραμμα πίεσης – χρόνου (MPa – sec) την ανάπτυξη της πίεσης στο κάθετο κανάλι (sprue) του συστήματος διανομής (runner system) του καλουπιού ενόσω διαρκεί η φάση της συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης.

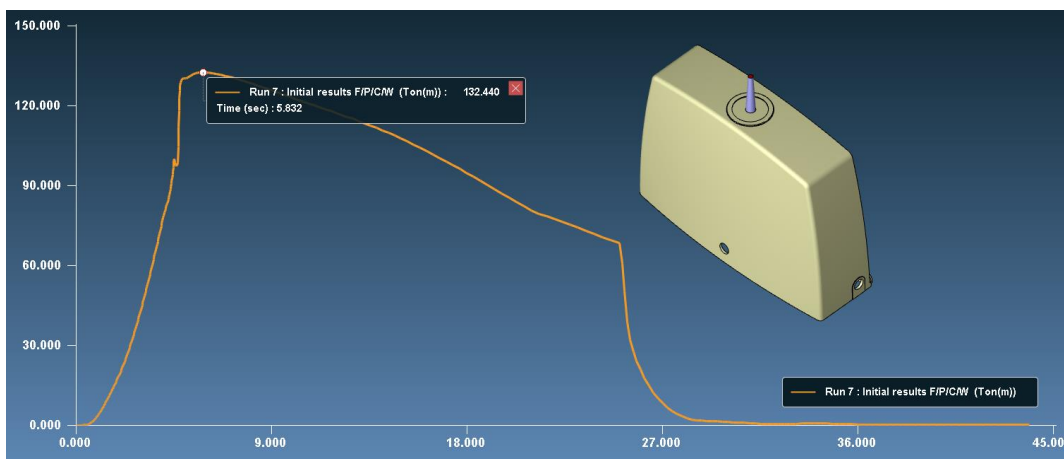


Σχήμα 4-66. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου. Η καμπύλη πίεσης εξελίσσεται ομαλά χωρίς απότομες μεταβολές μέχρι τη μέγιστη πίεση συμπίεσης η οποία ισούται με **30.985 MPa** τη χρονική στιγμή **4.5 sec**. Από εκεί και πέρα η πίεση συμπίεσης ξεκινά να φθίνει έως ότου φράξει η πύλη εισόδου με στερεοποιημένο πολυμερές οπότε και μηδενίζεται.

- **Clamping Force**

Εμφανίζει το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η κατανομή της δύναμης σύσφιξης (clamping force) του καλουπιού σε **Ton(m)** ενόσω διαρκεί η φάση της συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Σημειώνεται ότι η τιμή αυτή είναι η υπολογιζόμενη απαιτούμενη δύναμη σύσφιξης και όχι η δύναμη που εξάγει η μηχανή έγχυσης. Επομένως, αποτελεί ένα κριτήριο τόσο για την εκλογή της μηχανής έγχυσης με το καταλληλότερο μέγεθος όσο και για τον βαθμό τροποποίησης του καλουπιού. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι καθίσταται εφικτός ο περιορισμός των απαιτήσεων ως προς τη δύναμη σύσφιξης του καλουπιού για τη βελτιστοποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας.

Η δύναμη σύσφιξης λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της στη φάση της συμπίεσης. Για την ακρίβεια, μετά τη συμπίεση του τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης, η δύναμη σύσφιξης αυξάνεται καθότι η πίεση έγχυσης συνεχίζει να μεταδίδεται στην κοιλότητα. Η δε μείωσή της ξεκινά κατά το τελευταίο στάδιο της φάσης της συμπίεσης και, συγκεκριμένα, όταν η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος αρχίζει να μειώνεται (Σχήμα 4-67).

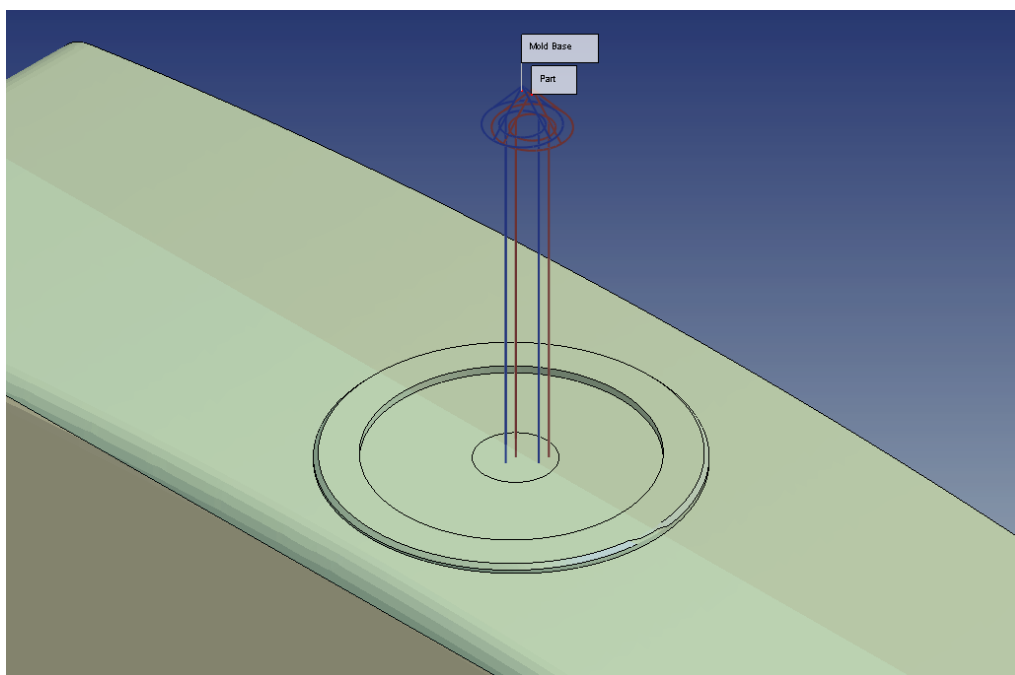


Σχήμα 4-67. Διάγραμμα δύναμης σύσφιξης – χρόνου. Η καμπύλη πίεσης φτάνει στο μέγιστο, ήτοι **132.440** Ton(m) τη χρονική στιγμή **5.832** sec και από εκεί και πέρα υποχωρεί ώστε με το πέρας της φάσης ψύξης να μηδενιστεί και το καλούπι να ανοίξει για την εξόλκευση του τελικού προϊόντος.

Όπως συμβαίνει και στην φάση της πλήρωσης, μεγάλη προσοχή απαιτείται στην καμπύλη της δύναμης σύσφιξης. Εφόσον αυτή δεν εξελίσσεται ομαλά καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας, τότε είναι απαραίτητο να γίνει έλεγχος για την καταλληλότητα της μονάδας σύσφιξης του καλουπιού (clamping unit) καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος να εμφανιστεί προέκταμα (flash) στο τελικό προϊόν έγχυσης. Εξάλλου, σύμφωνα με την πρότερη εμπειρία, εάν η υπολογιζόμενη δύναμη σύσφιξης είναι μεγαλύτερη από το **70** % της μέγιστης δύναμης σύσφιξης της μηχανής έγχυσης, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το πλαστικό τήγμα να συμπιεστεί εκτός της κοιλότητας μορφοποίησης και να προκληθεί προέκταμα.

❖ **Clamping Force Centroid**

Εμφανίζει την ακριβή θέση του κεντροειδούς της δύναμης σύσφιξης του καλουπιού (clamping force) ως προς το κεντροειδές της καλουπιέρας (moldbase). Εάν τα δύο κεντροειδή δεν ταυτίζονται, τότε υπάρχει απόκλιση μεταξύ τους που πρέπει να ληφθεί υπόψιν (**Σχήμα 4-68**).



Σχήμα 4-68. Ο μπλε κύκλος αντιπροσωπεύει το κεντροειδές της καλουπιέρας ενώ ο κόκκινος το κεντροειδές της δύναμης σύσφιξης. Παρατηρείται ότι οι δύο κύκλοι ελάχιστα δεν ταυτίζονται, οπότε υπάρχει μια μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο κεντροειδών.

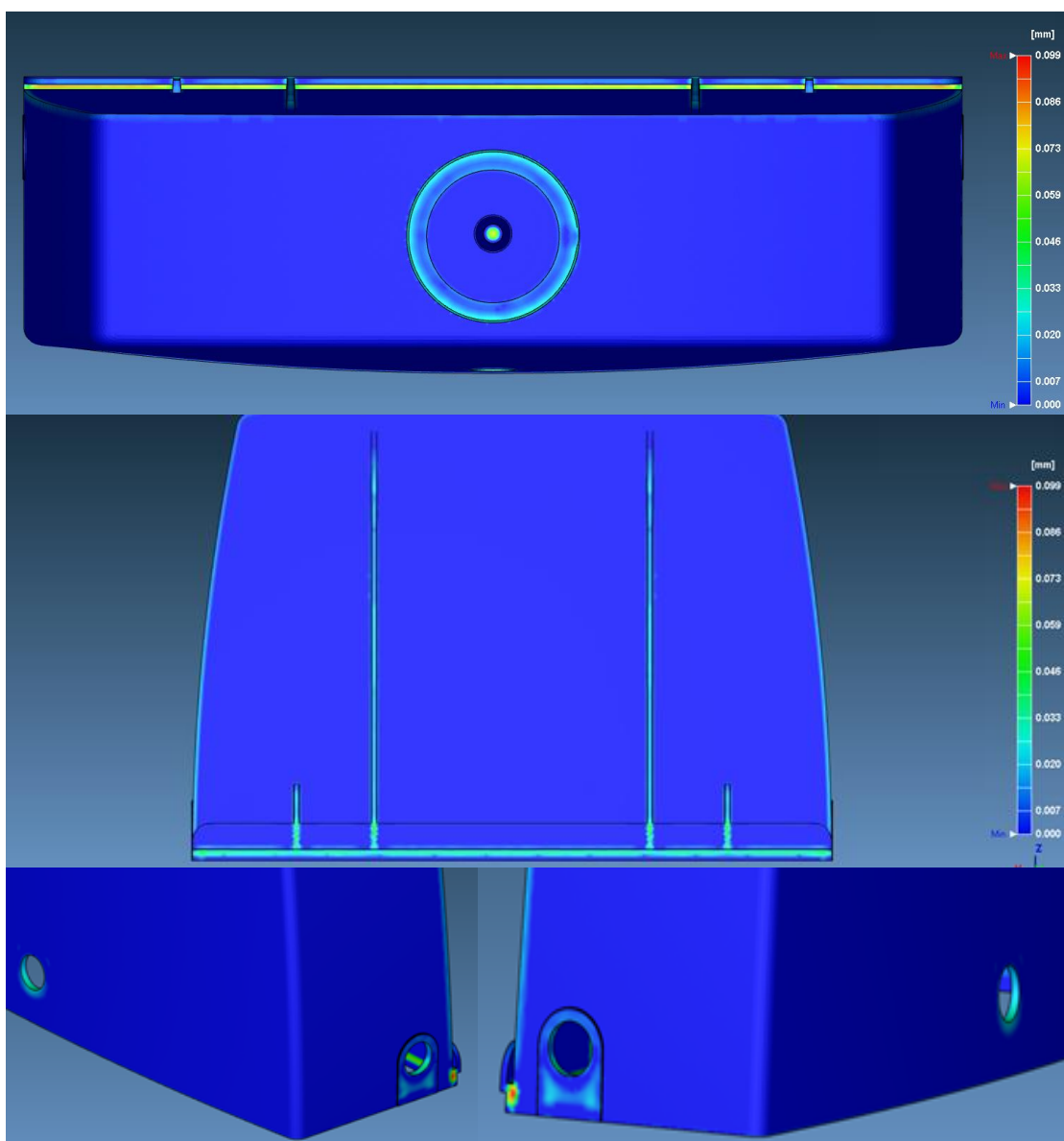
❖ **Sink Mark Indicator**

Πρόκειται για τον δείκτη αξιολόγησης της απόδοσης της συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Θετική τιμή του δείκτη υποδηλώνει ότι η συμπίεση του τήγματος δεν επαρκεί, γεγονός το οποίο πιθανόν να οδηγήσει στη δημιουργία βαθούωμάτων (sink marks) στο τελικό προϊόν έγχυσης. Αντιθέτως, αρνητική τιμή του δείκτη υποδηλώνει την υπερβολική συμπίεση του

τήγματος (overpacking). Γενικά, ένα βέλτιστο αποτέλεσμα συμπίεσης θα εμφανίζει τον συγκεκριμένο δείκτη με τιμές σχεδόν μηδενικές.

❖ *Sink Mark Displacement*

Εμφανίζει την πιθανή θέση των βαθουλωμάτων (sink marks) κάθετα στη συνολική επιφάνεια της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (**Σχήμα 4-69**). Επισημαίνεται ότι η υψηλή τιμή αυτού του αποτελέσματος μεταφράζεται σε υψηλού βαθμού βαθουλώματα στο τελικό προϊόν έγχυσης.



Σχήμα 4-69. Πιθανές θέσεις βαθουλωμάτων στο τελικό προϊόν έγχυσης με μέγιστη εκτόπιση ίση με **0.099** mm.

Σε αυτό το σημείο να υπογραμμιστεί ότι, αναλόγως της μελέτης που κάνει ο εκάστοτε μηχανικός, δεν είναι πάντα απαραίτητη η διεκπεραίωση και η αντίστοιχη προσομοίωση της φάσης της συμπίεσης. Τούτο συμβαίνει όταν τα πρωτογενή αποτελέσματα από την προσομοίωση της φάσης της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα είναι αρκούτως ικανοποιητικά για εκείνον και δεν χρειάζονται

πρόσθετες διορθωτικές ενέργειες για τη βελτίωση ορισμένων κατασκευαστικών προβλημάτων που έχουν ήδη προκύψει όπως, για παράδειγμα, η ογκομετρική συρρίκνωση (volumetric shrinkage).

4.3.3.3 Τα Πρωτογενή Αποτελέσματα της Προσομοίωσης της Φάσης Ψύξης στο Λογισμικό Moldex3D

Η προσομοίωση της φάσης της ψύξης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού στο λογισμικό Moldex3D, κοντά στα άλλα, αποσκοπεί :

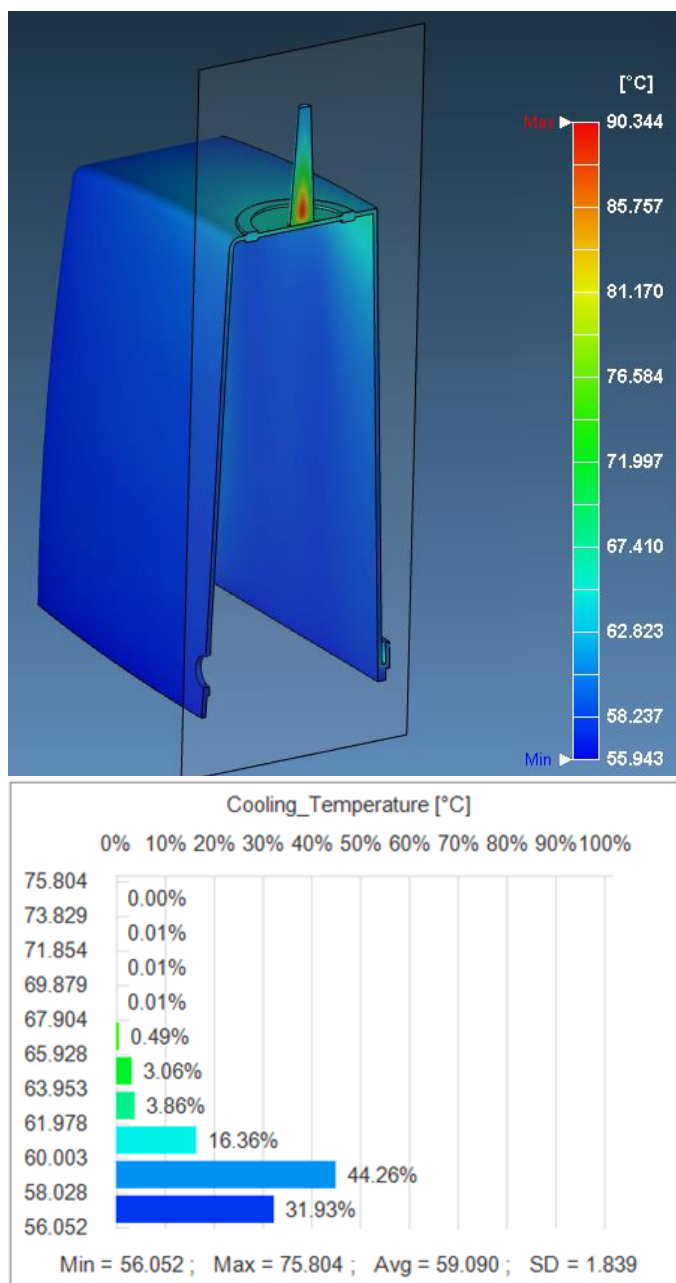
- ✓ στην επίτευξη αποδοτικού συστήματος ψύξης το οποίο θα καταστήσει την ψύξη του τήγματος ομοιογενή και ακολούθως θα περιορίσει την στρέβλωση (warpage) του τελικού προϊόντος έγχυσης,
- ✓ στον εντοπισμό τυχόν μεμονωμένων σημείων αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) στο εσωτερικό του τελικού προϊόντος έγχυσης, στην πρόβλεψη του απαιτούμενου χρόνου ψύξης (cooling time) και
- ✓ στην εκτίμηση της χρονικής διάρκειας ενός πλήρους κύκλου έγχυσης (cycle time).

Από την σκοπιά της φάσης της ψύξης, αναφορικά με το προϊόν έγχυσης που μελετάται στην παρούσα διατριβή, αξίζει να γίνει ξεχωριστή αναφορά στα παρακάτω αποτελέσματα της προσομοίωσης :

❖ **Temperature**

Εμφανίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στο στερεοποιημένο πολυμερές εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού μετά την ολοκλήρωση της φάσης της ψύξης. Αποτελεί ίσως το πιο άξιο προς παρατήρηση αποτέλεσμα καθότι μία θερμοκρασία ομοιόμορφα κατανεμημένη δύναται να περιορίζει σημαντικά τον κίνδυνο εμφάνισης στρέβλωσης (warpage), βαθουλωμάτων (sink marks) ή εσωτερικών υπολειμματικών τάσεων (residual stresses) στο τελικό προϊόν έγχυσης. Οπωσδήποτε, όσο μικρότερο είναι το θερμοκρασιακό εύρος, τόσο πιο ομοιόμορφα γίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας.

Από το αποτέλεσμα της θερμοκρασίας μπορεί επίσης να εξακριβωθεί αν υπάρχουν μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) στο εσωτερικό του μορφοποιημένου αντικειμένου ή όχι. Εάν υπάρχουν, ακριβώς σε αυτά τα σημεία ή πλησίον αυτών δεν πρέπει επουδενί λόγο να τοποθετηθούν οι εξολκείς του προϊόντος. Ασφαλώς, δεν πρέπει να λησμονείται το γεγονός ότι τα μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου εντείνουν τη στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης και προσαυξάνουν τη χρονική διάρκεια του κύκλου της έγχυσης.



Σχήμα 4-70. Η κατανομή της θερμοκρασίας στο στερεοποιημένο πολυμερές εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλούπιου μετά την ολοκλήρωση της φάσης της ψύξης με τη μέση θερμοκρασία να ανέρχεται στους **59.09 °C**.

❖ *Time to Reach Ejection Temperature*

Πρόκειται για τον χρόνο που εκτιμάται από τα αποτελέσματα στο τέλος της φάσης συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλούπιου για την υπολογισμένη θερμοκρασία της επιφάνειας της κοιλότητας και την εκτιμώμενη κεντρική θερμοκρασία του μορφοποιημένου αντικειμένου που πρέπει να ψυχθεί αρκετά ώστε να εξολκευθεί. Αυτή η τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης μεμονωμένων σημείων αυξημένου θερμοτικού φορτίου (hot spots) αλλά και χρονικού περιορισμού για τον κύκλο έγχυσης (cycle time) ελέγχοντας, κατ' ουσίαν, εάν η χρονική διάρκειά του είναι μεγάλη ή όχι. Με τη χρήση τομών (slicing / clipping) είναι δυνατή η θέαση της κατανομής του χρόνου στο εσωτερικό του αντικειμένου.

❖ **Heat flux**

Εμφανίζει το ρυθμό διάχυσης της θερμότητας του πολυμερούς τήγματος ανά περιοχή μονάδας. Για την ανάλυση μέσου κύκλου (cycle average analysis), το αποτέλεσμα αυτό υπολογίζεται από τη μέση ροή θερμότητας κατά την χρονική διάρκεια του κύκλου έγχυσης. Για τη μεταβατική ανάλυση (transient analysis), το αποτέλεσμα αυτό εμφανίζει την κατανομή της ροής θερμότητας την τρέχουσα χρονική στιγμή. Υψηλότερη ροή θερμότητας υποδηλώνει καλύτερη αποδοτικότητα ψύξης.

Η ροή της θερμότητας μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως εξής :

$$q' = h_f (T_w - T_c)$$

όπου :

h_f : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ο οποίος ισούται με :

$$h_f = Nu \cdot k / d_o$$

T_w : η θερμοκρασία διεπαφής μεταξύ καλουπιέρας και καναλιών ψύξης

T_c : η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου

Nu : ο αριθμός Nusselt

d_o : η περίμετρος

k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

❖ **Heat load**

Εμφανίζει το θερμικό φορτίο της διεπαφής παραγόμενου εξαρτήματος / καλουπιέρας / καναλιού ψύξης. Αυτή η τιμή υποδηλώνει την συσσωρευμένη θερμότητα που απελευθερώνεται με τη διεπαφή εξαρτήματος / καλουπιού.

❖ **Cooling Efficiency**

Εμφανίζει την αποδοτικότητα κάθε καναλιού του συστήματος ψύξης του καλουπιού διά του ποσοστού της θερμότητας του καλουπιού που κάθε κανάλι απαγάγει.

Έστω Q_i το συνολικό ποσό της θερμότητας που ρέει μέσα στην ισοθερμική επιφάνεια του καναλιού ψύξης.

Εάν $Q_i > 0$, τότε το συνολικό ποσό της θερμότητας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού απορροφάται από την επιφάνεια του καναλιού με την αποδοτικότητα ψύξης του να προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\text{Cooling Efficiency (CE)} = (Q_i / (Q_a + Q_{ma})) \times 100 \%,$$

όπου Q_a είναι το συνολικό ποσό της απορροφούμενης θερμότητας δια της επιφάνειας του καναλιού ψύξης και Q_{ma} είναι το συνολικό ποσό της απορροφούμενης θερμότητας διά της επιφάνειας του καλουπιού μέσω του περιβάλλοντος.

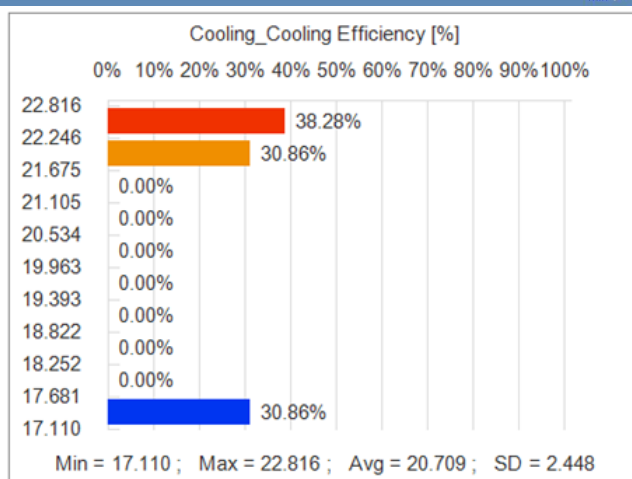
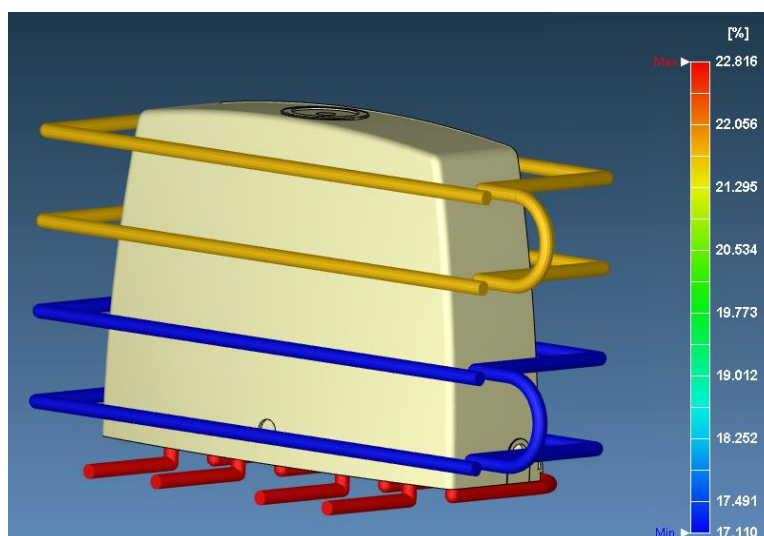
Εάν $Q_i < 0$, τότε το συνολικό ποσό της θερμότητας εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού απορροφάται από την επιφάνεια του μορφοποιημένου αντικειμένου με την αποδοτικότητα ψύξης του καναλιού να προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\text{Cooling Efficiency (CE)} = (Q_i / (Q_r + Q_{mr})) \times 100 \%,$$

όπου Q_r είναι το συνολικό ποσό της απελευθερούμενης θερμότητας δια της επιφάνειας του καναλιού ψύξης και Q_{mr} είναι το συνολικό ποσό της απελευθερούμενης θερμότητας διά της επιφάνειας του καλουπιού μέσω του περιβάλλοντος.

Γενικά, η θετική τιμή υποδηλώνει αποδοτικότητα ψύξης (**Σχήμα 4-71**), ενώ η αρνητική τιμή υποδηλώνει αποδοτικότητα θέρμανσης. Προφανώς η αρνητική τιμή δεν είναι αποδεκτή στα πλαίσια της διεκπεραίωσης ενός κύκλου έγχυσης. Επίσης, στην περίπτωση που η αποδοτικότητα ψύξης είναι πολύ χαμηλή, αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το σύστημα ψύξης του καλουπιού χρήζει βελτίωσης. Μία βελτιωτική ενέργεια προς αυτή την κατεύθυνση, φερεπειύν, θα μπορούσε να είναι η μετατόπιση των υπαρχόντων καναλιών ψύξης πλησιέστερα στα τυχόν μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) που έχουν ανιχνευθεί στο εσωτερικό του στερεοποιημένου πολυμερούς. Από την άλλη πλευρά, εφόσον η αποδοτικότητα ψύξης είναι πολύ υψηλή, τούτο σημαίνει ότι το φορτίο για τα υπάρχοντα κανάλια ψύξης είναι μεγάλο. Το σκηνικό αυτό θα μπορούσε να αλλάξει προς το καλύτερο αυξάνοντας τη διάμετρο ή τον αριθμό των υφιστάμενων καναλιών ψύξης.

Εν πάσει περιπτώσει, βασιζόμενος στα ευρήματα του εν λόγω αποτελέσματος, ο μηχανικός είναι πλέον σε θέση να βελτιώνει το σύστημα ψύξης του καλουπιού κάνοντάς το αποδοτικότερο διά της αναδιάταξης των καναλιών ψύξης, της αλλαγής του μεγέθους αυτών ή της κατάλληλης τροποποίησης του ψυκτικού μέσου που ρέει στο εσωτερικό τους.



Σχήμα 4-71. Η αποδοτικότητα του συστήματος ψύξης του καλουπιού του προϊόντος έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος. Η αποδοτικότητα είναι θετική και ισομοιρασμένη περί το **20.709 %** για κάθε κύκλωμα ψύξης.

❖ **Cooling Channel Reynolds Number**

Εμφανίζει την κατανομή του αριθμού Reynolds στο εσωτερικό των καναλιών ψύξης. Για κανάλια ψύξης κυκλικής διατομής η τιμή του αριθμού Reynolds θα πρέπει να είναι τουλάχιστον **4000** ώστε να εξασφαλίζεται η τυρβώδης ροή του ψυκτικού μέσου εντός των καναλιών. Τούτο επιδιώκεται διότι με την τυρβώδη ροή βελτιώνονται τόσο η μεταφορά θερμότητας όσο και η αποδοτικότητα της ψύξης.

❖ **Coolant Pressure**

Εμφανίζει την πίεση του ψυκτικού μέσου στο εσωτερικό των καναλιών ψύξης στη μόνιμη κατάσταση.

❖ **Coolant Temperature**

Εμφανίζει την κατανομή της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου στο εσωτερικό των καναλιών ψύξης.

❖ **Coolant X / Y / Z / Total Velocity**

Εμφανίζει την κατανομή της ταχύτητας ροής του ψυκτικού μέσου στις διευθύνσεις X, Y και Z αλλά και την κατανομή της συνολικής ταχύτητας ροής του ψυκτικού μέσου (coolant total velocity) εντός του καναλιού ψύξης, εφόσον έχει εκτελεστεί η προσομοίωση της φάσης ψύξης κατόπιν επιλογής της ανάλυσης 3D solid cooling channel analysis (πλεγματοποίηση τύπου solid εντός του καναλιού ψύξης).

❖ **Coolant Velocity Vector**

Εμφανίζει τον προσανατολισμό του διανύσματος της ταχύτητας ροής του ψυκτικού μέσου εντός του καναλιού ψύξης εφόσον έχει εκτελεστεί η προσομοίωση της φάσης ψύξης κατόπιν επιλογής της ανάλυσης **3D solid cooling channel analysis** (πλεγματοποίηση τύπου solid εντός του καναλιού ψύξης). Τα εμφανιζόμενα διανύσματα της ταχύτητας ροής του ψυκτικού μέσου κατά μήκος της διαδρομής ροής διευκολύνουν τον μηχανικό να κατανοήσει όχι μόνο την ένταση της ροής του ψυκτικού, αλλά και την κατεύθυνση της ροής του κάθε φορά.

❖ **Molten Core**

Αυτό το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των φάσεων πλήρωσης και συμπίεσης. Ωστόσο, μόλις περαιώνεται η φάση της ψύξης και εφόσον η κατασκευαστική διεργασία έχει παραμετροποιηθεί κατάλληλα, οι περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου με αυξημένο θερμικό φορτίο θα πρέπει να έχουν εξαλειφθεί εντελώς. Ειδάλλως, θεωρείται επιβεβλημένο, σε πρώτη φάση, να αυξηθεί ο χρόνος ψύξης (cooling time) του πολυμερούς τήγματος ώστε να καταστεί αποδοτικός. Έπειτα, δεδομένου ότι το πρόβλημα εμμένει, χρειάζεται επίσης να αναδιαμορφωθεί το σύστημα ψύξης του καλουπιού ώστε να βελτιωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος ως προς την ψύξη του καλουπιού.

❖ **Frozen Layer Ratio**

Αυτό το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των φάσεων πλήρωσης και συμπίεσης. Συγκρίνοντας τα τρία αποτελέσματα, η αναλογία ψύξης στο τέλος της φάσης της ψύξης, εφόσον ο χρόνος ψύξης του πολυμερούς τήγματος (cooling time) είναι επαρκής, θα πρέπει να φτάνει το 100 % σε όλες τις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Σε αντίθετη περίπτωση, υπάρχουν ακόμη κατά τόπους σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος ψύξης επιβάλλεται να γίνει αποδοτικός διά της αύξησής του και, ενδεχομένως, το σύστημα ψύξης του καλουπιού να αναδιαμορφωθεί με στόχο την καλύτερευση της αποδοτικότητας του συστήματος ως προς την ψύξη του καλουπιού.

❖ **Mold Temperature Difference**

Εμφανίζει τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στη σταθερή πλάκα (cavity) και την κινητή πλάκα (core) του καλουπιού. Ασφαλώς, αυτή η διαφορά θερμοκρασίας πρέπει να είναι η μικρότερη δυνατή, με το εύρος της να κυμαίνεται μεταξύ **5** και **10** °C για προϊόντα έγχυσης υψηλών ανοχών. Σε αντίθετη περίπτωση, επιτείνονται τόσο η στρέβλωση (warpage) του τελικού προϊόντος έγχυσης όσο και η ανάπτυξη μη εξισορροπημένης υπολειμματικής διατμητικής τάσης (residual shear stress) στο εσωτερικό του, με την επικρατέστερη αιτία να είναι η μη αποδοτικότητα του συστήματος ψύξης του καλουπιού.

❖ **Stream Line**

Εμφανίζει τη διαδρομή την οποία θα ακολουθήσει ένα στοιχείο του ψυκτικού υγρού σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή από την είσοδο έως την έξοδο του κυκλώματος ψύξης. Πρόκειται για ιδιαίτερα χρήσιμο αποτέλεσμα καθώς ελέγχοντας το μήκος ροής (flow length) και την συνολική ταχύτητα ροής (total velocity), είναι δυνατό να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα της ψύξης (cooling efficiency) και να ανιχνευθούν πιθανά αδιέξοδα (dead ends) ή ανισοροπίες στη ροή του ψυκτικού μέσα εντός του κυκλώματος ψύξης.

• **Flow Length**

Εμφανίζει το μήκος της διαδρομής ροής του ψυκτικού μέσου σε **mm** από την είσοδό του στο κύκλωμα ψύξης έως την έξοδό του από αυτό.

• **Total Velocity**

Εμφανίζει την συνολική ταχύτητα ροής του ψυκτικού μέσου όπως αυτή μεταβάλλεται κατά μήκος της διαδρομής ροής. Η συνολική ταχύτητα ροής του ψυκτικού μέσου είναι ένα βαθμωτό μέγεθος το οποίο προσδιορίζεται ως η νόρμα του διανύσματος ταχύτητας που εμφανίζει τη συνολική ένταση της ροής έπειτα από συνυπολογισμό των συνιστωσών της ταχύτητας ροής και στις τρεις διευθύνσεις X, Y και Z. Υψηλότερη ταχύτητα ροής στο κανάλι ψύξης θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη πτώση πίεσης αλλά καλύτερη μεταφορά θερμότητας και αποδοτικότητα ψύξης.

4.3.3.4 Τα Πρωτογενή Αποτελέσματα της Προσομοίωσης της Στρέβλωσης στο Λογισμικό Moldex3D

Η μελέτη της στρέβλωσης (warpage) μετά και την περαίωση της φάσης της ψύξης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού στοχεύει στον εντοπισμό σκεβρώσεων και εσωτερικών υπολειμματικών τάσεων (residual stresses) στο παραχθέν προϊόν έγχυσης. Πιο συγκεκριμένα, με την προσομοίωση που εκτελεί το λογισμικό Moldex3D είναι δυνατό :

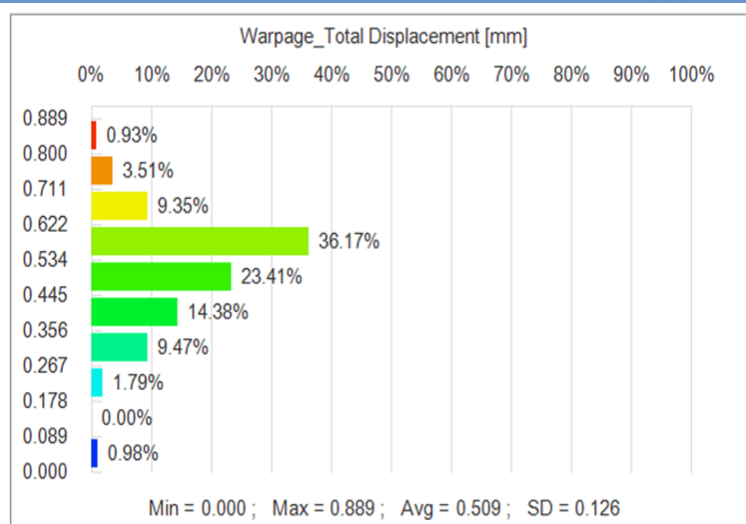
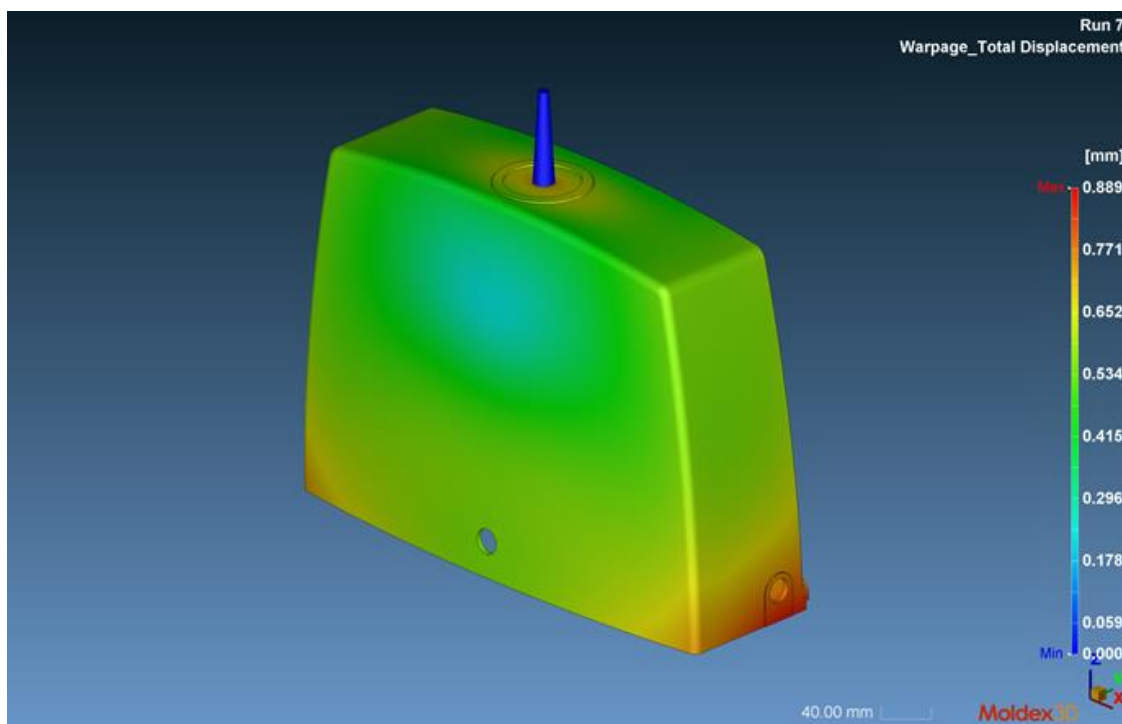
- ✓ να μετρηθεί η τάση και το μέγεθος της παραμόρφωσης ώστε να επαληθευτεί εάν η παραμόρφωση του τελικού προϊόντος έγχυσης ευθυγραμμίζεται με τις αντίστοιχες σχεδιαστικές προδιαγραφές,
- ✓ να οπτικοποιηθεί η παραμόρφωση για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτή συμβαίνει,
- ✓ να αξιολογηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τη συμπεριφορά της στρέβλωσης το χρησιμοποιούμενο πολυμερές δομικό υλικό (κρυσταλλικό, μη κρυσταλλικό, ινώδες), ο σχεδιασμός τόσο του προϊόντος έγχυσης (γεωμετρία, πάχη) όσο και του καλουπιού αυτού (συστήματα διανομής, εξαερισμού και ψύξης) και η παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας,
- ✓ να δοθούν οι κατευθυντήριες γραμμές για την αντιμετώπιση των προβλημάτων και να εντοπιστούν οι γενεσιουργές αιτίες της στρέβλωσης, συμπεριλαμβανομένων εκείνων των παραγόντων που την επηρεάζουν περισσότερο και
- ✓ να εκτιμηθούν οι παράμετροι σχεδιασμού για αναθεώρηση ή βελτιστοποίηση σχεδιασμού προκειμένου να επιλυθεί το ζήτημα των παραμορφώσεων.

Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι οι βασικές μηχανικές ιδιότητες που λαμβάνονται υπόψη στην προσομοίωση της στρέβλωσης στο λογισμικό Moldex3D περιλαμβάνουν το μέτρο ελαστικότητας (elastic modulus) και τον λόγο Poisson. Εφόσον υπάρχουν μόνο αυτές οι δύο ιδιότητες, γίνεται η παραδοχή ότι η παραμόρφωση του πολυμερούς και κατ' επέκταση η στρέβλωση του παραχθέντος αντικειμένου λαμβάνει χώρα εντός της περιοχής ελαστικής παραμόρφωσης με το υλικό να είναι ισότροπο. Η συγκεκριμένη παραδοχή είναι εύλογη, αφού η παραμόρφωση που ενέχει η στρέβλωση είναι μικρής κλίμακας και αποδίδεται κυρίως μόνο στις εσωτερικές τάσεις. Εξάλλου, οι πάσης φύσεως εξωτερικές φορτίσεις που μπορούν να προκαλέσουν μη γραμμική παραμόρφωση στο πολυμερές δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της στρέβλωσης.

Από την σκοπιά της στρέβλωσης, σε ό,τι αφορά το προϊόν έγχυσης που μελετάται στην παρούσα διατριβή, αξίζει να γίνει εκτενέστερη αναφορά στα ακόλουθα αποτελέσματα της προσομοίωσης :

❖ *Displacement*

Εμφανίζει τις συνιστώσες της συνολικής εκτόπισης του παραχθέντος αντικειμένου στις διαστάσεις X, Y, ή Z, καθώς και την ολική εκτόπισή του στις τρεις διαστάσεις ταυτόχρονα (total displacement) συνυπολογίζοντας όλα τα άμεσα σχετιζόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση των φάσεων πλήρωσης, συμπίεσης και ψύξης (Σχήμα 4-72). Για την ακρίβεια, εμφανίζει την εκτόπιση του στερεοποιημένου πολυμερούς μετά την εξόλκευση του αντικειμένου από το καλούπι και την προσαρμογή της θερμοκρασίας του στη θερμοκρασία δωματίου. Η τιμή που λαμβάνει αυτή η εκτόπιση είναι σχετική ως προς το σύστημα συντεταγμένων του 3D μοντέλου του αντικειμένου.



Σχήμα 4-72. Η στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης μετά την εξόλκευσή του από το καλούπι με μέγιστη εκτόπιση στις κάτω γωνίες του προϊόντος ίση με **0.889 mm**.

Ενσωματώνοντας δε το εργαλείο **Set Warpage Scale** σε αυτό το αποτέλεσμα και αυξάνοντας τον συντελεστή της κλίμακας (scale factor) έως και **100** φορές είναι δυνατή η υπερβολή επί της αρχικής παραμόρφωσης για καλύτερη θέαση της τάσης που εμφανίζει το αντικείμενο προς στρέβλωση. Τέλος, εφόσον το αντικείμενο δεν έχει κάποια χαρακτηριστική διεύθυνση, προτείνεται η αξιολόγηση της συνολικής εκτόπισής του (total displacement) κατευθείαν.

❖ **Thermal Displacement**

Εμφανίζει τις συνιστώσες της συνολικής εκτόπισης του παραχθέντος αντικειμένου στις διαστάσεις X, Y, ή Z, καθώς και την ολική εκτόπισή του στις τρεις διαστάσεις ταυτόχρονα (total displacement) υπολογίζοντας μόνο τα άμεσα σχετιζόμενα

αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της φάσης της ψύξης. Για την ακρίβεια, εμφανίζει την εκτόπιση του στερεοποιημένου πολυμερούς μετά την εξόλκευση του αντικειμένου από το καλούπι και την προσαρμογή της θερμοκρασίας του στη θερμοκρασία δωματίου.

Το εν λόγω αποτέλεσμα καλείται *θερμική εκτόπιση (thermal displacement)* καθότι αποτελεί έναν δείκτη αναφορικά με την ισορροπία της ψύξης. Γενικά, η μη εξισορροπημένη ψύξη οδηγεί σε ανομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς δομικού υλικού και κατ' επέκταση σε στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης. Επομένως, στην περίπτωση που η θερμική εκτόπιση είναι πολύ μεγάλη, τότε αυτό μεταφράζεται σε μη ομοιογενή ψύξη του πολυμερούς. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαίος ο επανασχεδιασμός του συστήματος ψύξης του καλουπιού διά της αναδιάταξης των καναλιών ψύξης ή/και της αναπροσαρμογής της θερμοκρασίας της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature). Ομοίως με πριν, η τιμή που λαμβάνει η θερμική εκτόπιση είναι σχετική ως προς το σύστημα συντεταγμένων του 3D μοντέλου του αντικειμένου.

❖ **Flatness**

Εμφανίζει την επιπεδότητα (κάθετη απόσταση) του παραμορφωμένου αντικειμένου στο επίπεδο αναφοράς που καθορίζεται από τον χρήστη. Το εν λόγω αποτέλεσμα αποτελεί μια μέτρηση του πόσο επίπεδη είναι μια συγκεκριμένη επιφάνεια του παραμορφωμένου αντικειμένου. Το δε επίπεδο αναφοράς ενδεχομένως να αναφέρεται σε ένα επίπεδο ενός στοιχείου ή τριών κόμβων ή σε ένα επίπεδο που προκύπτει από μια εξίσωση επιπέδου.

❖ **Thermally Induced Residual Stress**

Εμφανίζει τις θερμικά επαγόμενες υπολειμματικές τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του παραχθέντος αντικειμένου μετά την εξόλκευσή του και εφόσον η θερμοκρασία του πέφτει στα επίπεδα της θερμοκρασίας δωματίου. Βεβαίως, αποτελούν απότοκο της ανομοιόμορφης ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς δομικού υλικού που λαμβάνει χώρα τόσο κατά τη φάση της συμπίεσης του τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού όσο και κατά την ψύξη του. Όταν δε αυτές οι παραμένουσες τάσεις λαμβάνουν μεγάλες διαστάσεις, τότε ευθύνονται για τη δημιουργία κενών (voids) στο τελικό προϊόν έγχυσης. Επομένως, για την εξάλειψη της ανομοιόμορφης ογκομετρικής συρρίκνωσης του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς που οδηγεί στην ανάπτυξη θερμικά επαγόμενων υπολειμματικών τάσεων προκρίνεται, μεταξύ των άλλων, η τροποποίηση του συστήματος ψύξης του καλουπιού με σκοπό την καλυτέρευση της αποδοτικότητάς του.

• **X / Y / Z Stress Component**

Απεικονίζει τις X, Y και Z συνιστώσες της υπολειμματικής τάσης που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του εξολκευμένου προϊόντος έγχυσης και η οποία οφείλεται στην ανομοιόμορφη συρρίκνωση του πολυμερούς.

• **XY / YZ / ZX Shear Stress**

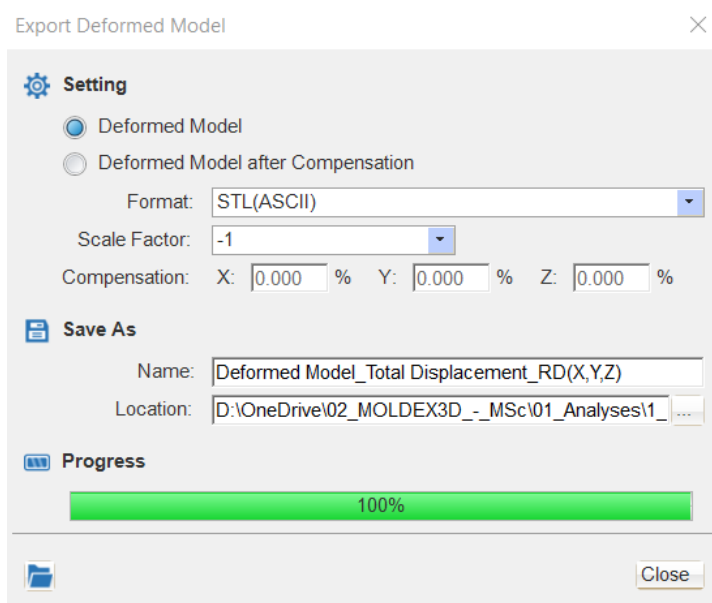
Απεικονίζει τις XY, XZ και YZ συνιστώσες της υπολειμματικής διαμητρικής τάσης που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του εξολκευμένου προϊόντος έγχυσης και η οποία οφείλεται στην ανομοιόμορφη συρρίκνωση του πολυμερούς.

- **Von Mises Stress**

Εμφανίζει την κατανομή της Von Mises υπολειμματικής τάσης στο εξολκευμένο προϊόν έγχυσης που οφείλεται στην ανομοιόμορφη συρρίκνωση του πολυμερούς. Η Von Mises τάση είναι το βαθμωτό μέγεθος το οποίο αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη τάση που απαιτείται για τη διενέργεια δοκιμής θραύσης του προϊόντος έγχυσης και προσδιορίζεται από τις συνιστώσες της τάσης σε κάθε άξονα.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι η μέθοδος αντιστάθμισης του καλουπιού είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική που στόχο έχει την επιδιόρθωση του καλουπιού για την περιστολή ή και εξάλειψη της ογκομετρικής συρρίκνωσης και κατ' επέκταση της στρέβλωσης του παραγόμενου αντικειμένου. Με την πρόβλεψη της τιμής της παραμόρφωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης, η κοιλότητα του καλουπιού μπορεί να αναδιαμορφωθεί γενόμενη ελαφρώς μεγαλύτερη από τον ονομαστικό όγκο του προϊόντος έγχυσης, συνεισφέροντας κατ' αυτόν τον τρόπο στην εξασφάλιση καλύτερης ακρίβειας στις διαστάσεις του τελικού προϊόντος στους επικείμενους κύκλους έγχυσης.

Έτσι, μέσα από το Moldex3D ο μηχανικός είναι σε θέση να εξάγει την παραμορφωμένη γεωμετρία του μοντέλου του αντικειμένου χρησιμοποιώντας την εντολή **Export Deformed Model (Σχήμα 4-73)** σε κάποια ουδέτερη μορφή αρχείου, όπως είναι το αρχείο της μορφής .stl (ASCII, Binary), ή σε κάποια άλλη ειδική μορφή (NX Global Deformation Format, CATIA RSO Format). Η δε κλίμακα παραμόρφωσης (Warpage Scale) μπορεί να καθοριστεί είτε σε όλους τους άξονες ταυτόχρονα (επιλογή **Deformed Model**) είτε σε μεμονωμένους κατ' επιλογήν του μηχανικού καθορίζοντας την ανάλογη ποσοστιαία αντιστάθμιση της παραμόρφωσης σε κάθε άξονα (επιλογή **Deformed Model after Compensation**). Επίσης, η εξαγωγή της παραμορφωμένης γεωμετρίας του μοντέλου μπορεί να γίνει τόσο στην κατεύθυνση της αρχικής παραμόρφωσης (**Scale Factor : +1**) όσο και στην αντίθετη κατεύθυνση (**Scale Factor : -1**) όπως ακριβώς χρειάζεται για την αντιστάθμιση του καλουπιού. Μάλιστα, είναι δυνατό να συμπεριληφθεί το σύστημα διανομής του καλουπιού στην εξαγωγή της γεωμετρίας ή να αποκλειστεί τελείως από αυτή.



Σχήμα 4-73. Χρήση της εντολής **Export Deformed Model** για εξαγωγή της παραμορφωμένης γεωμετρίας του μοντέλου.

5 Σχεδιασμός και Εκτέλεση Πειραμάτων

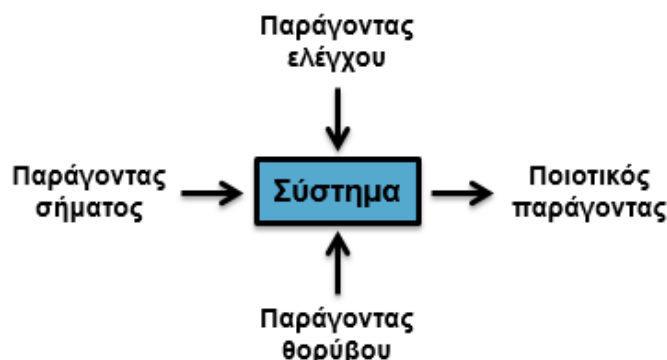
5.1 Σχεδιασμός Πειραμάτων – Θεωρητικό Υπόβαθρο

Ως *σχεδιασμός πειραμάτων* (*Design of Experiments - DOE*) νοείται η χρήση μαθηματικών και στατιστικών μεθόδων τόσο υπό χρονικό περιορισμό όσο και υπό περιορισμό κόστους προκειμένου να εκτελεστεί μια σειρά πειραμάτων. Σαφέστατα, από τα δεδομένα που προκύπτουν από την εκτέλεση των πειραμάτων υπάρχει η προσδοκία για άντληση όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών αποσκοπώντας στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Αδρομερώς, τα βήματα που εκτελούνται κατά τον σχεδιασμό ενός πειράματος είναι τα ακόλουθα :

- Σχεδιασμός του τρόπου εκτέλεσης του πειράματος.
- Ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.
- Βελτίωση της αποδοτικότητας των πληροφοριών στις οποίες υπάρχει πρόσβαση.
- Ελαχιστοποίηση του πειραματικού κόστους.

Ο σχεδιασμός πειραμάτων μπορεί να απομονωθεί και να θεωρηθεί ως σύστημα ελέγχου (**Σχήμα 5-1**) όπου :

- ως είσοδος του συστήματος νοείται ο *παράγοντας σήματος* (*signal factor*), δηλαδή η άμεση αλλαγή των τιμών των ποιοτικών παραγόντων διά της τροποποίησης αυτών,
- ως εξωτερική διέγερση του συστήματος νοούνται οι *παράγοντες ελέγχου* (*control factors*), δηλαδή οι παράγοντες που επίκειται να βελτιστοποιηθούν (π.χ. η ταχύτητα ροής, οι θερμοκρασίες τήγματος και καλουπιού, η πίεση έγχυσης κλπ),
- ως ανάδραση του συστήματος νοούνται οι *παράγοντες θορύβου* (*noise factors*), δηλαδή οι παράγοντες που είναι αδύνατο ή πολύ δύσκολο να προσαρμοστούν (π.χ. η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία, η προκύπτουσα διαφορά από την υποβάθμιση των συστατικών του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού κλπ) και
- ως έξοδος του συστήματος νοούνται οι *ποιοτικοί παράγοντες* (*quality factors*), δηλαδή τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που αποτελούν την αντικειμενική συνάρτηση του συστήματος η οποία και πρέπει να βελτιστοποιηθεί.



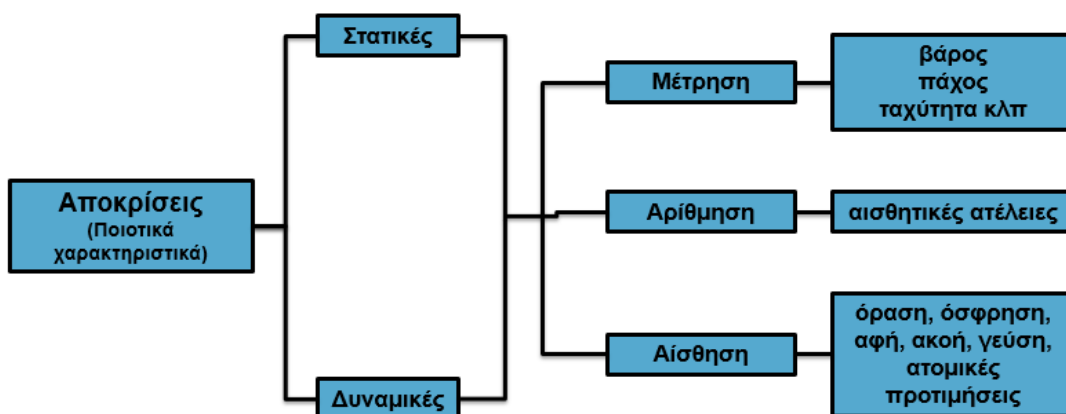
Σχήμα 5-1. Ο σχεδιασμός πειραμάτων ως σύστημα ελέγχου.

Ο όρος *παράγοντας* (*factor*) περιλαμβάνει μια σειρά από αιτίες στις οποίες δίδεται μεγαλύτερη προσοχή καθότι επηρεάζουν τις *αποκρίσεις* (*responses*) ενός συστήματος

(Σχήμα 5-2), ήτοι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ή αλλιώς την εξαρτημένη μεταβλητή y της μαθηματικής εξίσωσης :

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}), \text{ όπου } \mathbf{y} = y_1, y_2, \dots, y_k \text{ και } \mathbf{x} = x_1, x_2, \dots, x_k. \quad (5-1)$$

Κατ' ουσίαν, ο παράγοντας λειτουργεί ακριβώς όπως η ανεξάρτητη μεταβλητή x στην Εξ. (5-1). Κάθε παράγοντας μπορεί να είναι είτε *ποιοτικός* είτε *ποσοτικός*. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ποσοτικών παραγόντων συνιστούν η εκπεφρασμένη θερμοκρασία σε °C, η γωνιακή ταχύτητα μετρούμενη σε στροφές ανά λεπτό κλπ. Τουναντίον, ως ποιοτικοί παράγοντες A, B, C, ..., μπορούν να θεωρηθούν, λόγου χάρη, οι διαφορετικοί προμηθευτές ενός κατασκευαστικού υλικού, οι διαφορετικοί χειριστές ενός βιομηχανικού ρομπότ κλπ.



Σχήμα 5-2. Οι αποκρίσεις ενός συστήματος, είτε αυτές είναι *στατικές* είτε *δυναμικές*, μπορούν να αποτελούν μέτρηση, αρίθμηση ή οποιαδήποτε ανθρώπινη αίσθηση. Ωστόσο, συνίσταται η τιμή της απόκρισης να είναι μετρήσιμη ούτως ώστε να είναι παρατηρήσιμος ο βαθμός της μεταβολής.

Προφανώς, σε ένα πείραμα μπορούν να εξεταστούν ένας ή περισσότεροι παράγοντες. Τα στοιχεία που επιβάλλεται να εκτιμηθούν από στατιστική άποψη είναι η επίδραση του εκάστοτε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα καθώς και η επιρροή που ασκεί η αλληλεπίδραση των παραγόντων σε αυτό, εφόσον στο πείραμα εξετάζονται περισσότεροι του ενός παράγοντες. Εάν παρατηρείται αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων τότε η αντίστοιχη ασκούμενη επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα θα είναι μεγάλη, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα είναι αμελητέα.

Αναμφισβήτητα, ο σχεδιασμός πειραμάτων είναι μια γενική μεθοδολογία που βρίσκει εφαρμογή σε οποιαδήποτε περίπτωση εκτέλεσης πειραμάτων. Ασφαλώς, δεν αποτελεί ένα εργαλείο που μπορεί να παράγει από μόνο του γνώση, αλλά οπωσδήποτε μπορεί να συνεισφέρει στη διεξαγωγή και την οργάνωση της γνώσης που εμπεριέχεται σε μία διεργασία. Στην επιστήμη του μηχανικού ειδικότερα, κάποιες εκ των διαδικασιών που δύνανται να επωφεληθούν σημαντικά από την χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου εργαλείου είναι :

- η βελτίωση και η βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών διεργασιών. Καθώς στις περισσότερες των περιπτώσεων η απόδοση της παραγωγής εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, ελεγχόμενων και μη, ο σχεδιασμός πειραμάτων μπορεί να αναγνωρίσει τους καθοριστικής σημασίας παράγοντες και να συγκεκριμενοποιήσει τις τιμές που πρέπει να λάβουν.

- η βελτίωση του σχεδιασμού των προϊόντων. Ο σχεδιασμός πειραμάτων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία εναλλακτικών λύσεων για τα εκάστοτε προϊόντα που βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης. Μάλιστα, σε συνδυασμό με την υπολογιστική προσομοίωση που επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των κατάλληλων πακέτων λογισμικού που εφαρμόζουν την τεχνολογία των πεπερασμένων στοιχείων, είναι εφικτή η δραματική περιστολή του χρόνου ανάπτυξης των προϊόντων.
- η βελτίωση της συμπεριφοράς των προϊόντων. Τα εκάστοτε προϊόντα μπορούν να σχεδιαστούν και να ελεγχθούν ως προς τη συμπεριφορά τους σε ένα εύρος συνθηκών λειτουργίας και, τοιουτοτρόπως, να γίνουν περισσότερο «ανθεκτικά» στις μεταβολές των συνθηκών αυτών.

Συγκεκριλαιωτικά, από τα προαναφερθέντα εύκολα διακρίνει κανείς πολλά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, μερικά εκ των οποίων είναι :

- ✓ η αυξημένη αποδοτικότητα των διεργασιών,
- ✓ το μειωμένο κόστος,
- ✓ ο μειωμένος απαιτούμενος χρόνος διεκπεραίωσης,
- ✓ η μειωμένη μεταβλητότητα των προϊόντων και
- ✓ η αυξημένη συμφωνία των προϊόντων με τις εκάστοτε προδιαγραφές.

5.1.1 Μέθοδοι Σχεδιασμού Πειραμάτων

Υπάρχει μια σειρά διαφορετικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό πειραμάτων όπως :

- *Δοκιμή και Σφάλμα (Trial and Error)*

Πρόκειται για την πιο απλή μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων. Είναι μη συστηματοποιημένη, βασίζεται ξεκάθαρα στην κρίση και την πρότερη προσωπική εμπειρία του μηχανικού που εκτελεί το κάθε πείραμα και δεν απαιτεί ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων. Η αποτελεσματικότητά της ποικίλει και είναι δύσκολο να επιτευχθεί άμεσα με αποτέλεσμα ο αριθμός των επαναλήψεων που χρειάζεται να διενεργηθούν για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος να είναι μη πεπερασμένος.

- *Ένας εξεταζόμενος παράγοντας τη φορά σε κάθε πείραμα*

Πρόκειται περί μιας μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων κατά την οποία για κάθε δύο πειράματα που εκτελούνται μόνο ένας παράγοντας μπορεί να είναι διαφορετικός. Ωστόσο, μειονέκτημα της εν λόγω τακτικής αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε κατάσταση πειραματικής μεροληψίας. Και αυτό γιατί ενδέχεται σε κάποιο σύστημα με τη μεταβολή του ενός παράγοντα οι υπόλοιποι να μην παραμένουν σταθεροί αλλά να μεταβάλλονται και αυτοί.

- *Πλήρως παραγοντικά πειράματα (Full factorial experiments)*

Πρόκειται για μια μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων κατά την οποία λαμβάνονται υπόψιν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί και όλες οι πιθανές αντιμεταθέσεις των παραγόντων. Για παράδειγμα, εάν υπάρχουν τέσσερις παράγοντες (A, B, C, D) σε δύο επίπεδα, τότε απαιτείται η εκτέλεση $2^4 = 16$ πειραμάτων. Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί και όλες οι πιθανές αντιμεταθέσεις των παραγόντων επιτυγχάνονται με τη

χρήση ορθογώνιας διάταξης (**Πίνακας 5-1**) όπου κάθε επίπεδο έχει την ίδια παρουσία, ενώ τα πειράματα έχουν κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο και την ίδια παρουσία στους άλλους παράγοντες. Οι διατάξεις αυτές να μην εξαλείφουν πλήρως τη μεροληψία από τις επιδράσεις των παραγόντων, όμως όσο αυξάνεται ο αριθμός των παραγόντων αλλά και των επιπέδων, τόσο περισσότερα είναι τα πειράματα που απαιτείται να εκτελεστούν. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται χαμηλή αποδοτικότητα και αυξημένο έως απαγορευτικό κόστος εφαρμογής της μεθόδου.

Πίνακας 5-1. Παράδειγμα πλήρως παραγοντικής ορθογώνιας διάταξης τεσσάρων παραγόντων σε δύο επίπεδα.

Πείραμα	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	1	2	1
4	1	1	2	2
5	1	2	1	1
6	1	2	1	2
7	1	2	2	1
8	1	2	2	2
9	2	1	1	1
10	2	1	1	2
11	2	1	2	1
12	2	1	2	2
13	2	2	1	1
14	2	2	1	2
15	2	2	2	1
16	2	2	2	2

- *Μέθοδος Taguchi με χρήση ορθογώνιων διατάξεων*

Πρόκειται περί μιας μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων που βασίζεται κατά **80 %** σε εργαλεία της Μηχανικής και κατά **20 %** σε εργαλεία της Στατιστικής. Χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό πειραμάτων και την ανάλυση της διακύμανσης. Γενικά, η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων κατά μικρό ποσοστό σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο βελτιώνει αποτελεσματικά την ποιότητα του εξεταζόμενου προϊόντος. Άλλωστε, ο σκοπός του σχεδιασμού πειραμάτων με τη μέθοδο αυτή είναι η έγρευση της βέλτιστης αντικειμενικής συνάρτησης του προϊόντος και η διατήρηση της

ευρωστίας (robustness) της συνάρτησης, ήτοι ο περιορισμός του παράγοντα του θορύβου (noise factor).

Κοινή επιδίωξη κατά τον σχεδιασμό πειραμάτων αποτελεί η άντληση όσο το δυνατόν περισσότερων χρήσιμων πληροφοριών εκτελώντας, παράλληλα, όσο το δυνατόν λιγότερα πειράματα. Οπωσδήποτε, η μέθοδος Taguchi κινείται προς αυτή την κατεύθυνση μολονότι δεν είναι σαν τη μέθοδο των πλήρως παραγοντικών πειραμάτων (full factorial experiments) όπου μπορούν να επιτευχθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των παραγόντων. Εντούτοις, με την εκτέλεση ενός μικρού αριθμού πειραμάτων μπορεί να προκύψει επιτυχώς η τάση της βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης του εξεταζόμενου προϊόντος. Τέλος η εφικτότητα τη μεθόδου είναι υψηλότερη έναντι των υπόλοιπων μεθόδων σχεδιασμού πειραμάτων, ενώ η πειραματική μεροληψία εκλείπει.

5.1.2 Η Μέθοδος Taguchi

Η μέθοδος Taguchi αποτελεί ένα αμιγώς στατιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως από τους μηχανικούς στα πλαίσια του ποιοτικού ελέγχου. Αδρομερώς, διακρίνεται στα κάτωθι στάδια :

- *Σχεδιασμός συστήματος (system design)*

Σε αυτό το στάδιο εντοπίζονται και επιλέγονται οι διάφορες πιθανές «επιθυμητές λειτουργίες» του προς εξέταση συστήματος. Για παράδειγμα, εδώ μπορούν να καθοριστούν ο απαιτούμενος υλικοτεχνικός εξοπλισμός ή η κατάλληλη διαδικασία κατασκευής του συστήματος.

- *Σχεδιασμός παραμέτρων (parameter design)*

Πρόκειται για το στάδιο στο οποίο προσδιορίζεται το επίπεδο των παραμέτρων σχεδιασμού του συστήματος. Για την επιβεβαίωση των παραγόντων ελέγχου που έχουν οριστεί χρησιμοποιείται το ίδιο το πείραμα. Η δε ευαισθησία του συστήματος στους παράγοντες θορύβου πρέπει να είναι η χαμηλότερη δυνατή.

- *Σχεδιασμός ανοχής (tolerance design)*

Στο εν λόγω στάδιο λαμβάνεται υπόψιν ο σχεδιασμός της ανοχής του συστήματος διά της εξισορρόπησης μεταξύ κόστους και ποιότητας. Επομένως, εδώ ρυθμίζεται το εύρος της ανοχής για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων σχεδιασμού. Υπογραμμίζεται ότι στην περίπτωση που οι απαιτήσεις ποιότητας βρίσκονται ήδη εντός των κριτηρίων, το στάδιο αυτό μπορεί να παρακαμφθεί.

Σε κάθε περίπτωση, απαραίτητη προϋπόθεση για τον ορθό σχεδιασμό πειραμάτων με χρήση της μεθόδου Taguchi αποτελεί η επιλογή της κατάλληλης ορθογώνιας διάταξης Taguchi. Οι ορθογώνιες διατάξεις Taguchi (Taguchi's orthogonal arrays) διακρίνονται σε *μονού* και *διπλού επιπέδου*. Συγκεκριμένα, οι ορθογώνιες διατάξεις μονού επιπέδου προκύπτουν σύμφωνα με τον τύπο :

$$L_a(b^c)$$

όπου :

$L =$

A	B	C
C	A	B
B	C	A

και

a : ο αριθμός των πειραμάτων,
 b : ο αριθμός των επιπέδων κάθε παράγοντα ελέγχου και
 c : ο αριθμός των παραγόντων ελέγχου

Για παράδειγμα, για οκτώ πειράματα με επτά παράγοντες ελέγχου και δύο επίπεδα έκαστος, η ορθογώνια διάταξη Taguchi μονού επιπέδου είναι η εξής (**Πίνακας 5-2**) :

Πίνακας 5-2. Ορθογώνια διάταξη Taguchi μονού επιπέδου για οκτώ πειράματα με επτά παράγοντες ελέγχου και δύο επίπεδα έκαστος ($L_8(2^7)$).

Πείραμα	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Από την άλλη πλευρά, οι ορθογώνιες διατάξεις Taguchi διπλού επιπέδου προκύπτουν από τον τύπο :

$$L_a(b^c \times d^e)$$

όπου :

$L =$

A	B	C
C	A	B
B	C	A

και

a : ο αριθμός των πειραμάτων,
 b : ο αριθμός των επιπέδων του παράγοντα ή των παραγόντων ελέγχου,
 c : ο αριθμός των παραγόντων ελέγχου,
 d : ο αριθμός των επιπέδων του παράγοντα ή των παραγόντων ελέγχου και
 e : ο αριθμός των παραγόντων ελέγχου

Για παράδειγμα, για δεκαοκτώ πειράματα με οκτώ παράγοντες ελέγχου όπου ο πρώτος παράγοντας έχει δύο επίπεδα και οι υπόλοιποι παράγοντες έχουν τρία επίπεδα, η ορθογώνια διάταξη Taguchi διπλού επιπέδου είναι η ακόλουθη (**Πίνακας 5-3**) :

Πίνακας 5-3. Ορθογώνια διάταξη Taguchi διπλού επιπέδου για δεκαοκτώ πειράματα με οκτώ παράγοντες ελέγχου όπου ο πρώτος παράγοντας έχει δύο επίπεδα (πρώτη στήλη) και οι υπόλοιποι παράγοντες έχουν τρία επίπεδα ($L_{18}(2^1 \times 3^7)$).

Πείραμα	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Ασφαλώς, σύμφωνα με όσα έχουν προαναφερθεί, η μέθοδος Taguchi συνιστά μια διακριτή αλγοριθμική διαδικασία αποτελούμενη από τα εξής διαδοχικά βήματα :

Βήμα 1^ο

- **Καθορισμός στόχου / εύρους του εξεταζόμενου συστήματος** : Περιλαμβάνει τον καθορισμό του εύρους, του ηγέτη του έργου, των μελών, των στρατηγικών ανάπτυξης και λειτουργίας του στόχου και, φυσικά, τον καθορισμό του συστήματος ή του υποσυστήματος. Ακολούθως, επιλέγεται η τιμή της απόκρισης του συστήματος διά του καθορισμού των κατάλληλων αντικειμενικών συναρτήσεων, των διαταραχών (side effects) και των προτύπων αποτυχίας. Όλα αυτά γίνονται ώστε :

- ✓ να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα,
- ✓ να επιλεχθούν η τιμή της απόκρισης ή οι ιδανικές αντικειμενικές συναρτήσεις (ιδανική αντικειμενική συνάρτηση λογίζεται μια ιδανική σχέση μεταξύ του παράγοντα σήματος και των ποιοτικών παραγόντων) και
- ✓ να καθοριστεί ο τρόπος μέτρησης.

Βήμα 2°

- **Επιλογή παραγόντων και επιπέδων** : Στο βήμα αυτό καθορίζονται οι στρατηγικές ανάπτυξης των παραγόντων σήματος και θορύβου. Επίσης, συγκεκριμενοποιούνται οι παράγοντες ελέγχου και τα επίπεδα αυτών αφού πρώτα προσδιοριστούν στο σύνολό τους και επιλεχθούν οι σημαντικότεροι εξ αυτών με τα αντίστοιχα επίπεδα ως προς την επιρροή που ασκούν στο μετρούμενο μέγεθος.

Βήμα 3°

- **Επιλογή της κατάλληλης ορθογώνιας διάταξης** : Εδώ επιλέγεται ο κατάλληλος ορθογώνιος πίνακας, εκχωρούνται οι παράγοντες ελέγχου και εντοπίζονται οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Γενικά, τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα για το εκάστοτε σχεδιαζόμενο πείραμα είναι κατά σειρά προτεραιότητας :
 - ο αριθμός των παραγόντων και των μεταξύ των αλληλεπιδράσεων που λαμβάνονται υπόψιν,
 - ο αριθμός των επιπέδων για τους υπόψιν παράγοντες,
 - το επίπεδο της ανάλυσης του πειράματος, ήτοι ο βαθμός βεβαιότητας με την οποία μπορεί να εκτιμηθεί τόσο η επίδραση κάθε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα όσο και η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων και
 - η ύπαρξη χρονικών περιορισμών ή/και περιορισμών κόστους.

Βεβαίως, όσο μικρότερη είναι η ορθογώνια διάταξη που επιλέγεται, τόσο μικρότερο θα είναι το επίπεδο της ανάλυσης του πειράματος και τόσο μικρότερο το κόστος εκτέλεσής του μιας και απαιτούνται λιγότερες επαναλήψεις για τη διεκπεραίωσή του.

Βήμα 4°

- **Προετοιμασία και εκτέλεση πειραμάτων** : Σε αυτό το βήμα προετοιμάζονται / σχεδιάζονται τα πειράματα, ακολούθως αυτά πραγματοποιούνται και εν τέλει συλλέγονται τα δεδομένα που προκύπτουν.

Βήμα 5°

- **Υπολογισμός της αναλογίας S / N και της τιμής του ποιοτικού παράγοντα για κάθε πείραμα αναλόγως του αποτελέσματος.**

Βήμα 6°

- **Συμπλήρωση και ερμηνεία του διαγράμματος απόκρισης του λόγου S / N και της τιμής ποιότητας και εκτέλεση του δεύτερου σταδίου βελτιστοποίησης** : Στο βήμα αυτό τροποποιούνται εκείνοι οι σχετιζόμενοι παράγοντες που μπορούν να

μεγιστοποιήσουν τον λόγο S / N . Εν συνεχεία, τροποποιούνται οι υπόλοιποι παράγοντες που επηρεάζονται από τον ποιοτικό παράγοντα αλλά δεν επηρεάζουν τον λόγο S / N .

Βήμα 7°

- **Επιλογή του βελτιστοποιημένου συνόλου επιπέδων και εκτίμηση της αναλογίας S / N και της τιμής του ποιοτικού παράγοντα.**

Βήμα 8°

- **Εκτέλεση της πειραματικής επαλήθευσης :** Σύμφωνα με το αποτέλεσμα της απόκρισης του παράγοντα, προβλέπονται η αναλογία S / N και η τιμή του ποιοτικού παράγοντα τόσο του αρχικού όσο και του βελτιστοποιημένου σχεδιασμού και έπειτα υπολογίζονται επακριβώς δεδομένης της εκτέλεσης ενός συνόλου πειραμάτων και για τις δύο περιπτώσεις. Τέλος, συγκρίνεται αν η αναλογία S / N ή η τιμή του ποιοτικού παράγοντα είναι συνεπείς.

Βήμα 9° :

- **Συμπεράσματα :** Μετά την επιτυχή πειραματική επαλήθευση, τοποθετείται το βελτιστοποιημένο σύνολο επιπέδων στο σύστημα και πραγματοποιείται εκτέλεση.

5.1.2.1 Εύρωστος Σχεδιασμός

Κατά τον σχεδιασμό πειραμάτων με τη μέθοδο Taguchi, κομβικής σημασίας ζήτημα αποτελεί ο εύρωστος σχεδιασμός (*robust design*) των πειραμάτων. Ο εύρωστος σχεδιασμός επιτυγχάνεται όταν μεριμνάται η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης των ποιοτικών παραγόντων (quality factors) που οφείλεται στους παράγοντες θορύβου (noise factors). Η ελαχιστοποίηση αυτή μπορεί να γίνει διά :

- ✓ της μη γραμμικής σχέσης μεταξύ των ποιοτικών παραγόντων (quality factors) και των παραγόντων ελέγχου (control factors) με στόχο τη μείωση των επιπτώσεων του εσωτερικού παράγοντα θορύβου (*internal noise factor*) ή
- ✓ της αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραγόντων θορύβου (noise factors) και των παραγόντων ελέγχου (control factors) με στόχο τη μείωση των επιπτώσεων του εξωτερικού παράγοντα θορύβου (*external noise factor*) ή του παράγοντα θορύβου μέτρησης (*measurement noise factor*).

5.1.2.2 Συνάρτηση Απώλειας Ποιότητας : Η Προσέγγιση Taguchi

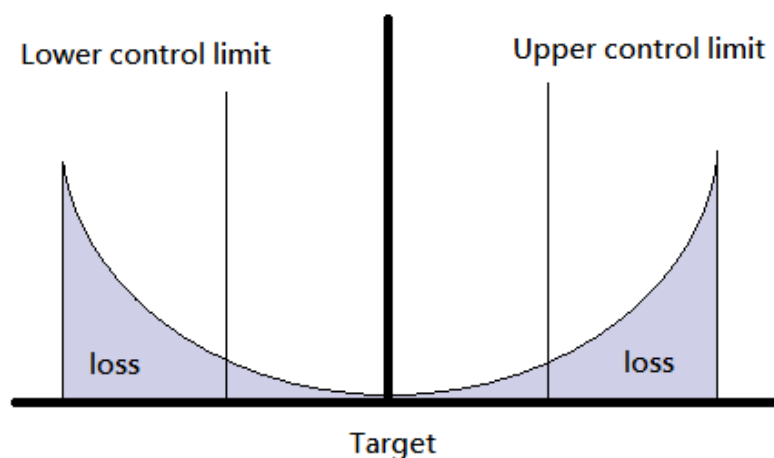
Σύμφωνα με την προσέγγιση Taguchi, η συνάρτηση απώλειας ποιότητας (*quality loss function*) είναι μια τετραγωνική καμπύλη που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απώλειας ποιότητας. Η εν λόγω συνάρτηση αποδίδεται γραφικά όπως ακριβώς στο **Σχήμα 5-3** και εκφράζεται μαθηματικά από την κάτωθι εξίσωση :

$$L = k (y - y_0)^2 \quad (5-2)$$

όπου :

L : η απώλεια

k : ο συντελεστής απώλειας ποιότητας, δηλαδή μια σταθερά που καθορίζεται συναρτήσει των παραμέτρων της παραγωγής
 y : η μετρούμενη τιμή του ποιοτικού παράγοντα
 y_0 : η προσδοκώμενη τιμή του ποιοτικού παράγοντα



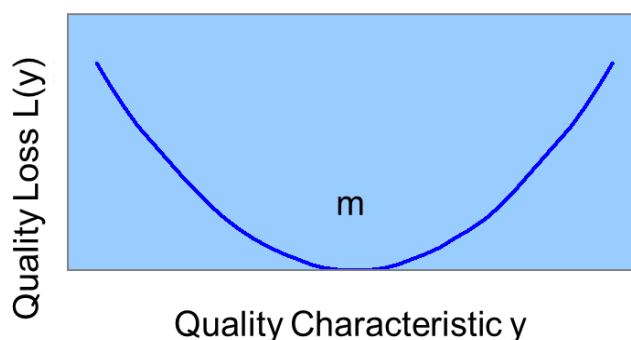
Σχήμα 5-3. Γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης απώλειας ποιότητας σύμφωνα με την προσέγγιση Taguchi. Προφανώς, όσο μικρότερη είναι η τιμή της αναλογίας S / N , τόσο μικρότερος είναι ο παράγοντας θορύβου.

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (**Σχήμα 5-3**), υπάρχουν οι εξής τρεις μορφές της συνάρτησης απώλειας ποιότητας :

- *Ονομαστική – η πιο καλή (Nominal – the best)*

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, όταν ο ποιοτικός παράγοντας y του εξεταζόμενου προϊόντος αρχίζει να αποκλίνει από την προσδοκώμενη τιμή m , ο ρυθμός μεταβολής της απώλειας ποιότητας L αυξάνεται τετραγωνικά σε συμφωνία με τον συντελεστή απώλειας ποιότητας k που πρόκειται να καθορισθεί (**Σχήμα 5-4**). Επομένως, η αναφερθείσα διαδικασία μπορεί εύκολα να περιγραφεί μαθηματικά από την ακόλουθη εξίσωση :

$$L(y) = k (y - m)^2 \quad (5-3)$$

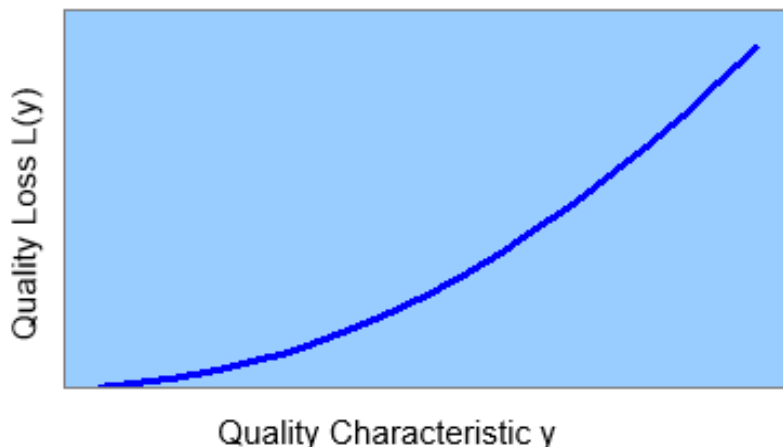


Σχήμα 5-4. Εφόσον ο ποιοτικός παράγοντας είναι μη διατάξιμη μεταβλητή (nominal) και υποθέτοντας ότι m είναι η προσδοκώμενη τιμή, η απώλεια ποιότητας αυξάνεται όταν η καμπύλη απομακρύνεται από την τιμή m .

- *Μικρή – η καλύτερη (Small – the better)*

Η εν λόγω μορφή της συνάρτησης απώλειας ποιότητας αποτελεί υποπερίπτωση της αντίστοιχης ονομαστικής (nominal) μορφής. Για την ακρίβεια, όταν ο ποιοτικός παράγοντας y του εξεταζόμενου προϊόντος αρχίζει να αποκλίνει από τη μηδενική προσδοκώμενη τιμή m , ο ρυθμός μεταβολής της απώλειας ποιότητας L αυξάνεται τετραγωνικά σε συμφωνία με τον συντελεστή απώλειας ποιότητας k που πρόκειται να καθορισθεί (**Σχήμα 5-5**). Επομένως, η αναφερθείσα διαδικασία μπορεί εύκολα να περιγραφεί μαθηματικά από την ακόλουθη εξίσωση :

$$L(y) = k y^2, y \geq 0 \quad (5-4)$$

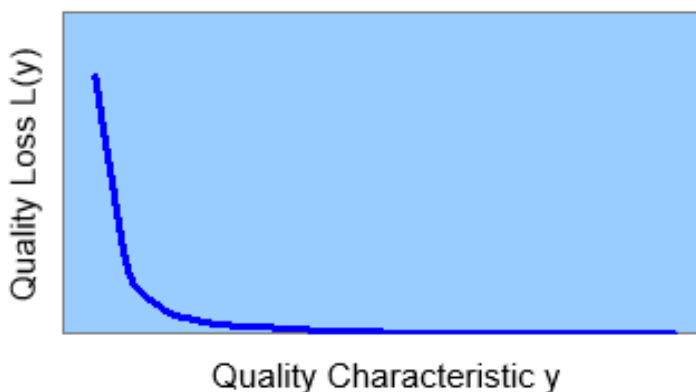


Σχήμα 5-5. Η εν λόγω περίπτωση αντιμετωπίζεται ως ειδική περίπτωση της ονομαστικής (nominal) μορφής της συνάρτησης απώλειας ποιότητας κατά την οποία η προσδοκώμενη τιμή είναι μηδενική και η απώλεια ποιότητας αυξάνεται ενώ η καμπύλη απομακρύνεται από το μηδέν.

- *Μεγάλη – η καλύτερη (Large – the better)*

Η συγκεκριμένη μορφή της συνάρτησης απώλειας ποιότητας διαφέρει από τις προηγούμενες δύο μορφές. Ακριβέστερα, ο ρυθμός μεταβολής της απώλειας ποιότητας L και το τετράγωνο του ποιοτικού παράγοντα y του εξεταζόμενου προϊόντος έχουν αντίστροφη σχέση κατά k φορές, όπου k είναι ο συντελεστής απώλειας ποιότητας που πρόκειται να καθορισθεί (**Σχήμα 5-6**). Επομένως, η αναφερθείσα διαδικασία μπορεί εύκολα να περιγραφεί μαθηματικά από την ακόλουθη εξίσωση :

$$L(y) = k / y^2, y \geq 0 \quad (5-5)$$



Σχήμα 5-6. Στην περίπτωση αυτή η απώλεια ποιότητας αυξάνεται ενώ η καμπύλη τείνει στο μηδέν. Αντιθέτως, η απώλεια ποιότητας είναι περίπου μηδενική ενώ η καμπύλη τείνει στο άπειρο.

Εντούτοις, βάσει της προσεγγίσεως Taguchi ο συντελεστής απώλειας ποιότητας k αγνοείται λαμβάνοντας λογαριθμικό μετασχηματισμό ο οποίος δεκαπλασιάζεται και λαμβάνει αρνητικό πρόσημο ως συνώνυμο της ποιότητας, ήτοι :

$$S / N = - 10 \log [MSD] \quad (5-6)$$

όπου **MSD (Mean Square Deviation)** είναι η μέση τετραγωνική απόκλιση και ορίζεται ως

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} = (\bar{y} - m)^2 + S^2 \quad (5-7)$$

Επίσης, η μέση απώλεια ποιότητας **Q** ορίζεται ως

$$Q = k \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} = k \left[(\bar{y} - m)^2 + S^2 \right], Q = k [MSD] \quad (5-8)$$

όπου :

y : η μετρούμενη τιμή του ποιοτικού παράγοντα

m : η προσδοκώμενη τιμή του ποιοτικού παράγοντα

k : ο συντελεστής απώλειας ποιότητας, δηλαδή μια σταθερά που καθορίζεται συναρτήσει των παραμέτρων της παραγωγής

n : ο αριθμός των πειραμάτων

Με βάση τα παραπάνω, η μέση τετραγωνική απόκλιση MSD ορίζεται για :

- ο την «ονομαστική» προσέγγιση της συνάρτησης απώλειας ποιότητας (Nominal – the best) ως

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} = (\bar{y} - m)^2 + S^2 \quad (5-9)$$

- ο τη «μικρή» προσέγγιση της συνάρτησης απώλειας ποιότητας (Small – the better) ως

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} = \bar{y}^2 + S^2 \quad (5-10)$$

- ο τη «μεγάλη» προσέγγιση της συνάρτησης απώλειας ποιότητας (Large – the better) ως

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^n 1/y_i^2}{n} \quad (5-11)$$

Προφανώς, η μέση τετραγωνική απόκλιση ισοδυναμεί με την απώλεια ποιότητας. Η μικρότερη τιμή της μέσης τετραγωνικής απόκλισης συνεπάγεται λιγότερο θόρυβο και πιο εύρωστο σχεδιασμό πειραμάτων. Τόσο ο λογαριθμικός μετασχηματισμός όσο και ο δεκαπλασιασμός της θα διατηρήσουν την χαρακτηριστική τιμή ίδια, αλλά το αρνητικό πρόσημο καθιστά την τιμή της αναλογίας S / N μεγαλύτερη και επομένως καλύτερη. Άλλωστε, η κύρια λειτουργία της μεθόδου Taguchi είναι η επιλογή της μεγαλύτερης τιμής της αναλογίας S / N στα πλαίσια του εύρωστου σχεδιασμού πειραμάτων.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

1. η «ονομαστική» προσέγγιση της συνάρτησης απώλειας ποιότητας (Nominal – the best) μεταφράζεται σε ελαχιστοποίηση της καθορισμένης προσδοκώμενης τιμής (target value) στα επίπεδα της μέσης διαφοράς,
2. η «ομοιόμορφη» προσέγγιση της συνάρτησης απώλειας ποιότητας (Uniform – the best) μεταφράζεται σε ελαχιστοποίηση της προκύπτουσας τυπικής απόκλισης (standard deviation),
3. η «μικρή» προσέγγιση της συνάρτησης απώλειας ποιότητας (Small – the better) μεταφράζεται σε ελαχιστοποίηση της προκύπτουσας μέγιστης τιμής και
4. η «μεγάλη» προσέγγιση της συνάρτησης απώλειας ποιότητας (Large – the better) μεταφράζεται σε μεγιστοποίηση της προκύπτουσας μέγιστης τιμής

5.2 Το εργαλείο Moldex3D Expert

Το Moldex3D Expert είναι ένα επαγγελματικό εργαλείο που διαθέτει το λογισμικό Moldex3D και βοηθάει τους μηχανικούς να αναζητούν το βέλτιστο αποτέλεσμα αναφορικά με το μέγεθος του συστήματος διανομής του καλουπιού (runner size), την τοποθέτηση των πυλών εισόδου (gate location) και τις συνθήκες που παραμετροποιούν την κατασκευαστική διεργασία injection molding, ήτοι τις πιέσεις, τις θερμοκρασίες, τις ταχύτητες κλπ. Συγκεκριμένα, απαιτώντας από τον μηχανικό την χειροκίνητη εισαγωγή ελάχιστων δεδομένων, το εργαλείο αυτό αρχικά παραμετροποιεί κατάλληλα την κατασκευαστική διεργασία. Μετά από μια σειρά απαραίτητων προσομοιώσεων, εκτελείται η βέλτιστη προσομοίωση του κύκλου έγχυσης χωρίς να υπάρχει πλέον η ανάγκη για τη διενέργεια περαιτέρω δοκιμών από τον μηχανικό διά της συμβατικής μεθόδου δοκιμής και σφάλματος (trial and error). Ασφαλώς, η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα να αποτυπώνεται ο βέλτιστος σχεδιασμός της κατασκευαστικής διεργασίας ενός προϊόντος έγχυσης συνολικά.

5.2.1 Σχεδιασμός Πειραμάτων με Χρήση του Εργαλείου Moldex3D Expert

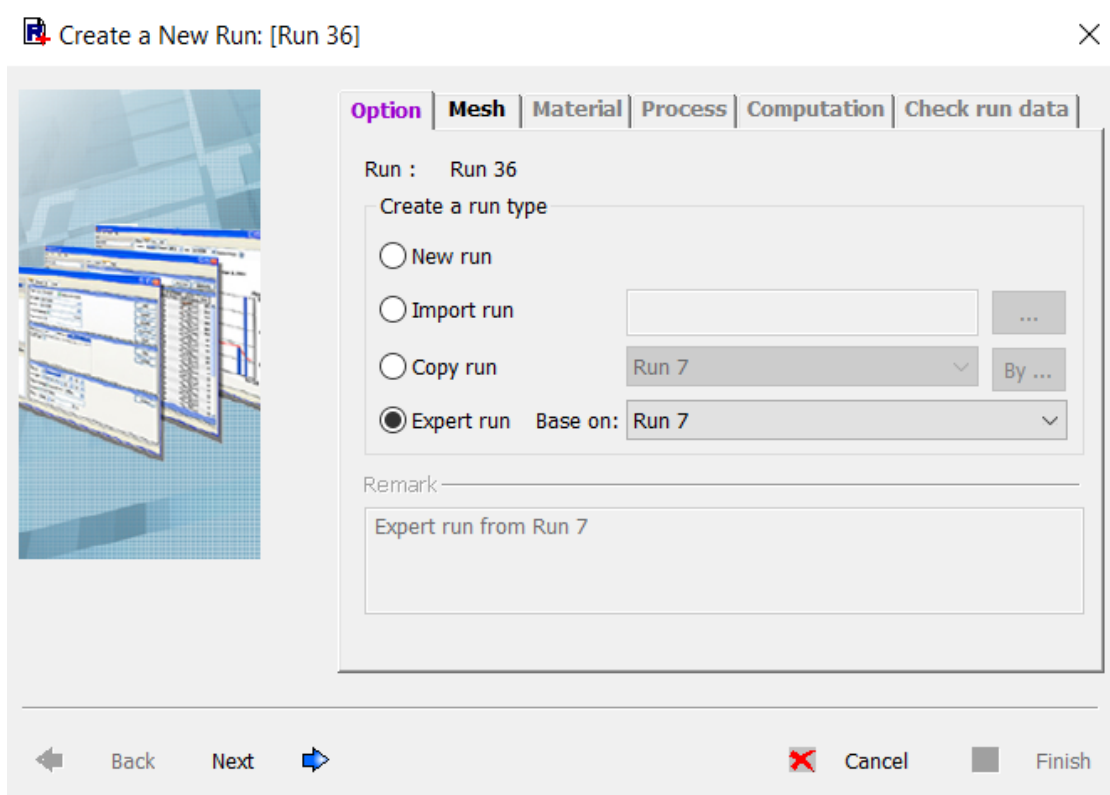
Μεταξύ των άλλων, το εργαλείο Moldex3D Expert μπορεί να θέτει σε εφαρμογή την αποτελεσματική μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων (DOE). Για την ακρίβεια, χρησιμοποιώντας άμεσα τα πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης ως δεδομένα εισαγωγής (input), το εν λόγω εργαλείο προβαίνει αρχικά σε μια εκτίμηση των βέλτιστων επιπέδων κάθε παράγοντα ελέγχου που συνυπολογίζεται στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Εν συνεχεία, εφαρμόζοντας τη μέθοδο Taguchi

προχωράει στη βελτιστοποίηση της ποιότητας του παραγόμενου αντικειμένου τόσο ως προς τη μηχανική του όσο και ως προς την αισθητική εμφάνισή του.

Αναμφίβολα, η ροή των εργασιών (workflow) που πρέπει να επιτελεστούν για τον ορθό σχεδιασμό των πειραμάτων γίνεται μια εξαιρετικά απλή διαδικασία, ιδιαίτερα φιλική προς τον μηχανικό ο οποίος καθοδηγείται βήμα προς βήμα από αναδυόμενα παράθυρα διαλόγου προκειμένου να ρυθμίσει καταλλήλως όλες τις απαραίτητες συνθήκες. Ειδικότερα, οι εργασίες αυτές παρατίθενται και σχολιάζονται εκτενώς παρακάτω.

➤ Δημιουργία εξειδικευμένης ανάλυσης (Expert run)

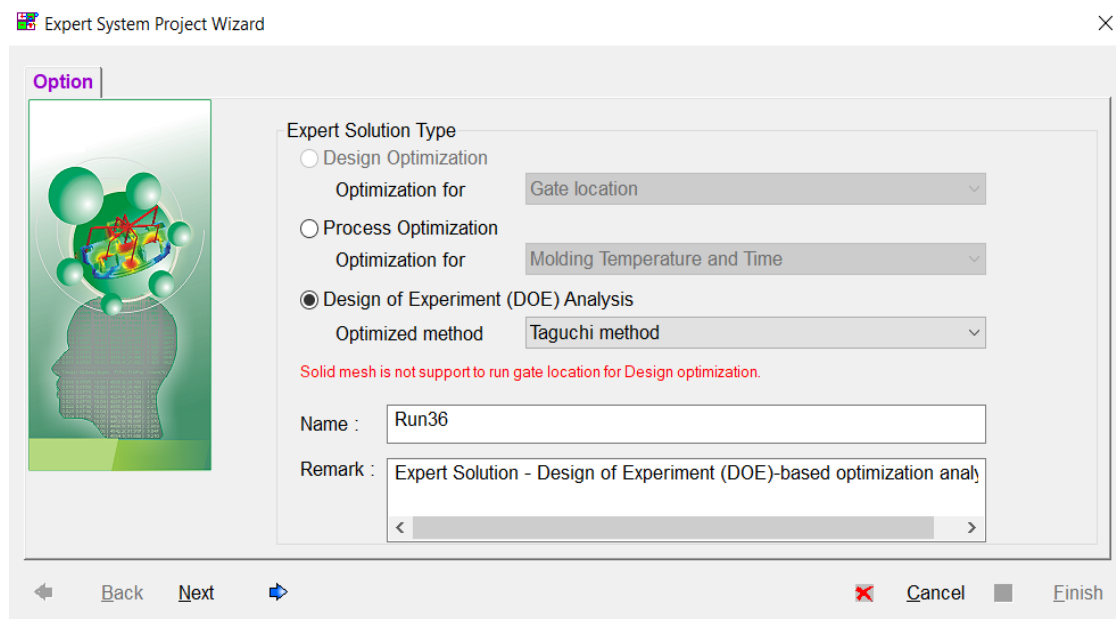
Εδώ ο μηχανικός δημιουργεί την εξειδικευμένη ανάλυση βάσει της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης της οποίας τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισαγωγής (input).



Σχήμα 5-7. Δημιουργία εξειδικευμένης ανάλυσης βάσει της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης.

➤ Επιλογή μεθόδου εξειδικευμένης ανάλυσης (Expert run system)

Ακολουθως, ο μηχανικός επιλέγει τη μέθοδο της εξειδικευμένης ανάλυσης καθώς και τη μέθοδο βελτιστοποίησης αυτής.



Σχήμα 5-8. Επιλογή μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων και μεθόδου Taguchi στα πλαίσια της βελτιστοποίησης της εξειδικευμένης ανάλυσης.

➤ Καθορισμός ποιοτικών παραγόντων (Quality Factor dialog)

Σε αυτό το στάδιο ο μηχανικός :

- επιλέγει τους ποιοτικούς παράγοντες που επιθυμεί,
- καθορίζει το ποσοστιαίο βάρος (weighting percentage) με το οποίο κάθε ποιοτικός παράγοντας συμμετέχει στη διαδικασία βελτιστοποίησης,
- δηλώνει το χαρακτηριστικό, δηλαδή την προσέγγιση κάθε ποιοτικού παράγοντα συμπεριλαμβανομένων των επιλογών Small the Better, Large the Better, Nominal the Best και Uniform the Best (καθορίζεται από την τυπική απόκλιση - standard deviation) ή/και
- θέτει την προσδοκώμενη τιμή για κάθε ποιοτικό παράγοντα, κάτι το οποίο απαιτείται όταν επιλέγεται το χαρακτηριστικό ενός παράγοντα ως Nominal the Best.

Αναλόγως της φάσης στην οποία βρίσκεται το πολυμερές τήγμα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου έγχυσης, οι ποιοτικοί παράγοντες ποικίλουν. Συγκεκριμένα, για τις φάσεις πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης και ψύξης του τήγματος (filling / packing / cooling phase), οι διαθέσιμοι ποιοτικοί παράγοντες που μπορούν να ληφθούν υπόψιν είναι οι εξής :

- ❖ *Μέση κατανομή θερμοκρασίας σε ° C (Average temperature distribution – ° C) με προτεινόμενη προσέγγιση την «ομοιόμορφη» (Uniform – the best).*
- ❖ *Κεντρική κατανομή θερμοκρασίας σε ° C (Center temperature distribution – ° C) με προτεινόμενη προσέγγιση την «ομοιόμορφη» (Uniform – the best).*

- ❖ Κατανομή κύριου όγκου θερμοκρασίας σε $^{\circ}\text{C}$ (*Bulk temperature distribution – $^{\circ}\text{C}$*) με προτεινόμενη προσέγγιση την «ομοιόμορφη» (Uniform – the best).
- ❖ Κατανομή ταχύτητας διατμήσεως σε $1/\text{sec}$ (*Shear rate distribution – $1/\text{sec}$*) με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ Κατανομή διατμητικής τάσης σε MPa (*Shear stress distribution – MPa*) με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ Κατανομή πυκνότητας σε g/cc (*Density distribution – g/cc*) με προτεινόμενη προσέγγιση την «ομοιόμορφη» (Uniform – the best).
- ❖ Ποσοστιαία κατανομή ογκομετρικής συρρίκνωσης (*Volumetric shrinkage distribution – %*) με προτεινόμενη προσέγγιση την «ομοιόμορφη» (Uniform – the best).
- ❖ Κατανομή θερμοκρασίας μετώπου ροής σε $^{\circ}\text{C}$ (*Melt Front temperature distribution – $^{\circ}\text{C}$*) με προτεινόμενη προσέγγιση την «ομοιόμορφη» (Uniform – the best).
- ❖ Κατανομή πίεσης σε MPa (*Pressure distribution – MPa*) με προτεινόμενη προσέγγιση την «ομοιόμορφη» (Uniform – the best).
- ❖ Μέγιστη δύναμη σύσφιξης σε Ton(m) (*Max. clamping force – Ton(m)*) με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ Τιμή πίεσης έγχυσης στο κάθετο κανάλι σε MPa (*Sprue injection pressure value – MPa*) με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ Διαφοροποίηση στη θερμοκρασία καλουπιού σε $^{\circ}\text{C}$ (*Mold temperature difference – $^{\circ}\text{C}$*) με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).

Πρόκειται για έναν σημαντικό ποιοτικό παράγοντα – δείκτη της θερμικής εκτόπισης (thermal displacement). Γενικά, όταν η θερμοκρασιακή διαφορά είναι μεγαλύτερη των 10°C , τότε συνεπακόλουθα αυξάνεται η στρέβλωση (warpage) του τελικού προϊόντος έγχυσης.

- ❖ Διαφοροποίηση στο πάχος του στερεοποιημένου υλικού σε mm (*Frozen thickness difference – mm*) με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ Χρόνος ψύξης σε sec (*Cooling time – sec*) με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ Θερμοκρασία παραγόμενου εξαρτήματος σε $^{\circ}\text{C}$ (*Part temperature – $^{\circ}\text{C}$*) με προτεινόμενη προσέγγιση την «ομοιόμορφη» (Uniform – the best).

Αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ποιοτικούς παράγοντες καθότι η ομοιόμορφη θερμοκρασία μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό ορισμένων εκ των σημαντικών προβλημάτων του τελικού προϊόντος έγχυσης, όπως είναι η στρέβλωσή του (warpage), η εμφάνιση βαθουλωμάτων (sink marks) στην

εξωτερική του επιφάνεια και η ανάπτυξη υπολειμματικών τάσεων στο εσωτερικό του (residual stresses).

Πέραν τούτων, οι ποιοτικοί παράγοντες που μπορούν να προσμετρηθούν κατά τη μελέτη της στρέβλωσης (warpage) του παραχθέντος προϊόντος έγχυσης είναι οι ακόλουθοι :

- ❖ *Ποσοστιαία ογκομετρική συρρίκνωση (Volumetric shrinkage – %)* με προτεινόμενη προσέγγιση την «ομοιόμορφη» (Uniform – the best).
- ❖ *Εκτόπιση κατά τη διεύθυνση X σε mm (X - displacement – mm)* με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ *Εκτόπιση κατά τη διεύθυνση Y σε mm (Y - displacement – mm)* με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ *Εκτόπιση κατά τη διεύθυνση Z σε mm (Z - displacement – mm)* με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ *Συνολική εκτόπιση σε mm (Total displacement – mm)* με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).
- ❖ *Επιπεδότητα σε mm (Flatness – mm)* με προτεινόμενη προσέγγιση τη «μικρή» (Small – the better).

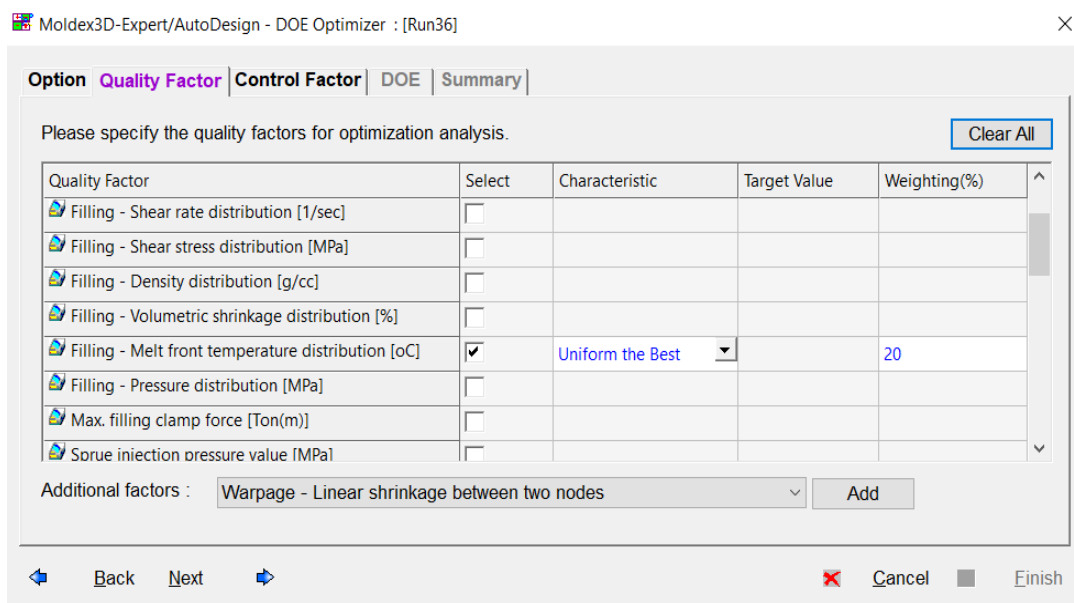
Επί του παρόντος, για το προϊόν έγχυσης που μελετάται στην παρούσα διατριβή, ο επικείμενος σχεδιασμός πειραμάτων θα έχει ως αντικείμενο βελτιστοποίησης μία αντικειμενική συνάρτηση στην οποία θα συμμετέχουν ταυτόχρονα συνολικά τέσσερις ποιοτικοί παράγοντες : ένας παράγοντας για καθεμία από τις τρεις φάσεις του κύκλου έγχυσης (φάση πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα – filling phase, φάση συμπίεσης του τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης – racking phase και φάση ψύξης του τήγματος – cooling phase) και ένας παράγοντας για τη μελέτη της στρέβλωσης (warpage) του παραχθέντος προϊόντος έγχυσης.

Τούτο συμβαίνει διότι και οι τέσσερις αυτοί ποιοτικοί παράγοντες που πρόκειται να ληφθούν υπόψιν στον σχεδιασμό πειραμάτων, αναλόγως της βαρύτητας του καθενός, είναι όλοι απαραίτητοι για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης. Και αυτό γιατί σχετίζονται άμεσα με τις σοβαρές κατασκευαστικές ατέλειες του τελικού προϊόντος έγχυσης, όπως αυτές εντοπίστηκαν στα πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης. Οπωσδήποτε, δεν αρκεί η μεμονωμένη μελέτη ενός ή περισσότερων ποιοτικών παραγόντων σε κάθε φάση ξεχωριστά. Και αυτό γιατί ο αντικειμενικός σκοπός της μελέτης στα πλαίσια της βελτιστοποίησης είναι ο συνυπολογισμός της αλληλοσυσχέτισης μεταξύ των ποιοτικών παραγόντων σε κάθε φάση, από την έναρξη έως τη λήξη ενός πλήρους κύκλου έγχυσης, συμπεριλαμβανομένης της μελέτης της στρέβλωσης του παραχθέντος προϊόντος έγχυσης.

Αναμφίβολα, στις ιδανικές συνθήκες θα ήταν ωφέλιμο κατά τον σχεδιασμό πειραμάτων να υπολογίζονται από κοινού όλοι οι ποιοτικοί παράγοντες σε κάθε φάση. Ωστόσο, όσο περισσότεροι είναι οι ποιοτικοί παράγοντες, τόσο μικρότερη γίνεται κατ' ανάγκην η βαρύτητα με την οποία καθένας εξ αυτών συμμετέχει στην προς

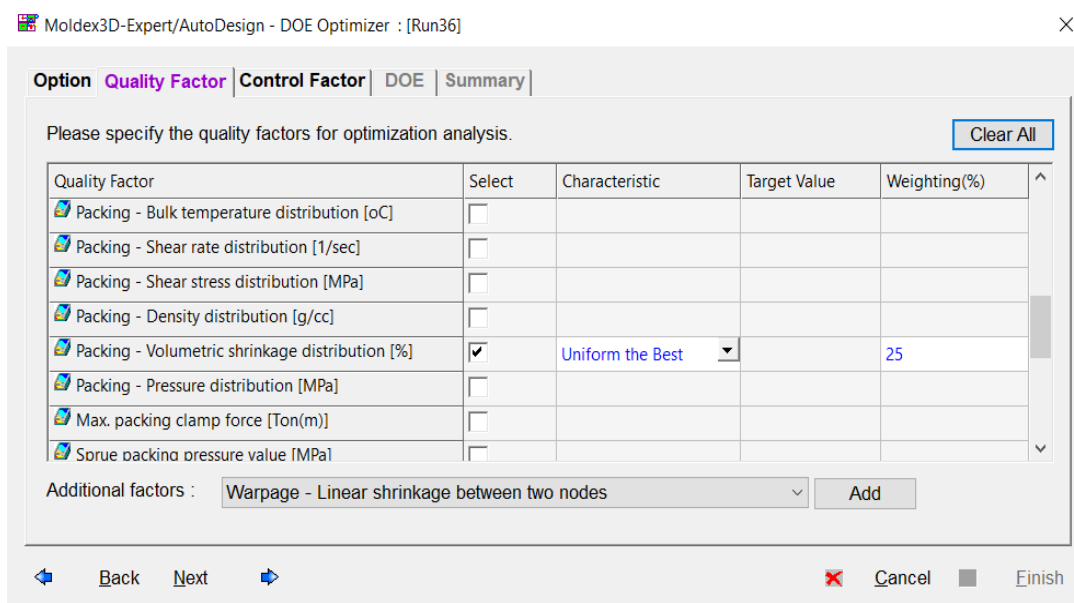
βελτιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση. Προφανώς, κάτι τέτοιο έχει ως συνέπεια, σε επίπεδο προσομοίωσης, να μην μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που να θεωρούνται αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας μιας και επιτείνεται η αστάθεια του εξεταζόμενου συστήματος. Επομένως, στον σχεδιασμό πειραμάτων λαμβάνονται υπόψιν οι κάτωθι ποιοτικοί παράγοντες που συνδέονται άμεσα με τις κατασκευαστικές ατέλειες του τελικού προϊόντος έγχυσης, δηλώνοντας παράλληλα την προσέγγιση κάθε παράγοντα και καθορίζοντας το ποσοστιαίο βάρος (weighting percentage) με το οποίο καθένας εξ αυτών συμμετέχει στη διαδικασία βελτιστοποίησης :

- Filling



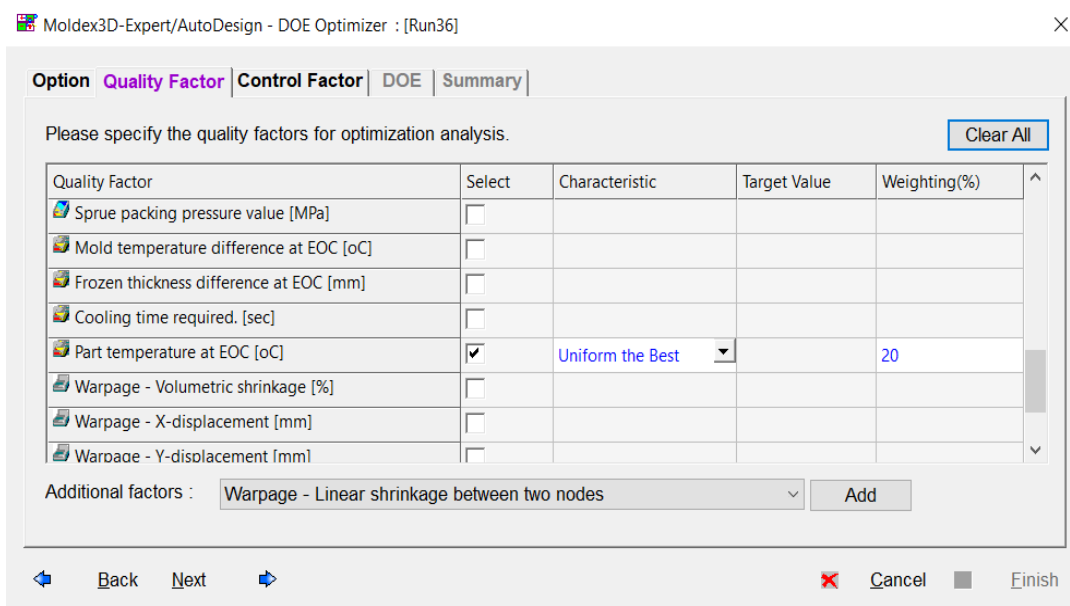
Σχήμα 5-9. Quality Factor – Filling

- Packing



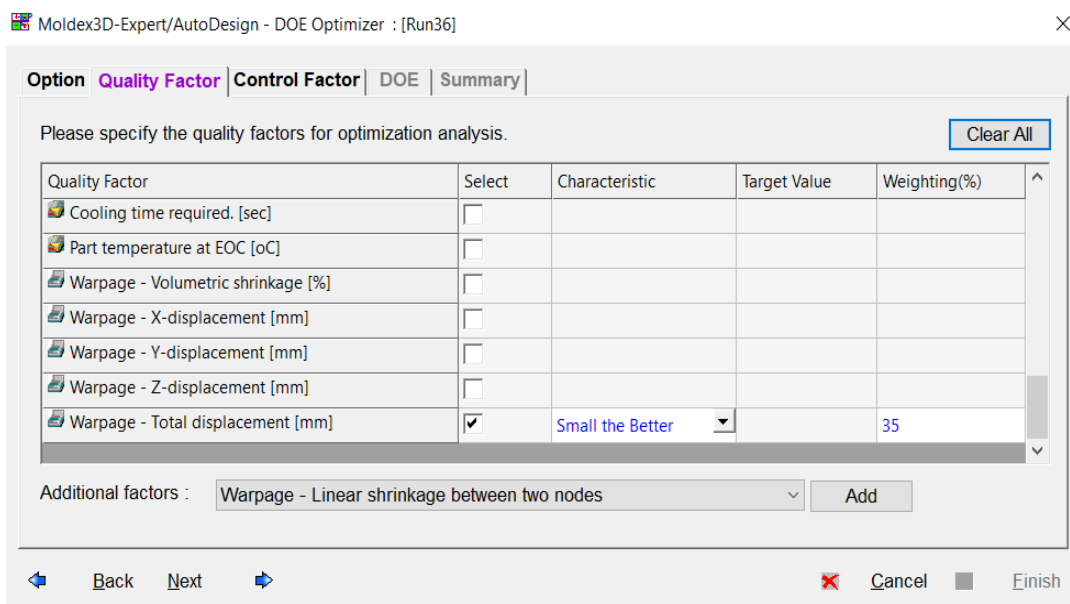
Σχήμα 5-10. Quality Factor – Packing

- Cooling



Σχήμα 5-11. Quality Factor – Cooling

- Warpage



Σχήμα 5-12. Quality Factor – Warpage

➤ Καθορισμός παραγόντων ελέγχου (Control Factor dialog)

Σε αυτό το στάδιο ο μηχανικός καθορίζει τους παράγοντες ελέγχου που συμμετέχουν στη διαδικασία βελτιστοποίησης, τον αριθμό των επιπέδων κάθε παράγοντα καθώς

και την τιμή που λαμβάνει ο εκάστοτε παράγοντας ελέγχου σε κάθε επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, οι παράγοντες ελέγχου μπορούν να είναι οι εξής :

❖ *3D πλέγμα (3D mesh)*

Στη διαδικασία βελτιστοποίησης ένας συνηθισμένος παράγοντας ελέγχου που ενδέχεται να ληφθεί υπόψιν είναι το 3D πλέγμα του προς μορφοποίηση αντικειμένου. Τα πολλαπλά επίπεδα που μπορούν να οριστούν από τον μηχανικό αντιστοιχούν στις πιθανές διαφορετικές εκδοχές του 3D πλέγματος ως προς τη μορφή και τη δομή του (αριθμός πεπερασμένων στοιχείων, γεωμετρία πεπερασμένων στοιχείων κλπ).

❖ *Πολυμερές δομικό υλικό (Polymer material)*

Ένας επίσης συνηθισμένος παράγοντας ελέγχου που ενδέχεται να ληφθεί υπόψιν στη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι το πολυμερές δομικό υλικό που χρησιμοποιείται για τη μορφοποίηση ενός αντικειμένου. Τα πολλαπλά επίπεδα που μπορούν να οριστούν από τον μηχανικό αντιστοιχούν στα πιθανά διαφορετικά πολυμερή δομικά υλικά που ο ίδιος επιθυμεί να χρησιμοποιήσει προκειμένου να εξετάσει τη συμπεριφορά του τελικού προϊόντος έγχυσης ως προς τις κατασκευαστικές ατέλειες αναλόγως του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου πολυμερούς.

❖ *Χρόνος πλήρωσης (Filling time)*

Μετρίεται σε δευτερόλεπτα (**sec**) και εξαρτάται από τις διαστάσεις, τον όγκο, και τις ιδιότητες του πολυμερούς δομικού υλικού του παραγόμενου εξαρτήματος. Σε κάθε περίπτωση είναι περίπου ίσος με το πηλίκο του μέγιστου μήκους ροής (max. flow length) από τις πύλες εισόδου (gates) μέχρι το πέρας της πλήρωσης (End Of Filling stage – EOF) προς την ταχύτητα ροής (flow rate), ήτοι :

$$filling\ time \approx (max.\ flow\ length) / (flow\ rate) \quad (5-12)$$

Από τη μία πλευρά, ο αυξημένος χρόνος πλήρωσης συνεπάγεται πολυμερές τήγμα με χαμηλότερο ιξώδες λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του τήγματος (melt temperature) η οποία ακολούθως απορρέει από την αυξημένη διατμητική θέρμανση (shear heating). Κατά κοινή διαπίστωση, όσο χαμηλότερο είναι το ιξώδες του τήγματος, τόσο καλύτερη είναι η συμπίεση του πολυμερούς εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού και τόσο μικρότερη είναι η ογκομετρική συρρίκνωση του υλικού και, εν τέλει, η στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης.

Από την άλλη πλευρά, μολονότι ο μειωμένος χρόνος πλήρωσης συνεισφέρει στην περιστολή της χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης, αυτομάτως συνεπάγεται την αύξηση της ταχύτητας ροής του πολυμερούς τήγματος προκειμένου να γεμίσει η κοιλότητα μορφοποίησης στο ακέραιο με υλικό. Εάν μάλιστα είναι εξαιρετικά σύντομος, τότε ο ρυθμός ροής του τήγματος ενδεχομένως να ξεπεράσει την ονομαστική ταχύτητα του εμβόλου, όπως αυτή καθορίζεται από την ικανότητα πλαστικοποίησης της μονάδας έγχυσης. Κάτι τέτοιο είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα επιφέρει αστάθεια στην κατασκευαστική διεργασία.

Επίσης, εξαιτίας του αυξημένου ρυθμού ροής του πολυμερούς τήγματος, είναι αδύνατο να αποφευχθούν :

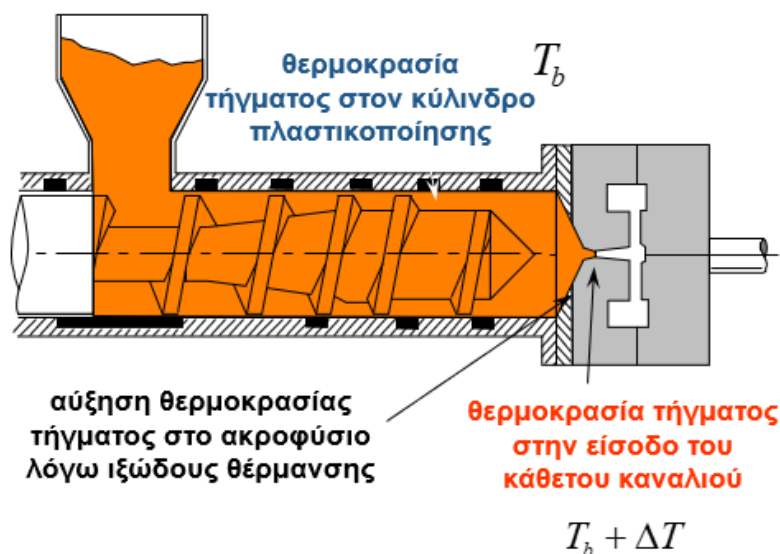
- η υψηλή ιξώδης θέρμανση (viscous heating) που συμβάλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (melt temperature),
- ο υψηλός ρυθμός διάτμησης (shear rate) που εξασθενεί τις μοριακές αλυσίδες του πολυμερούς επηρεάζοντας έτσι τη μηχανική αντοχή του τελικού προϊόντος έγχυσης και
- η άμεση πτώση της πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης με συνέπεια την ανάγκη για σημαντική αύξηση της πίεσης έγχυσης (injection pressure).

Συν τοις άλλοις, η μικρή χρονική διάρκεια της πλήρωσης πιθανόν να οδηγήσει σε αδυναμία πλήρωσης ολόκληρης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα, γεγονός το οποίο οδηγεί σε λειψά αντικείμενα (short shot). Επομένως, εύκολα καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι η άσκοπη μείωση του χρόνου πλήρωσης είναι καλό να αποφεύγεται. Ασφαλώς, ο ενδεδειγμένος χρόνος πλήρωσης είναι εκείνος ο οποίος ικανοποιεί πάντα τον περιορισμό της ελάχιστης πίεσης έγχυσης που είναι αρκετή για να ολοκληρώσει επιτυχώς την πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης με υλικό.

Στο λογισμικό Moldex3D ο χρόνος πλήρωσης προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με τις ακριβείς τιμές των ανωτέρω παραμέτρων (διαστάσεις, όγκος και ιδιότητες υλικού του εξαρτήματος) και μπορεί, σε ειδικές περιπτώσεις, να μεταβληθεί χειροκίνητα από τον μηχανικό σύμφωνα με την κρίση και την εμπειρία του. Ειδικότερα, στα πλαίσια του σχεδιασμού πειραμάτων, έχοντας προσεγγίσει κατά πολύ τον ιδανικό χρόνο πλήρωσης (περί τα 4.5 sec) κατόπιν πολλών δοκιμών, η τιμή του οριοθετείται εν τέλει μεταξύ τριών επιπέδων (4.25, 4.5 και 4.75 sec) προκειμένου να ανευρεθεί και μαθηματικά η βέλτιστη τιμή.

❖ Θερμοκρασία πολυμερούς τήγματος (Melt temperature)

Δεδομένου ότι αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα εν πάσει περιπτώσει, η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) επιδρά σημαντικά στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση κάθε φάσης ενός πλήρους κύκλου έγχυσης συμπεριλαμβανομένης της προσομοίωσης της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης. Μετρείται σε ° C και καθορίζεται έπειτα από συνυπολογισμό των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται λόγω της τριβής μεταξύ του κοχλίου και του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού εντός του κυλίνδρου πλαστικοποίησης της μηχανής έγχυσης (Σχήμα 5-13).



Σχήμα 5-13. Στο λογισμικό Moldex3D η εν λόγω θερμοκρασία αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος στην είσοδο του κάθετου καναλιού και προφανώς διαφέρει από τη θερμοκρασία του τήγματος εντός του κυλίνδρου πλαστικοποίησης (barrel temperature).

Γενικά, βάσει των ογκομετρικών ιδιοτήτων του πολυμερούς, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ογκομετρική συρρίκνωση του υλικού. Αυτό συμβαίνει διότι με την αύξηση της θερμοκρασίας το πολυμερές διαστέλλεται οπότε απαιτεί μεγαλύτερης τάξης μεγέθους συρρίκνωση προκειμένου να ισορροπήσει θερμοκρασιακά. Επομένως, χάριν αντιστάθμισης της επικείμενης ογκομετρικής συρρίκνωσης, η πίεση συμπίεσης που ασκείται στο τήγμα εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού χρειάζεται να είναι εξίσου υψηλή.

Συν τοις άλλοις, η αυξημένη θερμοκρασία του τήγματος καθιστά δυσκολότερη τη στερεοποίησή του εντός των πυλών εισόδου (frozen gates), ενώ συμπαρασύρει μοιραία τον χρόνο ψύξης (cooling time) προς τα πάνω. Κατά συνέπεια, κρίνεται αναγκαίο το εν λόγω φυσικό μέγεθος να εξετάζεται σχολαστικά διά των συγκεκριμένων τιμών που αυτό μπορεί να λάβει κάθε φορά, ευρισκόμενων πάντα εντός του ενδεδειγμένου εύρους τιμών.

Ακριβέστερα, στην παρούσα μελέτη περίπτωσης το ενδεδειγμένο εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η θερμοκρασία τήξης για το υλικό του πολυστυρενίου (HIPS) ούτως ώστε αυτό να τήκεται χωρίς να προκύπτει υποτίμηση των ιδιοτήτων του κυμαίνεται από **220** έως **250** ° C. Για τον σχεδιασμό πειραμάτων, έχοντας πλησιάσει κατά πολύ στην ιδανική θερμοκρασία τήξης του υλικού (περί τους **245** ° C) έπειτα από πληθώρα δοκιμών, η τιμή της εν λόγω θερμοκρασίας οριοθετείται τελικά μεταξύ τριών επιπέδων (**243.5**, **245** και **246.5** ° C) προκειμένου να ανευρεθεί και μαθηματικά η βέλτιστη τιμή.

Σημειωτέον ότι σύμφωνα με τον κατασκευαστή του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού, οι **250** ° C αποτελούν τη μέγιστη προβλεπόμενη τιμή που μπορεί να λάβει η θερμοκρασία του τήγματος πολυστυρενίου. Καλό είναι, ωστόσο, η εν λόγω θερμοκρασία να ρυθμίζεται ελαφρώς κάτω από τη μέγιστη προβλεπόμενη τιμή της. Και τούτο διότι κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη ενός εύλογου περιθωρίου για την επικείμενη αύξηση της θερμοκρασίας του τήγματος εξαιτίας της ιξώδους θέρμανσης (viscous heating) που αναπτύσσεται από την κίνηση του κοχλία εντός του κυλίνδρου πλαστικοποίησης.

Επίσης, ιδιαίτερη σημασία για την κατασκευαστική διεργασία έχει η ρύθμιση της θερμοκρασίας στο ακροφύσιο του καλουπιού η οποία είναι συνάρτηση του σχήματος του ακροφυσίου, του τύπου του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού και φυσικά της ποσότητας του υλικού που πρόκειται να εγχυθεί εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Δεδομένου ότι το ακροφύσιο λειτουργεί ως αγωγός μεταφοράς του πολυμερούς τήγματος, τότε αυτό δεν πρέπει να επηρεάζει την θερμοκρασία του τήγματος. Για αυτό, άλλωστε, στην ιδανική περίπτωση οι θερμοκρασίες εισόδου του τήγματος στο ακροφύσιο και εξόδου του τήγματος από αυτό πρέπει να είναι ίσες.

❖ *Θερμοκρασία καλουπιού (Mold temperature)*

Η θερμοκρασία των τοιχωμάτων της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού (mold temperature), μετρούμενη σε ° C, ελέγχεται από την κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου και αποτελεί οριακή συνθήκη για την πίεση έγχυσης (injection pressure). Ως γνωστόν, το υψηλό θερμοκρασιακό περιβάλλον συντείνει στη

μείωση της επιφανειακής τάσης του τήγματος. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός μεν την καλύτερευση της ρευστότητας του πολυμερούς, αφετέρου δε την ελαχιστοποίηση της ανάγκης για άσκηση υψηλών πιέσεων στο τήγμα. Ασφαλώς, οι υψηλές πιέσεις καλό είναι να αποφεύγονται καθότι αυξάνουν κατακόρυφα τις απαιτήσεις για αύξηση της δύναμης σύσφιξης του καλουπιού (clamping force), κάτι το οποίο δεν είναι πάντα εφικτό.

Εξάλλου, όταν η θερμοκρασία του καλουπιού είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature), το πολυμερές τήγμα εφάπτεται στα τοιχώματα της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού και ο συνολικός όγκος του πολυμερούς αρχίζει να συρρικνώνεται εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας. Επομένως, οι επιλογές που έχει ο εκάστοτε μηχανικός είναι δύο :

- είτε ο περιορισμός της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς διά της αύξησης της θερμοκρασίας του καλουπιού στα επίπεδα της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος εφόσον υπάρχει αυτή η δυνατότητα
- είτε η αντιστάθμιση της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς διά της άσκησης πίεσης συμπίεσης στο πολυμερές τήγμα η οποία θα ωθήσει επιπλέον τήγμα προς τα τοιχώματα της κοιλότητας και του πυρήνα του καλουπιού προτού φράξουν οι πύλες εισόδου από στερεοποιημένο πολυμερές.

Ομοίως με την θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος, η θερμοκρασία του καλουπιού καθορίζεται προσεκτικά έπειτα από συνυπολογισμό των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται λόγω της τριβής μεταξύ του κοχλία και του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού. Επομένως, στην παρούσα μελέτη περίπτωσης το ενδεδειγμένο εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η θερμοκρασία του καλουπιού για το υλικό του πολυστυρενίου (HIPS) κυμαίνεται από **40** έως **60** ° C. Για τον σχεδιασμό πειραμάτων, έχοντας φτάσει μετά από πολλές δοκιμές πολύ κοντά στην ιδανική θερμοκρασία που πρέπει να έχουν κοιλότητα και πυρήνας του καλουπιού (περί τους **55** ° C), η τιμή της εν λόγω θερμοκρασίας οριοθετείται εν τέλει μεταξύ τριών επιπέδων (**53.5**, **55** και **56.5** ° C) προκειμένου να ανευρεθεί και μαθηματικά η βέλτιστη τιμή.

Προφανώς, η επιλογή έγινε σε πλήρη εναρμόνιση με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή για τη θερμοκρασία του καλουπιού όπως αυτές προτείνονται από τον κατασκευαστή του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού. Ο στόχος δεν είναι άλλος από το να χρησιμοποιηθούν οι τιμές αυτές για τη θερμοκρασία του καλουπιού που σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες χρησιμοποιούμενες τιμές για τη θερμοκρασία του τήγματος να μην οδηγούν στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού.

Επισημαίνεται ότι στο λογισμικό Moldex3D, εφόσον η πρώτη ανάλυση που διενεργείται σε μία πλήρη προσομοίωση είναι η ανάλυση ψύξης (cooling analysis), δεν επιλέγεται η θερμοκρασία καλουπιού ως παράγοντας ελέγχου. Αντ' αυτού, επιλέγεται ως παράγοντας ελέγχου η προεπιλεγμένη θερμοκρασία ψυκτικού μέσου σε ° C (Default Coolant Temperature – ° C) προκειμένου να ελεγχθεί, εν τέλει, ορθά η θερμοκρασία του καλουπιού.

❖ *Μέγιστη πίεση έγχυσης (Max. injection pressure)*

Η πίεση έγχυσης (injection pressure) είναι η πίεση που ασκείται στο πολυμερές τήγμα κατά τη φάση της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού

με πολυμερές τήγμα. Η άσκηση της πίεσης διενεργείται από την εμπρόσθια αιχμή του κοχλίου ο οποίος λειτουργεί ως *εμβολέας* (*plunger*). Μετριέται σε **MPa**, σχετίζεται με την υδραυλική πίεση της μηχανής έγχυσης και εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων όπως :

- ο το καθορισμένο προφίλ της πίεσης έγχυσης,
- ο το ιξώδες του πολυμερούς τήγματος που επίκειται να εγχυθεί,
- ο τη θερμοκρασία του τήγματος,
- ο το μέγεθος, το μήκος και το είδος (δηλαδή αν είναι θερμαινόμενοι ή όχι) των αγωγών διανομής,
- ο ο τύπος, το μέγεθος και το είδος (δηλαδή αν είναι θερμαινόμενες ή όχι) των πυλών εισόδου και
- ο το βάθος της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

Γενικά, η πίεση έγχυσης επιβάλλεται να είναι αρκετά υψηλή και να ασκείται για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε από τη μία να πληρώνεται η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα και από την άλλη να περιστέλλεται το φαινόμενο της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς (*volumetric shrinkage*) κατά την ψύξη του τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Συνήθως, η μέγιστη πίεση έγχυσης ρυθμίζεται κάτω του **50 %** της μέγιστης πίεσης που υποστηρίζει η χρησιμοποιούμενη μηχανή έγχυσης.

- ❖ *Μέγιστη ποσοστιαία τιμή του προφίλ της πίεσης έγχυσης (Max. injection pressure profile value - %)*
- ❖ *Μέγιστη ποσοστιαία τιμή του προφίλ της ταχύτητας ροής (Max. flow rate profile value - %)*

Η ταχύτητα ή ο ρυθμός ροής (*flow rate*) καθορίζει το πόσο γρήγορα ή αργά εισέρχεται στο καλούπι το πολυμερές τήγμα. Σαφώς, η βέλτιστη ταχύτητα ροής εξαρτάται από τη γεωμετρία του προς μορφοποίηση αντικειμένου, το μέγεθος και το σχήμα τόσο των πυλών εισόδου (*gates*) όσο και των αγωγών διανομής (*runners*) και από τη θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (*melt temperature*). Υψηλή ταχύτητα ροής από κοινού με ακροφύσιο μικρής διαμέτρου οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς τήγματος (*melt temperature*) λόγω διαμητρικής θέρμανσης (*shear heating*).

Σε ό,τι αφορά το προφίλ της ταχύτητας ροής, πρέπει να αποφεύγεται να διατηρείται σταθερό. Και αυτό γιατί όταν διατηρείται σταθερό ο ρυθμός ροής του πολυμερούς τήγματος είναι υψηλότερος πέριξ της περιοχής της τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού μιας και το πεδίο ροής εκεί είναι σχετικά μικρότερο. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου πίδακα (*jetting*) και την επακόλουθη πρόκληση ατελειών στην αντίστοιχη περιοχή του τελικού προϊόντος έγχυσης.

Ειδικά δε για τα προϊόντα έγχυσης δαιδαλώδους μορφής, το μεταβλητό προφίλ της ταχύτητας ροής είναι επιβεβλημένο προκειμένου να διατηρηθεί η εξέλιξη του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος υπό σταθερή ταχύτητα. Επεξηγηματικά, στην περίπτωση αυτή τόσο η αρχική όσο και η τελική ταχύτητα ροής θα πρέπει να παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, ενώ οι αντίστοιχες ενδιάμεσες επιβάλλεται να βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα. Ο λόγος που επιδιώκεται κάτι τέτοιο δεν είναι άλλος πέρα από την αναγκαιότητα της ομαλής πλήρωσης του κύριου όγκου της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα.

❖ Χρόνος συμπίεσης (*Packing time*)

Από την στιγμή που η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού γεμίζει πλήρως με πολυμερές τήγμα, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εξασκείται ακόμη πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης καλείται *χρόνος συμπίεσης* ή *χρόνος παραμονής* (*packing time*). Με άλλα λόγια, ο χρόνος συμπίεσης αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί έως ότου το πολυμερές τήγμα στερεοποιηθεί εντός των πυλών εισόδου. Μετριέται σε δευτερόλεπτα (**sec**) και εξαρτάται από τις διαστάσεις των πυλών εισόδου, το πάχος των τοιχωμάτων του παραγόμενου προϊόντος έγχυσης και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος και την κατανομή της πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης, όπως οι θερμοκρασίες τήγματος και καλουπιού.

Γενικά, όσο συντομότερος είναι ο χρόνος συμπίεσης, τόσο ταχύτερος είναι ο ρυθμός πτώσης της πίεσης (*pressure drop*) στο σύστημα διανομής του καλουπιού (*runner system*). Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η ασκούμενη πίεση συμπίεσης στην κοιλότητα μορφοποίησης είναι ανεπαρκής, γεγονός το οποίο επιτείνει την ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς τήγματος. Από την άλλη, ο παρατεταμένος χρόνος συμπίεσης δεν θα πρέπει να αποτελεί πανάκεια καθότι επιβαρύνει χρονικά τον κύκλο έγχυσης με ό,τι αυτό συνεπάγεται για το κόστος της παραγωγικής διαδικασίας.

Ούτως ή άλλως, ο χρόνος συμπίεσης είναι πολλαπλάσιος του χρόνου πλήρωσης (συνήθως από τρεις έως πέντε φορές) λόγω της αντίστασης που αντιμετωπίζει το επιπλέον πολυμερές τήγμα που διοχετεύεται στην κοιλότητα μορφοποίησης από το ήδη υπάρχον τήγμα στο εσωτερικό της. Επίσης, ο ελάχιστος χρόνος παραμονής θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο στερεοποίησης του πολυμερούς τήγματος εντός των πυλών εισόδου του καλουπιού (*gate freeze time*). Ειδικά, η πίεση εντός της κοιλότητας μορφοποίησης όπως έχει αναπτυχθεί κατά τις φάσεις πλήρωσης και συμπίεσης θα προκαλέσει στο συμπιεσμένο πολυμερές τήγμα αντιστροφή της ροής του προς το σύστημα διανομής του καλουπιού με αποτέλεσμα την ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς και την επακόλουθη απώλεια της διαστατικής ακρίβειας του τελικού προϊόντος έγχυσης.

Στο λογισμικό Moldex3D ο χρόνος συμπίεσης προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με τις ακριβείς τιμές των ανωτέρω παραμέτρων (διαστάσεις πυλών εισόδου, πάχος τοιχωμάτων του εξαρτήματος, θερμοκρασίες τήγματος και καλουπιού κλπ) και μπορεί, σε ειδικές περιπτώσεις, να μεταβληθεί χειροκίνητα από τον μηχανικό σύμφωνα με την κρίση και την εμπειρία του. Ειδικότερα, στα πλαίσια του σχεδιασμού πειραμάτων, έχοντας προσεγγίσει κατά πολύ τον ιδανικό χρόνο συμπίεσης (περί τα **20.1 sec**) ύστερα από πληθώρα δοκιμών, η τιμή του οριοθετείται τελικά μεταξύ τριών επιπέδων (**17.1**, **20.1** και **23.1 sec**) προκειμένου να ανευρεθεί και μαθηματικά η βέλτιστη τιμή.

❖ Μέγιστη πίεση συμπίεσης (*Max. packing pressure*)

Ως πίεση συμπίεσης (*packing pressure*) λογίζεται εκείνη η πίεση που ασκείται στο πολυμερές τήγμα κατά τη φάση της συμπίεσης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Ομοίως με την πίεση έγχυσης, η άσκηση της πίεσης συμπίεσης διενεργείται από την εμπρόσθια αιχμή του κοχλία ο οποίος λειτουργεί ως εμβολέας (*plunger*). Μετριέται σε **MPa**, σχετίζεται με την υδραυλική πίεση της μηχανής έγχυσης και ο ρόλος της είναι να διατηρεί συμπαγές

το πολυμερές τήγμα εντός της κοιλότητας μορφοποίησης μέχρις ότου αυτό στερεοποιηθεί εντός των πυλών εισόδου (gates).

Η κατάλληλη ρύθμιση και φυσικά η βελτιστοποίησή της αποτελούν καίρια ζητήματα της κατασκευαστικής διεργασίας injection molding. Σε γενικές γραμμές, η πίεση συμπίεσης θα πρέπει :

- ✓ να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπερνικά την αντίσταση που προβάλλουν οι πύλες εισόδου στη ροή του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης και να περιορίζει την ογκομετρική συρρίκνωση του τελικού προϊόντος έγχυσης,
- ✓ να είναι χαμηλότερη από τη δύναμη σύσφιξης του καλουπιού (clamping force) ώστε να αποσοβηθούν οι κίνδυνοι δημιουργίας προεκτάματος (flash) στο τελικό προϊόν έγχυσης και πρόκλησης βλαβών στο καλούπι και
- ✓ να ρυθμίζεται μεταξύ του **20** και του **100** % της πίεσης που έχει αναπτυχθεί στο τέλος της φάσης πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα (End Of Filling stage – EOF), με την αποδοτικότερη πίεση συμπίεσης να ξεκινά συνήθως από το **80** %.

Εάν για κάποιο λόγο η πίεση συμπίεσης είναι πολύ υψηλή, τότε παρατηρείται υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης (overpacking) που με τη σειρά της ευθύνεται για :

- τη δυσκολία εξόλκευσης του παραχθέντος αντικειμένου από το καλούπι,
- τη δημιουργία προεκτάματος (flash) στο τελικό προϊόν έγχυσης λόγω διαρροής του πολυμερούς τήγματος πέραν των ορίων της κοιλότητας μορφοποίησης και
- την ανάπτυξη ισχυρών υπολειμματικών τάσεων (residual stresses) στο εσωτερικό του τελικού προϊόντος έγχυσης,

ενώ εάν είναι πολύ χαμηλή, τότε ευθύνεται για :

- την αυξημένη ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς (volumetric shrinkage), άρα και την επακόλουθη στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης και
- την παραγωγή μη ολοκληρωμένων αντικειμένων εξαιτίας της ελλιπούς πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα (short shot).

Εν πάσει περιπτώσει, ο καθορισμός του κατάλληλου προφίλ της πίεσης συμπίεσης μπορεί να εξαλείψει όλα τα προαναφερθέντα φαινόμενα οδηγώντας σε ομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς και ομοιόμορφες υπολειμματικές τάσεις που περιορίζουν τη στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης. Υπογραμμίζεται ότι κατάλληλο προφίλ σημαίνει κατανομή της πίεσης συμπίεσης κατά το δυνατόν πιο ομοιόμορφα έπειτα από συνυπολογισμό του ρυθμού ψύξης του καλουπιού (cooling rate).

Επομένως, εάν το μορφοποιημένο αντικείμενο ψύχεται ταχέως, η πτώση της πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης γίνεται αυτομάτως μεγαλύτερη, οπότε το προφίλ της πίεσης συμπίεσης μπορεί να τροποποιηθεί αυξητικά. Στην αντίθετη περίπτωση, προφανώς, το προφίλ της πίεσης συμπίεσης χρειάζεται να αναδιαμορφωθεί πτωτικά.

Στα πλαίσια του σχεδιασμού πειραμάτων, έχοντας προσεγγίσει κατά πολύ τη μέγιστη πίεση συμπίεσης (περί τα **25.604 MPa**) μετά από πολλές δοκιμές, η τιμή της εν λόγω πίεσης οριοθετείται τελικώς μεταξύ τριών επιπέδων (**23.304**, **25.604** και **27.904 MPa**) προκειμένου να ανευρεθεί και μαθηματικά η βέλτιστη τιμή.

- ❖ *Μέγιστη ποσοστιαία τιμή του προφίλ της πίεσης συμπίεσης (Max. packing pressure profile value - %)*
- ❖ *Χρόνος ψύξης (Cooling time)*

Ο χρόνος ψύξης (cooling time) είναι το χρονικό διάστημα από την στιγμή που παύει να ασκείται πίεση συμπίεσης στο υδαρές πολυμερές τήγμα εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού μέχρι τη στιγμή κατά την οποία το καλούπι ανοίγει για να ακολουθήσει η εξόλκευση (ejection) του παραχθέντος προϊόντος έγχυσης. Μετριέται σε δευτερόλεπτα (**sec**) και εξαρτάται κατά ένα μέρος από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του χρησιμοποιούμενου δομικού υλικού και το πάχος των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου και, κατά κύριο λόγο, από την ικανότητα ψύξης του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης μέσω του συστήματος ψύξης του καλουπιού.

Γενικά, ο συντομότερος χρόνος ψύξης αφενός μεν εξοικονομεί κατασκευαστικό κόστος, αφετέρου δε οδηγεί σε πρώιμη στερεοποίηση του πολυμερούς τήγματος εντός των πυλών εισόδου και μεγαλύτερη πτώση πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Με τη σειρά της, η πτώση πίεσης ευθύνεται για την περιστολή της ασκούμενης πίεσης συγκράτησης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης και την επακόλουθη συρρίκνωση του υλικού. Η δε σύντμησή του χρόνου ψύξης ενδεχομένως οφείλεται στην υψηλότερη θερμοκρασία εξόλκευσης (ejection temperature) του μορφοποιημένου αντικειμένου. Επίσης, όταν τα αντικείμενα που επίκειται να παραχθούν διαθέτουν τοιχώματα με μεγάλα πάχη, τότε απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος ψύξης και μορφοποίηση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Από την άλλη, σε ό,τι αφορά τον πραγματικό χρόνο ψύξης, αυτός είναι μεγαλύτερος από τον ιδανικό αρχικό καθορισμό του κατά την παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στον βαθμό αποδοτικότητας των καναλιών ψύξης που συνήθως δεν ανέρχεται στο **100 %** και των λοιπών περιορισμών που απορρέουν από το καλούπι. Ο δε υπολογισμός του ιδεατού χρόνου ψύξης, εφόσον δεν υπάρχουν άμεσα διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τις ογκομετρικές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς δομικού υλικού, μπορεί να γίνει χοντρικά σε συμφωνία με το πάχος των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου. Έτσι, ισχύουν οι ακόλουθοι εμπειρικοί τύποι :

$$t_c = h \times (1 + 2h) \quad (5-13)$$

όταν το πάχος των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου είναι μικρότερο των **4 mm** και η θερμοκρασία του καλουπιού (mold temperature) μικρότερη των **60 °C** και

$$t_c = 1.3 \times h \times (1 + 2h) \quad (5-14)$$

όταν το πάχος των τοιχωμάτων του προς μορφοποίηση αντικειμένου είναι μικρότερο των **4 mm** και η θερμοκρασία του καλουπιού (mold temperature) μεγαλύτερη των **60 °C**.

Στα πλαίσια του σχεδιασμού πειραμάτων, έχοντας προσεγγίσει κατά πολύ τον ιδανικό χρόνο ψύξης (περί τα **19.2 sec**) μετά από πολλές δοκιμές, η τιμή του οριοθετείται τελικώς μεταξύ τριών επιπέδων (**18.24**, **19.2** και **20.16 sec**) προκειμένου να ανευρεθεί και μαθηματικά η βέλτιστη τιμή.

❖ *Χρόνος ανοίγματος καλουπιού (Mold-Opening time)*

Μετριέται σε δευτερόλεπτα (**sec**) και περιγράφει τον χρόνο από τη στιγμή που το καλούπι ανοίγει, λαμβάνει χώρα η εξόλκευση του μορφοποιημένου αντικειμένου και έπειτα κλείνει εκ νέου. Εάν αυτός ο χρόνος είναι πολύ σύντομος, τότε το μερικώς στερεοποιημένο πολυμερές τήγμα εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού δεν προλαβαίνει να ψυχθεί όπως πρέπει ώστε να λάβει την επιθυμητή θερμοκρασία και να ακολουθήσει η επιτυχής εξόλκευση του μορφοποιημένου αντικειμένου Αφετέρου, ο συγκεκριμένος χρόνος δεν μπορεί να υπερβαίνει τα **10 sec**. Και αυτό διότι «σπάζοντας» αυτό το χρονικό φράγμα, ο κύκλος έγχυσης επιβαρύνεται ασκόπως χρονικά με αποτέλεσμα να συντελεί στην επιβράδυνση της παραγωγικότητας και να θεωρείται εν τέλει αντισυμβαλλόμενος.

❖ *Θερμοκρασία εξόλκευσης (Ejection temperature)*

Πρόκειται για τη θερμοκρασία κατά την οποία το παραχθέν εξάρτημα μπορεί να εξολκευθεί χωρίς να προκληθεί κάποια ζημιά επ' αυτού. Η θερμοκρασία εξόλκευσης μετριέται σε **° C** και ρυθμίζεται χαμηλότερα από την θερμοκρασία μετάβασης του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς (transition temperature) αλλά υψηλότερα από τη θερμοκρασία του καλουπιού. Σε κάθε περίπτωση, η υψηλότερη θερμοκρασία εξόλκευσης συνεπάγεται ότι ο χρόνος ψύξης (cooling time) είναι συντομότερος.

Στο λογισμικό Moldex3D προτείνεται η κατάλληλη θερμοκρασία εξόλκευσης βάσει των υπόλοιπων παραμέτρων της κατασκευαστικής διεργασίας που έχουν ήδη καθοριστεί από τον μηχανικό. Έτσι, είναι δυνατό να προβλεφθεί ακριβέστερα η πραγματική θερμοκρασία εξόλκευσης. Επίσης, όταν διενεργούνται προσομοιώσεις του κύκλου έγχυσης για την παραγωγή προϊόντων έγχυσης λεπτού πάχους με αρκετά λεπτά χαρακτηριστικά, όπως λεπτά νευρά στήριξης ή μικρές εγκοπές, τότε είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί διερεύνηση της θερμοκρασίας εξόλκευσης σε χαμηλότερα επίπεδα από την αρχική σχετική προσέγγιση που πραγματοποιείται στο λογισμικό.

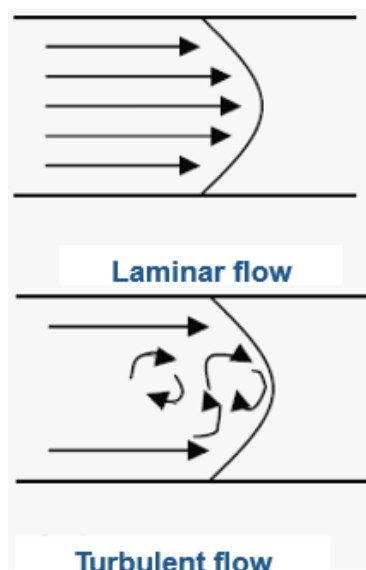
❖ *Θερμοκρασία δωματίου (Air temperature)*

Πρόκειται για τη θερμοκρασία που περιβάλλει την καλουπιέρα ενώ αυτή βρίσκεται σε κλειστό χώρο. Μετριέται σε **° C** και ενδεχομένως να επηρεάζει την κατανομή της θερμοκρασίας του παραχθέντος προϊόντος έγχυσης. Και αυτό γιατί κατά το άνοιγμα του καλουπιού, το παραχθέν προϊόν έγχυσης ψύχεται άμεσα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε αυτή πρέπει να κινείται στα φυσιολογικά επίπεδα (περίπου **25 ° C**) για την αποφυγή οποιασδήποτε επιπλοκής.

❖ *Ταχύτητα ή ρυθμός ροής ψυκτικού μέσου (Coolant flow rate)*

Η ταχύτητα ή ο ρυθμός ροής του ψυκτικού μέσου (coolant flow rate) σχετίζεται άμεσα με το είδος της ροής. Πιο συγκεκριμένα, όταν η ροή του ψυκτικού μέσου εντός των καναλιών ψύξης είναι *στρωτή* (laminar flow), τότε το ψυκτικό ρέει σε παράλληλα επίπεδα χωρίς διαταραχή μεταξύ των επιπέδων (**Σχήμα 5-14** – πάνω). Αντιθέτως, όταν η ροή του ψυκτικού είναι *τυρβώδης* (turbulent flow), τότε

αυτή χαρακτηρίζεται από χαοτικές – στοχαστικές αλλαγές των ιδιοτήτων του ρευστού, όπως διάχυση ορμής, υψηλή ταχύτητα μεταφοράς και ταχεία μεταβολή της πίεσης και της ταχύτητας στον χώρο και τον χρόνο (**Σχήμα 5-14** – κάτω).



Σχήμα 5-14. Σκαριφηματική απόδοση της στρωτής ροής (πάνω) και της τυρβώδους ροής (κάτω) του ψυκτικού μέσου.

Ο τύπος της ροής είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds (Εξ. (5-15)). Αναλόγως της τιμής που λαμβάνει ο αριθμός Reynolds, η ροή του ψυκτικού μέσου εντός των καναλιών ψύξης του καλουπιού χαρακτηρίζεται είτε στρωτή, είτε μεταβατική, είτε τυρβώδης, είτε στάσιμη (**Πίνακας 5-4**).

$$Re = \rho U d / \eta \quad (5-15)$$

όπου :

ρ : η πυκνότητα του ψυκτικού μέσου

U : η μέση ταχύτητα του ψυκτικού μέσου

d : η διάμετρος του καναλιού ψύξης

η : το δυναμικό ιξώδες του ψυκτικού μέσου

Πίνακας 5-4. Τύπος ροής του ψυκτικού μέσου αναλόγως του αριθμού Reynolds.

Re	Τύπος ροής
$4000 < Re$	Τυρβώδης
$2300 < Re < 4000$	Μεταβατική
$100 < Re < 2300$	Στρωτή
$Re < 100$	Στάσιμη

Κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ της στρωτής και της τυρβώδους ροής του ψυκτικού μέσου εντός των καναλιών ψύξης του καλουπιού, η μεν πρώτη εμφανίζει γενικά

μικρότερη πτώση πίεσης αλλά παρέχει φτωχή διάχυση θερμότητας εξαιτίας της ανομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας που πηγάζει από τη μεταφορά θερμότητας αποκλειστικά και μόνο με αγωγή (conduction). Απεναντίας, η δεύτερη μπορεί να δημιουργήσει κατά τόπους στροβιλισμούς και να επιτύχει τρεις με πέντε φορές καλύτερη διάχυση θερμότητας χάρη στη μεταφορά θερμότητας τόσο με αγωγή όσο και με συναγωγή (convection) επιφέροντας, ωστόσο, μεγαλύτερη πτώση πίεσης.

Σε κανονικές συνθήκες η ροή του ψυκτικού μέσου θεωρείται τυρβώδης με τυπικό αριθμό Reynolds από **6000** έως **10000** ή παραπάνω. Επίσης, δεδομένου ότι η θερμική αγωγιμότητα του νερού είναι η μεγαλύτερη (πενταπλάσια του λαδιού), έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται το νερό ως ψυκτικό μέσο εντός των καναλιών ψύξης. Πέραν τούτου, το λάδι χαρακτηρίζεται από υψηλότερο ιξώδες σε σχέση με το νερό, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται αύξηση στην ταχύτητα της ροής του ψυκτικού ώστε να επιτευχθεί η ίδια τυρβώδης ροή με αυτή του νερού.

❖ *Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (Coolant temperature)*

Η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου (coolant temperature) μετριέται σε $^{\circ}\text{C}$ και είναι ένας σημαντικός παράγοντας ελέγχου μια και επηρεάζει άμεσα την αποδοτικότητα του συστήματος ψύξης του καλουπιού. Η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου αυξάνεται στα κανάλια ψύξης από την είσοδο (inlet) στην έξοδο (outlet) και μαζί της συμπαράσχει αφενός την θερμοχωρητικότητα (heat capacity) και τη θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) του ψυκτικού μέσου προς τα πάνω, αφετέρου το ιξώδες (viscosity) και την πυκνότητα (density) του πολυμερούς τήγματος προς τα κάτω. Προφανώς, για χαμηλότερες τιμές της συγκεκριμένης θερμοκρασίας, ο χρόνος ψύξης (cooling time) μειώνεται. Εάν δε η ταχύτητα ροής του ψυκτικού μέσου (coolant flow rate) είναι ανεπαρκής, η θερμοκρασία αυξάνεται και η αποδοτικότητα της ψύξης μειώνεται.

Στην περίπτωση που το χρησιμοποιούμενο ψυκτικό μέσο είναι νερό, η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου κυμαίνεται από **10** έως **80** $^{\circ}\text{C}$. Όταν δε το χρησιμοποιούμενο ψυκτικό μέσο είναι λάδι, τότε η ελάχιστη θερμοκρασία του είναι **0** $^{\circ}\text{C}$ ενώ η μέγιστη μπορεί να φτάσει στους **200** $^{\circ}\text{C}$.

Επί του παρόντος, όπως προαναφέρθηκε, για το προϊόν έγχυσης που μελετάται στην παρούσα διατριβή, ο επικείμενος σχεδιασμός πειραμάτων θα έχει ως αντικείμενο βελτιστοποίησης μία αντικειμενική συνάρτηση στην οποία θα συμμετέχουν συνολικά τέσσερις ποιοτικοί παράγοντες. Πέραν των ποιοτικών παραγόντων, στη διαδικασία βελτιστοποίησης συνυπολογίζονται έξι συγκεκριμένοι παράγοντες ελέγχου οι οποίοι επιδρούν καταλυτικά στους ποιοτικούς παράγοντες αναλόγως των συνδυασμών που επιτάσσει η κατάλληλη ορθογώνια διάταξη Taguchi που επιλέγεται στη συνέχεια.

Λεπτομερέστερα, στον σχεδιασμό πειραμάτων λαμβάνονται υπόψιν οι κάτωθι παράγοντες ελέγχου ενώ συγχρόνως καθορίζονται τόσο τα επίπεδα ελέγχου για καθέναν εξ αυτών όσο και η τιμή που λαμβάνει έκαστος σε κάθε επίπεδο (**Σχήμα 5-15**). Σημειώνεται ότι για όσους εκ των προαναφερθέντων παραγόντων ελέγχου δεν καθορίζονται επίπεδα ελέγχου, η τιμή τους παραμένει η ίδια με εκείνη που είχαν λάβει κατά την αρχική παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας. Κατά συνέπεια, αυτοί οι παράγοντες ελέγχου συμμετέχουν στη διαδικασία βελτιστοποίησης ως παράγοντες θορύβου (σταθερές) και όχι ως παράγοντες ελέγχου (παραμέτροι).

53.5	Select	Order	Level 1	Level 2	Level 3
Filling time [sec]	<input checked="" type="checkbox"/>	1	4.25	4.5	4.75
Melt temperature [oC]	<input checked="" type="checkbox"/>	2	243.5	245	246.5
Mold temperature [oC]	<input type="checkbox"/>				
Max. injection pressure [MPa]	<input type="checkbox"/>				
Max. flow rate profile value [%]	<input type="checkbox"/>				
Max. injection pressure profile value [%]	<input type="checkbox"/>				
Packing time [sec]	<input checked="" type="checkbox"/>	4	17.1	20.1	23.1
Packing switch ratio [%]	<input type="checkbox"/>				
Max. packing pressure profile value [%]	<input type="checkbox"/>				
Max. packing pressure [MPa]	<input checked="" type="checkbox"/>	6	23.304	25.604	27.904
Cooling time [sec]	<input checked="" type="checkbox"/>	5	18.24	19.2	20.16
Mold-opening time [sec]	<input type="checkbox"/>				
Ejection temperature [oC]	<input type="checkbox"/>				
Air temperature [oC]	<input type="checkbox"/>				
Default coolant flow rate [cc/sec]	<input type="checkbox"/>				
Default coolant temperature [oC]	<input checked="" type="checkbox"/>	3	53.5	55	56.5

Σχήμα 5-15. Control Factors

- **Σχεδιασμός πειραμάτων (DOE dialog)** : Σε αυτό το στάδιο ο μηχανικός επιλέγει την κατάλληλη ορθογώνια διάταξη από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ορθογώνιων διατάξεων που προκρίνει το εργαλείο Moldex3D Expert σύμφωνα με τις ενέργειες που έχουν γίνει στα προηγούμενα δύο στάδια. Πράγματι, για τη διαδικασία βελτιστοποίησης όπως έχει στηθεί με την επιλογή των συγκεκριμένων ποιοτικών παραγόντων και των συγκεκριμένων παραγόντων ελέγχου θα μπορούσε να επιλεγθεί η ορθογώνια διάταξη Taguchi L18. Εντούτοις, το εργαλείο Moldex3D εμφανίζει προειδοποιητικό μήνυμα ότι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν με την ολοκλήρωση της διαδικασίας θα είναι επισφαλής λόγω πιθανών σφαλμάτων κατά τη διενέργεια των σχετικών υπολογισμών. Επομένως, η μετάβαση στην αμέσως επόμενη ορθογώνια διάταξη Taguchi L27 αποτελεί μονόδρομο προκειμένου η διαδικασία υπολογισμού να είναι ευσταθής χωρίς σφάλματα και τα τελικά αποτελέσματα αντιπροσωπευτικά των πραγματικών συνθηκών.

Please select the orthogonal array for the DOE optimization No. runs to be analyzed : 27

Taguchi L27 (3¹³) Orthogonal Array

Run	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
R1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
R2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
R4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
R5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
R6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
R7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
R8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3

Number of Control Factors Selected : 6 Available : 13
 Number of Levels Selected : 3 Available : 3
 Run optimized design based on S/N Ratio
 DOE Analysis Setting
 Run cooling for mold temperature
 Consider runner effect

Taguchi L27 (3¹³) Orthogonal Array

Run	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
R9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
R10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
R11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
R12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
R13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
R14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
R15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
R16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1

Number of Control Factors Selected : 6 Available : 13
 Number of Levels Selected : 3 Available : 3
 Run optimized design based on S/N Ratio
 DOE Analysis Setting
 Run cooling for mold temperature
 Consider runner effect

Taguchi L27 (3¹³) Orthogonal Array

Run	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
R17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
R18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
R19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
R20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
R21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
R22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
R23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
R24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
R25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
R26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
R27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Number of Control Factors Selected : 6 Available : 13
 Number of Levels Selected : 3 Available : 3
 Run optimized design based on S/N Ratio
 DOE Analysis Setting
 Run cooling for mold temperature
 Consider runner effect

Σχήμα 5-16. Ορθογώνια διάταξη Taguchi L27.

- **Συνοπτική παράθεση σχεδιασμού πειραμάτων (Summary dialog)** : Εδώ ο μηχανικός κάνει μια συνοπτική επισκόπηση της διαδικασίας του σχεδιασμού πειραμάτων όπως ακριβώς την έχει στήσει ο ίδιος.

Quality Factor(s) :

No.	Quality Factor	Characteristic	Target Value	Weighting
1	Filling - Melt front temperature distribution	Uniform the Best		20%
2	Packing - Volumetric shrinkage distribution	Uniform the Best		25%
3	Part temperature at EOC	Uniform the Best		20%
4	Warpage - Total displacement	Small the Better		35%

Control Factors :

No.	Control Factor	Level 1	Level 2	Level 3
1	Filling time	4.25	4.5	4.75
2	Melt temperature	243.5	245	246.5
3	Default coolant temperature	53.5	55	56.5
4	Packing time	17.1	20.1	23.1
5	Cooling time	18.24	19.2	20.16
6	Max. packing pressure	23.304	25.604	27.904

DOE Analysis Setting

- Mold temperature is to consider cooling effect first.
- Runner effect is to be considered.

Σχήμα 5-17. Συνοπτική επισκόπηση της διαδικασίας σχεδιασμού πειραμάτων.

5.2.2 Ανάλυση των Αποτελεσμάτων

5.2.2.1 Αποτελέσματα Εκτέλεσης Σχεδιασμού Πειραμάτων (DOE Run Results)

Οι αποκρίσεις ποιότητας (quality responses) σε κάθε ανάλυση, δηλαδή οι υπολογισμένες ποσότητες κάθε ποιοτικού παράγοντα, παρέχονται από κοινού με τους αντίστοιχους παράγοντες ελέγχου (**Σχήμα 5-18**). Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι η τελευταία ανάλυση (28^η) είναι η βέλτιστη ανάλυση.

DOE Method: Taguchi Orthogonal Array L27(3¹³) Orthogonal Array

DOE Run Results :

No.[Run]	STDEV of QF ...	STDEV of QF ...	STDEV of QF ...	QF #4:...	CF #1:...	CF #2:...	CF #3:...	CF #4:...	CF #5:...	CF #6:...
1 [8]	1.2968	0.876355	1.82245	0.9218	4.25	243.5	53.5	17.1	18.24	23.304
2 [9]	1.28268	0.772538	1.78717	0.88297	4.25	243.5	55	20.1	19.2	25.604
3 [10]	1.27048	0.696212	1.75007	0.8487...	4.25	243.5	56.5	23.1	20.16	27.904
4 [11]	1.29294	0.763321	1.84683	0.8714...	4.25	245	53.5	20.1	19.2	27.904
5 [12]	1.30175	0.70393	1.80534	0.8367...	4.25	245	55	23.1	20.16	23.304
6 [13]	1.28039	0.884921	1.73308	0.9494...	4.25	245	56.5	17.1	18.24	25.604
7 [14]	1.29837	0.701995	1.86352	0.8351...	4.25	246.5	53.5	23.1	20.16	25.604
8 [15]	1.282	0.885872	1.78902	0.9346...	4.25	246.5	55	17.1	18.24	27.904
9 [16]	1.27276	0.787743	1.75472	0.8955...	4.25	246.5	56.5	20.1	19.2	23.304
10 [17]	1.36874	0.765897	1.84824	0.8684...	4.5	243.5	53.5	20.1	20.16	25.604
11 [18]	1.36293	0.690705	1.81023	0.8403...	4.5	243.5	55	23.1	18.24	27.904
12 [19]	1.35475	0.873881	1.47066	0.9449...	4.5	243.5	56.5	17.1	19.2	23.304
13 [20]	1.36195	0.699282	1.86686	0.8288...	4.5	245	53.5	23.1	18.24	23.304
14 [21]	1.35158	0.878286	1.79469	0.9298...	4.5	245	55	17.1	19.2	25.604
15 [22]	1.33288	0.765204	1.75977	0.8829...	4.5	245	56.5	20.1	20.16	27.904
16 [23]	1.40208	0.878489	3.93671	0.9281...	4.5	246.5	53.5	17.1	19.2	27.904
17 [24]	1.39752	0.782532	1.81363	0.8826...	4.5	246.5	55	20.1	20.16	23.304
18 [25]	1.3716	0.704004	3.52275	0.8075...	4.5	246.5	56.5	23.1	18.24	25.604
19 [26]	1.45071	0.684882	1.87312	0.8259...	4.75	243.5	53.5	23.1	19.2	27.904
20 [27]	0.92258	0.86229	3.77634	0.9348...	4.75	243.5	55	17.1	20.16	23.304
21 [28]	1.43648	0.766607	1.76117	0.8944...	4.75	243.5	56.5	20.1	18.24	25.604
22 [29]	1.46539	0.872911	1.85472	0.9127...	4.75	245	53.5	17.1	20.16	25.604
23 [30]	1.45536	0.770517	1.81771	0.8846...	4.75	245	55	20.1	18.24	27.904
24 [31]	1.45794	0.698036	1.7787	0.8463...	4.75	245	56.5	23.1	19.2	23.304
25 [32]	1.4756	0.776624	1.87489	0.8775...	4.75	246.5	53.5	20.1	18.24	23.304
26 [33]	1.4626	0.698748	1.8368	0.8451...	4.75	246.5	55	23.1	19.2	25.604
27 [34]	1.44684	0.875693	1.76533	0.9374...	4.75	246.5	56.5	17.1	20.16	27.904
28 [35]*	1.27586	0.704526	2.19556	0.8451...	4.25	245	56.5	23.1	20.16	23.304

Σχήμα 5-18. Αποκρίσεις ποιότητας σε κάθε ανάλυση για κάθε ποιοτικό παράγοντα.

5.2.2.2 Απόκριση Ποιότητας (Quality Response)

Για κάθε έναν από τους ποιοτικούς παράγοντες, οι μέσες αποκρίσεις ποιότητας σε κάθε επίπεδο κάθε παράγοντα ελέγχου υπολογίζονται ως εξής :

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Filling – Melt Front Temperature Distribution”*

Το εργαλείο Moldex3D Expert υπολογίζει για κάθε επίπεδο τις επιδράσεις των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” (**Σχήμα 5-19**), ενώ παράλληλα εκτελεί την ανάλυση της διακύμανσης (Analysis Of Variance – ANOVA) (**Σχήμα 5-20**). Επίσης, εξάγει σε ποσοτικό γράφημα τη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα συναρτήσεως των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου (**Σχήμα 5-21**). Σημειωτέον ότι η επίδραση κάθε παράγοντα ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας διαφέρει από επίπεδο σε επίπεδο.

Factor Effects :

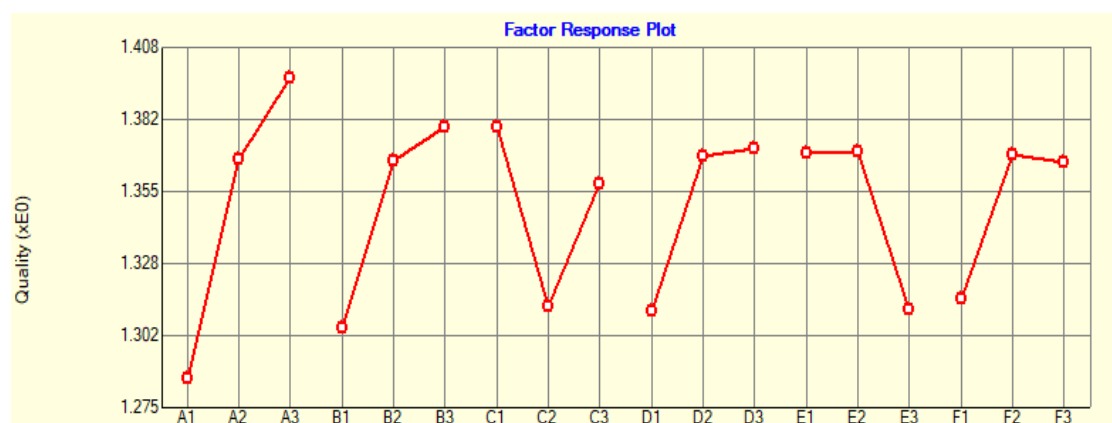
Level	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
1	1.28646	1.30513	1.37917	1.31138	1.36923	1.31574
2	1.36711	1.36668	1.31322	1.36833	1.36978	1.36865
3	1.39706	1.37882	1.35824	1.37092	1.31161	1.36625
Effect	0.110592	0.0736907	0.0659532	0.0595468	0.0581679	0.0529076

Σχήμα 5-19. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.

ANOVA :

Factor	SS(Sum of Squares)	DOF	Variance	Contribution [%]
1	0.0588946	2	0.0294473	35.9101
2	0.0281004	2	0.0140502	17.1338
3	0.0204436	2	0.0102218	12.4652
4	0.0203878	2	0.0101939	12.4312
5	0.0201114	2	0.0100557	12.2626
6	0.0160679	2	0.00803394	9.79715
Error	0	0	0	0
Total	0.164006	12		

Σχήμα 5-20. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη ανάλυση, η θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (coolant temperature), ο χρόνος συμπίεσης (racking time) και ο χρόνος ψύξης (cooling time) ως παράγοντες ελέγχου επιδρούν σχεδόν ισομερώς στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” με ποσοστά **12.4652 %**, **12.4312 %** και **12.2626 %** αντίστοιχα. Ο δε χρόνος πλήρωσης (filling time) επιδρά στη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα κατά **35.9101 %** που είναι και το μεγαλύτερο ποσοστό, ενώ ακολουθεί η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) με περίπου το μισό ποσοστό (**17.1338 %**). Μικρότερη αλλά όχι αμελητέα είναι η επίδραση της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. racking pressure) σε ποσοστό κοντά στο **10 %** (**9.79715 %**). Άξιο παρατήρησης είναι επίσης το γεγονός ότι τα σφάλματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού είναι μηδενικά.



Σχήμα 5-21. Ποσοτικό γράφημα μέσης απόκρισης ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” συναρτήσεως των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου. Ο παράγοντας ελέγχου που επηρεάζει κατά μεγάλο ποσοστό τη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα είναι ο χρόνος πλήρωσης (filling time).

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”*

Το εργαλείο Moldex3D Expert υπολογίζει για κάθε επίπεδο τις επιδράσεις των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” (**Σχήμα 5-22**), ενώ παράλληλα εκτελεί την ανάλυση της διακύμανσης (**Σχήμα 5-23**). Επίσης, εξάγει σε ποσοτικό γράφημα τη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα συναρτήσεως των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου (**Σχήμα 5-24**). Σημειωτέον ότι η επίδραση κάθε παράγοντα ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας ποικίλει από επίπεδο σε επίπεδο.

Factor Effects :

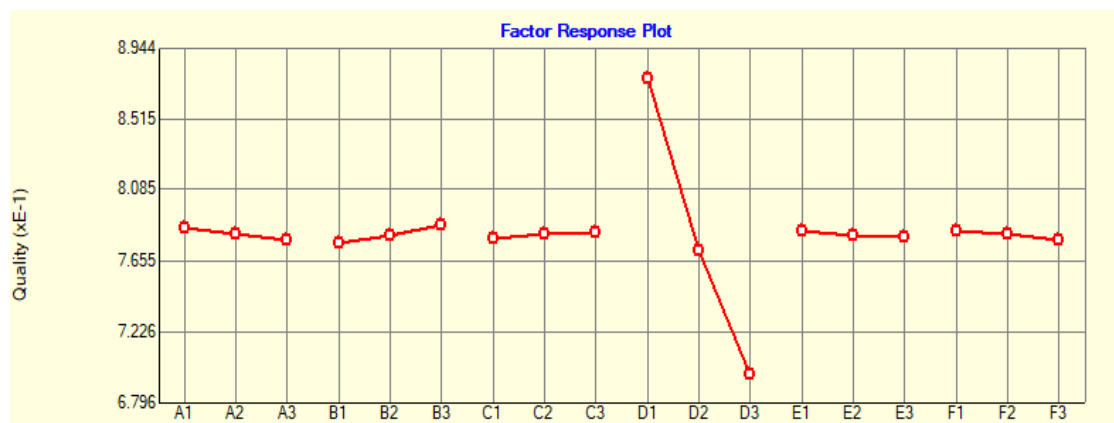
Level	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
1	0.785876	0.776596	0.779973	0.876522	0.783876	0.784519
2	0.782031	0.781823	0.782824	0.772331	0.781769	0.782878
3	0.778479	0.787967	0.783589	0.697533	0.78074	0.778988
Effect	0.00739782	0.0113702	0.00361611	0.178989	0.00313593	0.00553087

Σχήμα 5-22. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.

ANOVA :

Factor	SS(Sum of Squares)	DOF	Variance	Contribution [%]
1	0.000246403	2	0.000123202	0.168137
2	0.000583029	2	0.000291514	0.397839
3	6.53758e-005	2	3.26879e-005	0.0446102
4	0.145463	2	0.0727315	99.2589
5	4.59951e-005	2	2.29975e-005	0.0313855
6	0.000145246	2	7.26232e-005	0.0991111
Error	0	0	0	0
Total	0.146549	12		

Σχήμα 5-23. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή, ο παράγοντας ελέγχου ο οποίος επιδρά σχεδόν απόλυτα στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” είναι ο χρόνος συμπίεσης (packing time) σε ποσοστό περί το **99.2589 %**. Οι επιδράσεις των υπόλοιπων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα είναι αμελητέες όπως μαρτυρούν και τα αντίστοιχα ποσοστά. Άξιο παρατήρησης είναι επίσης το γεγονός ότι τα σφάλματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού είναι μηδενικά.



Σχήμα 5-24. Ποσοτικό γράφημα μέσης απόκρισης ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου. Όπως είναι αναμενόμενο, κατόπιν σύγκρισης με τους υπόλοιπους παράγοντες ελέγχου, ο χρόνος συμπίεσης (packing time) είναι εκείνος ο παράγοντας ελέγχου ο οποίος επιδρά ως επί το πλείστον στην κατανομή της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς κατά τη φάση της συμπίεσής του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Cooling – Part Temperature at EOC”*

Το εργαλείο Moldex3D Expert υπολογίζει για κάθε επίπεδο τις επιδράσεις των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” (**Σχήμα 5-25**), ενώ παράλληλα εκτελεί την ανάλυση της διακύμανσης (**Σχήμα 5-26**). Επίσης, εξάγει σε ποσοτικό γράφημα τη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα συναρτήσει των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου (**Σχήμα 5-27**). Σημειώτεον ότι η επίδραση κάθε παράγοντα ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας διαφέρει από επίπεδο σε επίπεδο.

Factor Effects :

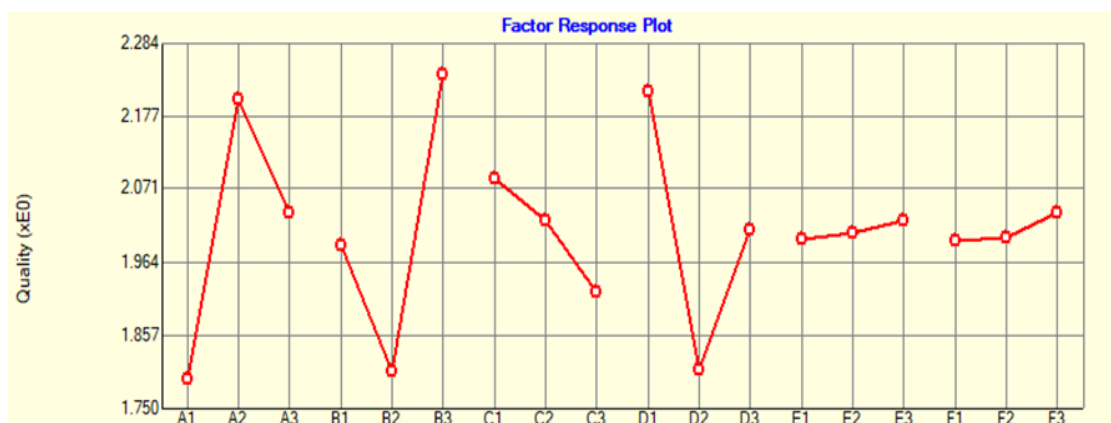
Level	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
1	1.79469	1.98883	2.08748	2.21589	1.9998	1.99595
2	2.20262	1.80641	2.02566	1.80712	2.00882	2.00024
3	2.03764	2.23971	1.92181	2.01193	2.02633	2.03876
Effect	0.407928	0.433299	0.165675	0.408765	0.0265319	0.0428019

Σχήμα 5-25. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.

ANOVA :

Factor	SS(Sum of Squares)	DOF	Variance	Contribution [%]
1	0.757943	2	0.378971	30.3033
2	0.851897	2	0.425948	34.0597
3	0.126167	2	0.0630833	5.04427
4	0.751902	2	0.375951	30.0618
5	0.00327559	2	0.00163779	0.130961
6	0.0100021	2	0.00500105	0.399894
Error	0	0	0	0
Total	2.50119	12		

Σχήμα 5-26. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Βάσει της συγκεκριμένης ανάλυσης, ο χρόνος πλήρωσης (filling time) και ο χρόνος συμπίεσης (packing time) επιδρούν σχεδόν ισομερώς στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” με ποσοστά **30.3033 %** και **30.0618 %** αντιστοίχως. Κατά ένα μεγάλο ποσοστό της τάξης του **34.0597 %** επηρεάζει τη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature), ενώ η θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (coolant temperature) την επηρεάζει κατά ένα μικρό ποσοστό της τάξης του **5.04427 %**. Σχεδόν αμελητέες είναι οι επιδράσεις του χρόνου ψύξης (cooling time) και της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) σε ποσοστά **0.130961 %** και **0.399894 %** αντίστοιχα. Άξιο παρατήρησης είναι επίσης το γεγονός ότι τα σφάλματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού είναι μηδενικά.



Σχήμα 5-27. Ποσοτικό γράφημα μέσης απόκρισης ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” συναρτήσεως των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου. Ο παράγοντας ελέγχου που επηρεάζει κατά μεγάλο ποσοστό τη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα είναι η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) και ακολουθούν με επίσης μεγάλα ποσοστά οι χρόνοι πλήρωσης και συμπίεσης (filling / packing time).

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Warpage – Total Displacement”*

Το εργαλείο Moldex3D Expert υπολογίζει για κάθε επίπεδο τις επιδράσεις των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Warpage – Total Displacement” (**Σχήμα 5-28**), ενώ παράλληλα εκτελεί την ανάλυση της διακύμανσης (**Σχήμα 5-29**). Επίσης, εξάγει σε ποσοτικό γράφημα τη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα συναρτήσεως των

επιπέδων των παραγόντων ελέγχου (Σχήμα 5-30). Σημειωτέον ότι η επίδραση κάθε παράγοντα ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας ποικίλει από επίπεδο σε επίπεδο.

Factor Effects :

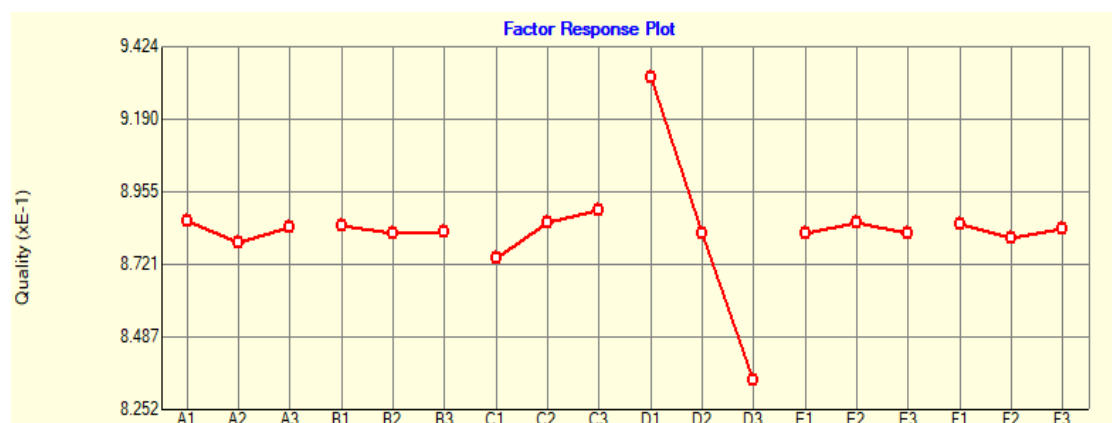
Level	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
1	0.886273	0.884742	0.87446	0.932645	0.882157	0.885479
2	0.879318	0.882561	0.885779	0.882302	0.885588	0.880646
3	0.884355	0.882642	0.889707	0.834998	0.8822	0.883821
Effect	0.00695447	0.00218162	0.0152478	0.0976469	0.00343054	0.00483362

Σχήμα 5-28. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεγθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.

ANOVA :

Factor	SS(Sum of Squares)	DOF	Variance	Contribution [%]
1	0.000232239	2	0.00011612	0.522035
2	2.75285e-005	2	1.37642e-005	0.0618794
3	0.00112817	2	0.000564083	2.53593
4	0.042921	2	0.0214605	96.4793
5	6.97445e-005	2	3.48722e-005	0.156774
6	0.000108587	2	5.42933e-005	0.244085
Error	0	0	0	0
Total	0.0444873	12		

Σχήμα 5-29. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή, ο παράγοντας ελέγχου ο οποίος επιδρά καθοριστικά στη μέση απόκριση ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Warpage – Total Displacement” είναι ο χρόνος συμπίεσης (racking time) σε ποσοστό περί το **96.4793 %**. Οι επιδράσεις των υπόλοιπων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση ποιότητας του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα είναι αμελητέες όπως καταδεικνύουν και τα αντίστοιχα ποσοστά. Άξιο παρατήρησης είναι επίσης το γεγονός ότι τα σφάλματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού είναι μηδενικά.



Σχήμα 5-30. Ποσοτικό γράφημα μέσης απόκρισης ποιότητας του ποιοτικού παράγοντα “Warpage – Total Displacement” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεγμένων παραγόντων ελέγχου. Καταπώς είναι αναμενόμενο, έπειτα από σύγκριση με τους υπόλοιπους παράγοντες ελέγχου, ο χρόνος συμπίεσης (racking time) είναι εκείνος ο παράγοντας ελέγχου που επιδρά κατά κόρον στη μέση συνολική εκτόπιση του πολυμερούς και άρα στη στρέβλωση του τελικού προϊόντος μετά την εξόλκευσή του. Ασφαλώς, η αύξηση του χρόνου συμπίεσης να μεν συμβάλει στη μείωση της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος, αλλά η αύξηση αυτή δεν μπορεί να είναι υπερβολικά μεγάλη στη λογική της ολοκληρωτικής εξάλειψης της στρέβλωσης. Και αυτό γιατί σε μια τέτοια περίπτωση επιβαρύνεται επί ματαίω η χρονική διάρκεια του κύκλου έγχυσης με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την αποδοτικότητα του καλουπιού.

5.2.2.3 Απόκριση Αναλογίας S / N (S / N Ratio Response)

Η αναλογία S / N αντιπροσωπεύει τον παράγοντα θορύβου. Υψηλότερη τιμή της αναλογίας S / N μεταφράζεται σε καλύτερη ποιότητα. Στη μέθοδο Taguchi, ο λόγος S / N ενσωματώνει την επίδραση των μέσων αποκρίσεων ποιότητας και των τυπικών αποκλίσεων αυτών. Πέραν τούτου, η τιμή του λόγου S / N κανονικοποιείται, οπότε ο υψηλότερος λόγος S / N είναι πάντα καλύτερος ανεξαρτήτως των χαρακτηριστικών του ποιοτικού παράγοντα.

- Ποιοτικός Παράγοντας “Filling – Melt Front Temperature Distribution”

Το εργαλείο Moldex3D Expert υπολογίζει για κάθε επίπεδο τις επιδράσεις των επιλεγμένων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” (**Σχήμα 5-31**), ενώ παράλληλα εκτελεί την ανάλυση της διακύμανσης (**Σχήμα 5-32**). Επίσης, εξάγει σε ποσοτικό γράφημα τη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον εν λόγω ποιοτικό παράγοντα συναρτήσει των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου (**Σχήμα 5-33**).

Factor Effects :

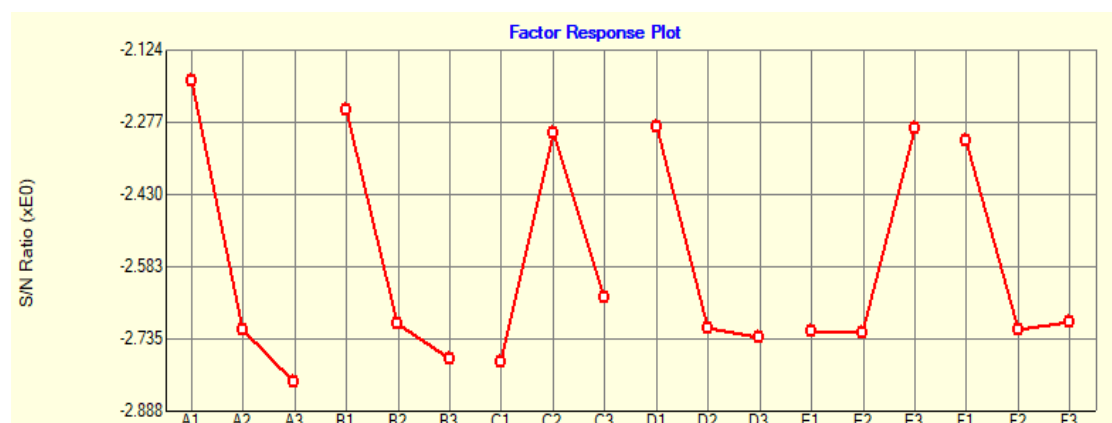
Level	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
1	-2.18765	-2.24777	-2.78134	-2.28656	-2.71823	-2.31386
2	-2.71511	-2.702	-2.29846	-2.71145	-2.72081	-2.71472
3	-2.82458	-2.77757	-2.64754	-2.72933	-2.2883	-2.69876
Effect	0.636937	0.529795	0.482887	0.442771	0.432506	0.400859
Best level	1	1	2	1	3	1

Σχήμα 5-31. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεγμένων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”. Η τιμή της αναλογίας S / N γίνεται μεγαλύτερη στα επίπεδα **A1**, **B1**, **C2**, **D1**, **E3** και **F1**, οπότε συνεπάγεται ότι εκεί ο παράγοντας θορύβου είναι ο μικρότερος δυνατός.

ANOVA :

Factor	SS(Sum of Squares)	DOF	Variance	Contribution [%]
1	2.08769	2	1.04384	26.5665
2	1.47815	2	0.739074	18.8099
3	1.11883	2	0.559416	14.2375
4	1.13069	2	0.565343	14.3884
5	1.11572	2	0.557859	14.1979
6	0.927268	2	0.463634	11.7998
Error	0	0	0	0
Total	7.85835	12		

Σχήμα 5-32. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Με βάση τη συγκεκριμένη ανάλυση, ο χρόνος πλήρωσης (filling time) επιδρά στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N του ποιοτικού παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” κατά **26.5665 %** που είναι και το μεγαλύτερο ποσοστό. Ακολουθεί η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) με ποσοστό **18.8099 %**, ενώ έπονται όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες ελέγχου που επιδρούν σχεδόν ισομερώς στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N με ποσοστά από **14.2375 %** έως **11.7998 %**. Άξιο παρατήρησης είναι επίσης το γεγονός ότι τα σφάλματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού είναι μηδενικά.



Σχήμα 5-33. Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου.

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”*

Το εργαλείο Moldex3D Expert υπολογίζει για κάθε επίπεδο τις επιδράσεις των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” (**Σχήμα 5-34**), ενώ παράλληλα εκτελεί την ανάλυση της διακύμανσης (**Σχήμα 5-35**). Επίσης, εξάγει σε ποσοτικό γράφημα τη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον εν λόγω ποιοτικό παράγοντα συναρτήσει των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου (**Σχήμα 5-36**).

Factor Effects :

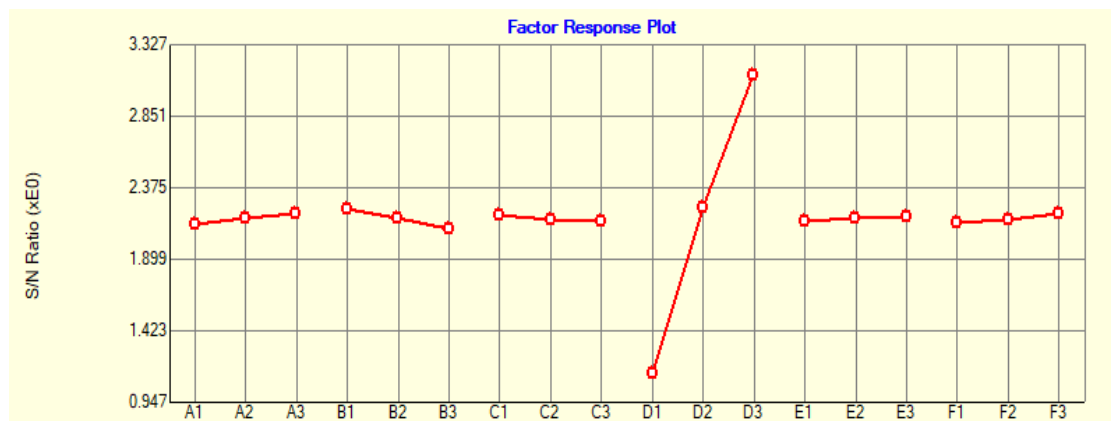
Level	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
1	2.13206	2.23534	2.19761	1.14499	2.15546	2.14235
2	2.17379	2.17592	2.16443	2.24438	2.17855	2.16355
3	2.21255	2.10714	2.15636	3.12902	2.18438	2.2125
Effect	0.0804839	0.128194	0.0412463	1.98403	0.028915	0.0701492
Best level	3	1	1	3	3	3

Σχήμα 5-34. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”. Η τιμή της αναλογίας S / N γίνεται μεγαλύτερη στα επίπεδα **A3**, **B1**, **C1**, **D3**, **E3** και **F3**, οπότε συνεπάγεται ότι εκεί ο παράγοντας θορύβου είναι ο μικρότερος δυνατός.

ANOVA :

Factor	SS(Sum of Squares)	DOF	Variance	Contribution [%]
1	0.0291627	2	0.0145813	0.162717
2	0.0740825	2	0.0370413	0.413354
3	0.00860173	2	0.00430087	0.0479946
4	17.7829	2	8.89147	99.2224
5	0.00420936	2	0.00210468	0.0234867
6	0.0232989	2	0.0116495	0.13
Error	0	0	0	0
Total	17.9223	12		

Σχήμα 5-35. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή, ο παράγοντας ελέγχου ο οποίος επιδρά σχεδόν απόλυτα στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N του ποιοτικού παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” είναι ο χρόνος συμπίεσης (packing time) σε ποσοστό περί το **99.2224** %. Οι επιδράσεις των υπόλοιπων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα είναι αμελητέες όπως μαρτυρούν και τα αντίστοιχα ποσοστά. Άξιο παρατήρησης είναι επίσης το γεγονός ότι τα σφάλματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού είναι μηδενικά.



Σχήμα 5-36. Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεγθέντων παραγόντων ελέγχου.

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Cooling – Part Temperature at EOC”*

Το εργαλείο Moldex3D Expert υπολογίζει για κάθε επίπεδο τις επιδράσεις των επιλεγθέντων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” (**Σχήμα 5-37**), ενώ παράλληλα εκτελεί την ανάλυση της διακύμανσης (**Σχήμα 5-38**). Επίσης, εξάγει σε ποσοτικό γράφημα τη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον εν λόγω ποιοτικό παράγοντα συναρτήσει των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου (**Σχήμα 5-39**).

Factor Effects :

Level	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
1	-5.07742	-5.65182	-6.09831	-6.35756	-5.79138	-5.6861
2	-6.3625	-5.13392	-5.84949	-5.13747	-5.70259	-5.79353
3	-5.9049	-6.55908	-5.39703	-5.84979	-5.85086	-5.8652
Effect	1.28509	1.42516	0.701277	1.22009	0.148265	0.179101
Best level	1	2	3	2	2	1

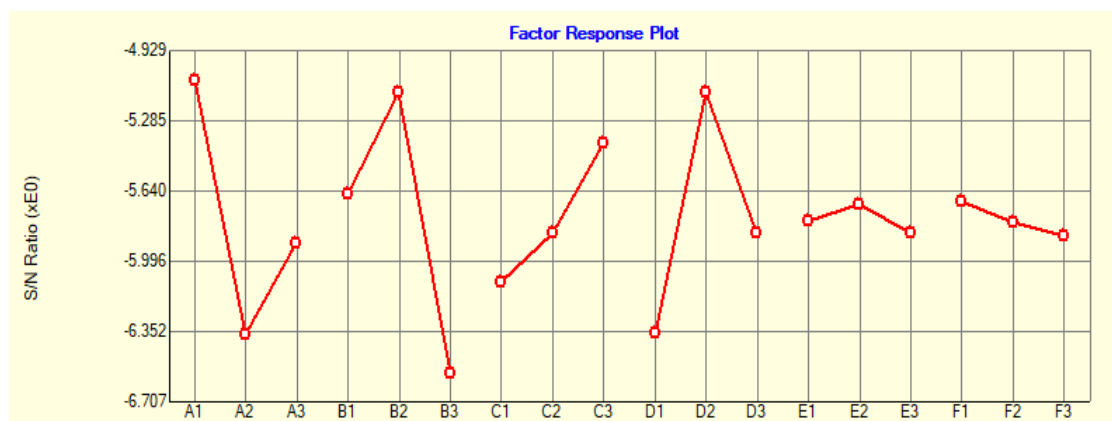
Σχήμα 5-37. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεγθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”. Η τιμή της αναλογίας S / N γίνεται μεγαλύτερη στα επίπεδα **A1**, **B2**, **C3**, **D2**, **E2** και **F1**, οπότε συνεπάγεται ότι εκεί ο παράγοντας θορύβου είναι ο μικρότερος δυνατός.

ANOVA :

Factor	SS(Sum of Squares)	DOF	Variance	Contribution [%]
1	7.63672	2	3.81836	29.0511
2	9.36726	2	4.68363	35.6343
3	2.27526	2	1.13763	8.65537
4	6.76152	2	3.38076	25.7217
5	0.100209	2	0.0501044	0.381207
6	0.146265	2	0.0731326	0.556412
Error	0	0	0	0
Total	26.2872	12		

Σχήμα 5-38. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη ανάλυση, η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature), ο χρόνος πλήρωσης (filling time) και ο χρόνος συμπίεσης (packing time) είναι εκείνοι οι ποιοτικοί παράγοντες που επιδρούν σημαντικά στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N του ποιοτικού παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” με ποσοστά **35.6343 %**, **29.0511 %** και **25.7217 %** αντίστοιχα. Ακολουθεί, η μικρή αλλά όχι αμελητέα επίδραση της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου (coolant temperature) στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N της τάξης του **8.65537 %**, ενώ οι εναπομείναντες παράγοντες ελέγχου δεν ασκούν κάποια σημαντική επίδραση σε αυτή. Άξιο

παρατήρησης είναι επίσης το γεγονός ότι τα σφάλματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού είναι μηδενικά.



Σχήμα 5-39. Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου.

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Warpage – Total Displacement”*

Το εργαλείο Moldex3D Expert υπολογίζει για κάθε επίπεδο τις επιδράσεις των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement” (**Σχήμα 5-40**), ενώ παράλληλα εκτελεί την ανάλυση της διακύμανσης (**Σχήμα 5-41**). Επίσης, εξάγει σε ποσοτικό γράφημα τη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον εν λόγω ποιοτικό παράγοντα συναρτήσει των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου (**Σχήμα 5-42**).

Factor Effects :

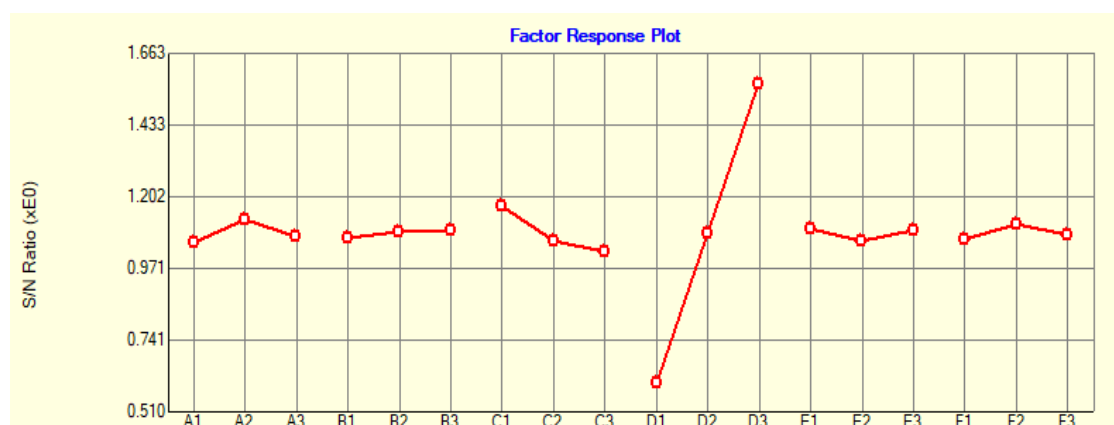
Level	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
1	1.05746	1.07264	1.17315	0.60623	1.10106	1.06541
2	1.12872	1.09376	1.06141	1.08806	1.06418	1.11473
3	1.07533	1.09511	1.02695	1.56721	1.09627	1.08137
Effect	0.0712649	0.0224612	0.146199	0.960984	0.0368814	0.0493198
Best level	2	3	1	3	1	2

Σχήμα 5-40. Υπολογισμός των επιδράσεων των επιλεχθέντων παραγόντων ελέγχου για κάθε επίπεδο στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”. Η τιμή της αναλογίας S / N γίνεται μεγαλύτερη στα επίπεδα **A2**, **B3**, **C1**, **D3**, **E1** και **F2**, οπότε συνεπάγεται ότι εκεί ο παράγοντας θορύβου είναι ο μικρότερος δυνατός.

ANOVA :

Factor	SS(Sum of Squares)	DOF	Variance	Contribution [%]
1	0.0247472	2	0.0123736	0.574568
2	0.00285638	2	0.00142819	0.0663178
3	0.105144	2	0.0525719	2.44117
4	4.15571	2	2.07786	96.4852
5	0.00723991	2	0.00361996	0.168092
6	0.0113993	2	0.00569967	0.264664
Error	0	0	0	0
Total	4.3071	12		

Σχήμα 5-41. Ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Με βάση αυτή την ανάλυση, ο παράγοντας ελέγχου ο οποίος επιδρά καθοριστικά στη μέση απόκριση της αναλογίας S / N του ποιοτικού παράγοντα “Warpage – Total Displacement” είναι ο χρόνος συμπίεσης (racking time) σε ποσοστό περί το **96.4852** %. Οι επιδράσεις των υπόλοιπων παραγόντων ελέγχου στη μέση απόκριση της αναλογίας S/N του εν λόγω ποιοτικού παράγοντα είναι αμελητέες όπως καταδεικνύουν και τα αντίστοιχα ποσοστά. Άξιο παρατήρησης είναι επίσης το γεγονός ότι τα σφάλματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού είναι μηδενικά.

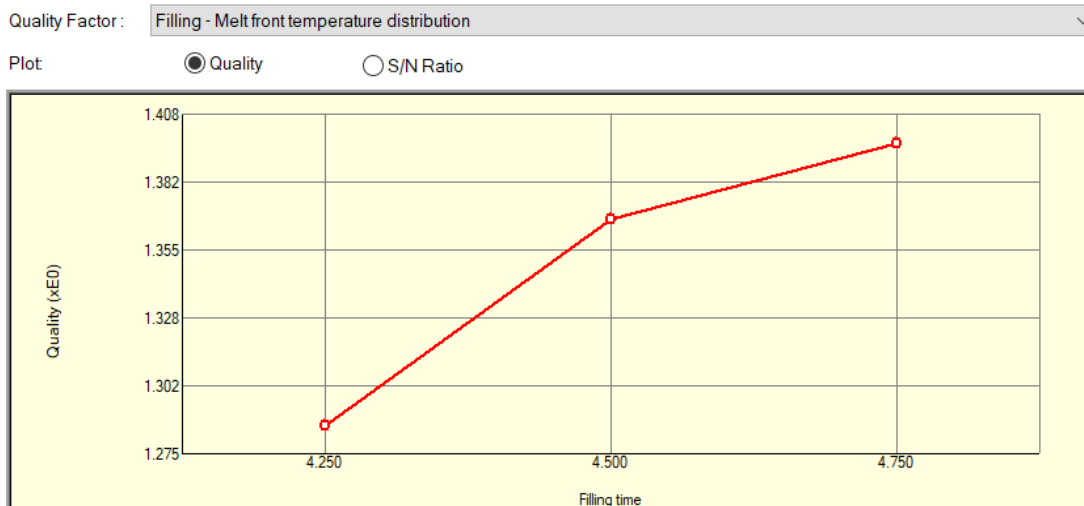


Σχήμα 5-42. Ποσοτικό γράφημα της μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement” συναρτήσει των επιπέδων των επιλεγμένων παραγόντων ελέγχου.

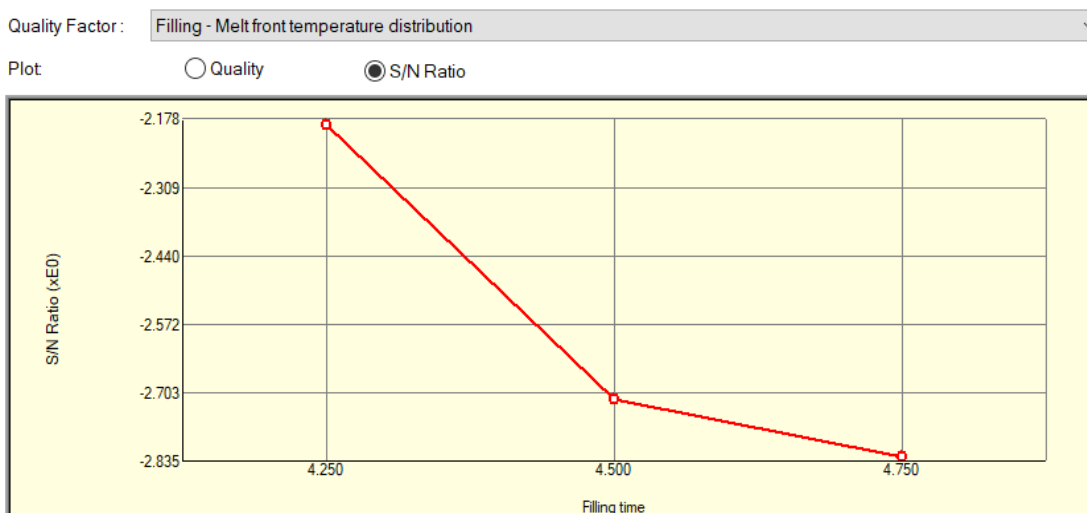
5.2.2.4 Καμπύλες Απόκρισης (Response Curves)

- Ποιοτικός Παράγοντας “Filling – Melt Front Temperature Distribution”

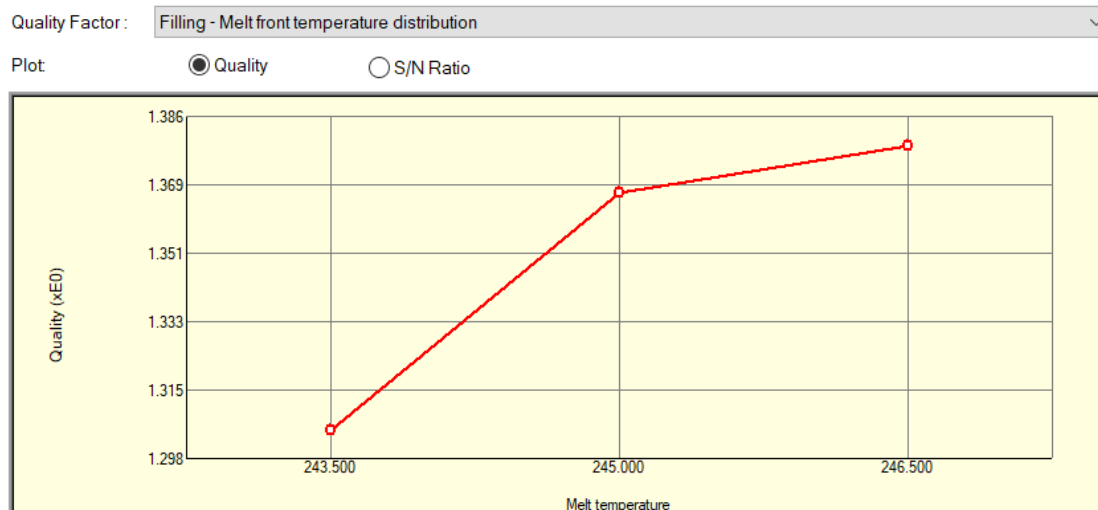
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, αναπαρίσταται για κάθε επίπεδο η επίδραση κάθε παράγοντα ελέγχου (χρόνος πλήρωσης, θερμοκρασία τήγματος, θερμοκρασία ψυκτικού μέσου, χρόνος συμπίεσης, χρόνος ψύξης και μέγιστη πίεση συμπίεσης) στον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” (αποκρίσεις ποιότητας και αναλογίας S / N).



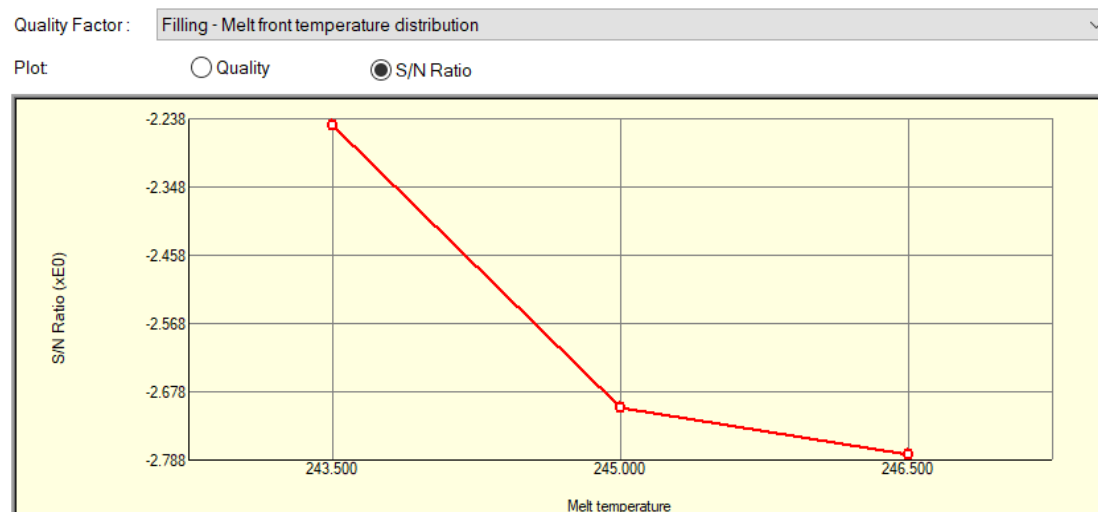
Σχήμα 5-43. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



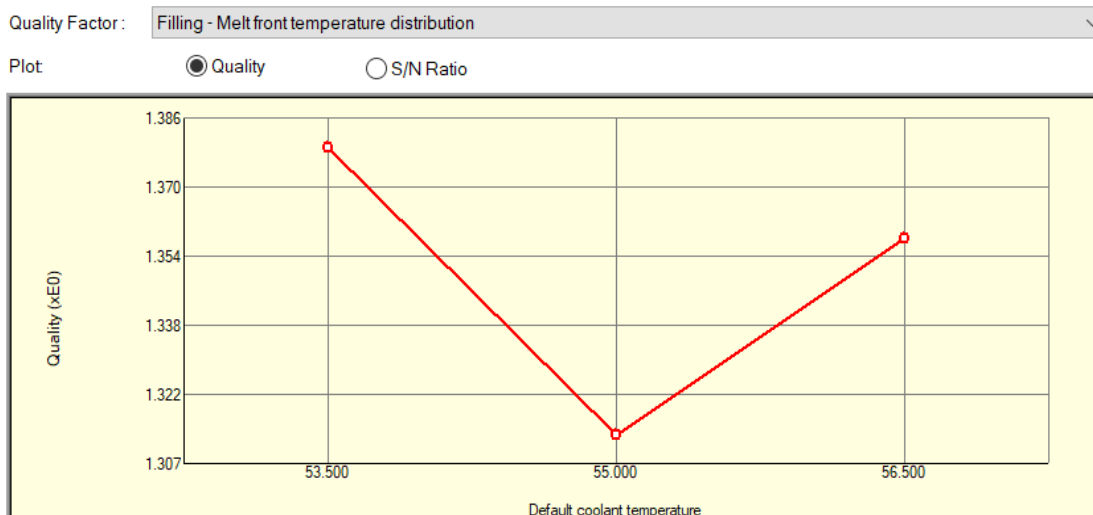
Σχήμα 5-44. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



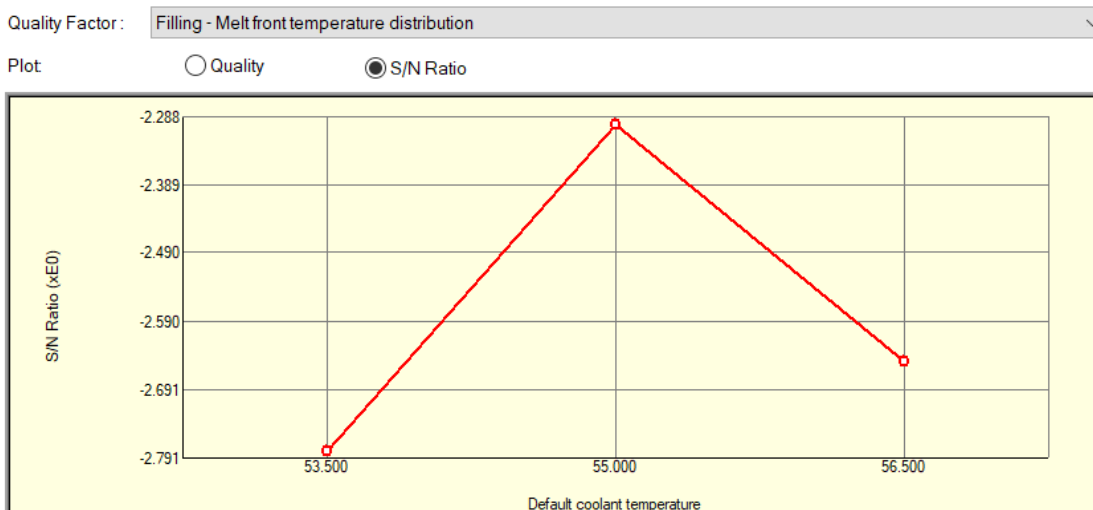
Σχήμα 5-45. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



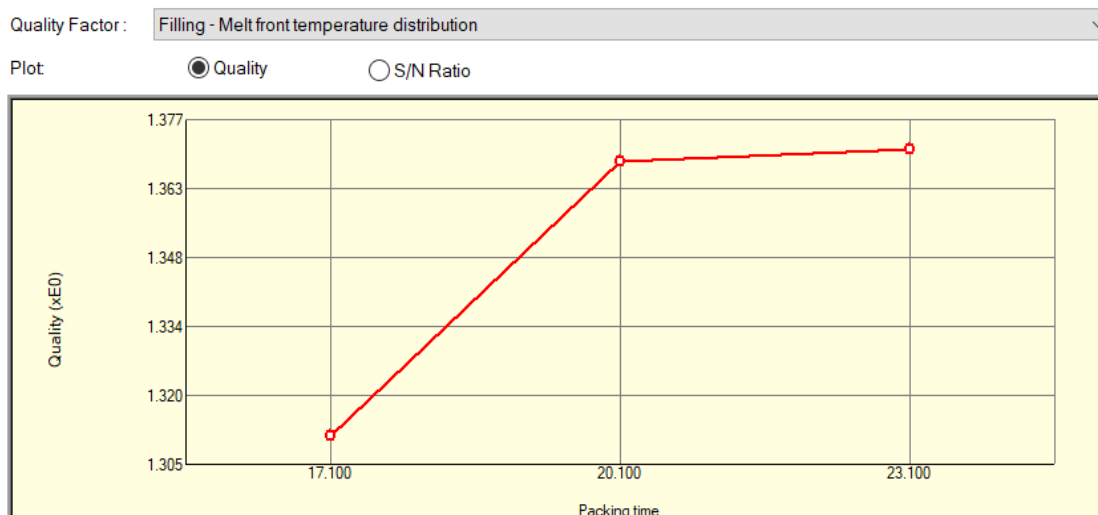
Σχήμα 5-46. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



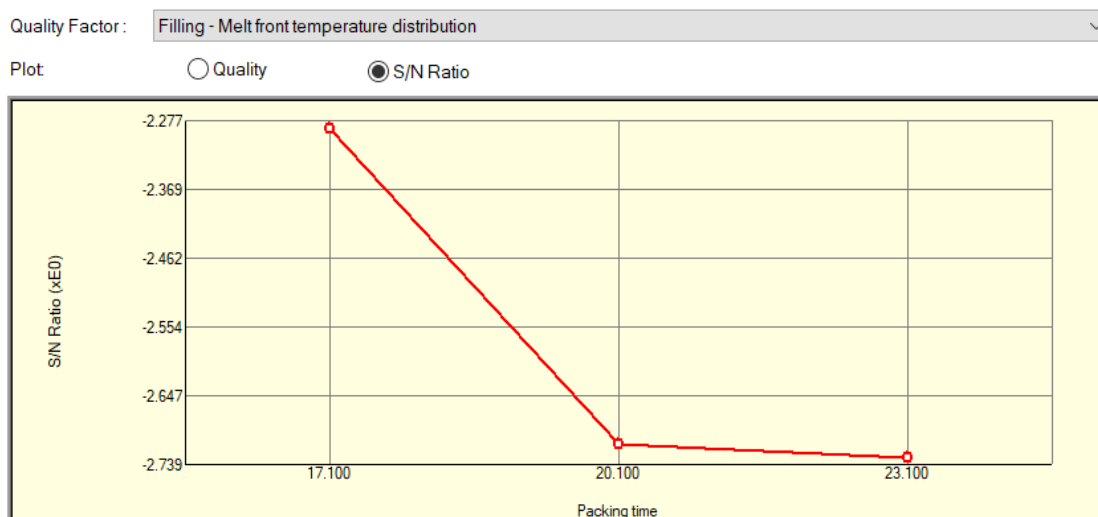
Σχήμα 5-47. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



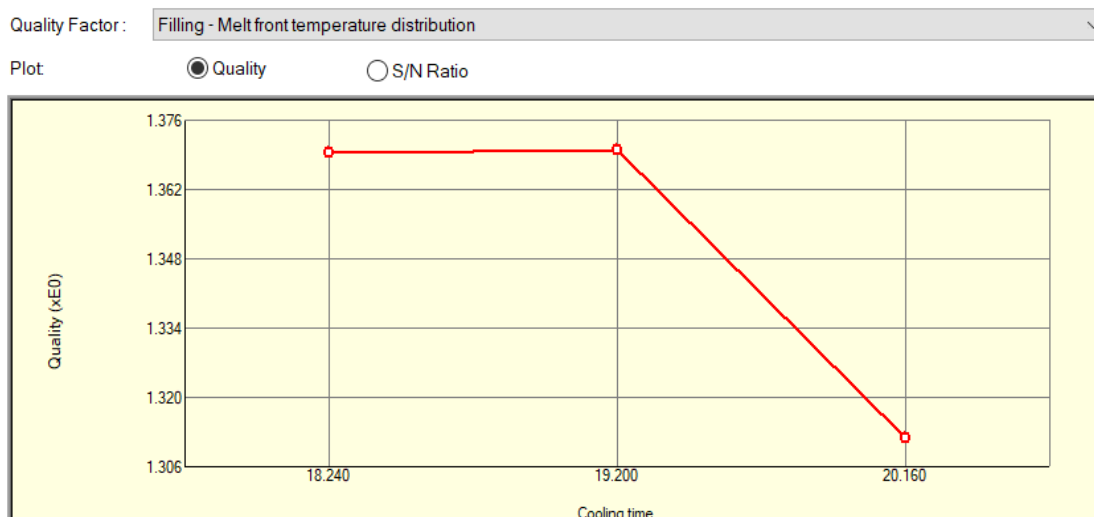
Σχήμα 5-48. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



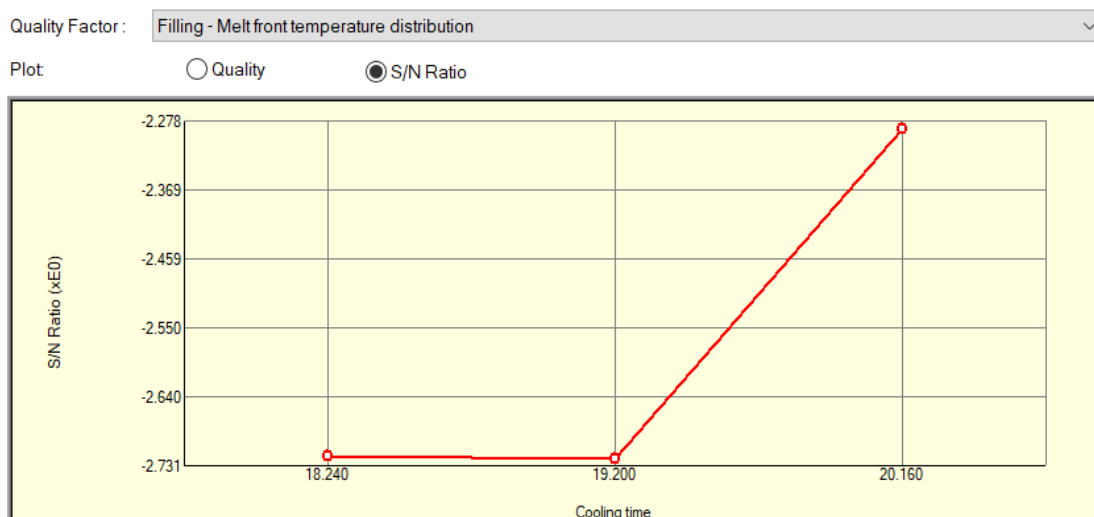
Σχήμα 5-49. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



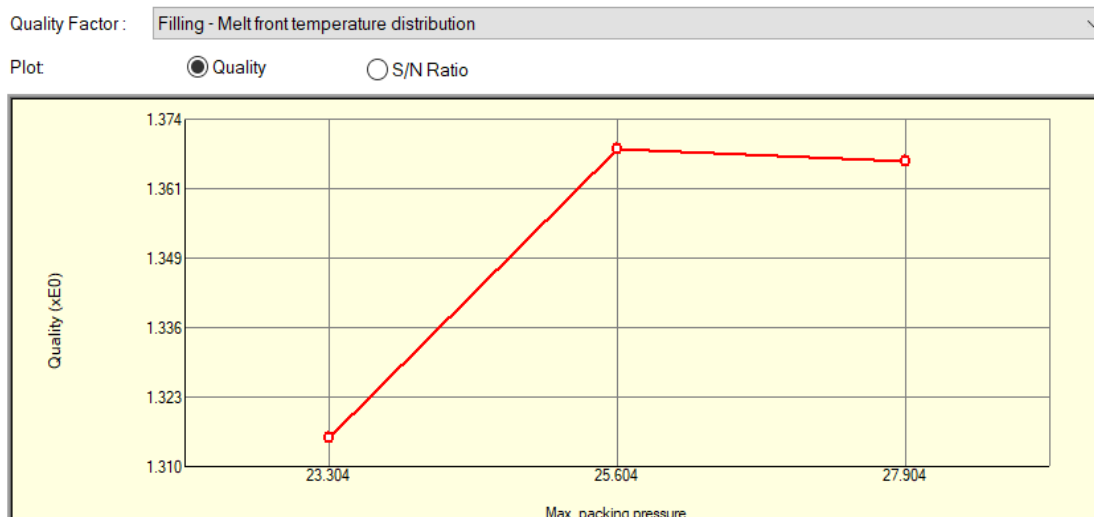
Σχήμα 5-50. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



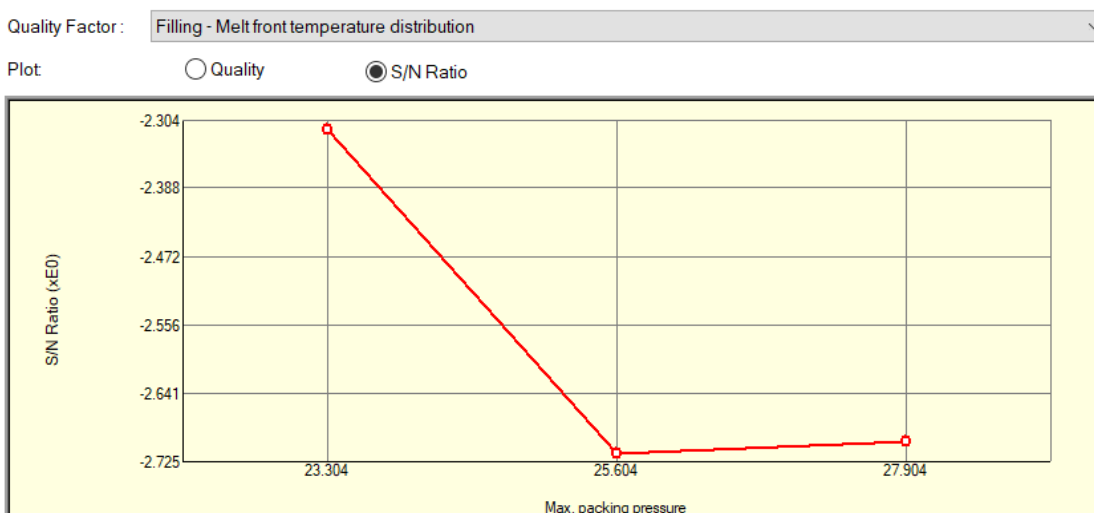
Σχήμα 5-51. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



Σχήμα 5-52. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



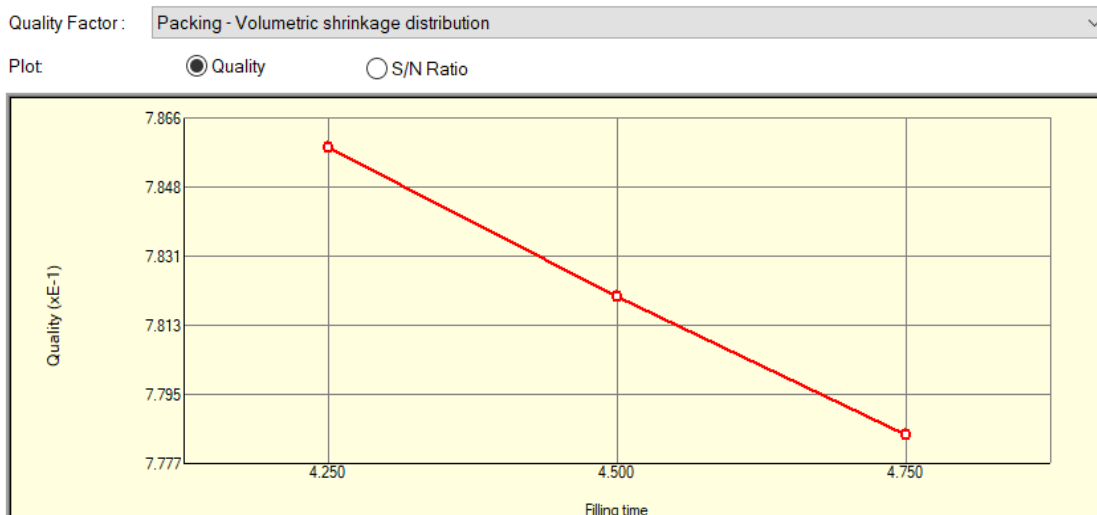
Σχήμα 5-53. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.



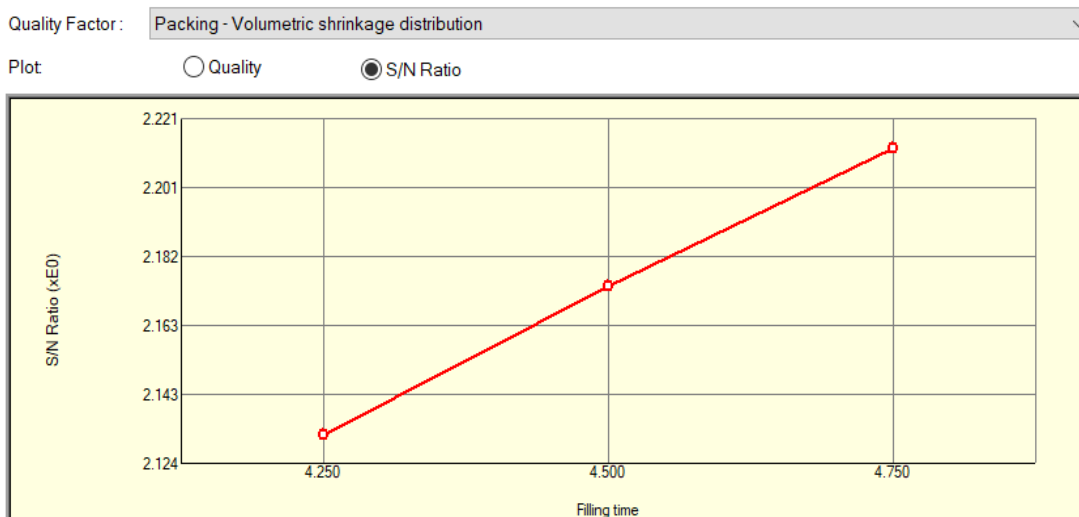
Σχήμα 5-54. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.

- Ποιοτικός Παράγοντας “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”

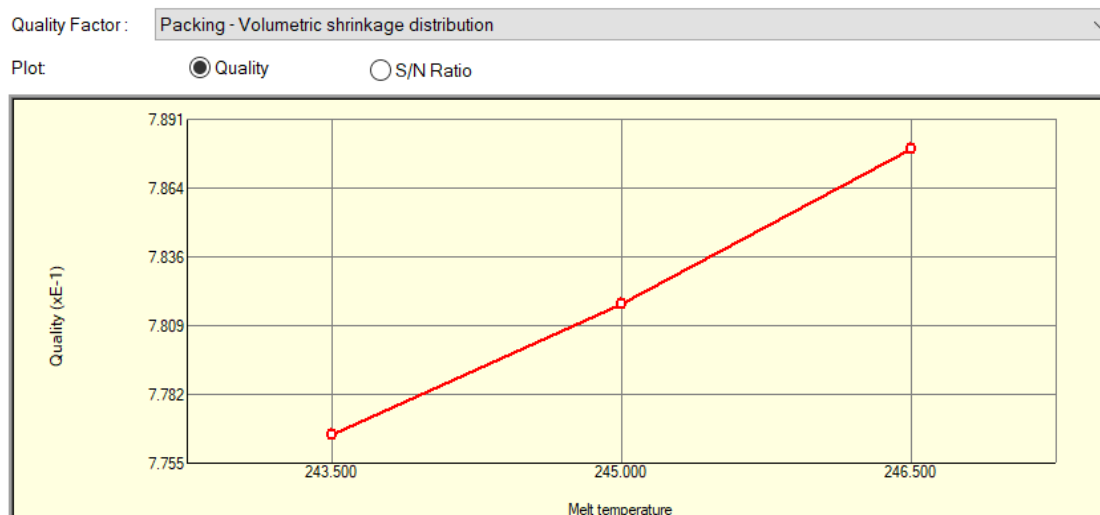
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, αναπαρίσταται για κάθε επίπεδο η επίδραση κάθε παράγοντα ελέγχου (χρόνος πλήρωσης, θερμοκρασία τήγματος, θερμοκρασία ψυκτικού μέσου, χρόνος συμπίεσης, χρόνος ψύξης και μέγιστη πίεση συμπίεσης) στον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” (αποκρίσεις ποιότητας και αναλογίας S / N).



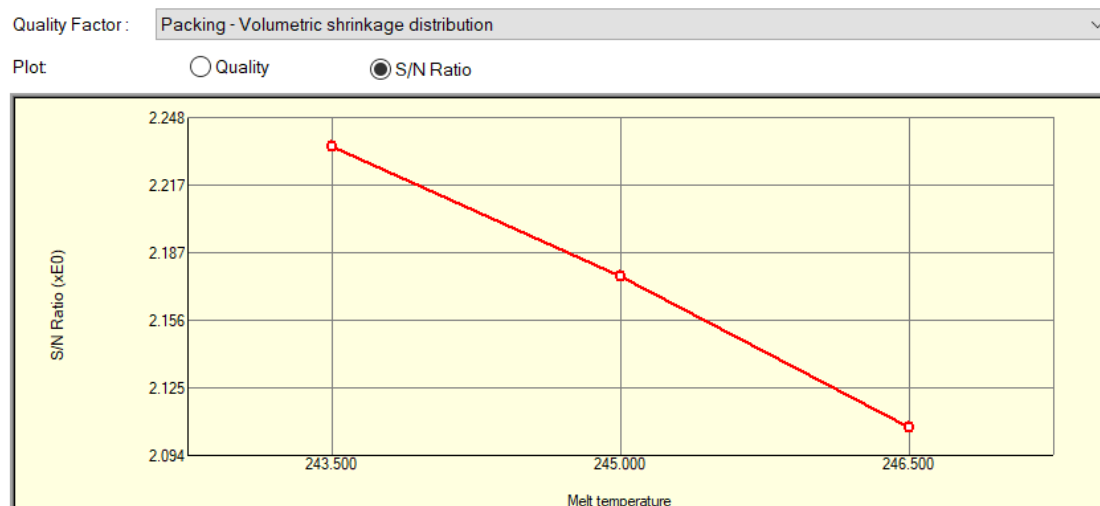
Σχήμα 5-55. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



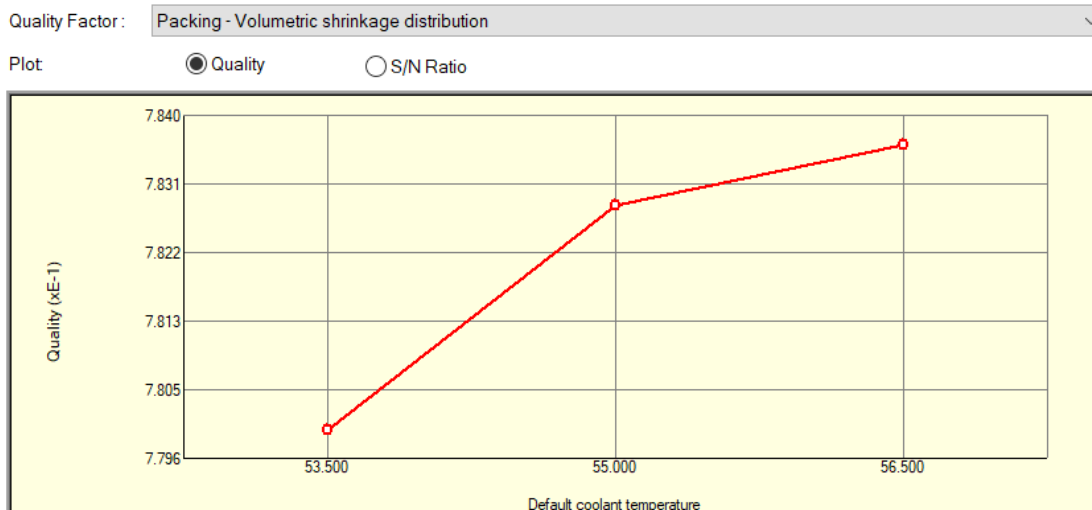
Σχήμα 5-56. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



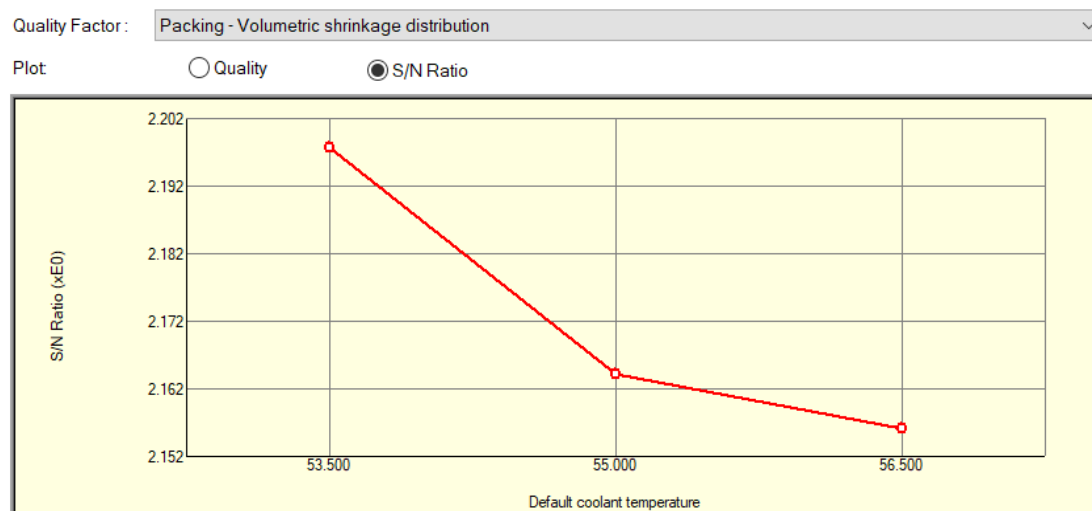
Σχήμα 5-57. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



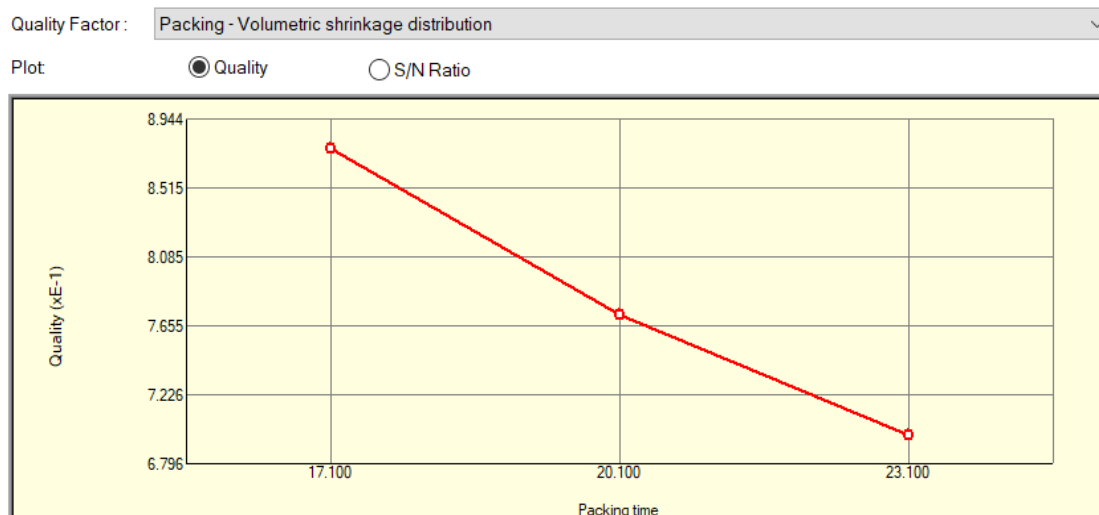
Σχήμα 5-58. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



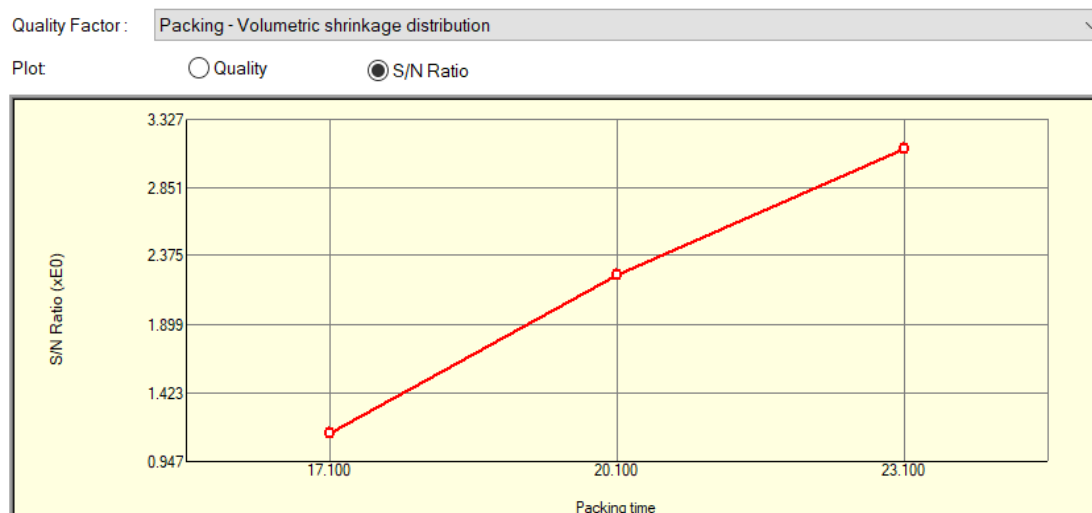
Σχήμα 5-59. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



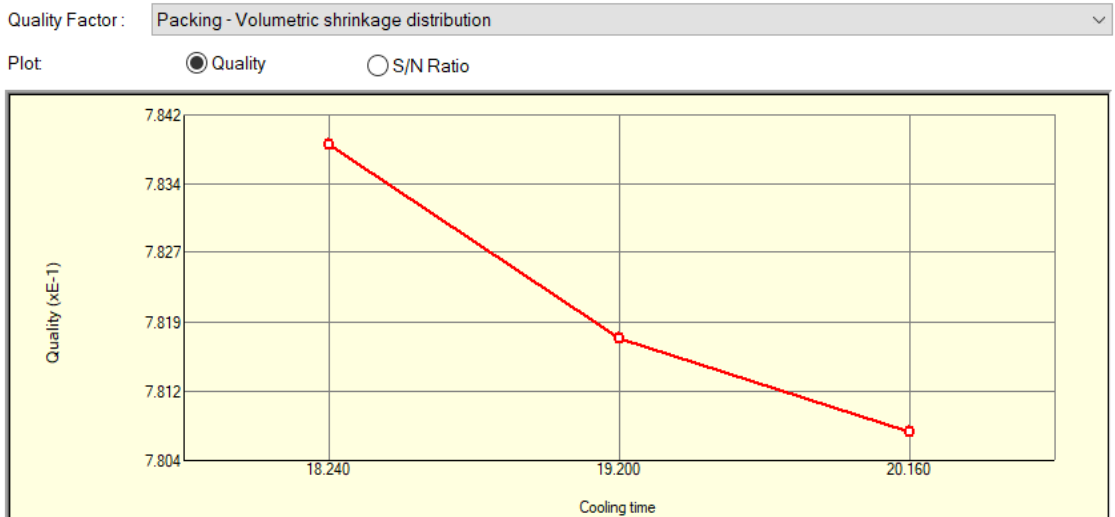
Σχήμα 5-60. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



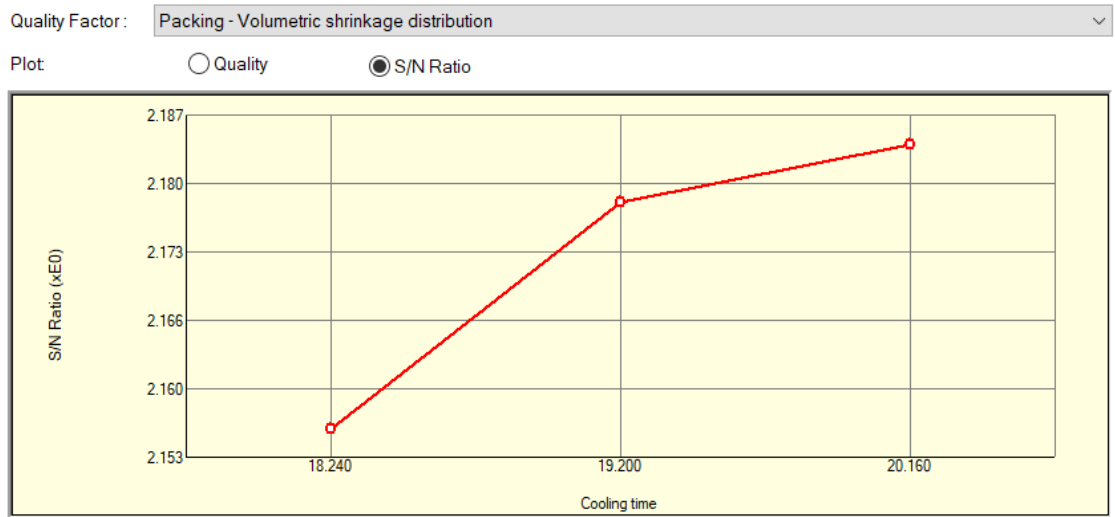
Σχήμα 5-61. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



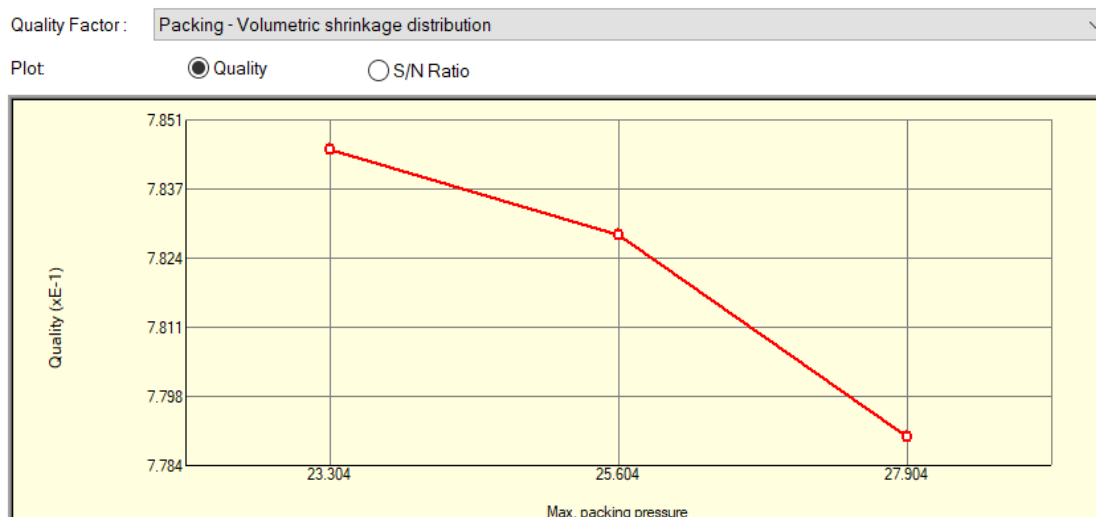
Σχήμα 5-62. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



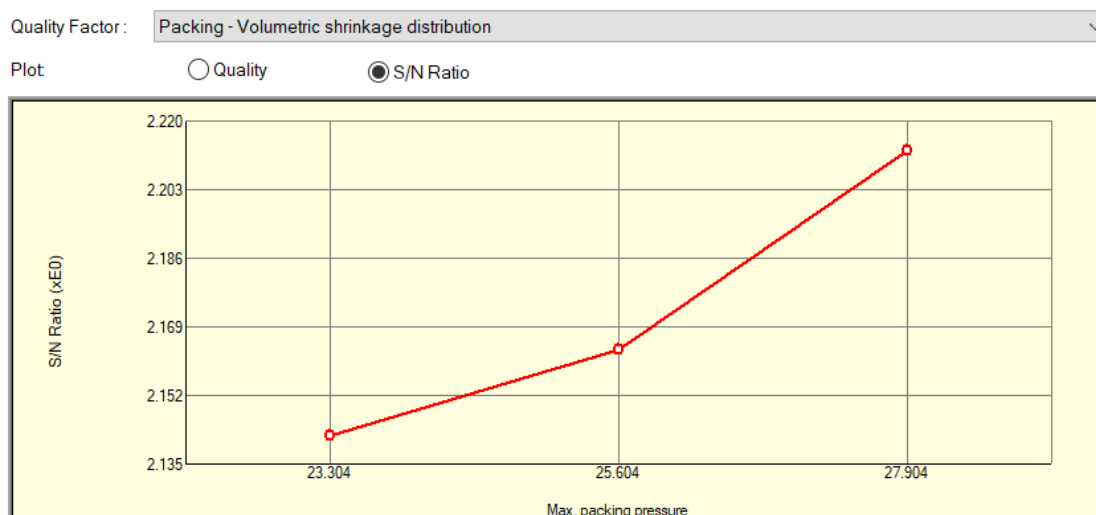
Σχήμα 5-63. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



Σχήμα 5-64. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



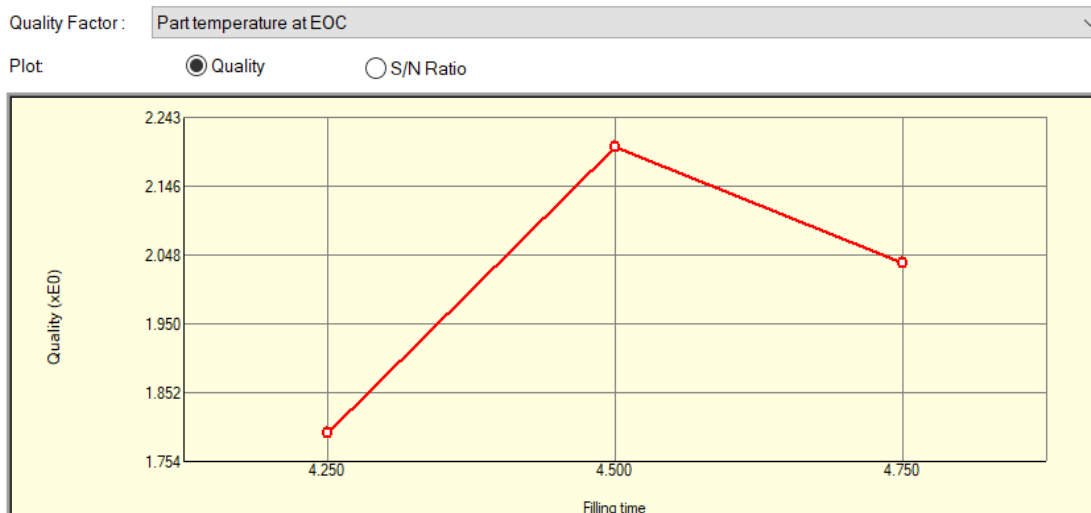
Σχήμα 5-65. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.



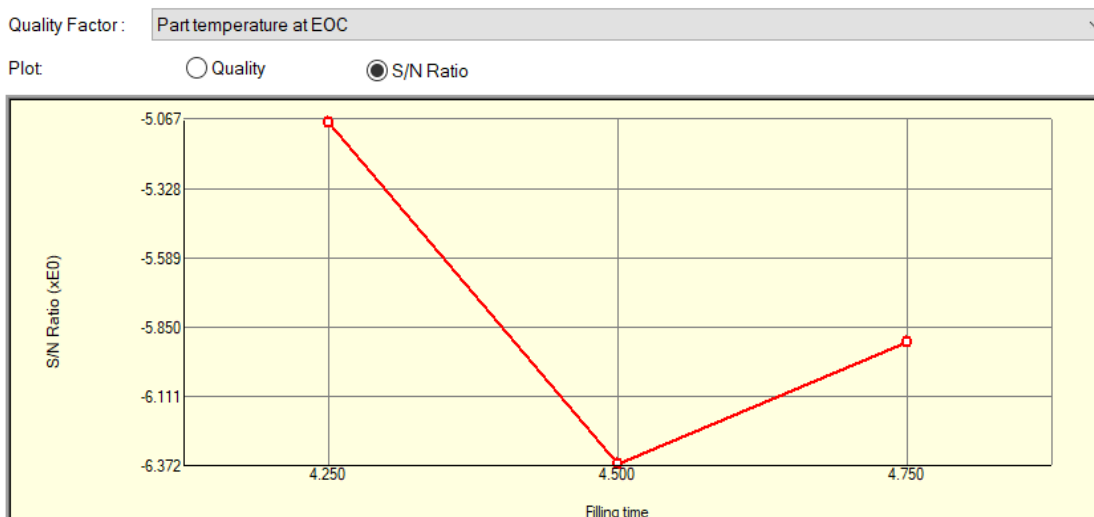
Σχήμα 5-66. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Cooling – Part Temperature at EOC”*

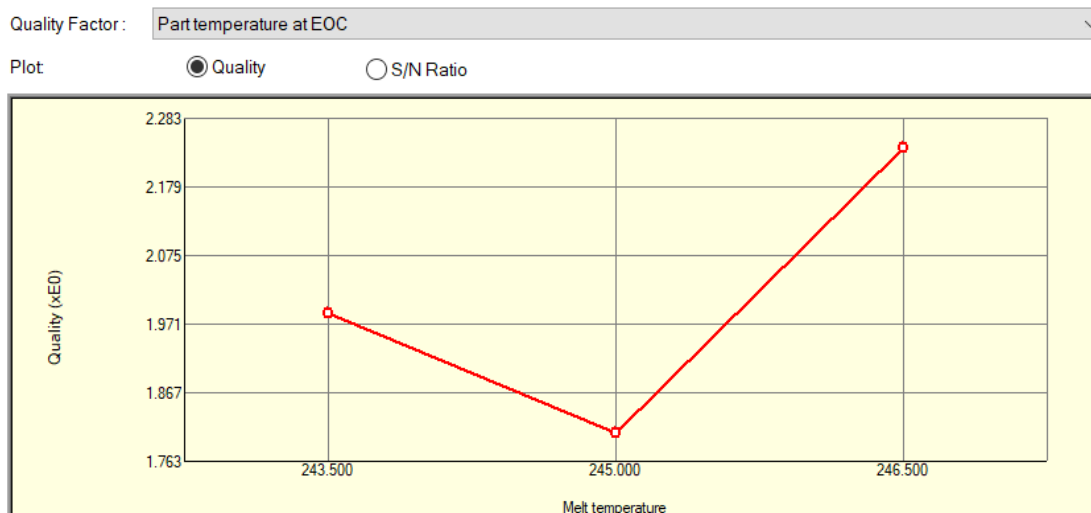
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, αναπαρίσταται για κάθε επίπεδο η επίδραση κάθε παράγοντα ελέγχου (χρόνος πλήρωσης, θερμοκρασία τήγματος, θερμοκρασία ψυκτικού μέσου, χρόνος συμπίεσης, χρόνος ψύξης και μέγιστη πίεση συμπίεσης) στον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” (αποκρίσεις ποιότητας και αναλογίας S / N).



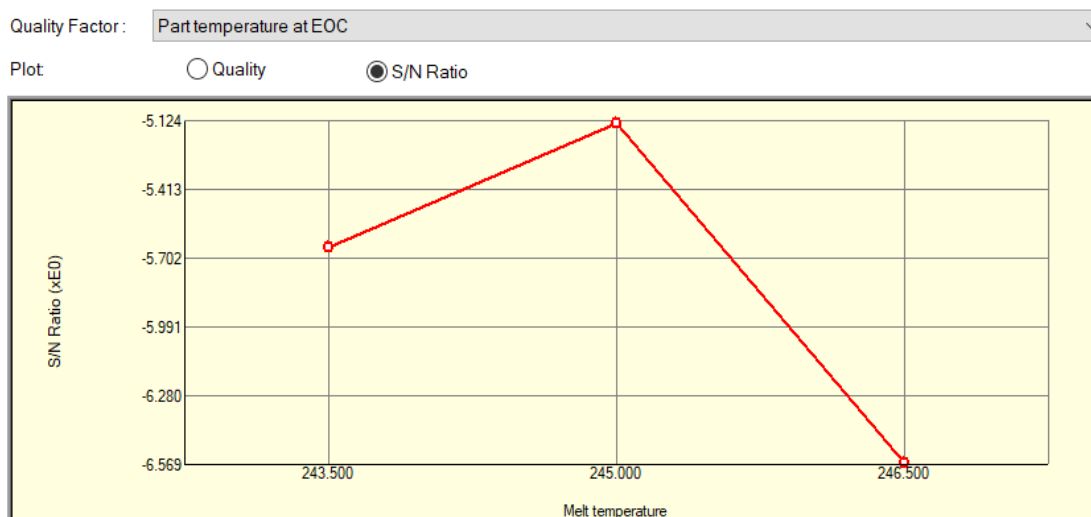
Σχήμα 5-67. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



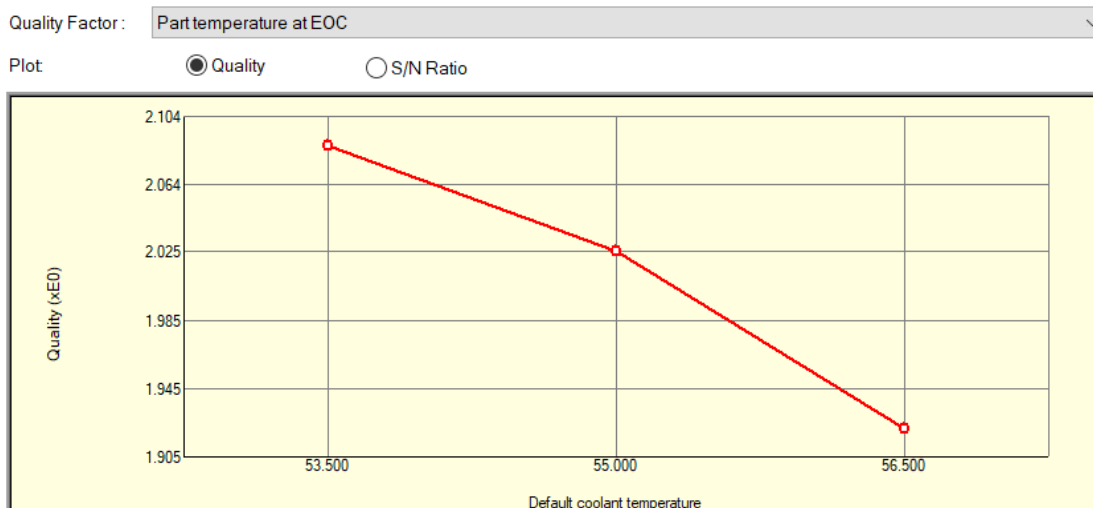
Σχήμα 5-68. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



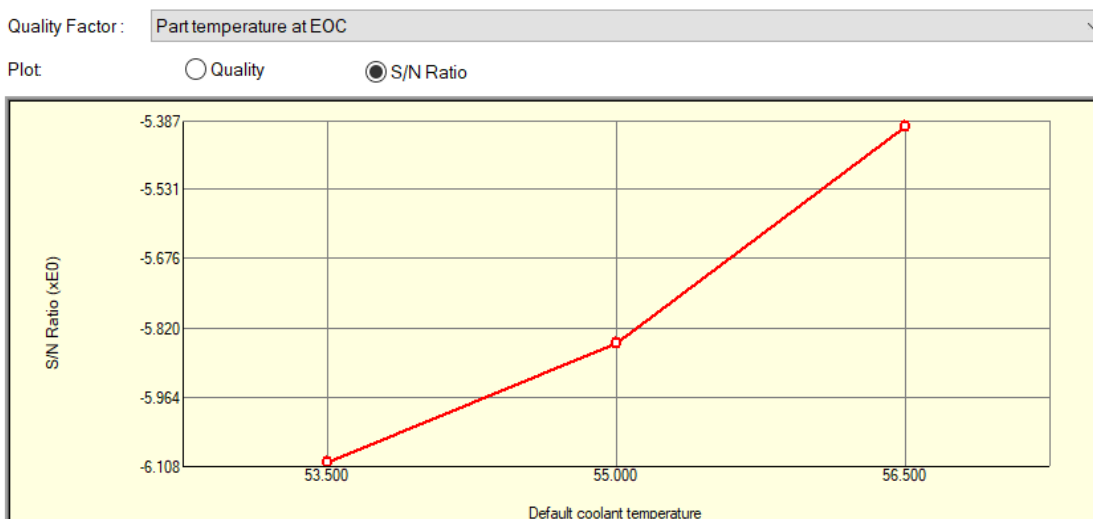
Σχήμα 5-69. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



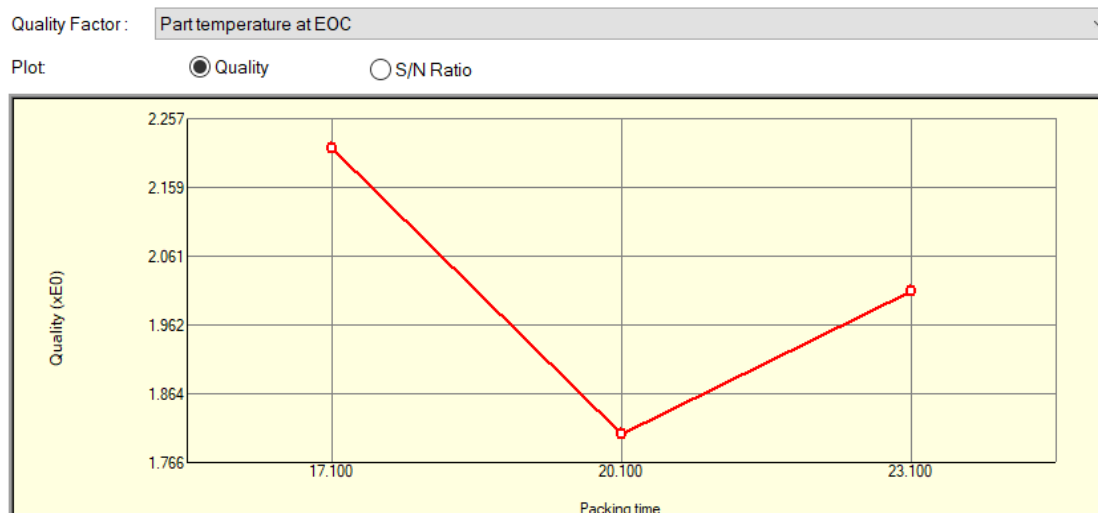
Σχήμα 5-70. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



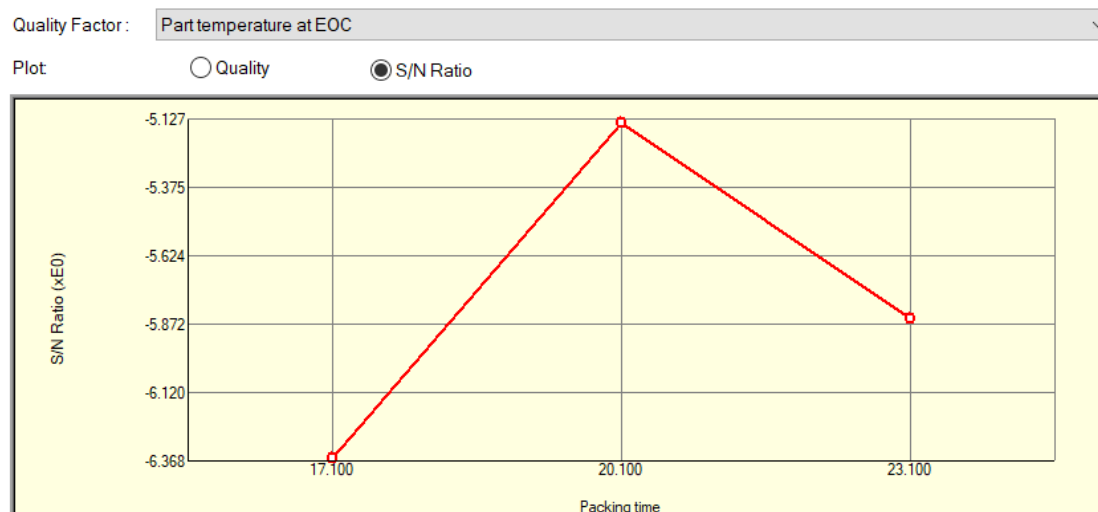
Σχήμα 5-71. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



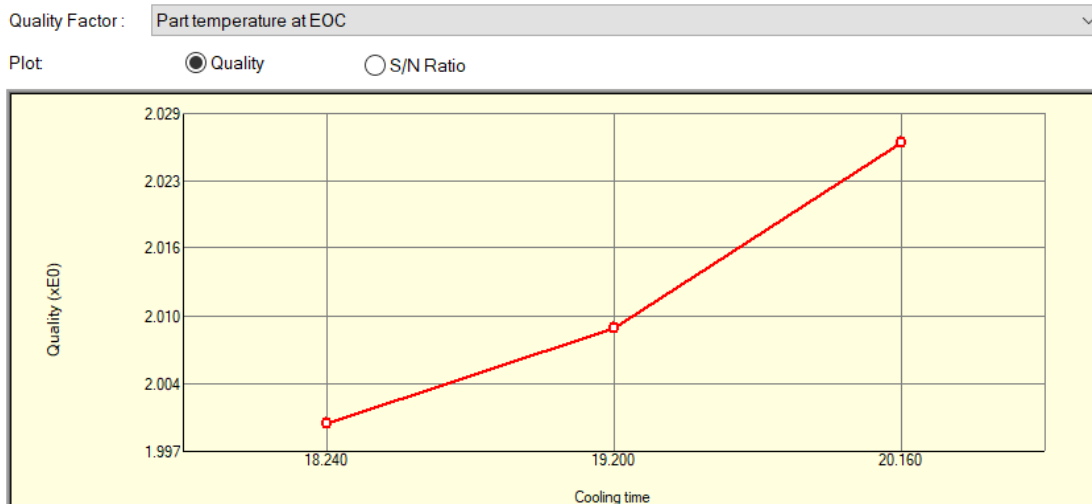
Σχήμα 5-72. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



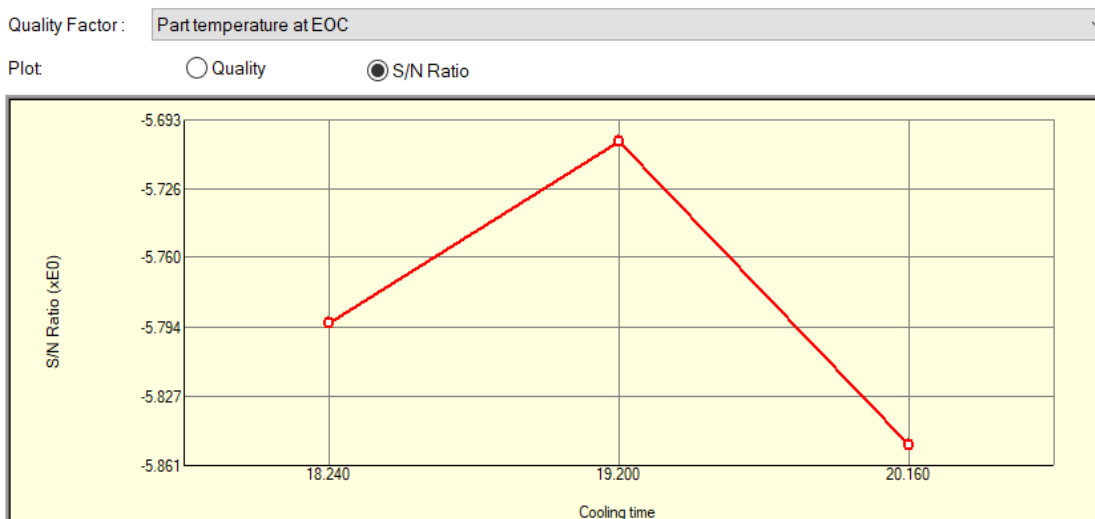
Σχήμα 5-73. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



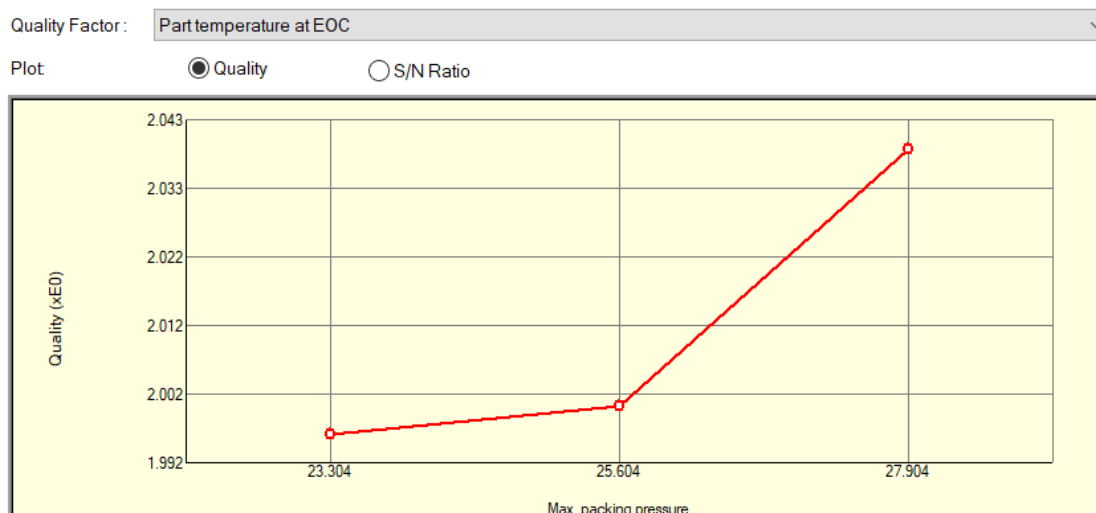
Σχήμα 5-74. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



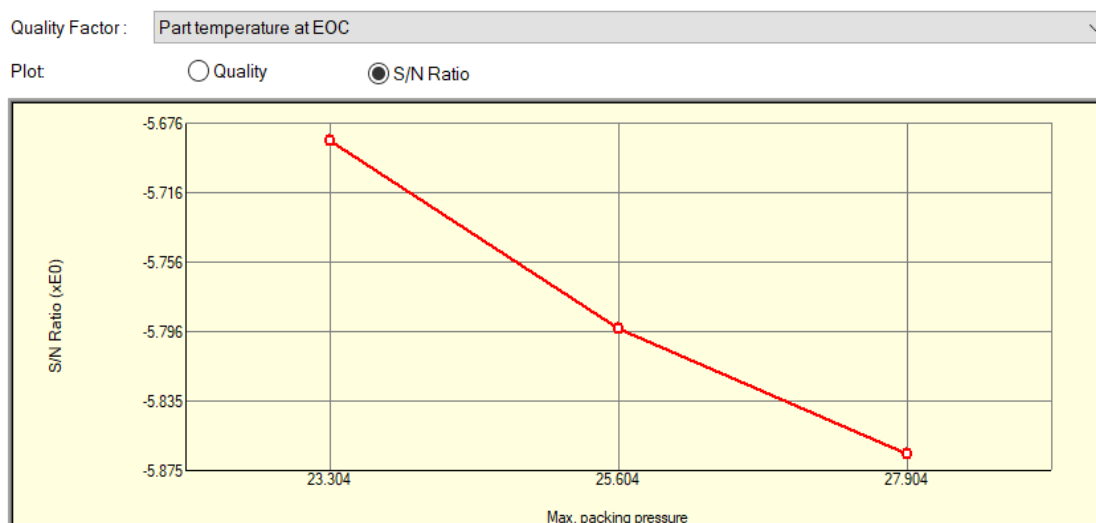
Σχήμα 5-75. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



Σχήμα 5-76. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



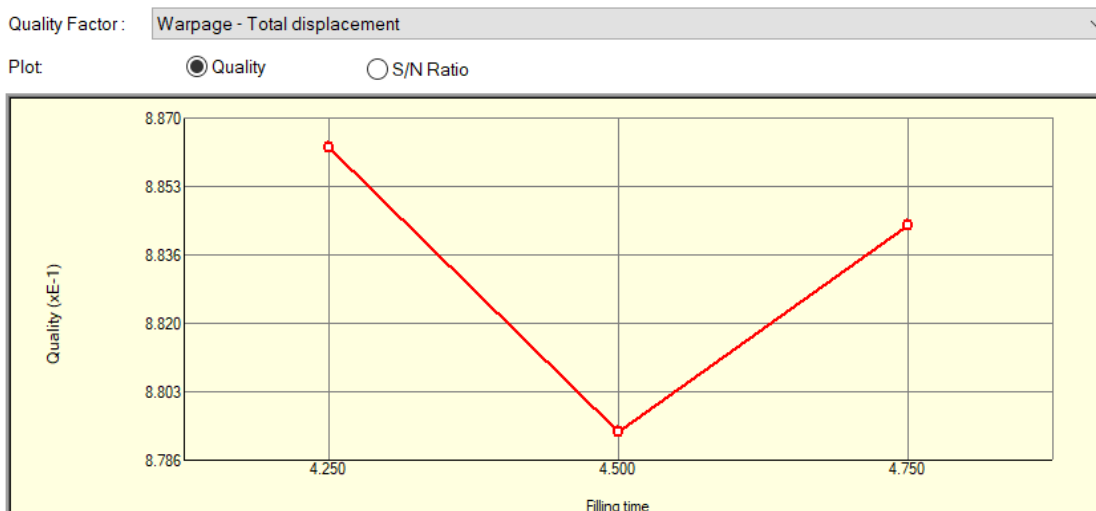
Σχήμα 5-77. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.



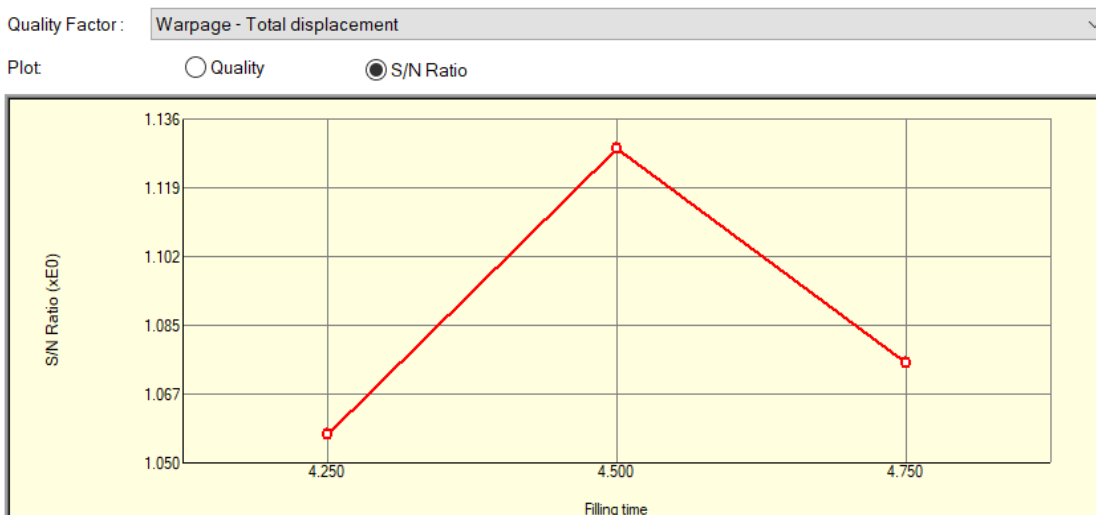
Σχήμα 5-78. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Warpage – Total Displacement”*

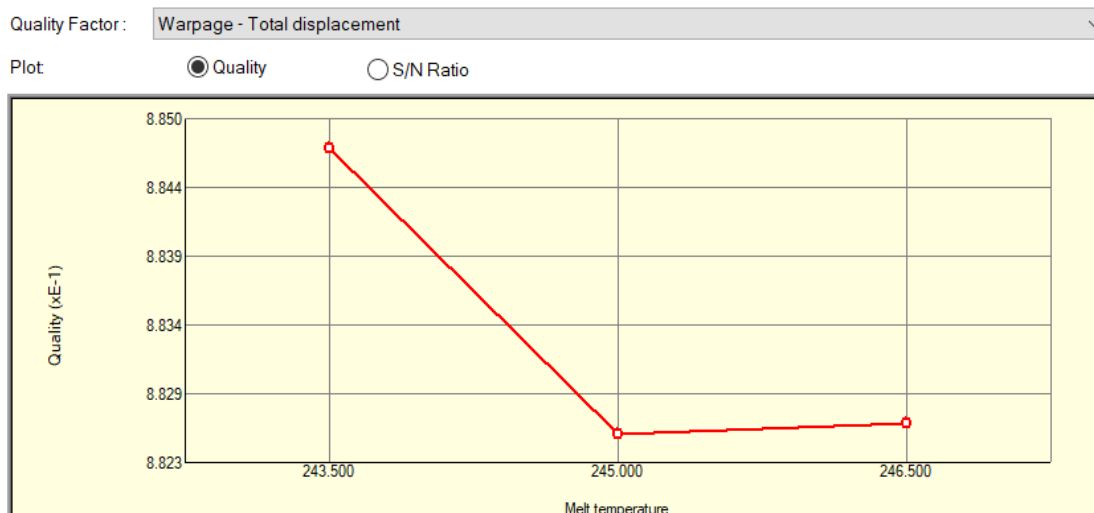
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, αναπαρίσταται για κάθε επίπεδο η επίδραση κάθε παράγοντα ελέγχου (χρόνος πλήρωσης, θερμοκρασία τήγματος, θερμοκρασία ψυκτικού μέσου, χρόνος συμπίεσης, χρόνος ψύξης και μέγιστη πίεση συμπίεσης) στον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement” (αποκρίσεις ποιότητας και αναλογίας S / N).



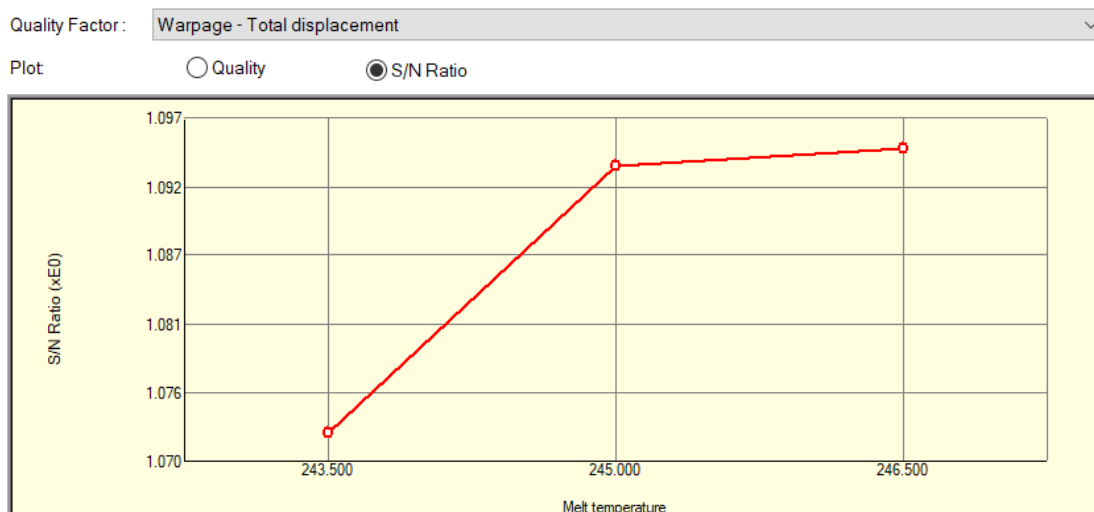
Σχήμα 5-79. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



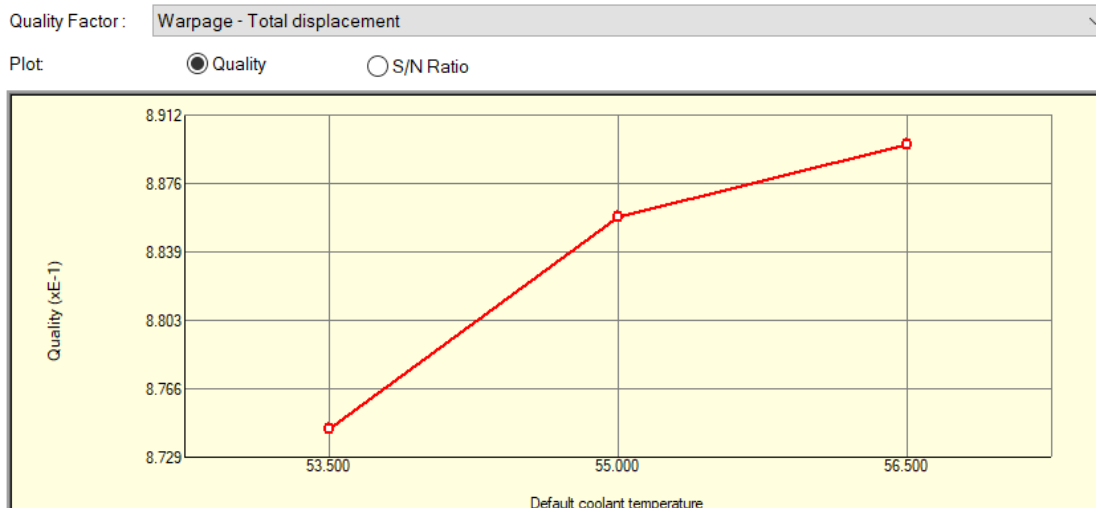
Σχήμα 5-80. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου πλήρωσης (filling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



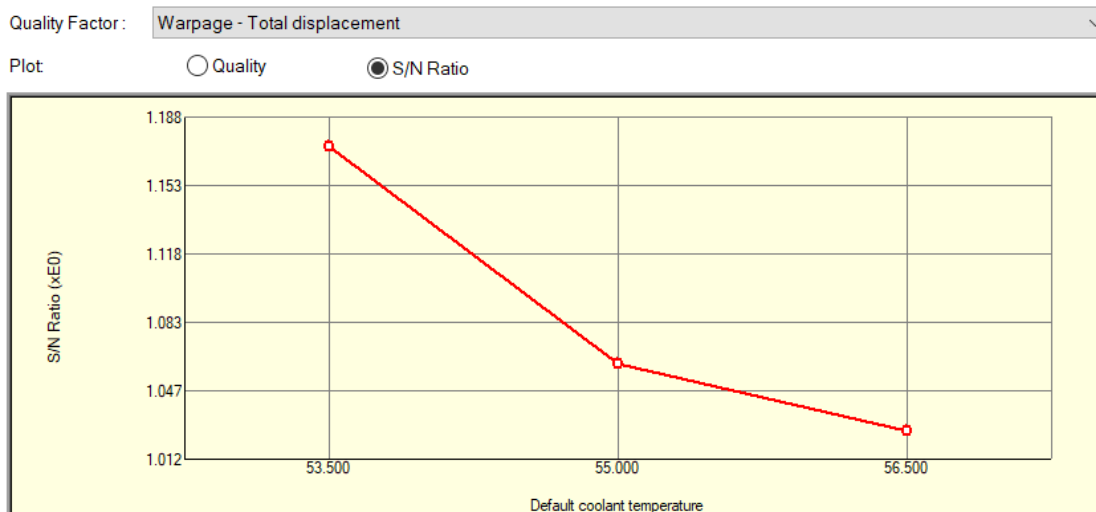
Σχήμα 5-81. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



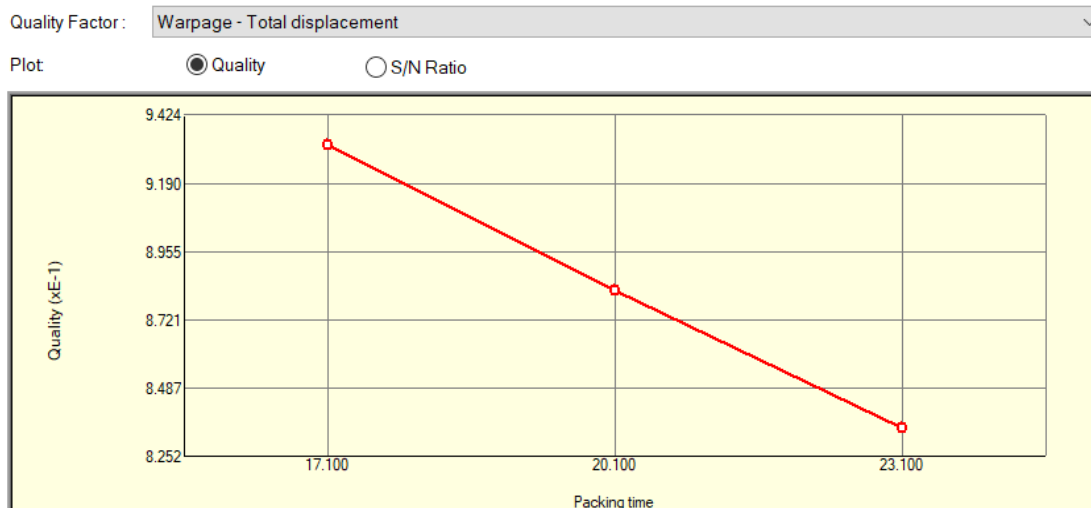
Σχήμα 5-82. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



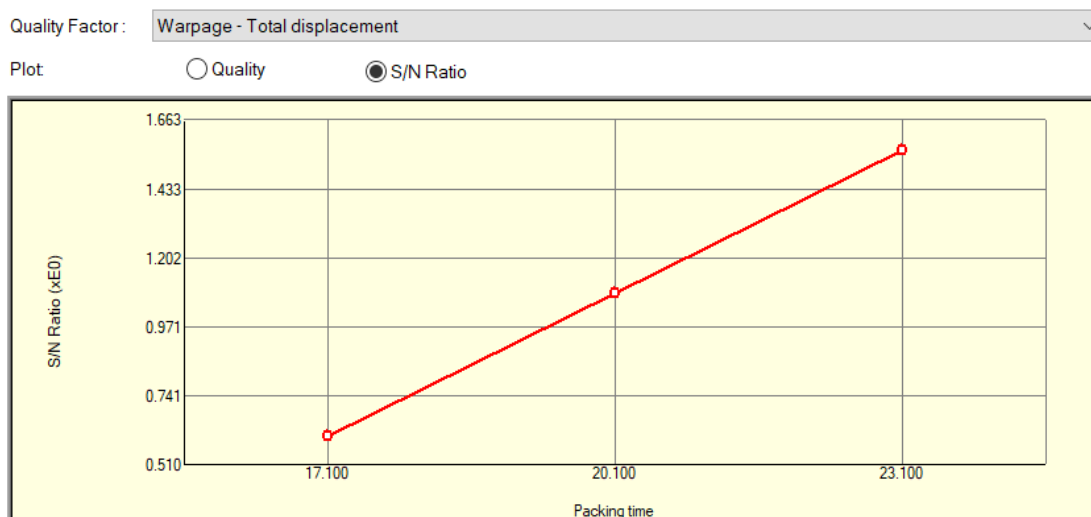
Σχήμα 5-83. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



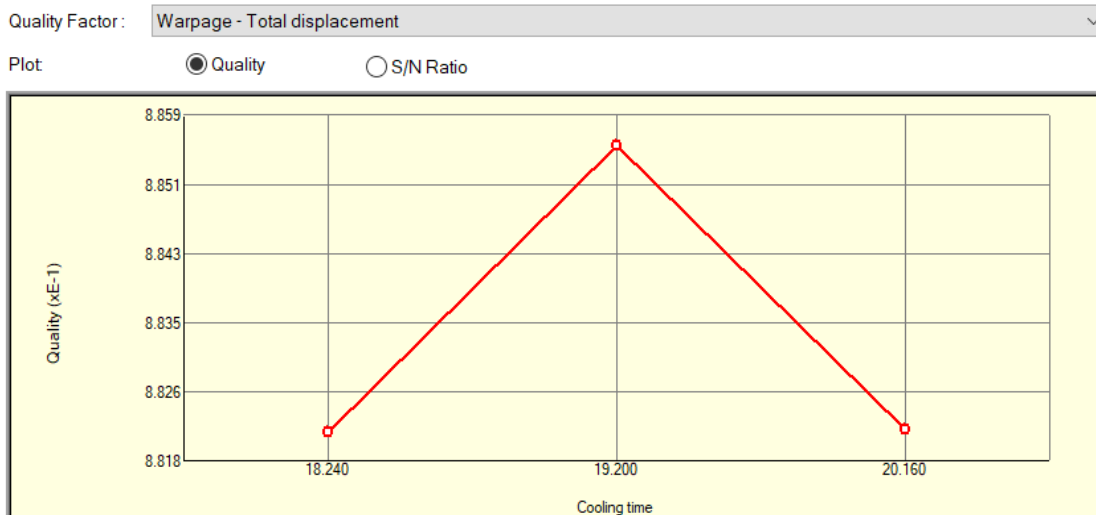
Σχήμα 5-84. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου (coolant temperature) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



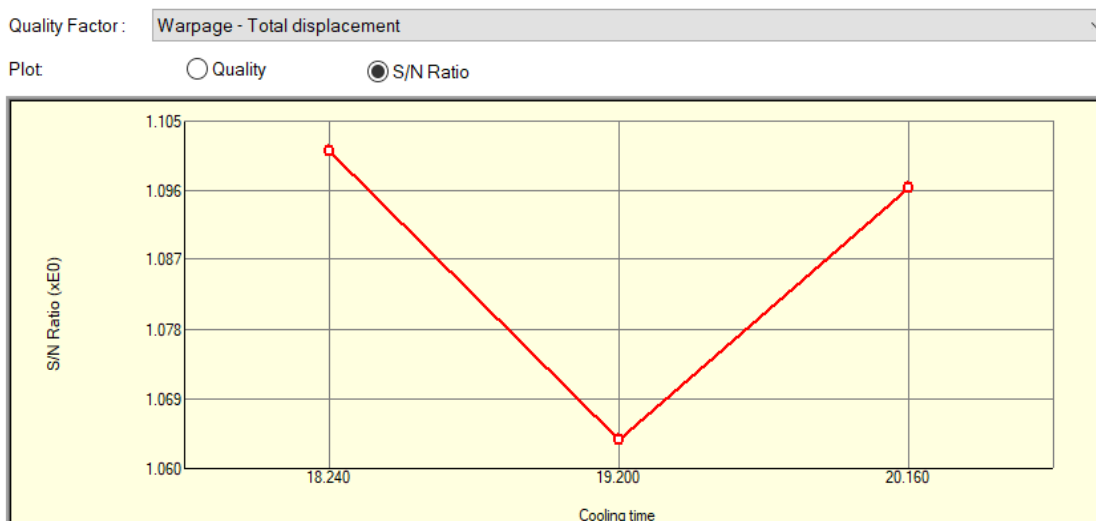
Σχήμα 5-85. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



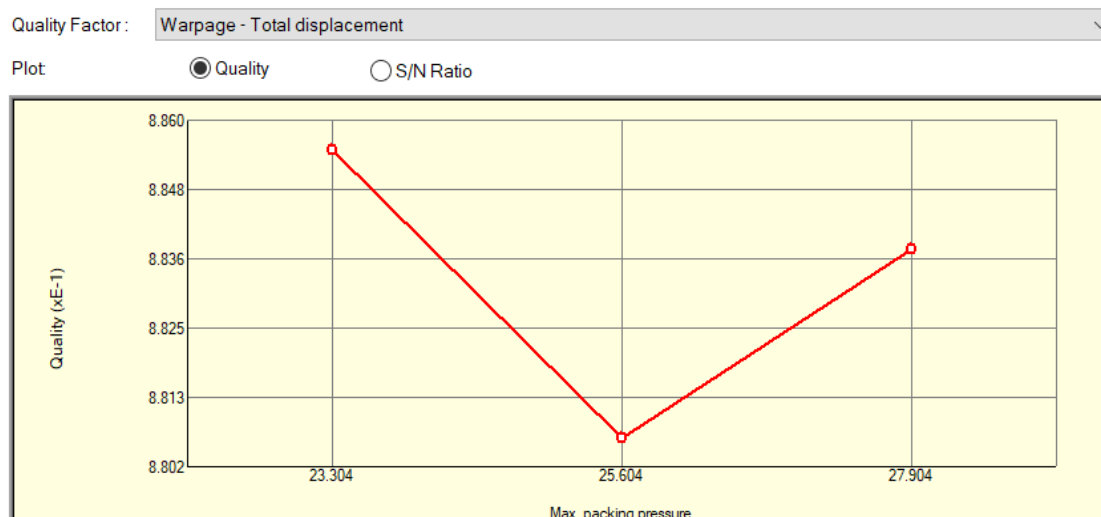
Σχήμα 5-86. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου συμπίεσης (packing time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



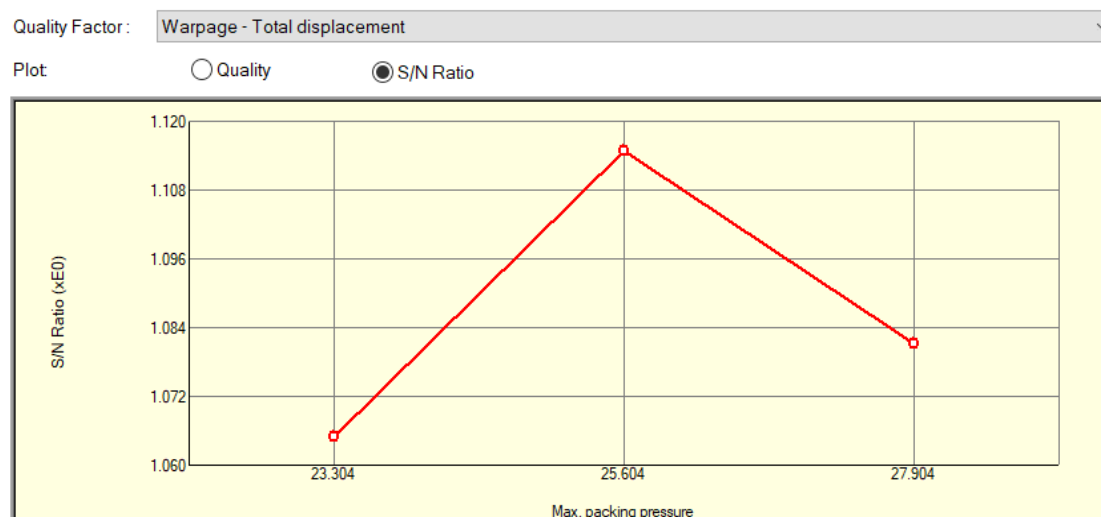
Σχήμα 5-87. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



Σχήμα 5-88. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα του χρόνου ψύξης (cooling time) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



Σχήμα 5-89. Διάγραμμα μέσης απόκρισης ποιότητας ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.



Σχήμα 5-90. Διάγραμμα μέσης απόκρισης της αναλογίας S / N ως προς τα τρία επίπεδα της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (max. packing pressure) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.

5.2.2.5 Βέλτιστος Σχεδιασμός (Optimized Design)

Για κάθε ποιοτικό παράγοντα υπολογίζονται οι προσδοκώμενες τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N (**Estimated Quality Value** και **Estimated S / N ratio**) καθώς και οι αντίστοιχες πραγματικές (**Actual Quality Value** και **Actual S / N ratio**). Επίσης, βάσει του σχεδιασμού πειραμάτων όπου καθένας εκ των τεσσάρων ποιοτικών παραγόντων συμμετέχει με το δικό του ποσοστιαίο βάρος στην προς βελτιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση, ευρίσκονται οι βέλτιστες τιμές και των έξι παραγόντων ελέγχου που έχουν προηγουμένως καθοριστεί. Σε τελική ανάλυση, ο υπολογισμός των βέλτιστων τιμών και των έξι παραγόντων ελέγχου είναι ο αντικειμενικός σκοπός του σχεδιασμού πειραμάτων.

Στο διά ταύτα, ο βέλτιστος χρόνος πλήρωσης (filling time) ανέρχεται στα **4.25 sec**, η βέλτιστη θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος (melt temperature) ανέρχεται στους **245**

$^{\circ}\text{C}$, η βέλτιστη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου ανέρχεται στους **56.5** $^{\circ}\text{C}$, ο βέλτιστος χρόνος συμπίεσης (packing time) ανέρχεται στα **23.1** sec, ο βέλτιστος χρόνος ψύξης (cooling time) ανέρχεται στα **20.16** sec και η βέλτιστη μέγιστη πίεση συμπίεσης (max. packing pressure) ανέρχεται στα **23.304** MPa (Πίνακας 5-5).

Πίνακας 5-5. Ελάχιστες, μέγιστες και βέλτιστες τιμές των έξι παραγόντων ελέγχου σύμφωνα με τον σχεδιασμό πειραμάτων με τη μέθοδο Taguchi.

Παράγοντας ελέγχου	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βέλτιστη τιμή	Τρέχουσα ρύθμιση
Χρόνος πλήρωσης (sec)	4.25	4.75	4.25	4.25
Θερμοκρασία τήγματος ($^{\circ}\text{C}$)	243.5	246.5	245	245
Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου ($^{\circ}\text{C}$)	53.5	56.5	56.5	56.5
Χρόνος συμπίεσης (sec)	17.1	23.1	23.1	23.1
Χρόνος ψύξης (sec)	18.24	20.16	20.16	20.16
Μέγιστη πίεση συμπίεσης (MPa)	23.304	27.904	23.304	23.304

Μάλιστα, παρατηρώντας πιο προσεκτικά τις αρχικές τιμές των ανωτέρω παραγόντων ελέγχου και τις αντίστοιχες τελικές οι οποίες είναι και οι βέλτιστες σύμφωνα με τη μέθοδο Taguchi, προκύπτουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για τους παράγοντες ελέγχου. Συγκεκριμένα :

- 1) ο χρόνος πλήρωσης μειώνεται από τα **4.5** στα **4.25** sec. Εφόσον η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού γεμίζει πλήρως με πολυμερές τήγμα σε αυτόν τον χρόνο χωρίς να παρατηρούνται ελλειπίες πληρώσεις (short shots) και ικανοποιώντας τις προσεγγίσεις των προς εξέταση ποιοτικών παραγόντων συνολικά, τότε δεν υπάρχει κάποιος ουσιαστικός λόγος ο χρόνος πλήρωσης να είναι μεγαλύτερος και οι πιθανότητες για εκδήλωση άλλων κατασκευαστικών ατελειών στο τελικό προϊόν έγχυσης (π.χ. προέκταμα) αυτομάτως να αυξάνονται.
- 2) η θερμοκρασία του πολυμερούς τήγματος παραμένει στα ίδια επίπεδα, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει όλες τις αρχικές θεωρήσεις που έγιναν και οδήγησαν στην ρύθμιση της εν λόγω θερμοκρασίας στους **245** $^{\circ}\text{C}$.
- 3) η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου που ταυτόχρονα ελέγχει και τη θερμοκρασία του καλουπιού αυξάνεται από τους **55** στους **56.5** $^{\circ}\text{C}$.
- 4) ο χρόνος συμπίεσης αυξάνεται από τα **20.1** στα **23.1** sec. Το γεγονός αυτό συνδέεται οπωσδήποτε με τη μη στερεοποίηση του πολυμερούς τήγματος εντός της πύλης εισόδου τύπου sprue. Προφανώς, ως ιδανικός χρόνος συμπίεσης λογίζεται εκείνος που οδηγεί στη στερεοποίηση του τήγματος στο εσωτερικό της πύλης εισόδου. Εντούτοις, λόγω της μεγάλης διαμέτρου στη βάση της πύλης εισόδου τύπου sprue, η στερεοποίηση του τήγματος στο εσωτερικό της καθυστερεί. Καθόσον, οι μεγάλοι χρόνοι συμπίεσης συμβάλουν στην διόγκωση της χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης, ο μηχανικός είναι σε θέση να αποφασίσει αν μπορεί να κάνει αποδεκτό έναν μικρότερο χρόνο συμπίεσης. Στην προκειμένη περίπτωση, δεν είναι αναγκαία η αύξηση του χρόνου συμπίεσης έως ότου το πολυμερές στερεοποιηθεί πλήρως εντός της πύλης εισόδου. Και αυτό γιατί η ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς που θα

λάβει χώρα εξαιτίας της τάσης επαναφοράς του προς το ακροφύσιο κατά την ψύξη του τήγματος θα σημειωθεί σε περιοχή του τελικού προϊόντος έγχυσης (κυκλικός δίσκος) η οποία μέλλεται να αφαιρεθεί με πρόσθετη μηχανική επεξεργασία μετά και την εξόλκευση του προϊόντος από το καλούπι.

- 5) ο χρόνος ψύξης συμπαρασύρεται από τον χρόνο συμπίεσης για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω και αυξάνεται από τα **19.2** στα **20.16** sec.
- 6) η μέγιστη πίεση συμπίεσης μειώνεται από τα **25.604** στα **23.304** MPa ελαχιστοποιώντας από τη μία τη στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης και αποτρέποντας από την άλλη την υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού που πιθανόν να δημιουργήσει άλλα κατασκευαστικά ζητήματα.

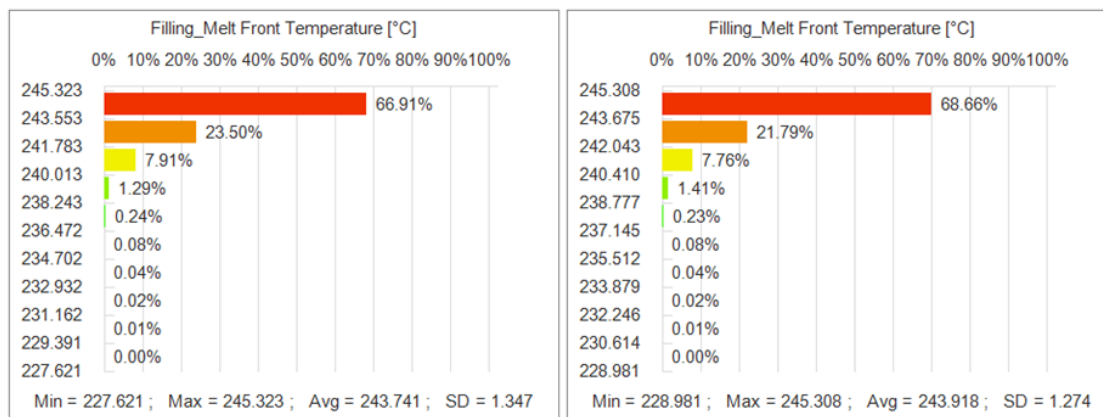
Είναι αληθές ότι από τα αποτελέσματα της βέλτιστης προσομοίωσης προέκυψε ότι άπαντες οι ποιοτικοί παράγοντες παρουσίασαν βελτίωση σε σχέση με τα πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης. Η βελτίωση ενός ποιοτικού παράγοντα σχετίζεται με την ποσοστιαία μεταβολή της τυπικής απόκλισης (Εξ. (5-16)). Για την ακρίβεια, όσο μεγαλύτερη είναι η ποσοστιαία μείωση της τυπικής απόκλισης, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό βελτίωσης του ποιοτικού παράγοντα.

$$PM = ((SD_{optimum} - SD_{original}) / SD_{original}) \times 100 \% \quad (5-16)$$

- Ποιοτικός Παράγοντας “Filling – Melt Front Temperature Distribution”

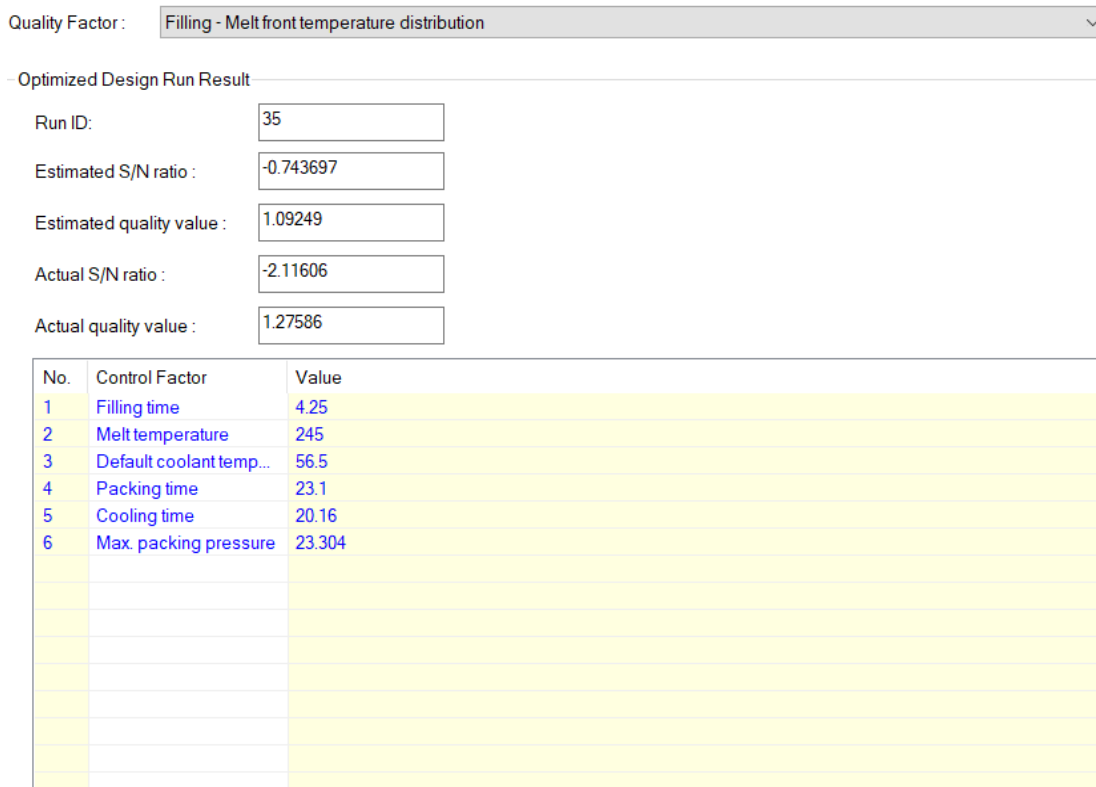
Σύμφωνα με την Εξ. (5-16) και τις πληροφορίες στο **Σχήμα 5-91**, η ποσοστιαία μεταβολή της τυπικής απόκλισης ισούται με :

$$((1.274 - 1.347) / 1.347) \times 100 \% = - 5.42 \%$$



Σχήμα 5-91. Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (αριστερά) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (δεξιά) για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution” ο οποίος βελτιώθηκε τελικώς κατά **5.42** %.

Επίσης, στο **Σχήμα 5-92** που ακολουθεί παρατίθενται οι προσδοκώμενες τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N (**1.09249** και **-0.743697** αντίστοιχα) καθώς και οι αντίστοιχες πραγματικές (**1.27586** και **-2.11606** αντίστοιχα).

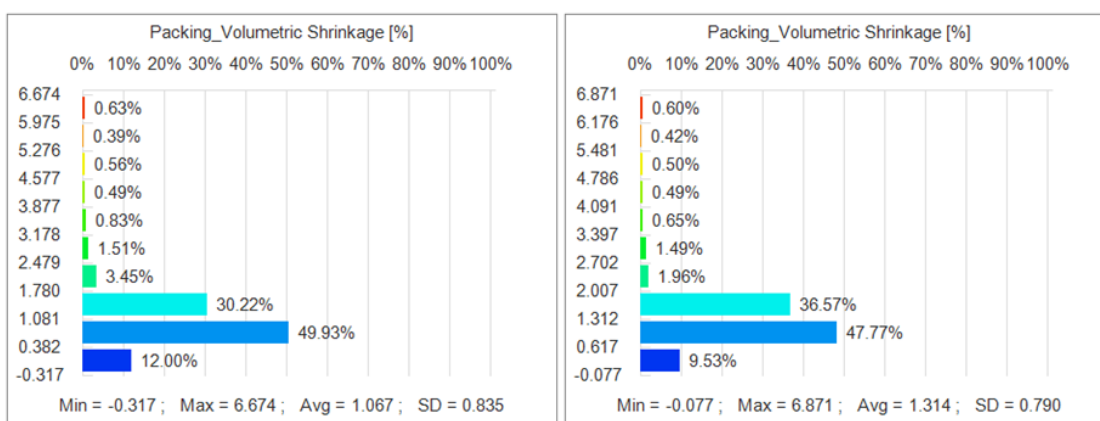


Σχήμα 5-92. Προσδοκώμενες και πραγματικές τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Filling – Melt Front Temperature Distribution”.

- Ποιοτικός Παράγοντας “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”

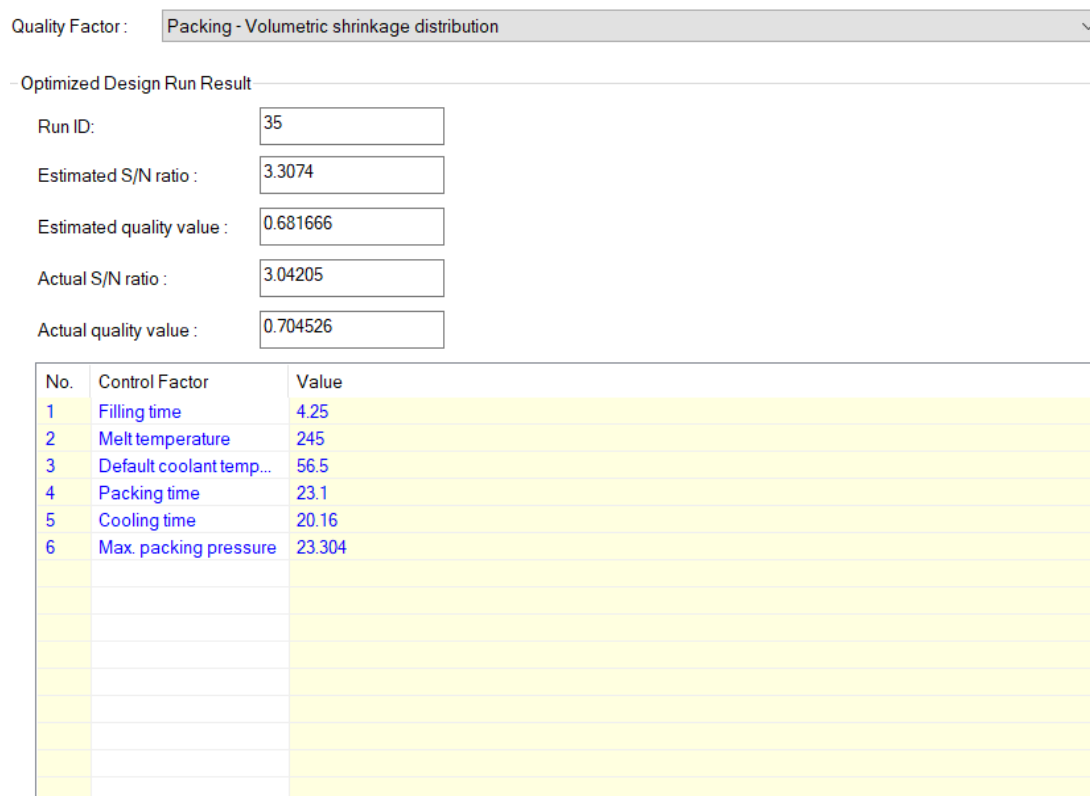
Σύμφωνα με την Εξ. (5-16) και τις πληροφορίες στο **Σχήμα 5-93**, η ποσοστιαία μεταβολή της τυπικής απόκλισης ισούται με :

$$((0.790 - 0.835) / 0.835) \times 100 \% = - 5.39 \%$$



Σχήμα 5-93. Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (αριστερά) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (δεξιά) για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution” ο οποίος βελτιώθηκε εν τέλει κατά **5.39 %**.

Επίσης, στο **Σχήμα 5-94** που ακολουθεί παρατίθενται οι προσδοκώμενες τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N (**0.681666** και **3.3074** αντίστοιχα) καθώς και οι αντίστοιχες πραγματικές (**0.704526** και **3.04205** αντίστοιχα).

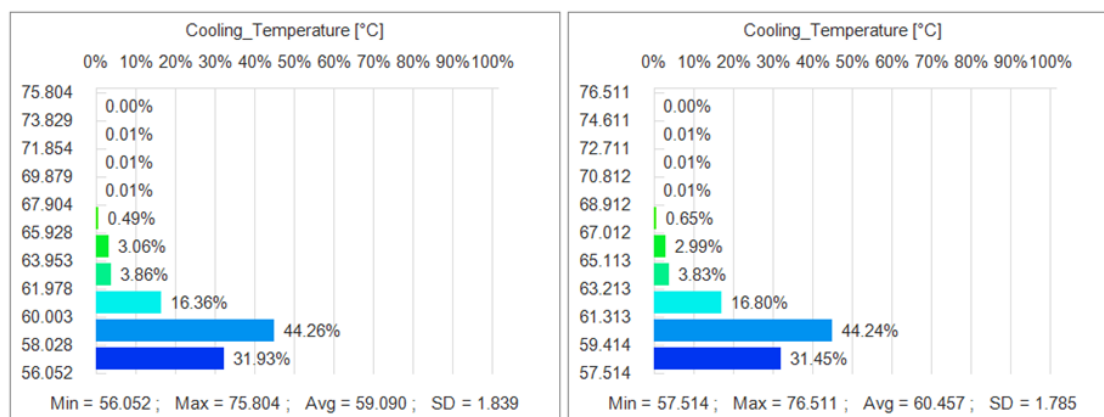


Σχήμα 5-94. Προσδοκώμενες και πραγματικές τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Packing – Volumetric Shrinkage Distribution”.

- *Ποιοτικός Παράγοντας “Cooling – Part Temperature at EOC”*

Σύμφωνα με την Εξ. (5-16) και τις πληροφορίες στο **Σχήμα 5-95**, η ποσοστιαία μεταβολή της τυπικής απόκλισης ισούται με :

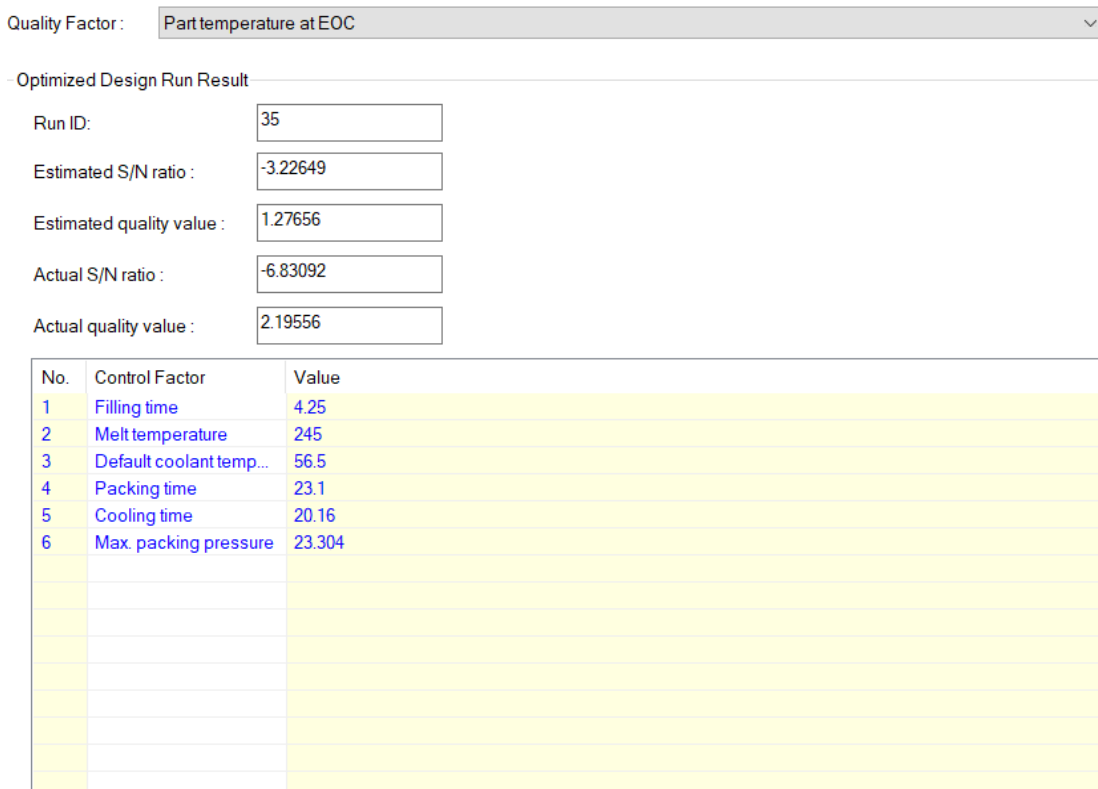
$$\left(\frac{1.785 - 1.839}{1.839} \right) \times 100 \% = - 2.94 \%$$



Σχήμα 5-95. Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (αριστερά) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου

έγχυσης (δεξιά) για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC” ο οποίος βελτιώθηκε τελικά κατά **2.94 %**.

Επίσης, στο **Σχήμα 5-96** που ακολουθεί παρατίθενται οι προσδοκώμενες τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N (**1.27656** και **-3.22649** αντίστοιχα) καθώς και οι αντίστοιχες πραγματικές (**2.19556** και **-6.83092** αντίστοιχα).

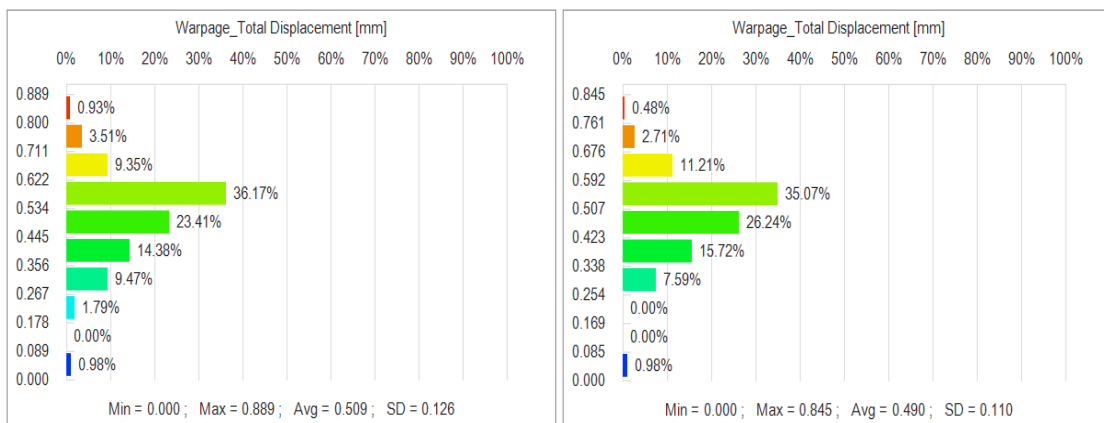


Σχήμα 5-96. Προσδοκώμενες και πραγματικές τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Cooling – Part Temperature at EOC”.

- Ποιοτικός Παράγοντας “Warpage – Total Displacement”

Σύμφωνα με την Εξ. (5-16) και τις πληροφορίες στο **Σχήμα 5-97**, η ποσοστιαία μεταβολή της τυπικής απόκλισης ισούται με :

$$((0.110 - 0.126) / 0.126) \times 100 \% = - 12.7 \%$$



Σχήμα 5-97. Πρωτογενή αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (αριστερά) και βέλτιστα αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης (δεξιά) για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement” ο οποίος βελτιώθηκε εν τέλει κατά **12.7 %**.

Επίσης, στο **Σχήμα 5-98** που ακολουθεί παρατίθενται οι προσδοκώμενες τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N (**0.817645** και **1.74413** αντίστοιχα) καθώς και οι αντίστοιχες πραγματικές (**0.845148** και **1.46135** αντίστοιχα).

Quality Factor :

Optimized Design Run Result

Run ID:

Estimated S/N ratio :

Estimated quality value :

Actual S/N ratio :

Actual quality value :

No.	Control Factor	Value
1	Filling time	4.25
2	Melt temperature	245
3	Default coolant temp...	56.5
4	Packing time	23.1
5	Cooling time	20.16
6	Max. packing pressure	23.304

Σχήμα 5-98. Προσδοκώμενες και πραγματικές τιμές ποιότητας και αναλογίας S / N για τον ποιοτικό παράγοντα “Warpage – Total Displacement”.

6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Η μέθοδος σχεδιασμού πειραμάτων χρησιμοποιεί όλα εκείνα τα εργαλεία της επιστήμης της Στατιστικής που είναι απαραίτητα για τη διεξαγωγή πειραμάτων σε διαδικασίες βελτιστοποίησης υπό ορισμένους χρονικούς περιορισμούς και περιορισμούς κόστους. Το λογισμικό Moldex3D παρέχει το Moldex3D Expert, ένα επαγγελματικό εργαλείο εξειδικευμένο στην υποστήριξη των μηχανικών να προσδιορίζουν τα βέλτιστα αποτελέσματα προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης διά της αυτόματης εξαγωγής περιληπτικών γραφημάτων. Μολονότι η μέθοδος Taguchi δεν είναι σαν τη μέθοδο των πλήρως παραγοντικών πειραμάτων η οποία μπορεί να προσδιορίζει κάθε φορά επακριβώς όλους τους πιθανούς συνδυασμούς παραγόντων, τα λιγότερα πειράματα προς εκτέλεση που προϋποθέτει η εν λόγω μέθοδος, εντούτοις, αρκούν για την παροχή χρήσιμων πληροφοριών στους μηχανικούς. Η δε εφικτότητα της μεθόδου Taguchi είναι κατά πολύ υψηλότερη από τη μέθοδο των πλήρως παραγοντικών πειραμάτων. Εξάλλου, το λογισμικό Moldex3D υποστηρίζει την ενσωμάτωση της υπολογιστικής μηχανικής (CAE) και του σχεδιασμού πειραμάτων (DOE). Έτσι, χρησιμοποιώντας απευθείας τα πρωτογενή αποτελέσματα μιας προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης σαν αρχικά δεδομένα, μπορούν να εκτιμηθούν τα βέλτιστα επίπεδα της επίδρασης ενός παράγοντα ελέγχου σε έναν ποιοτικό παράγοντα.

Για του λόγου το αληθές, στα πλαίσια της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης και των τεσσάρων ποιοτικών παραγόντων που επιλέχθηκαν στην προκειμένη μελέτη περίπτωσης ως οι πιο σημαντικοί, αυτό το οποίο επετεύχθη χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Taguchi ήταν μία ποσοστιαία βελτίωση για κάθε ποιοτικό παράγοντα από **2.94 %** (η μικρότερη) έως **12.7 %** (η μεγαλύτερη). Οπωσδήποτε, κάποιιοι μεμονωμένοι παράγοντες ελέγχου εκ των όσων επιλέχθηκαν βρέθηκε ότι επηρεάζουν δραματικά κάποιους ποιοτικούς παράγοντες και σχεδόν καθόλου κάποιους άλλους, ενώ σε έτερες περιπτώσεις διαπιστώθηκε ότι όλοι οι παράγοντες ελέγχου επιδρούν κατά ένα σεβαστό ποσοστό σε ορισμένους ποιοτικούς παράγοντες. Επίσης, τα μηδενικά σφάλματα σε κάθε ανάλυση ANOVA δικαιολογούν απόλυτα την ακρίβεια του βέλτιστου σχεδιασμού πειραμάτων με τις βέλτιστες τελικές τιμές των παραγόντων ελέγχου να ταυτίζονται με τις προσδοκώμενες βάσει εμπειρίας.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Οπωσδήποτε, επιπλέον διερεύνηση θα μπορούσε να υπάρξει στη συμπεριφορά του συγκεκριμένου προϊόντος έγχυσης με τη χρήση θερμής πύλης εισόδου στο αντίστοιχο καλούπι. Η αρχική εκτίμηση είναι ότι σε μία τέτοια περίπτωση η πλειονότητα των κατασκευαστικών ατελειών που εντοπίστηκαν στο τελικό προϊόν με τη χρήση ψυχρής πύλης εισόδου στο αντίστοιχο καλούπι θα βελτιώνονταν περαιτέρω. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να συνυπολογιστούν το κόστος μιας τέτοιας τροποποίησης του καλουπιού και, φυσικά, το ποσοστό της επερχόμενης βελτίωσης της ποιότητας του τελικού προϊόντος από αυτή τη διορθωτική ενέργεια. Έτσι, μπορεί να ληφθεί με ασφάλεια η απόφαση από την κατασκευάστρια εταιρεία για το αν αξίζει να προχωρήσει μια τέτοια επένδυση ή όχι.

Επίσης, υπενθυμίζεται ότι η μελέτη του προϊόντος έγχυσης έγινε στη βάση της μελέτης του μεμονωμένου εξαρτήματος και όχι της πλήρους μελέτης ολόκληρου του καλουπιού που διαθέτει στο ακέραιο όλα εκείνα τα επιμέρους εξαρτήματα που κρίνονται απαραίτητα για την παραγωγή του προϊόντος σε πραγματικό χρόνο (συρτάρια, ένθετα κλπ). Επομένως, δεδομένης της δυνατότητας που έχει έτσι και αλλιώς ο μηχανικός να εκπονεί

πλήρεις μελέτες ολόκληρων των καλουπιών στο λογισμικό Moldex3D, θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον να στηθεί μία τέτοιου είδους μελέτη για το συγκεκριμένο προϊόν έγχυσης και να διερευνηθούν τυχόν αποκλίσεις από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του μεμονωμένου εξαρτήματος που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.

Τέλος, στο λογισμικό Moldex3D η προσομοίωση του κύκλου έγχυσης για κάθε σενάριο τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού έγινε στην κατάσταση λειτουργίας της υπολογιστικής μηχανικής (CAE Mode) και όχι στην κατάσταση λειτουργίας της πραγματικής μηχανής έγχυσης (Machine Mode) που αποτελεί τη γέφυρα επικοινωνίας μεταξύ του μηχανικού που εκπονεί τη μελέτη και του χειριστή της μηχανής. Εφόσον υπάρχει επάρκεια πληροφοριών αναφορικά με τις ρυθμίσεις του εξειδικευμένου τεχνικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, θα ήταν ωφέλιμο σε επόμενη φάση να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του κύκλου έγχυσης στην κατάσταση λειτουργίας Machine Mode. Και αυτό γιατί η δυναμική απόκριση της μηχανής έγχυσης δεν είναι ένας παράγοντας που εξετάζεται στην κατάσταση λειτουργίας CAE Mode με συνέπεια την απόκλιση στην ακρίβεια της προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης όταν αυτή συγκρίνεται με την πραγματική χύτευση.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Kamaruddin, Z. A. Khan and S. H. Foong, "Application of Taguchi Method in the Optimization of Injection Moulding Parameters for Manufacturing Products from Plastic Blend", *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 574–580, 2010.
- [2] L. D. Mahajan and P. N. Ulhe, "Analysis of Injection Molding Process to Reduce Defects (Short Shot) by using Taguchi Methodology", *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, vol. 5, no. 6, pp. 113–119, 2018.
- [3] M. V. Kavade and S. D. Kadam, "Parameter Optimization of Injection Molding of Polypropylene by using Taguchi Methodology", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 49–58, 2016.
- [4] S. A. N. Mohamed, E. S. Zainudin, S. M. Sapuan, M. A. M. Deros and A. M. T. Arifin, "Integration of Taguchi-Grey Relational Analysis Technique in Parameter Process Optimization for Rice Husk Composite", *BioResources*, vol. 14, no. 1, pp. 1111–1122, 2019.
- [5] A. Wavare and S. Ubale, "Parametric Investigation for PP Homopolymer (1110 MAS) in Plastic Injection Molding Process using Taguchi Method", *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 4, no. 2, pp. 323–330, 2016.
- [6] N. Subramani, J. G. Murali, P. V. Rajan and C. G. Jose, "Optimization of Injection Moulding Mould Flow Analysis Using Taguchi Approach", *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 118, no. 11, pp. 241–248, 2018.
- [7] H. Radhwan, M. T. Mustaffa, A. F. Annuar, H. Azmi, M. Z. Zakaria and A. N. M. Khalilf, "An Optimization of Shrinkage in Injection Molding Parts by Using Taguchi Method", *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, vol. 10, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [8] R. Hussin, R. M. Saad, R. Hussin and M. S. I. M. Dawi, "An Optimization of Plastic Injection Molding Parameters Using Taguchi Optimization Method", *Asian Transactions on Engineering*, vol. 02, no. 05, pp. 75–79, 2012.
- [9] R. K. Roy, "A Primer On The Taguchi Method", *Society of Manufacturing Engineers*, pp. 19–27, 40–96 and 100–172, 1990.
- [10] P. J. Ross, "Taguchi Techniques for Quality Engineering", *Mc Graw-Hill*, 2nd Edition, pp. 23–27, 43–69, 91–167, 181–196, 203–213 and 245–255, 1996.
- [11] 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 Experiment Analysis", *Expert Systems with Applications*, no. 36, pp. 10753–10758, 2009.
- [12] B. Ozcelik and I. Sonat, "Warping and Structural Analysis of Thin Shell Plastic in the Plastic Injection Molding", *Materials and Design*, no. 30, pp. 368–374, 2009.
- [13] D. V. Rosato, D. V. Rosato and M. G. Rosato, "Injection Molding Handbook", *Springer Science + Business Media, LLC*, vol. 1, no. 3, pp. 151–368, 415–476 and 969–994, 2000.
- [14] D. Kazmer, "Injection Mold Design Engineer", *Hanser Publications*, 2nd Edition, pp. 109–135, 141–175, 197–224, 246–278, 291–306, 317–323 and 470–481, 2016.

- [15] H. P. Heim, “Specialized Injection Molding Techniques”, *PLASTICS DESIGN LIBRARY (PDL), PDL HANDBOOK SERIES, Elsevier Inc.*, pp. 17–26, 2016.
- [16] H. Pruner and W. Nesch, “Understanding Injection Molds”, *Hanser Publications*, pp. 49–58 and 71–79, 2013.
- [17] H. Rees, “Understanding Injection Mold Design”, *Hanser Publications*, pp. 7–27, 48–71 and 83–91, 2001.
- [18] W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar and F. Ehrig, “Training in Injection Molding, A Text and Workbook”, *Hanser Publications*, 2nd Edition, pp. 12–14, 20–25, 32–39, 43–53, 56–61 and 70–85, 2001.
- [19] G. Mennig and K. Stoeckhert, “Mold-Making Handbook”, *Hanser Publications*, 3rd Edition, pp. 301–329 and 349–376, 2013.
- [20] G. Menges, W. Michaeli and P. Mohren, “How to Make Injection Molds”, *Hanser Publications*, 3rd Edition, pp. 105–140, 143–156, 164–176, 180–192, 205–210, 242–248, 259–265, 312–318 and 335–348, 2001.
- [21] G. Menges, W. Michaeli and P. Mohren, “How to Make Injection Molds”, *Hanser Publications*, 3rd Edition, pp. 105–140, 143–156, 164–176, 180–192, 205–210, 242–248, 259–265, 312–318 and 335–348, 2001.

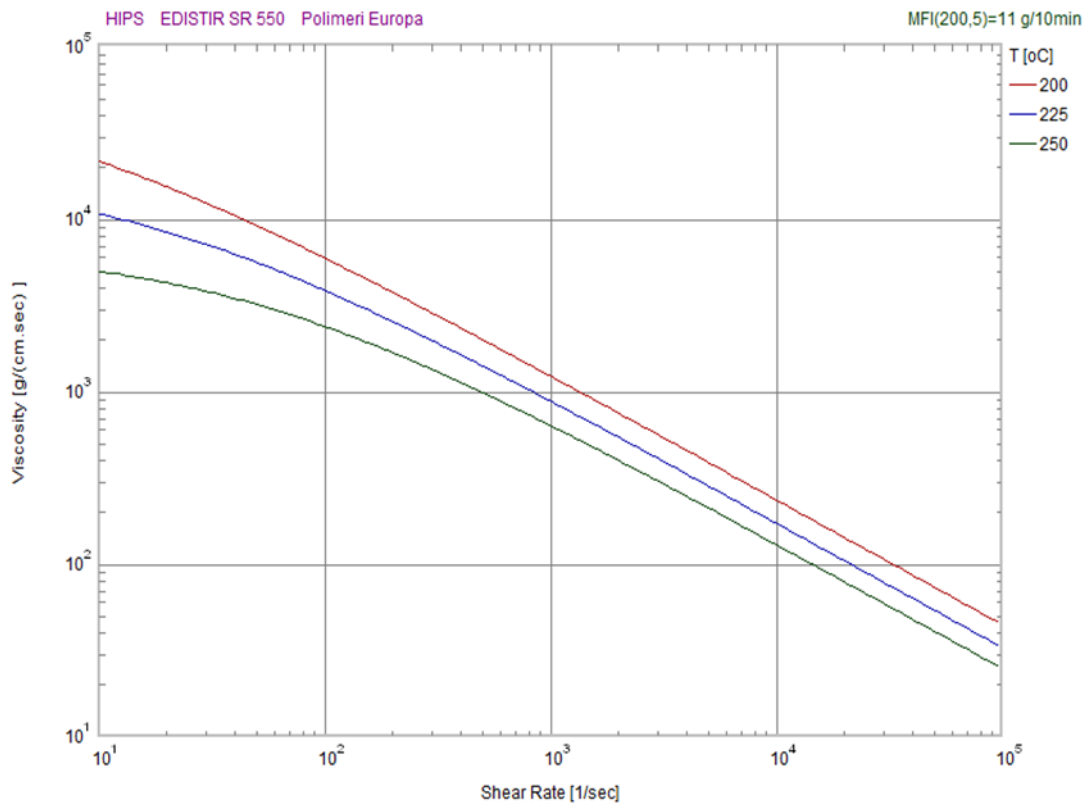
Διαδικτυακές πηγές

- <http://support.moldex3d.com/r17/en/>
- https://www.moldmakingtechnology.com/articles/a-different-approach-to-mold-venting?fbclid=IwAR37QivohJlzDw-p8lt3AQpNL5ANSVyfYFAPq8tw2nHeSX2cGB71Zb_PZal
- <https://www.creativemechanisms.com/blog/what-cause-injection-molding-defects-and-how-to-fix-them>
- <https://www.intouch-quality.com/blog/injection-molding-defects-and-how-to-prevent>
- <https://www.waykenrm.com/plastic-injection-molding-problems-and-solutions.html>
- <https://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>

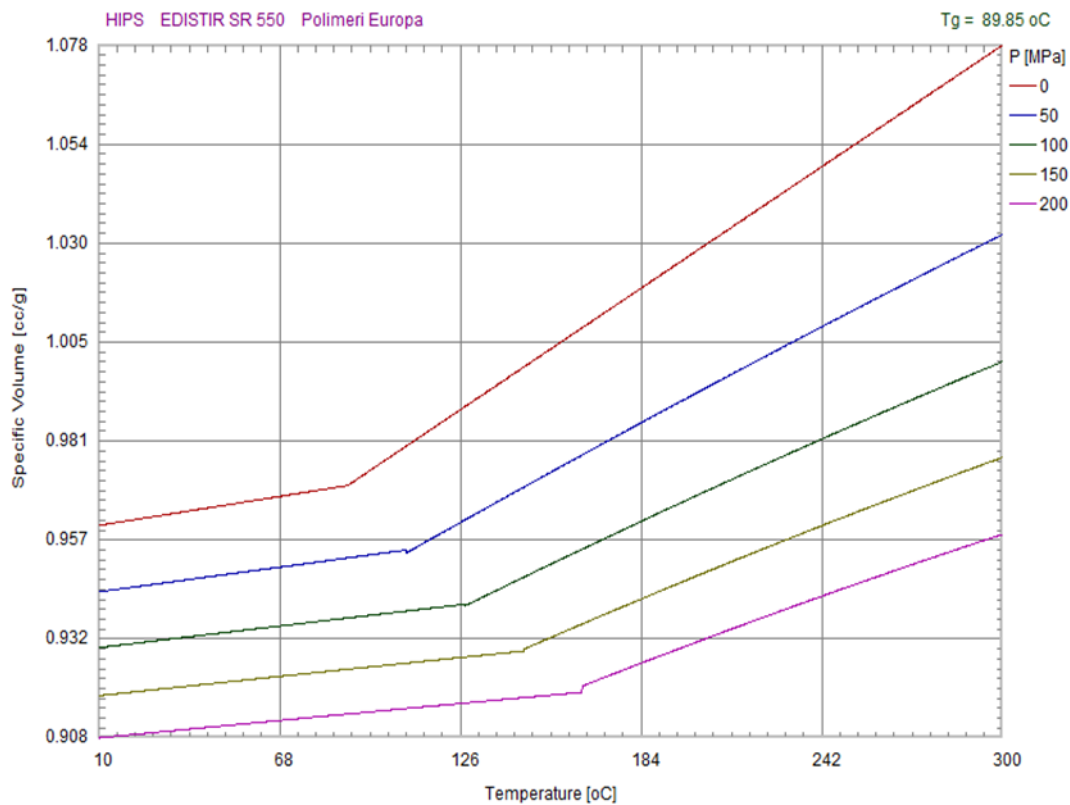
Παράρτημα Α

Πίνακας Α-1. Χαρακτηριστικά του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.

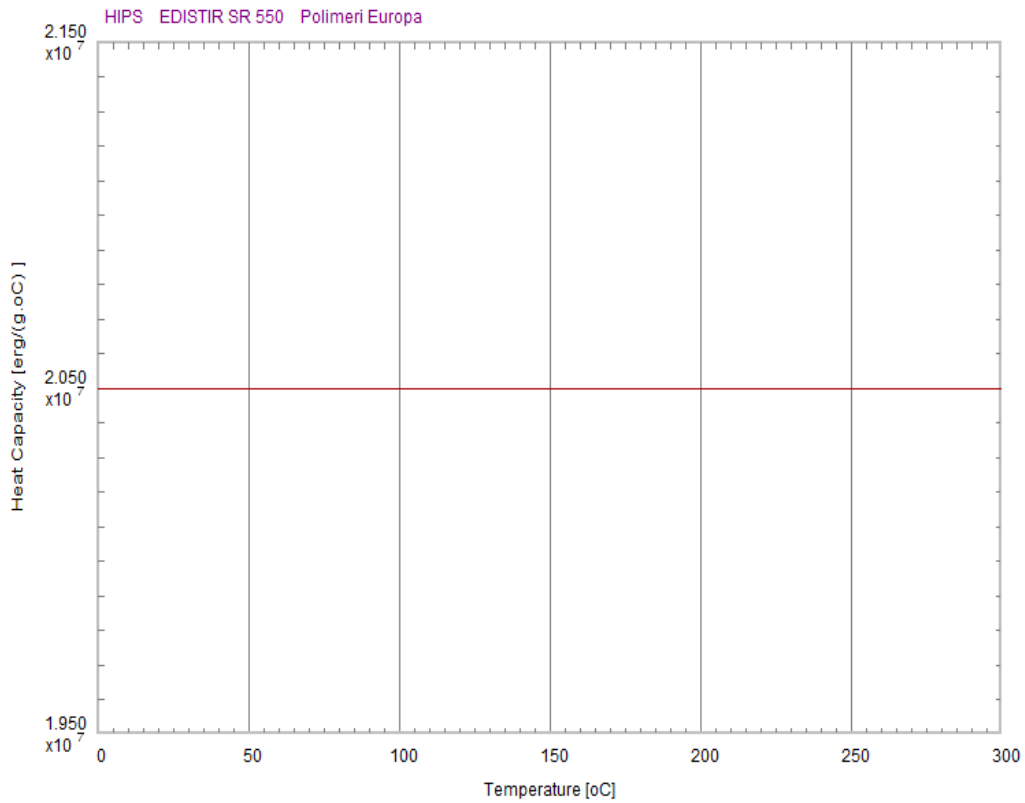
Χαρακτηριστικά υλικού	Δεδομένα βάσει εργαστηριακών δοκιμών	Μονάδα μέτρησης
ελάχιστη θερμοκρασία τήγματος (minimum melt temperature)	200	°C
κανονική θερμοκρασία τήγματος (normal melt temperature)	225	°C
μέγιστη θερμοκρασία τήγματος (maximum melt temperature)	250	°C
εύρος θερμοκρασίας τήγματος (melt temperature range)	200 ~ 250	°C
ελάχιστη θερμοκρασία καλουπιού (minimum mold temperature)	20	°C
κανονική θερμοκρασία καλουπιού (normal mold temperature)	40	°C
μέγιστη θερμοκρασία καλουπιού (maximum mold temperature)	60	°C
εύρος θερμοκρασίας καλουπιού (mold temperature range)	20 ~ 60	°C
θερμοκρασία εξόλκευσης (ejection temperature)	89.85	°C
θερμοκρασία στερεοποίησης (freeze temperature)	109.85	°C
θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature)	89.85	°C
μέτρο ελαστικότητας (elastic modulus)	1.9 e 0,10	dyne / cm ²
λόγος Poisson (Poisson's ratio)	0,38	
CLTE	9 e -0,05	1 / K
MFI (200,5)	11 g / 10 min, D = 1,04 g / cm³	



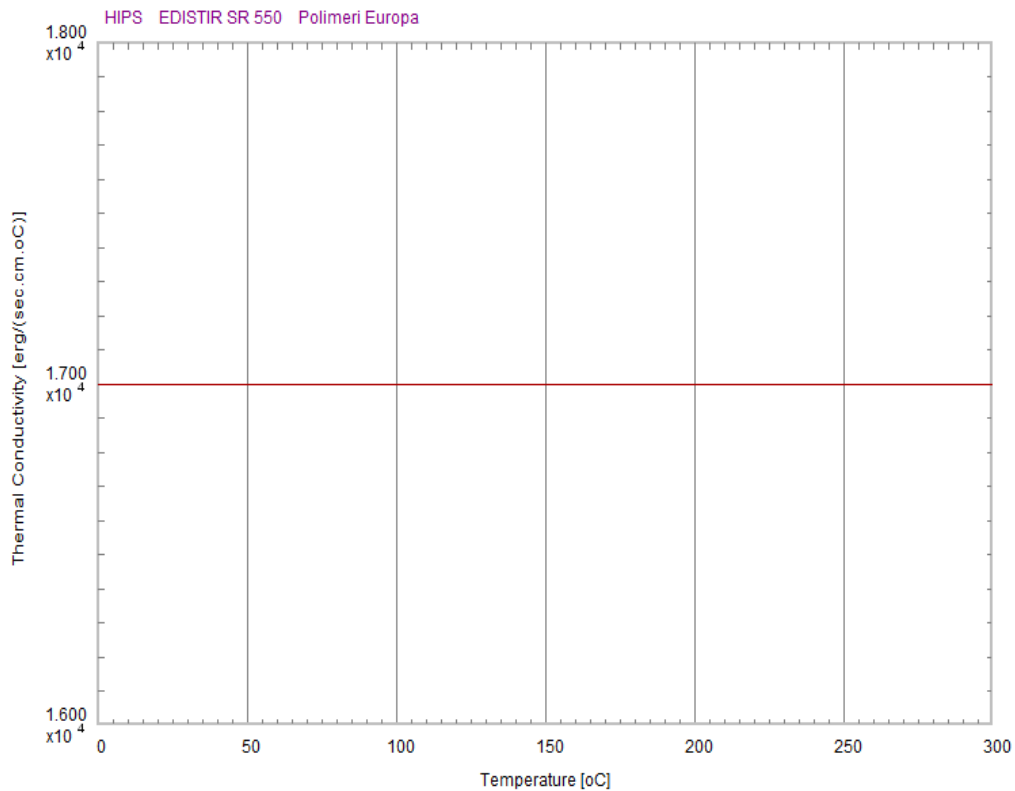
Σχήμα A-1. Ιξώδες (viscosity) του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri. Στο λογισμικό Moldex3D, το ιξώδες διαμορφώνεται ως συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης και της θερμοκρασίας. Το ιξώδες σε διαφορετικές κλίμακες διακύμανσης και θερμοκρασίας μπορεί να αποτυπωθεί ως διαφορετικές καμπύλες ιξώδους.



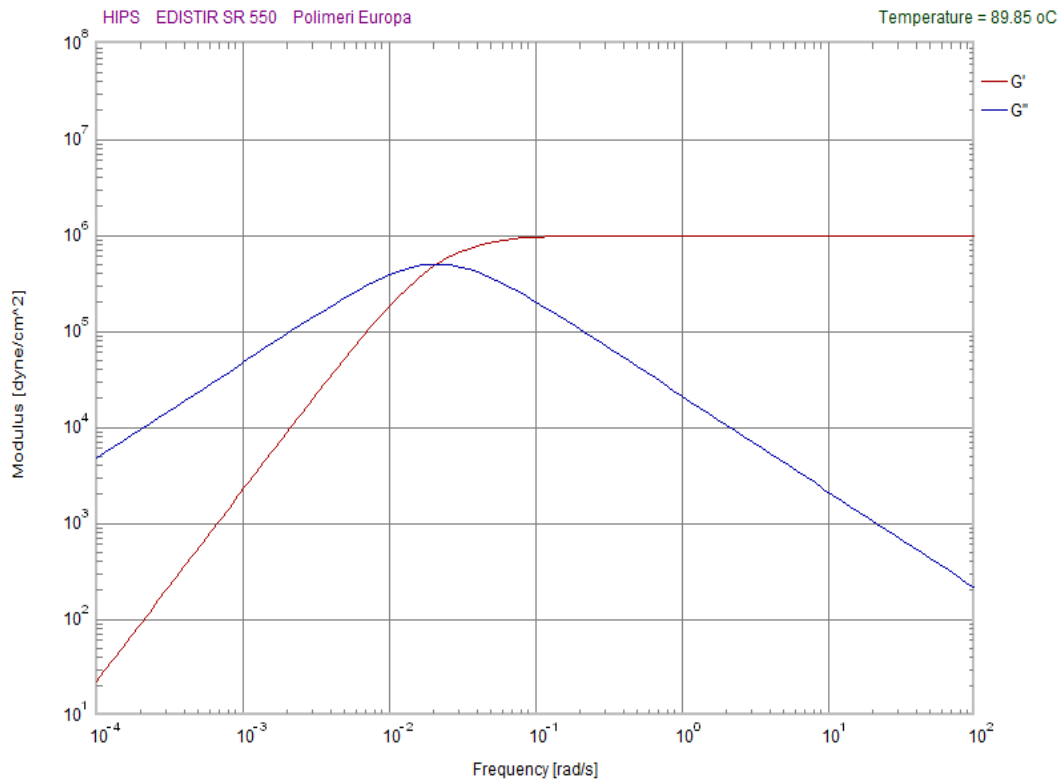
Σχήμα A-2. Ογκομετρικές ιδιότητες (PVT properties) του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.



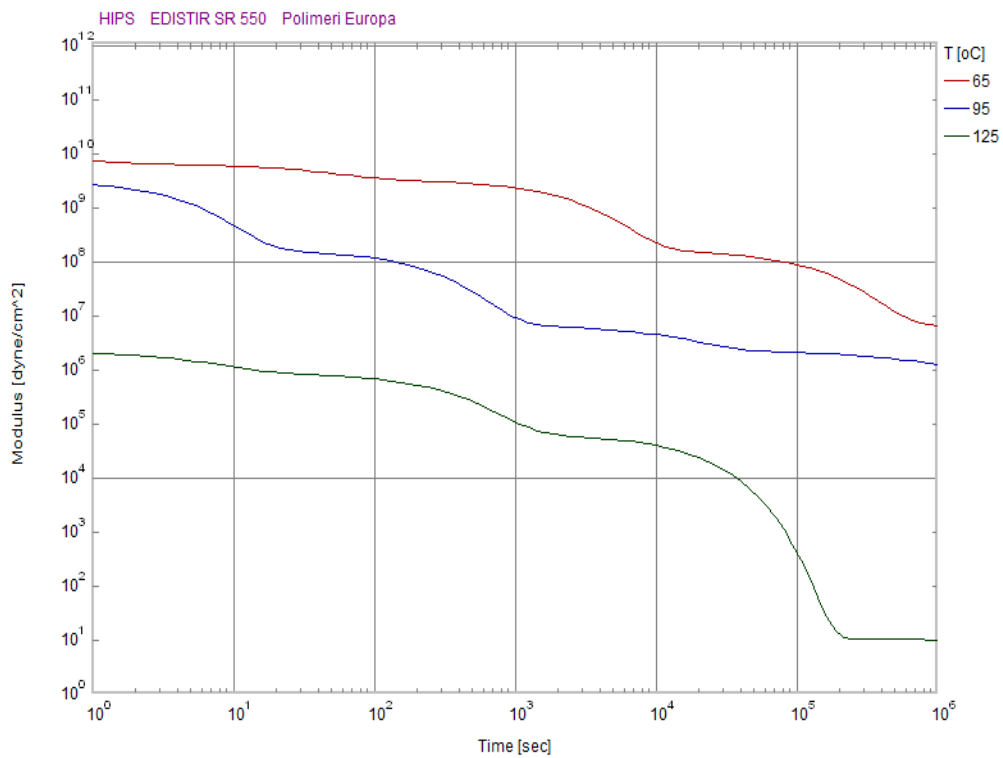
Σχήμα A-3. Θερμοχωρητικότητα (heat capacity) του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.



Σχήμα A-4. Θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.



Σχήμα A-5. Ιξωδοελαστικότητα (viscoelasticity) του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.



Σχήμα A-6. Structure VE του πολυμερούς HIPS EDISTIR SR550 της Europa Polimeri.

