



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Χύτευση με έγχυση ως κατεργασία για την παραγωγή προϊόντων για τις πλαστικές συσκευασίες τροφίμων.

Διπλωματική Εργασία

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Τσουρβελούδης

Χανιά 2024

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
1. Εισαγωγή.....	5
1.1 Σύντομη ιστορία των πλαστικών.....	5
2. Πολυμερή Υλικά.....	6
2.1 Εισαγωγή.....	6
2.2 Ταξινόμηση πολυμερών.....	6
2.3 Σχηματισμός πολυμερούς και πολυμερισμός προσθήκης.....	7
3. Μικροδομές Πολυμερών.....	8
3.1 Καταστάσεις Θερμοπλαστικών Πολυμερών.....	8
3.2 Μορφή πολυμερών.....	10
4. Χύτευση με έγχυση (Injection Molding).....	13
4.1 Εισαγωγή.....	13
4.2 Τα μέρη μηχανής χύτευσης με έγχυση.....	14
4.2.1 Μονάδα έγχυσης.....	15
4.2.2 Μονάδα σύσφιξης.....	18
4.3 Φάσεις πλήρωσης καλουπιού.....	19
4.4 Οι τρόποι έγχυσης.....	20
4.4.1 Καλούπια ψυχρού δρομέα.....	20
4.4.2 Καλούπια θερμού δρομέα.....	21
4.4.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα συστημάτων δρομέων.....	24
4.5 Έλεγχος διαδικασιών χύτευσης με έγχυση.....	25
4.5.1 Έλεγχος θερμοκρασίας πλαστικού.....	26
4.6 Έλεγχος θερμοκρασίας καλουπιού.....	27
4.7 Θερμοκρασίες μηχανής και λαδιού.....	29
4.8 Πίεση έγχυσης.....	29
4.9 Χρόνος κατά τη χύτευση με έγχυση.....	31
4.10 Ψύξη καλουπιού.....	32
4.11 Αποκόλληση του πλαστικού – Εξόλκευση τελικού προϊόντος.....	33
4.12 Σφάλματα που προκύπτουν κατά την χύτευση με έγχυση και τρόποι αντιμετώπισης.....	35
4.12.1 Σημάδια Ροής / Γραμμές Ροής.....	36
4.12.2 Στρεβλώσεις.....	37
4.12.3 Κενά.....	38
4.12.4 Σημάδια βύθισης – Βαθουλώματα.....	38

4.12.5 Γραμμές συγκόλλησης	39
4.12.6 Φαινόμενο πίδακα	40
4.12.7 Προέκταμα.....	40
4.12.8 Αποκόλληση.....	41
4.12.9 Σημάδια καύσης	42
5. Δημιουργία περιέκτη συσκευασίας τροφίμων με χύτευση με έγχυση.....	44
5.1 Μελέτη περίπτωσης πλαστικού περιέκτη τροφίμων	44
5.2 Σχεδιασμός καλουπιού	46
5.3 Το λογισμικό Moldex3D	47
5.4 Μελέτη προϊόντος	47
5.4.1.α Προ-επεξεργασία – Βήμα 1 : Εισαγωγή 3D μοντέλου.....	48
5.4.1.β Προ-επεξεργασία – Βήμα 2 : Σχεδιασμός πυλών εισόδου και καναλιών ψύξης.....	49
5.4.1.γ Προ-επεξεργασία – Βήμα 3 : Σχεδιασμός καλουπιέρας.....	50
5.4.1.δ Προ-επεξεργασία – Βήμα 4 : Δημιουργία 3D πλέγματος.....	51
5.4.1.ε Προ-επεξεργασία – Βήμα 5 : Έλεγχος πλέγματος και αποθήκευση.....	53
5.4.2.α Διεργασία – Βήμα 1 : Εισαγωγή πολυμερούς υλικού	53
5.4.2.β Διεργασία – Βήμα 2 : Παραμετροποίηση κατασκευαστικής διαδικασίας	55
5.4.2.γ Διεργασία – Βήμα 3: Καθορισμός κύκλου έγχυσης	61
5.4.3.α Μετα-επεξεργασία – Βήμα 1 / Βήμα 2 : Ανάλυση αποτελεσμάτων πλήρωσης / συγκράτησης και σύγκριση.....	61
5.4.3.β Μετα-επεξεργασία – Βήμα 3 : Ανάλυση αποτελεσμάτων ψύξης.....	89
5.4.3.γ Μετα-επεξεργασία – Βήμα 4 : Ανάλυση αποτελεσμάτων στρέβλωσης.....	100
6. Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις.....	108
7. Βιβλιογραφία.....	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	111

Περίληψη

Η χύτευση με έγχυση είναι μια ευέλικτη και ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία που χρησιμοποιείται στην παραγωγή διαφόρων πλαστικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των προϊόντων συσκευασίας τροφίμων. Αυτή η εργασία διερευνά την χύτευση με έγχυση και τις εφαρμογές της στην κατασκευή πολυμερών προϊόντων συσκευασίας τροφίμων και επικεντρώνεται σε μια περιεκτική μελέτη περίπτωσης που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα προσομοίωσης Moldex3D. Μέσω αυτής της μελέτης περίπτωσης, θα γίνει εμβάθυνση στις λεπτομέρειες της παραγωγικής διαδικασίας, από την επιλογή υλικού έως τη φάση της χύτευσης. Εξετάζοντας προσεκτικά κάθε φάση, η μελέτη στοχεύει να παρέχει μια λεπτομερή κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η χύτευση με έγχυση μπορεί να βελτιστοποιηθεί για την παραγωγή υψηλής ποιότητας πολυμερών προϊόντων, διασφαλίζοντας την αποτελεσματικότητα τους στις απαιτήσεις της βιομηχανίας τροφίμων.

1. Εισαγωγή

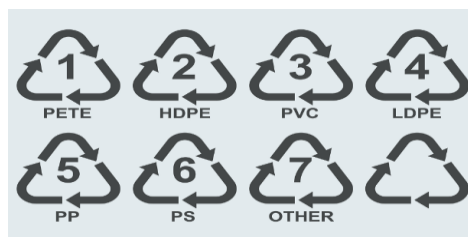
1.1 Σύντομη ιστορία των πλαστικών

Ο όρος πλαστικό, συνηθίζεται να θεωρείται μία σύγχρονη ανακάλυψη. Στην πραγματικότητα όμως, τα πλαστικά ανήκουν σε μία ευρύτερη οικογένεια, τα «πολυμερή», τα οποία είναι ζωικά και φυτικά παράγωγα. Τα σύνθετα πολυμερή όπως ονομάζονται τα πλαστικά θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

Σήμερα, τα πλαστικά χρησιμοποιούνται σε μια καθημερινή βάση για πολλές εφαρμογές όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στις κατασκευές, στα υφάσματα, αλλά και στη συσκευασία τροφίμων. Η παραγωγή και η χρήση πλαστικών αυξήθηκαν κατά 85% μεταξύ 2000 και 2020, φτάνοντας τους 435 εκατομμύρια τόνους [1]. Η χρήση του πλαστικού στη συσκευασία τροφίμων συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τα φιλμ πολλαπλών στρωμάτων για επικάλυψη ή τύλιγμα προϊόντων, τις σακούλες, τα μπουκάλια και τους περιέκτες αποθήκευσης τροφίμων.

Τα συνήθη πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία παράγονται από πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Ορισμένα πλαστικά με βάση το φυσικό αέριο περιλαμβάνουν το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και τα ακρυλικά. Το πολυαιθυλένιο (PE) κατασκευάζεται με περίπου 50% φυσικό αέριο και 50% αργό πετρέλαιο.

Το βασικό ερώτημα που τίθεται την τελευταία πενταετία είναι η ρύπανση που προκαλεί το πλαστικό στο περιβάλλον τόσο κατά την παραγωγή του όσο και μετά τη χρήση του. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των πλαστικών είναι ότι μπορούν να ανακυκλωθούν και να παραχθούν εκ νέου σε νέα ανακυκλωμένη πρώτη ύλη. Οι αριθμοί ανακύκλωσης πλαστικών παρατίθενται ως εξής (Σχήμα 1.1) :



Σχήμα 1.1: Αριθμοί ανακύκλωσης πλαστικών

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία της Eurostat για την ανακύκλωση πλαστικών στην Ευρώπη, δημιουργήθηκαν 16,13 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών απορριμμάτων το 2021 με 6,56 εκατομμύρια τόνους να ανακυκλώνονται. Αυτό το ποσοστό ανακύκλωσης, περίπου 40% για τα πλαστικά στην ΕΕ είναι πολύ χαμηλότερο σε σύγκριση με άλλα υλικά. Ως μέρος της Πράσινης Συμφωνίας της ΕΕ, τα ποσοστά ανακύκλωσης πλαστικών θα πρέπει να φτάσουν το 55% έως το 2030. [2]

Κατά κοινή διαπίστωση, το πλαστικό αποτελεί ένα υλικό το οποίο έχει επιφέρει όχι μόνο ραγδαίες εξελίξεις αλλά και ριζικές αλλαγές στην καθημερινότητα και τη ζωή εν γένει του σύγχρονου ανθρώπου, μειώνοντας τα κόστη σε οτιδήποτε χρησιμοποιείται. Λύσεις για την καλύτερη μετάβαση του σε πιο φιλικό υλικό προς το περιβάλλον υπάρχουν αρκετές. Ωστόσο, οι λύσεις αυτές βρίσκονται στο σύνολό τους στο χέρι της ίδιας κοινωνίας να τις υλοποιήσει.

2. Πολυμερή Υλικά

2.1 Εισαγωγή

Η βασική φύση των πολυμερών οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο τα άτομα και τα ηλεκτρόνια διατάσσονται στην αλυσίδα του πολυμερούς, δηλαδή την μοριακή τους δομή. [3] Ο όρος πολυμερές προέρχεται από το «poly» (πολλά) και το «mers», δηλαδή μέρη ή μονάδες που επαναλαμβάνονται. Τα περισσότερα πολυμερή αποτελούνται από δεσμούς άνθρακα και υδρογόνου, αλλά μπορούν επίσης να περιέχουν οξυγόνο, άζωτο, θείο και φθόριο, με τα άτομα τους αναδιατάσσονται πολλές φορές με επαναλαμβανόμενο τρόπο. [3] Ο άνθρακας έχει ατομικό αριθμό 12 και έχει τυπικά τέσσερις δεσμούς. Ο Πίνακας 2.1 παραθέτει τον αριθμό των δεσμών για διαφορετικά άτομα: [3]

Άτομα	Αριθμός δεσμών
C	4
H	1
Cl	1
N	3
O	2
Si	4
F	1
Br	1

Πίνακας 2.1 Αριθμός δεσμών για τα συνηθέστερα άτομα

2.2 Ταξινόμηση πολυμερών

Τα πολυμερή μπορούν να ταξινομηθούν ως *θερμοσκληρυνόμενα* και ως *θερμοπλαστικά*. Τα θερμοσκληρυνόμενα είναι πολυμερή των οποίων η μορφή είναι άλλη σε θερμοκρασία δωματίου και άλλη όταν θερμαίνονται. Αντιθέτως, τα θερμοπλαστικά τήκονται όταν θερμαίνονται και στερεοποιούνται εκ νέου όταν ψυχθούν.

Τα θερμοπλαστικά από τα οποία προκύπτει πλήθος από διαφορετικούς τύπους, περιλαμβάνουν το πολυαιθυλένιο, το πολυπροπυλένιο, το νάιλον, το πολυκαρβονικό ή πολυανθρακικό (PC), την πολυουρεθάνη, τον πολυεστέρα, το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και άλλα. Τα θερμοσκληρυνόμενα χωρίζονται σε πολυμερή όπως ο πολυεστέρας, το εποξειδικό και το καουτσούκ. [3] Τόσο τα θερμοπλαστικά όσο και τα θερμοσκληρυνόμενα παρουσιάζουν αμφότερα κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα τα οποία συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 2.2 :

Θερμοπλαστικά	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν απαιτείται οποιαδήποτε χημική διεργασία κατά την επεξεργασία τους. • Μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. • Αντιστέκονται στην υγρασία και σε άλλα μη φιλικά περιβάλλοντα. • Είναι φιλικά προς το περιβάλλον και ανακυκλώσιμα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Τείνουν να εμφανίζουν ασθενείς δεσμούς συγκόλλησης και μπορεί να μαλακώσουν όταν εκτεθούν σε θερμότητα. • Συνήθως είναι πιο ακριβά από τα θερμοσκληρυνόμενα.
Θερμοσκληρυνόμενα	<ul style="list-style-type: none"> • Αντιστέκονται στους ανασχηματισμούς και παρουσιάζουν σταθερές μηχανικές ιδιότητες. • Αντιδρούν με πολλές επιφάνειες σχηματίζοντας ισχυρούς χημικούς δεσμούς 	<ul style="list-style-type: none"> • Είναι μη ανακυκλώσιμα • Παρουσιάζουν υψηλή ψαθυρότητα που τα καθιστά εύθραυστα

Πίνακας 2.2 : Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων.

2.3 Σχηματισμός πολυμερούς και πολυμερισμός προσθήκης

Τα συνθετικά μακρομόρια συντίθενται με την συνένωση χιλιάδων μικρών μοριακών μονάδων, τα επονομαζόμενα *μονομερή*. Η διαδικασία συνένωσης των μονομερών ονομάζεται *πολυμερισμός προσθήκης*, ενώ το πλήθος των μονομερών που αποτελούν την αλυσίδα ονομάζεται *βαθμός πολυμερισμού “n”* (Degree of Polymerization - DP) [4]. Γενικά, όσο πιο υψηλή τιμή παίρνει το *n* τόσο αυξάνεται η δύναμη του υλικού αλλά και το ιξώδες του για οποιαδήποτε κατεργασία. Με άλλα λόγια, ο βαθμός πολυμερισμού επηρεάζει το μοριακό βάρος του πολυμερούς. Τα διάφορα πλαστικά διαφέρουν ως προς τη σύνθεση και τη δομή των βασικών δομικών στοιχείων. Μπορούν δε να αποτελούνται από έναν μόνο τύπο οπότε και ονομάζονται *ομοπολυμερή* (HOMO) ή από συνδυασμούς πολλών τύπων γνωστά ως *συμπολυμερή* (COPO). Ο πολυμερισμός προσθήκης είναι στιγμιαίος και η αλυσίδα πολυμερούς σχηματίζεται χωρίς υποπροϊόντα.

3. Μικροδομές Πολυμερών

3.1 Καταστάσεις Θερμοπλαστικών Πολυμερών

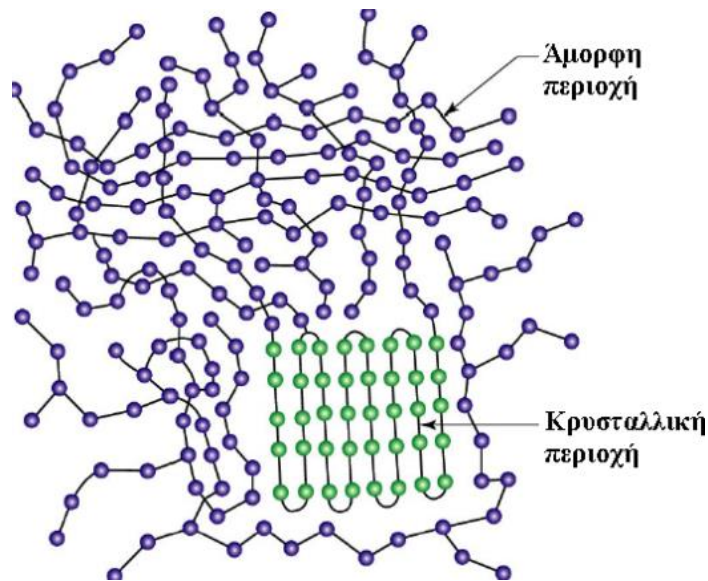
Οι καταστάσεις των πολυμερών καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένες οι πολυμερείς αλυσίδες. Για τον λόγο αυτό τα διάφορα πολυμερή μπορούν να είναι *άμορφα* ή *κρυσταλλικά*. Τυπικά, τα πολυμερή έχουν τόσο άμορφες όσο και κρυσταλλικές περιοχές στη δομή τους, για αυτό και συχνά αναφέρονται ως *ημικρυσταλλικά*.

Η αρχική κατάσταση των πολυμερών είναι μια άμορφη δομή. Η άμορφη μοριακή δομή είναι ανίκανη να σχηματίσει κρυστάλλους με μόρια ή τμήματα μορίων τακτικά στοιβαγμένα. Όλα τα πλαστικά είναι άμορφα πάνω από τη θερμοκρασία τήξης. Ωστόσο, κάτω από τη θερμοκρασία τήξης, τείνουν να σχηματίζουν κρυστάλλους με τη διαδικασία αυτή να ονομάζεται *ρυθμός κρυστάλλωσης*. Τα άμορφα πλαστικά, έχουν τυπικά αργό ρυθμό κρυστάλλωσης και η μοριακή διάταξη συστρέφεται και περιελίσσεται τυχαία. Το τυχαίο μήκος των ατόμων άνθρακα στο πολυμερές δημιουργεί μια άμορφη δομή. Κατά συνέπεια, το πολυμερές επιτρέπει στο φως να το διαπεράσει, προκαλώντας ένα διαφανές ή ημιδιαφανές τελικό προϊόν, π.χ. πλαστικό μπουκάλι, σακούλα ή δοχείο συσκευασίας.

Ορισμένα άμορφα θερμοπλαστικά θεωρούνται τα:

- ABS
- PPO
- PS
- PVC

Η δεύτερη κατάσταση μικροδομής είναι μια *κρυσταλλική* δομή. Μια κρυσταλλική - μοριακή δομή σχηματίζει μια κανονική τάξη, με μόρια ή τμήματα μορίων τακτικά στοιβαγμένα, κατά τέτοιον τρόπο ώστε να μοιάζει με κρύσταλλο. Πολύ υψηλή κρυσταλλικότητα επιτυγχάνεται σπάνια στα πολυμερή. Τα περισσότερα κρυσταλλικά πολυμερή είναι *ημικρυσταλλικά* καθότι έχουν μεν περιοχές που είναι κρυσταλλικές, αλλά έχουν και περιοχές που είναι άμορφες. Τα μόρια ενός κρυσταλλοποιημένου πολυμερούς είναι διατεταγμένα σε μια κρυσταλλική – μοριακή δομή. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα. 3.1 που ακολουθεί απεικονίζεται η άμορφη και η κρυσταλλική διάταξη του πολυμερούς. [3]



Σχήμα 3.1: Αμορφη και Κρυσταλλική περιοχή του πολυμερούς [5]

Ο ρυθμός κρυσταλλικότητας είναι συνάρτηση του παράγοντα ταχύτητας κρυσταλλοποίησης του πολυμερούς. Πλήθος παραγόντων στην επεξεργασία των πολυμερών με χύτευση με έγχυση μπορούν να επηρεάσουν την κρυσταλλικότητα των πολυμερών. Μάλιστα, ορισμένα κρυσταλλικά πολυμερή μπορούν να γίνουν διαφανή, όπως το LDPE και το PET. Και στις δύο περιπτώσεις, η κρυσταλλοποίηση επιβραδύνεται με την ταχεία ψύξη του πλαστικού έως ότου η θερμοκρασία πέσει κάτω από τη θερμοκρασία έναρξής της. Το PET μπορεί να γίνει διαφανές ενώ λαμβάνει χώρα η εμφύσησή του σε μπουκάλια και εφόσον ψύχεται γρήγορα. Το δε PBT έχει παρόμοια δομή με το PET, αλλά έχει πολύ ταχύτερο ρυθμό κρυστάλλωσης και επομένως δεν μπορεί να γίνει καθαρό ή διαφανές. Ομοίως, το HDPE έχει παρόμοια δομή με το LDPE, αλλά έχει πολύ ταχύτερο ρυθμό κρυστάλλωσης και επομένως δεν μπορεί να γίνει καθαρό ή διαφανές. [3]

Οι παράμετροι διεργασίας στη χύτευση με έγχυση που επηρεάζουν τον ρυθμό κρυστάλλωσης είναι οι εξής :

- Ρυθμός ψύξης από θερμοκρασίες τήγματος και καλουπιού
- Θερμοκρασίες του φούρνου (εξωτερικός κύλινδρος του κοχλίου)
- Πίεση έγχυσης και πίεση συμπίεσης («σιδέρωμα») [3]

Επίσης, ορισμένα πολυμερή που θεωρούνται κρυσταλλικά αλλά δεν είναι διαφανή είναι τα ακόλουθα:

- HDPE
- PP
- PBT
- Πολυαμίδια (νάιλον)
- PMO
- PEEK
- PPS [3]

3.2 Μορφή πολυμερών

Το θερμοπλαστικό υλικό είναι τυπικά στερεό σε θερμοκρασία δωματίου. Ωστόσο, διακρίνεται για τη σημαντική του ελαστικότητα, ενώ σε υψηλότερη θερμοκρασία μετατρέπεται σε ένα παχύρρευστο υγρό υλικό. Μάλιστα, η διαδικασία αυτή είναι αναστρέψιμη. Σε γενικές γραμμές, τα πολυμερή υλικά είναι *ιζώδοελαστικά*. Αυτό σημαίνει ότι συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά ενός ελαστικού στερεού με χαρακτηριστικά ενός ιζώδους ρευστού (άλλοτε να λειτουργούν σαν στερεά και άλλοτε σαν υγρά), ανάλογα με τη θερμοκρασία και την πίεση. Η ιζώδοελαστικότητα των πολυμερών μπορεί να μοντελοποιηθεί ως στερεό, όπως ένα ελατήριο, ή ως υγρό όπως ένας αποσβεστήρας. [3]

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα πολυμερή που μοντελοποιούνται ως στερεά, υπακούουν στο νόμο του Hooke ενός ιδανικού ελατηρίου ($\sigma = E * \epsilon$), ενώ τα υγρά πολυμερή, υπακούουν στο νόμο του ιζώδους του Newton ($\sigma = \eta * d\epsilon/dt$). Εν ολίγοις, η συμπεριφορά του πολυμερούς που μοιάζει με στερεό σημαίνει ότι όταν στο πλαστικό ασκείται δύναμη, μπορεί να «θυμάται» τη δύναμη που ασκήθηκε πάνω του και την αναγκάζει να υποχωρήσει όταν αυτή αφαιρεθεί (ελαστική παραμόρφωση). Η δε συμπεριφορά του πλαστικού ως υγρού είναι ακριβώς η αντίθετη, αναγκάζοντας το πλαστικό να ρέει όταν του ασκηθεί δύναμη διάτμησης. Όταν, μάλιστα, σταματήσει να ασκείται η δύναμη αυτή, η ροή είναι μη αναστρέψιμη και ασυμπίεστη. Σε αυτό το σημείο να υπογραμμιστεί ότι η υγρή φύση του πλαστικού μετράται ως *επιφανειακή τάση* ή *ιζώδες*. [3]

3.3 Θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου στα πολυμερή

Ένας σημαντικός παράγοντας για τη διαμόρφωση των πολυμερών είναι οι θερμικές τους ιδιότητες. Όταν τα θερμοπλαστικά θερμαίνονται, μπορούν να αλλάξουν τη διαμόρφωση της πολυμερούς αλυσίδας σε ελαστική ή υαλώδη κατάσταση. Όλα τα πολυμερή, έχουν μια θερμοκρασία κατά την οποία η διαμόρφωση αλλάζει από μια άκαμπτη ή υαλώδη κατάσταση σε μια ελαστική ή εύκαμπτη κατάσταση. Η θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται η μετατροπή αυτή ονομάζεται *θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης* (T_g). [3]

Για παράδειγμα, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE) είναι -100°C . Κάτω από αυτή τη θερμοκρασία, το πλαστικό αυτό είναι άκαμπτο και σκληρό. Πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, το πλαστικό είναι σαν καουτσούκ. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο σε θερμοκρασία δωματίου, το πολυαιθυλένιο είναι εύκαμπτο και μπορεί να γίνει ελαστικό προϊόν. Οι θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης των περισσότερων χρησιμοποιούμενων πολυμερών παρατίθενται στον Πίνακα 3.1:

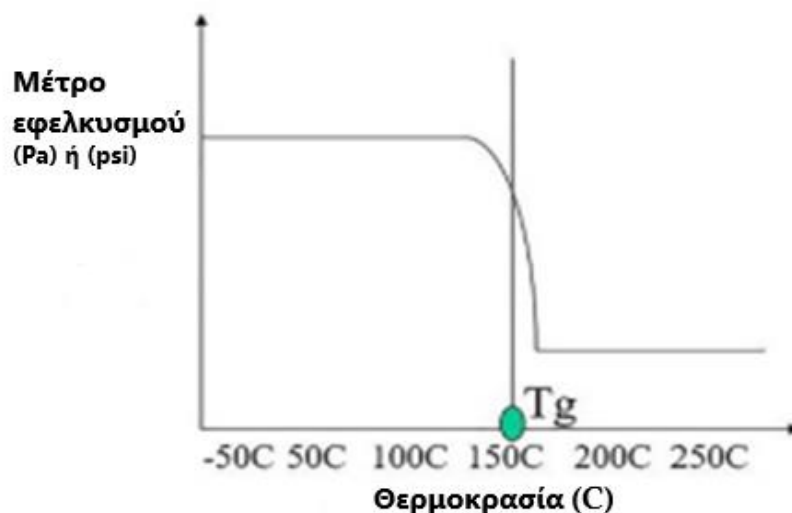
Πολυμερές	T_g (°C)	T_m (°C)
Χαμηλής πυκνότητας Πολυαιθυλένιο (LDPE)	-100	160
Υψηλής πυκνότητας Πολυαιθυλένιο (HDPE)	-100	175
Πολυπροπυλένιο (PP)	-25	175
Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)	70	240
Πολυστερίνη (PS)	95	175
Nylon 6.6	49	250
Οξείδιο του Πολυφαινυλενίου (PPO)	200	300

Πίνακας 3.1 : Θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης των περισσότερων χρησιμοποιούμενων πλαστικών [3]

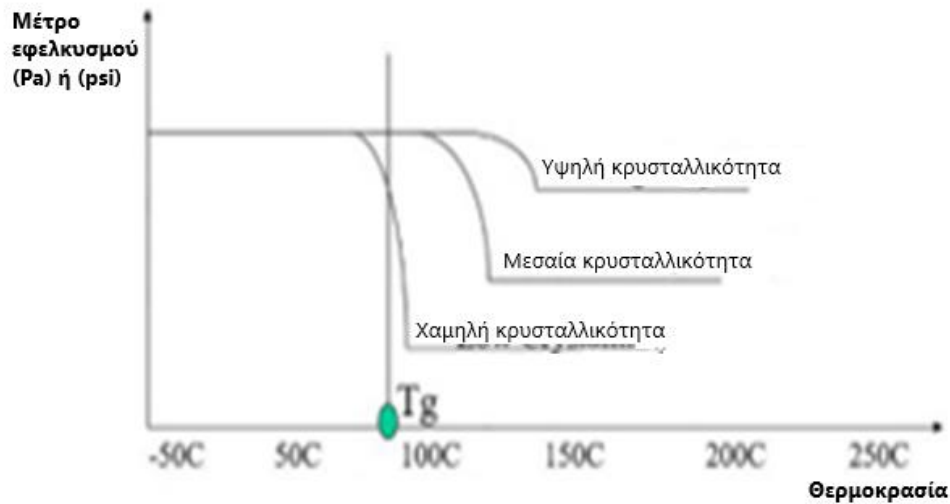
Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g επηρεάζεται από το επίπεδο κρυσταλλικότητας, όπου :

- υψηλό επίπεδο κρυσταλλικότητας συνεπάγεται υψηλό T_g και
- χαμηλό επίπεδο κρυσταλλικότητας συνεπάγεται χαμηλό T_g .

Άλλη μια πιο σημαντική οριακή θερμοκρασία των πολυμερών είναι η *θερμοκρασία τήξης* (T_m). Όταν η θερμοκρασία του άμορφου πολυμερούς υπερβεί τη θερμοκρασία τήξης, ο όγκος του μειώνεται γραμμικά σε σχέση με τη θερμοκρασία (T). Καθώς η θερμοκρασία του πολυμερούς είναι μεγαλύτερη από την T_g αλλά χαμηλότερη από την T_m , σχηματίζονται κρύσταλλοι και ο όγκος του μειώνεται, επειδή οι κρύσταλλοι είναι σημαντικά πιο πυκνοί από το άμορφο υλικό. Καθώς η θερμοκρασία είναι μικρότερη από την T_g , οι άμορφες περιοχές συστέλλονται γραμμικά και προκαλούν αλλαγή στην κλίση. Αυτό αποτυπώνεται καλύτερα στο Σχήμα 3.2, και στο Σχήμα 3.3 που ακολουθούν.



Σχήμα 3.2 : Θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης σε σχέση με το μέτρο εφελκυσμού



Σχήμα 3.3: Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και κρυσταλλικότητα

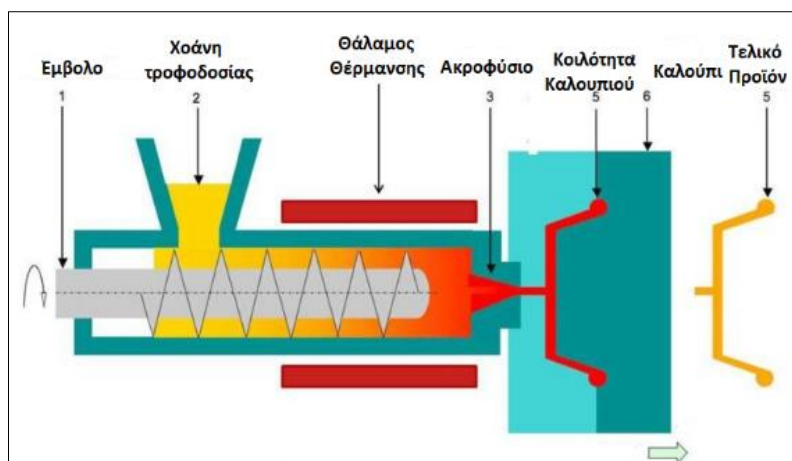
Οι θερμικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης και της θερμοκρασίας τήξης, μετρώνται με ένα θερμιδόμετρο διαφορικής σάρωσης (DSC). Το DSC μετρά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, τη θερμοκρασία τήξης, καθώς και την ποσοστιαία κρυσταλλικότητα του υλικού. Η διαδικασία DSC είναι μια θερμοανλυτική τεχνική στην οποία η διαφορά στην ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός δείγματος και μετράται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [6]. περιλαμβάνει θέρμανση του δείγματος με σταθερό ρυθμό (π.χ. 10°C ανά λεπτό) και μέτρηση της ροής θερμότητας του πλαστικού καθώς μεταβάλλεται από κρυσταλλικό σε άμορφο (T_g) ή από στερεό σε υγρό (T_m) [3].

4. Χύτευση με έγχυση (Injection Molding)

Στο παρόν κεφάλαιο επίκειται η ανάλυση της διαδικασίας χύτευσης με έγχυση, συμπεριλαμβανομένων των κύριων εξαρτημάτων, των λειτουργιών, των απαιτήσεων έγχυσης, του κόστους και του μεγέθους της μονάδας σύσφιξης και των μονάδων έγχυσης.

4.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία της χύτευσης με έγχυση των θερμοπλαστικών χρησιμοποιείται εκτενώς σε πολλές βιομηχανίες, συμβάλλοντας στη δημιουργία προϊόντων υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας εντοπίζεται στη μορφοποίηση οποιουδήποτε αντικειμένου, όσο περίπλοκο κι αν είναι. Ένα άλλο πλεονέκτημα της διεργασίας αυτής, είναι η δυνατότητα επιλογής των φυσικών ιδιοτήτων του αντικειμένου με την αντίστοιχη επιλογή του κατάλληλου πολυμερούς (σκληρότητα, ευκαμψία, αντοχή στη διάβρωση). Σε αυτή τη διαδικασία, χρησιμοποιούνται άμορφα ή κρυσταλλικά πολυμερή, τα οποία θερμαίνονται σε σταθερή θερμοκρασία και στη συνέχεια συμπιέζονται σε καλούπι. Στο Σχήμα 4.1 που ακολουθεί αναπαρίσταται γραφικά η παραπάνω διαδικασία.



Σχήμα 4.1 : Παρουσίαση διαδικασίας χύτευσης με έγχυση.

Σχεδόν όλα τα θερμοπλαστικά και ορισμένα θερμοσκληρυνόμενα υλικά δύνανται να υπόκεινται σε χύτευση με έγχυση όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.

Material	Mold temperature range(°C)	Melt temperature range(°C)	Ejection temperature (°C)	Elastic modulus 1 st principal direction(MPa)	Share modulus (MPa)
HDPE(T50-4400)	20–95	180–280	100	911	319.4
PP A-333)	20–80	200–280	93	1634.35	591.477
ABS (6003)	25–80	200–280	88	2000	694.444
POM (Tenac3010)	40–90	190–210	142	2987.13	1008
PMMA (KT-80)	40–90	220–280	95	2700	980
PC (PC X-1)	70–120	260–293	127	2280	804.5
PVC (HTX6220)	21–37	180–210	70	3280	1155
PVC (FPVCFN01)	20–70	160–220	75	3280	1155

Πίνακας 4.1 : Θερμοπλαστικά και ορισμένα θερμοσκληρυνόμενα υλικά που μπορούν να χυτευθούν με έγχυση. [3]

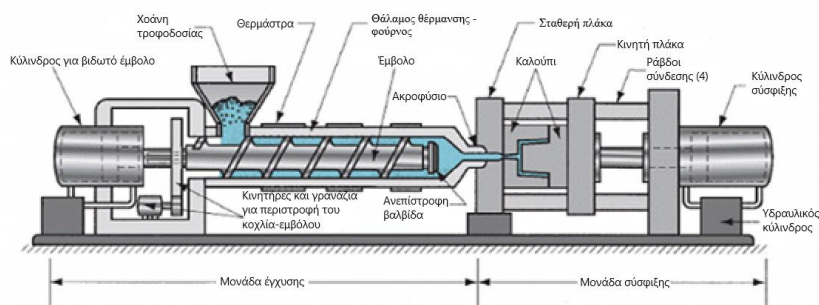
Η διαδικασία της έγχυσης είναι αρκετά απλή, αλλά εμπεριέχει ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να γνωρίζει καλά ο χειριστής της αλλά και ο υπευθύνως για τον σχεδιασμό του καλουπιού. Αρχικά, το πολυμερές υλικό που έχει επιλεγεί, τροφοδοτείται υπό μορφή κόκκων (pellet) από την χοάνη τροφοδοσίας και στη συνέχεια εισαγάζεται, θερμαίνεται και μεταφέρεται μέσα σε έναν ελικοφόρο μηχανισμό, τον κοχλία, ο οποίος λειτουργεί και ως έμβολο. Το πολυμερές που κινείται στα πτερύγια του κοχλία τήκεται υπό την επίδραση σταθερής θερμοκρασίας και γίνεται παχύρρευστο ώστε να πραγματοποιηθεί η έγχυσή του στο καλούπι. Η θέρμανση του υλικού γίνεται από αντιστάσεις οι οποίες περιβάλλουν τον κοχλία. Το σύστημα κοχλίας-θάλαμος θέρμανσης ονομάζεται *φούρνος*. Μετά την έγχυση το αντικείμενο αφήνεται να ψυχθεί για συγκεκριμένο χρόνο πριν ανοίξει το καλούπι μέχρι να δημιουργηθεί το προϊόν και να εξαχθεί.

Μέσω αυτής της διαδικασίας, δημιουργούνται από απλά έως πολύ σύνθετα αντικείμενα σε σύντομο χρονικό διάστημα, όπως κινητά τηλέφωνα, καρέκλες, περιέκτες τροφίμων (δοχεία) και άλλα. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή έχει υψηλό κόστος προετοιμασίας το οποίο περιλαμβάνει το σχέδιο του καλουπιού, τη λειτουργία των εργαλειομηχανών για τη διαμόρφωση του και την αγορά του πολυμερούς υλικού που θα χρησιμοποιηθεί. Οποσδήποτε, το κόστος αυτό θα αποσβεστεί από την υψηλή παραγωγή τεμαχίων που επιτρέπει η εν λόγω διαδικασία.

4.2 Τα μέρη μηχανής χύτευσης με έγχυση

Ένα παράδειγμα ολόκληρης της διάταξης μιας τυπικής μηχανής injection αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.2. Πιο συγκεκριμένα, η μονάδα έγχυσης βρίσκεται στα αριστερά ενώ η μονάδα σύσφιξης (Clamping Unit) βρίσκεται στα δεξιά. Η σύσφιξη των δύο μισών του καλουπιού είναι υδραυλική. Ο κύλινδρος σύσφιξης (Clamping Cylinder) έχει παχιά τοιχώματα για να αντέχει τις υψηλές πιέσεις στις οποίες υπόκειται. Το δε έμβολο που είναι προσαρτημένο στον κύλινδρο φέρει στο αριστερό του άκρο την κινητή πλάκα (movable plate), η οποία είναι επίσης σχεδιασμένη για υψηλή ακαμψία. Το μέρος του καλουπιού που είναι προσαρτημένο σε αυτή την πλάκα ονομάζεται *αρσενικό*. Το άλλο μισό του καλουπιού, είναι προσαρτημένο στη σταθερή πλάκα (stationary plate) και ονομάζεται *θηλυκό*.

Επιστρέφοντας στην αριστερή πλευρά της μηχανής, στο κάτω άκρο της υπάρχει ένας υδραυλικός κινητήρας με ακτινωτό έμβολο (motor for screw rotation) που παρέχει την περιστροφική κίνηση στον κοχλία. Η χοάνη είναι ορατή στο πάνω μέρος της μονάδας έγχυσης και δεξιά της βρίσκεται ο θάλαμος θέρμανσης - φούρνος (barrel). Ολόκληρη η μονάδα έγχυσης είναι τοποθετημένη σε ράγες οδήγησης και μπορεί να μετακινηθεί προς τα πίσω για να αλλάξει ο κοχλίας ή να καθαριστεί το σύστημα.



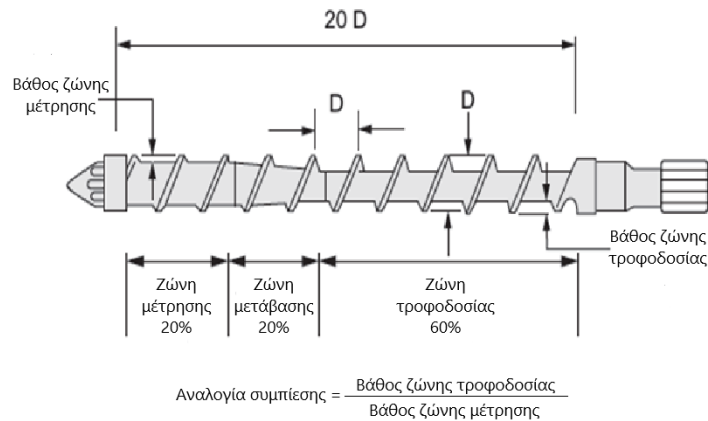
Σχήμα 4.2 : Μηχανή χύτευσης με έγχυση [7]

Αφετέρου, στη μονάδα σύσφιξης η δύναμη σύσφιξης περιορίζεται από ράβδους σύνδεσης (tie rods) που συνδέουν την κινητή με την σταθερή πλάκα. Η ταχεία κίνηση προσέγγισης του καλουπιού, οδηγείται από το λάδι που αντλείται μέσω του υδραυλικού κυλίνδρου προώθησης. Η αντλία αυτή είναι χαμηλού όγκου και χαμηλής πίεσης και οδηγεί το έμβολο μέχρι την επαφή μεταξύ των μισών της μήτρας. Στη συνέχεια ενεργοποιείται μια αντλία υψηλής πίεσης για να αυξηθεί γρήγορα η δύναμη σύσφιξης. Τέλος, ένας μετρητής πίεσης σηματοδοτεί τη εκκίνηση της έγχυσης και στο τέλος του κύκλου οι κινήσεις ενεργούν αντίστροφα.

4.2.1 Μονάδα έγχυσης

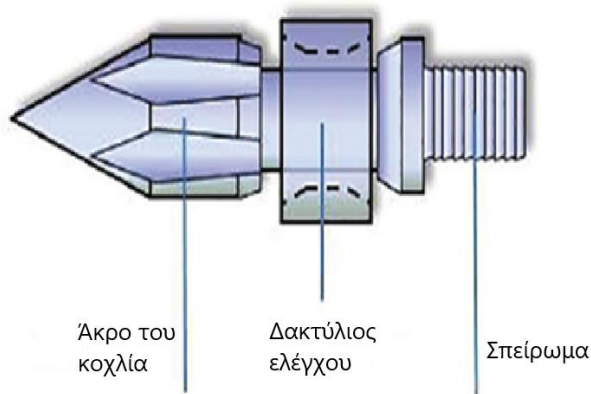
Η κάθε μονάδα έγχυσης που φέρει μια μηχανή injection έχει μέγεθος τέτοιο ώστε να περιέχει υλικό για δύο έως πέντε πλήρεις κύκλους. Τούτο πρακτικά σημαίνει ότι περίπου από το 20 έως το 50% της χωρητικότητας της μηχανής injection θα πρέπει να αδειάζει σε κάθε κύκλο. Η χωρητικότητα μιας μηχανής σε πλαστικό μετράται με βάση το βάρος του πολυστυρενίου που μπορεί να χωρέσει. Η μετατροπή σε πραγματική έγχυση πλαστικού γίνεται πολλαπλασιάζοντας με την πυκνότητα του πολυστυρενίου και διαιρώντας με την πυκνότητα του πλαστικού. [3] Αναμφίβολα, είναι σημαντικό να γίνει αντιληπτό πως η ευαισθησία στη θερμοκρασία του πλαστικού επηρεάζει και το μέγεθος της κάθε βολής. Ορισμένα πολυμερή είναι πολύ ευαίσθητα στη θερμοκρασία, αναφλέγονται εύκολα και δεν πρέπει να βρίσκονται στον φούρνο για πολύ ώρα καθώς μπορεί να υποβαθμιστούν. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να γίνει ενδελεχής μελέτη για την επιλογή μιας μηχανής injection, βάσει της μονάδας έγχυσης και του προϊόντος που είναι επιθυμητό να χυτευτεί.

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, η μονάδα έγχυσης περιέχει έναν κοχλία ο οποίος ωθεί προς τα εμπρός το τηκόμενο υλικό και έπειτα κινείται προς τα πίσω, λειτουργώντας ως έμβολο για την παραλαβή νέου υλικού από τη χοάνη τροφοδοσίας. Ο δε κοχλίας χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές ζώνες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3. Επί της ουσίας, πρόκειται για τη ζώνη *τροφοδοσίας*, τη ζώνη *μετάβασης* ή *συμπίεσης* και τη ζώνη *μέτρησης*. Η ζώνη τροφοδοσίας έχει τη μικρότερη διάμετρο κοχλίας και το μεγαλύτερο διάκενο μεταξύ των εγχύσεων. [3] Η ζώνη μέτρησης εμφανίζει υψηλή διατμητική τάση, ενώ έχει τη μεγαλύτερη διάμετρο κοχλίας και το μικρότερο κενό μεταξύ των εγχύσεων.



Σχήμα 4.3 : Κοχλίας δύο κινήσεων και οι τρεις ζώνες χύτευσης με έγχυσης [8]

Στο άκρο του κοχλία (Σχήμα 4.4), εισάγεται ένας δακτύλιος ελέγχου και μια έδρα που έχουν σχεδιαστεί προκειμένου να εμποδίζουν το λιωμένο πλαστικό να ρέει προς τα πίσω κατά τη διάρκεια της έγχυσης. Η γωνία και το μήκος του άκρου του κοχλία καθορίζονται από το ιξώδες του πλαστικού που διαμορφώνεται.



Σχήμα 4.4 : Το άκρο του κοχλία έγχυσης και ο δακτύλιος ελέγχου [3]

Πιο συγκεκριμένα, η ακολουθία της μη επιστροφής του υλικού περιγράφεται ως εξής :

- Ο κοχλίας κινείται προς τα εμπρός, ωθώντας μια ποσότητα λιωμένου πολυμερούς στο άκρο του καλουπιού.
- Ο δακτύλιος ελέγχου πιέζεται προς την έδρα της μύτης του κοχλία και σφραγίζεται επάνω της, εμποδίζοντας κατά τον τρόπο αυτό το υλικό να περάσει πίσω από τη βίδα. [3]
- Ο κοχλίας παύει να κινείται προς τα εμπρός και ξεκινά να περιστρέφεται φέρνοντας νέο υλικό.
- Ο δακτύλιος ελέγχου ολισθαίνει προς τα εμπρός υπό την επίδραση συσσώρευσης πίεσης.
- Το λιωμένο πλαστικό ρέει στον ανοιχτό χώρο μπροστά από το άκρο του κοχλία (ακροφύσιο) και εγχέεται στο διαιρούμενο καλούπι. [3]

Ένα από τα κύρια προβλήματα της διαδικασίας που κάνει συνήθως την εμφάνισή του είναι ότι το πλαστικό υλικό μπορεί να βρίσκεται στις θήκες του δακτυλίου ελέγχου, ακόμη και όταν η συσκευή αντεπιστροφής βρίσκεται σε θέση ανοικτής ροής. Αυτό μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση σε ορισμένα υλικά. Για το λόγο αυτό, οι μηχανισμοί αντεπιστροφής συνήθως δεν χρησιμοποιούνται κατά τη χύτευση υλικών ευαίσθητων στη διάτμηση ή υλικών υψηλού ιξώδους.

Οι απαιτήσεις της έγχυσης εξαρτώνται α) από τον ρυθμό διάτμησης, β) την ταχύτητα εξόδου του κοχλία, γ) την ταχύτητα στροφών ανά λεπτό και δ) την πίεση της έγχυσης. Σε ό,τι αφορά τον ρυθμό διάτμησης, αυτός ορίζεται ως η επιφανειακή ταχύτητα του πλαστικού στο τοίχωμα της κанныς θέρμανσης διαιρεμένη με το βάθος της πτήσης του κοχλία (Εξίσωση 4.1), ήτοι :

$$V = \frac{D \times N}{h} \text{ m/s, (Εξ. 4.1),}$$

όπου :

- V : η ταχύτητα διάτμησης (m/s),
- D : η διάμετρος του κοχλία (mm),
- N : ο ρυθμός περιστροφής του κοχλία (rpm),
- h = βάθος καναλιού (mm).

Κάθε πλαστικό έχει ρυθμό διάτμησης πέραν του οποίου θα υποβαθμιστεί. Για παράδειγμα, το PVC είναι αρκετά ευαίσθητο και έχει μέγιστη ταχύτητα 0.5 m/s, ενώ άλλα μη ευαίσθητα υλικά έχουν μέγιστη ταχύτητα 0.9 m/s και πάνω. Για παράδειγμα, για έναν τυπικό κοχλία διαμέτρου 51 mm, η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής είναι 230 rpm για την επίτευξη μέσης ταχύτητας διάτμησης 0.8 m/s [3]. Ασφαλώς, οποιεσδήποτε μεγαλύτερες ταχύτητες θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν το υλικό.

Η έξοδος του υλικού από τον κοχλία, ορίζεται ως η ποσότητα υλικού που μπορεί να εγχύσει μια μηχανή έγχυσης σε κιλά ανά ώρα (kg/h) και είναι συνάρτηση της ιπποδύναμης του κοχλία. Η ιπποδύναμη για ένα κοχλία διαμέτρου 51 mm είναι 15 HP, ενώ ένας κοχλίας διαμέτρου 114.3 mm θα έχει 150 HP. Ένα σύστημα με 15 HP και διάμετρο κοχλία 50.8 mm παράγει 34–102 kg/h πλαστικό.

Στη μονάδα έγχυσης, μία σημαντική τιμή που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι η πίεση έγχυσης, η τιμή της οποίας κυμαίνονται μεταξύ 103 και 138 MPa. Όσο πιο υψηλή είναι η τιμή της πίεσης, τηρουμένων των προδιαγραφών, τόσο καλύτερη θα είναι η ποιότητα του τελικού προϊόντος.

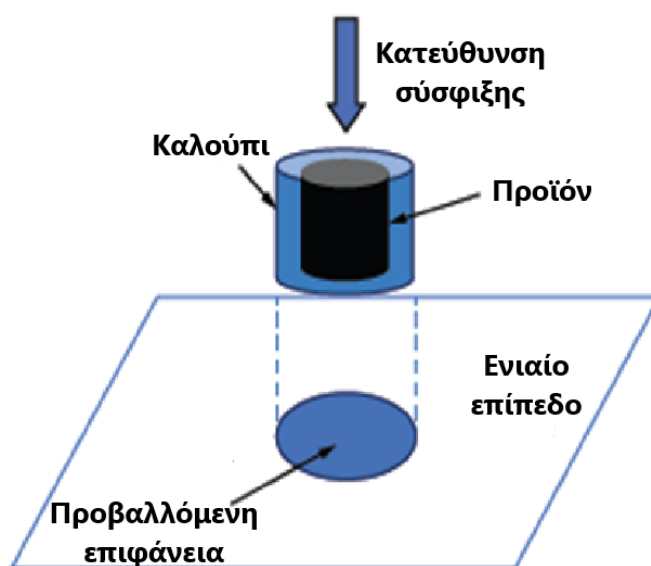
Τέλος, ο λόγος L/D του κοχλία συνιστά έναν κρίσιμο παράγοντα για τη δημιουργία πίεσης έγχυσης, όπου L είναι το μήκος όλου του κοχλία και D είναι η μεγαλύτερη διακριτή διάμετρος αυτού. Σήμερα, οι περισσότεροι κατασκευαστές μηχανών χύτευσης με έγχυση προσφέρουν μηχανές χύτευσης με αναλογία L/D = 20:1 ή γύρω από αυτήν την αναλογία, όπως σε 19:1 ή 21:1. Για ορισμένες βελτιστοποιημένες μηχανές έγχυσης παρατηρείται μεγαλύτερη αναλογία όπως 24:1 έως 26:1. Οι μεγαλύτερες αναλογίες L/D, χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή προϊόντων με πολύ υψηλή ποιότητα εμφάνισης, όπως καλλυντικά, μπουκάλια και τα δοχεία συσκευασίας τα οποία είναι λεία και διαυγή ώστε να καθίσταται ευδιάκριτο το συσκευασμένο προϊόν.

4.2.2 Μονάδα σύσφιξης

Η λειτουργία της μονάδας σύσφιξης, είναι να συγκρατεί το διαιρούμενο καλούπι ενωμένο ενόσω η ρητίνη εγχέεται, διαμορφώνεται, ψύχεται και αφαιρείται. Η δύναμη σύσφιξης ορίζεται ως η δύναμη που απαιτείται για τη συγκράτηση του καλουπιού κατά τη διάρκεια της έγχυσης και εφαρμόζεται από τη μονάδα σύσφιξης (tons) [3]. Η δύναμη σύσφιξης είναι η «βαθμολογία» της μηχανής έγχυσης. Μεγάλη μηχανή έγχυσης είναι αυτή που παράγει υψηλή δύναμη σύσφιξης, π.χ., δύναμη σύσφιξης 150 τόνων (tons). Η δύναμη σύσφιξης υπολογίζεται με την πίεση έγχυσης επί τη συνολική προβαλλόμενη επιφάνεια της κοιλότητας, (Εξίσωση 4.2) [3].

$$F = P \times A (N) \text{ (Εξ. 4.2)}$$

Η προβαλλόμενη επιφάνεια είναι η περιοχή που προβάλλεται σε ένα ενιαίο επίπεδο. Μια υψηλότερη προβαλλόμενη περιοχή, απαιτεί μεγαλύτερη δύναμη σύσφιξης, όπως επίσης και το υψηλότερο ιξώδες της ρητίνης. Πιο συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά της προβαλλόμενης περιοχής απεικονίζονται στο Σχήμα 4.5 [3] :

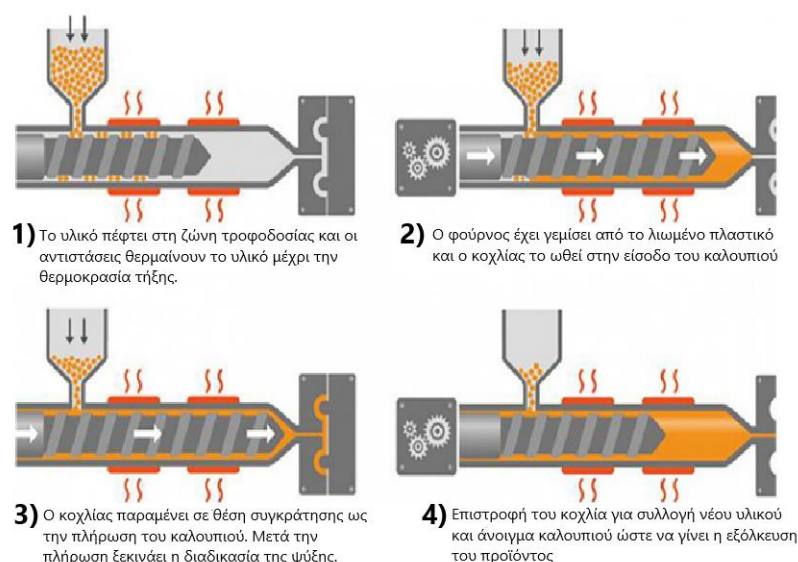


Σχήμα 4.5 : Παράδειγμα προβαλλόμενης περιοχής

4.3 Φάσεις πλήρωσης καλουπιού

Για τη δημιουργία ενός προϊόντος μέσω της τεχνολογίας παραγωγής χύτευσης με έγχυση κρίνεται απαραίτητο να προσδιοριστούν συγκεκριμένες τιμές στις ταχύτητες που θα ρέει το υλικό. Ο προσδιορισμός αυτός ονομάζεται *βαθμός πλήρωσης καλουπιού* και απαιτούνται επαναληπτικές δοκιμές (μελέτες πληρώσεως τύπου), όπου σε κάθε κίνηση του κοχλίας της μηχανής, αυξάνεται η ποσότητα της έγχυσης μέχρι να σχηματιστεί το προϊόν που ικανοποιεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Η διαδικασία χύτευσης με έγχυση περιλαμβάνει τέσσερις συγκεκριμένες φάσεις προκειμένου να διαμορφωθεί το τελικό προϊόν οι οποίες αποτυπώνονται στο Σχήμα 4.6 [3], ήτοι :

1. τη μεταφορά στη ζώνη τροφοδοσίας,
2. την τήξη στη ζώνη συμπίεσης,
3. την έγχυση στη ζώνη μέτρησης και
4. την επιστροφή του κοχλίας για την επόμενη βολή και αφαίρεση υλικού μετά την ψύξη.



Σχήμα 4.6 : Οι τέσσερις φάσεις πλήρωσης καλουπιού

Πιο συγκεκριμένα, η φάση 1 (μεταφορά στη ζώνη τροφοδοσίας) ξεκινάει μόλις το καλούπι κλείσει με το πέρας του προηγούμενου κύκλου έγχυσης. Ο κοχλίας βρίσκεται στο πίσω μέρος της μηχανής, το υλικό πέφτει στη ζώνη τροφοδοσίας και οι αντιστάσεις ξεκινούν να θερμαίνουν το υλικό μέχρι το σημείο τήξης. Έπειτα, ο κοχλίας εκτελεί σύνθετη κίνηση (μεταφορική και περιστροφική), ωθώντας το λιωμένο πλαστικό προς την πύλη του καλουπιού (φάση 2). Ο κοχλίας παραμένει σε λειτουργία συγκράτησης και αφού γίνει η πλήρωση του καλουπιού, η μήτρα ψύχεται μέσω του συστήματος ψύξης, συνήθως με κρύο νερό, το οποίο ρέει στο εσωτερικό του καλουπιού, μέχρι το πλαστικό να αποκτήσει στερεά μορφή (φάση 3). Η ανεπίστροφος βαλβίδα αποτρέπει την ροή του υλικού προς τα πίσω. Ο δε κοχλίας κινείται εκ νέου προς τα πίσω για να συλλέξει νέο υλικό ενώ το διαρρέον καλούπι ανοίγει για να απομακρυνθεί το προϊόν (φάση 4) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου συμπληρωθεί ο όγκος των προϊόντων που πρέπει να παραχθούν.

4.4 Οι τρόποι έγχυσης

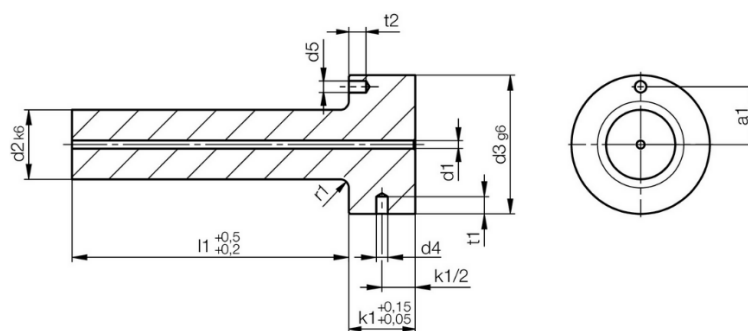
Για την έγχυση του λιωμένου πλαστικού στο διαιρούμενο καλούπι, υπάρχουν δύο διαφορετικά συστήματα καλουπιών που αναλύονται εκτενώς παρακάτω : τα καλούπια ψυχρού δρομέα και τα καλούπια θερμού δρομέα.

4.4.1 Καλούπια ψυχρού δρομέα

Ένα σύστημα καλουπιών χύτευσης με έγχυση ψυχρού δρομέα ή αλλιώς χύτευση με μπουκαδούρα αποτελείται από δύο πλάκες και τα δύο διαιρούμενες μήτρες. Ο ψυχρός δρομέας είναι ένα ψυχρό κανάλι που χρησιμοποιείται για την έγχυση λιωμένου πλαστικού σε μια κοιλότητα. Το υλικό εισέρχεται από το σημείο έγχυσης που ακουμπάει στην πίσω πλάκα και μέσω του δακτυλίου και της τροφοδοσίας των δρομέων, το υλικό οδηγείται στην κοιλότητα του καλουπιού όπου γίνεται η έγχυση. Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται μία μπουκαδούρα ψυχρού δρομέα. Οι διαστάσεις του ψυχρού δρομέα ποικίλουν ανάλογα με το προϊόν που θέλουμε να δημιουργήσουμε όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Η εσωτερική γεωμετρία του, παρουσιάζεται κωνική, συνήθως 1.5 - 2° κλίση ώστε όταν το υλικό ψυχθεί, η αφαίρεση του από το καλούπι να είναι εύκολη. [9]



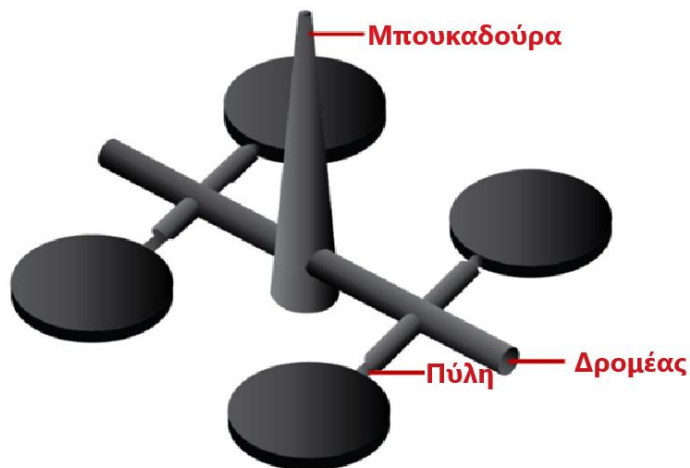
Σχήμα. 4.7: Ψυχρός δρομέας – Μπουκαδούρα [9]



Σχήμα. 4.8: Πλάγια όψη ψυχρού δρομέα - μπουκαδούρα και οι διαστάσεις του [9]

Ένα ουσιαστικό μέρος της χύτευσης με έγχυση, ειδικά στα συστήματα ψυχρού δρομέα, είναι η διαδρομή ροής της κοιλότητας του καλουπιού που αποτελείται από τον δακτύλιο της μπουκαδούρας, έναν δρομέα και τις πύλες. Στο Σχήμα 4.9 [10] φαίνεται ένα προϊόν το οποίο έχει εγχυθεί σε καλούπι ψυχρού δρομέα. Μόλις το εξάρτημα εξολκευτεί από το καλούπι, η μπουκαδούρα κόβεται και αφαιρείται με το χέρι από το τεμάχιο ή αποκόπτεται σε δεύτερο χρόνο με κάποιο πρόσθετο εξοπλισμό (π.χ. ειδικό μαχαίρι) εφόσον η διά χειρός απομάκρυνση δεν είναι εφικτή. Για να ελαχιστοποιήσουν τα απόβλητα όσο το δυνατόν περισσότερο, οι δακτύλιοι πρέπει να διατηρούν τη διάμετρο τους όσο το δυνατόν μικρότερη και κοντή, αλλά αρκετά επαρκής ώστε να γεμίσει την κοιλότητα και να

αποφευχθούν ενδεχόμενα προβλήματα ποιότητας. Ο δρομέας είναι ένα κανάλι που κατευθύνει το λιωμένο πλαστικό από τον δακτύλιο στην πύλη της κοιλότητας [3]. Ακριβώς όπως στον δακτύλιο, η διάμετρος του δρομέα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, αλλά επαρκής για να γεμίσει πλήρως η κοιλότητα. Τέλος οι πύλες είναι στενές τομές μεταξύ του κύριου δρομέα και της κοιλότητας του καλουπιού [3]. Σε αυτό το σημείο το λιωμένο πλαστικό θα εισέλθει στην κοιλότητα. Σε κάθε περίπτωση, η θέση της πύλης είναι εξαιρετικά κρίσιμη για την απόδοση και την ποιότητα του τελικού χυτευόμενου εξαρτήματος.



Σχήμα 4.9: Προϊόν το οποίο έχει προκύψει από καλούπι έγχυσης ψυχρού δρομέα και τα μέρη του

4.4.2 Καλούπια θερμού δρομέα

Η τεχνολογία καλουπιών με θερμό δρομέα, που εισήχθη στη βιομηχανία πλαστικών πριν από περισσότερα από 50 χρόνια και αντικατέστησε την έγχυση με τη χρήση καναλιών ψυχρού δρομέα στις περισσότερες εφαρμογές, έφερε την επανάσταση στις δυνατότητες επεξεργασίας χύτευσης με έγχυση. Και αυτό γιατί αφενός μεν επήλθε μεγάλη βελτίωση στην ποιότητα και τη λειτουργικότητα των χυτευμένων εξαρτημάτων, αφετέρου δε μειώθηκε η ποσότητα του scrap με αποτέλεσμα τον αισθητό περιορισμό του κόστους κατασκευής.

Ένα σύστημα θερμού δρομέα είναι μια μονάδα μεταφοράς λιωμένου πλαστικού που χρησιμοποιείται σε ένα καλούπι έγχυσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 [11]. Αποτελείται από θερμαινόμενα εξαρτήματα (μέσω ηλεκτρισμού) που χρησιμοποιούνται μέσα στα καλούπια έγχυσης πλαστικού, τα οποία φέρνουν το λιωμένο πλαστικό από το φούρνο μιας μηχανής χύτευσης με έγχυση στις κοιλότητες του καλουπιού [11].

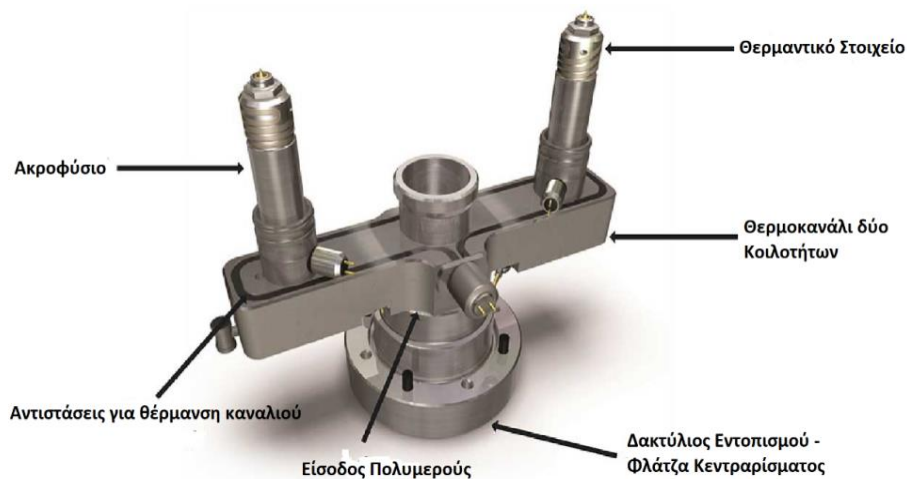
Το μέγεθος των καναλιών τήξης θερμού δρομέα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως α) ο τύπος ρητίνης, β) η ταχύτητα έγχυσης, γ) ο ρυθμός πλήρωσης και δ) το ίδιο το προς χύτευση εξάρτημα [11]. Ένας ελεγκτής θερμοκρασίας, θερμαίνει το σύστημα θερμού δρομέα μέσα στο καλούπι έγχυσης και τη ρητίνη μέσα στο φούρνο της μηχανής στη θερμοκρασία επεξεργασίας και εγχέει τη ρητίνη στο καλούπι. Η ρητίνη ταξιδεύει μέσω του ακροφυσίου, εφόσον το καλούπι είναι μονής κοιλότητας, ή προς το θερμοκανάλι πολλών κοιλοτήτων (manifold), εφόσον πρόκειται για ζυγό αριθμό κοιλοτήτων, η οποία στη συνέχεια διασπάται στα διάφορα ακροφύσια. Εν συνεχεία, μέσω των σημείων έγχυσης καταλήγει στην τελική κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού όπου και σχηματίζεται το τελικό προϊόν.

Πριν από την τεχνολογία θερμών δρομέων, χρησιμοποιούνταν μπουκαδούρες (κρύοι δρομείς) σε καλούπια έγχυσης [11]. Τα καλούπια κρύου δρομέα αντιμετώπισαν πολλές προκλήσεις στη μεταφορά της ρητίνης από το φούρνο της μηχανής στις κοιλότητες μορφοποίησης [11]. Με την πρόοδο των τύπων ρητίνης και την πολυπλοκότητα στα σχέδια καλουπιών και εξαρτημάτων, γινόταν όλο και πιο δύσκολος ο έλεγχος της διαδικασίας χύτευσης μέσω καλουπιών ψυχρού δρομέα για την παραγωγή χυτευμένων εξαρτημάτων αποδεκτής ποιότητας [11].

Ωστόσο, με την εισαγωγή της τεχνολογίας του θερμού δρομέα, η επεξεργασία ευρύτερων τύπων ρητίνης έγινε πιο πρακτική και βολική στα καλούπια έγχυσης. Σε αντίθεση με ένα καλούπι κρύου δρομέα, τα εξαρτήματα του θερμού δρομέα θερμαίνονται ξεχωριστά για να διασφαλιστεί ότι η ρητίνη διατηρεί τη θερμοκρασία συνεχώς μέσω του καλουπιού [11]. Η θερμοκρασία κάθε θερμαινόμενου εξαρτήματος με θερμό δρομέα μπορεί επίσης να ελεγχθεί με ακρίβεια για να διασφαλιστεί η βελτιστοποίηση της διαδικασίας σύμφωνα με τις απαιτήσεις κάθε τύπου ρητίνης που οδηγεί στην υψηλότερη δυνατή ποιότητα του παραγόμενου εξαρτήματος [11].

Σήμερα, οι θερμοί δρομείς είναι σε θέση να παράγουν εξαιρετικά πολύπλοκα εξαρτήματα σε ένα ευρύ φάσμα μεγεθών που χρησιμοποιούνται σε κάθε κλάδο της βιομηχανίας, από τη βιομηχανία των καθημερινών καταναλωτικών αγαθών μέχρι την αυτοκινητοβιομηχανία και τις βιομηχανίες της αεροναυπηγικής και της αεροδιαστημικής. Τα στοιχεία ενός θερμού δρομέα είναι τα ακόλουθα :

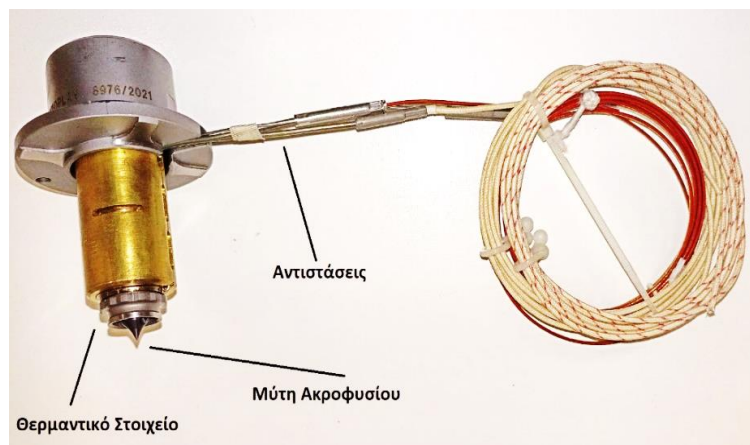
1. Δακτύλιος εντοπισμού – Φλάντζα κεντραρίσματος: Ο δακτύλιος εντοπισμού ευθυγραμμίζει το καλούπι έγχυσης με την πίσω πλάκα της μηχανής χύτευσης. Εξασφαλίζει δε ότι υπάρχει σωστή ευθυγράμμιση του καλουπιού με το μηχανήμα [11].
2. Είσοδος Πολυμερούς: Καθώς η ρητίνη εγχέεται εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, αυτή είναι η θύρα εισόδου όπου η ρητίνη εισέρχεται από το ακροφύσιο της μηχανής έγχυσης. Ανάλογα με τον τύπο της ρητίνης και τον σχεδιασμό του θερμού δρομέα, το εξάρτημα εισόδου μπορεί να θερμανθεί προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία της χύτευσης [11].
3. Θερμοκανάλι: Το θερμοκανάλι επιτρέπει τη ροή της ρητίνης σε διαφορετικά ακροφύσια και σημεία έγχυσης (πύλες εισόδου). Τα θερμοκανάλια χρησιμοποιούνται συνήθως όπου εντοπίζονται πολλαπλές κοιλότητες ή όπου χρειάζονται περισσότερα από ένα ακροφύσια / πύλες εισόδου ανά εξάρτημα. Τα θερμοκανάλια είναι διαθέσιμα σε ένα ευρύ φάσμα υλικών, σχεδίων και σχημάτων και συχνά βελτιστοποιούνται για τη βελτίωση της διαδικασίας χύτευσης χρησιμοποιώντας ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων [11].
4. Ακροφύσια – Beck: Τα ακροφύσια είναι εξαρτήματα όπου η ρητίνη εγχέεται στην κοιλότητα μέσω μιας πύλης. Ανάλογα με το σχέδιο, τα ακροφύσια συνήθως εγκαθίστανται στην πλάκα του καλουπιού με ή χωρίς θερμοκανάλια. Διατίθεται ένα ευρύ φάσμα σχεδίων ακροφυσίων, με χρήση διαφορετικών υλικών, προκειμένου να επιτευχθούν τα χαρακτηριστικά επεξεργασίας διαφόρων ρητινών που ταιριάζουν καλύτερα στην εφαρμογή [11].
5. Αντιστάσεις για θέρμανση καναλιού & θερμαντικό στοιχείο: Είναι η βάση όλων των συστημάτων θερμού δρομέα και επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία χύτευσης και την ποιότητα των εξαρτημάτων. Υπάρχουν πλήθος επιλογών θέρμανσης η καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή του σωστού θερμού δρομέα εξαρτάται από τις απαιτήσεις όπως η διαδικασία χύτευσης, η απόδοση του εξαρτήματος, η αξιοπιστία και το κόστος. Οι περισσότερες κοινές τεχνολογίες θερμού δρομέα έχουν θερμαντήρες με ταινίες/πλάκες θέρμανσης, ή θερμαντήρες επικόλλησης / ευκαμνίας [11].



Σχήμα 4.10 : Σύστημα θερμού δρομέα δύο κοιλοτήτων (θερμαινόμενο κανάλι)

Παρακάτω απεικονίζονται μεμονωμένα τα εξαρτήματα ενός συστήματος hot runner. Το ακροφύσιο (Σχήμα 4.11 & Σχήμα 4.12) εισέρχεται σε δακτύλιο (Σχήμα 4.13) που βρίσκεται πίσω από την κοιλότητα της σταθερής πλάκας του καλουπιού. Η μύτη του ακροφυσίου είναι διασπώμενη και φέρει στα πλάγια δύο οπές από 3 – 5 mm όπου βγαίνει το λιωμένο υλικό για να οδηγηθεί στον δακτύλιο. Στην πάνω όψη του, υπάρχει επίσης μία οπή διαμέτρου από 6 - 10 mm.

Τέλος, η συναρμολόγηση του ακροφυσίου με τον δακτύλιο αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.14. Ο δακτύλιος αυτός έχει μία οπή με διάμετρο από 0.6 mm έως 3 mm, ανάλογα με το προϊόν που είναι επιθυμητό να παραχθεί και η λειτουργία του είναι να εξάγει την τηγμένη ρητίνη στην κοιλότητα της σταθερής πλάκας του καλουπιού ώστε να γίνει η έγχυση.



Σχήμα 4.11 : Επιμέρους εξαρτήματα ενός ακροφυσίου



Σχήμα 4.12: Κάτω και πάνω όψη ενός ακροφυσίου



Σχήμα 4.13: Πάνω, πλάγια και κάτω όψη ενός δακτυλίου



Σχήμα 4.14: Συνδεσμολογία ακροφυσίου και δακτυλίου

4.4.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα συστημάτων δρομέων

Τα συστήματα ψυχρού δρομέα, είναι συνήθως πιο οικονομικά από τα αντίστοιχα του θερμού δρομέα. Το συνολικό κόστος για την παραγωγή ενός προϊόντος έγχυσης και οι χαμηλότερες γενικές δαπάνες συντήρησης συμβάλλουν στη συνολική μείωση του κόστους. Επιπλέον, οι ψυχροί δρομείς

είναι πιο ευέλικτοι από τους θερμούς δρομείς, καθώς οι θέσεις δρομέων και πυλών μπορούν εύκολα να αλλάξουν ή να αναβαθμιστούν, επιτρέποντας ταχύτερες αλλαγές σχεδιασμού.

Ωστόσο, ένα από τα σημαντικά μειονεκτήματα των συστημάτων ψυχρού δρομέα είναι η πραγματική παραγωγή του ίδιου του δρομέα. Σε συστήματα ψυχρού δρομέα δύο πλακών, ο πλαστικός δρομέας που εμφανίζεται στο τελικό προϊόν (Σχήμα 4.16) πρέπει να διαχωρίζεται χειροκίνητα από το ολοκληρωμένο τμήμα μετά από κάθε διαδρομή. Εάν αυτοί οι δρομείς δεν εξαλειφθούν και δεν ανακυκλωθούν, σημειώνεται περιττή σπατάλη του πλαστικού υλικού μετά από κάθε κύκλο έγχυσης. Επιπλέον, η αφαίρεση των δρομέων και ο συνακόλουθος χρόνος που χρειάζεται για την ανακύκλωση κάθε δρομέα αυξάνει τον χρόνο του κύκλου, με αποτέλεσμα πιο αργό χρόνο παραγωγής από τα συστήματα θερμού δρομέα.

Από την άλλη, τα συστήματα θερμού δρομέα γενικά διαθέτουν σημαντικά ταχύτερους χρόνους κύκλου από τα συστήματα ψυχρού δρομέα. Η εξάλειψη των πλαστικών δρομέων μειώνει σημαντικά τον αριθμό των δραστηριοτήτων μετά την παραγωγή, όπως την αφαίρεση δρομέα και δαχτυλιδιού, η την εκ νέου λείανση και την ανακύκλωση του περισσευούμενου πλαστικού. Όλα αυτά συμβάλλουν στη συνολική μείωση του κόστους και αυξάνουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αυτοματισμού των καλουπιών.

Επίσης, επειδή κάθε δρομέας τροφοδοτεί ένα ειδικό καλούπι, τα συστήματα θερμού δρομέα είναι ικανά να κατασκευάζουν μεγαλύτερα εξαρτήματα. Οι θερμοί δρομείς, ωστόσο, τείνουν να είναι πιο ακριβοί από τα συστήματα καλουπιών έγχυσης ψυχρού δρομέα. Επειδή κάθε θερμός δρομέας τροφοδοτείται σε ένα ειδικό καλούπι, απαιτούνται πρόσθετες εσωτερικές ή εξωτερικές πηγές θέρμανσης για να διατηρούνται οι δρομείς σε σταθερή θερμοκρασία.

Επιπλέον, το κόστος των συστημάτων θερμού δρομέα είναι συνήθως υψηλότερο από αυτό των συστημάτων ψυχρού δρομέα. Κατά συνέπεια, εξαρτήματα της έγχυσης μπορεί να είναι πιο ακριβά στην παραγωγή, αυξάνοντας έτσι το κόστος του συνολικού όγκου παραγωγής. Η περίπλοκη φύση του εξοπλισμού θερμού δρομέα σημαίνει επίσης ότι απαιτεί πιο προσεκτική επιθεώρηση και συντήρηση, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους συντήρησης και του πιθανού χρόνου διακοπής λειτουργίας. Τέλος, τα εσωτερικά θερμαινόμενα συστήματα θερμού δρομέα μπορεί να μην είναι κατάλληλα για θερμικά ευαίσθητα πολυμερή, καθώς υπάρχουν περιοχές όπου το υλικό θα μπορούσε να κολλήσει στην επιφάνεια και να υπερθερμανθεί [9].

4.5 Έλεγχος διαδικασιών χύτευσης με έγχυση

Ο έλεγχος της διαδικασίας κατά τη χύτευση με έγχυση είναι απαραίτητος, ώστε να επιτευχθεί υψηλή ποιότητα εξαρτημάτων με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος. Οι παράμετροι της έγχυσης πρέπει να είναι συνεπείς και οι βέλτιστοι για κάθε προϊόν, ώστε η παραγωγή να είναι εύκολη και το κόστος να παραμένει χαμηλό. Η συνέπεια επιτυγχάνεται μέσω αυστηρού ελέγχου των παραμέτρων της διαδικασίας, που επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο το πλαστικό γεμίζει το καλούπι. Για παράδειγμα, μια πλαστική οδοντόβουρτσα απαιτεί συγκεκριμένο σχήμα και διαφανές πλαστικό με λειτουργικότητα [3]. Ένα πλαστικό πάνελ πόρτας, κατασκευασμένο από συνδυασμό PC και ABS

απαιτεί συγκεκριμένο σχήμα, λίγα έως καθόλου σημάδια / γραμμές ροής (flow lines), σωστές διαστάσεις και καθορισμένη μάζα.

Οι πιο σημαντικές παράμετροι για έλεγχο της διαδικασίας είναι οι εξής:

- α) Η θερμοκρασίες πλαστικού (τήγματος)
- β) Η θερμοκρασία καλουπιού,
- β) Η πίεση έγχυσης,
- γ) Οι χρόνοι πίεσης και ψύξης
- δ) Η απόσταση μεταξύ των τμημάτων του καλουπιού.

4.5.1 Έλεγχος θερμοκρασίας πλαστικού

Οι θερμοκρασίες τόσο του πλαστικού όσο και του καλουπιού ελέγχονται πάντα κατά τη χύτευση με έγχυση. Η θέρμανση του πλαστικού λαμβάνει χώρα στον φούρνο, όπου οι αντιστάσεις θερμαίνουν το πλαστικό στις τρεις περιοχές του κοχλία (περιοχές τροφοδοσίας, μετάβασης και μέτρησης).

Η θέρμανση της ζώνης τροφοδοσίας βρίσκεται ακριβώς πίσω από το ακροφύσιο και αποτελείται από το πρώτο τρίτο του συνολικού μήκους του κυλίνδρου θέρμανσης [3]. Στη ζώνη μετάβασης ή συμπίεσης, η θέρμανση πραγματοποιείται μέσα από μια σειρά από θερμαντικές ταινίες [3]. Βρίσκεται ακριβώς πίσω από το μπροστινό μέρος και αποτελεί τα δύο τρίτα του συνολικού μήκους του κυλίνδρου θέρμανσης. Η πραγματική θερμοκρασία είναι ο μέσος όρος της μπροστινής και της πίσω ζώνης [3].

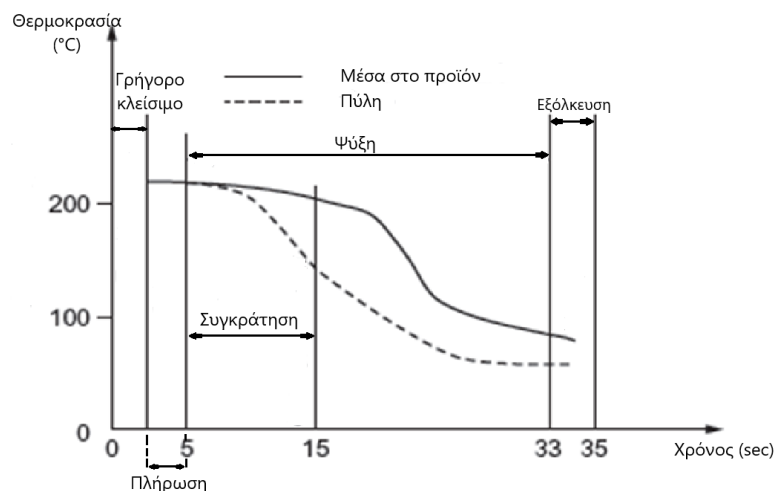
Ένα μεγάλο πρόβλημα στη χύτευση με έγχυση είναι η σύνδεση στη ζώνη τροφοδοσίας στην αρχή του κοχλία, εκεί όπου το πολυμερές υλικό μπορεί να θερμανθεί, να λιώσει και στη συνέχεια να στερεοποιηθεί σε όλη τη ζώνη. Η στερεοποίηση αυτή εμποδίζει τα νέα πλαστικά σφαιρίδια (pellets) να κινηθούν προς τα κάτω στο κανάλι του κοχλία [3]. Συνήθως, το ακροφύσιο τροφοδοσίας ψύχεται με νερό για να μην θερμανθεί υπερβολικά. Μπορεί να καθαριστεί ψύχοντας το πλαστικό και στη συνέχεια αφαιρώντας το συμπαγές πλαστικό γύρω από αυτό [3].

Το καλούπι έγχυσης πρέπει να έχει επαρκή ψύξη στην περιοχή του λαιμού με θερμοκρασίες μεταξύ 25 °C και 50 °C. Κοντά στη ζώνη του ακροφυσίου του κυλίνδρου έγχυσης, η θερμοκρασία πρέπει να είναι ίδια (ή 5°C υψηλότερη) με τη θερμοκρασία τήξης του πλαστικού [3]. Οι θερμοκρασίες τήξης των κοινών πλαστικών βιομηχανικού τύπου βρίσκονται συγκεντρωμένες στον Πίνακα 4.2 [3].

Material	Mold temperature range(°C)	Melt temperature range(°C)	Ejection temperature (°C)	Elastic modulus 1 st principal direction(MPa)	Share modulus (MPa)
HDPE(T50-4400)	20-95	180-280	100	911	319.4
PP A-333)	20-80	200-280	93	1634.35	591.477
ABS (6003)	25-80	200-280	88	2000	694.444
POM (Tenac3010)	40-90	190-210	142	2987.13	1008
PMMA (KT-80)	40-90	220-280	95	2700	980
PC (PC X-1)	70-120	260-293	127	2280	804.5
PVC (HTX6220)	21-37	180-210	70	3280	1155
PVC (FPVCFN01)	20-70	160-220	75	3280	1155

Πίνακας 4.2 : Θερμοκρασίες τήξης των κοινών πλαστικών βιομηχανικού τύπου [3]

Καθώς το ζεστό πλαστικό εγχέεται στο καλούπι, χτυπά το κρύο τοίχωμα του καλουπιού και αρχίζει να ψύχεται [3]. Η συνάρτηση θερμοκρασίας του πλαστικού σε συνάρτηση με τον χρόνο ενόσω διαρκεί η χύτευση με έγχυση αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.15:



Σχήμα 4.15: Το προφίλ θέρμανσης του πλαστικού καθώς πραγματοποιείται η χύτευση με έγχυση

Η θερμοκρασία του προϊόντος ποικίλει ανάλογα με την περιοχή που μελετάται. Παρατηρώντας πιο προσεκτικά το Σχήμα 4.17 γίνεται αντιληπτό ότι η θερμοκρασία μειώνεται απότομα μόλις ολοκληρωθεί η χύτευση με έγχυση. Επιπλέον, όπως είναι αναμενόμενο, το κέντρο του παραγόμενου εξαρτήματος είναι πιο θερμό από το σημείο που τοποθετείται η μπουκαδούρα, η οποία ψύχεται πρώτη. Οποσδήποτε, υπάρχει το ενδεχόμενο να σημειωθούν τόσο θερμά όσο και ψυχρά σημεία (στο εξάρτημα καθώς η κοιλότητα μορφοποιήσης πληρώνεται με πολυμερές τήγμα. Για την ταυτοποίηση όλων αυτών των σημείων και την εξακρίβωση της θέσης στην οποία βρίσκονται εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, ενδείκνυται η προκαταρκτική μελέτη και προσομοίωση της ροής του πολυμερούς, με τη χρήση λογισμικών ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, π.χ. Moldex3D, πριν εκκινήσει η διαδικασία κατασκευής του καλουπιού.

4.6 Έλεγχος θερμοκρασίας καλουπιού

Με τη ροή του πλαστικού υλικού στο καλούπι, επέρχεται η ψύξη του προϊόντος που είναι επιθυμητό να παραχθεί. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μια κρίσιμη παράμετρος του υλικού, είναι ο ρυθμός με τον οποίο ψύχεται, ο οποίος που μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του τελικού προϊόντος ανάλογα με τις τιμές που καταχωρούνται. Η προσομοίωση της ροής του πολυμερούς μπορεί να βοηθήσει στον σχεδιασμό του αριθμού και της θέσης των καναλιών ψύξης στο καλούπι έγχυσης [3]. Η δε θερμοκρασία καλουπιού μπορεί να μετρηθεί απευθείας από την επιφάνεια καλουπώματος με ένα πυρόμετρο λήψης δεδομένων [3].

Ασφαλώς, σκοπός της ψύξης δεν είναι άλλος από τη μείωση της θερμοκρασίας του χυτευμένου πλαστικού στο σημείο στο οποίο αυτό στερεοποιείται [3]. Η απομάκρυνση του τελικού προϊόντος από το καλούπι συμβαίνει μετά από στερεοποιήσεις που ελαχιστοποιούν την στρέβλωση, τη συστροφή ή

άλλα προβλήματα που σχετίζονται με τη συρρίκνωση. Συνήθως, το πλαστικό ψύχεται κάτω από τη θερμοκρασία της υαλώδους μετάπτωσης προτού λάβει χώρα η εξόλκευση του παραχθέντος προϊόντος προκειμένου να μειωθεί η παραμόρφωση. Η συρρίκνωση συμβαίνει συνήθως εντός πέντε λεπτών από τη χύτευση. Στα περισσότερα πλαστικά, το 95% της συνολικής συρρίκνωσης συμβαίνει όταν βρίσκονται στο καλούπι και το 99% εντός 3 ωρών από τη χύτευση [3].

Ο έλεγχος της θερμοκρασίας του καλουπιού παρέχεται μέσω των καναλιών ψύξης ή της θέρμανσης του καλουπιού. Η διαδικασία ψύξης χρησιμοποιεί ένα ψυκτικό, συνήθως νερό, που περνά μέσα από σωλήνες στο καλούπι που απομακρύνουν τη θερμότητα από το θερμό πλαστικό καθώς αυτό ρέει εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Ο σχεδιασμός των καναλιών ψύξης περιλαμβάνει τη διάμετρο του σωλήνα, τον αριθμό και τη θέση των καναλιών αλλά και την απόσταση μεταξύ αυτών και της επιφάνειας του καλουπιού [3].

Σε κάθε περίπτωση, ο σχεδιασμός των καναλιών ψύξης είναι κρίσιμος για την απόδοση του χυτευόμενου εξαρτήματος [3]. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας του καλουπιού για την κοιλότητα μορφοποίησης μπορεί να γίνει με πολλές επιπλέον συσκευές προκειμένου να διατηρείται η θερμοκρασία αυτής σταθερή. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός ψυκτικού υγρού σε μορφή «καταρράκτη» για καλούπια με στενά αλλά μεγάλου μήκους προϊόντα, όπως θήκες για στυλό. Επιπλέον, είναι δυνατή η προσθήκη μονωτικών φύλλων στις εξωτερικές επιφάνειες του καλουπιού στοχεύοντας στην αποτροπή της μεταφοράς θερμότητας από την πίσω πλάκα του καλουπιού στο πλατό της μηχανής. Ως επί το πλείστον, πρόκειται για πλάκες από φύλλα ναλοβάμβακα πάχους 3 mm έως 12 mm. Αυτή η τακτική δύναται να εξοικονομεί μέχρι και 25% της θερμοκρασίας εάν τα μονωτικά φύλλα τοποθετηθούν και στις έξι πλευρές του καλουπιού. Η συνιστώμενη θερμοκρασία καλουπιού για τα κοινά πλαστικά βιομηχανικού τύπου παρατίθεται στον συγκεντρωτικό Πίνακα 4.3 που ακολουθεί [3].

Material	Mold temperature range(°C)	Melt temperature range(°C)	Ejection temperature (°C)	Elastic modulus 1 st principal direction(MPa)	Share modulus (MPa)
HDPE(T50-4400)	20–95	180–280	100	911	319.4
PP A-333)	20–80	200–280	93	1634.35	591.477
ABS (6003)	25–80	200–280	88	2000	694.444
POM (Tenac3010)	40–90	190–210	142	2987.13	1008
PMMA (KT-80)	40–90	220–280	95	2700	980
PC (PC X-1)	70–120	260–293	127	2280	804.5
PVC (HTX6220)	21–37	180–210	70	3280	1155
PVC (FPVCFN01)	20–70	160–220	75	3280	1155

Πίνακας 4.3 : Η συνιστώμενη θερμοκρασία καλουπιού για τα κοινά πλαστικά βιομηχανικού τύπου

Η ψύξη στο παραγόμενο εξάρτημα σχετίζεται με τον χρόνο κύκλου. Γενικά, η θερμοκρασία του καλουπιού θα πρέπει να ρυθμιστεί σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3 [3] και είναι συνάρτηση του πάχους των τοιχωμάτων του ίδιου του εξαρτήματος [3]. Οι οδηγίες για οποιοδήποτε δεδομένο πάχος τοιχώματος είναι ότι εάν αυτό διπλασιαστεί, ο χρόνος ψύξης αυξάνεται κατά τέσσερις φορές λόγω της σχέσης της λειτουργίας ψύξης στη μεταφορά θερμότητας με το τετράγωνο του πάχους [3]. Για παράδειγμα, εάν το πάχος είναι 0,4 mm, απαιτούνται 3 δευτερόλεπτα για να κρυώσει. τότε εάν ο τοίχος αυξηθεί στα 0,8 mm., ο χρόνος ψύξης θα απαιτούσε 12 δευτερόλεπτα [3]. Εάν το πάχος μειωθεί, ο κανόνας του τετραγώνου ισχύει επίσης για ταχύτερο χρόνο κύκλου [3].

Οι δρομείς ενδεχομένως να είναι ένας ακόμη παράγοντας ελέγχου στους χρόνους ψύξης. Το πλαστικό εξάρτημα θα πρέπει να είναι αρκετά άκαμπτο για να ξεφορμάρει με ακρίβεια. Συνήθως η διάμετρος του δρομέα είναι 1,5 – 3 mm σε πάχος. Να σημειωθεί ότι το πλαστικό ψύχεται από την εξωτερική επιφάνεια προς την εσωτερική [3]. Άλλωστε, ο χρόνος ψύξης για τους δρομείς είναι συνήθως μεγαλύτερος από τον χρόνο ψύξης του εξαρτήματος [3]. Επομένως, ένας από τους τρόπους βελτίωσης της απόδοσης της ψύξης είναι η τοποθέτηση των κοιλοτήτων όσο το δυνατόν πιο κοντά στο δακτύλιο. Αυτό μειώνει το μήκος του δρομέα και επιτρέπει μικρότερη διάμετρο αυτού [3].

Επιπλέον η διάμετρος της οπής στο μεγάλο άκρο του δακτυλίου ψεκασμού δεν είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη [3]. Ο δακτύλιος ψεκασμού είναι το συνδετικό μέλος μεταξύ του ακροφυσίου της μηχανής και της όψης του καλουπιού, παρέχοντας την κατάλληλη οπή, μέσω της οποίας το υλικό μπορεί να οδηγηθεί προς την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού ή την αρχή του συστήματος δρομέων σε καλούπια πολλαπλών κοιλοτήτων. Ο εμπειρικός κανόνας για τη διάμετρο του δακτυλίου είναι ότι η διάμετρος του δακτυλίου πρέπει να παρέχει την ίδια περιοχή διατομής με το σύνολο όλων των δρομέων που έρχονται σε αυτόν [3]. Για παράδειγμα, αν διάμετρος κάθε δρομέα είναι $D = 1.5 \text{ mm}$, τότε η περιοχή των δρομέων $= \pi D^2 / 4 = 3,14 \times (1.5^2 / 4) + 3,14 \times (1.5^2 / 4) = 2.12 \text{ mm}^2$. Η διάμετρος του δακτυλίου από την περιοχή $= 2.12 \text{ mm}^2 = 4\pi / D^2 \Rightarrow D \text{ δακτυλίου} = 0.411 \text{ mm}$. Αυτό διασφαλίζει ότι υπάρχει πάντα αρκετό υλικό που τροφοδοτείται στους δρομείς από τον δακτύλιο για να διατηρείται η ίδια πίεση σε αυτούς τους δρομείς.

4.7 Θερμοκρασίες μηχανής και λαδιού

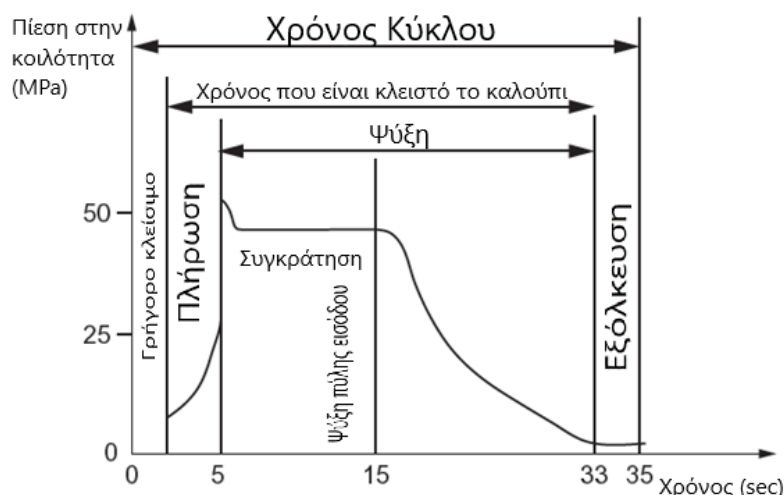
Η θερμοκρασία του υδραυλικού λαδιού έχει ένα επιθυμητό εύρος μεταξύ 30°C και 60°C. Εάν είναι πολύ κρύο, τότε το λάδι είναι υποτονικό λόγω υψηλότερου ιξώδους. Εάν είναι πολύ ζεστό, γίνεται θερμική διάσπαση [3]. Ένας εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει αρκετή ψύξη και τη σωστή θερμοκρασία, αν και μπορεί να συσσωρευτούν πάνω του σκουριές ή άλατα, και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να καθαρίζεται κάθε μήνα με μια φορητή μονάδα που παράγει οξύ. Οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορούν να επηρεάσουν τη θερμοκρασία καλουπιού, την υδραυλική θερμοκρασία, τον χρόνο κύκλου, την ποιότητα και το κόστος. Οι ιδανικές ρυθμίσεις είναι: 35 – 40°C με 30% – 50% σχετική υγρασία [3].

4.8 Πίεση έγχυσης

Η πίεση έγχυσης παρατηρείται στην μονάδα έγχυσης, εφαρμόζεται στο λιωμένο πλαστικό και προκύπτει από την κύρια υδραυλική πίεση στο πίσω άκρο του κοχλίου έγχυσης [3]. Η πίεση της αντλίας μπορεί να είναι μεταξύ 6.9 MPa και 34.5 MPa στις υδραυλικές μηχανές. Αυτό μεταφράζεται σε πίεση έγχυσης μεταξύ 69 MPa και 137.9 MPa, ενώ η πίεση συγκράτησης λαμβάνει τιμές από 55.2 – 103.4 MPa. Η πίεση έγχυσης υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.3 [3]. Ο εμπειρικός κανόνας είναι ότι η πίεση συγκράτησης είναι το 75% της πίεσης έγχυσης [3].

$$P_{\text{έγχυσης}} = \frac{P_{\text{αντλίας}} \times \text{εμβαδόν_εμβόλου}}{\text{εμβαδόν_κοχλίου}} \text{ (MPa)} \text{ (Εξ. 4.3) [3]}$$

Η πίεση στο καλούπι ποικίλει καθώς το υλικό εγχέεται και στη συνέχεια ψύχεται. Το Σχήμα 4.16 δείχνει το προφίλ της πίεσης κατά την χύτευση με έγχυση [3].



Σχήμα 4.16: Κατανομή της πίεσης κατά τη χύτευση με έγχυση

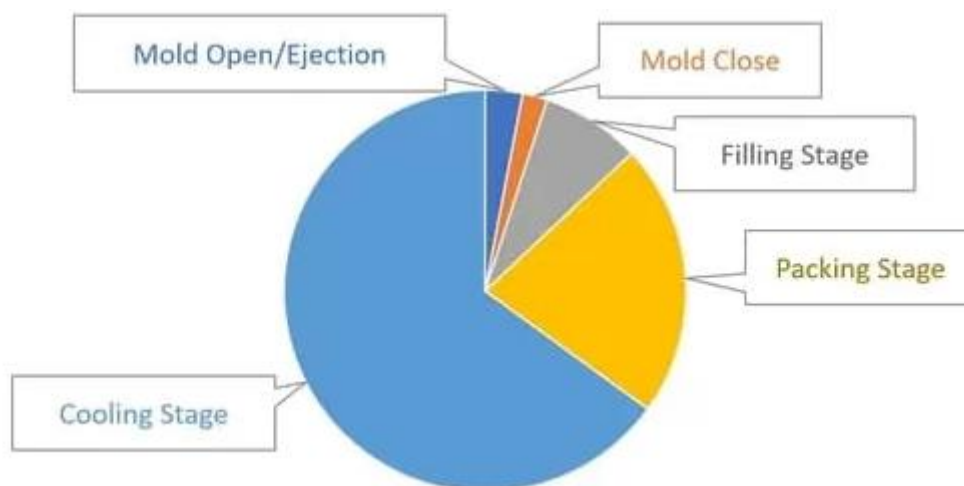
Όπως φαίνεται στο σχήμα, η υψηλότερη πίεση είναι μετά την έγχυση και στη συνέχεια η χαμηλότερη είναι για τη συγκράτηση και την ψύξη. Κατά την ψύξη του εξαρτήματος η πίεση μειώνεται, φτάνοντας την ατμοσφαιρική πίεση και στη συνέχεια το παραχθέν εξάρτημα εξολκεύεται [3]. Κατά την χύτευση με έγχυση, η πίεση συγκράτησης χρησιμοποιείται για να ολοκληρώσει την πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με πολυμερές τήγμα και να διατηρήσει την πίεση μέχρι να στερεοποιηθεί το πολυμερές και να διαμορφωθεί το τελικό προϊόν (packing – «σιδέρωμα»). Η αύξηση δε της πίεσης συγκράτησης μπορεί να μειώσει τα όποια προβλήματα παραμόρφωσης στο προϊόν.

Η αντίθλιψη εφαρμόζεται μετά την ολοκλήρωση των φάσεων της έγχυσης [3]. Η αντίθλιψη στη χύτευση με έγχυση, ή αλλιώς *πίεση πλαστικοποίησης*, είναι ένα αποτέλεσμα χύτευσης και τήξης των πολυμερών. Το υλικό πιέζει προς τα πίσω το κοχλίας καθώς αναμιγνύεται και ωθείται προς τα εμπρός. Όταν ολοκληρωθεί η πίεση συγκράτησης, ο κοχλίας αρχίζει να περιστρέφεται για να φέρει νέο υλικό στο μπροστινό μέρος της κάννης ως προετοιμασία για την επόμενη βολή. Καθώς το υλικό γεμίζει την κοιλότητα, ο κοχλίας ωθείται προς τα πίσω. Η αντίθλιψη είναι μικρή σε σύγκριση με την πίεση έγχυσης (μεταξύ 0.34 και 3.44 MPa, ο κοχλίας μπορεί να μην περιστραφεί εάν ξεπεραστεί) [3]. Η διαδικασία ξεκινάει με μια μικρή ποσότητα αντίθλιψης και να αυξάνεται σταθερά σε αυξήσεις της τάξης των 0.069 MPa [3]. Η αντίθλιψη εξασφαλίζει συνέπεια στο μερικό βάρος, την πυκνότητα και την εμφάνιση του τελικού προϊόντος και αποσπά κάθε παγιδευμένο αέρα ή υγρασία ενώ ελαχιστοποιεί τα κενά στα μέρη του καλουπιού [3].

Από την άλλη, η πίεση του σφικτήρα είναι σημαντική για να διατηρείται το καλούπι κλειστό έναντι των δυνάμεων που αναπτύσσονται όταν η πίεση έγχυσης ωθεί το πλαστικό στο κλειστό καλούπι. Η πίεση ποικίλει ανάλογα με την θέση του εξαρτήματος [3]. Μπορεί να έχει σημεία υψηλής και χαμηλής πίεσης στο παραγόμενο εξάρτημα καθώς η κοιλότητα μορφοποίησης πληρώνεται με πολυμερές τήγμα [3].

4.9 Χρόνος κατά τη χύτευση με έγχυση

Ο χρόνος του κύκλου της έγχυσης είναι η πιο σημαντική χρονική παράμετρος. Ο χρόνος του κύκλου είναι ο χρόνος από το "πάτημα σε πάτημα" στον κύκλο καλουπώματος [3]. Στο Σχήμα 4.22 [12] αποτυπώνεται ένα παράδειγμα ενός πλήρους κύκλου έγχυσης για την παραγωγή ενός εξαρτήματος μέσω χύτευσης με έγχυση [3].



Σχήμα 4.17: Ο χρόνος ενός πλήρους κύκλου έγχυσης

Ο χρόνος κύκλου περιλαμβάνει τον χρόνο για το κλείσιμο του καλουπιού, την έγχυση του υλικού στο καλούπι, τον χρόνο μορφοποίησης και τον έλεγχο μερικής παραμόρφωσης, τον χρόνο ψύξης και τον χρόνο εξόλκευσης [3]. Πρακτικά είναι ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή ενός προϊόντος. Έτσι, το ωριαίο κόστος της μηχανής μπορεί να υπολογιστεί ανά αριθμό εξαρτημάτων, εάν ο χρόνος κύκλου διαιρεθεί με τον αριθμό των προϊόντων που κατασκευάζονται σε κάθε κύκλο [3]. Για παράδειγμα, εάν κατασκευάζονται 8 προϊόντα κάθε 30 δευτερόλεπτα, τότε ο αριθμός των προϊόντων ανά ώρα είναι 8 προϊόντα επί 2 ανά λεπτό επί 60 λεπτά την ώρα για να παράξει 960 προϊόντα ανά ώρα.

Στη συνέχεια, εάν το κόστος του μηχανήματος, συμπεριλαμβανομένης της εργασίας, είναι 150 € ανά ώρα, τότε το κόστος του μηχανήματος θα είναι $150 \text{ €} / 960 \text{ προϊόντα} = 0,156 \text{ €}$ ανά εξάρτημα [3].

Ο χρόνος κλεισίματος του καλουπιού είναι μια παράμετρος που μπορεί να βελτιστοποιηθεί. Έχει δύο φάσεις, ένα γρήγορο κλείσιμο και ένα αργό κλείσιμο για υψηλή πίεση [3]. Ακόμη, έχει γρήγορο άνοιγμα και αργό άνοιγμα κατά το άνοιγμα της πρέσας. Επιπλέον, ο χρόνος έγχυσης μπορεί να βελτιστοποιηθεί καθώς η έγχυση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν συντομότερη, συνήθως λιγότερο από 2 δευτερόλεπτα [3]. Οι μεγαλύτεροι χρόνοι πλήρωσης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε υψηλότερη πίεση λόγω των παχύτερων περιοχών του πυρήνα από τα αποτελέσματα ψύξης [3]. Ο δε χρόνος κλεισίματος της πύλης μπορεί επίσης να ρυθμιστεί.

4.10 Ψύξη καλουπιού

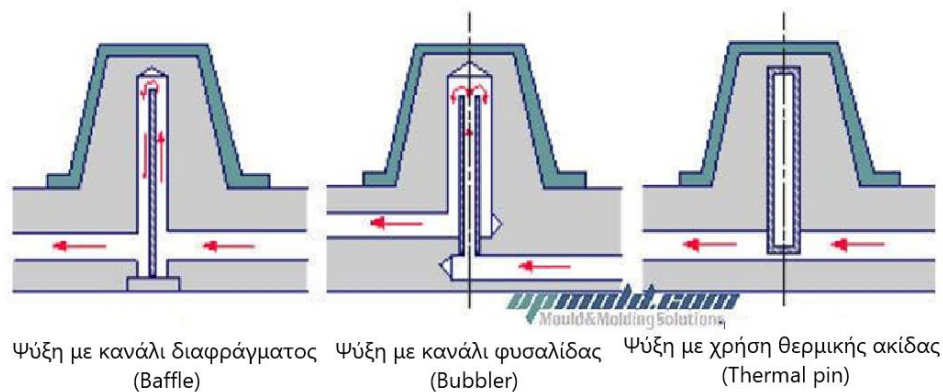
Ο σχεδιασμός του κατάλληλου συστήματος ψύξης των καλουπιών είναι πολύ σημαντικός για την παραγωγή του τελικού προϊόντος και για αυτό έχουν αναπτυχθεί ποικίλοι μηχανισμοί. Ένα σωστά σχεδιασμένο κύκλωμα ψύξης, αφαιρεί θερμότητα από τις δύο κοιλότητες του καλουπιού γρήγορα και ομοιόμορφα. Η διεργασία ολοκληρώνεται όταν το εξάρτημα ή το υλικό που απαιτεί περισσότερο χρόνο ψύξης κρυσταλλωθεί και φτάσει στην κατάλληλη θερμοκρασία για εξόλκευση. Η ψύξη του καλουπιού γίνεται με την χρήση κάποιου ψυκτικού (συνήθως κρύο νερό) στο εσωτερικό των κοίλων μερών του καλουπιού και, προφανώς, υπακούει στην Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας (Εξίσωση 4.4 [9]). Και αυτό διότι το κύκλωμα της ψύξης μελετάται ως ένας εναλλάκτης θερμότητας οπότε, πρακτικά, τούτο σημαίνει ότι οι κοιλότητες του καλουπιού αυξάνουν τη θερμοκρασία τους κατά τη ροή του πολυμερούς σε αυτές και έπειτα γίνεται η ψύξη τους.

$$\dot{Q}_{\text{πολ.}} + \dot{Q}_{\text{περ.}} + \dot{Q}_{\text{ψυ.}} = \dot{Q}_{\text{καλ.}} \quad (\text{Εξ. 4.4}), \text{ όπου : [9]}$$

- $\dot{Q}_{\text{πολ.}}$: Η θερμότητα που συναλλάσσεται με το πολυμερές
- $\dot{Q}_{\text{περ.}}$: Η θερμότητα που συναλλάσσεται με το περιβάλλον
- $\dot{Q}_{\text{ψυ.}}$: Η θερμότητα που συναλλάσσεται με το ψυκτικό υγρό
- $\dot{Q}_{\text{καλ.}}$: Η θερμική ενέργεια του καλουπιού

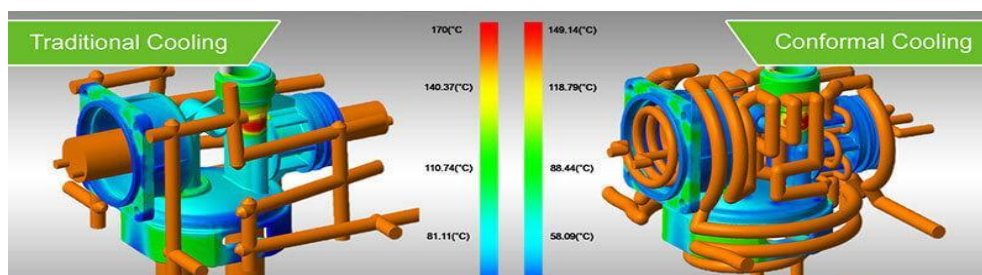
Ο συνηθέστερος τρόπος ψύξης του καλουπιού είναι η χρήση ευθείων καναλιών ψύξης κυκλικής διατομής στο εσωτερικό των κοίλων μερών του, μέσα στα οποία περνάει κάποιο ψυκτικό υγρό (π.χ. κρύο νερό). Η μεν διάμετρος των καναλιών μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη επιφάνεια των κοιλοτήτων όπου είναι επιθυμητό να πραγματοποιηθεί η έγχυση του αντίστοιχο υλικού. Η δε δημιουργία των καναλιών γίνεται με χρήση φρέζας, ακολουθώντας ευθείες γραμμές στα εξωτερικά τοιχώματα του καλουπιού οι οποίες τέμνονται, δημιουργώντας έτσι ένα κλειστό κύκλωμα. Για την βελτίωση τους μπορεί χρησιμοποιηθούν κανάλια με διαφράγματα (baffles), κανάλια με φυσαλίδες (bubblers) ή πείροι μετάδοση ψύξης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18 [13].

Αφενός, τα μεν κανάλια διαφράγματος συνιστούν σωληνώσεις με διαχωριστική λάμα οι οποίες τοποθετούνται κάθετα στο κύριο κανάλι ψύξης και ωθούν το ψυκτικό υγρό προς τα πάνω για αποτελεσματικότερη ψύξη ψηλών αντικειμένων. Αφετέρου, τα δε κανάλια φυσαλίδας, μοιάζουν με τα κανάλια διαφράγματος, με τη διαφορά ότι το υγρό που εισέρχεται στον κάθετο σωλήνα ρέει εξωτερικά, ώστε να επανέρχεται γρηγορότερα στην έξοδο των καναλιών. Τέλος, για την ψύξη μακριών και λεπτών αντικειμένων χρησιμοποιούνται θερμικές ακίδες, δηλαδή θερμοαγώγιμα κράματα χαλκού σε μορφή πείρου, τα οποία εισέρχονται εφαρμοστά στις κοιλότητες του καλουπιού. Οπωσδήποτε, ο τυπικός σχεδιασμός των καναλιών ψύξης είναι κατάλληλος για εξαρτήματα με σχετικά απλές γεωμετρίες για να διασφαλιστεί ότι ολόκληρο το μορφοποιημένο εξάρτημα ψύχεται αποτελεσματικά.



Σχ. 4.18: Ψύξη με κανάλια διαφράγματος, ψύξη με κανάλια φυσαλίδας και ψύξη με θερμικές ακίδες [13]

Ένας άλλος τρόπος ψύξης είναι η σύμμορφη ψύξη, η οποία χρησιμοποιείται για τη χύτευση πιο σύνθετων προϊόντων. Η σύμμορφη ψύξη αποτελεί έναν τρόπο εισαγωγής καναλιών ψύξης που ακολουθούν πιστά τη γεωμετρία περίπλοκων εξαρτημάτων, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 4.19 [13]. Αυτή η διαδικασία βοηθά αυτά τα μέρη να ψύχονται με σταθερό ρυθμό παρόλο που έχουν δυσπρόσιτες περιοχές. Η δημιουργία των καλουπιών που περιλαμβάνουν τα κανάλια αυτά καθίσταται δυνατή αποκλειστικά και μόνο μέσω της διαδικασίας 3D Printing η οποία βέβαια είναι ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο οπότε το κόστος είναι μεγάλο και δεν συμφέρει σε επίπεδο ευρείας παραγωγής.



Σχήμα 4.19: Διαφορά συμβατικής ψύξης με την Σύμμορφη ψύξη [13]

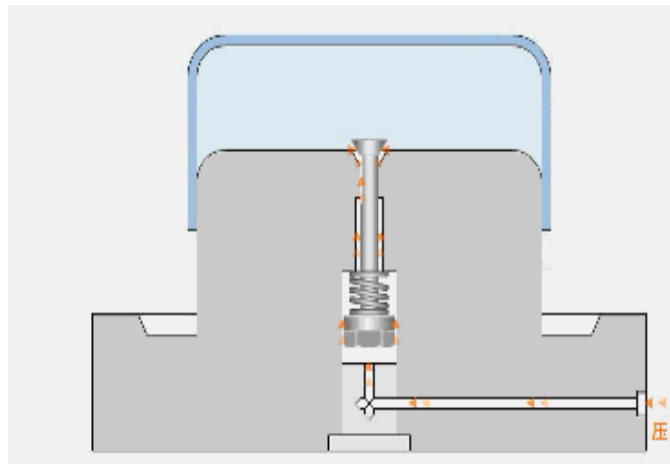
Για τον σχεδιασμό του συστήματος ψύξης στο καλούπι, υπάρχουν αρκετοί και σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται. Οι κύριοι παράγοντες σχεδιασμού περιλαμβάνουν :

- ο την επιβεβαίωση ότι τα κανάλια ψύξης είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο παχύτερο μέρος της κοιλότητας του καλουπιού (δηλαδή, στο παχύτερο μέρος του τεμαχίου),
- ο την διασφάλιση ότι τα μεγαλύτερα κανάλια ψύξης θα πρέπει να διατηρούν την ίδια διάμετρο σε όλο το καλούπι,
- ο την κοινή διαπίστωση ότι πολλά μικρότερα κανάλια είναι καλύτερα από ένα μεγάλο κανάλι και
- ο την εξασφάλιση της σταθερής τιμής ψύξης και στα δύο μέρη του καλουπιού («αρσενικό» – «θηλυκό»)

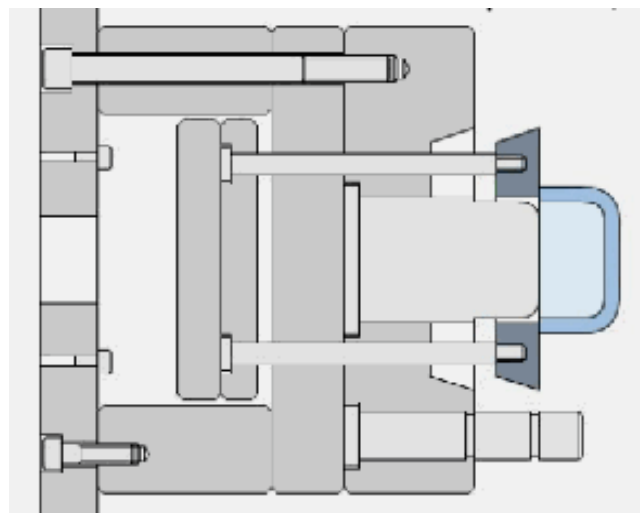
4.11 Αποκόλληση του πλαστικού – Εξόλκευση τελικού προϊόντος

Ο μηχανισμός της εξόλκευσης ή αλλιώς οι εξολκείς του καλουπιού, σχεδιάζονται με σκοπό την αποκόλληση του τελικού προϊόντος από το διαιρούμενο καλούπι, και συγκεκριμένα από το μέρος του καλουπιού το οποίο είναι τοποθετημένο στην κινητή πλάκα της μηχανής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25. Οι μηχανισμοί εξόλκευσης περιλαμβάνουν έμβολα ή κινούμενες επιφάνειες διαιρούμενων πλακών και η τοποθέτηση του/των εξολκέα/ων γίνεται βάσει των γεωμετρικών

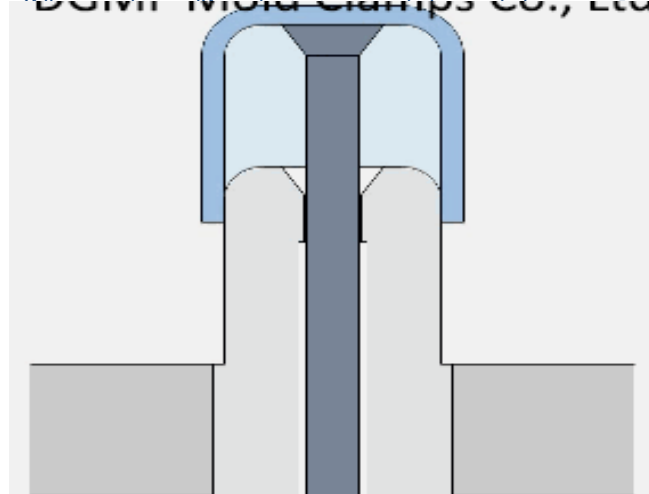
χαρακτηριστικών του προϊόντος που είναι επιθυμητό να αποτυπωθούν τελικώς. Παραδείγματα των πιο συνήθων μηχανισμών εξόλκευσης αναπαρίστανται στο Σχήμα 4.20α, στο Σχήμα 4.20β, στο Σχήμα 4.20γ και στο Σχήμα 4.20δ [14].



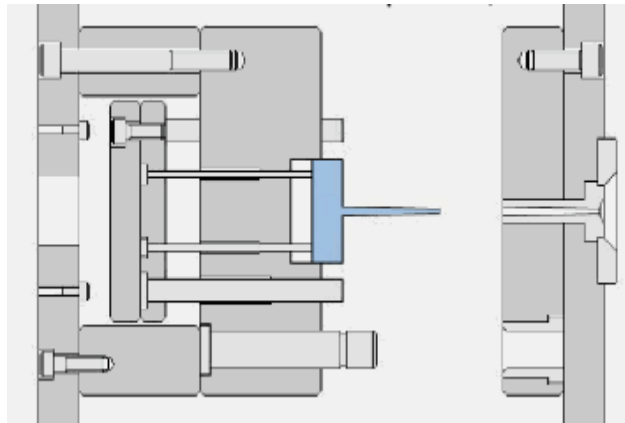
Σχήμα 4.20α : Μηχανισμός εξόλκευσης με βαλβίδα αέρα. [14]



Σχήμα 4.20β : Μηχανισμός εξόλκευσης με κινητή πλάκα. [14]



Σχήμα 4.20γ : Μηχανισμός εξόλκευσης με πείρο. [14]



Σχήμα 4.20δ : Μηχανισμός εξόλκευσης με ακίδες [14]

4.12 Σφάλματα που προκύπτουν κατά την χύτευση με έγχυση και τρόποι αντιμετώπισης

Όπως έχει επισημανθεί, τα τελικά προϊόντα που έχουν παραχθεί μέσω της χύτευσης με έγχυση, εμφανίζουν συχνά διάφορες κατασκευαστικές ατέλειες. Οι κύριες αιτίες εμφάνισης αυτών των ατελειών πιθανόν να οφείλονται στον κακό σχεδιασμό του τελικού προϊόντος ή και του καλουπιού αυτού, στην λάθος επιλογή της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης, ήτοι στο ακατάλληλο πολυμερές, καθώς και στην εσφαλμένη παραμετροποίηση των μεταβλητών της κατασκευαστικής διεργασίας που συμβάλλουν στη σωστή δημιουργία ενός προϊόντος (π.χ. λάθος θερμοκρασίες, πιέσεις, ταχύτητες έγχυσης κ.λπ.).

Η ποιότητα σε όλα τα προϊόντα παραγωγής είναι από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους που πρέπει να δίνει βαρύτητα μια επιχείρηση, εφόσον επιθυμεί να παραμένει ανταγωνιστική έναντι των υπολοίπων. Οπότε, η ύπαρξη μιας συγκεκριμένης ατέλειας και, ιδιαίτερα ο συνδυασμός ατελειών, επηρεάζουν τη λειτουργικότητα, την ποιότητα και την αισθητική των τελικών προϊόντων, ενώ τα καθιστούν ιδιαίτερα κοστοβόρα, λόγω της αδυναμίας πώλησής τους, με αποτέλεσμα να θεωρούνται “ελλαττωματικά” προϊόντα.

Παρακάτω, γίνεται η καταγραφή των συνηθέστερων κατασκευαστικών ατελειών που παρατηρούνται στα προϊόντα χύτευσης με έγχυση, εξηγούνται οι λόγοι εμφάνισής τους και προτείνονται κάποιες ενδεικτικές λύσεις για τον περιορισμό τους ή και την εξάλειψή τους. Ορισμένες από τις ατέλειες που θα παρατηρηθούν, μπορούν να εξαλειφθούν με μερικό ή ολικό επανασχεδιασμό του τελικού προϊόντος, ή και του καλουπιού αυτού. Ωστόσο, τέτοιες ενέργειες είναι εξαιρετικά χρονοβόρες και δαπανηρές, οπότε θεωρείται φρόνιμο να αποτελούν την έσχατη λύση για τη διόρθωση των ατελειών αυτών, δηλαδή, να γίνονται μετά την εύρεση των κατάλληλων ρυθμίσεων των παραμέτρων της έγχυσης.

Σε αυτό το σημείο να υπογραμμιστεί, πως για την επίτευξη του καλύτερου αποτελέσματος, κρίνεται δεδομένο πως οποιαδήποτε βελτιωτική κίνηση που επίκειται να γίνει από τον χειριστή της injection μηχανής θα πρέπει να είναι μέσα στα όρια των αντίστοιχων συστάσεων που αναγράφονται στα εγχειρίδια χρήσης των προμηθευτών και των κατασκευαστών του εκάστοτε υλικού ή του εκάστοτε τεχνικού εξοπλισμού. Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η επίλυση μιας ατέλειας, ενδέχεται να προκαλέσει διαφορετικά προβλήματα στην δημιουργία ενός προϊόντος. Κατά συνέπεια,

για οποιαδήποτε ενέργεια εξάλειψης της, απαιτείται περαιτέρω εξέταση όλων των τεχνικών προδιαγραφών σχεδίασης ενός καλουπιού.

4.12.1 Σημάδια Ροής / Γραμμές Ροής

Τα σημάδια ροής ή οι γραμμές ροής, αποτελούν μια συνήθη κατασκευαστική ατέλεια των προϊόντων χύτευσης με έγχυσης. Διακρίνονται ως κυματιστά σημάδια με μερικώς διαφορετικό χρώμα (συνήθως πιο σκούρο) από το τελικό προϊόν, και συνήθως παρουσιάζονται στα στενά τμήματα του εξαρτήματος έγχυσης ή κοντά στο σημείο εισόδου του υλικού. Τα σημάδια ροής δεν επηρεάζουν τη λειτουργικότητα του προϊόντος, αλλά θα επηρεάσουν την εμφάνισή του. Συνεπώς, για αισθητικούς λόγους, τα σημάδια ροής κρίνονται ως μη αποδεκτά. Στο Σχήμα 4.21 που ακολουθεί απεικονίζονται οι γραμμές ροής που εμφανίζονται σε ένα προϊόν χύτευσης με έγχυση .



Σχήμα 4.21: Σημάδια / Γραμμές ροής σε επιφάνεια τελικού προϊόντος [15]

Κατά την έγχυση του τηγμένου πολυμερούς, δύναται να ρέει ψυχρό πολυμερές στις κοιλότητες του καλουπιού, προκαλώντας περιοχές με μερικώς στερεοποιημένο υλικό, το οποίο εμφανίζεται με τη μορφή των γραμμών ροής. Συγκεκριμένα, η δημιουργία τους οφείλεται στις διακυμάνσεις της ταχύτητας ψύξης του υλικού καθώς αυτό ρέει στο καλούπι και μπορεί να παρατηρηθεί στα σημεία με τις μεγαλύτερες διαφορές στο πάχος του τοιχώματος. Σε αυτά τα σημεία, η ψύξη του υλικού γίνεται με αργούς ρυθμούς καθώς η ταχύτητα έγχυσης είναι πιο αργή, με αποτέλεσμα εκεί να προκαλείται ταχεία ψύξη του υλικού. Με λίγα λόγια, το πρώτο στρώμα του πλαστικού γίνεται μερικώς στερεό ενώ η κοιλότητα μορφοποίησης εξακολουθεί να πληρώνεται με θερμό πολυμερές τήγμα.

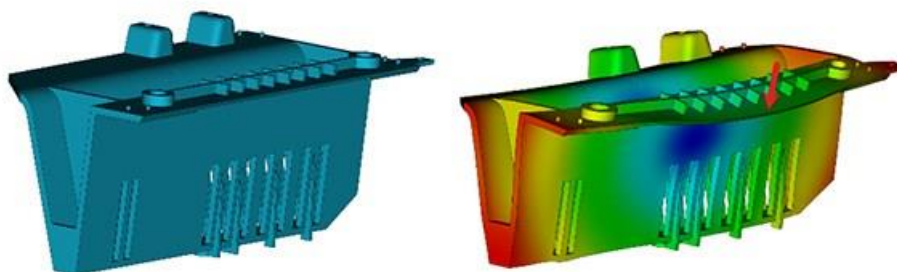
Για την αντιμετώπιση των σημαδιών / γραμμών ροής στο τελικό προϊόν, οι πιθανές λύσεις μπορεί να είναι οι ακόλουθες :

- ✓ αύξηση της θερμοκρασίας τήξης του πολυμερούς.
- ✓ αύξηση της θερμοκρασίας των δύο μερών του καλουπιού

- ✓ αύξηση της πίεσης έγχυσης στα κατάλληλα επίπεδα, ώστε να διασφαλιστεί η πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού με το πολυμερές τήγμα χωρίς να προκαλείται ταχεία στερεοποίηση του σε σημεία όπου παρατηρείται μεταβολή στην ταχύτητα ροής,
- ✓ διατήρηση του ομοιόμορφου πάχους των τοιχωμάτων του αντικειμένου που επίκειται να παραχθεί, διαμορφώνοντάς το με στρογγυλεύσεις (fillets) στις αιχμηρές ακμές των 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,
- ✓ αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου ούτως ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα ροής και να προληφθεί η πρόωγη ψύξη του πολυμερούς τήγματος και
- ✓ ανατοποθέτηση των πυλών εισόδου με σκοπό τη δημιουργία μεγαλύτερης απόστασης μεταξύ αυτών και των καναλιών ψύξης στοχεύοντας στην αποτροπή της.

4.12.2 Στρεβλώσεις

Οι στρεβλώσεις που παρατηρούνται σε ένα αντικείμενο που έχει διαμορφωθεί με χύτευση με έγχυση, είναι ουσιαστικά η παραμόρφωση που μπορεί να συμβεί όταν τα προϊόντα συρρικνώνονται άνισα ή ανομοιόμορφα κατά τη διαδικασία της ψύξης. Η ανομοιόμορφη αυτή συρρίκνωση μπορεί προκαλέσει τάσεις στο τεμάχιο, το οποίο όταν ψύχεται οι τάσεις το λυγίζουν ή το στρίβουν (Σχήμα 4.22). Η κύρια αιτία της στρέβλωσης οφείλεται στην ταχεία ψύξη του προϊόντος (για παράδειγμα όταν ένα αντικείμενο έχει μεγάλη επίπεδη επιφάνεια) καθώς και στη συρρίκνωση του κάθε υλικού όπου αναφέρουν οι προδιαγραφές.

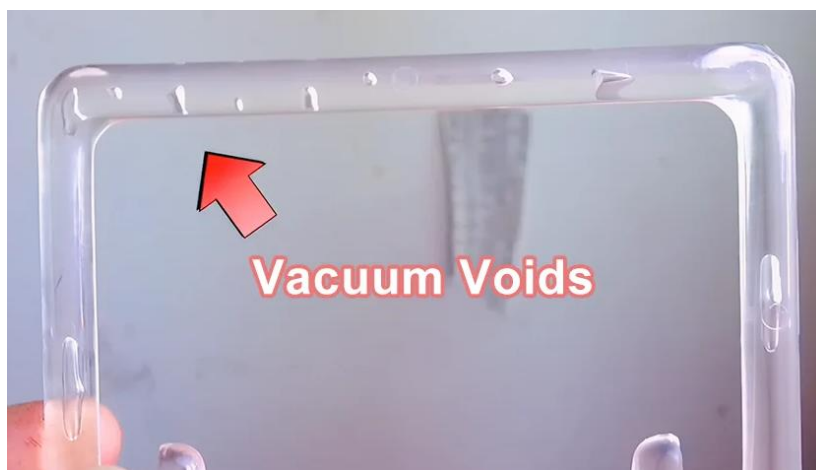


Σχήμα 4.22: Προϊόν έγχυσης με εμφανή σημάδια στρέβλωσης (δεξιά) [16]

Για την αντιμετώπιση των στρεβλώσεων, εφόσον η διαδικασία ψύξης είναι σταδιακή και επαρκής, κάτι το οποίο συνεπάγεται αποτροπή των ανομοιόμορφων τάσεων στο υλικό, ενδείκνυται η μείωση της θερμοκρασίας του καλουπιού ή του τήγματος του υλικού που χρησιμοποιείται (ανάλογα με τις ανοχές του). Σε περίπτωση που αυτές οι ενέργειες έχουν ελεγχθεί αλλά η στρέβλωση παραμένει, τότε θα πρέπει να εξεταστεί είτε η αλλαγή του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς υλικού με κάποιο άλλο το οποίο εμφανίζει μικρότερη συρρίκνωση κατά την ψύξη είτε ο επανασχεδιασμός του καλουπιού, δίνοντας έμφαση τόσο στη συμμετρικότητα του αντικειμένου όσο και στην ομοιομορφία του πάχους των τοιχωμάτων αυτού προκειμένου να διασφαλιστεί η σταθερότητα της ψύξης.

4.12.3 Κενά

Κενά ή θύλακες αέρα, ονομάζονται οι παγιδευμένες φυσαλίδες αέρος που εμφανίζονται στα τελικά injection προϊόντα (Σχήμα 4.23), οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν αποδυνάμωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του, εφόσον υπάρχουν σε μεγάλο αριθμό. Κύρια αιτία των κενών συνιστά η ανεπαρκής πίεση συμπίεσης η οποία αδυνατεί να ωθήσει τον παγιδευμένο αέρα έξω από την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού. Κάτι σημαντικό το οποίο χρειάζεται να αναφερθεί και αποτελεί εμπειρική διαπίστωση είναι ότι τα κενά αέρος είναι δύσκολο να αποφευχθούν εάν το πάχος του τελικού προϊόντος είναι μεγαλύτερο από 6 mm.

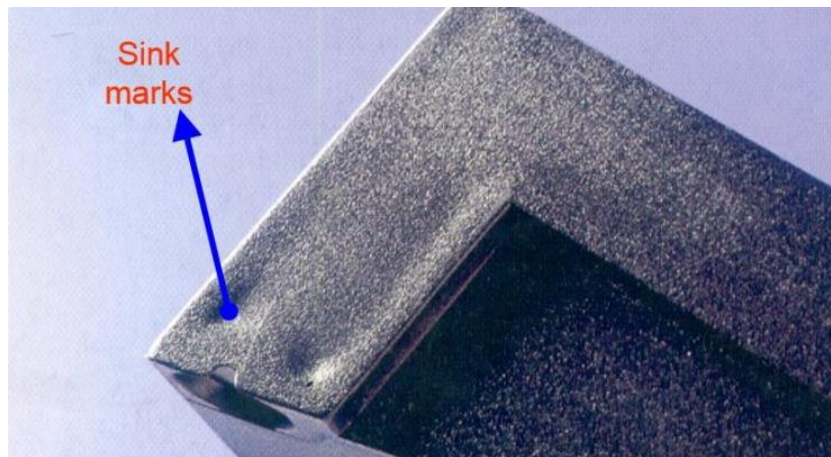


Σχήμα 4.23: Προϊόν έγχυσης με πολλά και διάσπαρτα κενά που προκλήθηκαν από παγιδευμένα αέρια κατά την χύτευση του πολυμερούς [17]

Η λύση για την εξάλειψη των κενών, είναι η αύξηση της πίεσης έγχυσης, έτσι ώστε να εξαναγκαστεί ο παγιδευμένος αέρας να διαφύγει από το καλούπι. Επιπλέον καλό είναι να επιλεγθεί υλικό με χαμηλό ιξώδες, ώστε η ροή μέσα στον κοχλία και στο καλούπι να είναι ομοιόμορφη, περιορίζοντας τον κίνδυνο σχηματισμού φυσαλίδων. Συγχρόνως δε, ενδείκνυται η πύλη εισόδου του υλικού να τοποθετείται κοντά στο παχύτερο μέρος του καλουπιού, με σκοπό να αποτραπεί η πρόωρη ψύξη του.

4.12.4 Σημάδια βύθισης – Βαθουλώματα

Τα σημάδια βύθισης ή αλλιώς βαθουλώματα (Σχήμα 4.24) συνιστούν σπηλαιώσεις που εμφανίζονται στις επίπεδες επιφάνειες του προϊόντος έγχυσης. Κατά την διάρκεια της ψύξης του λιωμένου πλαστικού, το υλικό συρρικνώνεται προκαλώντας το εσωτερικό τμήμα να έλκει το εξωτερικό, σχηματίζοντας μια κοιλότητα. Συνήθως, τα σημάδια βύθισης εμφανίζονται στα παχύτερα μέρη του προϊόντος που χυτεύεται. Αν δε η γεωμετρία του εξαρτήματος έχει μεταβλητό πάχος, οι πιθανότητες εμφάνισης των σημαδιών αυτών είναι μεγάλες.

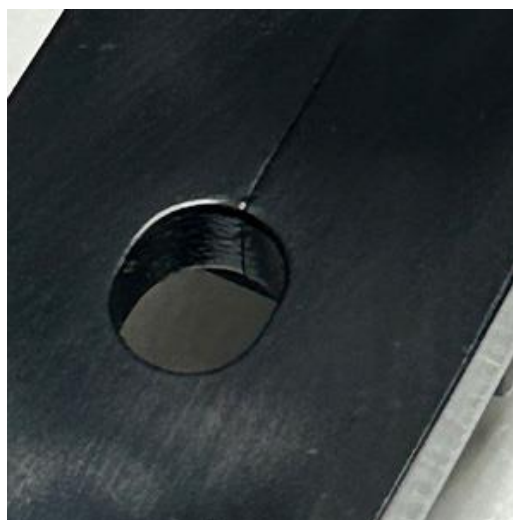


Σχήμα 4.24: Προϊόν έγχυσης με βαθουλώματα στην εξωτερική επιφάνεια που αυτομάτως το υποβαθμίζουν ποιοτικά [18]

Για την αντιμετώπιση των σημαδιών βύθισης, θα πρέπει να αυξηθεί η πίεση και ο χρόνος συμπίεσης, ώστε να επιτραπεί στο υλικό της επιφάνειας του εξαρτήματος να ψυχθεί, ή να αυξηθεί ο χρόνος ψύξης για να περιοριστεί η συρρίκνωση του μορφοποιούμενου προϊόντος. Στην περίπτωση δε που απαιτείται επανασχεδιασμός του καλουπιού, είναι αναγκαίο να δοθεί έμφαση στα τοιχώματα του προϊόντος ώστε να κατασκευαστούν πιο λεπτά για την ταχύτερη ψύξη κοντά στην επιφάνεια.

4.12.5 Γραμμές συγκόλλησης

Οι γραμμές συγκόλλησης (Σχήμα 4.25) μπορούν να εμφανιστούν σε ένα τελικό προϊόν έγχυσης, είτε στα επιφανειακά είτε στα ενδότερα στρώματα αυτού. Η αιτία εμφάνισης των γραμμών συγκόλλησης δεν είναι άλλη από τη διάσπαση του μετώπου ροής του πολυμερούς τήγματος κατά την έγχυσή του στην κοιλότητα μορφοποίησης ενός καλουπιού σε δύο ή περισσότερα επιμέρους μέτωπα. Σημειωτέο ότι η γραμμή συγκόλλησης είναι το αποτέλεσμα ασθενούς συγκόλλησης υλικού δύο ή περισσότερων μετώπων ροής η οποία μειώνει την αντοχή του εξαρτήματος. Μάλιστα, όταν στο καλούπι υπάρχουν δύο ή περισσότερες πύλες εισόδου, τότε το πολυμερές πρέπει να διατηρείται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Διαφορετικά, στερεοποιείται μερικώς και δεν δύναται να συγκολληθεί επαρκώς στο σημείο που συναντώνται οι ροές, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται γραμμές συγκόλλησης.



Σχήμα 4.25: Προϊόν έγχυσης με εμφανή γραμμή συγκόλλησης που καθιστά το τελικό προϊόν ποιοτικά μη αποδεκτό [19]

Στα πλαίσια της αποτροπής σχηματισμού γραμμών συγκόλλησης, θα πρέπει να αυξηθεί η θερμοκρασία του υλικού ή / και του καλουπιού ώστε να μην παρατηρηθεί η μερική στερεοποίηση του υλικού ή / και να αυξηθεί η ταχύτητα και η πίεση της έγχυσης για να περιοριστεί η ψύξη, πριν το υλικό γεμίσει την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού. Αν η συγκεκριμένη αστοχία δεν απορρέει εν τέλει από τους παραπάνω παράγοντες, τότε καλό είναι να ελεγχθεί το καλούπι και να εξαλειφθούν όσο γίνεται τα χωρίσματα. Άλλωστε, το επόμενο βήμα είναι ο ανασχεδιασμός ώστε το υλικό να εγχέεται εντός της κοιλότητας μορφοποίησης μέσα από λιγότερες εισόδους. Αναμφίβολα, το υλικό που χρησιμοποιείται παίζει και αυτό σημαντικό ρόλο στη δημιουργία των γραμμών συγκόλλησης. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η επιλογή υλικού με χαμηλή θερμοκρασία τήξης ή χαμηλό ιξώδες ούτως ώστε να επιτραπεί η ταχύτερη ροή και να αποτραπεί η πρόωρη ψύξη του μορφοποιούμενου προϊόντος.

4.12.6 Φαινόμενο πίδακα

Η ανάπτυξη του φαινομένου πίδακα οδηγεί στη δημιουργία σημαδιών φολιδωτού ή κυματιστού μοτίβου στην εξωτερική επιφάνεια του τελικού injection προϊόντος (Σχήμα 4.26). Με λίγα λόγια, το φαινόμενο πίδακα παρατηρείται όταν το υλικό εγχέεται με υψηλή ταχύτητα στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού και παρατηρείται στην περιοχή όπου ξεκίνησε η στερεοποίηση, πριν η κοιλότητα γεμίσει πλήρως, προκαλώντας την αποδυνάμωση του τελικού προϊόντος. Στην περίπτωση αυτή, το λιωμένο πλαστικό δεν κολλάει ομοιόμορφα στις επιφάνειες του καλουπιού και η κύρια αιτία είναι η υψηλή πίεση έγχυσης ή / και η υψηλή ταχύτητα ροής.



Σχήμα 4.26: Προϊόν έγχυσης με φολιδωτό μοτίβο στην εξωτερική επιφάνεια λόγω ανάπτυξης του φαινομένου πίδακα κατά την έγχυση [20]

Για την αντιμετώπιση των σημαδιών που απορρέουν από την ανάπτυξη του φαινομένου πίδακα θα πρέπει να γίνει μείωση της πίεσης έγχυσης ή / και της ταχύτητας ροής ή / και αύξηση της θερμοκρασίας τήξης του υλικού ή / και του καλουπιού, ώστε να γίνει πιο αργή η στερεοποίηση του προϊόντος. Αν γίνουν οι παραπάνω ενέργειες, αλλά τα σημάδια παραμένουν, τότε κρίνεται αναγκαίο να εξεταστεί η ανατοποθέτηση της πύλης εισόδου σε εναλλακτικό σημείο του καλουπιού, ώστε το υλικό να ακολουθεί μία πιο συμμετρική ροή.

4.12.7 Προέκταμα

Μία συχνή αστοχία στα προϊόντα χύτευσης με έγχυση, είναι η δημιουργία προεκτάματος (Σχήμα 4.27). Πρόκειται για μια ατέλεια που εμφανίζεται ως μία λεπτή προεξοχή στην άκρη του

τελικού προϊόντος, όταν το υλικό διαφεύγει από την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού. Συνήθως, εντοπίζεται στις περιοχές της γραμμής διαχωρισμού ή των εξολκείων. Οι κύριες αιτίες εμφάνισης του προεκτάματος είναι η ανεπαρκής σύσφιξη του καλουπιού κατά τη συναρμολόγηση του, αλλά και η αυξημένη πίεση έγχυσης σε σχέση με τη δύναμη σύσφιξης. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι η σύγκριση της πίεσης με τη δύναμη δεν γίνεται ποσοτικά (Pascal με Newton) αλλά βάσει ορισμένων μετρήσεων οι οποίες προέρχονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή των μηχανών έγχυσης.

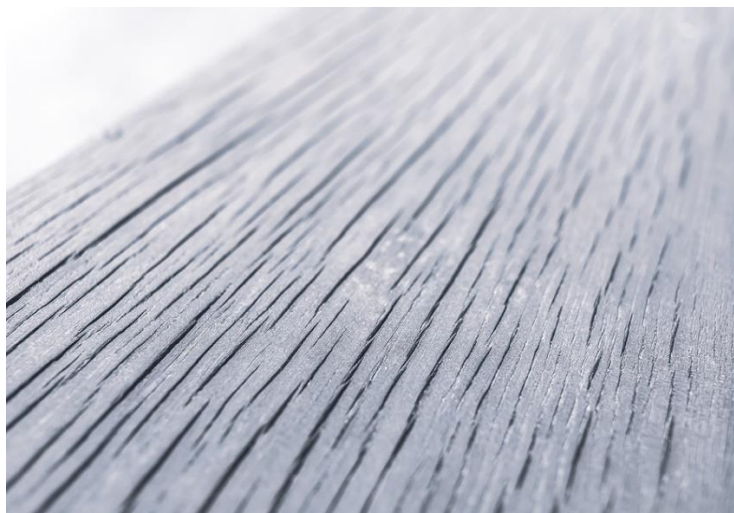


Σχήμα 4.27: Προέκταμα σε προϊόν έγχυσης στην περιοχή της γραμμής διαχωρισμού λόγω ανεπαρκούς δύναμης σύσφιξης [21]

Σε κάθε περίπτωση, για να αποτραπεί η δημιουργία του προεκτάματος θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην σωστή συναρμολόγηση του καλουπιού στο μηχανουργείο, ελέγχοντας την σύνδεση των πλακών με τα μέρη του καλουπιού. Οποσδήποτε, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί αν η δύναμη σύσφιξης είναι υψηλή σε σχέση με την πίεση έγχυσης, τηρουμένων των αναλογιών που προτείνει ο κατασκευαστής της μηχανής, προκειμένου να περιοριστεί η ροή του υλικού έξω από την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού.

4.12.8 Αποκόλληση

Αποκόλληση ονομάζεται η αστοχία κατά την οποία το τελικό προϊόν έγχυσης σπάει σε φλοιούς (Σχήμα 4.28). Παρατηρείται ως μία λεπτή επιφάνεια στρώματος που αφαιρείται εύκολα από το τελικό προϊόν λόγω της κακής ανάμειξης υλικών αποτρέποντας την ανάπτυξη ισχυρών δεσμών συγκράτησης. Σίγουρα, συνιστά σοβαρή αστοχία, καθώς μειώνεται σημαντικά η μηχανική αντοχή του τελικού προϊόντος έγχυσης. Η κύρια αιτία της αποκόλλησης δεν οφείλεται μόνο στη κακή ανάμειξη των υλικών που χρησιμοποιούνται, αλλά και στην ύπαρξη υγρασίας στο υλικό καθώς και στην υπερβολική συρρίκνωσή του κατά τη διαδικασία της ψύξης. Για την αντιμετώπιση της αστοχίας αυτής απαιτείται η αύξηση της θερμοκρασίας του καλουπιού ή η προθέρμανση του τήγματος ή / και της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, εφόσον το πρόβλημα έγκειται στην υγρασία του υλικού.



Σχήμα 4.28: Σπασμένοι φλοιοί στην εξωτερική επιφάνεια ενός τελικού προϊόντος έγχυσης που υποδηλώνουν αποκόλληση του πολυμερούς τήγματος κατά την στερεοποίησή του [22]

4.12.9 Σημάδια καύσης

Τα σημάδια καύσης σημειώνονται στην εξωτερική επιφάνεια των προϊόντων έγχυσης ως αποχρωματισμοί, συνήθως σε χρώμα σκουριάς ή σε μαύρο χρώμα (Σχήμα 4.29). Πέραν της οπτικής δυσαρμονίας που είναι ζήτημα αισθητικής, η συγκεκριμένη ατέλεια δεν επηρεάζει την ακεραιότητα του προϊόντος. Ωστόσο, εάν η καύση είναι σε βαθμό αλλοίωσης ή υποβάθμισης, τότε συνιστά κατασκευαστική ατέλεια και μάλιστα βαρύνουσας σημασίας. Κυρίως, τα σημάδια αυτά προκαλούνται είτε από την υποβάθμιση του πλαστικού υλικού λόγω υπερθέρμανσης είτε από υπερβολικά γρήγορες ταχύτητες ροής. Επίσης, είναι πιθανό να προκληθούν σημάδια καύσης από την υπερθέρμανση του παγιδευμένου αέρα στην κοιλότητα μορφοποίησης ο οποίος, εξαιτίας της υψηλής πίεσης, χαράσσει τμήμα της επιφάνειας του τελικού προϊόντος.



Σχήμα 4.29: Σημάδια καύσης στην εξωτερική επιφάνεια ενός τελικού προϊόντος έγχυσης λόγω αυτανάφλεξης του πολυμερούς τήγματος κατά την φάση της συμπίεσης [23]

Ως προς την εξάλειψη δε των σημαδιών καύσης, θα πρέπει αρχικά να μειωθεί η ταχύτητα ροής ή / και η πίεση έγχυσης. Έπειτα, θα μπορούσε να βελτιωθεί περαιτέρω η εξαέρωση του καλουπιού, με

σκοπό την πλήρη απαγωγή των παγιδευμένων αερίων (air-traps). Τέλος, καλό θα ήταν να μειωθούν οι θερμοκρασίες τήγματος ή / και καλουπιού, ώστε να μην υπερθερμανθούν τόσο το τήγμα όσο και ο τυχόν παγιδευμένος αέρας.

5. Δημιουργία περιέκτη συσκευασίας τροφίμων με χύτευση με έγχυση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί η δημιουργία ενός πλαστικού περιέκτη τροφίμων με τη διαδικασία της χύτευσης με έγχυση σε συνεργασία με την εταιρία INOVA AEBE και θα αναλυθεί η πλήρης διαδικασία μέχρι την παραγωγή του. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει ανάλυση για :

- τον κατάλληλο σχεδιασμό του καλουπιού ώστε να είναι γρήγορη και σωστή η διαδικασία της έγχυσης,
- την επιλογή του κατάλληλου υλικού ώστε να τηρούνται οι προδιαγραφές του όπως οι διαστάσεις και το βάρος.

5.1 Μελέτη περίπτωσης πλαστικού περιέκτη τροφίμων

Σκοπός αυτής της μελέτης περίπτωσης είναι να διερευνηθεί η διαδικασία χύτευσης με έγχυση για την παραγωγή ενός πλαστικού περιέκτη ειδικά σχεδιασμένου για εφαρμογές επαφής με τρόφιμα. Η μελέτη θα περιλαμβάνει :

- ✓ τον σχεδιασμό του εξαρτήματος και του καλουπιού αυτού με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού σχεδίασης με χρήση H/Y Fusion360 και
- ✓ τη διεξαγωγή μιας σειράς από αναλύσεις ροής χρησιμοποιώντας το εμπορικό λογισμικό ανάλυσης ροής σε καλούπια μέσω Πεπερασμένων Στοιχείων Moldex3D χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο πλαστικό υλικό βιομηχανικού τύπου (πολυπροπυλένιο – PP) από συγκεκριμένη εταιρεία.

Η **μεθοδολογία** που θα χρησιμοποιηθεί, είναι η ακόλουθη :

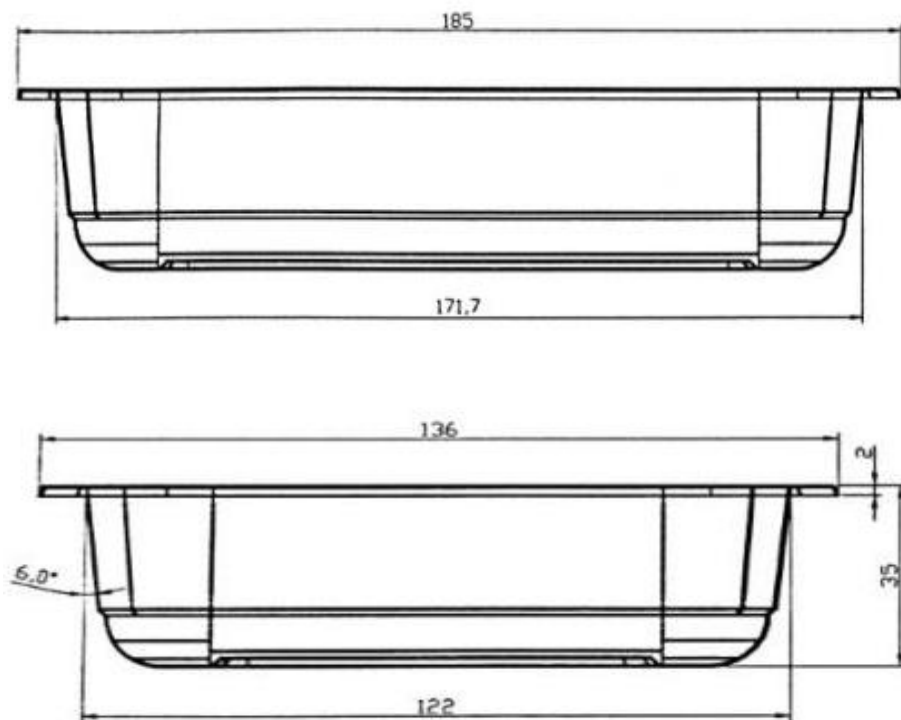
- 1) Αφού σχεδιαστεί ο περιέκτης, θα ακολουθήσει η ανάλυση της ροής του υλικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού.
- 2) Σε περιβάλλον FEA, θα αναλυθούν οι ιδιότητες του υλικού, οι συνθήκες επεξεργασίας και τα πιθανά ελαττώματα όπως παγίδες αέρα (air-traps), γραμμές συγκόλλησης (weld lines) ή σημάδια / γραμμές ροής (flow marks / lines).
- 3) Κατόπιν εντοπισμού των αντίστοιχων ελαττωμάτων και ατελειών, θα επιχειρηθεί βελτίωση των παραμέτρων έγχυσης όπως η ταχύτητα έγχυσης, η πίεση και η θερμοκρασία διά της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπημένη και ομοιόμορφη πλήρωση της κοιλότητας με ελάχιστο χρόνο κύκλου.
- 4) Τέλος, θα σχεδιαστεί το καλούπι, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του προϊόντος, βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, με το βέλτιστο σύστημα εκτίναξης, τα βέλτιστα κανάλια ψύξης και τον βέλτιστο εξαερισμό.

Αναμφίβολα, η βιομηχανία συσκευασίας τροφίμων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην κατάλληλη επιλογή υλικών. Η σωστή επιλογή υλικών για έναν περιέκτη συνιστά έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για τον σχεδιασμό του. Τα πλαστικά προσφέρουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα έναντι των «ανταγωνιστών» τους, ήτοι το γυαλί ή το χαρτί, όπως :

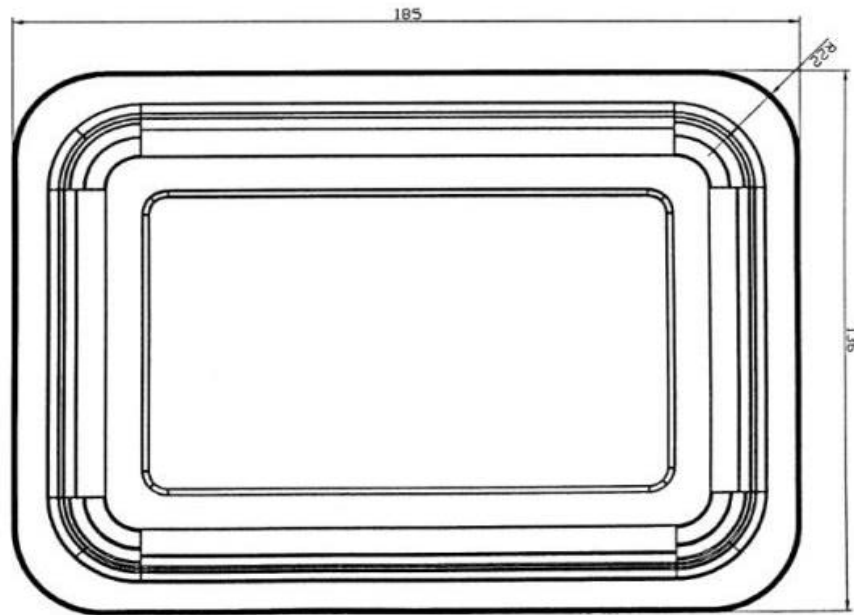
- μειωμένο βάρος: Το βάρος του περιέκτη είναι μικρότερο από αυτό του αντίστοιχου περιέκτη από γυαλί και σχεδόν το ίδιο με τον αντίστοιχο περιέκτη από χαρτί.

- οικονομική αποτελεσματικότητα: Το κόστος των πλαστικών είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το χαρτί ή το γυαλί.
- ασφάλεια: Ο πλαστικός περιέκτης έχει μεγαλύτερη αντοχή από το χαρτί και ταυτόχρονα είναι πιο εύκαμπτος σε σχέση με τον γυάλινο περιέκτη αποτρέποντας σπασίματα και ρωγμές.
- ανακυκλωσιμότητα και βιωσιμότητα: Για τα πλαστικά και τα σύνθετα υλικά υπάρχει πλήθος από επιλογές ανακύκλωσης για προϊόντα συσκευασίας, γεγονός το οποίο αυτόματα μεταφράζεται σε χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα, λιγότερα απόβλητα και χαμηλότερη ρύπανση εν συγκρίσει με τα μεταλλικά εξαρτήματα.

Στην παρούσα εργασία ο περιέκτης στον οποίο θα γίνει η ανάλυση για την δημιουργία του με χύτευση με έγχυση με διαστάσεις του να είναι $185 \times 136 \times 35$ mm (Σχήμα 6.1α και Σχήμα 6.1β) με πάχος τοιχώματος στα 0.6 mm,



Σχήμα 6.1α : Οι πλάγιες όψεις του περιέκτη και οι διαστάσεις αυτού



Σχήμα 6.1β : Η κάτω όψη του περιέκτη και οι διαστάσεις του

5.2 Σχεδιασμός καλουπιού

Ο σχεδιασμός ενός καλουπιού, που θα χρησιμοποιηθεί για χύτευση με έγχυση αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία πρέπει να τηρεί ορισμένες προϋποθέσεις. Οι προϋποθέσεις αυτές είναι οι εξής :

- ❖ ο υπολογισμός και μετέπειτα η διανομή της μάζας του πολυμερούς τήγματος,
- ❖ η μορφοποίηση, η ψύξη και η εξόλκευση του τελικού προϊόντος έγχυσης,
- ❖ ο υπολογισμός των δυνάμεων και ο καθορισμός της κινηματικής των αντίστοιχων μερών και διατάξεων και κινήσεων και
- ❖ η ορθή και ακριβής οδήγηση του καλουπιού που θα εξασφαλίζει τη βιωσιμότητα και τη χρηστικότητα του μακροπρόθεσμα.

Βεβαίως, τα σύγχρονα σχεδιαστικά προγράμματα CAD δίδουν τη δυνατότητα της τρισδιάστατης μοντελοποίησης στον Σχεδιαστή ή τον Μηχανικό, διευκολύνοντας την πολύπλοκη αυτή διαδικασία. Επομένως, με τη βοήθεια των CAD εργαλείων αλλά και χάρη στην ενοποίηση αυτών με τα διάφορα CAE εργαλεία, καθίσταται ευκολότερη όχι μόνο η κατασκευή ή η συναρμολόγηση των διάφορων μερών του καλουπιού, αλλά μπορούν να εξαχθούν και να αναλυθούν πολύτιμα συμπεράσματα για την καλύτερη δυνατή παραγωγή.

5.3 Το λογισμικό Moldex3D

Το λογισμικό Moldex3D είναι μια λύση CAE (Computer-Aided Engineering) που έχει σχεδιαστεί ειδικά για διαδικασίες χύτευσης πλαστικού με έγχυση. Παρέχει στους μηχανικούς και τους σχεδιαστές ισχυρά εργαλεία για την ανάλυση, τη βελτιστοποίηση και την επικύρωση των σχεδίων τους, βελτιώνοντας τελικά την ποιότητα των προϊόντων και μειώνοντας τον χρόνο διοχέτευσης αυτών στην αγορά.

Το Moldex3D αποτελεί μια πλατφόρμα προσομοίωσης της πλήρους διαδικασίας χύτευσης με έγχυση, από το αρχικό στάδιο πλήρωσης του καλουπιού έως τις φάσεις συμπίεσης και ψύξης, δίνοντας παράλληλα τη δυνατότητα μελέτης της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος έγχυσης μετά την απομάκρυνσή του από το καλούπι. Το εν λόγω λογισμικό ενσωματώνει προηγμένους αλγόριθμους και αριθμητικές μεθόδους για την ακριβή πρόβλεψη διαφόρων φαινομένων χύτευσης, επιτρέποντας στους Μηχανικούς να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις και να αποφεύγουν δαπανηρές επαναλήψεις σχεδιασμού.

Μία από τις βασικές δυνατότητες του Moldex3D είναι η ικανότητά του να προσομοιώνει τη διαδικασία πλήρωσης του καλουπιού. Προβλέπει με ακρίβεια τη συμπεριφορά ροής του λιωμένου πλαστικού μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού, επιτρέποντας στους Μηχανικούς να εντοπίσουν πιθανά ζητήματα όπως ανισορροπίες ροής, παγιδευμένο αέρα, γραμμές συγκόλλησης και άλλα. Οπτικοποιώντας τα μοτίβα ροής και αναλύοντας τον χρόνο πλήρωσης, το Moldex3D βοηθά τους Μηχανικούς να αποφαίνονται για την ανάγκη ανατοποθέτησης των πυλών εισόδου ή τον πιθανό επανασχεδιασμό των δρομέων και των συστημάτων ψύξης, οδηγώντας σε πιο αποτελεσματικές και στιβαρές διαδικασίες χύτευσης.

Εκτός από την προσομοίωση πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού, το Moldex3D προσφέρει επίσης δυνατότητες πρόβλεψης συρρίκνωσης εξαρτημάτων, παραμόρφωσης και υπολειπόμενης τάσης. Αυτοί οι παράγοντες είναι κρίσιμοι για τον προσδιορισμό της τελικής ακρίβειας των διαστάσεων του χυτευμένου εξαρτήματος και των μηχανικών ιδιοτήτων του. Με την προσομοίωση των σταδίων ψύξης και στερεοποίησης, το Moldex3D βοηθά τους μηχανικούς να εντοπίσουν πιθανά ζητήματα παραμόρφωσης και να βελτιστοποιήσουν τα σχέδια καλουπιών και καναλιών ψύξης για να επιτύχουν την επιθυμητή ποιότητα εξαρτήματος.

5.4 Μελέτη προϊόντος

Η μελέτη του εν λόγω προϊόντος ως προς τη συμπεριφορά ροής του πολυμερούς τήγματος κατά την έγχυσή του εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού γίνεται σε τρία διαδοχικά στάδια : α) Προ-επεξεργασία, β) Διεργασία και γ) Μετα-επεξεργασία (Post-Process). Στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί παρατίθενται επιγραμματικά τα στάδια αυτά και τα επιμέρους βήματα που εκτελούνται διαδοχικά σε κάθε στάδιο.

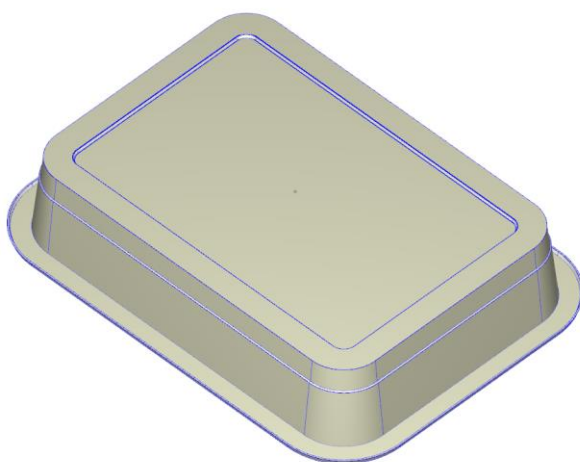
Βήματα	Προ-επεξεργασία	Διεργασία	Μετά-επεξεργασία
1	Εισαγωγή τρισδιάστατου μοντέλου (.stl) & έλεγχος για πιθανές	Εισαγωγή συγκεκριμένου τύπου πολυμερούς από την βιβλιοθήκη του	Ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων πλήρωσης

	ατέλειες	Moldex3D	
2	Σχεδιασμός των πυλών εισόδου του πολυμερούς (gates) & των καναλιών ψύξης (Ψύξη channels)	Καθορισμός των πρωτογενών τιμών των παραγόντων έγχυσης (πίεση έγχυσης, θερμοκρασία τήξης κλπ)	Ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων συγκράτησης
3	Σχεδιασμός της καλουπιέρας (moldbase)	Παραμετροποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας	Ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων ψύξης
4	Δημιουργία 3D πλέγματος (3D mesh) στο προς μελέτη προϊόν	Καθορισμός της σειράς των εργασιών (κύκλου έγχυσης) που θα ακολουθήσουν	Ανάλυση αποτελεσμάτων της στρέβλωσης
5	Έλεγχος πλέγματος και αποθήκευση		

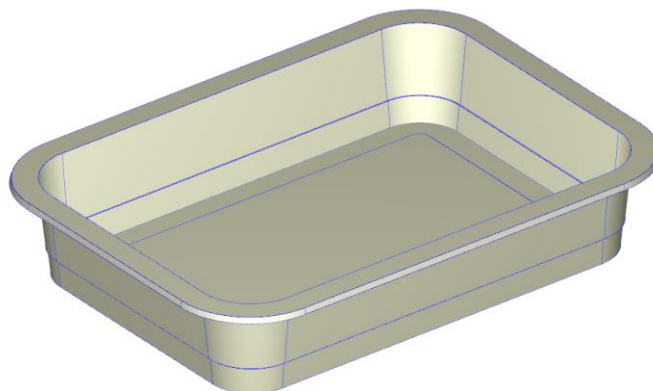
Πίνακας 6.1 : Τα στάδια της μελέτης του προϊόντος έγχυσης στο περιβάλλον του Moldex3D

5.4.1.α Προ-επεξεργασία – Βήμα 1 : Εισαγωγή 3D μοντέλου

Η απαρχή του στησίματος της μελέτης μέσα στο περιβάλλον του Moldex3D γίνεται με την εισαγωγή του 3D μοντέλου του τελικού προϊόντος έγχυσης (Σχήμα 6.2α και Σχήμα 6.2β) σε κάποια ουδέτερη μορφή (parasolid). Κατόπιν, διενεργείται έλεγχος για τυχόν ατέλειες στο εισαχθέν αρχείο (π.χ. κενά μεταξύ των επιφανειών, αλληλοεπικάλυψη επιφανειών κλπ) οι οποίες και επιδιορθώνονται με τη βοήθεια σχετικών εργαλείων.



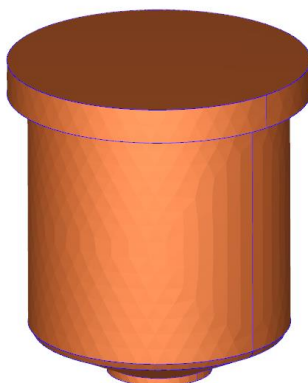
Σχήμα 6.2α : Το εισαχθέν 3D μοντέλο του περιέκτη στο περιβάλλον του Moldex3D.



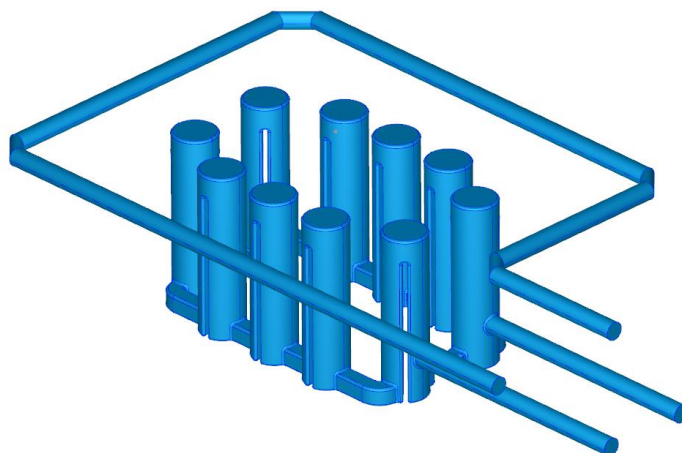
Σχήμα 6.2β : Το εισαχθέν 3D μοντέλο του περιέκτη στο περιβάλλον του Moldex3D.

5.4.1.β Προ-επεξεργασία – Βήμα 2 : Σχεδιασμός πυλών εισόδου και καναλιών ψύξης

Εν συνεχεία, σχεδιάζονται τόσο η θερμή πύλη εισόδου τύπου sprue στην άνω ελεύθερη επιφάνεια του του περιέκτη (Σχήμα 6.3α) όσο και τα κανάλια ψύξης του καλουπιού (Σχήμα 6.3β). Η μεν πύλη εισόδου είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η κατά το δυνατόν ομοιόμορφη πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού στον ελάχιστο δυνατό χρόνο χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος διαίρεσης του μετώπου ροής σε επιμέρους μέτωπα. Τα δε κανάλια ψύξης είναι σχεδιασμένα κατά τέτοιον τρόπο ώστε να περιβάλλουν το τελικό προϊόν έγχυσης σε όλη την έκτασή του. Αυτό μεταφράζεται αυτομάτως σε όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη ψύξη του καλουπιού η οποία με τη σειρά της θα οδηγήσει σε μικρότερες και πιο ομοιόμορφες ογκομετρικές συρρικνώσεις και, κατ' επέκταση, σε μικρότερης έκτασης στρεβλώσεις.



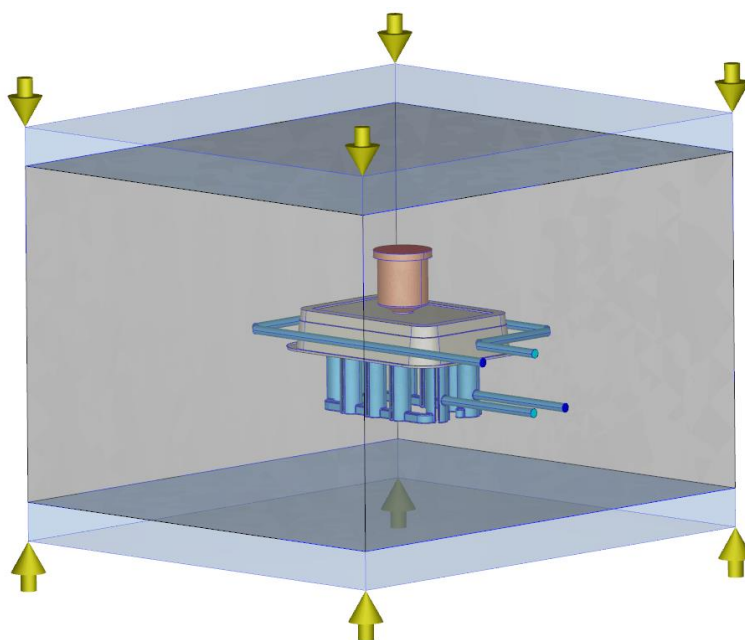
Σχήμα 6.3α : Θερμή πύλη εισόδου τύπου sprue στο κέντρο της άνω ελεύθερης επιφάνειας του περιέκτη



Σχήμα 6.3β : Σύστημα ψύξης αποτελούμενο από απλά κανάλια (πάνω) και κανάλια τύπου baffles. σχεδιασμένο έτσι ώστε να περιβάλλει πλήρως το τελικό προϊόν έγχυσης

5.4.1.γ Προ-επεξεργασία – Βήμα 3 : Σχεδιασμός καλουπιέρας

Σε αυτό το στάδιο σχεδιάζεται η καλουπιέρα (moldbase), δηλαδή ο 3D όγκος που περιβάλλει το τελικό προϊόν έγχυσης, την πύλη εισόδου και το σύστημα ψύξης του καλουπιού (Σχήμα 6.4). Δεδομένου ότι το τελικό προϊόν έγχυσης ισοδυναμεί με την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού, δεν απαιτείται κάτι πιο πολύπλοκο πέρα από ένα παραλληλεπίπεδο καθορισμένων διαστάσεων που περιβάλλει όλα τα υπόλοιπα προκειμένου η μελέτη να στηθεί σωστά. Η μελέτη μπορεί να στηθεί και με διαφορετική προσέγγιση, δηλαδή εισάγοντας ολόκληρη τη συναρμολόγηση του καλουπιού με τα επιμέρους εξαρτήματα. Εντούτοις, δεν είναι κάτι που θα αποτελέσει αντικείμενο διερεύνησης στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Σχήμα 6.4 : Η καλουπιέρα που περιβάλλει το προϊόν έγχυσης, την πύλη εισόδου και το σύστημα ψύξης.

5.4.1.δ Προ-επεξεργασία – Βήμα 4 : Δημιουργία 3D πλέγματος

Στο Moldex3D η δημιουργία και εξαγωγή του συνολικού 3D πλέγματος είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν επιλέγοντας έναν από τους ακόλουθους τύπους 3D πλέγματος που υποστηρίζονται :

❖ eDesign Mode

Ο συγκεκριμένος τύπος 3D πλέγματος υποστηρίζει την κυβική προσέγγιση πλεγματοποίησης σε όλη την έκταση τόσο του μοντέλου του προϊόντος έγχυσης όσο και του συστήματος διανομής. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αυτού συγκαταλέγονται :

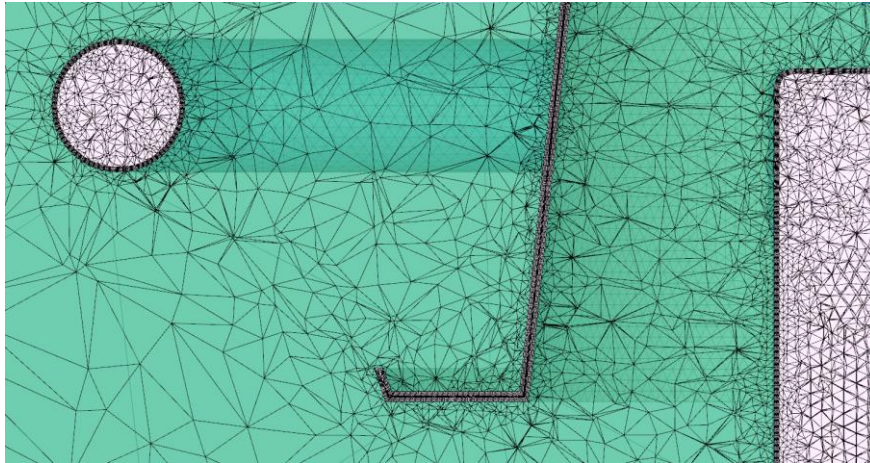
- ✓ η ευκολία και η απλοϊκότητα σε ότι αφορά την χρήση του και
- ✓ η πολύ γρήγορη προ-επεξεργασία της ανάλυσης.

❖ Solid Mode

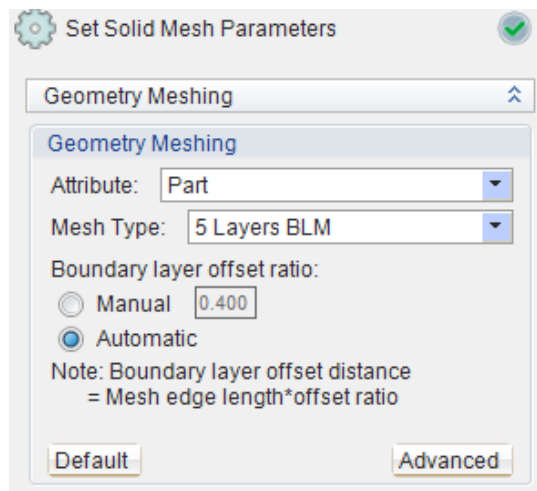
Ο εν λόγω τύπος 3D πλέγματος υποστηρίζει αφενός μεν την πρισματική προσέγγιση του πλέγματος στις εξωτερικές στιβάδες του μοντέλου του προϊόντος έγχυσης, αφετέρου δε την τετραεδρική προσέγγιση στον πυρήνα του. Επίσης, είναι εφικτή η πλεγματοποίηση και των υπόλοιπων κομβικής σημασίας στοιχείων του καλουπιού (πύλη εισόδου / σύστημα διανομής, σύστημα ψύξης και καλουπιέρα) και μάλιστα με διαφορετική πλεγματική δομή μέσω των διαφόρων διαθέσιμων επιλογών. Εξάλλου, μεταξύ των πλεονεκτημάτων του εν λόγω 3D πλέγματος συγκαταλέγονται :

- ✓ ο περιορισμός των ασκούμενων διατμητικών τάσεων (shear stresses) στο πολυμερές τήγμα σε μεγάλο βαθμό,
- ✓ η επίδραση της ιξώδους θέρμανσης (viscous heating) στο λιωμένο πλαστικό και η μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της,
- ✓ η καλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της πίεσης,
- ✓ η καλύτερη πρόβλεψη της στρέβλωσης (warpage) και των κατά τόπους ρουφηγμάτων (sink marks) στο τελικό προϊόν και
- ✓ η δυνατότητα δημιουργίας 3D πλεγμάτων για περίπλοκα εξαρτήματα και εξαρτήματα με πολύ λεπτά τοιχώματα.

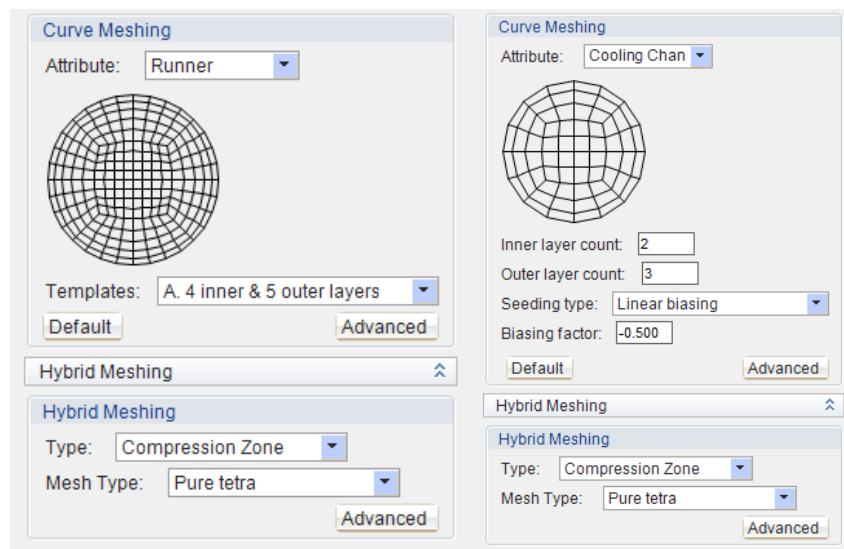
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέγεται ο δεύτερος τύπος 3D πλεγματοποίησης για την εξαγωγή της ανάλογης 3D πλεγματικής δομής για το τελικό προϊόν έγχυσης (Σχήμα 6.5 και Σχήμα 6.6α), της πύλης εισόδου και των καναλιών ψύξης (Σχήμα 6.5 και Σχήμα 6.6β), μια και η εξασφάλιση της μεγαλύτερης δυνατής ακρίβειας στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του κύκλου έγχυσης συνιστά ζήτημα βαρύνουσας σημασίας.



Σχήμα 6.5 : Τομή με τη βοήθεια της οποίας απεικονίζεται η διαφορετική προσέγγιση στη 3D πλεγματοποίηση του τελικού προϊόντος έγχυσης (κέντρο), των καναλιών ψύξης (εντός και εκτός της κοιλότητας μορφοποίησης) και της καλουπιέρας



Σχήμα 6.6α : Καθορισμός παραμέτρων της 3D πλεγματικής δομής του τελικού προϊόντος έγχυσης



Σχήμα 6.6β : Καθορισμός παραμέτρων της 3D πλεγματικής δομής της πύλης εισόδου (αριστερά) και των καναλιών ψύξης (δεξιά)

5.4.1.ε Προ-επεξεργασία – Βήμα 5 : Έλεγχος πλέγματος και αποθήκευση

Εφόσον όλα τα παραπάνω βήματα από το 1^ο έως και το 4^ο εκτελέστηκαν επιτυχώς, πραγματοποιείται ο προκαθορισμένος αυτόματος έλεγχος του 3D πλέγματος από το ίδιο το σύστημα προκειμένου να εντοπιστούν σχετικά σφάλματα. Πρόκειται για μια πρόσθετη δικλείδα ασφαλείας βαρύνουσας σημασίας που αποτρέπει τη διεξαγωγή της εκτέλεσης της ανάλυσης χρησιμοποιώντας ένα 3D πλέγμα με σφάλματα που με τη σειρά τους θα οδηγήσουν τον solver του συστήματος σε αστάθεια και, εν τέλει σε αδυναμία σύγκλισης. Επομένως, κατ' αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται χρόνος από τη μη εκτέλεση αναλύσεων που βασίζονται σε προπαρασκευαστικά σφάλματα.

Στην προκειμένη περίπτωση, μετά και τον ανάλογο έλεγχο, το 3D πλέγμα αποθηκεύεται επιτυχώς και είναι έτοιμο να χρησιμοποιηθεί στα επόμενα προπαρασκευαστικά στάδια της μελέτης (καθορισμός του πλαστικού υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, παραμετροποίηση κατασκευαστικής διεργασίας κλπ.). Στο Σχήμα 6.7 που ακολουθεί, απεικονίζονται συνοπτικά κάποιες πληροφορίες αναφορικά με το μέγεθος τόσο του 3D πλέγματος όσο και του επιφανειακού πλέγματος ως προς τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων, οι διαστάσεις του εξαρτήματος και του καλουπιού καθώς και ο όγκος του εξαρτήματος και του θερμού καναλιού.

Model Details	
Mesh Type	Solid
Solid Mesh Element...	11,775,647
Part	1,973,350
Hot Runner	33,342
Moldbase	3,413,165
Cooling Channel	6,355,790
Surface Mesh Elemen...	348,836
Part	345,842
Runner	2,994
Dimension	mm
Part	186.41x137.41x35.00
Mold	413.24x469.16x300.00
Projection Area	cm ²
In Parting Direction (Z)	246.474
Volume	cc
Part	32.30
Hot Runner	85.31

Σχήμα 6.7 : Συνοπτικός πίνακας πληροφοριών μετά και την επιτυχή ολοκλήρωση του προπαρασκευαστικού σταδίου της προ-επεξεργασίας της μελέτης στο Moldex3D

5.4.2.α Διεργασία – Βήμα 1 : Εισαγωγή πολυμερούς υλικού

Μετά και την επιτυχή ολοκλήρωση του προπαρασκευαστικού σταδίου της προ-επεξεργασίας της μελέτης στο Moldex3D, οπότε και το 3D πλέγμα είναι έτοιμο προς χρήση, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή και ο καθορισμός του πολυμερούς που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της μελέτης. Το εν λόγω χρησιμοποιούμενο πολυμερές είναι πολυπροπυλένιο (PP) και συγκεκριμένα το TAIRIPRP K1035 από τον προμηθευτή Formosa Chemicals & Fibre Corporation. Οι θερμοκρασιακοί και οι λοιποί δείκτες με τα αντίστοιχα εύρη τιμών για το συγκεκριμένο υλικό συγκεντρώνονται στους πίνακες που παρατίθενται στη συνέχεια (Σχήμα 6.8α, Σχήμα 6.8β και Σχήμα 6.8γ) ενώ πρόσθετες

πληροφορίες μπορούν να αντληθούν και από τους πίνακες και τα γραφήματα που βρίσκονται στο παράρτημα στο τέλος.

Σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι οι ιδιότητες του κάθε υλικού είναι μοναδικές. Παρότι δύο υλικά μπορεί να είναι ίδια ως προς την ονομασία καταλόγου, ενδέχεται να έχουν διαφορετικές ιδιότητες καθώς μπορεί να διοχετεύονται στην αγορά από δύο ή περισσότερους διαφορετικούς προμηθευτές. Επομένως, για την εξαγωγή όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων στο Moldex3D, κρίνεται απαραίτητη η επιλογή του υλικού που χρησιμοποιείται επακριβώς στην παραγωγική διαδικασία. Εφόσον το συγκεκριμένο υλικό δεν βρίσκεται καταχωρημένο στη βιβλιοθήκη υλικών του Moldex3D για διάφορους λόγους, τότε και μόνον τότε επιλέγεται ένα παρόμοιο σε ιδιότητες υλικό κάνοντας, ταυτόχρονα, έναν συμβιβασμό ως προς την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων.

Item Name	Item Data
Polymer	PP
Grade Name	TAIRIPRP K1035
Producer	Formosa Chemicals & Fibre Corporation
Ejection Temperature	114 °C
Freeze Temperature	120 °C
Glass Transition Temperature	127 °C

Σχήμα 6.8α : Συνοπτικός πίνακας πληροφοριών του πλαστικού που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη στο Moldex3D

Item Name	Item Data
Melt Temperature (minimum)	200 °C
Melt Temperature (normal)	245 °C
Melt Temperature (maximum)	290 °C
Melt Temperature Range	200~290 °C
Mold Temperature (minimum)	30 °C
Mold Temperature (normal)	40 °C
Mold Temperature (maximum)	50 °C
Mold Temperature Range	30~50 °C

Σχήμα 6.8β : Συνοπτικός πίνακας πληροφοριών του πλαστικού που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη στο Moldex3D

Item Name	Item Data
Melt Flow Index	38 g/10min
Temperature	230 °C
Load	2.16 kg
Melt Volume-Flow Rate	42.2222 cm ³ /10min
Temperature	230 °C
Load	2.16 kg

Σχήμα 6.8γ : Συνοπτικός πίνακας πληροφοριών του πλαστικού που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη στο Moldex3D

5.4.2.β Διεργασία – Βήμα 2 : Παραμετροποίηση κατασκευαστικής διαδικασίας

Σε αυτό το βήμα, μετά και την επιλογή του πολυμερούς υλικού, λαμβάνει χώρα η παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διαδικασίας. Θα πρέπει να οριστούν παραμετροί σε βασικούς παράγοντες, όπως η μέγιστη πίεση έγχυσης και η μέγιστη πίεση συμπίεσης / συγκράτησης, η ταχύτητα ροής, ο χρόνος έγχυσης, ο χρόνος συμπίεσης / συγκράτησης και ο χρόνος ψύξης. Οι εν λόγω παράμετροι εντάσσονται στις εξής ομάδες :

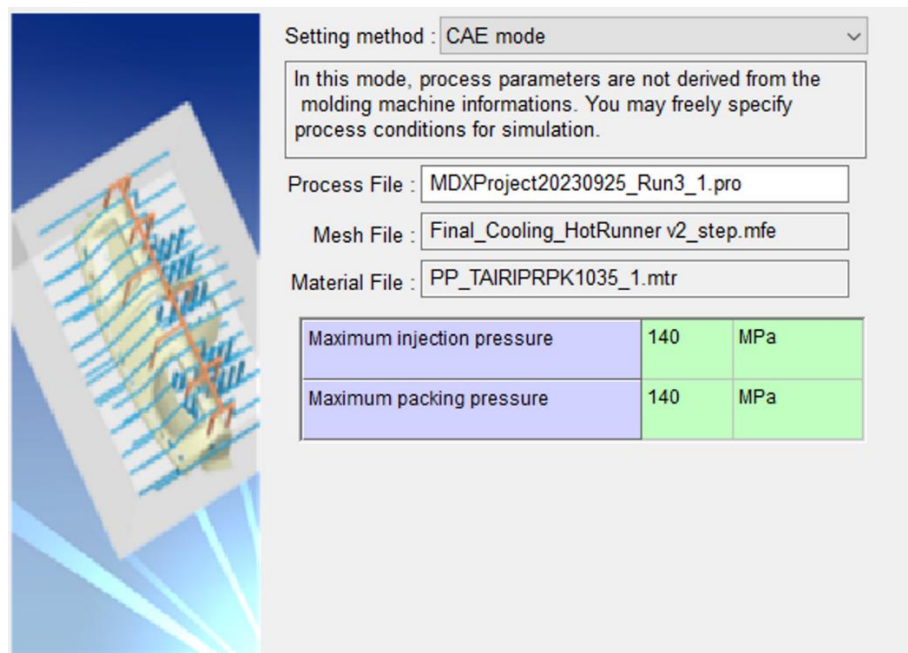
- **Project Settings** (Ρυθμίσεις έργου)
- **Filling / Packing Settings** (Ρυθμίσεις Πλήρωσης / Συγκράτησης)
- **Ψύξη Settings** (Ρυθμίσεις Ψύξης)
- **Summary** (Περίληπτική Ανασκόπηση)

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όλες οι τιμές των παραμέτρων προκαθορίζονται αρχικά από το ίδιο το λογισμικό βάσει α) της γεωμετρίας του προϊόντος από το οποίο προκύπτει η κοιλότητα και ο πυρήνας, β) του συστήματος της διανομής και ψύξης του καλουπιού, γ) των ιδιοτήτων του πολυμερούς υλικού που έχει επιλεγεί και δ) του εκάστοτε 3D πλέγματος που έχει προκύψει. Ειδικότερα δε για το 3D πλέγμα να τονιστεί πως όσο πιο πυκνό είναι, τόσο καλύτερος και πιο στοχευμένος είναι ο προκαθορισμός των τιμών αυτών.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος και αφού γίνουν ικανοποιητικές σε αριθμό δοκιμές, δύναται να εξαχθούν τα συμπεράσματα του για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα έγχυσης. Συνοψίζοντας, οι παράμετροι σε κάθε ομάδα καθορίζονται επαναληπτικά ως εξής :

- **Project Settings** (Ρυθμίσεις έργου)

Στις αρχικές ρυθμίσεις του έργου γίνεται επιλογή της μεθόδου προσέγγισης της κατασκευαστικής διεργασίας ώστε να χτιστούν αντίστοιχα οι προσομοιώσεις των φάσεων πλήρωσης, συγκράτησης και ψύξης αλλά και της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος. Χάριν συντομίας, η μέθοδος προσέγγισης που επιλέγεται είναι η CAE mode. Τέλος, οριοθετούνται οι μέγιστες πιέσεις έγχυσης και συγκράτησης (maximum injection/packing pressure) στα **140 MPa** η καθεμία (Σχήμα 6.9).



Σχήμα 6.9 : Αρχικές ρυθμίσεις έργου στο Moldex3D

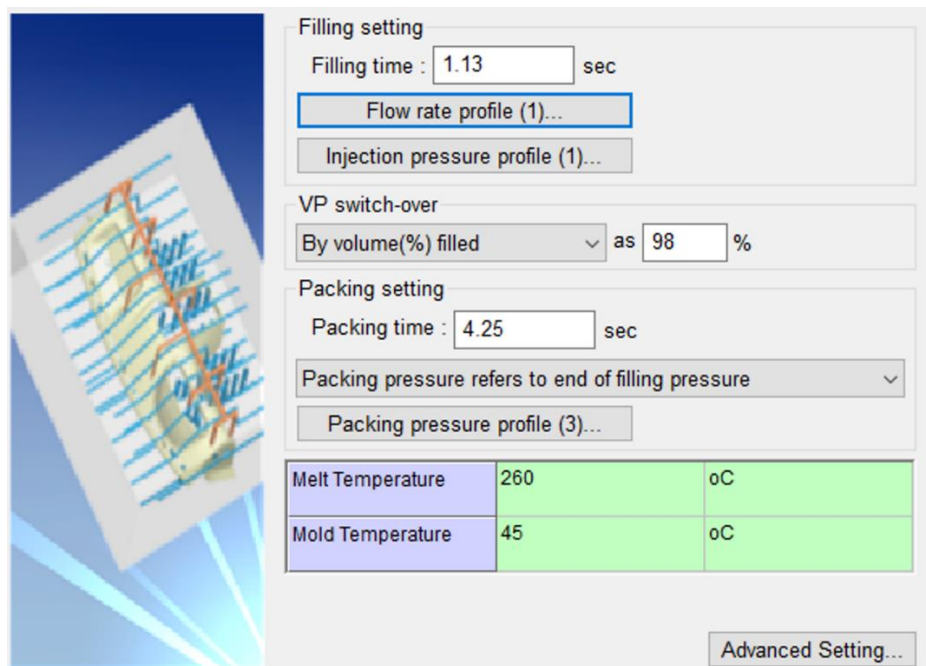
- **Filling / Packing Settings** (Ρυθμίσεις Πλήρωσης / Συγκράτησης)

Στις ρυθμίσεις πλήρωσης / συγκράτησης (Σχήμα 6.10) καθορίζονται :

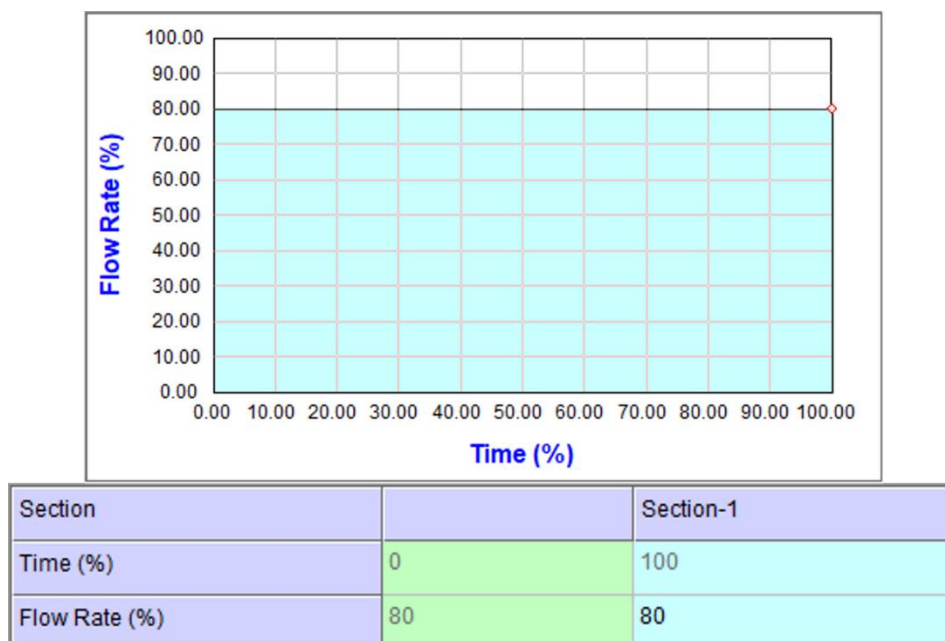
- ο χρόνος πλήρωσης (filling time) στα **1.13 sec**. Πρόκειται για τον απαιτούμενο χρόνο πλήρους γεμίσματος της κοιλότητας μορφοποίησης με λιωμένο πλαστικό.
- το ποσοστό μετάβασης (VP switchover) στο **98%**, κάτω του **100%**. Ποσοστό μετάβασης που ανέρχεται στο 100 % μεταφράζεται σε μη έλεγχο της ταχύτητας ροής του λιωμένου πλαστικού και της πίεσης που ασκείται επ' αυτού. Πρόκειται για συνθήκη μη ρεαλιστική δεδομένου ότι η μηχανή έγχυσης χρειάζεται ένα «μαξιλάρι» ασφαλείας για να απομακρυνθεί ο κίνδυνος πρόκλησης ζημιάς.
- το προφίλ της ταχύτητας ροής (flow rate profile) σταθερό ως προς το αντίστοιχο ποσοστό του χρόνου πλήρωσης που ρυθμίστηκε προηγούμενα, ξεκινώντας από το 0 και φθάνοντας σταδιακά στο 100 % (Σχήμα 6.11)
- το προφίλ της πίεσης έγχυσης (injection pressure profile). Να σημειωθεί ότι εφόσον η πίεση έγχυσης στα αποτελέσματα της προσομοίωσης της φάσης πλήρωσης δεν προσεγγίζει τα όρια της αρχικά ορισμένης μέγιστης πίεσης έγχυσης (**140 MPa**) για διάφορους λόγους (γεωμετρία προϊόντος έγχυσης ή/και γεωμετρία συστήματος διανομής που προκαλούν πτώση πίεσης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης), δεν παρίσταται η ανάγκη μεταβολής του προφίλ της πίεσης έγχυσης από το 100 % σε χαμηλότερα ποσοστά (Σχήμα 6.12).
- ο χρόνος συμπίεσης (packing time) στα **4.25 sec**. Πρόκειται για τη διάρκεια της φάσης της συμπίεσης του λιωμένου πλαστικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης.
- η αναφορά της πίεσης συγκράτησης (packing pressure reference) ως προς το τέλος της πίεσης πλήρωσης (filling pressure).
- το προφίλ της πίεσης συγκράτησης (packing pressure profile). Κατά κοινή διαπίστωση, η αποδοτικότερη πίεση συγκράτησης ξεκινά συνήθως από το **80+ %** της πίεσης που έχει αναπτυχθεί

στο τέλος της φάσης πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης και μπορεί να αγγίξει έως και το **100%** αυτής. Με αυτό το δεδομένο και κατόπιν δοκιμών, το προφίλ της πίεσης συγκράτησης χωρίζεται σε τέσσερα επιμέρους τμήματα όπου η πίεση συγκράτησης μειώνεται σταδιακά από το **82.5%** της πίεσης έγχυσης τη χρονική στιγμή $t_0 = 0 \text{ sec}$ έως το **55%** αυτής τη χρονική στιγμή $t_4 = 4.25 \text{ sec}$ (Σχήμα 6.13).

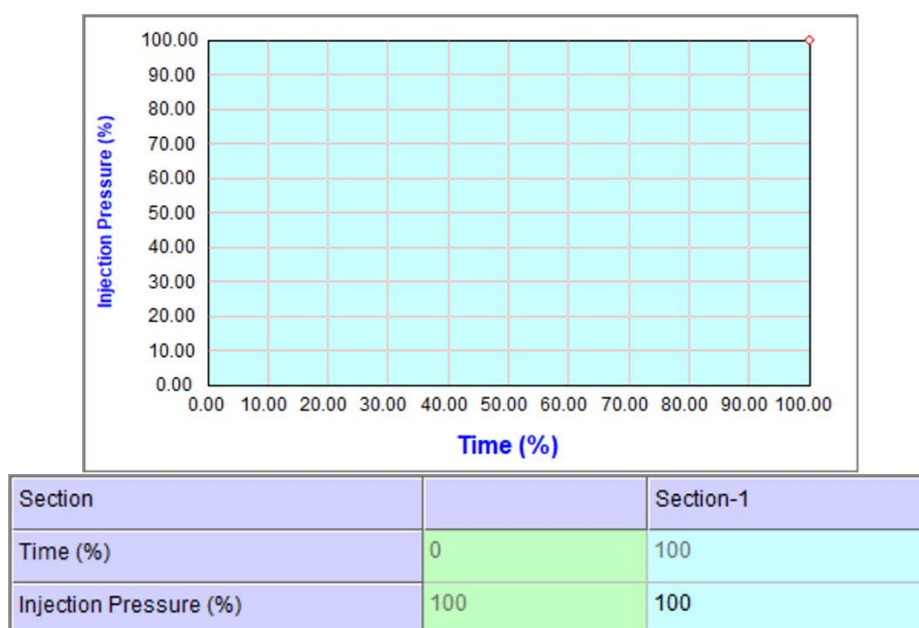
- η θερμοκρασία του λιωμένου πλαστικού (melt temperature) στους **260 °C**. Πρόκειται για την θερμοκρασία του λιωμένου πλαστικού κατά την είσοδό του στο 3D πλέγμα του συστήματος διανομής και έπειτα στο 3D πλέγμα της κοιλότητας μορφοποίησης (3D πλέγμα μοντέλου προϊόντος έγχυσης). Διαφέρει από τη θερμοκρασία του τήγματος εντός του κυλίνδρου πλαστικοποίησης (barrel temperature) και συγκεκριμένα από τη θερμοκρασία στο ακροφύσιο, καθώς η εν λόγω θερμοκρασία ενδέχεται να αυξηθεί λόγω της ιξώδους θέρμανσης (viscous heating).
- η θερμοκρασία του καλουπιού (mold temperature) στους **45 °C**. Οποσδήποτε, η θερμοκρασία του καλουπιού θα πρέπει να είναι υψηλότερη από τη χαμηλότερη θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού. Σημειωτέον ότι η θερμοκρασία του καλουπιού γενικά κατανέμεται μη ομοιόμορφα.



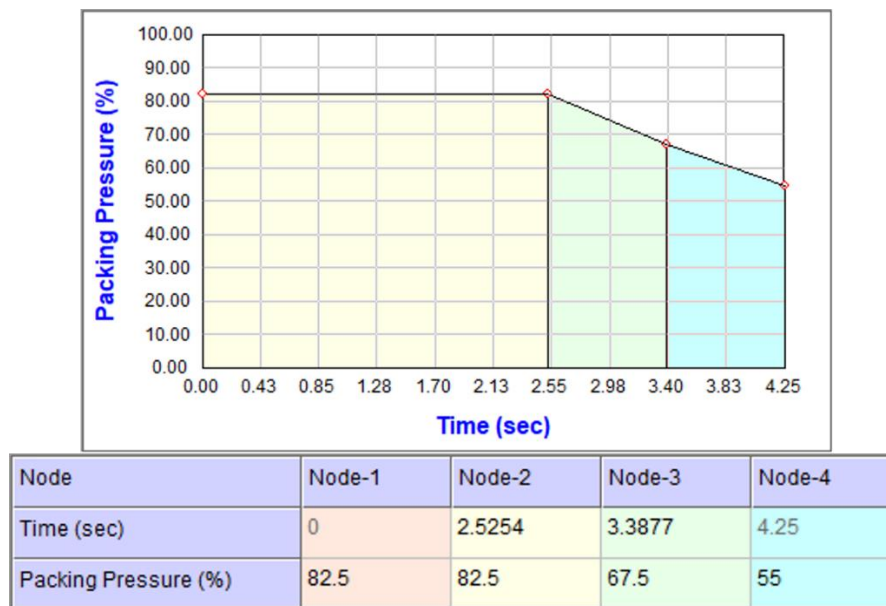
Σχήμα 6.10 : Αρχικές ρυθμίσεις έργου στο Moldex3D



Σχήμα 6.11 : Το προφίλ της ταχύτητας ροής στο Moldex3D



Σχήμα 6.12 : Το προφίλ της πίεσης έγχυσης στο Moldex3D

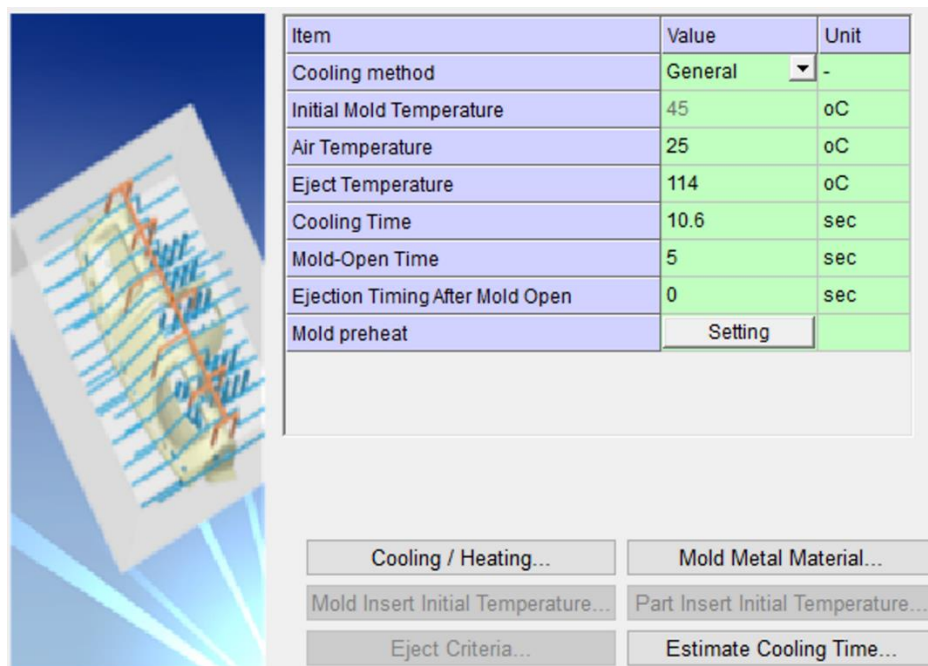


Σχήμα 6.13 : Το προφίλ της πίεσης συγκράτησης στο Moldex3D

- Ψύξη Settings (Ρυθμίσεις Ψύξης)

Στις ρυθμίσεις πλήρωσης / συγκράτησης (Σχήμα 6.14) καθορίζονται :

- η μέθοδος ψύξης. Επιλέγεται η μέθοδος μέσου κύκλου (cycle average method) η οποία υπολογίζει κατά παραδοχή (θερμοκρασία κάθε καναλιού ψύξης και ογκομετρική ταχύτητα ροής αμετάβλητες) τη μέση θερμοκρασία καλουπιού (mold temperature) ενόσω διαρκεί ένας πλήρης κύκλος έγχυσης, παρέχοντας έτσι μια απλοποιημένη επιλογή ρύθμισης ψύξης.
- η θερμοκρασία δωματίου (air temperature) στους **25 °C**. Η θερμοκρασία δωματίου είναι επίσης η τελική θερμοκρασία του εξολκευμένου προϊόντος και επηρεάζει το αποτέλεσμα της στρέβλωσης αυτού.
- η θερμοκρασία εξόλκευσης (eject temperature) στους **114 °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 (Ψύξη time) στα **10.6 sec**.
- ο χρόνος ανοίγματος του καλουπιού (mold-open time) στα 5 sec.



Σχήμα 6.14 : Ρυθμίσεις ψύξης στο Moldex3D

- Summary (Περίληπτική Ανασκόπηση)

Εδώ παρατίθενται συνοπτικά όλες οι τιμές που έχουν εκχωρηθεί προηγουμένως σε κάθε παράμετρο της κατασκευαστικής διεργασίας (Σχήμα 6.15).

[Filling]	
Filling time (sec)	1.13
Melt Temperature (oC)	260
Mold Temperature (oC)	45
Maximum injection pressure (MPa)	140
Injection volume (cm^3)	32.3035
[Packing]	
Packing time (sec)	4.25
Maximum packing pressure (MPa)	140
[Cooling]	
Cooling Time (sec)	10.6
Mold-Open Time (sec)	5
Eject Temperature (oC)	114
Air Temperature (oC)	25
[Miscellaneous]	
Cycle time (sec)	20.98
Residence time for hot runner (s)	76.3886
Mesh file	Final_Cooling_HotRunner2

Σχήμα 6.15 : Περίληπτική ανασκόπηση της παραμετροποίησης της κατασκευαστικής διεργασίας στο Moldex3D

5.4.2.γ Διεργασία – Βήμα 3: Καθορισμός κύκλου έγχυσης

Δεδομένου ότι όλα τα προηγούμενα βήματα εκτελέστηκαν επιτυχώς, το τελευταίο βήμα πριν την εκτέλεση της ανάλυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων στο Moldex3D είναι ο καθορισμός του κύκλου έγχυσης. Ένας πλήρης κύκλος έγχυσης προϋποθέτει την εκτέλεση επαναληπτικών υπολογισμών για την προσομοίωση των φάσεων πλήρωσης (Filling – F), συμπίεσης (Packing – P) και ψύξης (Ψύξη – C). Κοντά σε αυτά, εφόσον είναι επιθυμητή η προσομοίωση της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος, θα πρέπει να εκτελεστούν επαναληπτικοί υπολογισμοί και για την αντίστοιχη προσομοίωση (Warpage – W).

Επομένως, στα πλαίσια του Moldex3D, ένας πλήρης κύκλος έγχυσης συνεπάγεται τη διενέργεια επαναληπτικών υπολογισμών για Filling, Packing, Ψύξη και Warpage (F – P – C – W). Ωστόσο, πριν την προσομοίωση της φάσης πλήρωσης ενός κύκλου έγχυσης θα πρέπει να προηγείται προσομοίωση της φάσης ψύξης προκειμένου τα τελικά αποτελέσματα να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Και αυτό γιατί, σε πραγματικές συνθήκες, πριν την εκκίνηση ενός νέου κύκλου έγχυσης, η κοιλότητα μορφοποίησης έχει ήδη ψυχθεί κατά τον προηγούμενο κύκλο.

Με το πέρας της προσομοίωσης ενός πλήρους κύκλου έγχυσης, στις υποενότητες που ακολουθούν πραγματοποιείται η μετα-επεξεργασία των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με γνώμονα την κατά το δυνατόν πιο στοχευμένη ερμηνεία αυτών προκειμένου να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα.

5.4.3.α Μετα-επεξεργασία – Βήμα 1 / Βήμα 2 : Ανάλυση αποτελεσμάτων πλήρωσης / συγκράτησης και σύγκριση

Μερικά από τα σημαντικά προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία της έγχυσης σχετίζονται με την φάση της πλήρωσης. Πράγματι, με την προσομοίωση της φάσης της πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D, κοντά στα υπόλοιπα, μπορούν να προβλεφθούν :

- ✓ η ελλιπής πλήρωση της κοιλότητας μορφοποίησης,
- ✓ οι γραμμές συγκόλλησης,
- ✓ τα παγιδευμένα αέρια,
- ✓ ο ισοσκελισμός των αγωγών διανομής βτου συστήματος διανομής,
- ✓ η εξισορρόπηση της ροής,
- ✓ η καύση της εξωτερικής επιφάνειας του παραγόμενου αντικειμένου και ο σχεδιασμός της τροφοδοσίας.

Αφετέρου, η προσομοίωση της φάσης της συγκράτησης στο λογισμικό Moldex3D, μεταξύ των άλλων, στοχεύει :

- ✓ στην επίτευξη αποδοτικού συστήματος τροφοδοσίας,
- ✓ στον σχεδιαστικό έλεγχο και την επαλήθευση των διαστάσεων του προϊόντος έγχυσης που πρόκειται να παραχθεί,
- ✓ στον περιορισμό ορισμένων κατασκευαστικών ατελειών του τελικού προϊόντος έγχυσης, όπως το προέκταμα και τα βαθουλώματα,
- ✓ στην πρόβλεψη και την πρόληψη αισθητικών ατελειών στο τελικό αντικείμενο και

- ✓ στην πρόβλεψη του χρόνου φραγής των πυλών εισόδου από στερεοποιημένο πλαστικό, της απαιτούμενης δύναμης σύσφιξης, της κατάλληλης πίεσης συγκράτησης και του απαραίτητου χρόνου συμπίεσης σε έναν κύκλο έγχυσης.

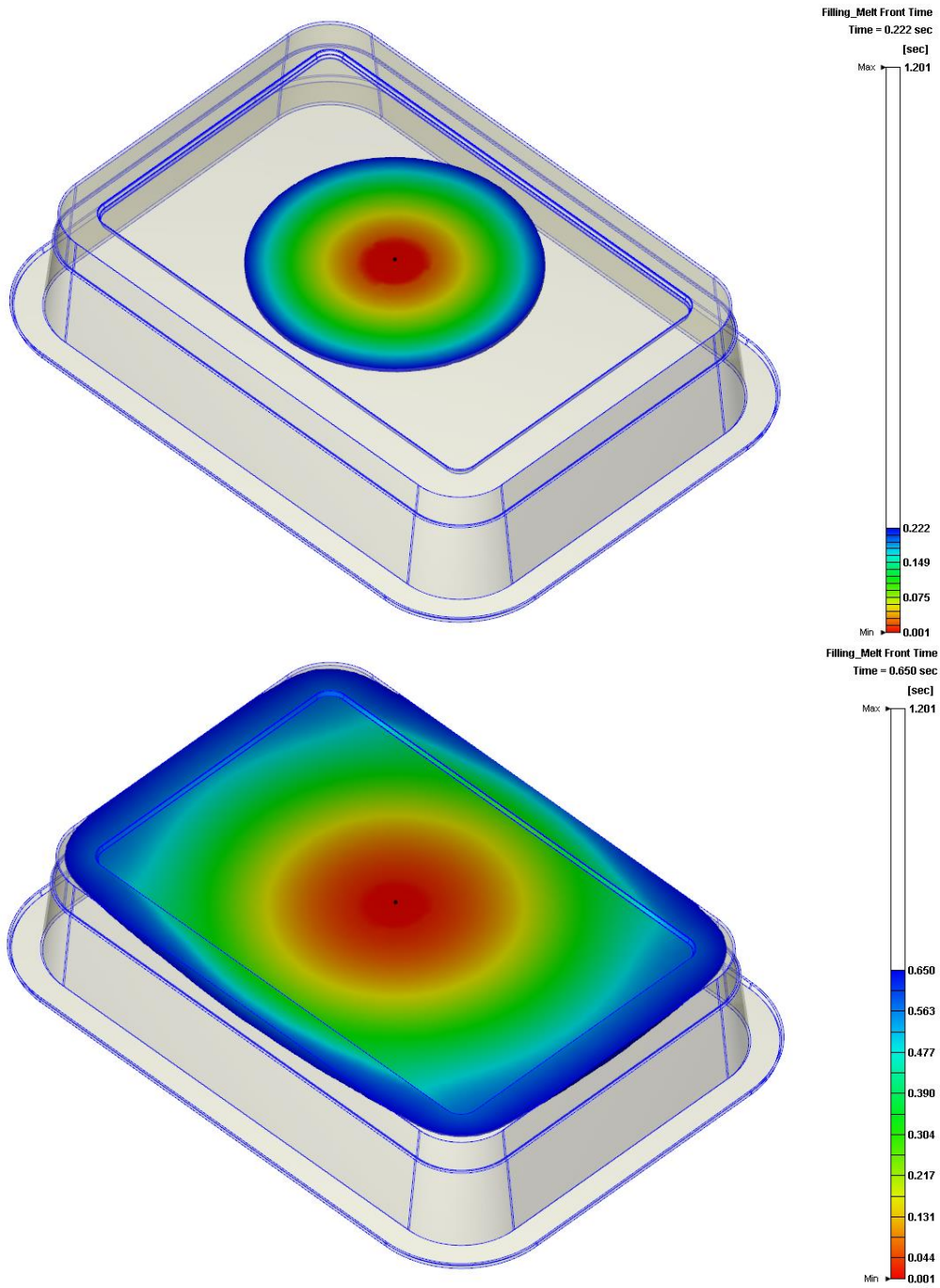
Παρακάτω, ακολουθεί παράθεση, ανάλυση και κατά περίπτωση σύγκριση των πιο χρήσιμων αποτελεσμάτων που εξάγει το λογισμικό Moldex3D για τις φάσεις πλήρωσης και συγκράτησης, όπως:

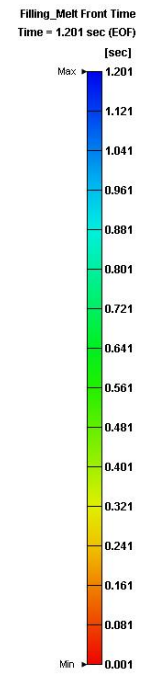
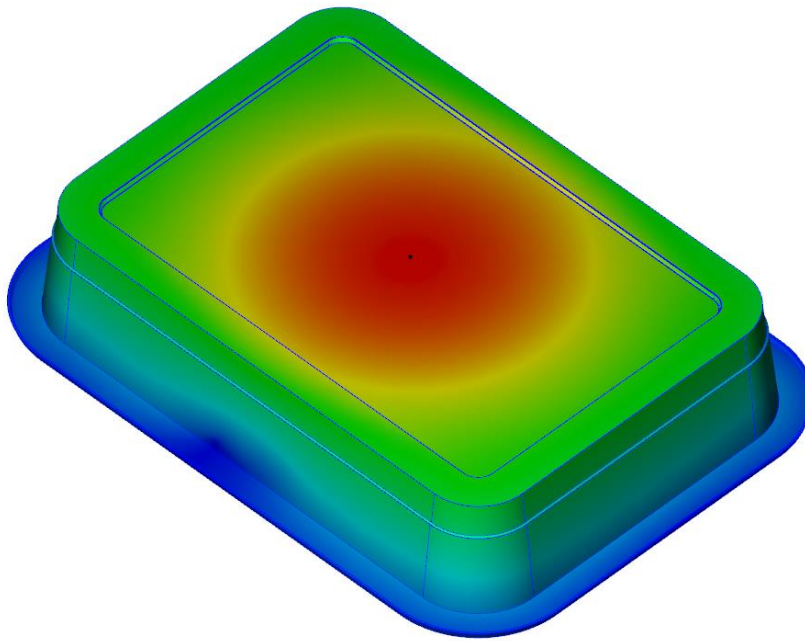
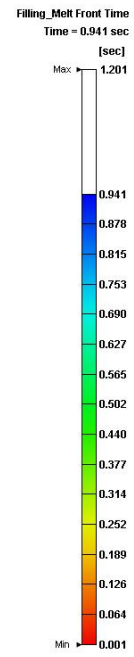
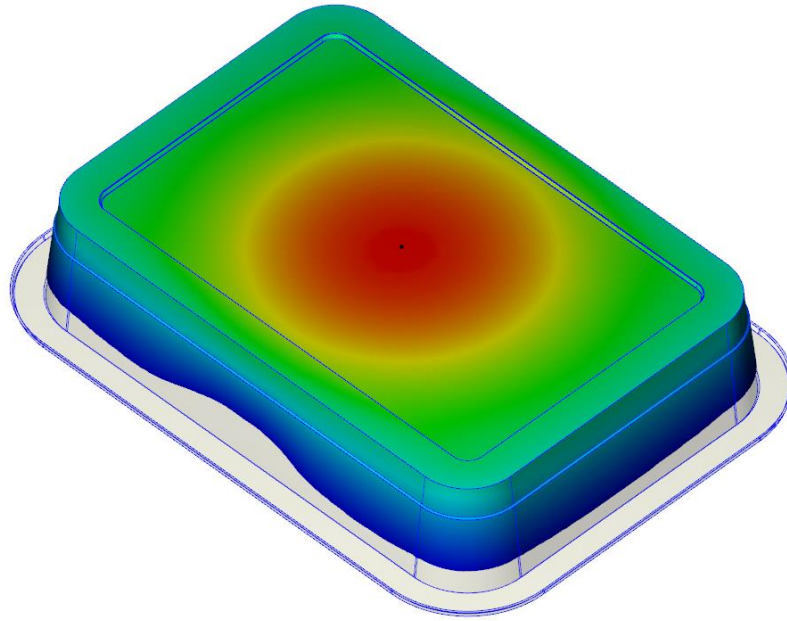
- Πλήρωση - Χρόνος πλήρωσης τεμαχίου

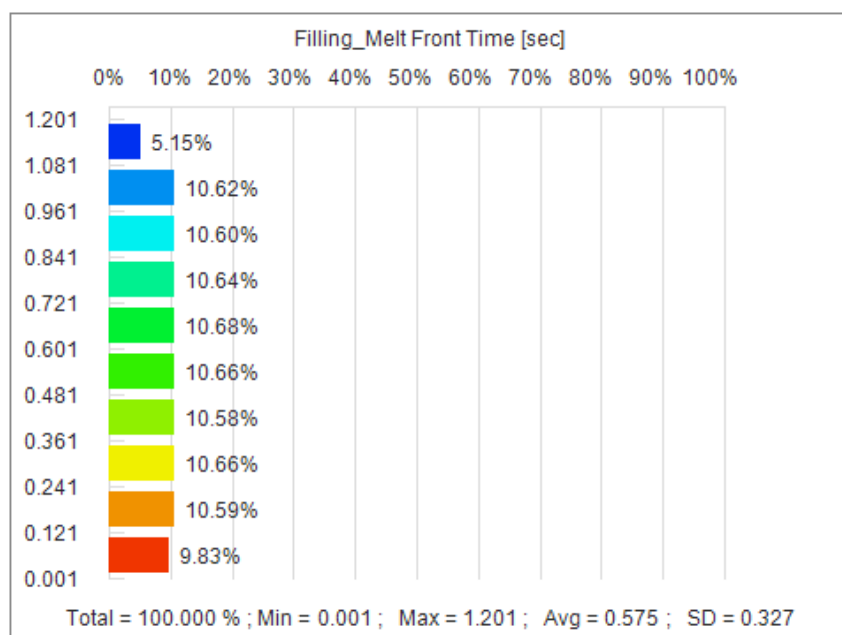
Απεικονίζει την εκάστοτε θέση του μετώπου ροής του λιωμένου πλαστικού στην κοιλότητα μορφοποίησης ενόσω αυτή γεμίζει με υλικό. Ο μέγιστος χρόνος πλήρωσης προκύπτει έπειτα από επαναληπτικούς υπολογισμούς σε συμφωνία πάντα με την παραμετροποίηση της κατασκευαστικής διεργασίας που έγινε προηγούμενα. Σε κάθε περίπτωση, ένα καλό αν όχι βέλτιστο αποτέλεσμα θα πρέπει να δείχνει ισομερή κατανομή της ροής σε όλες τις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης κατά τον ίδιο χρόνο.

Σχετικά με το παρόν προϊόν έγχυσης, παρατηρώντας το Σχήμα 6.16 και λαμβάνοντας υπόψιν όλα όσα έχουν αναφερθεί προηγούμενα, προκύπτουν τα εξής :

- ❖ Πρώτον, η μία και μοναδική θερμή πύλη εισόδου, εξασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή του λιωμένου πλαστικού σε όλη την έκταση της κοιλότητας δημιουργώντας μια πολύ μικρή γραμμή συγκόλλησης στα όρια του αποδεκτού.
- ❖ Δεύτερον, στο προϊόν έγχυσης δεν εντοπίζονται ελλιπώς πληρωμένες περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης, οι λεγόμενες σύντομες βολές. Και αυτό γιατί κατόπιν αρκετών επαναληπτικών δοκιμών, έγινε η κατάλληλη τροποποίηση των παραμέτρων της κατασκευαστικής διεργασίας (θερμοκρασίες, πιέσεις, ταχύτητες κλπ) προκειμένου να εξαλειφθούν κάποιες μικρές ελλειπείς πληρώσεις που είχαν προκύψει αρχικά κοντά στην γραμμή διαχωρισμού του καλουπιού.



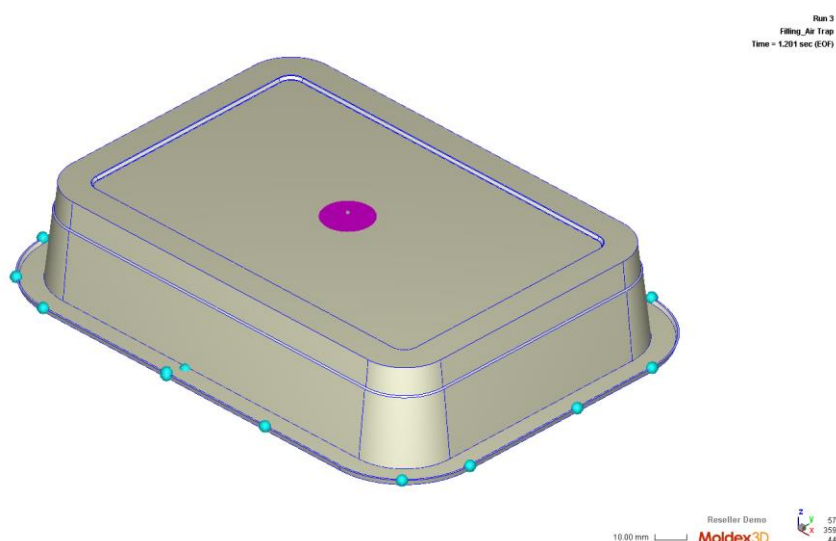




Σχήμα 6.16 : Διαδοχικά στιγμιότυπα του μετώπου ροής του λιωμένου πλαστικού μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης με τον συνολικό χρόνο πλήρωσης να ανέρχεται στα 1.2 sec.

- Πλήρωση – Παγιδευμένα αέρια

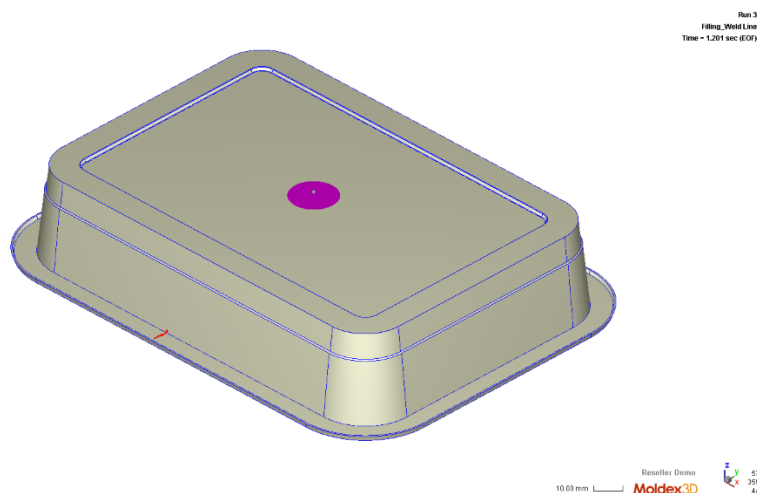
Εμφανίζονται οι θέσεις πιθανών παγιδευμένων αερίων στο τελικό προϊόν έγχυσης (Σχήμα 6.17). Αυτό συνεπάγεται και τη δυνατότητα πρόβλεψης των πιθανών σημείων καύσης στο τελικό προϊόν. Σχετικά με το προϊόν έγχυσης που μελετάται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, το λογισμικό Moldex3D εμφανίζει τα θεωρητικά σημεία έκλυσης παγιδευμένου αέρα στο καλούπι. Συνιστά ένα κομβικής σημασίας αποτέλεσμα της ανάλυσης καθώς μπορεί να γίνει κατανοητό πού θα πρέπει να γίνει η τοποθέτηση των σημείων εξαερισμού στο καλούπι.



Σχήμα 6.17 : Πιθανά σημεία έκλυσης παγιδευμένου αέρα στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλούπιού

- Πλήρωση – Γραμμές συγκόλλησης

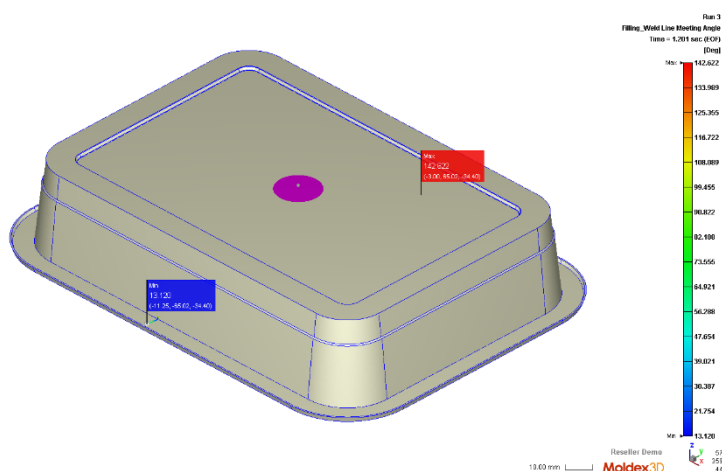
Εμφανίζονται οι γραμμές συγκόλλησης που υποδηλώνουν περιοχές του τελικού προϊόντος με ασθενή δομή. Όσο πιο σκούρες είναι σε χρώμα, τόσο ασθενέστερη είναι η δομή των αντίστοιχων περιοχών (Σχήμα 6.18).

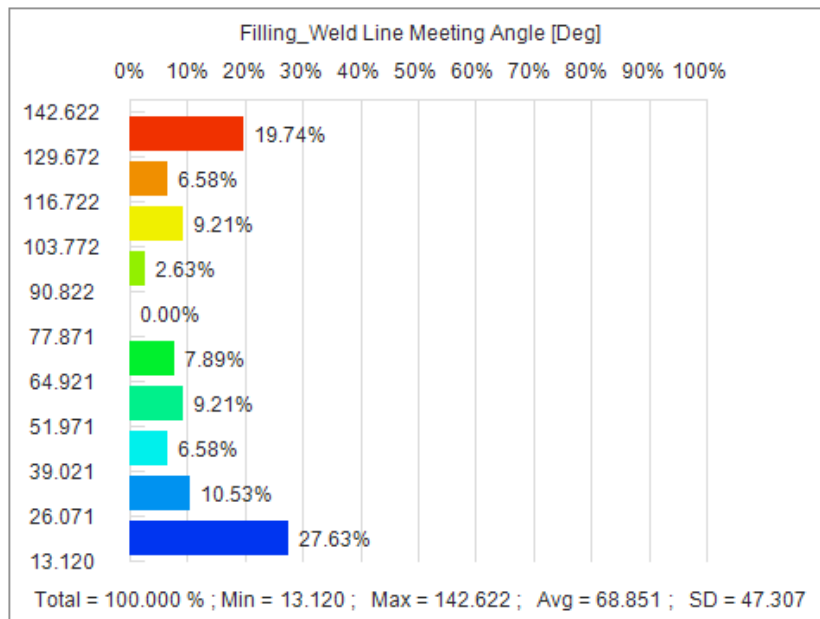


Σχήμα 6.18 : Οι δύο πιθανές γραμμές συγκόλλησης στο τελικό προϊόν έγχυσης μετά την προσομοίωση της φάσης πλήρωσης στο λογισμικό Moldex3D. Προκειμένου να αποφανθεί κανείς αν είναι εν δυνάμει προβληματικός ποιοτικός παράγοντας, θα πρέπει να μελετηθούν συμπληρωματικά και τα παρακάτω αποτελέσματα.

- Πλήρωση – Γωνία συνάντησης / συγχώνευσης μετώπων ροής

Εμφανίζει την κατανομή της γωνίας συνάντησης / συγχώνευσης θ των μετώπων ροής του λιωμένου πλαστικού (Σχήμα 6.19). Προφανώς, η γωνία συνάντησης δύο μετώπων ροής, αναλόγως της εκάστοτε έγχυσης, ποικίλει από 0° έως 135° . Εάν δε η γωνία θ ανέρχεται στις 180° , τότε τα δύο μέτωπα ροής μπορούν να θεωρηθούν ως ένα. Αντίθετα, στην περίπτωση που η γωνία θ μηδενίζεται, τότε τα δύο μέτωπα ροής συγκλίνουν μετωπικά. [24] Κατά κοινή διαπίστωση, όσο πιο μικρή είναι η γωνία θ , τόσο πιο πολύ υποβαθμίζεται η μηχανική αντοχή του τελικού προϊόντος και τόσο πιο έντονη είναι η γραμμή συγκόλλησης στο τελικό προϊόν [25].

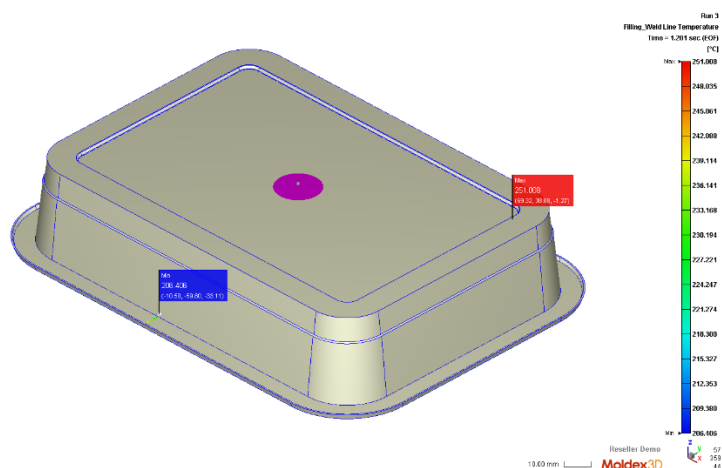


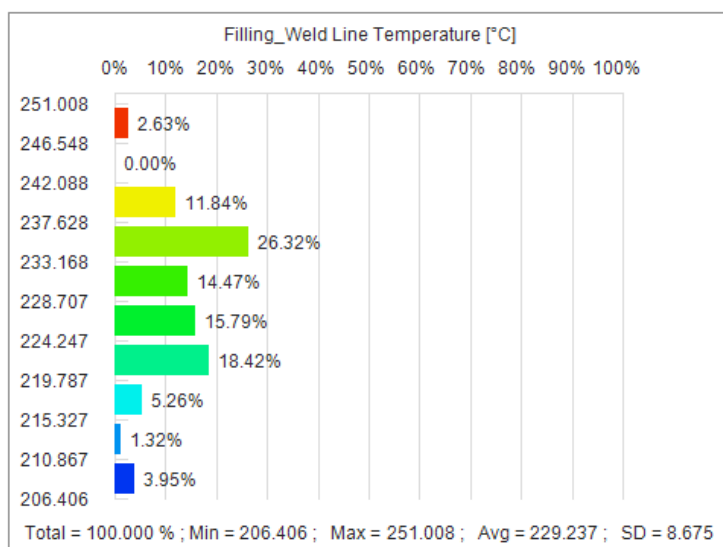


Σχήμα 6.19 : Κατανομή της γωνίας συνάντησης / συγχώνευσης θ των μετώπων ροής του λιωμένου πλαστικού

- Πλήρωση - Θερμοκρασία στις γραμμές συγκόλλησης

Εμφανίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στις πιθανές γραμμές συγκόλλησης. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία στις γραμμές συγκόλλησης μέσω αύξησης της θερμοκρασίας του τήγματος ή του καλουπιού, οι γραμμές συγκόλλησης τείνουν να εμφανίζονται λιγότερο (Σχήμα 6.20). Ωστόσο, αυξημένη θερμοκρασία του λιωμένου πλαστικού συνεπάγεται και επιδείνωση της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος. Κατά κοινή διαπίστωση, όταν η θερμοκρασία των γραμμών συγκόλλησης είναι, στο μεγαλύτερο μέρος της μικρότερη ή ίση των **230 °C**, αυτό αποτελεί ένδειξη ότι ίσως θα μπορούσε να εξεταστεί η περαιτέρω αύξηση αυτής μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας του πλαστικού [26].



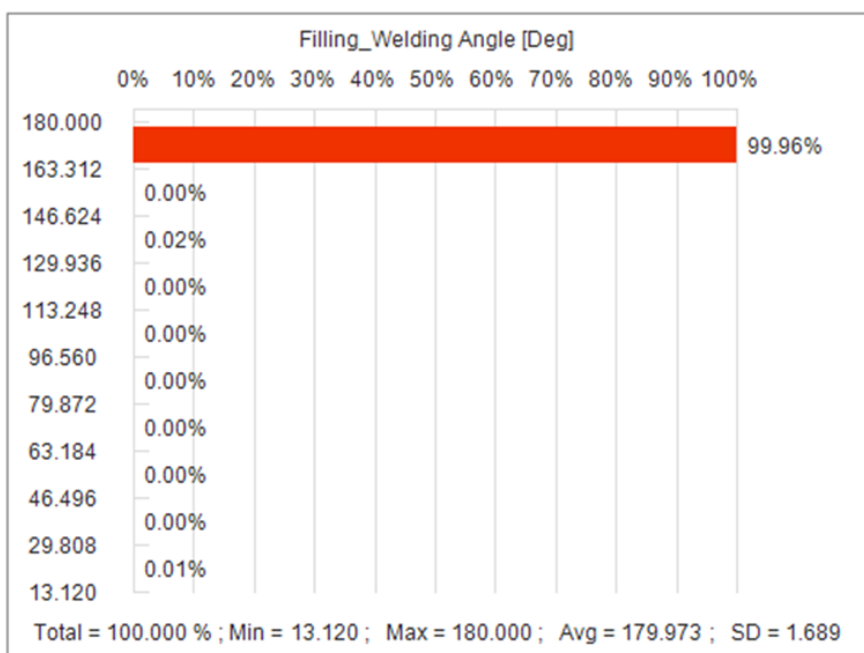


Σχήμα 6.20 : Η μέση θερμοκρασία των γραμμών συγκόλλησης του τελικού προϊόντος έγχυσης ανέρχεται στους 229.237 ο C, δηλαδή μια θερμοκρασιακή τιμή ελαφρώς μικρότερη των 230 °C. Αποφασίστηκε, ωστόσο, η μη περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του πλαστικού καθότι, σε αντίθετη περίπτωση, παρατηρήθηκε επιδείνωση της στρέβλωσης του τελικού προϊόντος κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό σε καμία των περιπτώσεων.

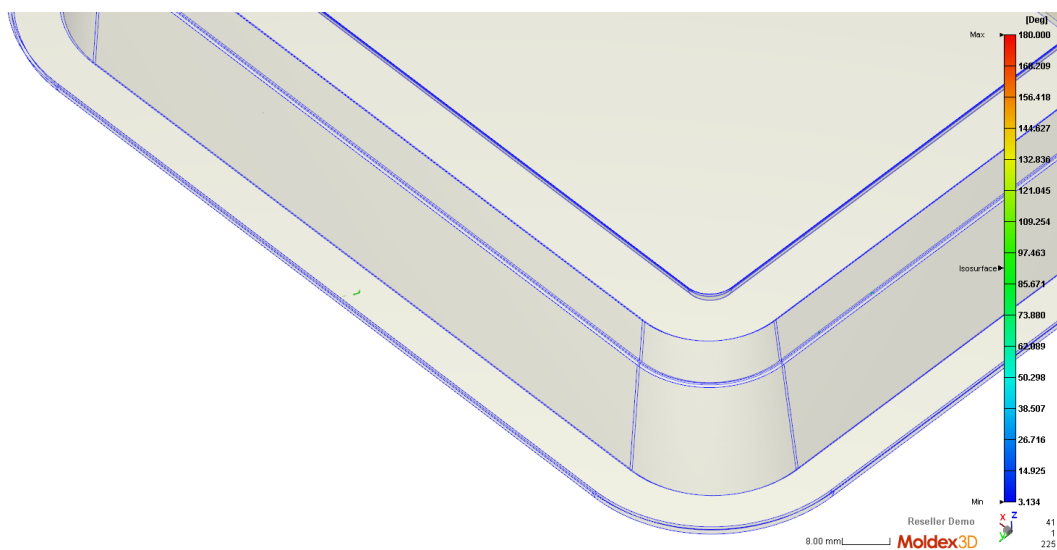
- Πλήρωση / Συγκράτηση- Γωνία συγχώνευσης

Εκφράζει τη γωνία συγχώνευσης θ δύο μετώπων ροής του λιωμένου πλαστικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (Σχήμα 6.21α και (Σχήμα 6.22α). Για περαιτέρω διερεύνηση στο εσωτερικό της περιοχής συγχώνευσης η οποία και είναι απαραίτητη για την κατάλληλη γνωμάτευση, ενδείκνυται η χρήση του εργαλείου Isosurface (Σχήμα 6.21β και Σχήμα 6.22β). Χάρη σε αυτό, είναι εφικτή η πλήρης τομογραφία της γραμμής συγκόλλησης. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι μπορεί να επιθεωρηθεί επακριβώς η μορφή των επιμέρους πεπερασμένων στοιχείων στην περιοχή των γραμμών συγκόλλησης και να αποφασιστεί εάν το αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι τελικώς αποδεκτό.

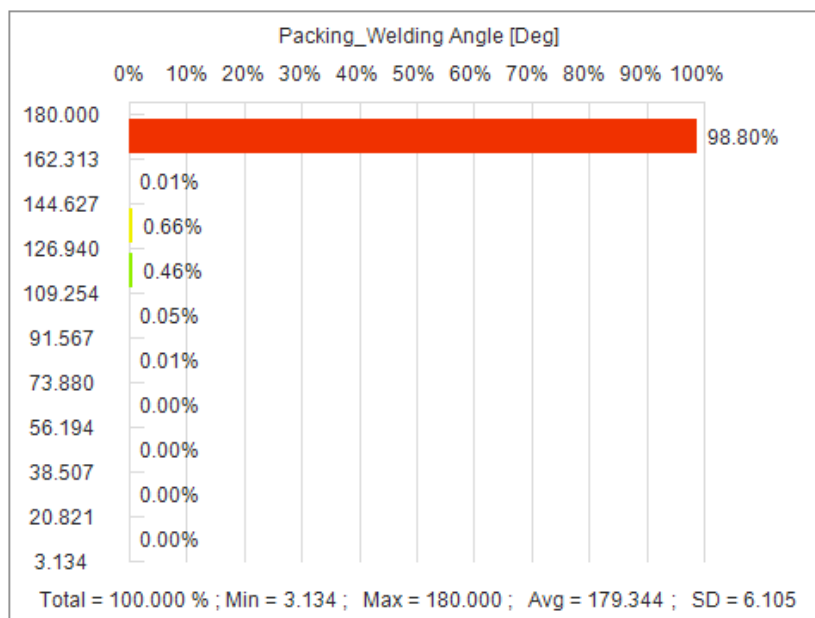




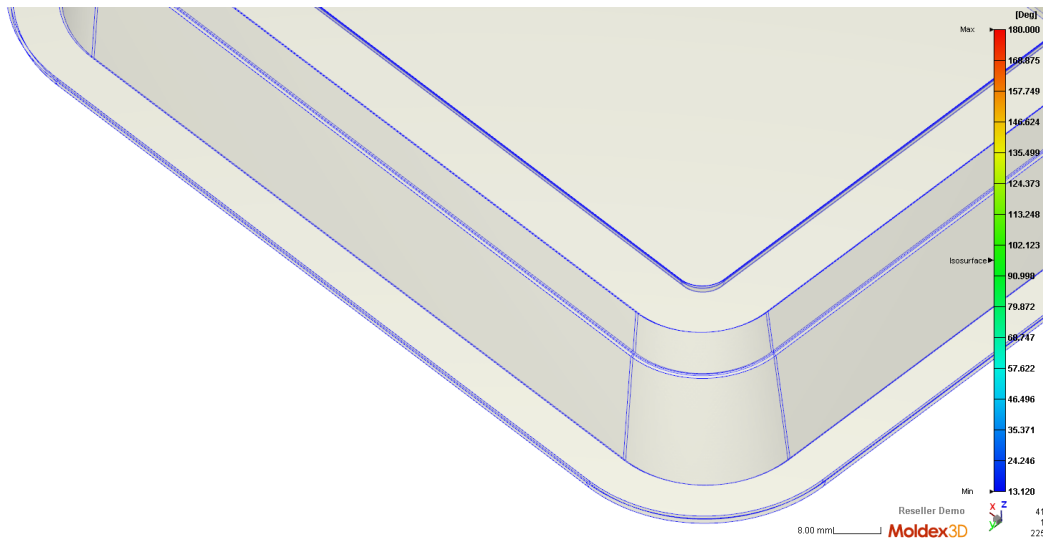
Σχήμα 6.21α : Γωνίες συγχώνευσης των μετώπων ροής του λιωμένου πλαστικού στο τέλος της φάσης της πλήρωσης. Σημειώνεται ότι αν η γωνία συνάντησης / συγχώνευσης (θ) είναι μικρότερη των 135° οδηγεί σε έντονες γραμμές συγκόλλησης, που μειώνουν τη μηχανική αντοχή από 40 έως 90 %. Στο προς μελέτη προϊόν έγχυσης, οι γωνίες συνάντησης κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό κυμαίνονται μεταξύ 146.624° (μέγιστο) και 129.936° (ελάχιστο), δηλαδή το αποτέλεσμα είναι αποδεκτό.



Σχήμα 6.21β : Isosurface προβολή της γραμμής συγκόλλησης με πολύ μικρές περιοχές στο εσωτερικό με γωνία συνάντησης $\theta < 135^\circ$.



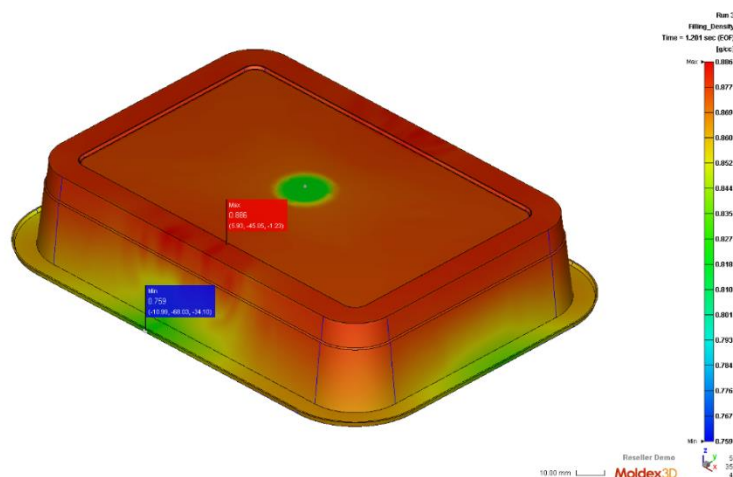
Σχήμα 6.22α : Γωνίες συγχώνευσης των μετώπων ροής του λιωμένου πλαστικού στο τέλος της φάσης της συγκράτησης. Στο προς μελέτη προϊόν έγχυσης, οι γωνίες συνάντησης κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους κυμαίνονται μεταξύ 180° (μέγιστο) και 162.313° (ελάχιστο), με μέση τιμή τις 179.313°. Είτε σαν μέγιστη και ελάχιστη τιμή είτε σαν μέση τιμή, η γωνία συνάντησης των μετώπων ροής είναι κατά πολύ μεγαλύτερη των 135° και δεδομένου του πολύ μικρού ποσοστού της γωνίας συνάντησης περίξ και χαμηλότερα των 135°, το αποτέλεσμα είναι αποδεκτό.

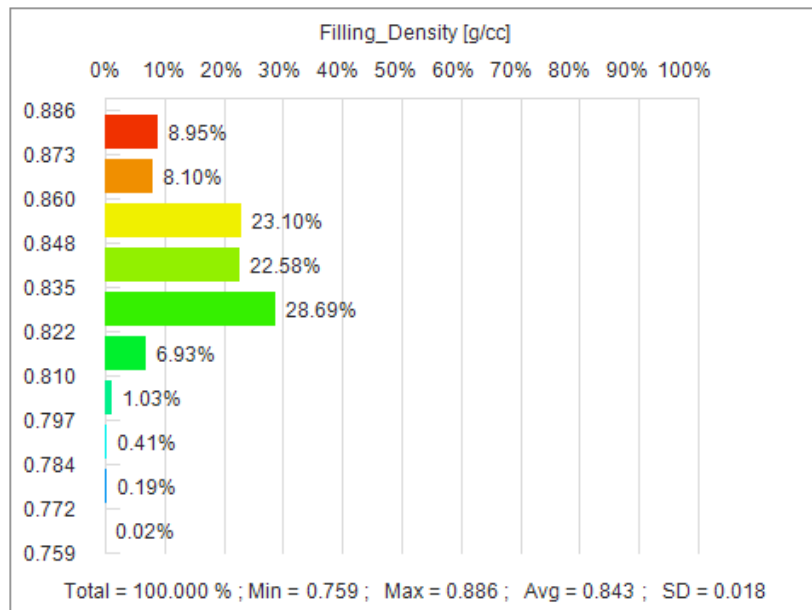


Σχήμα 6.22β : Isosurface προβολή της γραμμής συγκόλλησης με ανύπαρκτες περιοχές στο εσωτερικό με γωνία συνάντησης $\theta < 135^\circ$.

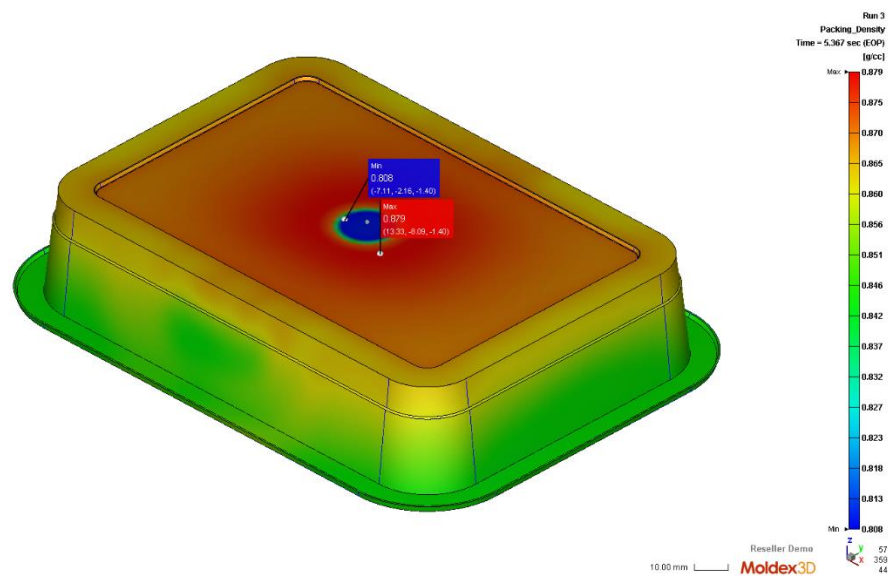
- Πλήρωση / Συγκράτηση - Πυκνότητα

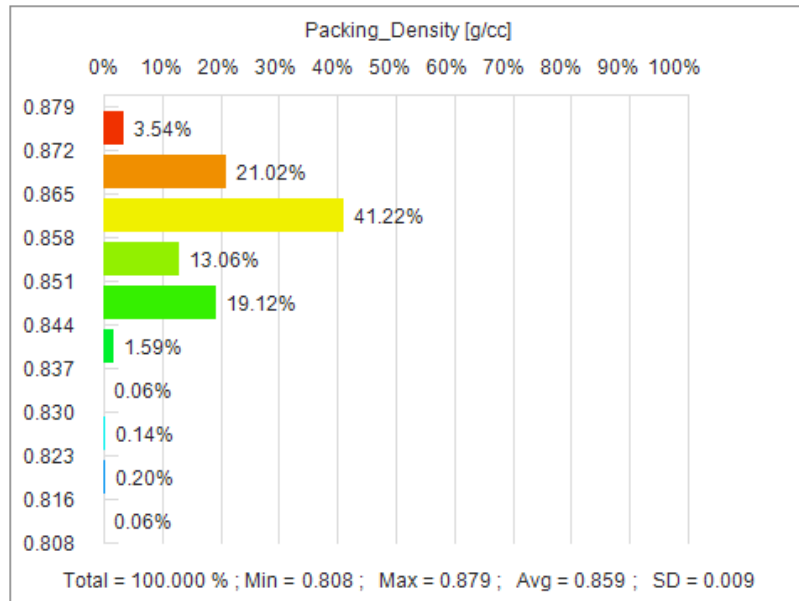
Εμφανίζει την κατανομή της πυκνότητας του λιωμένου πλαστικού την τρέχουσα χρονική στιγμή (Σχήμα 6.23α και Σχήμα 6.23β). Οι περιοχές του πλαστικού που έχουν ήδη ψυχθεί μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης είναι επόμενο να έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα σε αντίθεση με τις περιοχές που δεν έχουν ακόμη ψυχθεί. Το ζητούμενο είναι η κατά το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας καθώς, σε αντίθετη περίπτωση, επέρχεται αναπόφευκτα στρέβλωση στο τελικό προϊόν.





Σχήμα 6.23α : Στο παρόν προϊόν έγχυσης η πυκνότητα κατανέμεται σχετικά ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του προϊόντος στη φάση της πλήρωσης (filling). Το αποτέλεσμα χρήζει περαιτέρω βελτίωσης κάτι το οποίο θα διαπιστωθεί ότι συμβαίνει με την ολοκλήρωση της φάσης της συγκράτησης (Σχήμα 6.23β).

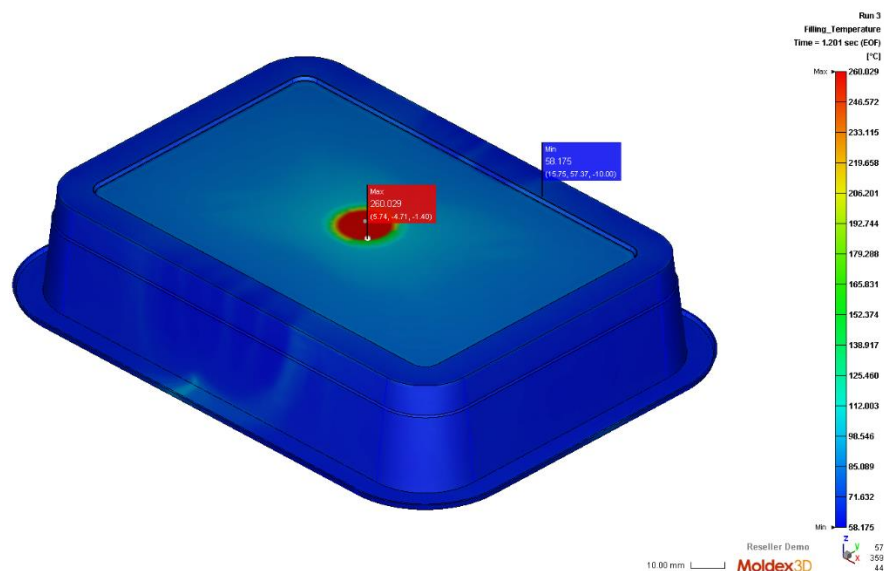


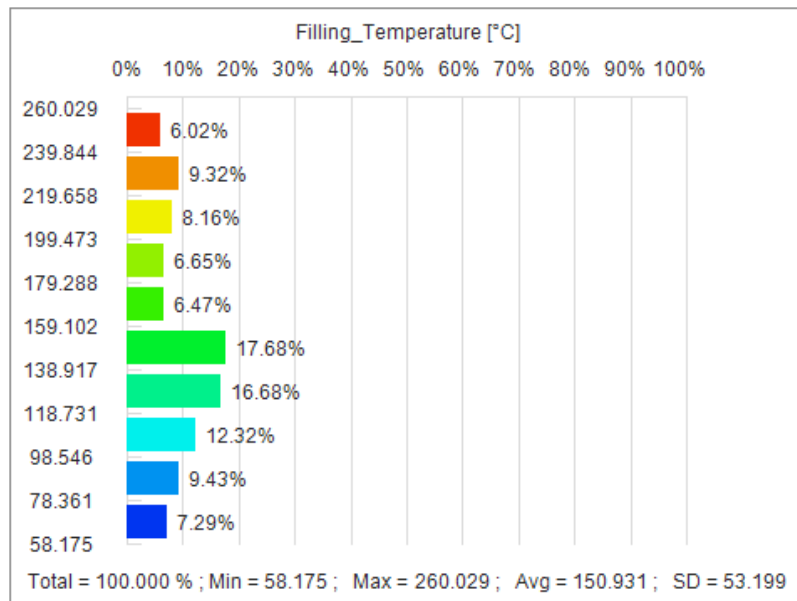


Σχήμα 6.23β : Στο παρόν προϊόν έγχυσης η πυκνότητα κατανέμεται εμφανώς πιο ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του προϊόντος μετά και την ολοκλήρωση της φάσης της συγκράτησης (packing)

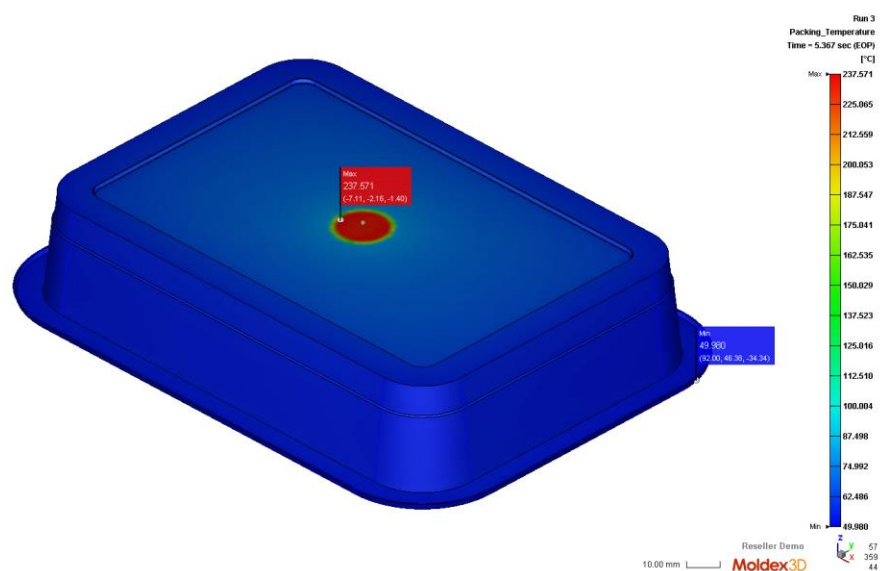
- Πλήρωση / Συγκράτηση - Θερμοκρασία

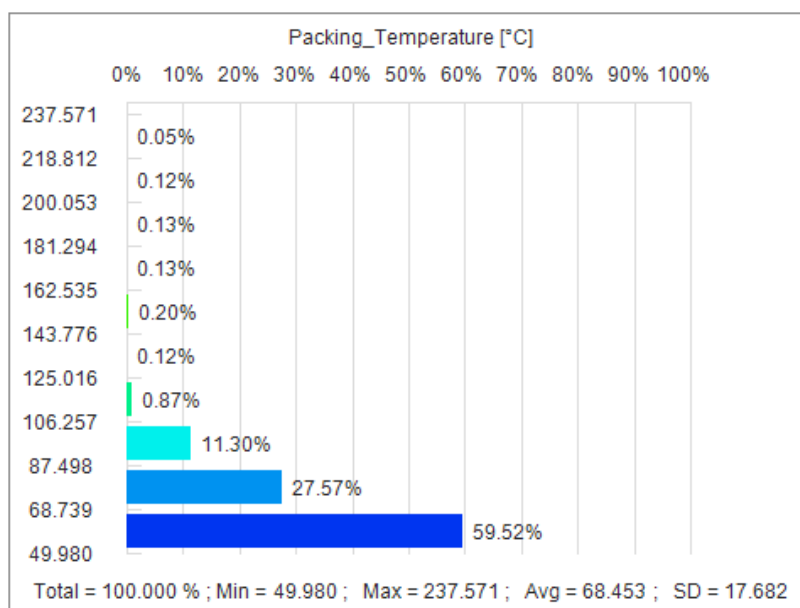
Εμφανίζει την κατανομή της θερμοκρασίας του λιωμένου πλαστικού μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης την τρέχουσα χρονική στιγμή (Σχήμα 6.24α και Σχήμα 6.24β). Εάν η μέγιστη θερμοκρασία του πολυμερούς είναι υψηλότερη από την αρχική θερμοκρασία του τήγματος, τότε αυτό σημαίνει ότι έχει παραχθεί σημαντική ποσότητα θερμότητας εξαιτίας της ιξώδους θέρμανσης του λιωμένου πλαστικού. Οπότε, σε πρώτη φάση, μπορεί να γίνει είναι ένας έλεγχος για πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας του τήγματος γύρω από την περιοχή της τροφοδοσίας της κοιλότητας μορφοποίησης και στις λεπτότοιχες περιοχές. Αφετέρου, όταν η θερμοκρασία του τήγματος κεντρικά και κατά μήκος του πάχους των τοιχωμάτων του αντικειμένου προσεγγίζει τη θερμοκρασία του καλουπιού, υποδηλώνει ότι το πλαστικό βρίσκεται σε κατάσταση στασιμότητας και η θερμοκρασία του σιγά - σιγά μειώνεται μέσω αγωγής στα ψυχρά τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης.





Σχήμα 6.24α : Η κατανομή της θερμοκρασίας του λιωμένου πλαστικού μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης, η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή αυτής στη φάση της πλήρωσης .





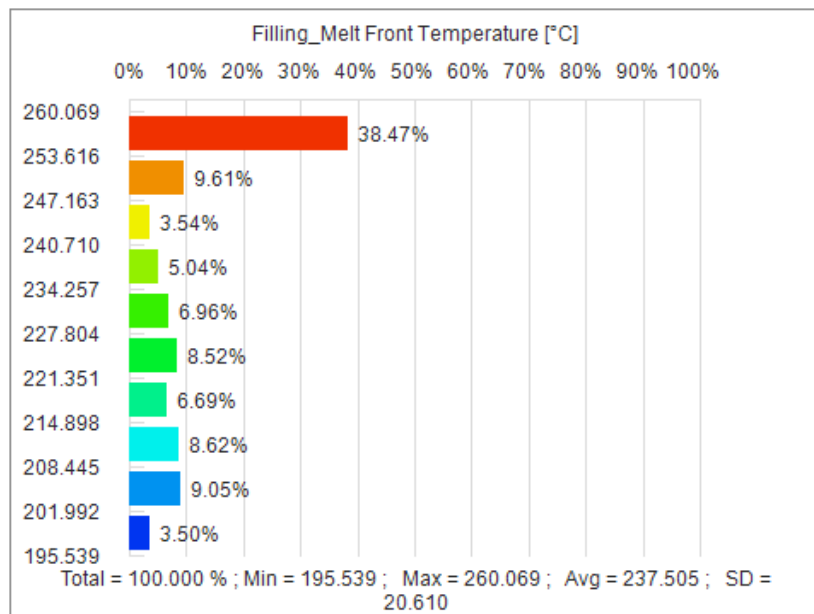
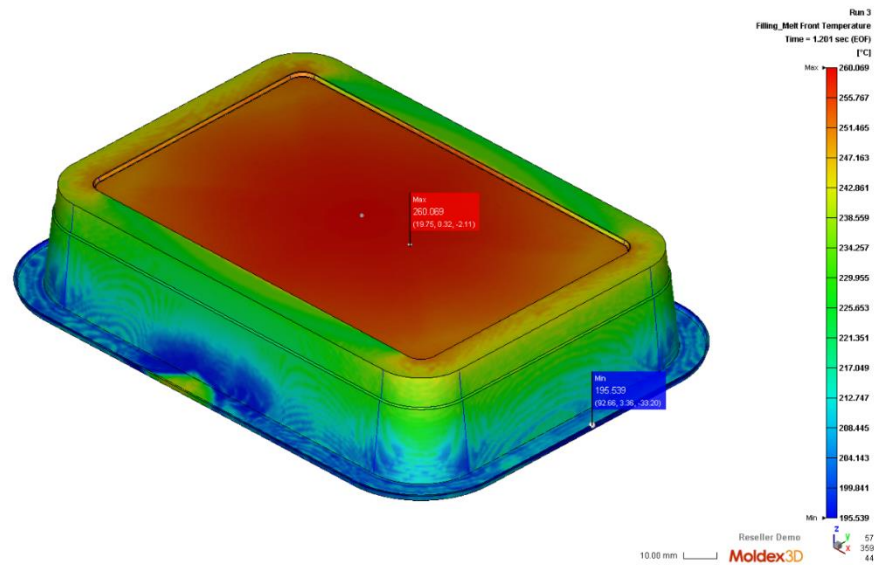
Σχήμα 6.24β : Η κατανομή της θερμοκρασίας του λιωμένου πλαστικού μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης στη φάση της συγκράτησης, ομοιόμορφα κατανεμημένη και αισθητά πιο μειωμένη κατά τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή αυτής συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές στη φάση της πλήρωσης. Αναμενόμενο αποτέλεσμα δεδομένου ότι κατά τη φάση της συγκράτησης έχει ήδη ξεκινήσει η ψύξη του τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης.

- Πλήρωση - Θερμοκρασία του λιωμένου πλαστικού

Καταγράφει την τιμή της θερμοκρασίας του λιωμένου πλαστικού την στιγμή που αυτό φτάνει σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο. Ουσιαστικά, η τιμή αυτή εκφράζει το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται και διαχέεται ενώ η φάση της πλήρωσης βρίσκεται σε εξέλιξη χωρίς, βέβαια, να συνεπάγεται ότι οι αναγραφόμενες τιμές της θερμοκρασίας (Σχήμα 6.25) αναφέρονται απαραίτητα στο ίδιο χρονικό στιγμιότυπο. Αναλύοντας τα στοιχεία που προκύπτουν από το συγκεκριμένο αποτέλεσμα, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα :

- ❖ Πρώτον, δεν παρατηρούνται μεγάλες ή έντονες γραμμές συγκόλλησης στο τελικό προϊόν σύμφωνα και με την εξέταση του αποτελέσματος χρόνου τήξης (Melt Front Time). Και αυτό γιατί στο παρόν αποτέλεσμα, στις περιοχές όπου ενδεχομένως θα μπορούσε να εμφανιστεί κάποια γραμμή συγκόλλησης δεν παρατηρείται τοπικά χαμηλότερη θερμοκρασία του μετώπου ροής του λιωμένου πλαστικού σε σχέση με την αντίστοιχη θερμοκρασία στη γύρω περιοχή.
- ❖ Δεύτερον, δεν υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης σημαδιών/γραμμών ροής δεδομένου ότι δεν εντοπίζεται αδόκητα χαμηλή θερμοκρασία του μετώπου ροής του λιωμένου πλαστικού στην περιοχή γύρω από την τροφοδοσία της κοιλότητας μορφοποίησης, κάτι το οποίο θα σήμαινε διάχυση ψυχρού τήγματος εντός της κοιλότητας.
- ❖ Τρίτον, δεν εντοπίζονται τυχόν επιβραδύνσεις/παύσεις ροής στην κοιλότητα μορφοποίησης σύμφωνα και με την εξέταση του αποτελέσματος Melt Front Time. Σε αντίθετη περίπτωση, οι εν λόγω δυσλειτουργίες της ροής θα προέκυπταν από τις κατά τόπους χαμηλές θερμοκρασίες του λιωμένου πλαστικού.
- ❖ Τέταρτον, δεν υπάρχει κίνδυνος υποβάθμισης του πλαστικού εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας δεδομένου ότι η θερμοκρασία του λιωμένου πλαστικού δεν υπερβαίνει το ανώτατο όριο του

θερμοκρασιακού εύρους εντός των ορίων του οποίου το χρησιμοποιούμενο υλικό διατηρεί τη δομική ακεραιότητά του.

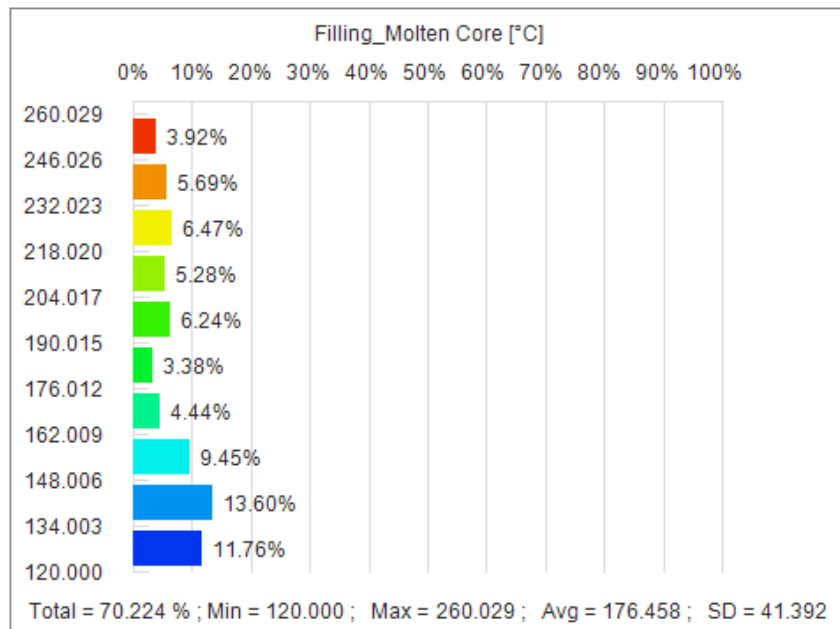
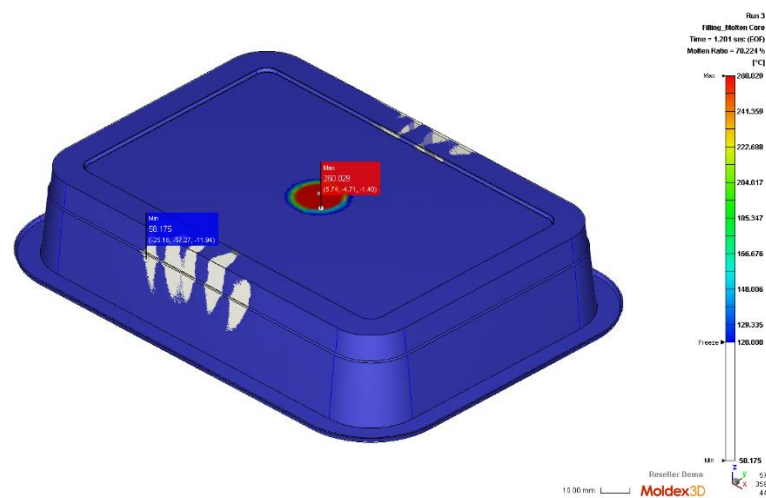


Σχήμα 6.25 : Η κατανομή της θερμοκρασίας του μετώπου ροής του λιωμένου πλαστικού, η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή αυτής

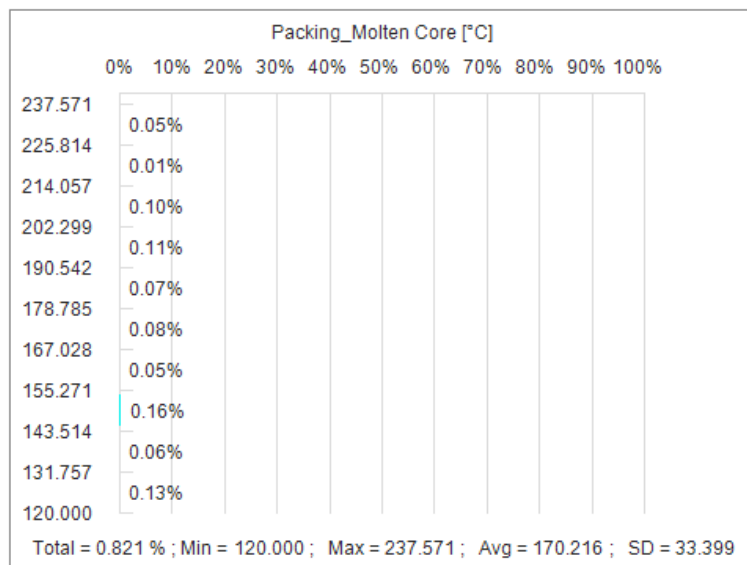
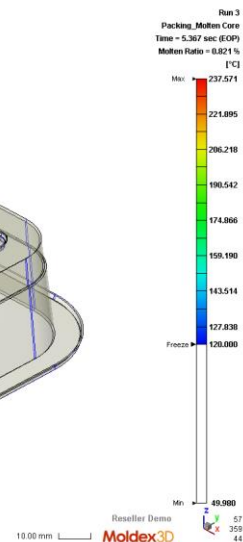
- Πλήρωση / Συγκράτηση, Στερεοποιημένο πλαστικό

Εμφανίζει την ισοπαραμετρική επιφάνεια του υδαρούς πλαστικού την τρέχουσα χρονική στιγμή. Εντός, εμφανίζονται σποραδικά εσώκλειστες περιοχές όπου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αρχικά καθορισμένη θερμοκρασία του στερεοποιημένου πλαστικού. Παρατηρώντας το Σχήμα 6.26α και αναλύοντας τα ευρήματα, μπορεί να γίνει εύκολα ο εντοπισμός των περιοχών της κοιλότητας μορφοποίησης όπου το υλικό εξακολουθεί να είναι υδαρές, κοινώς να «κρατάει» ακόμη, οπότε το αντικείμενο δεν μπορεί να εξολκευθεί. Γενικά, οι μεμονωμένες περιοχές αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) εμφανίζονται σε εκείνα τα τοιχώματα της κοιλότητας μορφοποίησης όπου το πάχος είναι συγκριτικά μεγαλύτερο.

Με την ολοκλήρωση της φάσης της πλήρωσης (1^η φάση), οι περιοχές όπου το υλικό «κρατάει» ακόμη είναι προφανώς πολλές και μεγάλες σε έκταση. Ωστόσο, με την ολοκλήρωση της φάσης της συγκράτησης (2^η φάση), όλες αυτές οι περιοχές θα πρέπει, ιδανικά, να έχουν εξαλειφθεί. Το κυριότερο ωστόσο εύρημα που προκύπτει αναλύοντας ενδελεχώς το Σχήμα 6.26β, αποτελεί το γεγονός ότι δεν παρεμβάλλεται υδαρές υλικό μεταξύ κοιλότητας μορφοποίησης και τροφοδοσίας. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ο αρχικά καθορισμένος από τον χρήστη χρόνος συμπίεσης και ο μετέπειτα επαναληπτικά υπολογισμένος από το σύστημα χρόνος συμπίεσης μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματική συμπίεση του τήγματος εντός της κοιλότητας μορφοποίησης. Στον αντίποδα, η αντίθετη περίπτωση θα καταμαρτυρούσε ανεπαρκή χρόνο συμπίεσης ο οποίος με τη σειρά του θα οδηγούσε σε αναποτελεσματική συμπίεση του τήγματος. Σημειωτέο ότι αναποτελεσματική συμπίεση μεταφράζεται σε επιστροφή του υδαρούς τήγματος προς την πύλη εισόδου, κάτι το οποίο σημαίνει αυξημένη ογκομετρική συρρίκνωση του υλικού και αυξημένη στρέβλωση του τελικού προϊόντος.



Σχήμα 6.26α : Η ισοπαραμετρική επιφάνεια του υδαρούς πλαστικού την τρέχουσα χρονική στιγμή. Με την ολοκλήρωση της φάσης της πλήρωσης, οι περιοχές όπου το υλικό εξακολουθεί να είναι υδαρές είναι προφανώς πολλές και μεγάλες σε έκταση.



Σχήμα 6.26β : Η ισοπαραμετρική επιφάνεια του υδαρούς πλαστικού την τρέχουσα χρονική στιγμή. Με την ολοκλήρωση της φάσης της συγκράτησης, οι περιοχές όπου το υλικό εξακολουθεί να είναι υδαρές είναι μηδενικές, κάτι το οποίο αποτελεί το ιδανικό ζητούμενο. Γενικά, εάν δεν είναι μηδενικές, θα πρέπει να είναι οι ελάχιστες και οι μικρότερες δυνατές σε έκταση.

- Πλήρωση / Συγκράτηση – Πίεση

Εμφανίζει με διαφορετικά χρώματα την κατανομή της πίεσης του λιωμένου πλαστικού στην κοιλότητα μορφοποίησης την τρέχουσα χρονική στιγμή. Σίγουρα, εφόσον δεν υπάρχουν πολλαπλές πύλες εισόδου στο καλούπι, απομακρύνεται το ενδεχόμενο ανισομερούς κατανομής της πίεσης. Λαμβάνοντας υπόψιν τα ευρήματα του συγκεκριμένου αποτελέσματος (Σχήμα 6.27α και Σχήμα 6.27β) είναι δυνατό :

- να εξεταστεί η κατάσταση της μετάδοσης πίεσης.

Σίγουρα, η πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης έχει αντίστροφη σχέση με το μήκος των πυλών εισόδου / αγωγών διανομής. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της πύλης εισόδου / του αγωγού διανομής, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πτώση της πίεσης στο σύστημα διανομής,

οπότε η τελική πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης είναι χαμηλότερη. Ενώ, το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει με το μέγεθος των πυλών εισόδου / αγωγών διανομής. Δηλαδή, όταν αυτό είναι πολύ μικρό, τότε θα προκληθεί μεγαλύτερη πτώση πίεσης, με την πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης τελικά να μειώνεται.

Από την άλλη, η θερμοκρασία του λιωμένου πλαστικού επιδρά στην πίεση του μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του λιωμένου πλαστικού, τόσο πιο δύσκολη είναι η φραγή των πυλών εισόδου με στερεοποιημένο πλαστικό, κάτι το οποίο μεταφράζεται σε μεγαλύτερο χρόνο πλήρωσης, πιο αργή ταχύτητα ψύξης και, εν τέλει, πιο υψηλή τελική πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης.

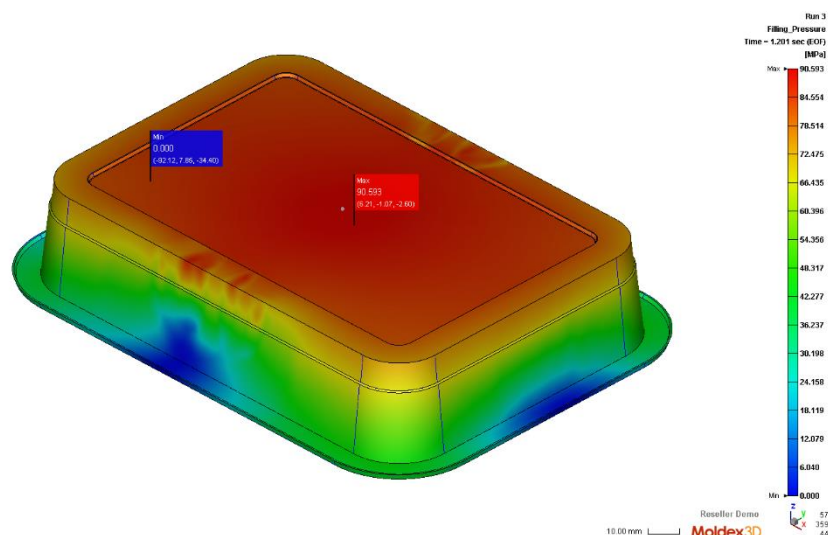
- να υπολογιστεί η πτώση πίεσης στο σύστημα διανομής του πολυμερούς δομικού υλικού στο καλούπι.

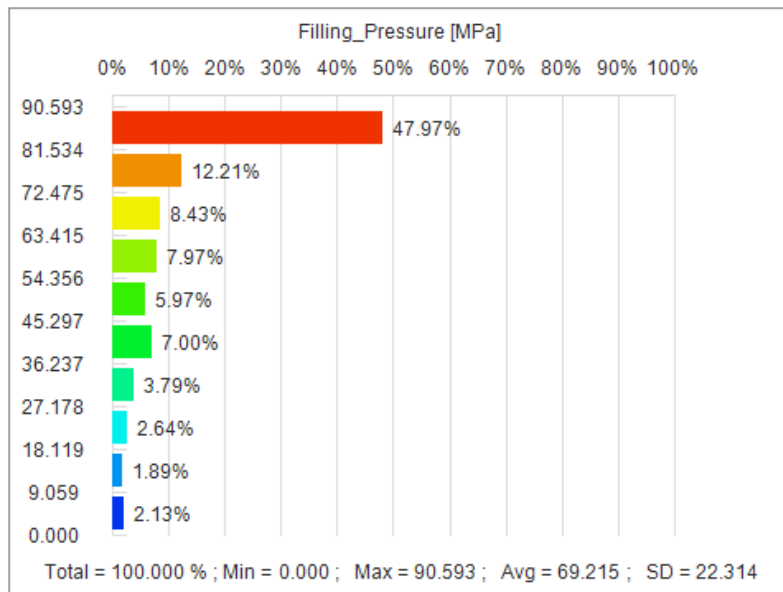
Η πτώση πίεσης προκύπτει ως εξής :

$$\begin{aligned} & (\text{Πτώση πίεσης στο σύστημα διανομής}) = \\ & (\text{Μέγιστη πίεση με το σύστημα διανομής}) - (\text{Μέγιστη πίεση χωρίς το σύστημα διανομής}) \end{aligned}$$

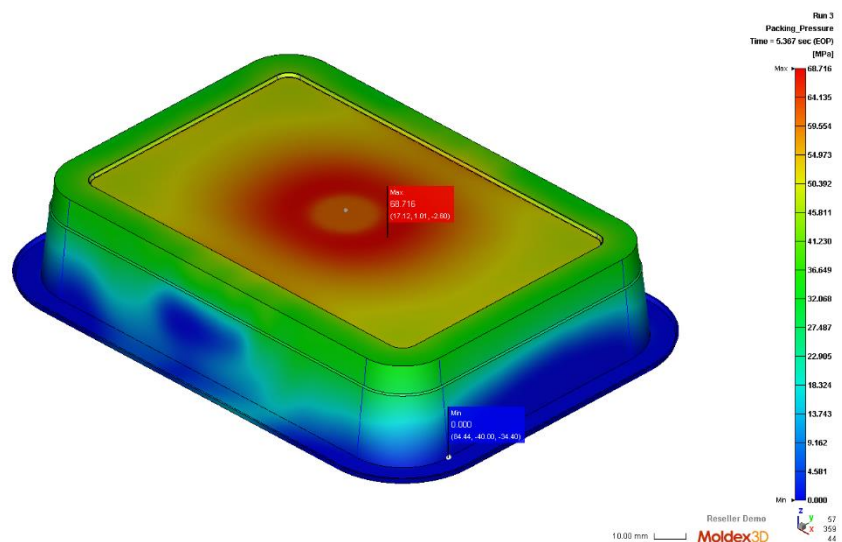
- να αποφευχθεί η υπερβολική συμπίεση του πολυμερούς τήγματος (overpacking) που μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση προεκτάματος στο τελικό προϊόν έγχυσης.

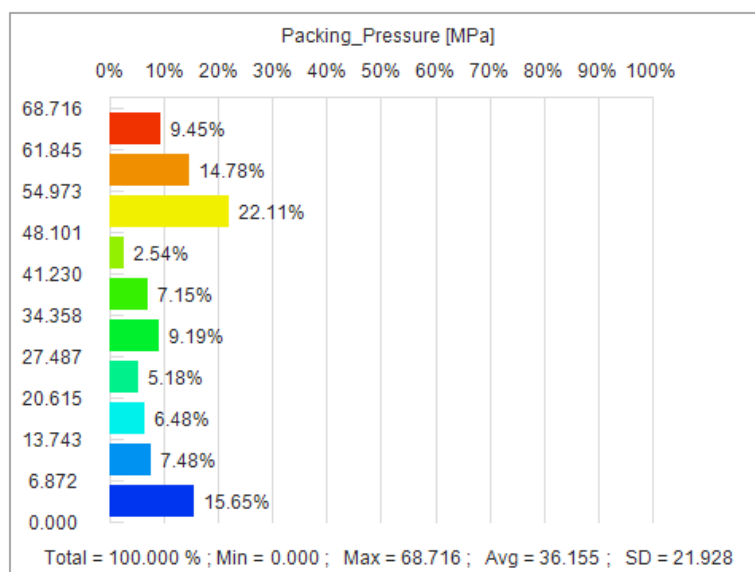
Για την ακριβέστερη πρόβλεψη τυχόν υπερβολικής συμπίεσης του λιωμένου πλαστικού, κρίνεται ενδεδειγμένη η εξέταση των ευρημάτων του παρόντος αποτελέσματος. Πιο συγκεκριμένα, χρειάζεται να ελεγχθεί η τιμή της πίεσης σε εκείνες τις περιοχές της κοιλότητας μορφοποίησης όπου υπάρχει αυξημένος κίνδυνος υπερβολικής συμπίεσης του λιωμένου πλαστικού.





Σχήμα 6.27α : Η ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης επί του λιωμένου πλαστικού στην κοιλότητα μορφοποίησης με μέση τιμή περί τα 69.125 MPa κατά την ολοκλήρωση της φάσης της πλήρωσης (Υπολογιζόμενη πίεση με το σύστημα διανομής).





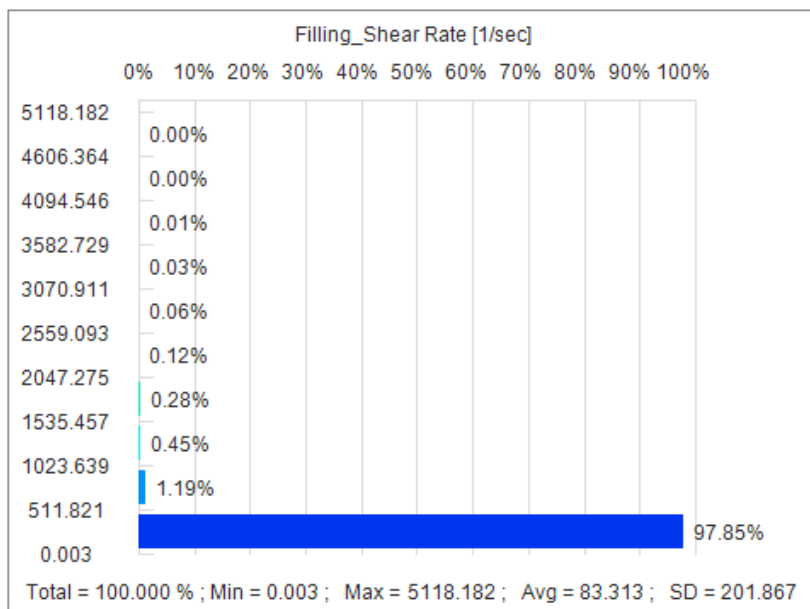
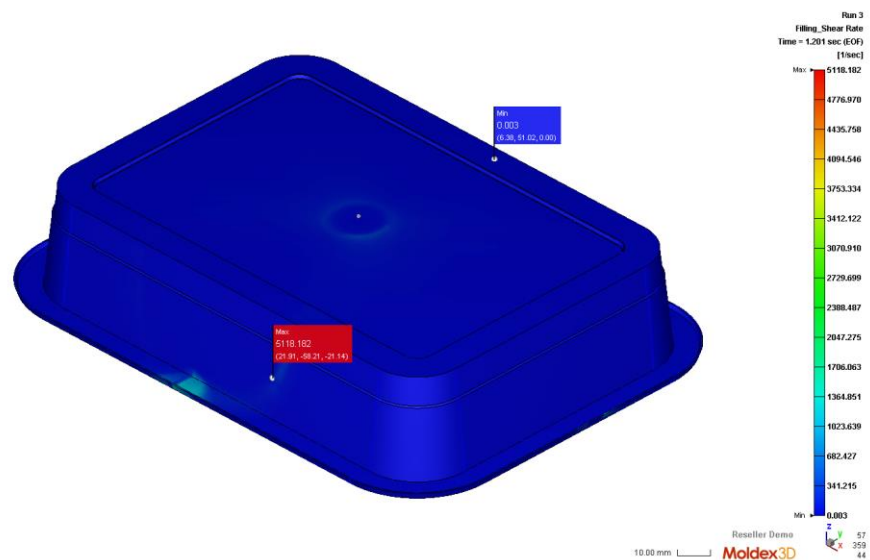
Σχήμα 6.27β : Η ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης επί του υδαρούς πλαστικού στην κοιλότητα μορφοποίησης με μέση τιμή περί τα 36.155 MPa κατά την ολοκλήρωση της φάσης της συγκράτησης (Υπολογιζόμενη πίεση με το σύστημα διανομής).

- Πλήρωση / Συγκράτηση – Ρυθμός διάτμησης

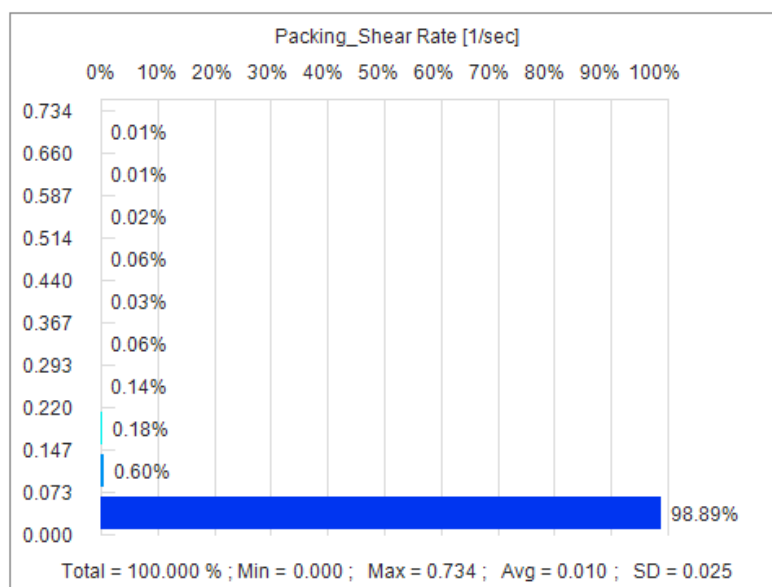
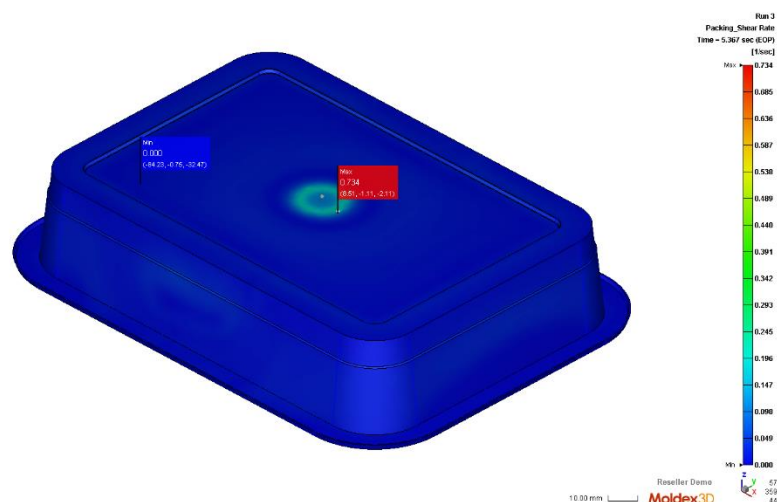
Απεικονίζει την κατανομή του ρυθμού διάτμησης στην κοιλότητα μορφοποίησης την τρέχουσα χρονική στιγμή. Η ταχύτητα ή ο ρυθμός διάτμησης εκφράζει τον ρυθμό της διατμητικής παραμόρφωσης του λιωμένου πλαστικού κατά τη διάρκεια της έγχυσης. Η μονάδα μέτρησης είναι sec^{-1} και συνιστά ποιοτικό παράγοντα προς εξέταση βαρύνουσας σημασίας στα πλαίσια του σχεδιασμού και της παραγωγής των προϊόντων έγχυσης.

Αυξάνοντας τον ρυθμό διάτμησης, οι μοριακές αλυσίδες του πολυμερούς υφίστανται αυξημένη πίεση. Στην περίπτωση που ο ρυθμός διάτμησης εξακολουθεί να αυξάνεται, οι μοριακές αλυσίδες του υλικού πιθανόν να αποσπαστούν, γεγονός το οποίο συνεπάγεται υποβάθμιση της ποιότητας του πλαστικού και της μηχανικής αντοχής του τελικού προϊόντος συνεπακόλουθα. Γενικά, ο ρυθμός διάτμησης είναι ο μέγιστος εντός της πύλης εισόδου όπου και η ταχύτητα ροής του λιωμένου πλαστικού είναι η μέγιστη.

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} . Πρακτικά, οι υψηλότερες τιμές του ρυθμού διάτμησης συνεπάγονται περισσότερα cm^3 πλαστικού που μπορούν να περάσουν από μια πύλη εισόδου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Προφανώς, οι μέγιστες τιμές του ρυθμού διάτμησης που εμφανίζονται δεν αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή απαραίτητα (Σχήμα 6.28α και Σχήμα 6.28β).



Σχήμα 6.28α : Η ομοιόμορφη κατανομή του χαμηλού ρυθμού διάτμησης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης κατά την ολοκλήρωση της φάσης της πλήρωσης. Το γεγονός ότι το προφίλ του ρυθμού διάτμησης δεν μεταβάλλεται συνεχώς και απότομα οπότε δεν παρατηρείται έντονη χρωματική διακύμανση, συνιστά πρώιμη ένδειξη μη σχηματισμού γραμμών/σημαδιών ροής στην εξωτερική επιφάνεια του τελικού προϊόντος έγχυσης.

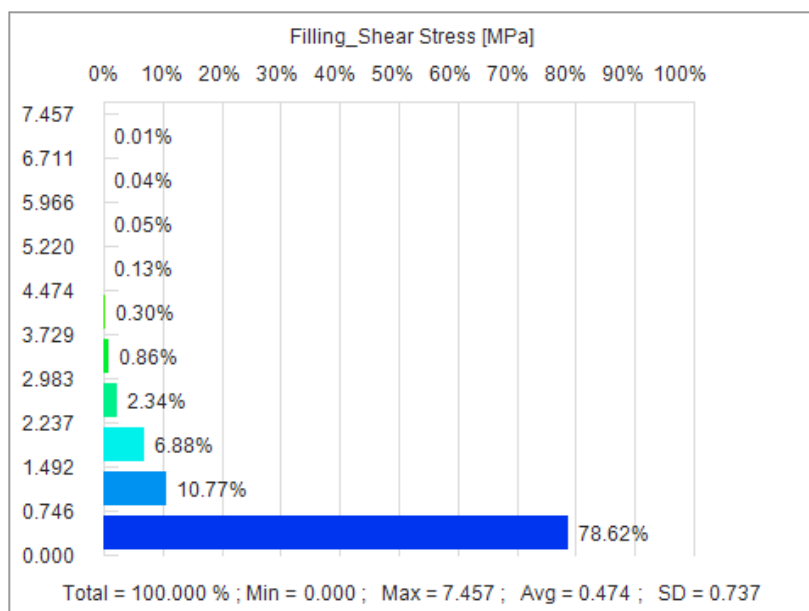
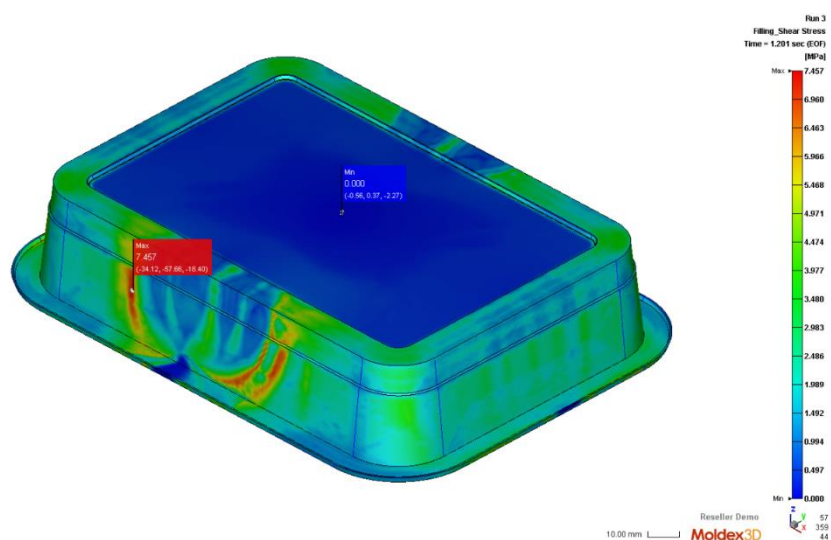


Σχήμα 6.28β : Η ομοιόμορφη κατανομή του χαμηλού ρυθμού διάτμησης εντός της κοιλότητας μορφοποίησης κατά την ολοκλήρωση της φάσης της συγκράτησης. Το γεγονός ότι το προφίλ του ρυθμού διάτμησης δεν μεταβάλλεται συνεχώς και απότομα οπότε δεν παρατηρείται έντονη χρωματική διακύμανση και σε αυτή τη φάση, αποτελεί εν τέλει σοβαρή ένδειξη μη σχηματισμού γραμμών/σημαδιών ροής (flow lines/marks) στην εξωτερική επιφάνεια του τελικού προϊόντος έγχυσης.

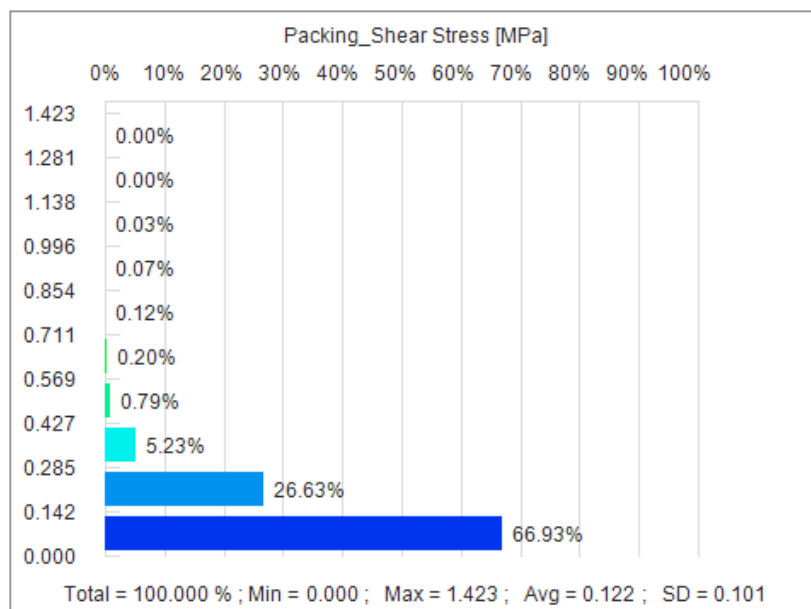
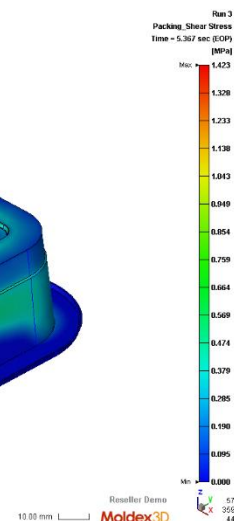
• Πλήρωση / Συγκράτηση – Διατμητική τάση

Εμφανίζει μέσω διαφορετικού χρωματισμού το πώς κατανέμεται η διατμητική τάση του λιωμένου πλαστικού την τρέχουσα χρονική στιγμή (Σχήμα 6.29α και Σχήμα 6.29β). Ιδανικά, η διατμητική τάση θα πρέπει να κατανέμεται κατά τρόπο ομαλό και να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή. Ειδικά, αυτή θα οδηγήσει νομοτελειακά στην παραμόρφωση του τελικού προϊόντος και στη μη ακρίβειά του ως προς τις διαστάσεις και τις ανοχές του. Ενώ, η πολύ υψηλή διατμητική τάση προκαλεί αναπόφευκτα την ανάπτυξη ισχυρών παραμενουσών τάσεων στο τελικό προϊόν.

Υπογραμμίζεται ότι οι μέγιστες τιμές της διατμητικής τάσης που εμφανίζονται δεν αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή απαραίτητα. Σίγουρα, μέσα από την ερμηνεία αυτού του αποτελέσματος, είναι δυνατό να εξακριβωθεί εάν η μέγιστη διατμητική τάση στο τελικό προϊόν υπερβαίνει την αντίστοιχη μέγιστη επιτρεπτή.



Σχήμα 6.29α : Η κατανομή της διατμητικής τάσης στο τέλος της φάσης της πλήρωσης είναι στο μεγαλύτερο μέρος της μικρή (μέση τιμή 0.474 MPa) και ομαλά κατανεμημένη με εξαίρεση κάποιες πολύ μικρές περιοχές πλευρικά που δεν χρήζουν ιδιαίτερης ανησυχίας καθώς ακολουθεί η φάση της συμπίεσης.

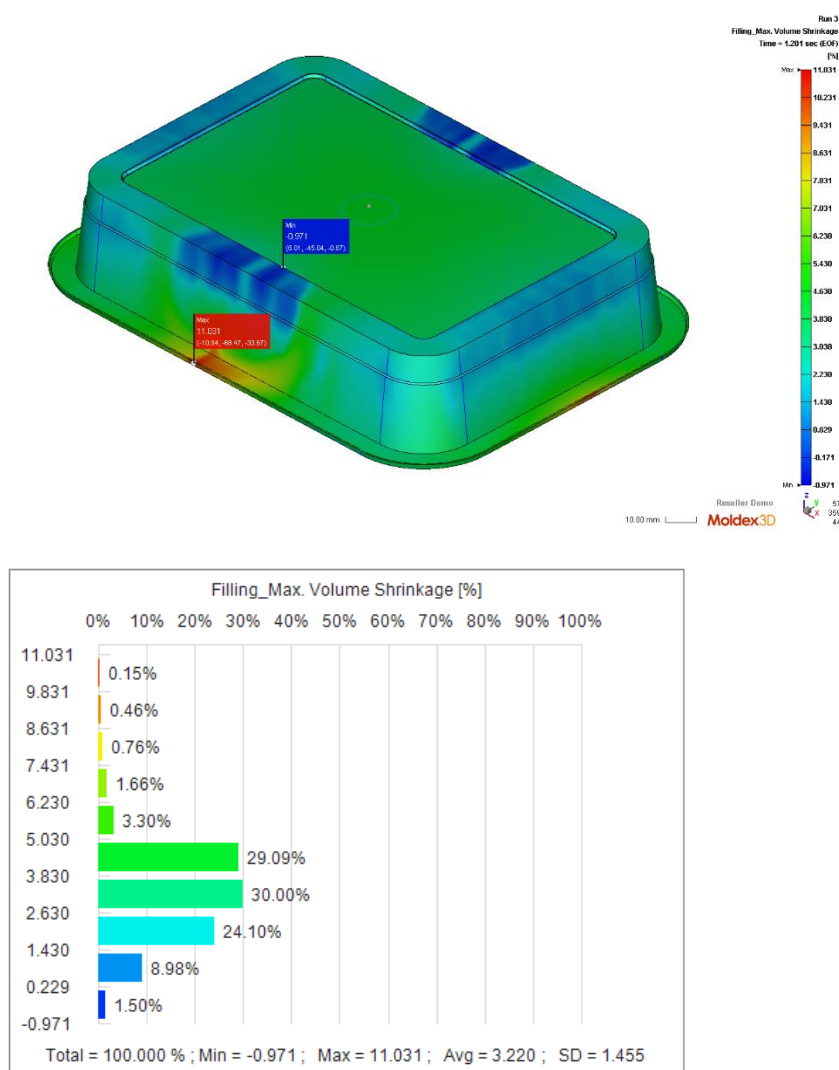


Σχήμα 6.29β : Η κατανομή της διατμητικής τάσης στο τέλος της φάσης της συγκράτησης είναι στο μεγαλύτερο μέρος της μικρή (μέση τιμή 0.122 MPa) και πολύ πιο ομαλά κατανεμημένη σε όλη την έκταση της κοιλότητας μορφοποίησης σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή στη φάση της πλήρωσης.

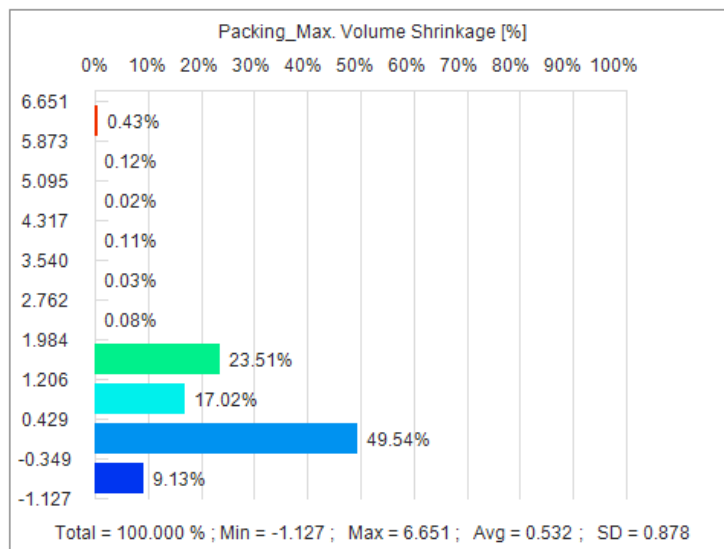
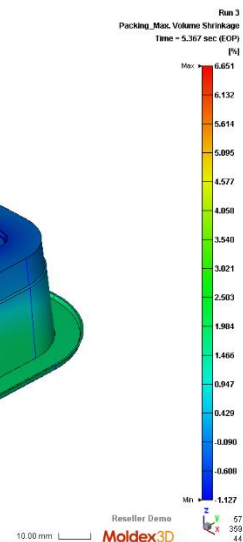
- Πλήρωση / Συγκράτηση – Μέγιστη ποσοστιαία μεταβολή του όγκου

Απεικονίζει την κατανομή της μέγιστης ποσοστιαίας μεταβολής του όγκου του λιωμένου πλαστικού μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης την τρέχουσα χρονική στιγμή λόγω αλλαγής των ογκομετρικών ιδιοτήτων του υλικού καθώς αυτό σταδιακά στερεοποιείται (Σχήμα 6.30α και Σχήμα 6.30β). Η βαθμιαία ψύξη ξεκινά από υψηλής τάξεως θερμοκρασίες και πιέσεις και καταλήγει σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία δωματίου. Ο υπολογισμός της ογκομετρικής συρρίκνωσης του πολυμερούς διενεργείται έπειτα από κοινού υπολογισμό των φάσεων συμπίεσης και ψύξης, με την τελική τιμή της συρρίκνωσης να αναφέρεται στο τέλος της φάσης ψύξης (End Of Ψύξη – EOC). Όταν αυτό το ποσοστό έχει θετική τιμή, τότε πρόκειται για ογκομετρική συρρίκνωση του υλικού ενώ, αντίθετα, πρόκειται για ογκομετρική διαστολή.

Μεταξύ των άλλων, στην ογκομετρική διαστολή, ή αλλιώς στην αρνητική ογκομετρική συρρίκνωση, οφείλεται ο σχηματισμός προεκτάματος στο τελικό αντικείμενο, γεγονός το οποίο δημιουργεί προβλήματα κατά την εξόλκευσή του. Σε κάθε περίπτωση, επιδίωξη είναι η κατά δυνατόν πιο ομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση. Σίγουρα, η μη ομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση οφείλεται τόσο στη μη ομαλή κατανομή πίεσης / θερμοκρασίας κατά τις φάσεις πλήρωσης και συμπίεσης όσο και στην ανομοιογενή ψύξη του λιωμένου πλαστικού. Γενικά, για την εξάλειψη της ανομοιόμορφης ογκομετρικής συρρίκνωσης του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς που οδηγεί, συν τοις άλλοις, στην ανάπτυξη θερμικά επαγόμενων υπολειμματικών τάσεων προκρίνεται, μεταξύ των άλλων, η τροποποίηση του συστήματος ψύξης του καλουπιού με σκοπό την καλυτέρευση της αποδοτικότητάς του.



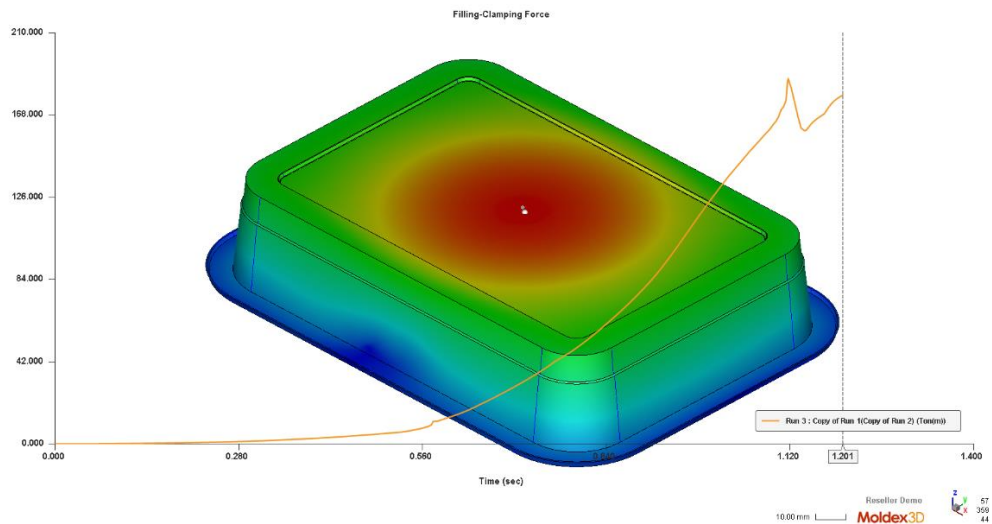
Σχήμα 6.30α : Η κατανομή της ογκομετρικής συρρίκνωσης στο τέλος της φάσης της πλήρωσης. Βασική επιδίωξη να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή και ομοιόμορφη ήδη κατά την τρέχουσα φάση καθώς, σε αντίθετη περίπτωση, σχηματίζονται ρουφήγματα (sink marks) και κενά (voids) στο τελικό προϊόν, επιτείνεται η στρέβλωσή του και εντείνονται οι παραμένουσες τάσεις στο εσωτερικό του. Στην προκειμένη περίπτωση, παρατηρείται σε περιοχές μικρής έκτασης αρνητική συρρίκνωση, κάτι το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψιν μετά και τη μελέτη της στρέβλωσης τους τελικού προϊόντος για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων.



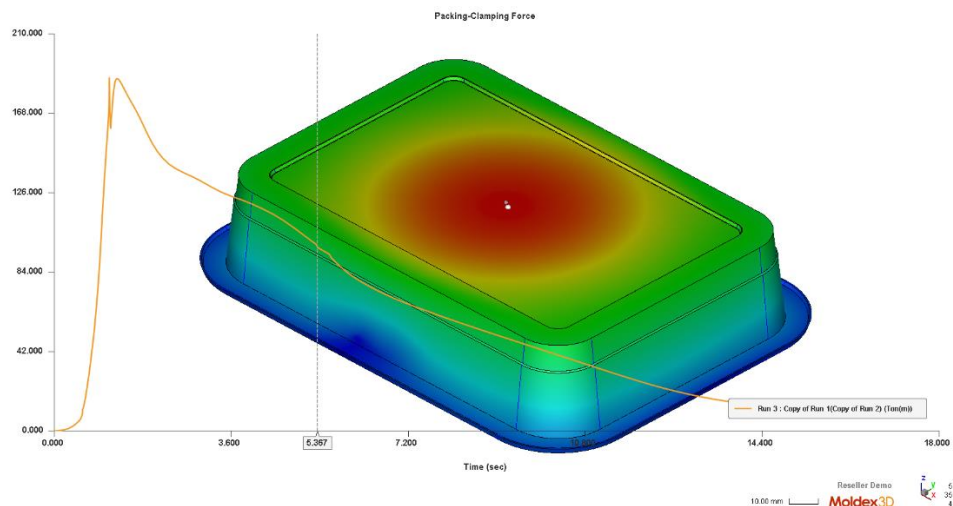
Σχήμα 6.30β : Η κατανομή της ογκομετρικής συρρίκνωσης στο τέλος της φάσης της συγκράτησης. Βασική επιδίωξη να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή και ομοιόμορφη στην τρέχουσα φάση ειδικά, σχηματίζονται μη αναστρέψιμα ρουφήγματα (sink marks) και κενά (voids) στο τελικό προϊόν, η στρέβλωσή του είναι εκτεταμένη και εντείνονται οι εσωτερικές παραμένουσες τάσεις. Εν προκειμένω, παρατηρούνται και σε αυτή τη φάση κατά τόπους μικρές αρνητικές συρρικνώσεις, κάτι το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψιν μετά και τη μελέτη της στρέβλωσης τους τελικού προϊόντος για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων. Να τονιστεί ότι αυτές οι συρρικνώσεις δεν παρατηρούνται πλησίον της επιφάνειας διαχωρισμού οπότε δεν υπάρχει ο κίνδυνος εμφάνισης προεκτάματος (flash) που είναι και η βασική απόρροια της αρνητικής συρρίκνωσης.

- Πλήρωση / Συγκράτηση – Δύναμη σύσφιξης

Εμφανίζει σε την κατανομή της δύναμης σύσφιξης (clamping force) του καλουπιού σε Τον όσο διαρκούν οι φάσεις της πλήρωσης της κοιλότητας μορφοποίησης με πολυμερές τήγμα (Σχήμα 6.31α) και συγκράτησης του τήγματος εντός της κοιλότητας (Σχήμα 6.31β). Σημειώνεται ότι η τιμή αυτή είναι η υπολογιζόμενη απαιτούμενη δύναμη σύσφιξης και όχι η δύναμη που εξάγει η μηχανή έγχυσης.



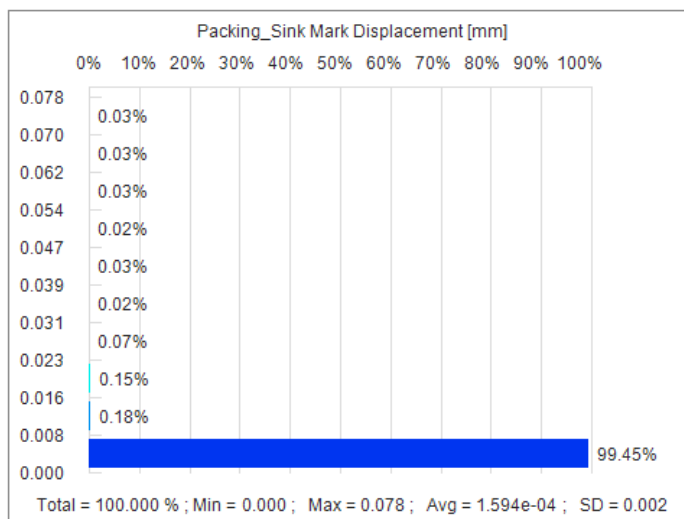
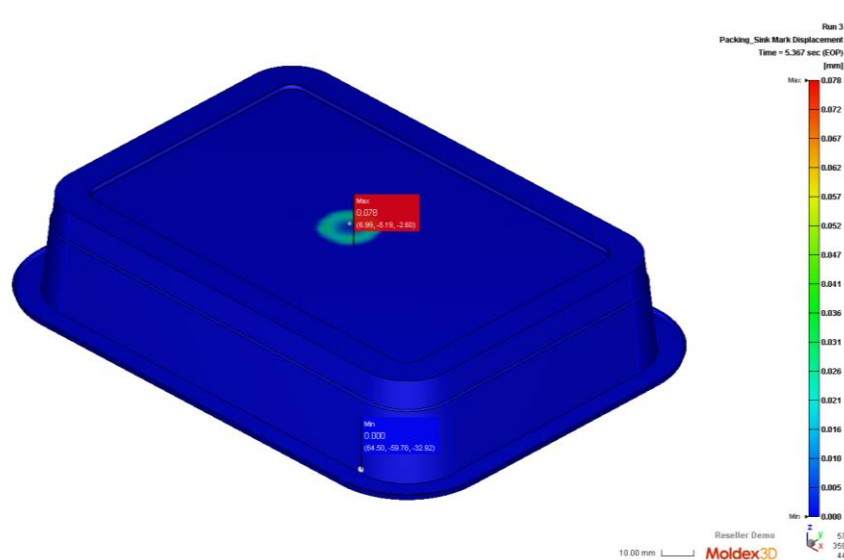
Σχήμα 6.31α : Η κατανομή της δύναμης σύσφιξης του καλουπιού στη φάση της πλήρωσης με μέγιστη τιμή τους 186.69 Tons (m)



Σχήμα 6.31β : Η κατανομή της δύναμης σύσφιξης του καλουπιού στη φάση της συγκράτησης με μέγιστη τιμή τους 186.69 Tons (m)

- Συγκράτηση – Βαθουλώματα

Εμφανίζει την πιθανή θέση των βαθουλωμάτων κάθετα στη συνολική επιφάνεια της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού (Σχήμα 6.32). Να τονιστεί ότι η υψηλή τιμή αυτού του αποτελέσματος μεταφράζεται σε υψηλού βαθμού βαθουλώματα στο τελικό προϊόν έγχυσης. Σε αυτό το σημείο να υπογραμμίζεται 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 αρκούντως ικανοποιητικά για εκείνον και δεν απαιτούνται πρόσθετες διορθωτικές ενέργειες για τη βελτίωση ορισμένων κατασκευαστικών προβλημάτων που έχουν ήδη προκύψει όπως, για παράδειγμα, η ογκομετρική συρρίκνωση.



Σχήμα 6.32 : Πιθανές θέσεις βαθουλωμάτων στο τελικό προϊόν έγχυσης με μέγιστη εκτόπιση ίση με 0.078 mm.

5.4.3.β Μετα-επεξεργασία – Βήμα 3 : Ανάλυση αποτελεσμάτων ψύξης

Η προσομοίωση της φάσης της ψύξης στο λογισμικό Moldex3D, στοχεύει :

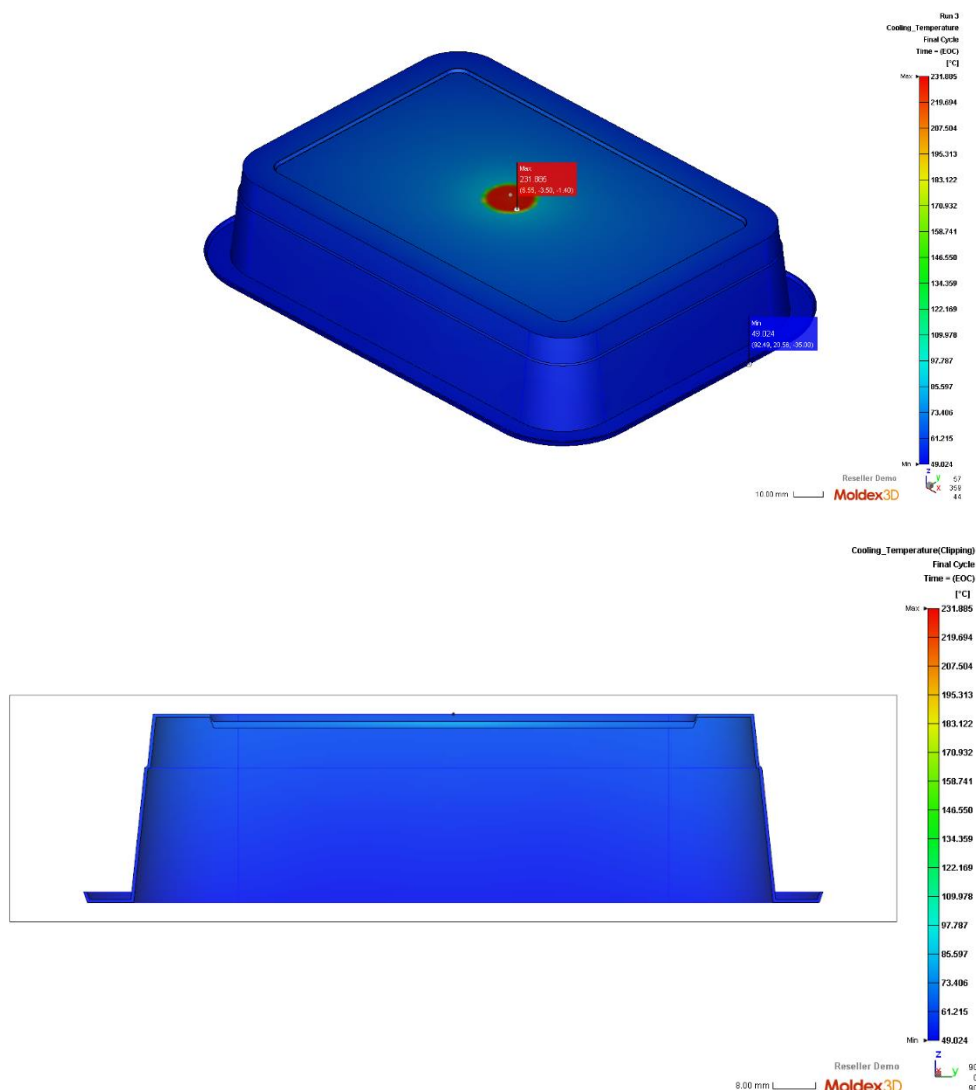
- ✓ στην εξασφάλιση αποδοτικού συστήματος ψύξης το οποίο με τη σειρά του θα οδηγήσει σε ομοιογενή ψύξη του λιωμένου πλαστικού και ακολούθως θα συμβάλει στον περιορισμό της στρέβλωσης (warpage) του τελικού προϊόντος,
- ✓ στον εντοπισμό πιθανών μεμονωμένων σημείων αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) στο εσωτερικό του τελικού προϊόντος έγχυσης,
- ✓ στην πρόβλεψη του απαιτούμενου χρόνου ψύξης (Ψύξη time) και
- ✓ στην εκτίμηση της χρονικής διάρκειας ενός πλήρους κύκλου έγχυσης (cycle time).

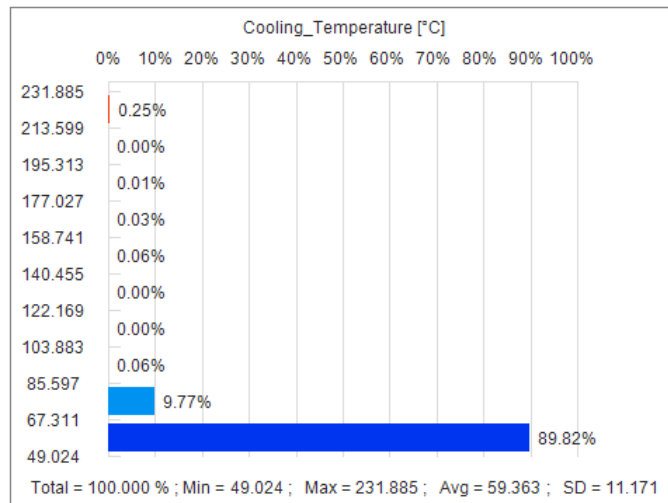
Από την σκοπιά της φάσης της ψύξης, αναφορικά με το προϊόν έγχυσης που μελετάται επί του παρόντος, αξίζει να γίνει ξεχωριστή αναφορά στα παρακάτω αποτελέσματα της προσομοίωσης στο λογισμικό Moldex3D :

- Ψύξη – Temperature

Εμφανίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στο στερεοποιημένο πλαστικό εντός της κοιλότητας μορφοποίησης στο τέλος της φάσης της ψύξης. Πρόκειται για ένα αποτέλεσμα βαρύνουσας σημασίας για το λόγο ότι μία θερμοκρασία ομοιόμορφα κατανομημένη συνεπάγεται σημαντικό περιορισμό του κινδύνου εμφάνισης στρέβλωσης (warpage), ρουφηγμάτων (sink marks) ή παραμενουσών τάσεων (residual stresses) εσωτερικά στο τελικό προϊόν έγχυσης.

Σίγουρα, όσο πιο μικρό είναι το θερμοκρασιακό εύρος, τόσο πιο ομοιόμορφη είναι η κατανομή της θερμοκρασίας (Σχήμα 6.33). Επίσης, μέσα από το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να διαπιστωθεί η ύπαρξη τυχόν μεμονωμένων σημείων αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spots) εσωτερικά στο μορφοποιημένο αντικείμενο (Σχήμα 6.33 - Τομή). Πιθανή ύπαρξη αυτών συνεπάγεται την αδυναμία τοποθέτησης των εξολκέων ακριβώς σε αυτά τα σημεία ή πλησίον αυτών. Πέραν τούτου, τα μεμονωμένα σημεία αυξημένου θερμικού φορτίου εντείνουν τη στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης και προσαυξάνουν τη χρονική διάρκεια του κύκλου της έγχυσης.

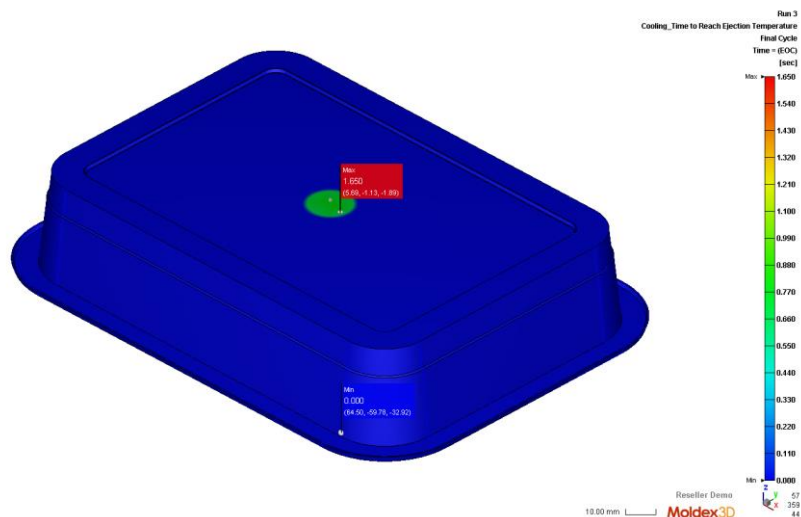


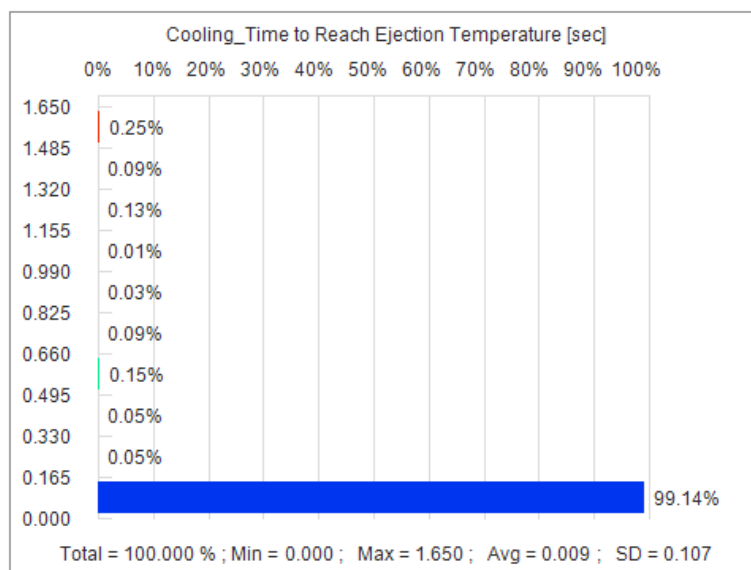
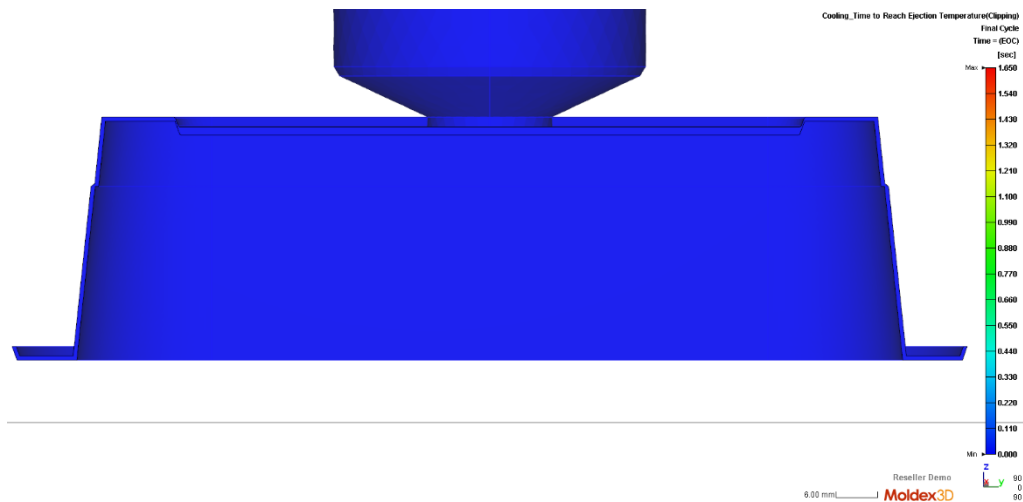


Σχήμα 6.33 : Η θερμοκρασία εντός της κοιλότητας μορφοποίησης στο τέλος της φάσης της ψύξης. Το μικρό θερμοκρασιακό εύρος που παρατηρείται (από 49.024 °C έως 85.597 °C και μέση τιμή 59.363 °C) καταδεικνύει την ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας. Επίσης, κάνοντας μια τομή στο μορφοποιημένο αντικείμενο περίπου στο μέσον, παρατηρείται η απουσία μεμονωμένων σημείων αυξημένου θερμικού φορτίου.

- Ψύξη – Χρόνος που απαιτείται μέχρι την εξόλκευση

Πρόκειται για τον εκτιμώμενο χρόνο που προκύπτει από τα αποτελέσματα στο τέλος της φάσης συγκράτησης του λιωμένου πλαστικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης για την υπολογισμένη θερμοκρασία της επιφάνειας της κοιλότητας και την εκτιμώμενη κεντρική θερμοκρασία του μορφοποιημένου αντικειμένου που πρέπει να ψυχθεί αρκετά ώστε να εξολκευθεί (Σχήμα 6.34). Αυτή η τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης μεμονωμένων σημείων αυξημένου θερμικού φορτίου αλλά και χρονικού περιορισμού για τον κύκλο έγχυσης ελέγχοντας, πρακτικά, εάν η χρονική διάρκεια του είναι μεγάλη ή όχι.



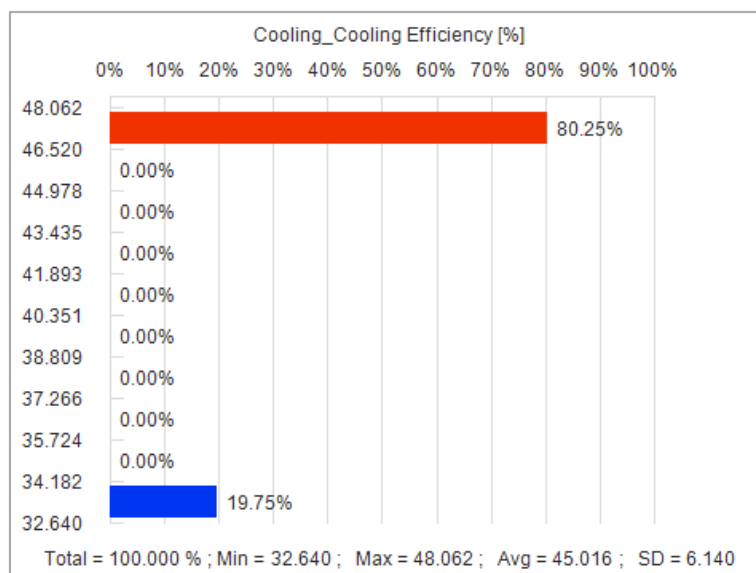
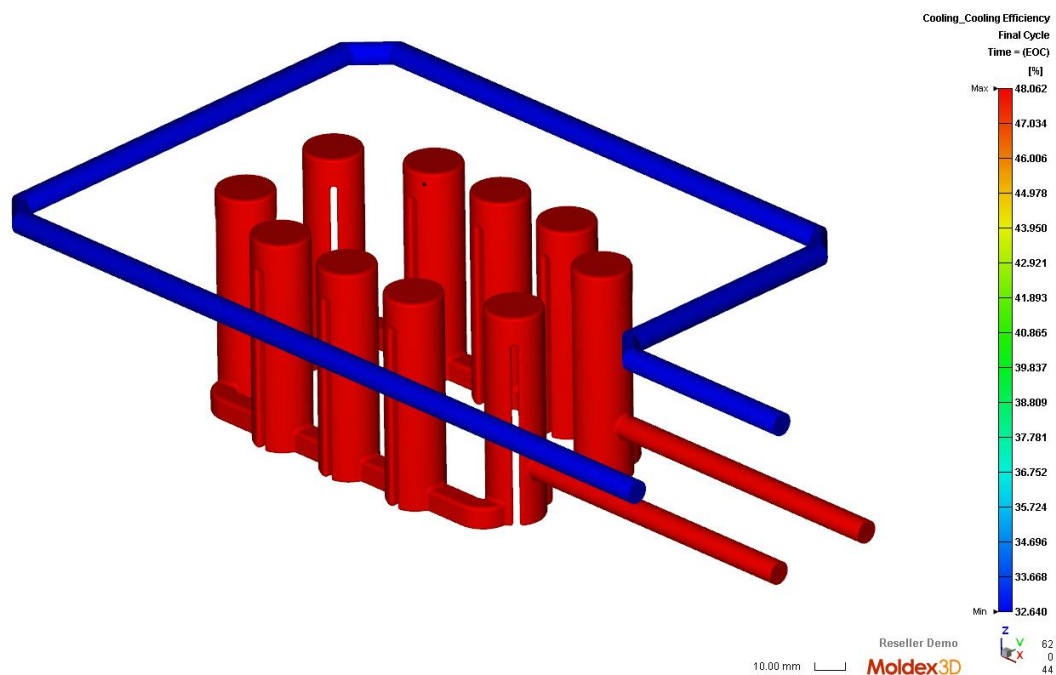


Σχήμα 6.34 : Ο μέγιστος εκτιμώμενος χρόνος που απαιτείται για την εξόλκευση του προϊόντος (συμπεριλαμβανομένης της πύλης εισόδου) ανέρχεται στα 1.65 sec. Κάνοντας μια τομή περίπου στο μέσον του μορφοποιημένου αντικειμένου δεν ανιχνεύεται κανένα μεμονωμένο σημείο αυξημένου θερμικού φορτίου (hot spot).

- Ψύξη – Αποδοτικότητα ψύξης

Εμφανίζει την αποδοτικότητα κάθε καναλιού του συστήματος ψύξης του καλουπιού διά του ποσοστού της θερμότητας του καλουπιού που κάθε κανάλι απαγάγει. Γενικά, η θετική τιμή υποδηλώνει αποδοτικότητα ψύξης (Σχήμα 6.35), ενώ η αρνητική τιμή υποδηλώνει αποδοτικότητα θέρμανσης. Σε κάθε περίπτωση, η αρνητική τιμή δεν είναι αποδεκτή στα πλαίσια της ολοκλήρωσης ενός κύκλου έγχυσης.

Στην περίπτωση δε που η αποδοτικότητα ψύξης είναι πολύ χαμηλή, αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το σύστημα ψύξης του καλουπιού χρήζει βελτίωσης. Αφετέρου, εφόσον η αποδοτικότητα ψύξης είναι πολύ υψηλή, πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το φορτίο για τα υπάρχοντα κανάλια ψύξης είναι υπερβολικά μεγάλο.

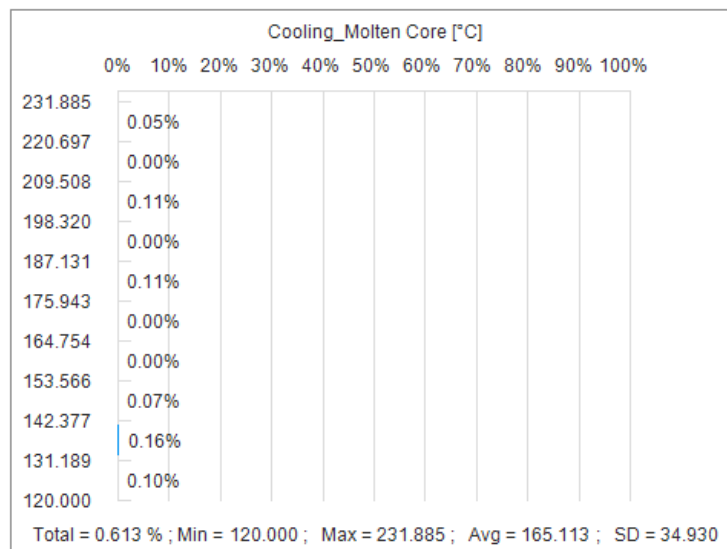
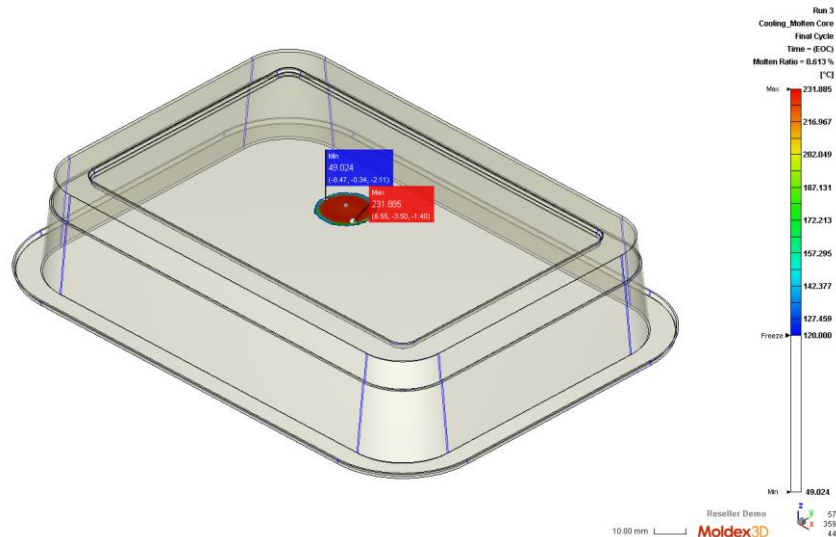


Σχήμα 6.35 : Η αποδοτικότητα του συστήματος ψύξης. Για να θεωρηθεί ένα σύστημα αποδοτικό θα πρέπει τα κανάλια ψύξης να συνεισφέρουν εξ ημισείας. Εν προκειμένω, η διάταξη του καναλιού στον πυρήνα συνεισφέρει κοντά στο 50% (48.062%), κάτι το οποίο είναι επιθυμητό και εν τέλει αποδεκτό. Από την άλλη, το κανάλι στο θηλυκό συνεισφέρει αρκετά κάτω από το 50% (32.64%). Αυτό σημαίνει ότι η αποδοτικότητα του συγκεκριμένου καναλιού επιδέχεται βελτίωσης είτε μέσω μεγέθυνσης της διαμέτρου του είτε μέσω αναδιάταξης αυτού. Δεδομένου, ωστόσο, ότι η ψύξη έχει ήδη ολοκληρωθεί κατά ένα μεγάλο ποσοστό ήδη από την φάση της συγκράτησης, η εν λόγω διορθωτική ενέργεια δεν θεωρείται κρίσιμη.

- Ψύξη – Λιωμένος Πυρήνας

Το αποτέλεσμα αυτό 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 ανάλογα, οι περιοχές του μορφοποιημένου αντικειμένου με αυξημένο θερμικό φορτίο θα πρέπει να έχουν εξαλειφθεί εντελώς (Σχήμα 6.36). Ειδικά, θεωρείται επιβεβλημένο, σε πρώτη φάση, να αυξηθεί ο χρόνος ψύξης του λιωμένου

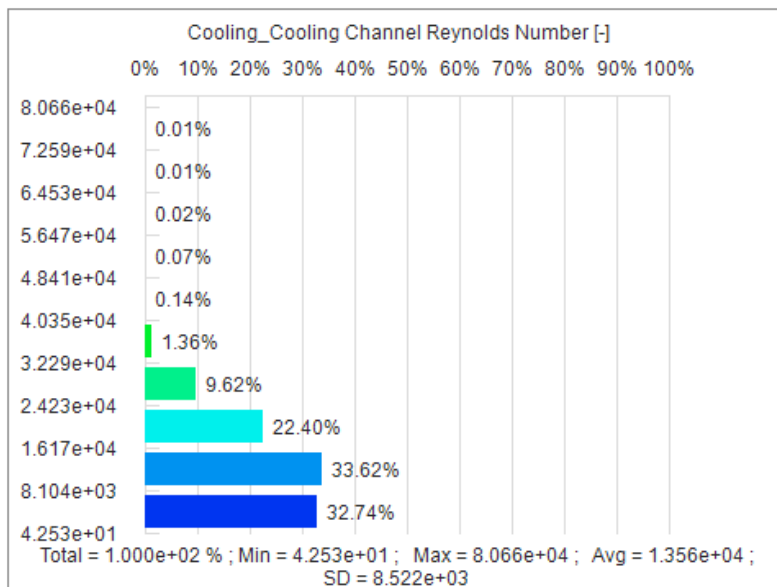
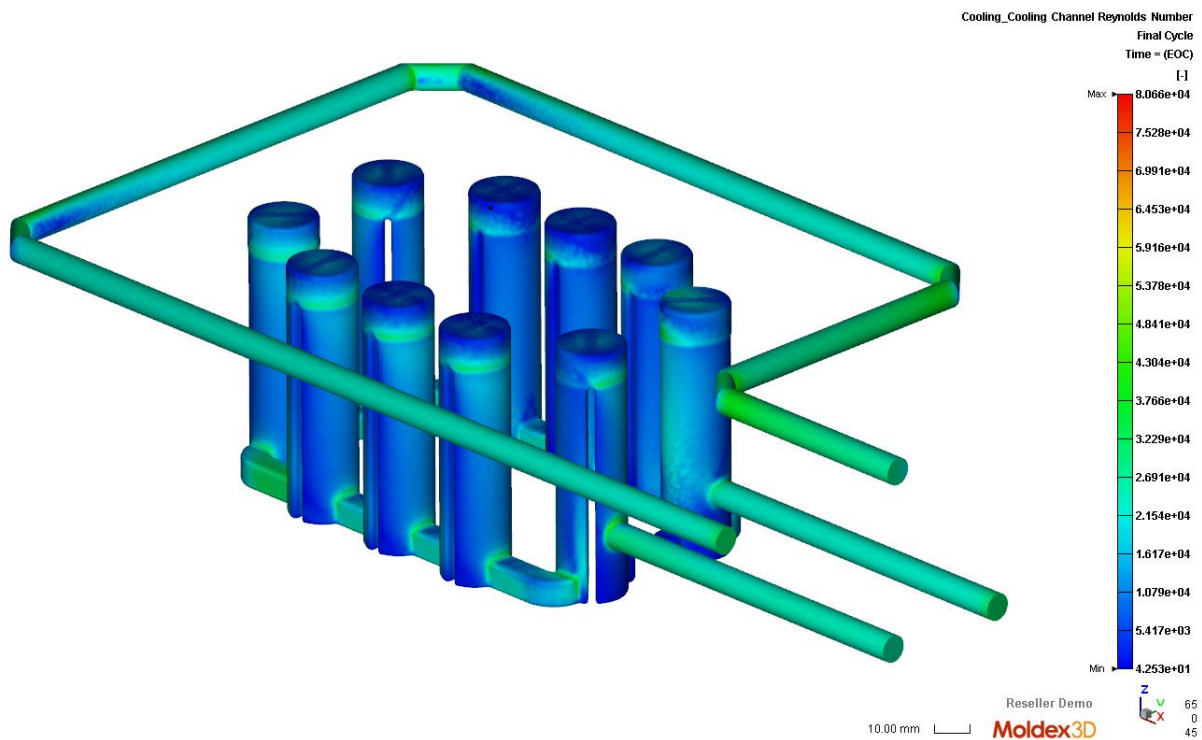
πλαστικού ώστε να καταστεί αποδοτικός. Έπειτα, δεδομένου ότι το πρόβλημα εμμένει, χρειάζεται συμπληρωματικά να αναδιαμορφωθεί το σύστημα ψύξης του καλουπιού ώστε να βελτιωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος ως προς την ψύξη του καλουπιού.



Σχήμα 6.36 : Απουσία μεμονωμένων περιοχών αυξημένου θερμικού φορτίου με την ολοκλήρωση της φάσης της ψύξης. Αποτέλεσμα απόλυτα λογικό και αναμενόμενο δεδομένου ότι η ίδια εικόνα επικρατεί ήδη από το τέλος της προηγούμενης φάσης (packing).

- Ψύξη – Αριθμός Reynolds στο εσωτερικό των καναλιών ψύξης

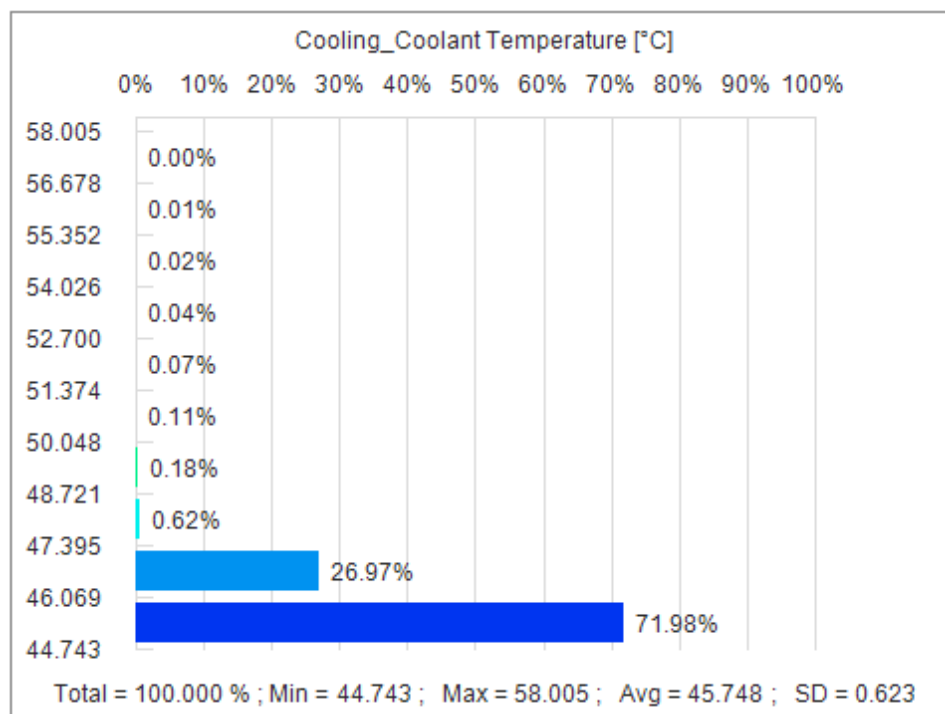
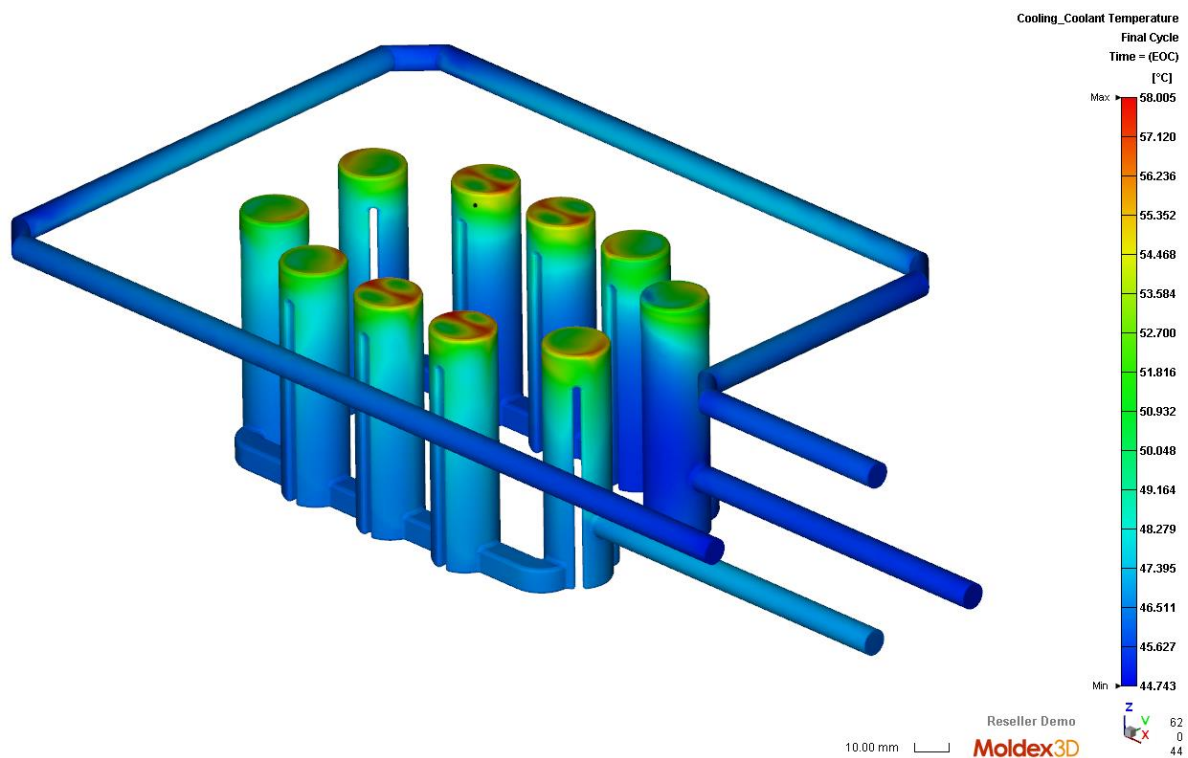
Εμφανίζει την κατανομή του αριθμού Reynolds στο εσωτερικό των καναλιών ψύξης. Για κανάλια ψύξης κυκλικής διατομής η τιμή του αριθμού Reynolds θα πρέπει να είναι τουλάχιστον **4000** ώστε να εξασφαλίζεται η τυρβώδης ροή του ψυκτικού μέσου εντός των καναλιών (Σχήμα 6.37).



Σχήμα 6.37 : Αριθμός Reynolds αρκετά πάνω από 4000 κατά ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή. Ο υψηλός αριθμός Reynolds αποτελεί επιδίωξη καθώς με την ύπαρξη τυρβώδους ροής βελτιώνονται τόσο η μεταφορά θερμότητας όσο και η αποδοτικότητα της ψύξης.

- Ψύξη – Θερμοκρασία ψυκτικού

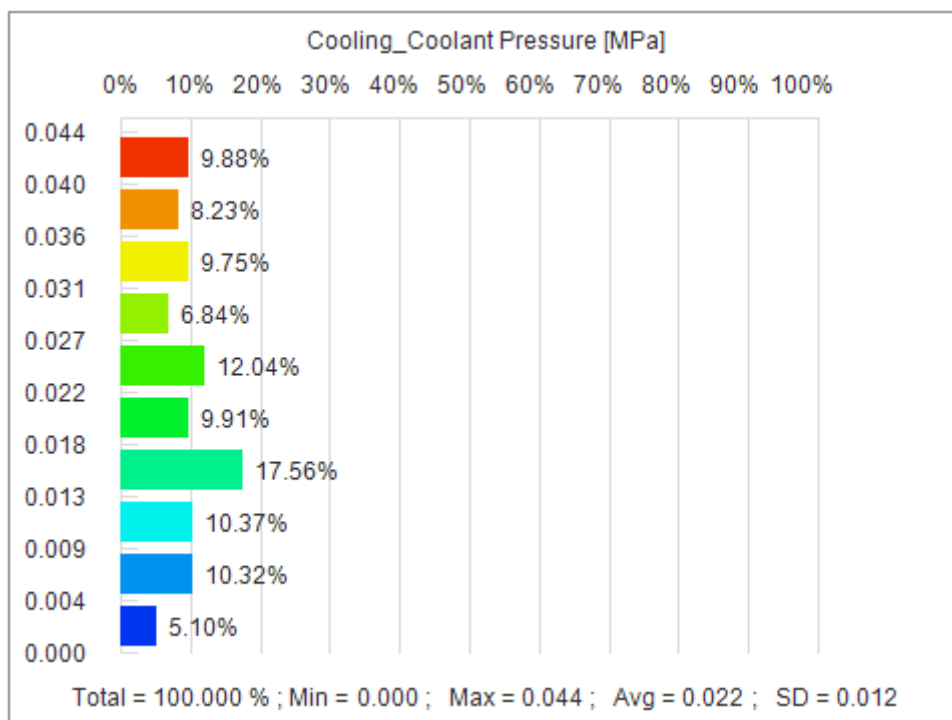
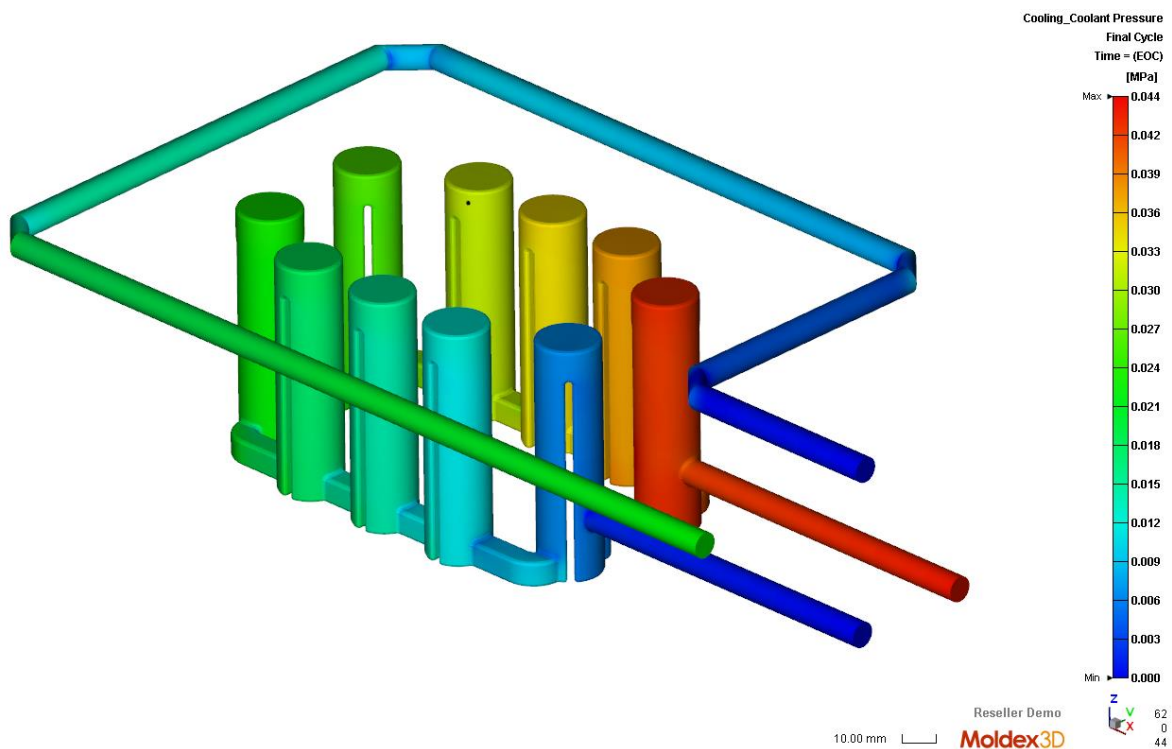
Εμφανίζει την κατανομή της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου στο εσωτερικό των καναλιών ψύξης (Σχήμα 6.38).



Σχήμα 6.38 : Η κατανομή της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου εντός των καναλιών ψύξης.

- Ψύξη – Πίεση ψυκτικού

Εμφανίζει την κατανομή της πίεσης του ψυκτικού μέσου στο εσωτερικό των καναλιών ψύξης στη μόνιμη κατάσταση (Σχήμα 6.39).

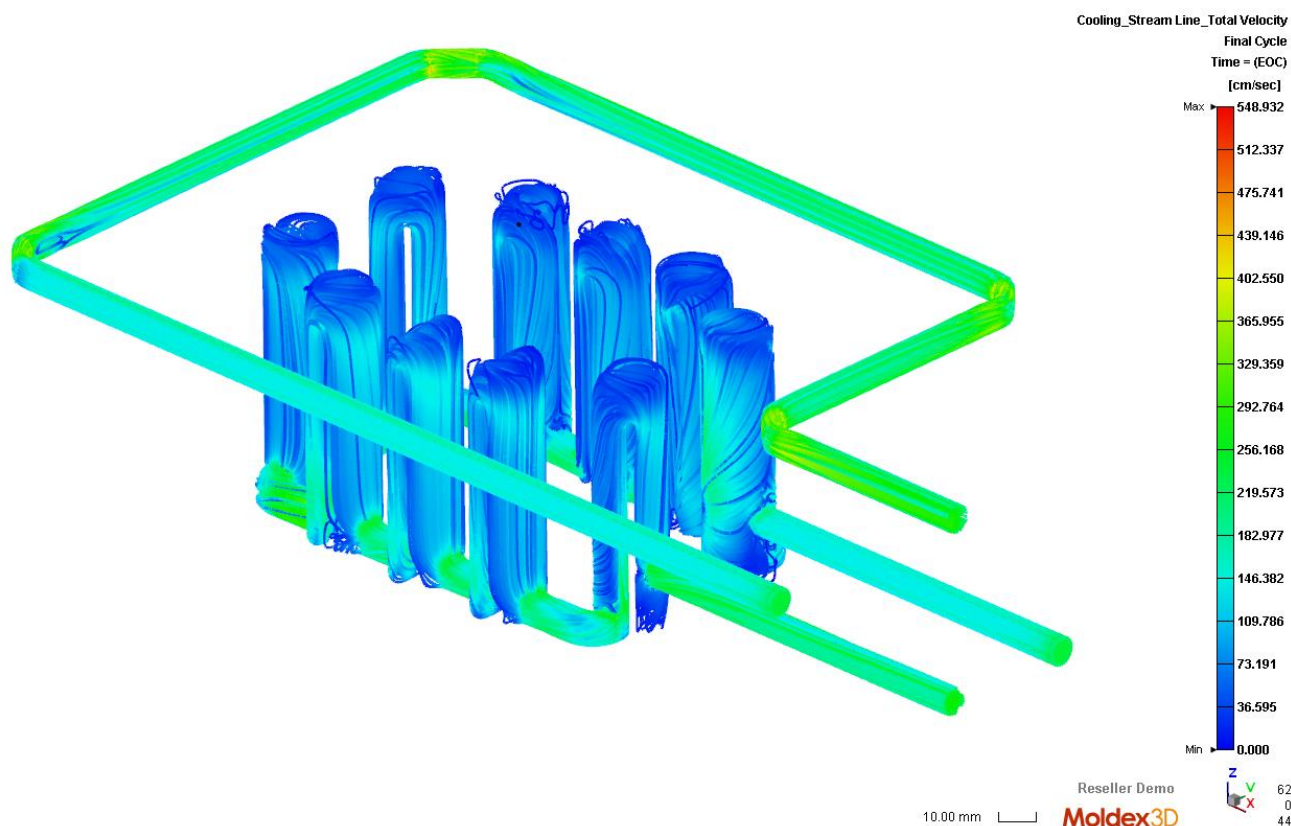


Σχήμα 6.39 : Η κατανομή της πίεσης του ψυκτικού μέσου εντός των καναλιών ψύξης.

- Ψύξη – Συνολική ταχύτητα γραμμής ροής

Εμφανίζει την συνολική ταχύτητα ροής του ψυκτικού μέσου όπως αυτή μεταβάλλεται κατά μήκος της διαδρομής ροής (Σχήμα 6.40). 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

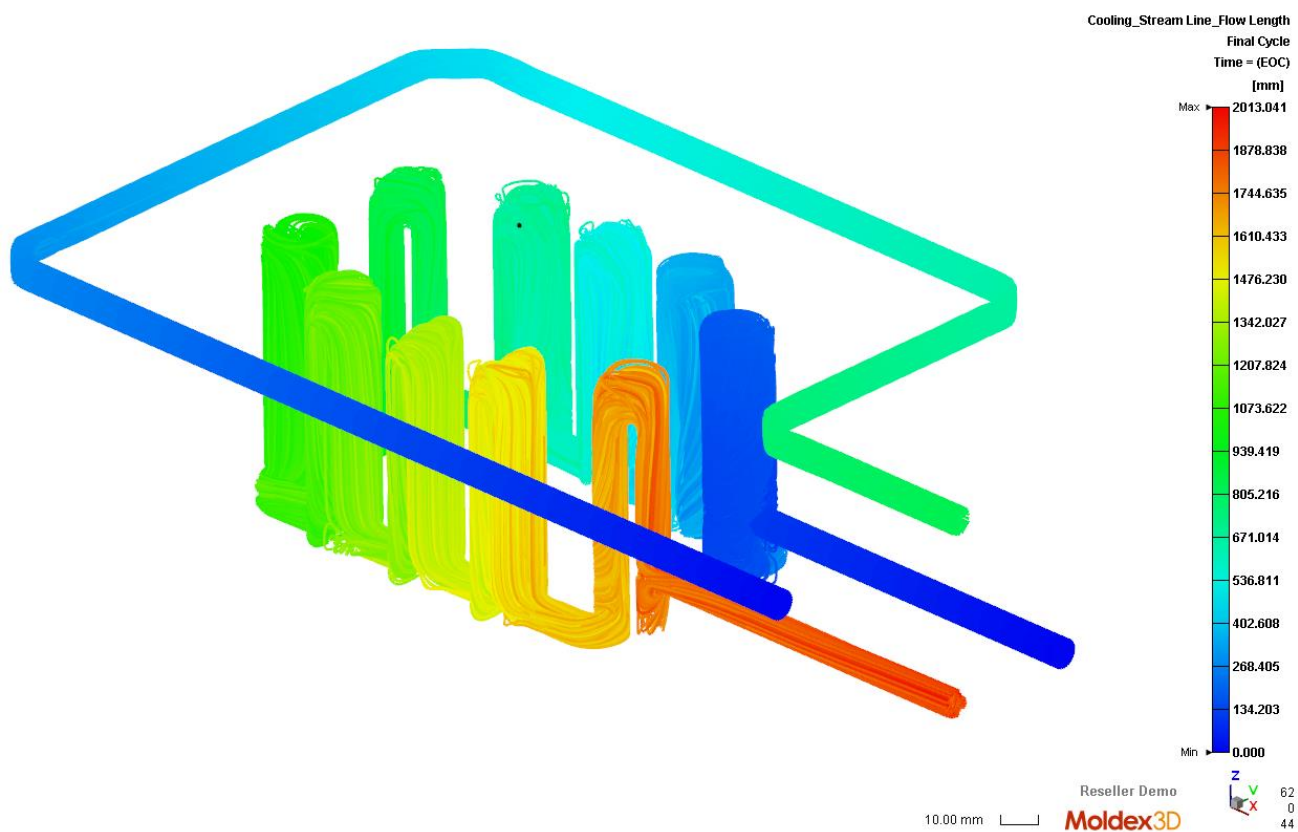
τρεις διευθύνσεις X, Y και Z. Γενικά, υψηλότερη ταχύτητα ροής στο κανάλι ψύξης θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη πτώση πίεσης αλλά καλύτερη μεταφορά θερμότητας και αποδοτικότητα ψύξης.



Σχήμα 6.40 : Η συνολική ταχύτητα ροής του ψυκτικού μέσου (max : 548.932 cm/sec).

- Ψύξη – Μήκος διαδρομής ροής

Εμφανίζει το μήκος της διαδρομής ροής του ψυκτικού μέσου σε mm από την είσοδό του στο κύκλωμα ψύξης έως την έξοδό του από αυτό. Πιο συγκεκριμένα, 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 (Σχήμα 6.41). Οποσδήποτε, ερμηνεύοντας τα ευρήματα του αποτελέσματος αυτού είναι δυνατό να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα της ψύξης και να ανιχνευθούν πιθανά αδιέξοδα ή ανισορροπίες στη ροή του ψυκτικού μέσου εντός του κυκλώματος ψύξης.



Σχήμα 6.41 : Το μήκος της διαδρομής ροής του ψυκτικού μέσου (μέγιστο: 2013.041 mm στην έξοδο του κυκλώματος ψύξης στον πυρήνα).

5.4.3.γ Μετα-επεξεργασία – Βήμα 4 : Ανάλυση αποτελεσμάτων στρέβλωσης

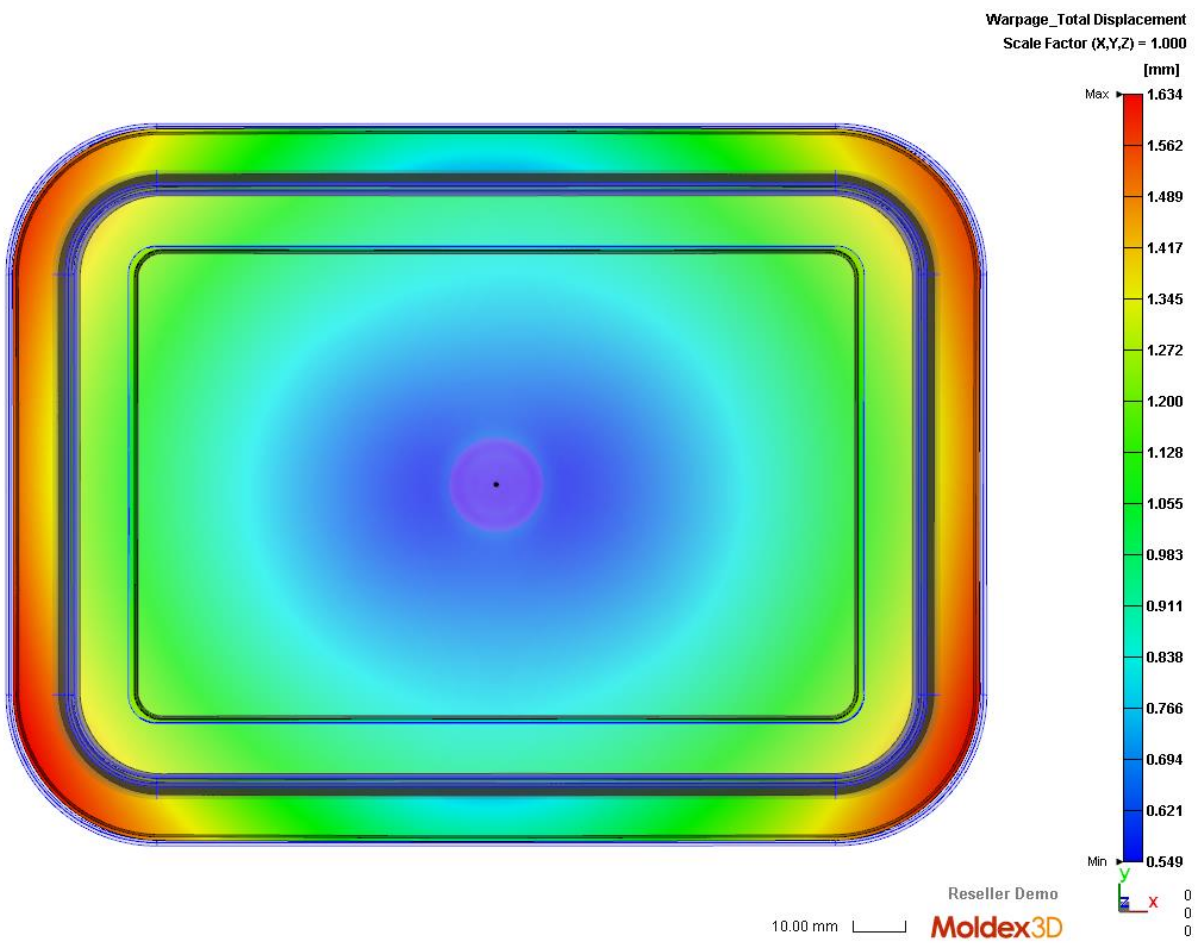
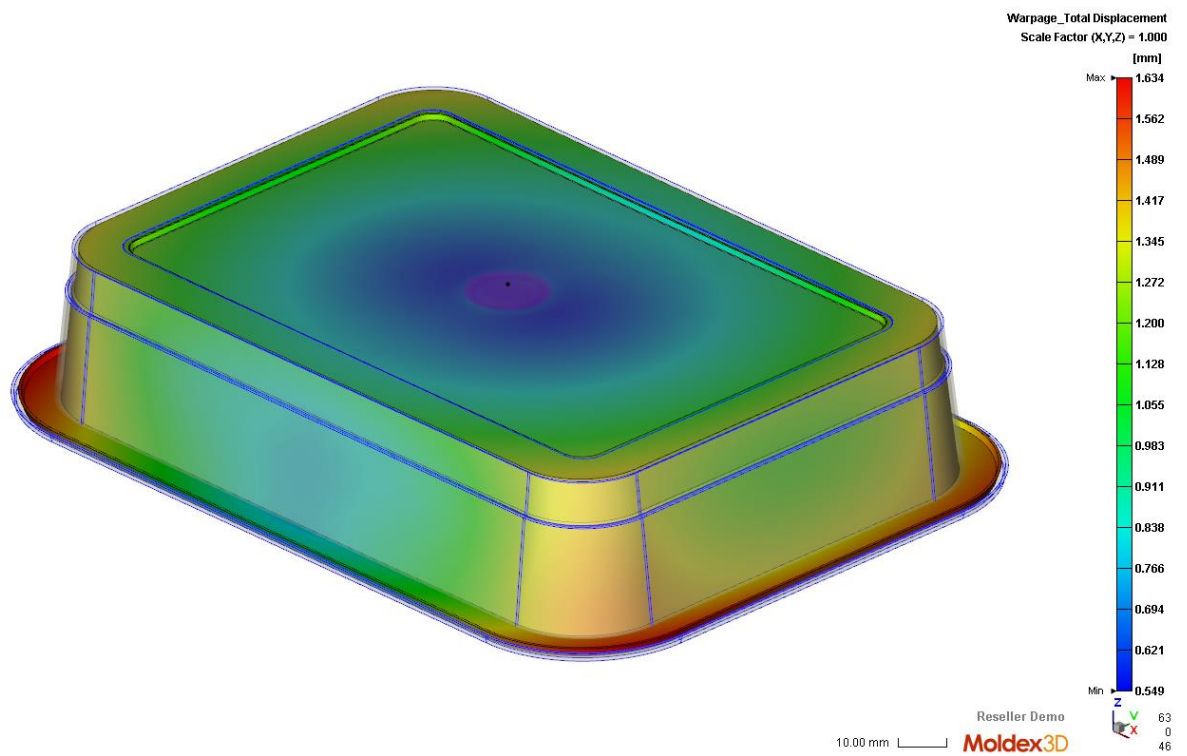
Η μελέτη της στρέβλωσης μετά και την ολοκλήρωση της φάσης της ψύξης του λιωμένου πλαστικού εντός της κοιλότητας μορφοποίησης αποσκοπεί στον εντοπισμό στρεβλώσεων (warpages) και εσωτερικών υπολειμματικών τάσεων στο τελικό προϊόν έγχυσης μετά την απομάκρυνσή του από το καλούπι. Πιο συγκεκριμένα, με την προσομοίωση που εκτελεί το λογισμικό Moldex3D είναι δυνατό :

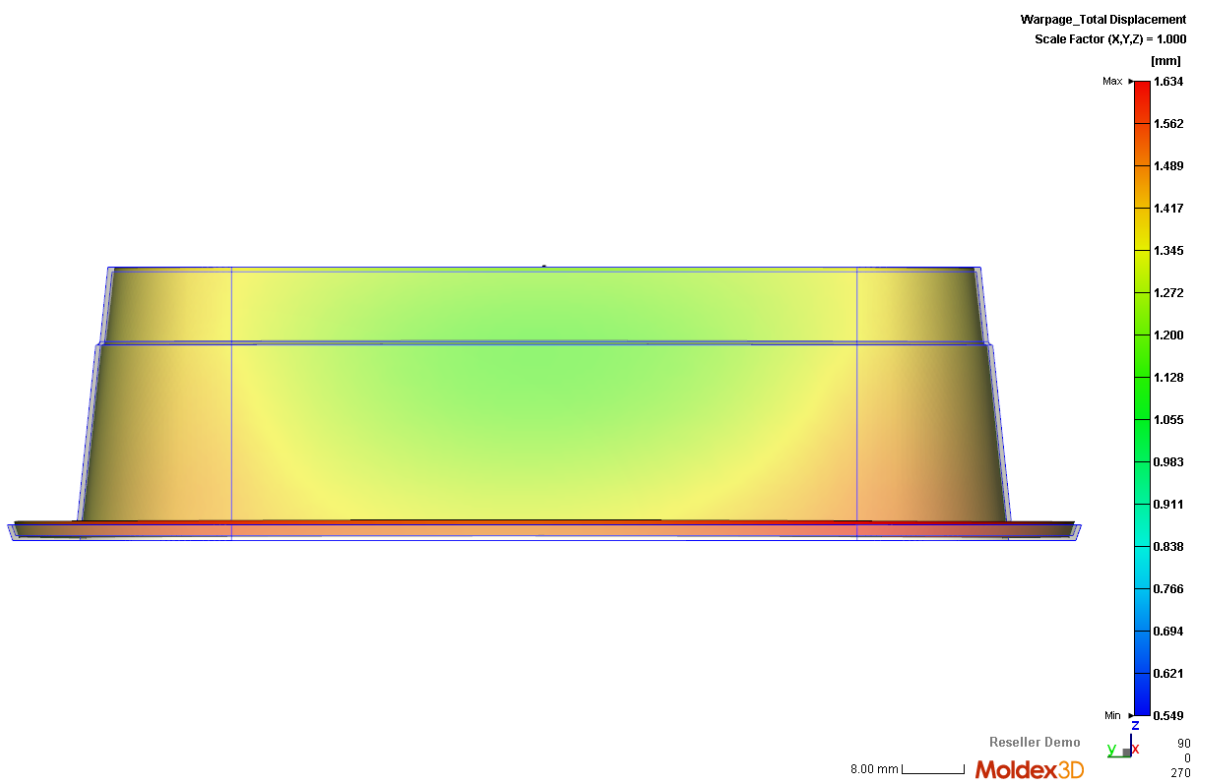
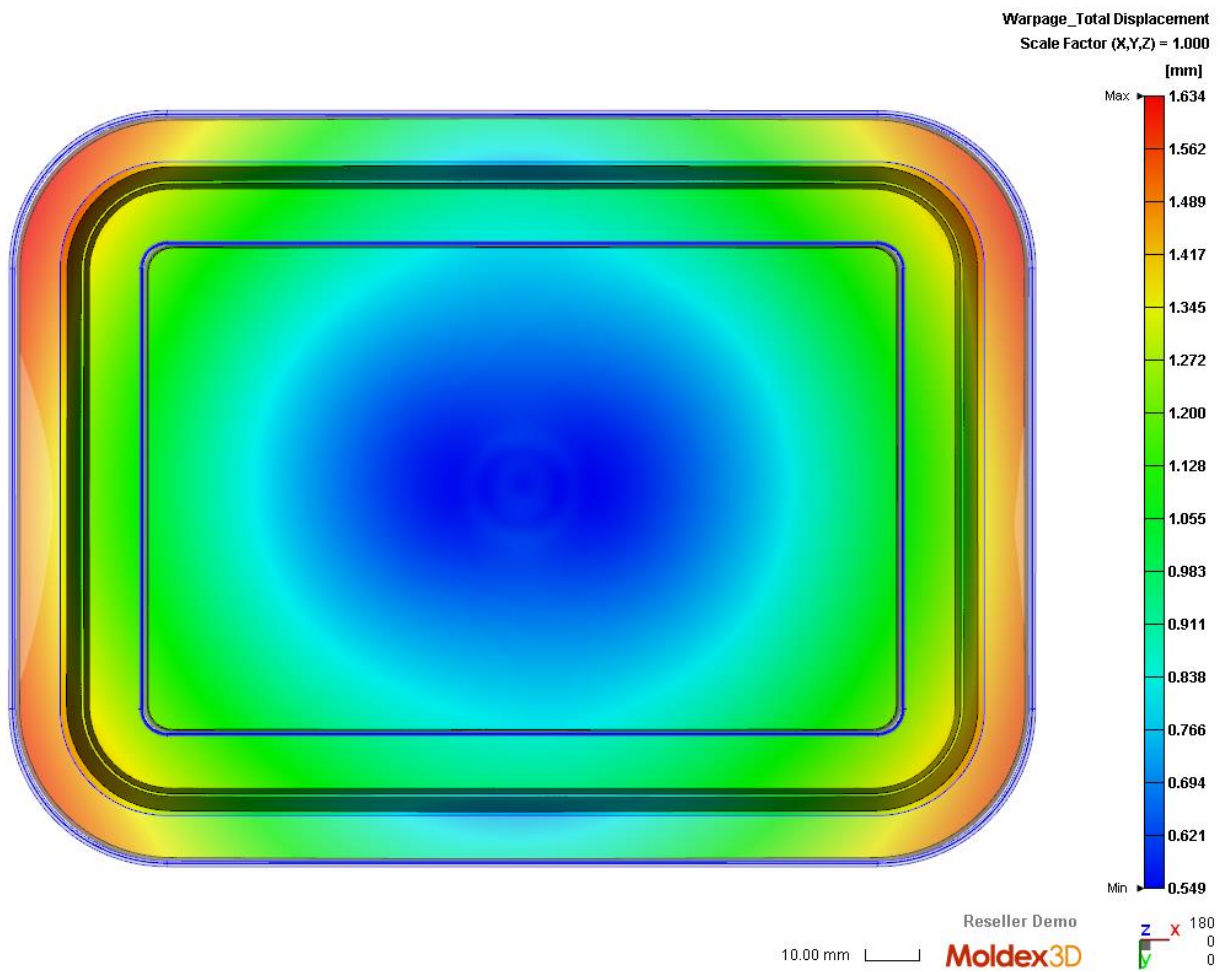
- ✓ να μετρηθεί η τάση και το μέγεθος της παραμόρφωσης ώστε να επαληθευτεί εάν η παραμόρφωση του τελικού προϊόντος έγχυσης ευθυγραμμίζεται με τις αντίστοιχες σχεδιαστικές προδιαγραφές,
- ✓ να οπτικοποιηθεί η παραμόρφωση για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτή συμβαίνει,
- ✓ να αξιολογηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τη συμπεριφορά της στρέβλωσης το χρησιμοποιούμενο πολυμερές (κρυσταλλικό, μη κρυσταλλικό, ινώδες), ο σχεδιασμός τόσο του προϊόντος έγχυσης (γεωμετρία, πάχη) όσο και του καλουπιού (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 αιτίες που προκαλούν την στρέβλωση, συμπεριλαμβανομένων εκείνων των παραγόντων που την επηρεάζουν δραματικά και
- ✓ να γίνει μια εκτίμηση ως προς τις παραμέτρους σχεδιασμού για αναθεώρηση ή βελτιστοποίηση σχεδιασμού προκειμένου να επιλυθεί το ζήτημα των παραμορφώσεων.

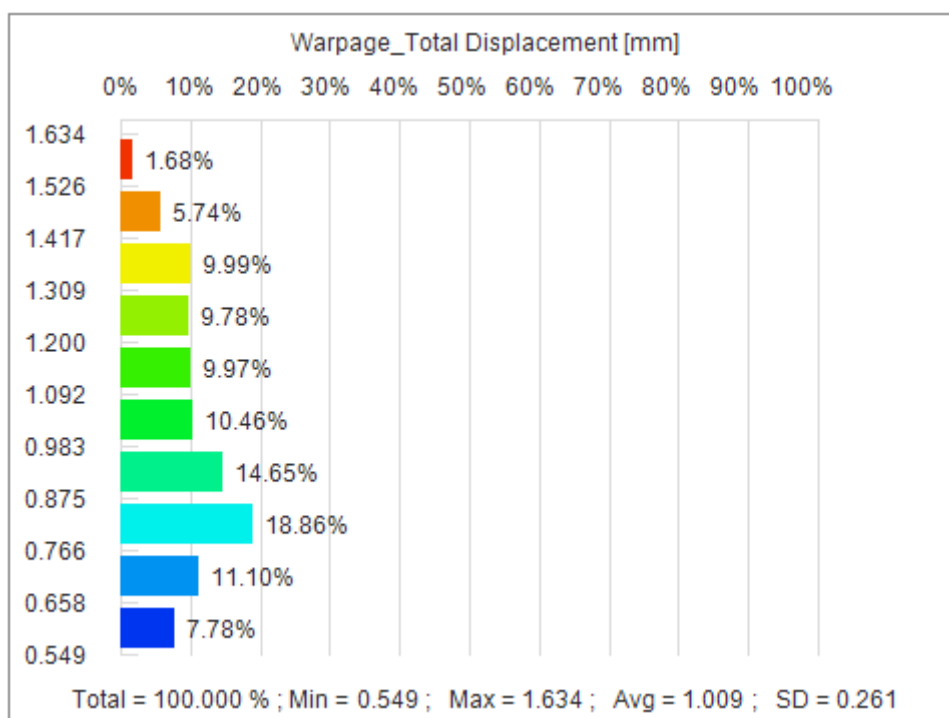
Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι οι βασικές μηχανικές ιδιότητες που λαμβάνονται υπόψη στην προσομοίωση της στρέβλωσης στο λογισμικό Moldex3D περιλαμβάνουν το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson. Εφόσον υπάρχουν μόνο αυτές οι δύο ιδιότητες, γίνεται η παραδοχή ότι η παραμόρφωση του πλαστικού και 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 επί του παρόντος, αξίζει να γίνει εκτενέστερη αναφορά στα ακόλουθα αποτελέσματα της προσομοίωσης :

- Στρέβλωση– Ολική εκτόπιση

Εμφανίζει την ολική εκτόπιση του παραχθέντος αντικειμένου στις τρεις διαστάσεις ταυτόχρονα συνυπολογίζοντας όλα τα άμεσα σχετιζόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση των φάσεων πλήρωσης, συγκράτησης και ψύξης (Σχήμα 6.42). Πιο συγκεκριμένα, 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.





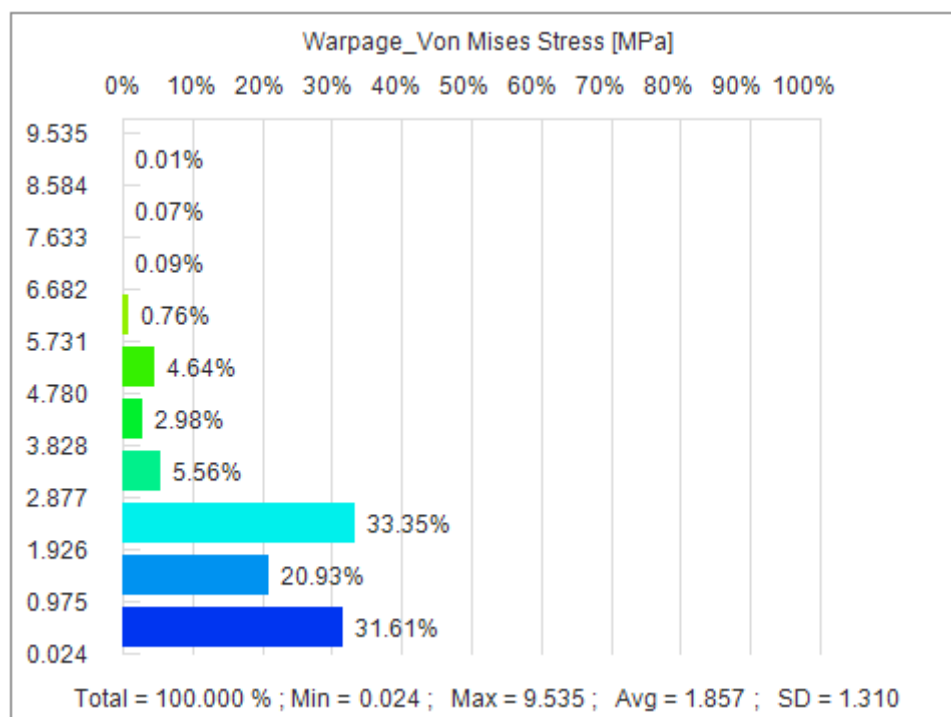
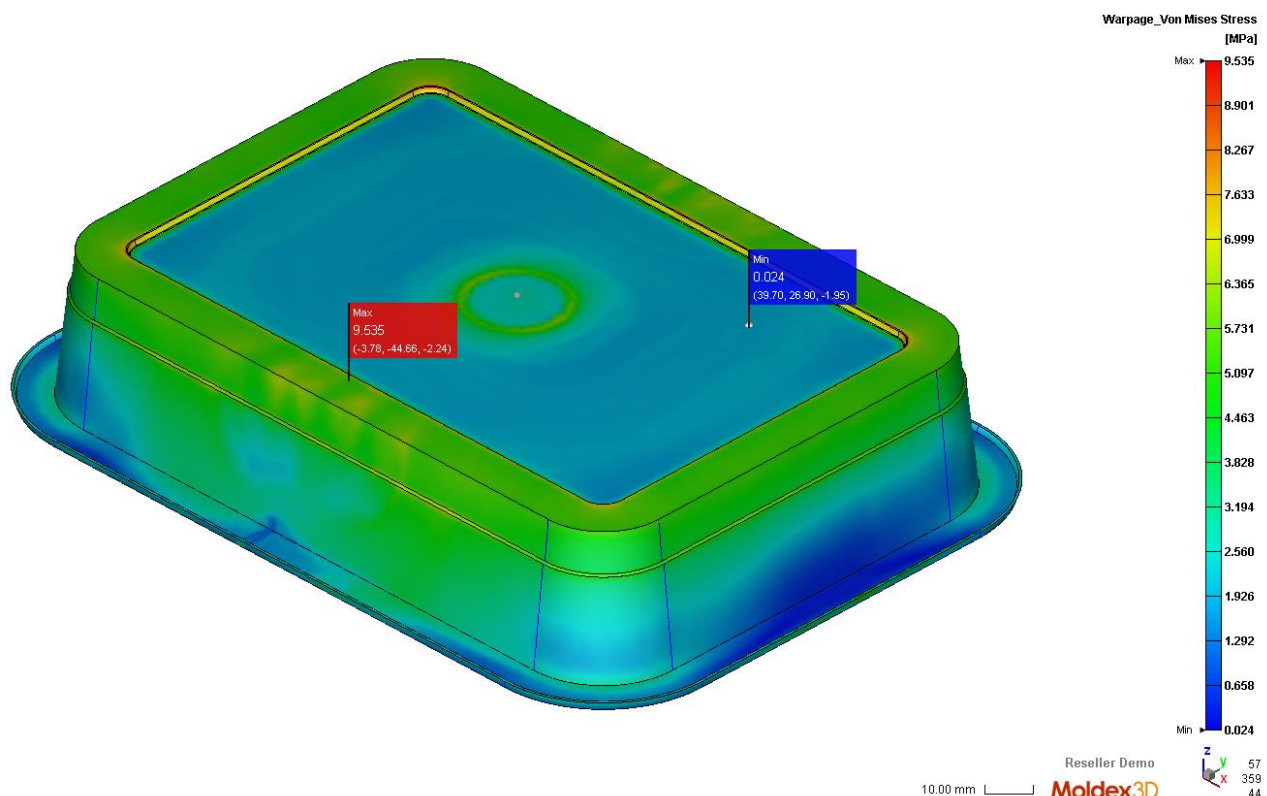


Σχήμα 6.42 : Η στρέβλωση του τελικού προϊόντος έγχυσης μετά την εξόλκευσή του από το καλούπι με μέγιστη εκτόπιση στις κάτω γωνίες του προϊόντος ίση με 1.634 mm και μέση τιμή περί το 1mm. Η στρέβλωση που προκύπτει είναι ως επί το πλείστο σταθερή και ομοιόμορφη με εξαίρεση τις κάτω γωνίες όπου εκεί υπάρχει η μέγιστη εκτόπιση. Στις τέσσερις κεκλιμένες πλευρές, η εκτόπιση είναι λίγο παραπάνω από τη μέση τιμή.

- Στρέβλωση– Θερμικά επαγόμενες υπολειμματικές τάσεις / Τάσεις Von Mises

Εμφανίζει τις θερμικά επαγόμενες υπολειμματικές τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του παραχθέντος αντικειμένου μετά την απομάκρυνσή του από το καλούπι και εφόσον η θερμοκρασία του ευθυγραμμίζεται με τη θερμοκρασία δωματίου. Οι εν λόγω τάσεις απορρέουν από την ανομοιόμορφη ογκομετρική συρρίκνωση του πολυμερούς που διενεργείται τόσο κατά τη φάση της συγκράτησης όσο και κατά την φάση της ψύξης. Μάλιστα, όταν αυτές οι παραμένουσες τάσεις λαμβάνουν μεγάλες διαστάσεις, τότε ευθύνονται για τη δημιουργία κενών στο τελικό προϊόν έγχυσης.

Σε ό,τι αφορά το αποτέλεσμα Von Mises Stress, αυτό εμφανίζει την κατανομή της Von Mises υπολειμματικής τάσης στο εξολκευμένο προϊόν έγχυσης που οφείλεται στη μη ομοιόμορφη συρρίκνωση του πλαστικού. 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.

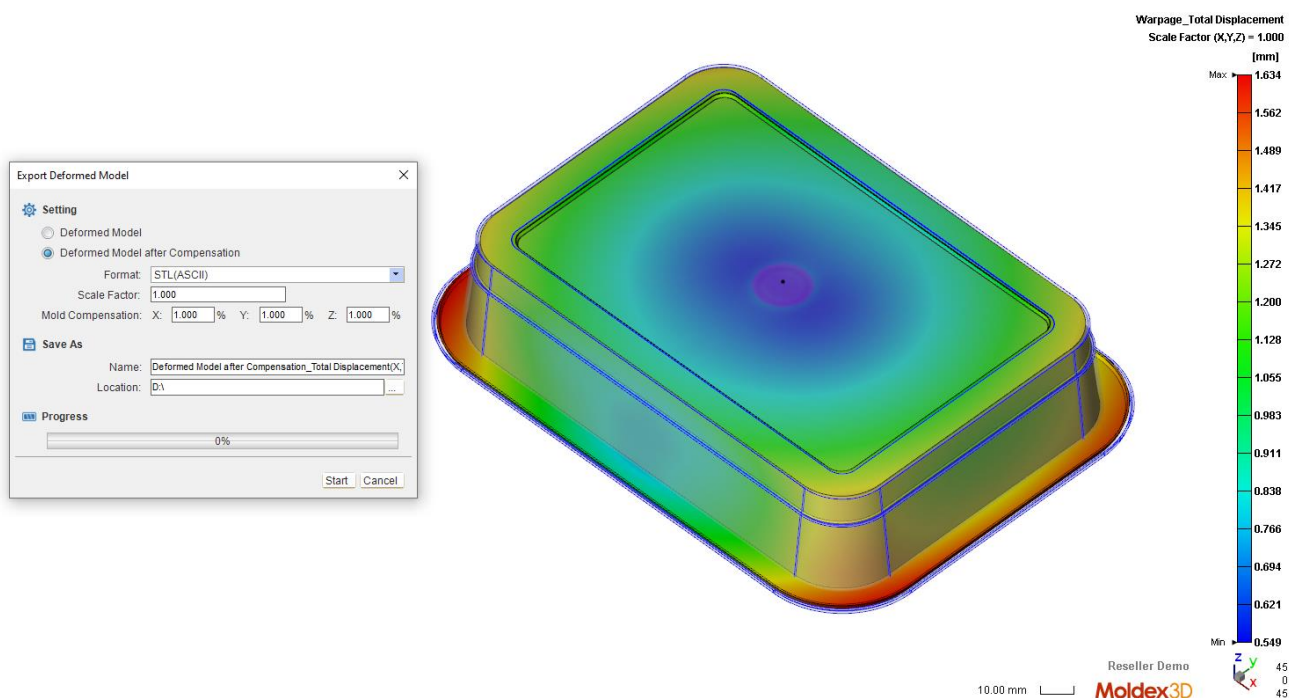


Σχήμα 6.43 : Η Von Mises υπολειμματική τάση στο εξολκευμένο προϊόν έγχυσης με μέση τιμή τα 1.310 MPa.

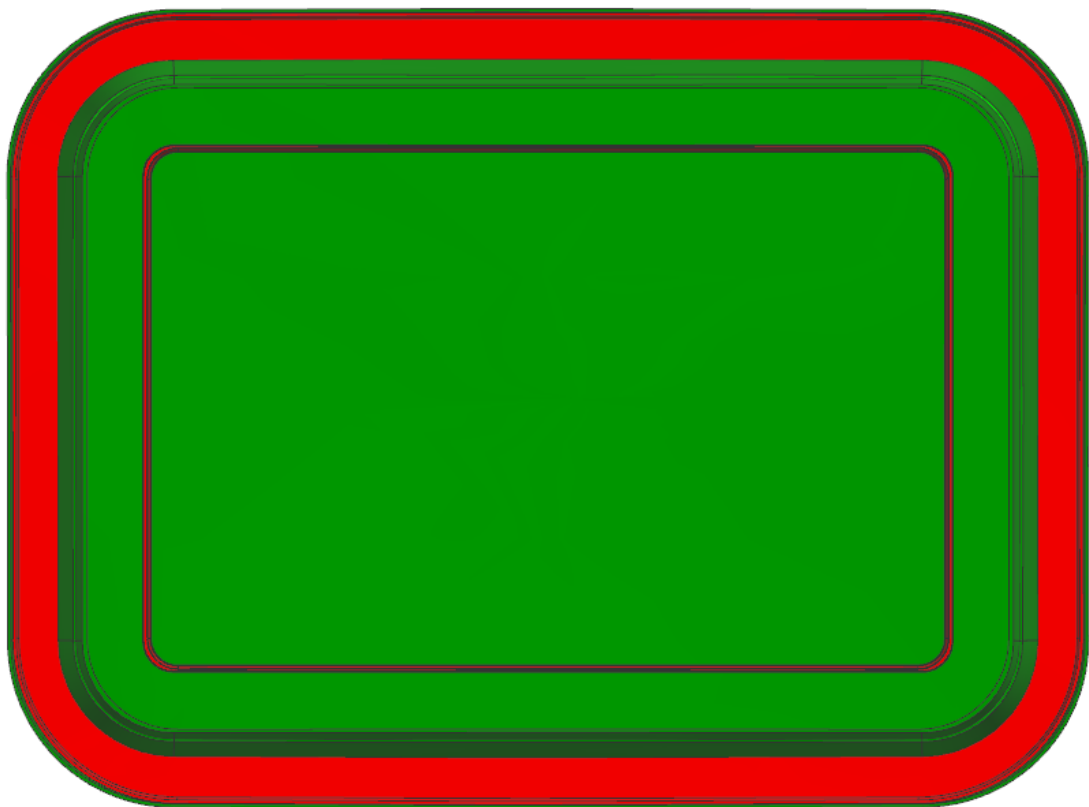
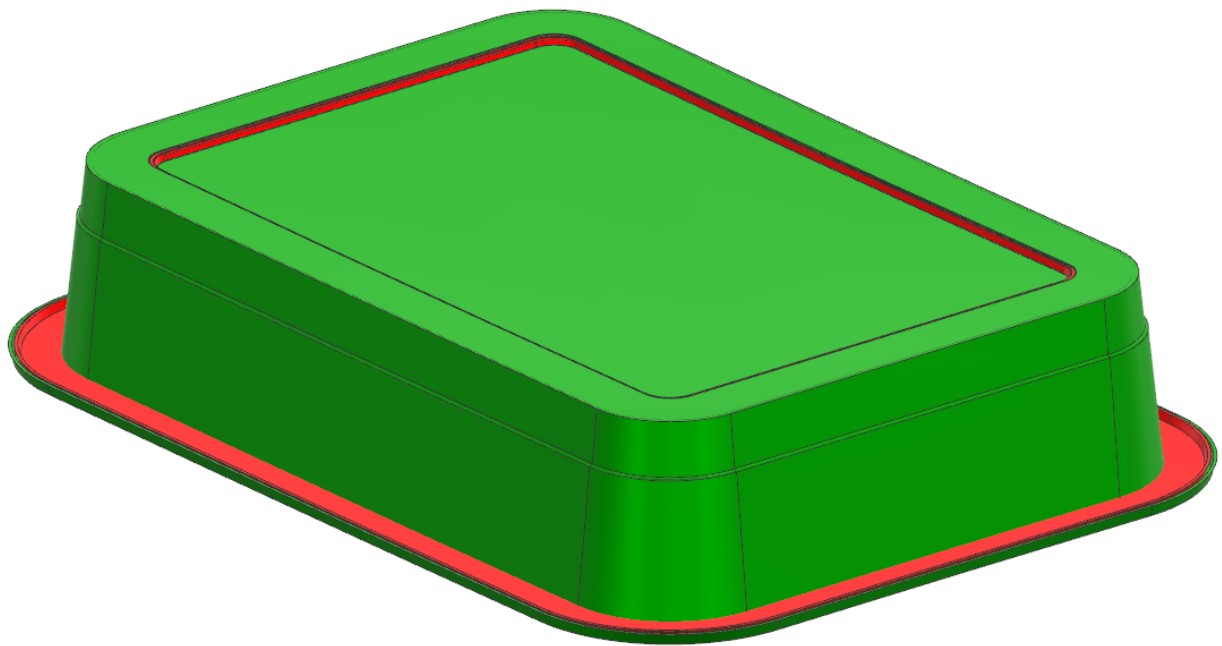
Μετά και τη μελέτη των αποτελεσμάτων της στρέβλωσης και προκειμένου να προχωρήσει η κατασκευή του καλουπιού του προϊόντος πατώντας πάνω σε σωστά δεδομένα θα πρέπει να διενεργηθεί μια εκ των προτέρων αντιστάθμιση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Γενικά, η αντιστάθμιση είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική που στόχο έχει την επιδιόρθωση του καλουπιού για την περιστολή ή και την εξάλειψη της

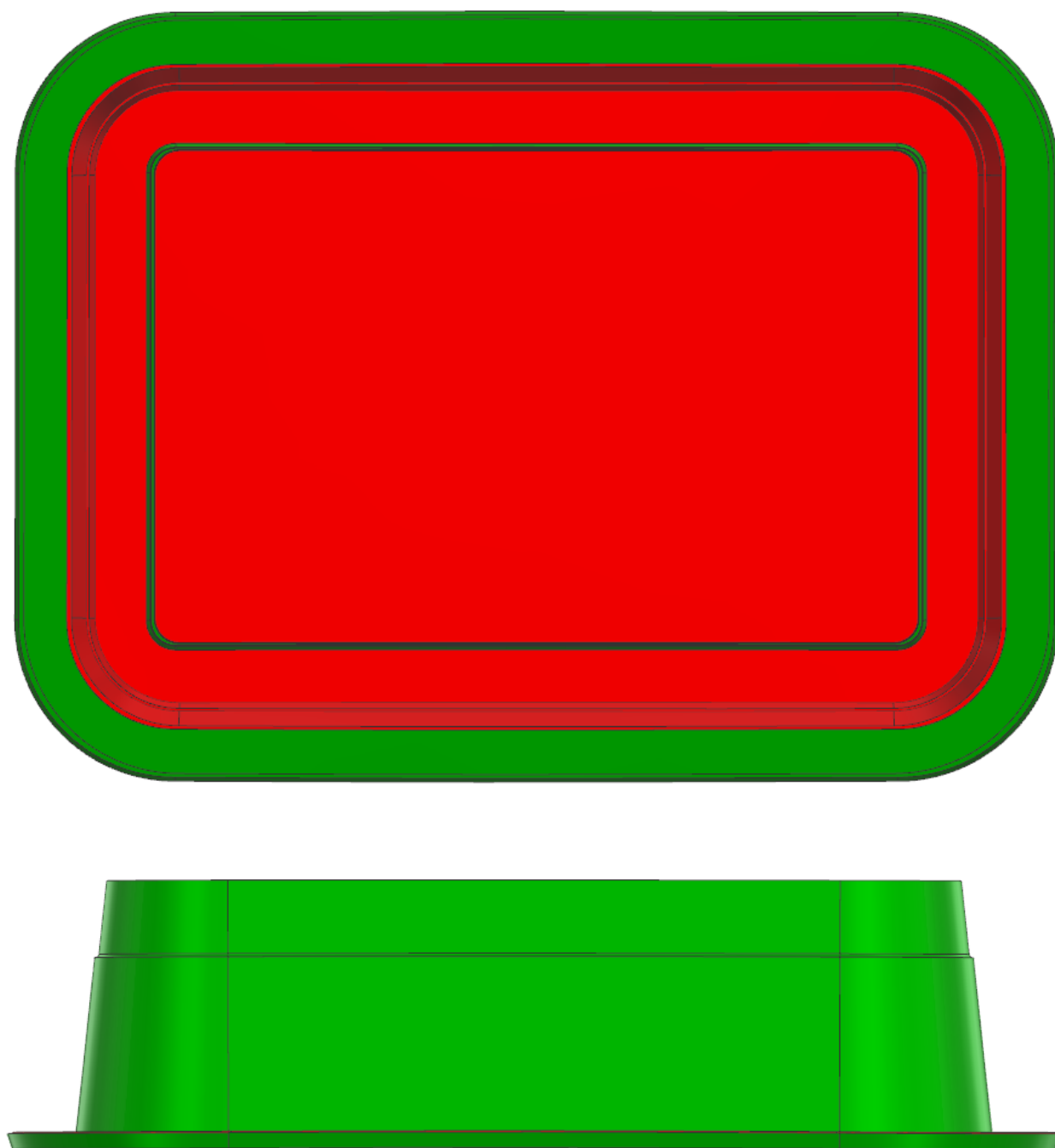
ογκομετρικής συρρίκνωσης και κατ' επέκταση της στρέβλωσης του παραγόμενου αντικειμένου. Προβλέποντας την τιμή της παραμόρφωσης του τελικού προϊόντος, η κοιλότητα του καλουπιού μπορεί να αναδιαμορφωθεί και να γίνει ελαφρώς μεγαλύτερη από τον ονομαστικό όγκο του προϊόντος έγχυσης, εξασφαλίζοντας, έτσι, την καλύτερη δυνατή διαστατική ακρίβεια του τελικού προϊόντος στους επικείμενους κύκλους έγχυσης.

Σε αυτά τα πλαίσια, μέσα από το Moldex3D είναι εφικτό να εξαχθεί η παραμορφωμένη γεωμετρία του μοντέλου του αντικειμένου (Σχήμα 6.44) σε κάποια ουδέτερη μορφή αρχείου (stl / step / parasolid). Η κλίμακα παραμόρφωσης καθορίζεται θέτοντας την ανάλογη ποσοστιαία αντιστάθμιση της παραμόρφωσης σε κάθε άξονα. Με βάση τα παραπάνω, η εξαγωγή της ένα προς ένα παραμορφωμένης γεωμετρίας του μοντέλου γίνεται πρώτα στην κατεύθυνση της αρχικής παραμόρφωσης (Scale Factor : +1, Σχήμα 6.45 – κόκκινο χρώμα) και έπειτα στην αντίθετη κατεύθυνση (Scale Factor : -1, Σχήμα 6.45 – πράσινο χρώμα) που είναι ακριβώς αυτή η οποία χρειάζεται για την σωστή αντιστάθμιση της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Μάλιστα, είναι δυνατό να συμπεριληφθεί το σύστημα διανομής του καλουπιού στην εξαγωγή της γεωμετρίας ή να αποκλειστεί τελείως από αυτή.



Σχήμα 6.44 : Εξαγωγή παραμορφωμένης γεωμετρίας του τελικού προϊόντος μετά την εξόλκευσή του σε κλίμακα 1:1 τόσο στην κατεύθυνση της αρχικής παραμόρφωσης όσο και στην αντίθετη κατεύθυνση.





Σχήμα 6.45 : Παραμορφωμένη γεωμετρία του τελικού προϊόντος μετά την εξόλκευσή του σε κλίμακα 1:1 τόσο στην κατεύθυνση της αρχικής παραμόρφωσης (κόκκινο χρώμα) όσο και στην αντίθετη κατεύθυνση (πράσινο χρώμα).

6. Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις

Στα πλαίσια της απόλυτης ευθυγράμμισης των ευρημάτων της προσομοίωσης του κύκλου έγχυσης του προϊόντος που μελετήθηκε με τις πραγματικές συνθήκες, θα μπορούσε μελλοντικά η προσομοίωση να στηθεί στη βάση της μελέτης της συναρμολόγησης ολόκληρου του καλουπιού. Ως γνωστόν, η συνήθης συναρμολόγηση ενός τυπικού καλουπιού έγχυσης περιλαμβάνει όλα εκείνα τα επιμέρους εξαρτήματα που κρίνονται απαραίτητα για την παραγωγή του προϊόντος σε πραγματικό χρόνο (συρτάρια, ένθετα κλπ). Επισημαίνεται ότι η συγκεκριμένη προσομοίωση στήθηκε στα πλαίσια της μελέτης του εξαρτήματος που αντιστοιχεί στην κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού. Επομένως, δεδομένης της δυνατότητας που έχει 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.

Ακόμη, στο λογισμικό Moldex3D η προσομοίωση του κύκλου έγχυσης έγινε στην κατάσταση λειτουργίας της υπολογιστικής μηχανικής (CAE Mode) και όχι στην κατάσταση λειτουργίας της πραγματικής μηχανής έγχυσης (Machine Mode) που αποτελεί τον δίαυλο επικοινωνίας μεταξύ του μηχανικού που εκπονεί τη μελέτη και του χειριστή της μηχανής. Σίγουρα, 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.

Τέλος, η μέθοδος δοκιμής και σφάλματος που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, παρά το μεγάλο αριθμό πειραμάτων που εκτελέστηκαν, δεν εξασφαλίζει σε καμία περίπτωση την εύρεση των μαθηματικά βέλτιστων τιμών των ποιοτικών παραγόντων που εξετάστηκαν (ογκομετρική συρρίκνωση, στρέβλωση, πυκνότητα κλπ). Ασφαλώς, κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρήση σύγχρονων μαθηματικών εργαλείων στατιστικής (π.χ. σχεδιασμός πειραμάτων με τη μέθοδο Taguchi).

7. Βιβλιογραφία

- [1] “O. org.”, 2020 [Online], “*Plastics*,”. Available at: <https://www.oecd.org/en/topics/sub-issues/plastics.html>.
- [2] Food Packaging Forum, Jul. 16, 2024 [Online], European industry associations report latest recycling rates. Available at: <https://www.foodpackagingforum.org/news/european-industry-associations-report-latest-recycling-rates>.
- [3] J. P. Greene, *Automotive Plastics and Composites*. Oxford: Elsevier, 2021.
- [4] Μ. Π. Ε. Ι. Νίκος Χατζηχρηστίδης and Α. Βιομηχανική Χημεία-Πολυμερή, *Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*, 2008.
- [5] ΣΒ (. Κ. ΕΜΠ), “Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας IV: Σύνοψη και ανάπτυξη βιομηχανικών διαδικασιών,” *Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμερών*, vol. 6ο Εξάμηνο., 2021 [Online]. Available at: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://mycourses.ntua.gr/courses/CHEM1055/document/MHXANIKH_POLYMERWN_site.pdf.
- [6] E. Freire, *Differential Scanning Calorimetry*. Totowa: Humana Press Inc., 1995.
- [7] Solid Modeling Association, Mar. 28, 2018 [Online], “FOUR Basic parts of injection molding machine,”. Available at: <https://medium.com/@jasonmould2017/four-basic-parts-of-injection-molding-machine-e614e995b13f>.
- [8] LANXESS Corporation, 2005 [Online], “A processing guide for INJECTION MOLDING,”. Available at: https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/Durethan_PA_Injection_Molding_Guide.pdf?docId=79275.
- [9] H. Hasenclever, “Injection/sprue-bushing,” *HASCO Hasenclever* [Online]. Available at: https://www.hasco.com/en/Z/Injection/Sprue-bushings/p/Z510_d2x11xd1.
- [10] echosupply, ““Injection Molding Basics: Cold Runner Systems,” echosupply” [Online]. Available at: <https://www.echosupply.com/blog/injection-molding-basics-cold-runner-systems/>.
- [11] Mold-Masters, 25 08 2020 [Online], “What is a hot runner?” Mold: Masters. Available at: <https://www.moldmasters.com/blog/what-is-a-hot-runner>.
- [12] Zetar Industry Co, Feb. 23, 2023 [Online], “How do you calculate cycle time of injection molding?” Zetar Industry Co. Available at: <https://zetarmold.com/cycle-time-injection-molding/>.
- [13] Upmold Technology Limited, Feb. 8, 2021 [Online], “Injection mold cooling design.” Upmold Technology Limited. Available at: <https://upmold.com/injection-mold-cooling-design/>.
- [14] “Mould clamps manufacturer,”, Jan. 5, 2021 [Online], “*Summary of 50 Injection Mold Structure Operation Dynamic Diagrams* -,” Mould Clamps Manufacturer. Available at: <https://www.dgmfmoldclamps.com/summary-of-50-injection-mold-structure-operation-dynamic-diagrams/>.
- [15] Jerry.W., Jan. 15, 2021 [Online], “How to improve flow mark in injection molding,” *Cavity Mold Plastic Injection Molding and Mold Maker Manufacturing*. Available at: <https://www.cavitymold.com/how-to-improve-flow-mark-in-injection-molding/>.

- [16] Ptonline, 21 1 2019 [Online], "Injection molding: The causes of warpage," *Ptonline*. Available at: <https://www.ptonline.com/articles/injection-molding-the-causes-of-warpage>.
- [17] Prototool, "Vacuum voids in injection molding: Unraveling the most common injection molding defect," [Online]. Available at: <https://prototool.com/vacuum-voids/>.
- [18] Richfields Corporation, "Avoid sink marks with a plastic injection molding in China | Richfields blog." Plastic Injection Molding Company in China. Richfields Corporation., 5 January 2024 [Online]. Available at: <https://richfieldsplastics.com/blog/sink-marks/>.
- [19] "Integrated molding solutions," June 27, 2024 [Online], "*The Most Common Injection Molding Defects & Preventative Solutions*," Integrated Molding Solutions. Available at: <https://ims-tex.com/the-most-common-injection-molding-defects/>.
- [20] C. Mold, Feb. 3, 2021 [Online], "How to improve injection mold jetting,". Available at: <https://www.cavitymold.com/how-to-improve-injection-mold-jetting/>.
- [21] WayKen, Apr. 12, 2023 [Online], "What causes & how to avoid flash in injection molding process -," WayKen. Rapid Prototype Manufacturing in China. Available at: <https://waykenrm.com/blogs/injection-molding-flash/>.
- [22] "Midstate Mold & engineering," May 13, 2020 [Online], "*What Causes Delamination in Injection Molding?*" Midstate Mold & Engineering. Available at: <https://www.midstatemold.com/what-causes-delamination-in-injection-molding/>.
- [23] J. Erdman, Dec. 18, 2020 [Online]. Available: nc, "PFA," "*5 Injection Molding Defects and How to Improve Them*,". Available at: <https://www.pfa-inc.com/5-injection-molding-defects-and-how-to-improve-them/>.
- [24] Moldex3D, 2022 [Online], "16. Welding angle," p. Moldex3D. Available at: https://support.moldex3d.com/2022/en/4-1-2-16_weldingangle.html.
- [25] M. A. Azieatul, Azrin Dzulkpli, "*Study of the Effects of Injection Molding Parameter on Weld Line Formation*," ResearchGate, December 2017 [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/316654225_Study_of_the_Effects_of_Injection_Molding_Parameter_on_Weld_Line_Formation
- [26] F. S. K. Raz, "Effect of melt temperature on weld line strength," ResearchGate, May 2019 [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/332841738_Effect_of_Melt_Temperature_on_Weld_Line_Strength

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

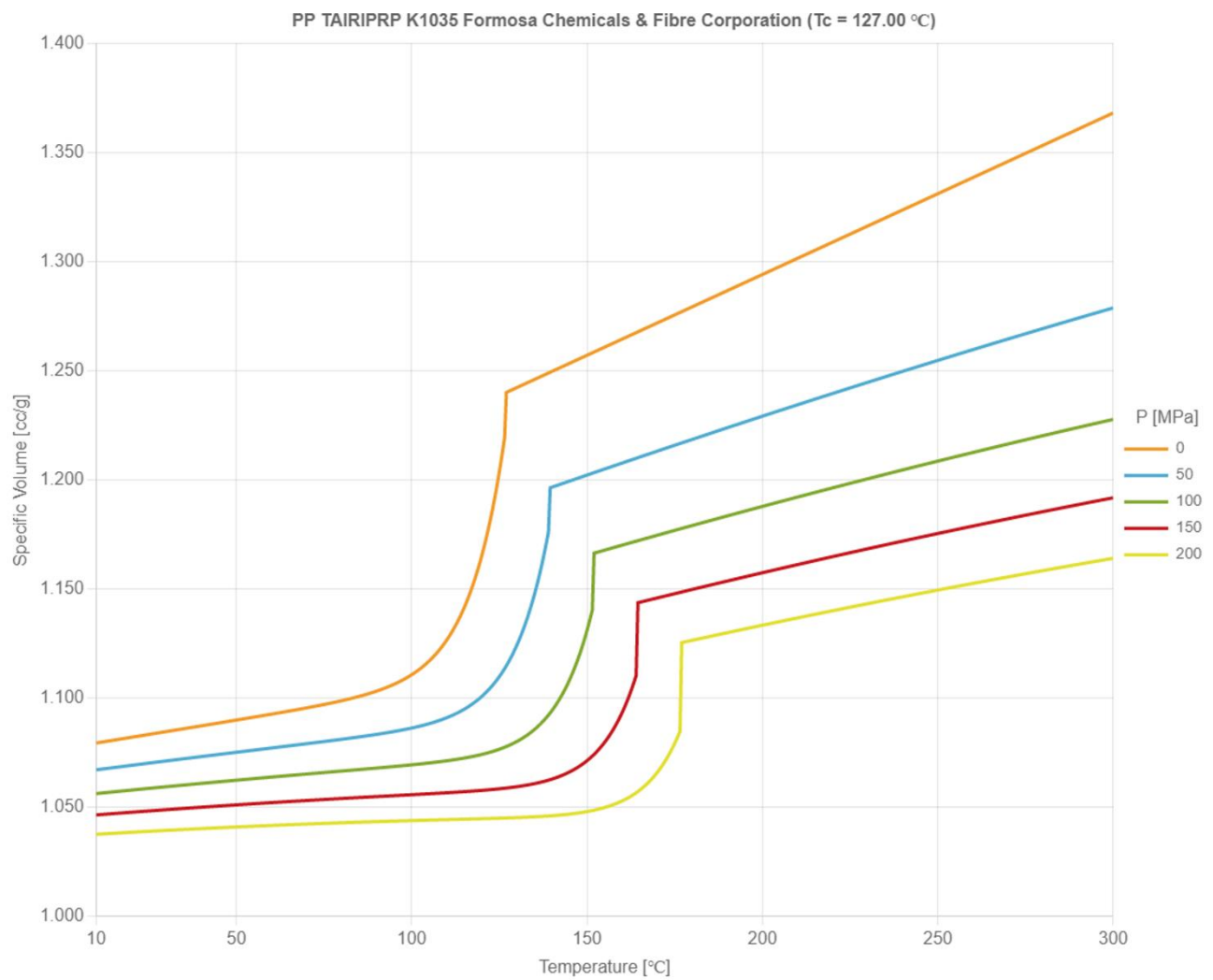
PP TAIRIPRP K1035 – ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ & ΕΥΡΗ ΤΙΜΩΝ

Type	PP
Grade Name	TAIRIPRP K1035
Producer	Formosa Chemicals & Fibre Corporation
Comment	MFI(230, 2.16)=38 g/10min, D=0.9 g/cm ³
Moldex3D Bank Version	2023.02.02
Melt Temperature (Minimum)	200.00 °C
Melt Temperature (Normal)	245.00 °C
Melt Temperature (Maximum)	290.00 °C
Mold Temperature (Minimum)	30.00 °C
Mold Temperature (Normal)	40.00 °C
Mold Temperature (Maximum)	50.00 °C
Ejection Temperature	114.00 °C
Freeze Temperature	120.00 °C

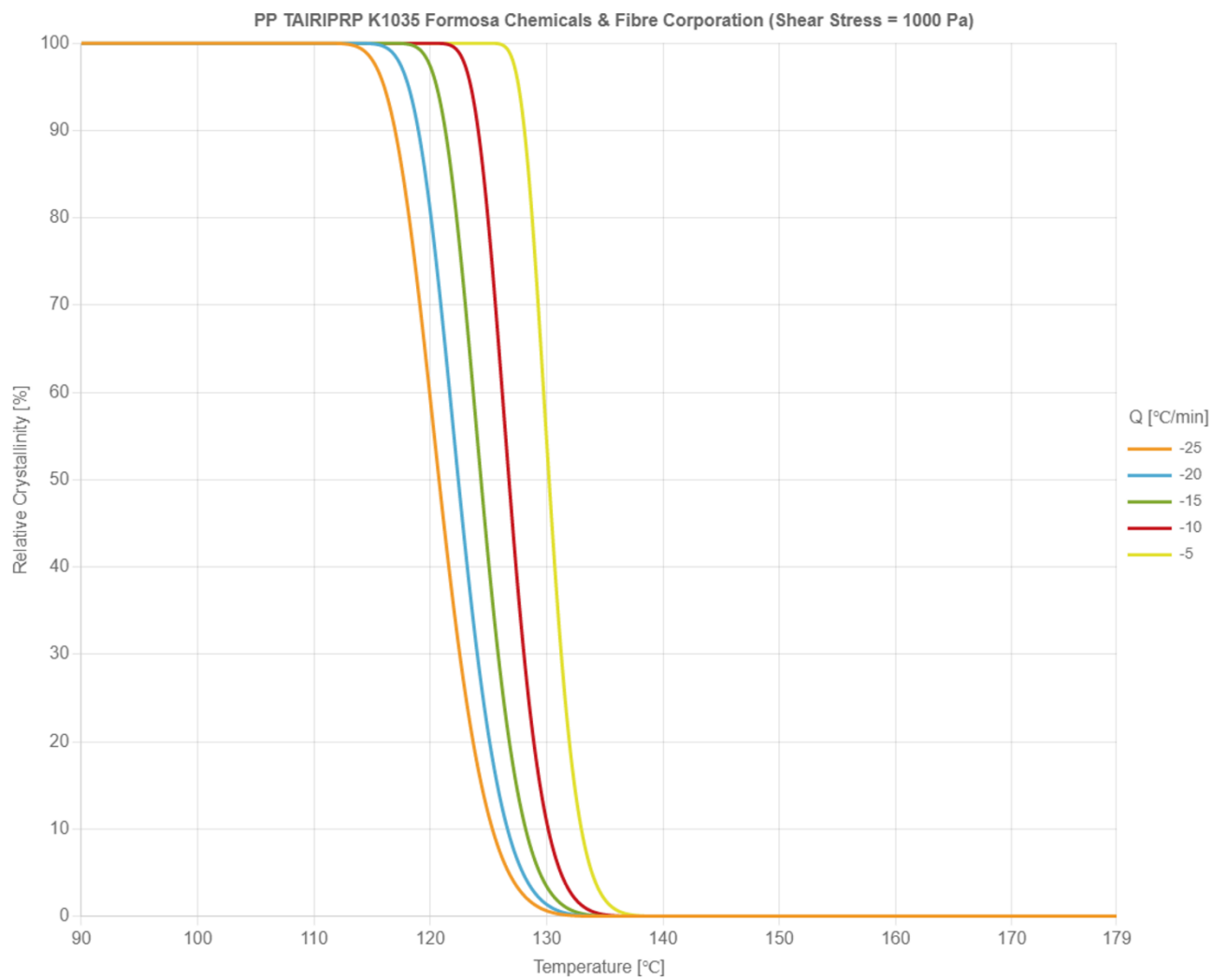
PP TAIRIPRP K1035 – ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Type	PP
Grade Name	TAIRIPRP K1035
Producer	Formosa Chemicals & Fibre Corporation
Mechanical Properties	Isotropic Pure Polymer
Elastic Modulus	1.37e+10 (dyne/cm ²)
Poisson's Ratio	0.38 (-)
CLTE	1.5e-4 (1/K)

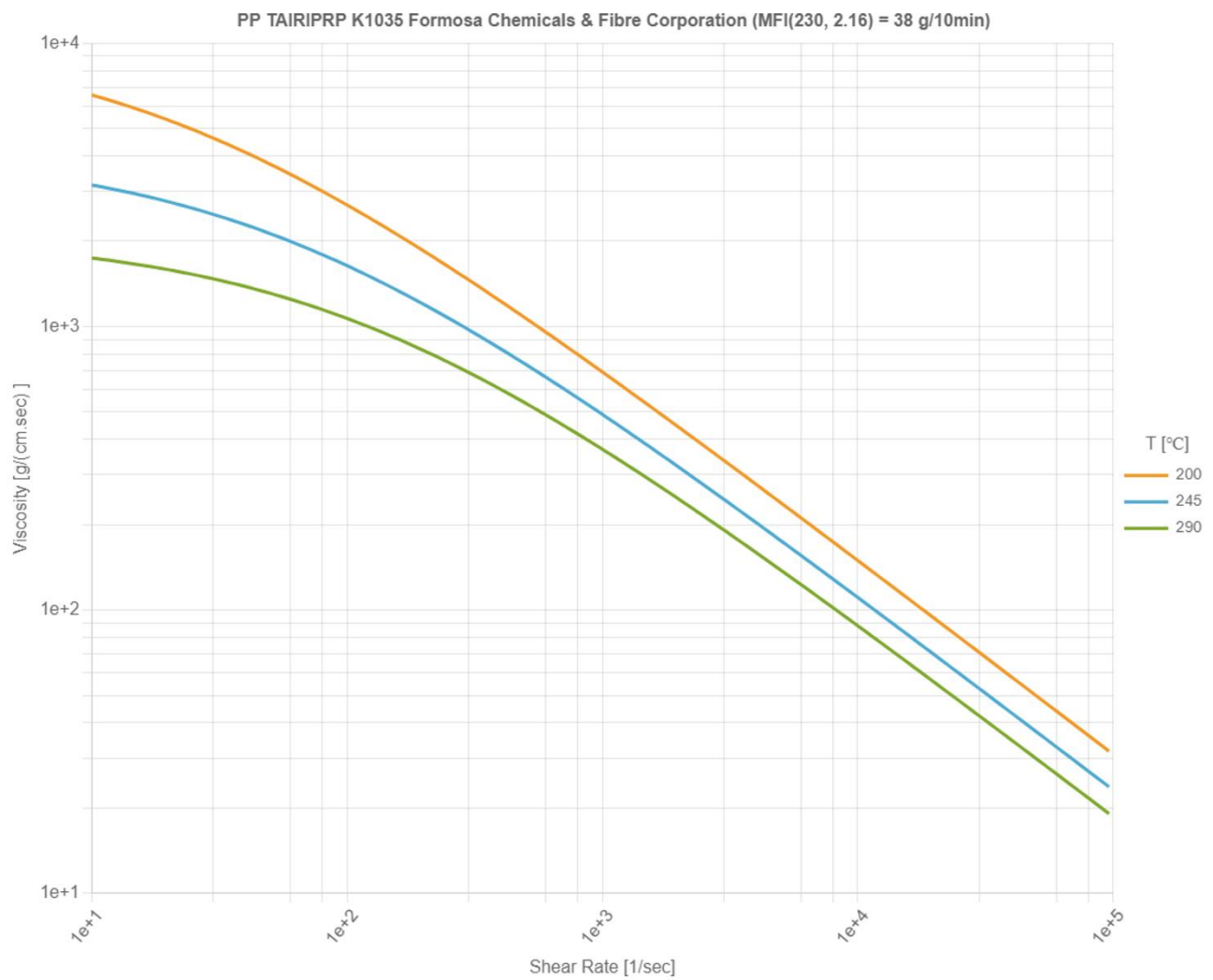
PP TAIRIPRP K1035 – ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΕΣ (PVT) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ



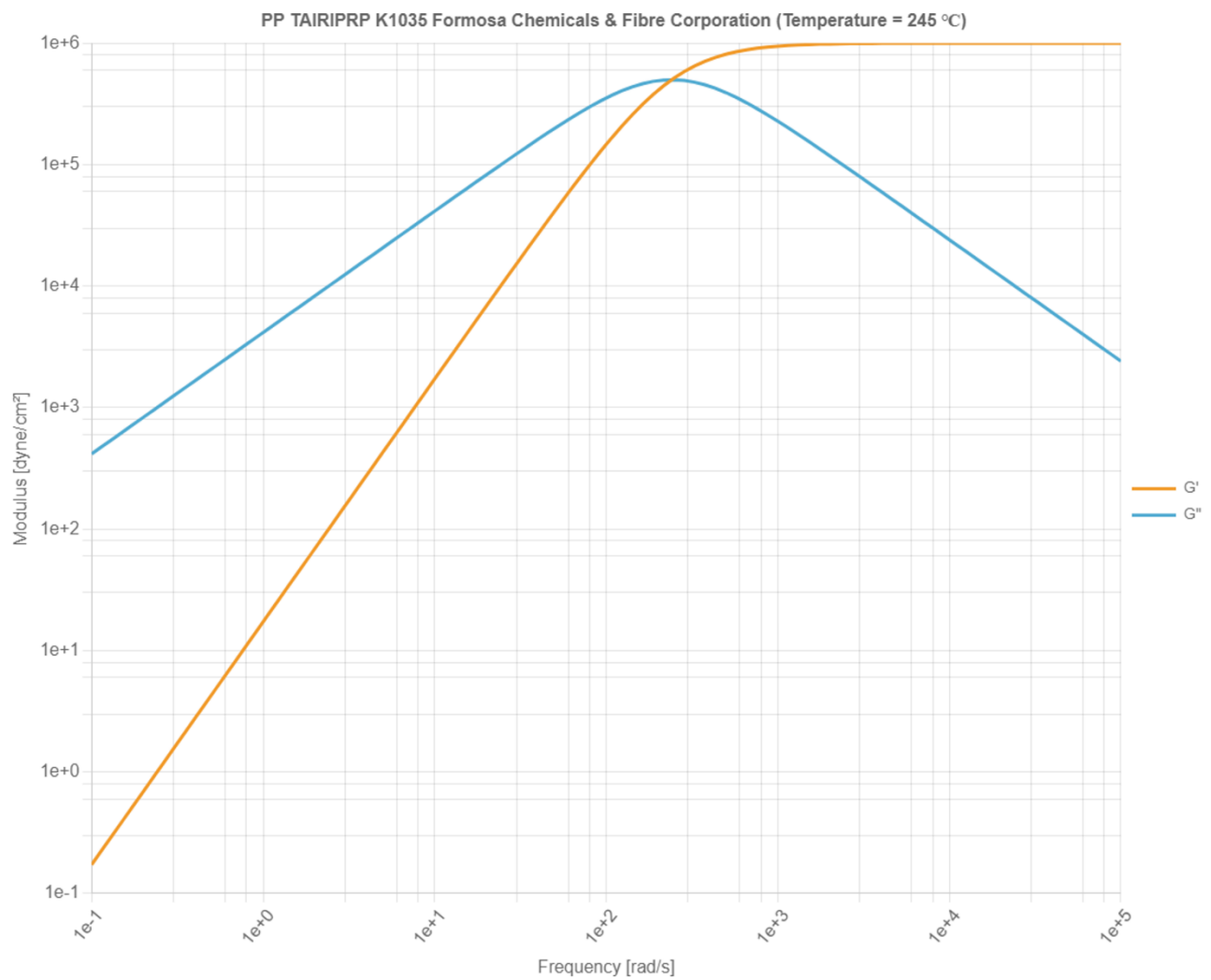
PP TAIRIPRP K1035 – ΣΧΕΤΙΚΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΤΗΤΑ



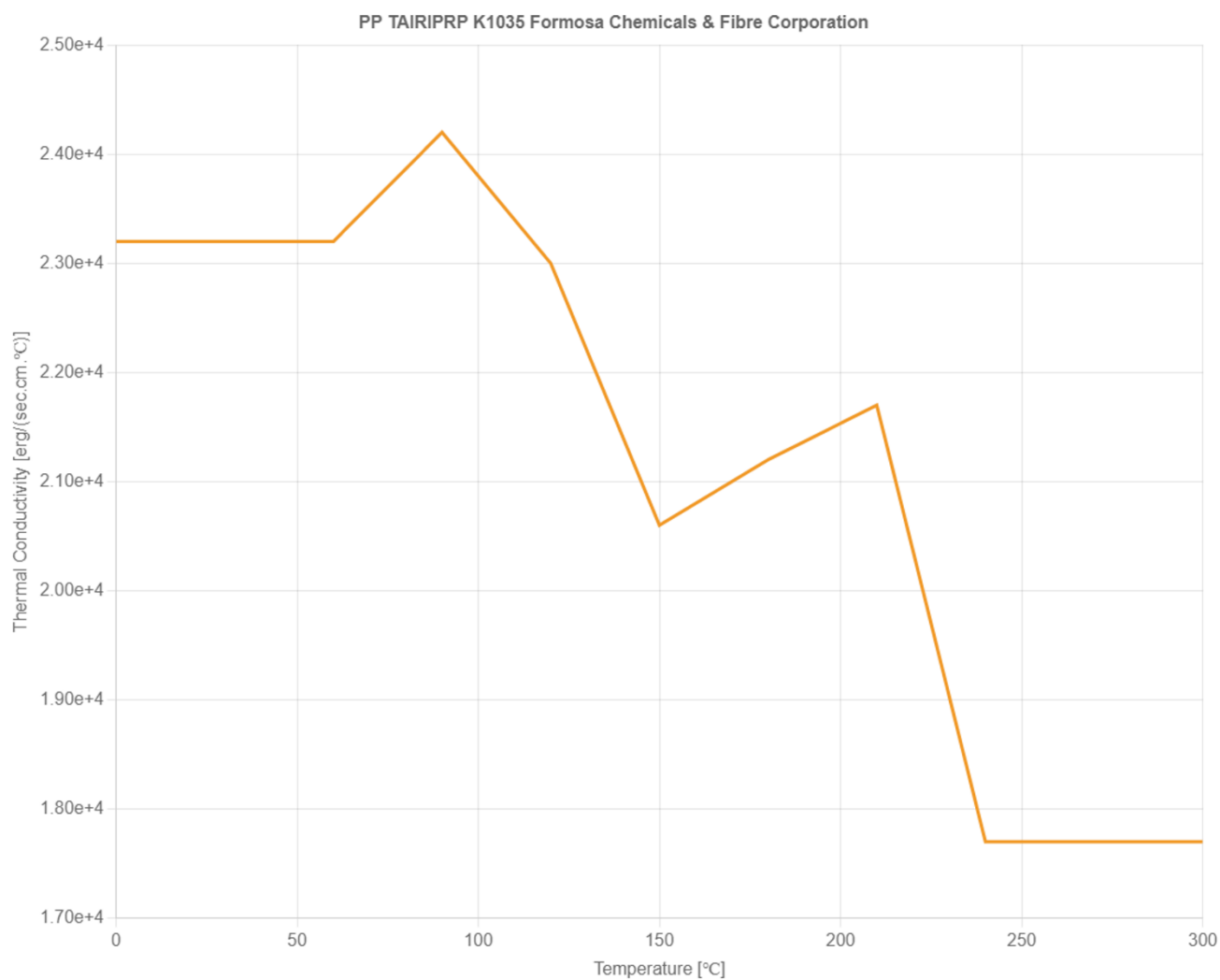
PP TAIRIPRP K1035 – ΙΞΩΔΕΣ



PP TAIRIPRP K1035 – ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ



PP TAIRIPRP K1035 – ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ



PP TAIRIPRP K1035 – ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

