



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

*Ανάλυση και στοχαστική προσομοίωση δημιουργίας
προεξοχής (flash) συναρτήσεως γεωμετρικών και
λειτουργικών παραμέτρων σε καλούπι έγχυσης
θερμοπλαστικών υπό πίεση (Injection Molding) με χρήση
CAD-CAE*

Διπλωματική εργασία

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΣΙΟΥΜΑΝΗΣ ΜΑΝΟΣ

Επιβλέπων : Επίκουρος Καθ. Β.Σπιτάς

Αθήνα 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επίδραση των γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων καθώς και των παραγόντων της κατασκευαστικής διαδικασίας πάνω στη δημιουργία του ελαττώματος προεξοχής ή flash σε πλαστικό αντικείμενο που παράγεται σε καλούπι έγχυσης θερμοπλαστικών υπό πίεση (Injection Molding), το οποίο καλούπι σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο ΜΟΡΦΗ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΕΠΕ. Η γεωμετρική διερεύνηση αναφέρεται στην ανάλυση των ανοχών των διαφόρων εξαρτημάτων του καλουπιού που αποδεικνύεται ότι παίζουν ρόλο στην ανάπτυξη του φαινομένου και υλοποιείται με τη στοχαστική μέθοδο Monte-Carlo μέσω γεννήτριας τυχαίων αριθμών στο Matlab και μετά με εφαρμογή τους σε περιβάλλον CAD Unigraphics NX. Στη συνέχεια πραγματοποιείται υπολογιστική ανάλυση της ροής στο λογισμικό Moldex3D και διερευνάται η συνεισφορά της παραμόρφωσης του καλουπιού στο λογισμικό προσομοιώσεων ANSYS κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, στην ανάπτυξη προεξοχής κατά την νοητή γραμμή διαχωρισμού. Παρουσιάζονται επίσης οι αιτίες δημιουργίας της προεξοχής κατά τη διάρκεια των κατασκευαστικών κατεργασιών και προτείνονται λύσεις περιορισμού τους

ABSTRACT

In this diploma thesis the influence of the geometrical and functional parameters is investigated, as well as the factors of the manufacturing process on the creation of the flash defect in a plastic part produced in an injection mold, which was designed and manufactured in the machine shop MORFI MOLDS Ltd.

Geometric investigation refers to the analysis of the tolerances of the various mold components that are indicated to have a significant role in the development of the phenomenon and is implemented by the Monte Carlo stochastic method using a random number generator in Matlab and then evaluated in a CAD assembly in the Unigraphics NX environment. A computational flow analysis is then performed on the Moldex3D software and the contribution of mold deformation during operation to flash development along the parting line is investigated in the ANSYS simulation software. Also are mentioned the reasons for flash creation during the various manufacturing processes and suggestions are made to minimize their effect.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, ευχαριστώ τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Επίκουρο Καθηγητή κ.Βασίλειο Σπιτά για την όλη καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας, αλλά κυρίως για τη μετάδοση βαθέων τεχνικών γνώσεων κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου και κινήτρων για σοβαρή διερεύνηση τεχνικών ζητημάτων. Ακόμη, ευχαριστώ τα μέλη του Εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών για την βοήθεια τους σε διάφορα θέματα.

Ευχαριστώ επίσης το μηχανουργείο ΜΟΡΦΗ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΕΠΕ και ιδιαιτέρως τους κ.Θ.Δάκα και κ.Δ.Μηνά για την ανταλλαγή πρακτικών γνώσεων σε θέματα κατεργασιών και σχεδιασμού, αλλά κυρίως για την ευκαιρία που μου δόθηκε να ασχοληθώ με απαιτητικά προβλήματα σχεδιασμού, υπολογισμού και κατασκευής.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για τη συμπαράσταση και την υπομονή της όλα αυτά τα χρόνια.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά περί καλουπιών – Τοποθέτηση του τεχνικού προβλήματος	13
1.1 Μέθοδοι Μορφοποίησης Πολυμερών	13
1.2 Γενικές πληροφορίες περί Injection Molding	27
1.3 Παρουσίαση του τεχνικού ζητήματος	32
Κεφάλαιο 2: Κινηματική Ανάλυση Πλακών Καλουπιού	35
2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο κινηματικής μελέτης Απαραμόρφωτου Στερεού.....	35
2.2 Υλοποίηση Ανάλυσης Ανοχών μέσω της μεθόδου Monte Carlo στην μελέτη δημιουργίας προεξοχής στο εγχυόμενο αντικείμενο.....	61
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση της Επίδρασης των Λειτουργικών Παραμέτρων.....	73
3.1 Βασικές λειτουργικές αρχές μηχανών Injection	73
3.2 Προσομοίωση ροής πλαστικού στις κοιλότητες του υλικού	78
3.3 Προσομοίωση παραμόρφωσης του συνόλου Καλουπιού-Μηχανής μέσω στατικής δομικής ανάλυσης	84
Κεφάλαιο 4: Επίδραση των παραμέτρων κατά τη φάση κατασκευής του καλουπιού και τρόποι βελτίωσης	89
4.1 Σχηματισμός γρεζιού και στρώσιμο καλουπιού	89
4.2 Παράγοντες κατά τη διάρκεια των φάσεων κατεργασίας	92
Κεφάλαιο 5: Αθροιστικά Αποτελέσματα, Προτάσεις βελτίωσης και Μελλοντικές Ιδέες	97
5.1 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Αναλύσεων	97
5.2 Προτάσεις Βελτίωσης και Ιδέες για Μελλοντική Υλοποίηση	98
Βιβλιογραφία	99
Παράρτημα	101

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά περί καλουπιών – Τοποθέτηση του τεχνικού προβλήματος

1.1 Μέθοδοι Μορφοποίησης Πολυμερών

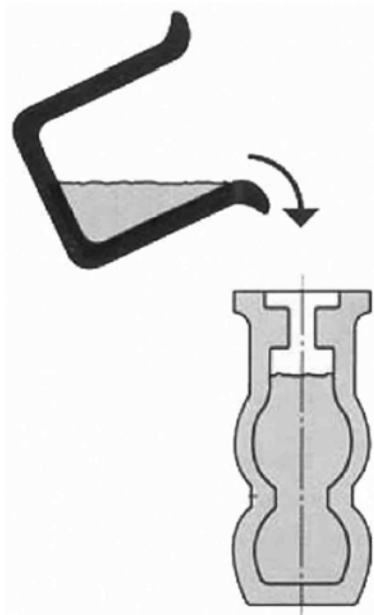
Οι κυριότερες μέθοδοι μορφοποίησης πολυμερών είναι η χύτευση (moulding), η εκβολή (extrusion), η κατασκευή λεπτών φύλλων (polymer foil manufacturing), και η ινοποίηση (fiber manufacturing ή spinning). Οι παραλλαγές των μεθόδων αυτών, και ο συνδυασμός τους, οδηγούν σε πληθώρα διαφορετικών τεχνικών μορφοποίησης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί ένα τεχνικό ζήτημα που αφορά καλούπι τύπου έγχυσης υπό πίεση (Injection Molding)

Οι μέθοδοι εκβολής (extrusion/pultrusion) εφαρμόζονται κυρίως για την κατασκευή προϊόντων συνεχούς μήκους, ορισμένης διατομής, επίπεδης μορφής και απλού τυπικού σχήματος, όπως ράβδοι, σωλήνες, ίνες, φύλλα κ.α. Στην μέθοδο της ινοποίησης, ίνες παράγονται με την εξαναγκασμένη διέλευση τήγματος ή διαλύματος του πολυμερούς διαμέσου συστήματος το οποίο φέρει ακροφύσια μικρής διαμέτρου και ακολούθως, μετά τη διαμόρφωσή τους, τυλίγονται σε καρούλια. Κάτι ανάλογο γίνεται και στις μεθόδους κατασκευής λεπτών φύλλων όπως είναι η μέθοδος της κυλίνδρωσης, όπου μάζα τήγματος πολυμερούς περνά από ένα σύστημα κυλίνδρων μικρού ανοίγματος, με αποτέλεσμα την παραγωγή πλακιδίων πατώματος, κουρτινών μπάνιου, κ.λπ. Γενικότερα οι πιο πάνω μέθοδοι που έχουν αναφερθεί χαρακτηρίζονται σαν διεργασίες υψηλού ρυθμού παραγωγής και δεν χρησιμοποιούν καλούπια. Κατά συνέπεια οι μέθοδοι της χύτευσης είναι αυτές που χρησιμοποιούν καλούπια και παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω.

1.1.1 Απλή χύτευση πολυμερούς

Κατά την απλή χύτευση πολυμερούς ρευστό υλικό χύνεται σε ένα συνήθως διαιρετό καλούπι, αφήνεται μέχρι τη στερεοποίησή του και στη συνέχεια απομακρύνεται από το καλούπι φέροντας όλες τις λεπτομέρειες της κοιλότητας του καλουπιού (εικόνα 1.1). Χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή μεγάλων γραναζιών, σφαιρών

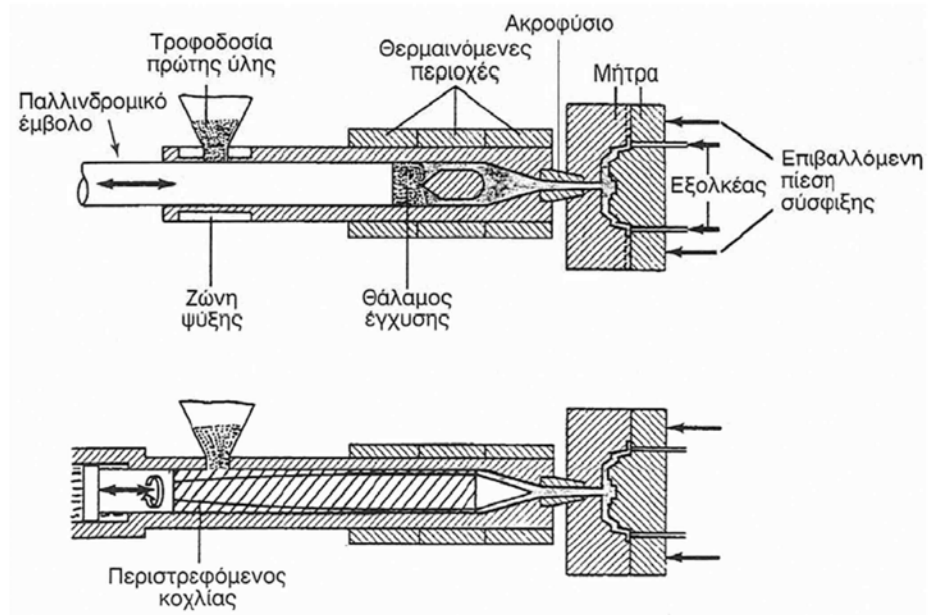
μπόουλινγκ και άλλων προϊόντων στα οποία δεν υπάρχει απαίτηση για υψηλού ρυθμού παραγωγή. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται η ύπαρξη δαπανηρών εγκαταστάσεων ή δαπανηρών καλουπιών και ότι μπορούν να παραχθούν σύνθετες μορφές αντικειμένων με ικανοποιητική τελική επιφάνεια. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ο μικρός ρυθμός παραγωγής και το ότι κατά τη στερεοποίηση παρατηρείται μεγάλος βαθμός συρρίκνωσης (25%), το οποίο προδιαθέτει την δημιουργία ρωγμών.



Εικόνα 1.1: Απλή χύτευση πολυμερούς

1.1.2 Χύτευση με έγχυση (injection molding)

Η χύτευση με έγχυση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος μορφοποίησης. Με τη μέθοδο αυτή, κόκκοι πολυμερούς τροφοδοτούνται από μία χοάνη σε ένα σωλήνα όπου θερμαίνονται μέχρι την τήξη τους. Το τήγμα αυτό, με τη βοήθεια ενός παλινδρομικού εμβόλου ή ενός περιστρεφόμενου κοχλίου, διοχετεύεται υπό πίεση (έγχυση) στα τοιχώματα ενός καλούπιού (εικόνα 1.2). Ακολούθως, το χυτό παραμένει μέσα στο καλούπι, αποψύχεται και τέλος το καλούπι ανοίγεται λαμβάνοντας το προϊόν. Η μέθοδος της χύτευσης με έγχυση χρησιμοποιείται, τόσο για θερμοπλαστικά πολυμερή, όπως π.χ. ακρυλικά, όσο και για θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, όπως π.χ. ρητίνες. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες λεπτομερείς διαφορές στην διαδικασία. Για παράδειγμα στα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή η μονάδα εγχύσεως είναι σε κρύα κατάσταση, συνεισφέροντας στην απόψυξη του χυτού, ενώ στα θερμοπλαστικά η μονάδα είναι θερμαινόμενη.



Εικόνα 1.2: Έγχυση με χρήση παλινδρομικού εμβόλου και με περιστρεφόμενο κοχλία

Η μέθοδος αυτή βρίσκει μεγάλο εύρος εφαρμογών σε αντικείμενα οποιουδήποτε μεγέθους και σχήματος, όπως κελύφη ηλεκτρικών συσκευών, δοχεία, παιχνίδια, καπάκια βαλβίδων αυτοκινήτου κ.ά. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι ότι μπορούν να δημιουργηθούν πολύπλοκα σχήματα οποιουδήποτε βάρους ή μεγέθους, προσφέρει εξαιρετική τελική επιφάνεια, έχει καλή ακρίβεια διαστάσεων, καλή επαναληπτικότητα (από το ίδιο καλούπι παράγονται πολλά αντικείμενα), έχει υψηλή παραγωγικότητα και δεν απαιτείται συνήθως φινιρίσμα και περαιτέρω επεξεργασία της τελικής επιφάνειας μετά την έξοδο από το καλούπι. Το μειονέκτημά της είναι ότι έχει υψηλό κόστος για την κατασκευή των καλουπιών και την αγορά της μηχανής.

1.1.3 Χύτευση με συμπίεση (compression moulding)

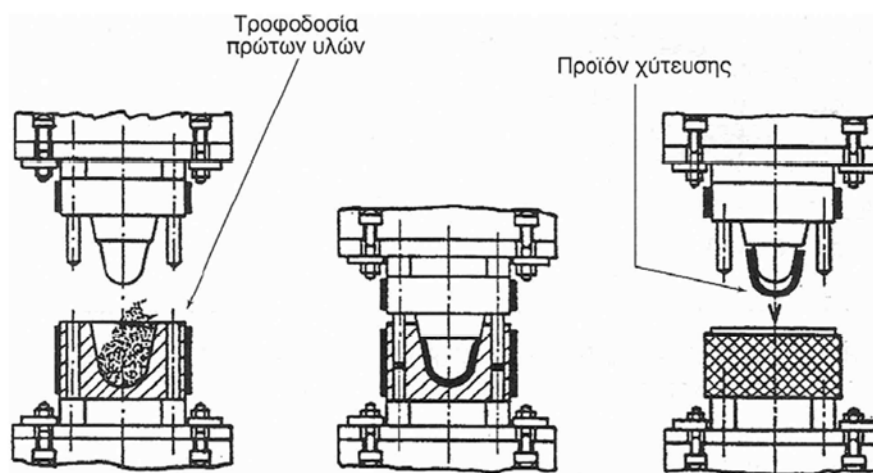
Η μέθοδος της χύτευσης με συμπίεση των πολυμερών είναι ανάλογη της σφρηγιάτησης κλειστής μήτρας, η οποία χρησιμοποιείται στις μεθόδους μορφοποίησης μετάλλων.

Κατά τη μέθοδο της συμπίεσης το στερεό υλικό (μείγμα θερμοπλαστικού ή θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς) - με καταλύτες, σκληρυντικά και ενισχυτικά υλικά - τοποθετείται σε ανοιχτή θερμαινόμενη μήτρα (εικόνα 1.3). Με το κλείσιμο της μήτρας, το υλικό θερμαίνεται μέχρι το σημείο τήξης του και με εφαρμογή υψηλής πίεσης ρέει μέχρι την πλήρωση του καλουπιού. Ο κύκλος απόψυξης και στερεοποίησης του υλικού ποικίλει ανάλογα με το υλικό, την θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την διαδικασία χύτευσης και το πάχος του αντικειμένου που έχει παραχθεί.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως στην περίπτωση των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών και έχει κάποιες βασικές διαφορές στην διαδικασία με

τα θερμοπλαστικά. Στην χύτευση των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών υπάρχει συνεχής θέρμανση και πίεση στο υλικό για τον ταυτόχρονο πολυμερισμό και σκλήρυνση του. Από την άλλη, στη χύτευση με συμπίεση των θερμοπλαστικών απαιτείται η απόψυξη του υλικού, μετά το σχηματισμό του μέσα στο καλούπι, για την στερεοποίηση του. Είναι αναγκαία η μείωση της θερμοκρασίας του αντικειμένου σε βαθμό ώστε με την αφαίρεση του από το καλούπι να μην υπάρξει θραύση.

Παραλλαγή της μεθόδου αποτελεί η χύτευση με συμπίεση εν ψυχρώ, κατά την οποία σκόνη του πολυμερούς τροφοδοτείται στη μήτρα συμπίεσης παρουσία κάποιου συνδετικού υλικού. Μετά την εν ψυχρώ συμπίεση του υλικού, το συνδετικό υλικό απομακρύνεται με κατάλληλη θερμική κατεργασία.



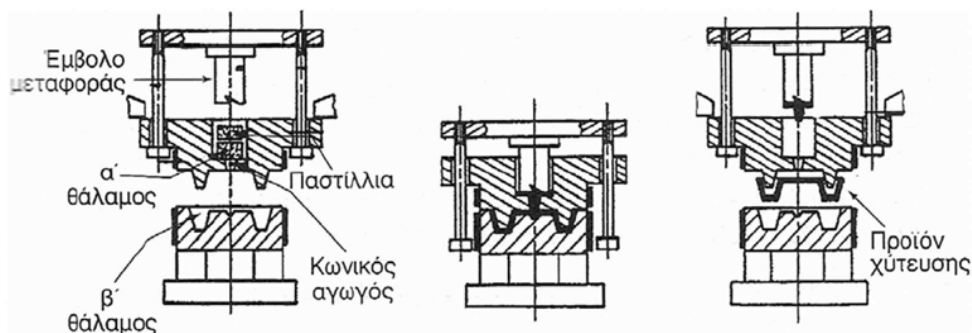
Εικόνα 1.3: Διαδικασία χύτευσης με συμπίεση

Με τη μέθοδο της χύτευσης με συμπίεση παράγονται προϊόντα οποιουδήποτε μεγέθους και μέτριας πολυπλοκότητας, όπως πώματα, πάνελ πορτών αυτοκινήτου, μπανιέρες, χερούλια μαχαιροπίρουνων, κ.ά. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ελαχιστοποίηση της φθοράς του υλικού κατά τη μορφοποίηση, όπως επίσης η ελαχιστοποίηση των παραμενουσών μηχανικών τάσεων στο τελικό προϊόν. Τα προϊόντα της μεθόδου (κυρίως θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών) προσφέρουν ένα συνδυασμό αντοχής, μικρότερου σχετικά βάρους και ακρίβειας διαστάσεων. Τα χαρακτηριστικά αυτά πρόσφεραν μία καλή επιλογή αντικατάστασης πολλών μετάλλων. Άλλο ένα κύριο χαρακτηριστικό και μειονέκτημα των προϊόντων της μεθόδου είναι η απαραίτητη «ωρίμανση» τους (curing), καθώς προϊόντα για παράδειγμα ρητινών χρειάζονται διάστημα περίπου δύο εβδομάδων για την πλήρη σκλήρυνση και χρήση τους.

1.1.4 Χύτευση μεταφοράς (transfer moulding)

Μεγάλο εύρος εφαρμογών βρίσκει επίσης ο συνδυασμός της μεθόδου χύτευσης με έγχυση με την μέθοδο χύτευσης με συμπίεση, λεγόμενη ως μέθοδος της χύτευσης μεταφοράς ή αλλιώς χύτευση με έγχυση και συμπίεση (injection-compression moulding). Η μορφοποίηση με χύτευση μεταφοράς πραγματοποιείται σε δύο θαλάμους (εικόνα 1.4). Στον πρώτο θάλαμο, τα δύο συστατικά του πολυμερούς (μείγμα ρητίνης και σκληρυντικού) θερμαίνονται υπό πίεση και τήκονται. Εκεί, πραγματοποιείται η απαραίτητη θερμοκρασιακή ομογενοποίηση της πρώτης ύλης. Από τον πρώτο θάλαμο το τήγμα αυτό της πρώτης ύλης εγχέεται μέσω ενός θερμαινόμενου κωνικού αγωγού, με τη βοήθεια ενός εμβόλου (έμβολο μεταφοράς), στη κοιλότητα του καλούπιου (δεύτερος θάλαμος). Εκεί, γίνεται η πλήρωση και συμπίεση της μήτρας, η μορφοποίηση του υλικού και ο πολυμερισμός του.

Υπάρχουν τρεις πρωτογενείς τύποι αυτής της μεθόδου. Στον απλούστερο τύπο στον οποίο γίνεται με δύο διαδοχικά στάδια, το πολυμερές εγχέεται μέσα στη διευρυμένη κοιλότητα του καλούπιου και αφού τελειώσει η έγχυση, αργότερα το καλούπι κλείνεται πλήρως, συμπιέζοντας το υλικό. Ο δεύτερος τύπος γίνεται με την ταυτόχρονη έγχυση και συμπίεση του υλικού. Σε αυτό το σύστημα, η συμπίεση στο καλούπι συγχρονίζεται με την κίνηση του εμβόλου που κάνει την έγχυση προσφέροντας μεγαλύτερη παραγωγικότητα και ακρίβεια. Τρίτος και τελευταίος τύπος είναι ο επιλεκτικός τύπος της μεθόδου. Σε αυτόν, η συμπίεση προϋποθέτει ένα αρχικά εντελώς κλειστό καλούπι. Καθώς το υλικό εγχέεται δημιουργείται πίεση προς το καλούπι οδηγώντας το προς τα πίσω, ανοίγοντας το. Φτάνοντας στο επιθυμητό σημείο ανοίγματος του καλούπιου ακολουθεί η πίεση στο χυτό.



Εικόνα 1.4: Διαδικασία χύτευσης μεταφοράς

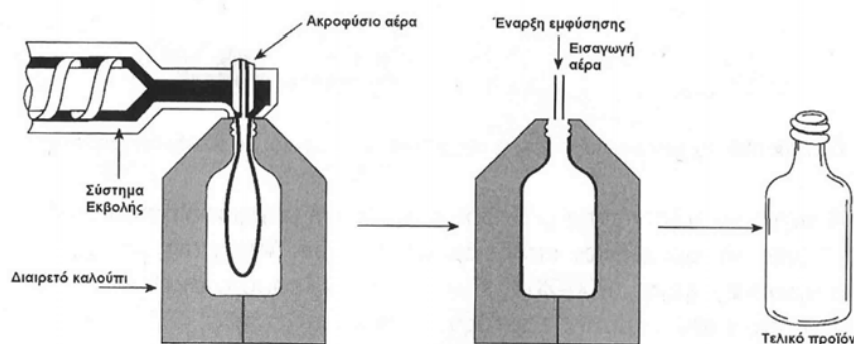
Η μέθοδος χύτευσης μεταφοράς υιοθετεί τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων της χύτευσης με έγχυση και χύτευσης με συμπίεση με τη διαφορά ότι αυξάνεται το κόστος του μηχανήματος και των καλούπιών, λόγω της μεγαλύτερης τεχνολογικής πολυπλοκότητας και πιέσεων που αναπτύσσονται. Παρόλα αυτά με την μέθοδο επιτυγχάνονται: ακρίβεια διαστάσεων, ελαχιστοποίηση συρρίκνωσης κατά την στερεοποίηση του υλικού, ικανότητα παραγωγής λεπτότερων επιφανειών, ταχύτερος

κύκλος χύτευσης και κατά συνέπεια μεγαλύτερη παραγωγικότητα και σχηματική ευελιξία. Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για την κατασκευή εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας, όπως πόρτες αυτοκινήτου, κελύφη ηλεκτρικών συσκευών, κουπιά για κανό, είδη φωτισμού κ.ά. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο είναι κυρίως θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή όπως πολυαμίνες και σιλικόνες αλλά χρησιμοποιούνται και θερμοπλαστικά όπως ακρυλικά και πολυαιθυλένια.

1.1.5 Μορφοποίηση με εμφύσηση (blow forming)

Η μέθοδος της μορφοποίησης με εμφύσηση εμφανίζεται σε τρεις βασικές παραλλαγές: τη μορφοποίηση με εμφύσηση μετά από εκβολή (extrusion blow moulding), όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5, τη μορφοποίηση με εμφύσηση μετά από έγχυση (injection blow moulding) και τη διαξονική μορφοποίηση με εμφύσηση (stretch blow moulding).

Κατά την εμφύσηση μετά από εκβολή το ρευστό πολυμερές διοχετεύεται μέσα από μία κεφαλή σχηματισμού προσφέροντας του μια αρχική μορφοποίηση ενός κοίλου σωλήνα. Στη συνέχεια τοποθετείται ανάμεσα σε ένα διαιρούμενο ανοικτό καλούπι ενώ παράλληλα ένα ήδη υπάρχον ακροφύσιο θερμού αέρα «φουσκώνει» μερικώς το πολυμερές για την αποφυγή επικόλλησης και διατήρησης του κοιλώματος του. Όταν το προ-μορφοποιημένο πολυμερές φτάσει το απαραίτητο μήκος κατά την εκβολή, το καλούπι κλείνει και, με την βοήθεια θερμού πεπιεσμένου αέρα μέσω ακροφύσιου, το πολυμερές διογκώνεται μέχρι να έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα του καλουπιού. Τέλος, με την παύση της ροής του θερμού αέρα το υλικό στερεοποιείται και ανοίγεται το καλούπι παίρνοντας το αντικείμενο. Η μέθοδος αυτή έχει μια συνεχή διεργασία και εμφανίζει τη μεγαλύτερη παραγωγικότητα από τις υπόλοιπες. Άλλα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι η ικανοποιητική της ακρίβεια και επαναληπτικότητα, και το σχετικά χαμηλότερο κόστος του μηχανήματος. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι προσφέρει χαμηλής ποιότητας επιφάνειες στα προϊόντα ούτως ώστε κατά την εξαγωγή του τεμαχίου από τη μήτρα να απαιτείται περαιτέρω διαδικασία λείανσης και φινιρίσματος γνωστή ως deflashing ή pinch-off. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για την παραγωγή μπουκαλιών όλων των μεγεθών, παιχνιδιών, δοχείων καυσίμου, αεραγωγών, μεγάλων δεξαμενών, κ.ά.



Εικόνα 1.5: Μορφοποίηση με εμφύσηση μετά από εκβολή

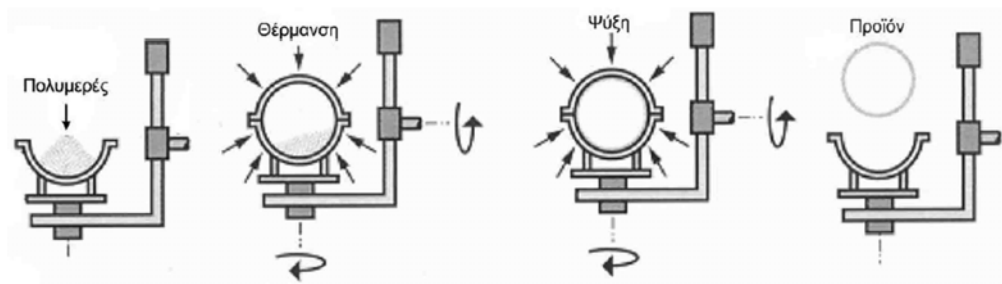
Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στην εμφύσηση μετά από έγχυση με την διαφορά ότι η αρχική μορφοποίηση του πολυμερούς πριν τη μεταφορά του στο καλούπι γίνεται με έγχυση. Αργότερα ακολουθεί η ίδια διαδικασία μεταφοράς του τεμαχίου στο καλούπι (ή μήτρα εμφύσησης) και η εμφύσηση του, για την τελική του μορφοποίηση. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το ότι το προϊόν διαθέτει καλή τελική επιφάνεια, υψηλή ακρίβεια και επαναληπτικότητα, όπως επίσης και υψηλή παραγωγικότητα. Από την άλλη μεριά στην μέθοδο αυτή απαιτούνται ειδικά μηχανήματα και καλούπια στην εφαρμογή της με αποτέλεσμα μεγάλο κόστος. Πολλά μπουκάλια διαφόρων μεγεθών (κυρίως μικρού και μεσαίου μεγέθους) και σχημάτων από PVC, PET και PP, βάζα, κούπες, φλιτζάνια κι άλλα προϊόντα με κοιλότητες κατασκευάζονται με αυτήν τη μέθοδο.

Η διαξονική μορφοποίηση με εμφύσηση έχει το χαρακτηριστικό της ταυτόχρονης εφαρμογής αξονικής και ακτινικής διόγκωσης του αρχικά μορφοποιημένου πολυμερούς από εκβολή ή έγχυση. Το αρχικά μορφοποιημένο πολυμερές μορφοποιείται αξονικά, σε δύο ή τρεις άξονες, με ποικίλους τρόπους μέσω μηχανικών ή ρομποτικών μέσων και στη συνέχεια ή παράλληλα γίνεται η ακτινική διόγκωση, μέσω του θερμού πεπιεσμένου αέρα κατά την εμφύσηση. Με τη διαξονική μορφοποίηση με εμφύσηση βελτιώνονται οι φυσικές ιδιότητες του αντικειμένου όπως η αντοχή του αντικειμένου σε κρούση και ερπυσμό. Βελτιώνεται η διαύγειά του και η διαπερατότητα του σε αέρια και υδρατμούς. Και αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για την κατασκευή φιαλών από PVC, PET, PP κ.λπ.

Γενικότερα η μέθοδος μορφοποίησης με εμφύσηση θεωρείται μία ικανοποιητικής παραγωγικότητας και επαναληπτικότητας μέθοδος. Με τη μέθοδο αυτή κατασκευάζονται πλαστικές φιάλες και άλλα προϊόντα με εσωτερικές κοιλότητες και χρησιμοποιούνται υλικά θερμοπλαστικών πολυμερών όπως ABS, PP, nylon, PSO, κ.α. Προνόμιο της μεθόδου είναι η δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων αποτελούμενων από πολλαπλά στρώματα.

1.1.6 Μορφοποίηση με περιστροφή (rotational moulding ή rotomoulding)

Στη μορφοποίηση με περιστροφή το πλαστικό πολυμερές σε μορφή σωματιδίων, είτε σε ρευστή μορφή, τοποθετείται μέσα σε ένα κελυφοειδές κοίλο καλούπι το οποίο στη συνέχεια τοποθετείται σε ένα θάλαμο θερμαινόμενου αέρα (φούρνο). Το καλούπι αρχίζει να περιστρέφεται διαξονικά και κατόπιν τήξης, το υλικό δημιουργεί μια «επένδυση» στην εσωτερική επιφάνεια του καλουπιού (εικόνα 1.6). Με το πέρας της κάλυψης, το καλούπι συνεχίζει να περιστρέφεται σε περιβάλλον ψύξης για την στερεοποίηση του πολυμερούς. Τέλος, το καλούπι ανοίγεται και αφαιρείται το έτοιμο αντικείμενο.



Εικόνα 1.6: Μορφοποίηση με περιστροφή

Σχετικά με άλλες μεθόδους μορφοποίησης, η μορφοποίηση με περιστροφή είναι αργή. Η δημιουργία του πάχους των τοιχωμάτων είναι αργή λόγω του ότι όλη η θέρμανση για την τήξη του πολυμερούς πρέπει να περάσει στο εσωτερικό του κλειστού καλουπιού ούτως ώστε να ξεκινήσει να τήκεται το πολυμερές. Αφού γίνει η επικάλυψη το σύστημα του καλουπιού θα πρέπει να αποψυχθεί για την στερεοποίηση του πολυμερούς. Αυτή η απόψυξη γίνεται δημιουργώντας ένα περιβάλλον ψύξης στον ίδιο θάλαμο είτε μεταφέροντας το σύστημα σε άλλον θάλαμο ψύξης.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή προϊόντων με ανοιχτές ή και κλειστές κοίλες επιφάνειες. Έχει την δυνατότητα παραγωγής μεγάλων σε μέγεθος προϊόντων, όπως δεξαμενές νερού και χημικών, κάδους απορριμμάτων, κανό, καγιακ, δοχεία κ.ά. αλλά και μικρότερων, όπως κελύφη ηλεκτρικών συσκευών, μηχανών, παιχνιδιών, τύμπανα, κ.ά. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο είναι θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, όπως πολυεστέρες, πολλά πολυαιθυλένια, και πολυπροπυλένια.

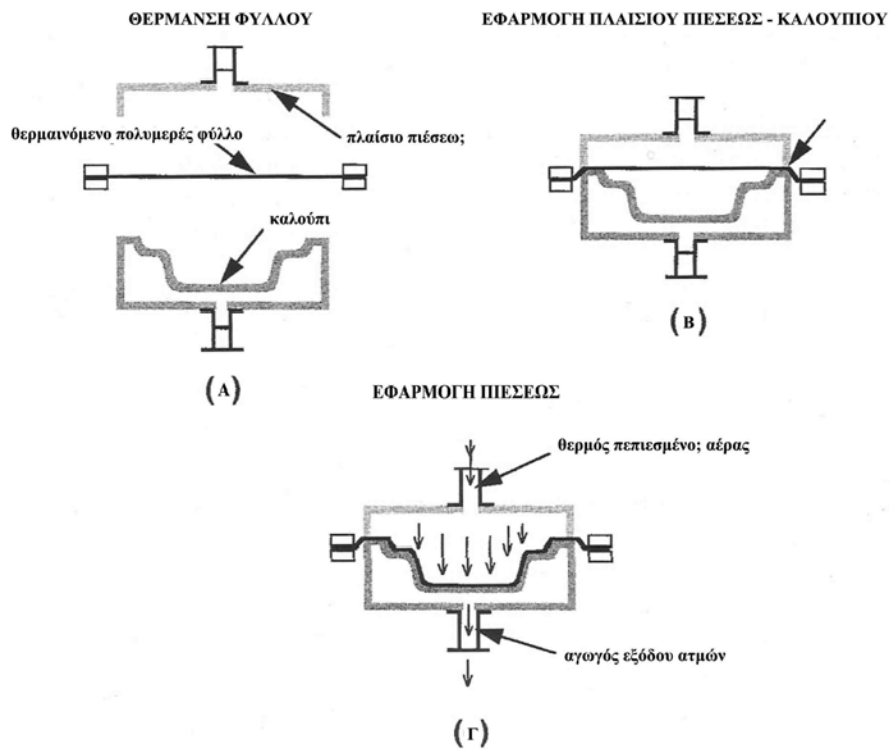
Το πάχος του τοιχώματος είναι ελεγχόμενο από την ποσότητα του πολυμερούς που θα τοποθετηθεί στο καλούπι. Αυτό δίνει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στη μέθοδο καθώς από οικονομικής άποψης δίνεται το μικρότερο δυνατό πάχος σε όλη την επιφάνεια του αντικείμενου χωρίς την σπατάλη υλικού. Άλλα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το σχετικά μικρό κόστος κατά την διαδικασία (χαμηλές πιέσεις), χαμηλό κόστος καλουπιών, η δυνατότητα παραγωγής μεγάλης ποικιλίας προϊόντων περίπλοκων σχημάτων, μεγέθους, χρωματισμών και πάχους επιφανειών (από 1.6 έως 12.7 mm) και η σταθερότητα διαστάσεων στα προϊόντα. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ο μεγάλος και αργός κύκλος παραγωγής λόγω των διαδικασιών τήξης και ψύξης του αντικείμενου αλλά και για τις διαδικασίες γέμισης- με το πολυμερές- και εκφόρτωσης του καλουπιού, κατά το τέλος της μορφοποίησης, οι οποίες γίνονται στις περισσότερες περιπτώσεις χειροποίητα και όχι αυτοματοποιημένα.

1.1.7 Θερμομόρφωση (thermoforming)

Η θερμομόρφωση αποτελεί μέθοδο μορφοποίησης λεπτών ταινιών ή φύλλων πολυμερούς πλαστικού σε προϊόντα πολύπλοκων σχημάτων. Η γενική διαδικασία της μεθόδου αυτής περιλαμβάνει την συγκράτηση του πολυμερούς φύλλου στη μήτρα, με τη βοήθεια συνήθως ενός δακτυλίου σύσφιξης, και στη συνέχεια της θέρμανσής του σε θερμοκρασία στην οποία το πολυμερές αποκτά μεγάλη ελαστικότητα. Ακολουθεί η άμεση υποχώρηση του πολυμερούς μέσα στο καλούπι με την εφαρμογή κενού, με τη διοχέτευση θερμού πεπιεσμένου αέρα, με μηχανική έκταση ή με το συνδυασμό τους. Τέλος, τα τοιχώματα του καλουπιού ψύχονται με αποτέλεσμα την ψύξη και σκλήρυνση του μορφοποιημένου πολυμερούς. Το αντικείμενο αφαιρείται από το καλούπι και κόβεται περιμετρικά από όπου συγκρατήθηκε.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω υπάρχουν τρεις βασικές παραλλαγές της μεθόδου ως προς τον τρόπο υποχώρησης του πολυμερούς στο καλούπι: η θερμομόρφωση υπό πίεση (εικόνα 1.7), η θερμομόρφωση υπό κενό (εικόνα 1.8) και η μηχανική θερμομόρφωση (εικόνα 1.9).

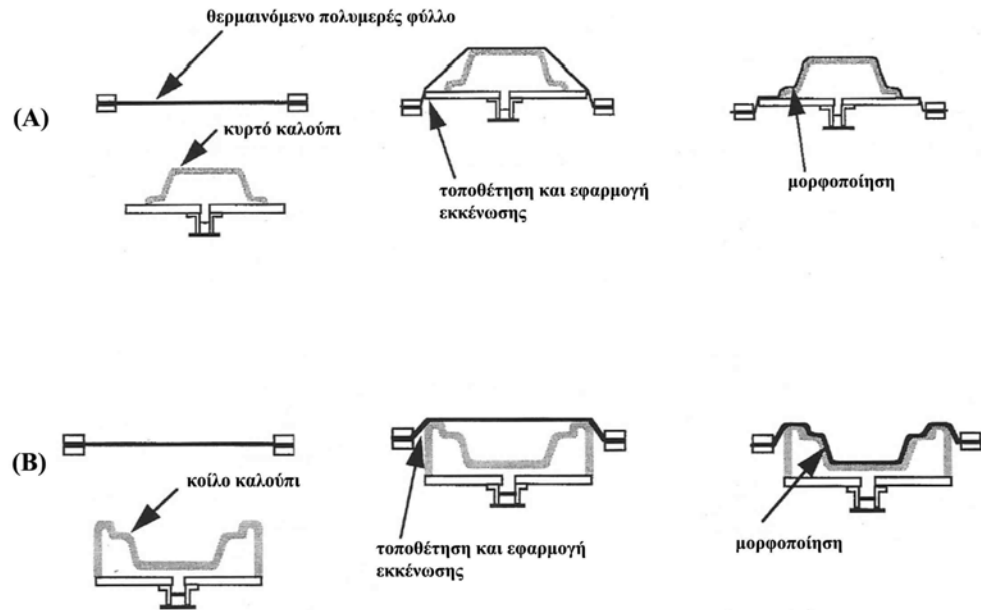
Η θερμομόρφωση υπό πίεση (pressure forming) περιλαμβάνει την παρουσία θερμού πεπιεσμένου αέρα μέσω ενός πλαισίου πίεσεως, το οποίο κλείνεται πάνω στο καλούπι, σφραγίζοντας τις ακμές του πολυμερούς φύλλου. Στη συνέχεια το φύλλο πιέζεται μέχρι την επαφή του με τα τοιχώματα του καλουπιού. Η χρήση αυτών των υψηλών πιέσεων δίνει την δυνατότητα παραγωγής σαφώς καθορισμένων σχημάτων του προϊόντος με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, την δυνατότητα τοποθέτησης κειμένου στο προϊόν, αυστηρότερα όρια ανοχής, καλύτερη κατανομή του υλικού αλλά και ταχύτερων ρυθμών μορφοποίησης. Κατά συνέπεια η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για προϊόντα τα οποία απαιτούν υψηλής ποιότητας εμφάνιση, όπως κελύφη επαγγελματικών και ιατρικών μηχανημάτων. Αυτές οι απαιτήσεις παρόλα αυτά επιφέρουν καλούπια υψηλότερου κόστους με μικρότερες αποδόσεις.



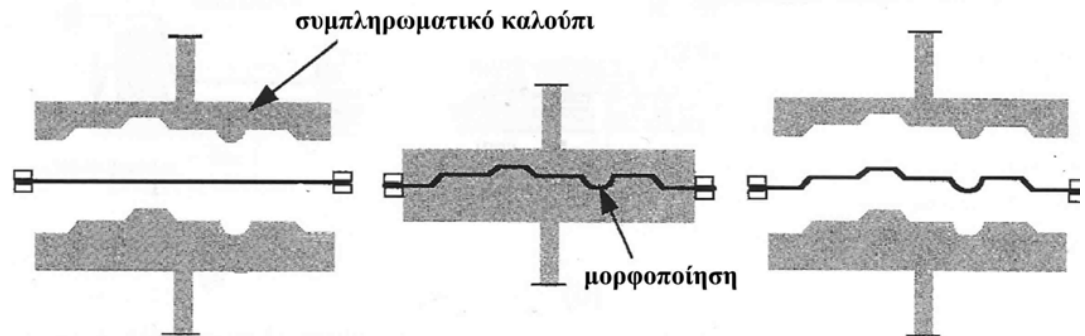
Εικόνα 1.7: Θερμομόρφωση υπό πίεση

Η θερμομόρφωση υπό κενό (vacuum forming) είναι η βασικότερη μέθοδος θερμομόρφωσης που χρησιμοποιείται. Περιλαμβάνει το θερμαινόμενο φύλλο πολυμερούς σε μαλακή κατάσταση το οποίο τοποθετείται πάνω στο καλούπι. Στο εύκαμπτο υλικό ασκούνται ατμοσφαιρικές πιέσεις από πάνω και τάσης του κενού που δημιουργείται από κάτω, μέχρις ότου το φύλλο να εφάπτεται της επιφάνειας του καλουπιού. Στη μέθοδο αυτή βρίσκουν εφαρμογή καλούπια κοίλων αλλά και κυρτών επιφανειών.

Στη μηχανική θερμομόρφωση (mechanical forming) το εύκαμπτο θερμό φύλλο πολυμερούς δέχεται πιέσεις μηχανικά (ή και χειροκίνητα) μέσω δύο συμπληρωματικών καλουπιών (ένα κοίλο και ένα κυρτό). Περιορισμοί σε αυτή την διαδικασία είναι οι εξάρτηση της διαμόρφωσης των καλουπιών και της συμπεριφοράς του πολυμερούς υλικού ως προς τη ροή και την εκτόνωση του.

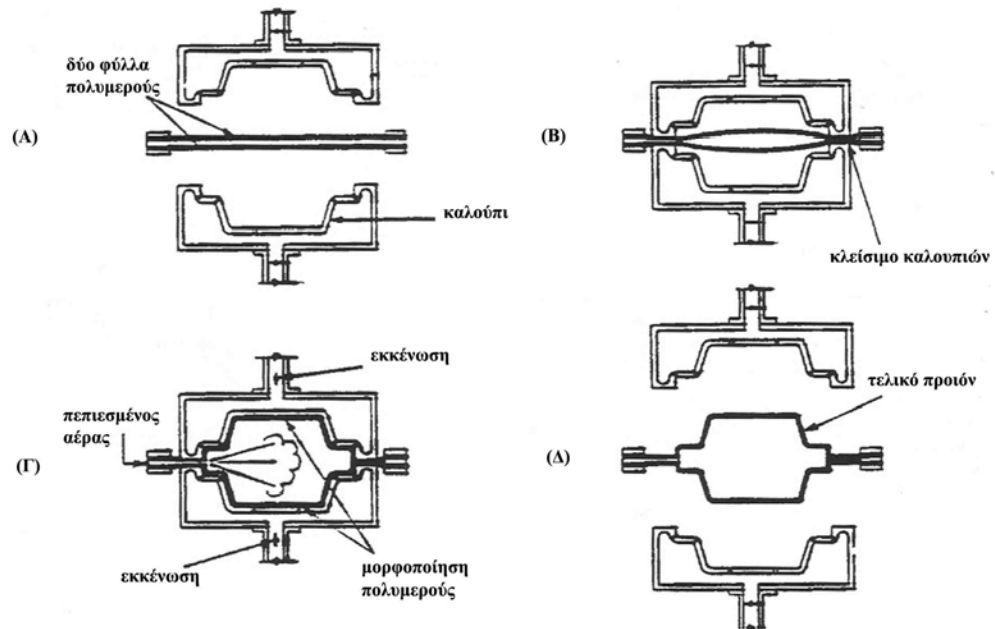


Εικόνα 1.8: Θερμομόρφωση υπό κενό με (Α) κυρτό και (Β) κούλο καλούπι



Εικόνα 1.9: Μηχανική θερμομόρφωση

Μια άλλη παραλλαγή της μεθόδου είναι η θερμομόρφωση διπλού φύλλου (twin-sheet forming, εικόνα 1.10) στην οποία δύο φύλλα ίδιου πολυμερούς συγκρατούνται παράλληλα από δύο ξεχωριστά πλαίσια σύσφιξης και θερμαίνονται. Τα θερμαινόμενα στοιχεία μεταφέρονται και τοποθετούνται μεταξύ δύο καλουπιών (όχι κατά κανόνα όμοιας κοιλότητας). Τα καλούπια ενώνονται μεταξύ τους και με την εφαρμογή κενού ή/ και πεπιεσμένου αέρα στα φύλλα επιτυγχάνεται η μορφοποίηση, με την ακόλουθη απόψυξη και αφαίρεση του αντικειμένου. Η μέθοδος αυτή θέτει νέες διαστάσεις της μεθόδου θερμομόρφωσης και παρουσιάζεται σαν ο κυριότερος ανταγωνιστής της μεθόδου μορφοποίησης με εμφύσηση καθώς παράγει παρόμοιας φύσης προϊόντα με πλεονέκτημα στο κόστος μηχανής.



Εικόνα 1.10: Θερμομόρφωση διπλού φύλλου

Γενικότερα κατά την μέθοδο της θερμομόρφωσης, η επιφάνεια του αρχικού φύλλου πολυμερούς αυξάνεται με ταυτόχρονη μείωση του πάχους του. Το τελικό προϊόν παρουσιάζει διαφορετικό πάχος σε διάφορες χαρακτηριστικές περιοχές του: τα ψυχρά μέρη του φύλλου στα σημεία συγκράτησης του διατηρούν το αρχικό πάχος τους, ο πυθμένας παρουσιάζει μέγιστο πάχος στο κέντρο του, στις γωνίες το πάχος των τοιχωμάτων του προϊόντος γίνεται ελάχιστο και το πάχος των τοιχωμάτων παίρνει ενδιάμεσες τιμές και μεταβάλλεται καθ' ύψος.

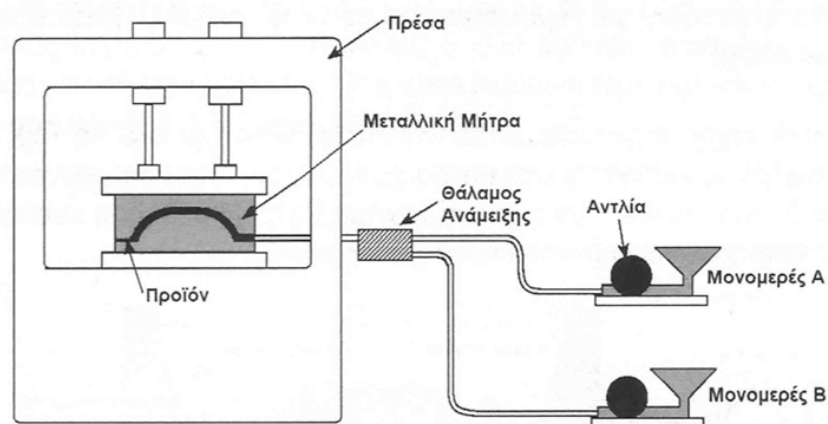
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή δύο τύπων προϊόντων: για μεγάλο όγκο παραγωγής προϊόντα, όπως λεπτών τοιχωμάτων προϊόντα συσκευασίας και αναλώσιμα αντικείμενα (π.χ. συσκευασίες γιαουρτιών, σταχτοδοχεία, ποτήρια) και για μικρότερου όγκο παραγωγής προϊόντα, όπως μεγάλα πάνελ, πινακίδες, παγκάκια, κιβώτια, καγιάκ κ.ά. Τα υλικά που βρίσκουν εφαρμογή είναι θερμοπλαστικά πολυμερή, όπως ABS, PP, PVC, PMMA, ανάλογα με τις λειτουργικές απαιτήσεις του αντικειμένου. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η μέθοδος είναι η δυνατότητα παραγωγής μεγάλων αντικειμένων με μικρότερο κόστος σχετικά με άλλες διαδικασίες, η δυνατότητα παραγωγής προϊόντων καλής αισθητικής ως προς τις επιφάνειες, ποικίλων χρωματισμών και σημαντική μείωση κόστους από περαιτέρω επεξεργασία. Ως μειονέκτημά της είναι το γεγονός ότι η διαδικασία ξεκινά από φύλλα πολυμερούς ως πρώτη ύλη. Αυτό σημαίνει ότι το αρχικό υλικό προϋποθέτει μια πρόσθετη διαδικασία εκβολής του πολυμερούς στη μορφή φύλλου, το οποίο έχει ένα

επιπλέον κόστος. Επίσης, το πάχος του αντικειμένου μεταβάλλεται ανάλογα με την ακτίνα καμπυλότητάς του, δείγμα έλλειψης ευελιξίας στην παραγωγή ποικιλίας προϊόντων.

1.1.8 Χύτευση με Αντίδραση και Έγχυση (reaction injection moulding)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου χύτευσης με έγχυση. Κατά τη χύτευση με αντίδραση και έγχυση (εικόνα 1.11), δύο ή περισσότερα αντιδρώντα μονομερή σε υγρή μορφή ρέουν σε ένα θάλαμο ανάμειξης όπου θερμαίνονται, αναμειγνύονται μαζί με άλλα πρόσθετα υλικά όπως καταλύτες, κονιάματα και χρωστικές ουσίες και αντιδρούν σχηματίζοντας το πολυμερές υλικό. Παράλληλα, το μείγμα των μονομερών υλικών εισέρχεται στο καλούπι, κάτω από μεγάλη πίεση. Η βασική διαφορά της μεθόδου αυτής από την χύτευση με έγχυση είναι η διεργασία πολυμερισμού η οποία πραγματοποιείται μέσα στο καλούπι μορφοποίησης, σε αντίθεση με την απόψυξη του ρευστού πολυμερούς η οποία συμβαίνει στη χύτευση με έγχυση. Επειδή τα μονομερή υλικά που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν υψηλή ρευστότητα (μικρό ιξώδες) απαιτούνται χαμηλότερες πιέσεις για την χύτευση τους στο καλούπι.

Η κύρια εφαρμογή της μεθόδου αφορά θερμοπλαστικά αλλά και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή στη μορφοποίηση, όπως πολυουρεθάνης, nylon και ορισμένων εποξειδικών ρητινών. Εφόσον η διεργασία του πολυμερισμού λαμβάνει χώρα μέσα στη μήτρα, οι αναπτυσσόμενες εσωτερικές τάσεις ελαχιστοποιούνται και, συνεπώς, η κατεργασία αυτή είναι κατάλληλη για εξαρτήματα μεγάλου μεγέθους και πολύπλοκης γεωμετρίας. Παραδείγματα προϊόντων αυτής της μεθόδου είναι: εφαρμογές σε αυτοκινητοβιομηχανία, όπως αεροτομές και πλαίσια ηλιοροφών, εφαρμογές σε τηλεπικοινωνία, όπως βάσεις και περιβλήματα τηλεφωνικών θαλάμων και υπολογιστών, καγιάκ, σκέιτμπορντ κ. ά.



Εικόνα 1.11: Μέθοδος χύτευσης με αντίδραση και έγχυση

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου προκύπτουν από τις σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις που αναπτύσσονται καθ' όλη τη διαδικασία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον απλό σχεδιασμό του καλουπιού, το χαμηλό κόστος κατασκευής του, την δυνατότητα παραγωγής μεγάλων σε μέγεθος και πολύπλοκων αντικειμένων υψηλότερης ποιότητας (ελαφρύτερων με μεγαλύτερη αντοχή σε θραύση). Το χαμηλό ιξώδες και η ανάμιξη των πολυμερών καθιστούν κάποια μειονεκτήματα στη μέθοδο, καθώς, εγκλωβίζονται φυσαλίδες αέρα κατά την έγχυση του υλικού. Αυτό, επίσης, καθιστά δυσκολότερη την σφράγιση του καλουπιού, η οποία μπορεί να προκαλέσει εγκοπές στο προϊόν, με περαιτέρω απαιτήσεις κοπής και επεξεργασίας, μεγαλύτερου κόστους.

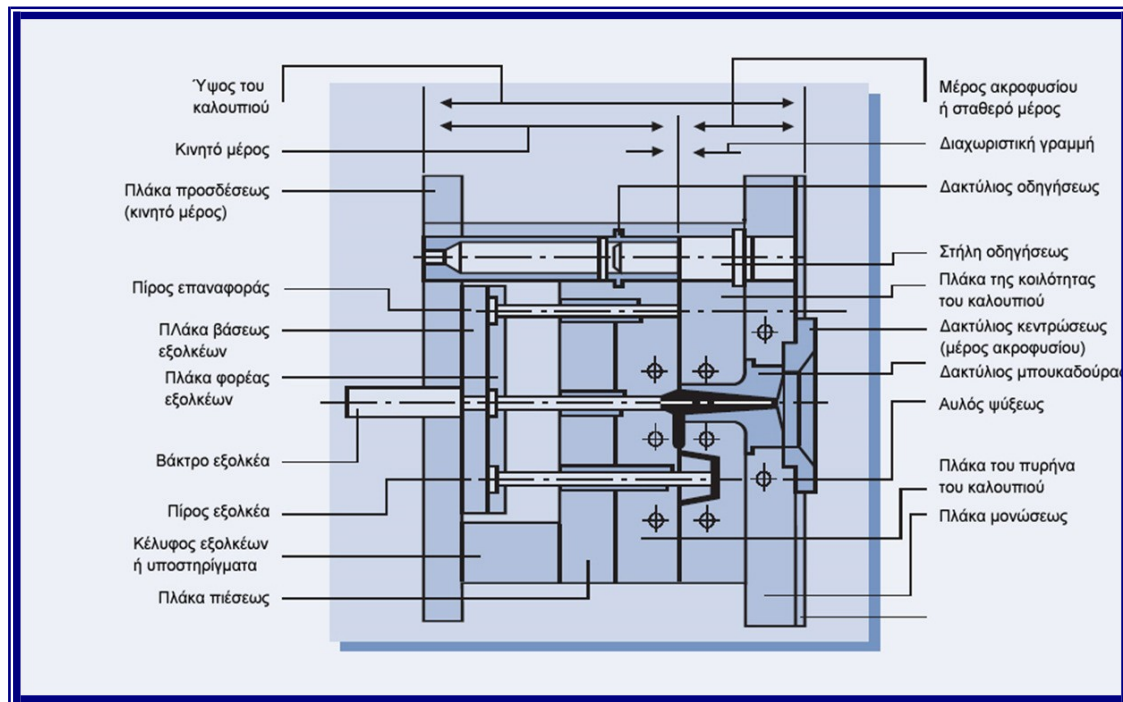
1.1.9 Άλλες μέθοδοι μορφοποίησης χύτευσης πολυμερών

Οι μέθοδοι χύτευσης είναι οι πρωτεύουσες μέθοδοι, με εκτενή χρήση στην παραγωγή αντικειμένων. Η παραγωγή προϊόντων σε διάφορους τομείς και εφαρμογές πάντοτε έχει κάποια σχέση με τις μεθόδους αυτές. Ανάλογα την εφαρμογή και το είδος του προϊόντος, οι μέθοδοι αλλά και τα υλικά που χρησιμοποιούνται προσαρμόζονται σε νέα δεδομένα για την εξυπηρέτηση διαφόρων σκοπών, όπως τη μείωση του κόστους παραγωγής, τη μείωση του κόστους μηχανών, την επίτευξη των απαιτούμενων ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών του προϊόντος κ. ά. Έτσι παρουσιάζεται μεγάλη ποικιλία παραλλαγών και συνδυασμών μεθόδων χύτευσης, καθώς, και ποικιλία υλικών που χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα παραλλαγή της μεθόδου χύτευσης με έγχυση, (πέραν αυτών που έχουν προαναφερθεί) η χύτευση με έγχυση με βοηθητικά αέρια, (Gas-assisted injection moulding) αν και με μεγαλύτερο κόστος στον εξοπλισμό, προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό, αυξάνει την ποιότητα των αντικειμένων ως προς την ακαμψία, το βάρος και την αντοχή σε θραύση και αυξάνει το ρυθμό παραγωγής. Μια άλλη παραλλαγή της μεθόδου αυτής, η χύτευση με συν-έγχυση (Coinjection moulding) έχει το κύριο πλεονέκτημα της δυνατότητας έγχυσης δύο διαφορετικών πολυμερών για ένα αντικείμενο. Αυτό προσφέρει την εξοικονόμηση του πολυμερούς το οποίο κοστίζει περισσότερο και την παραγωγή προϊόντων μικρότερου κόστους σε σχέση με άλλα ανταγωνιστικά προϊόντα μίας σύστασης.

Ως προς τα πολυμερή υλικά, πέραν των κλασικών θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών ποικίλων ιδιοτήτων που χρήζουν μεγάλης εφαρμογής στις διαδικασίες χύτευσης, παρουσιάζονται και τα αφρώδη πολυμερή. Τα αφρώδη πολυμερή (θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοπλαστικά), όπως είναι το φελιζόλ και πολλά δομικά αφρώδη πολυμερή, έχουν διάφορες ιδιαιτερότητες ως προς την παραγωγή τους, όπως είναι η εξάτμιση διαλύτη από τη μάζα του πολυμερούς ή η παραγωγή αερίου μέσα στη μάζα του μετά από χημική αντίδραση με πρόσθετα υλικά. Για αυτό το λόγο προκύπτουν παραλλαγές της μεθόδου χύτευσης, όπως η χύτευση δομικών αφρώδη (structural foam moulding) και η χύτευση διογκωμένων αφρώδη (expanded bead foam moulding). Τα προϊόντα αφρώδη πολυμερών έχουν ένα εξαιρετικό συνδυασμό μικρού βάρους, μικρού κόστους και πολύ καλών θερμομονωτικών και ηχομονωτικών ιδιοτήτων.

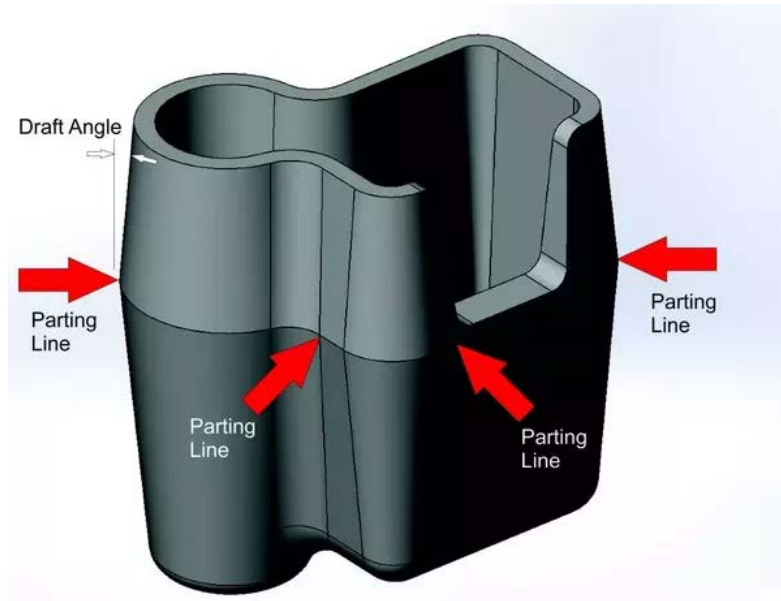
1.2 Γενικές πληροφορίες περί Injection Molding

Επειδή η παρούσα εργασία πραγματεύεται θέματα που αφορούν αποκλειστικά την έγχυση πλαστικών υπό πίεση (Injection Molding) δίνονται κάποια περαιτέρω στοιχεία για τη συγκεκριμένη διεργασία.

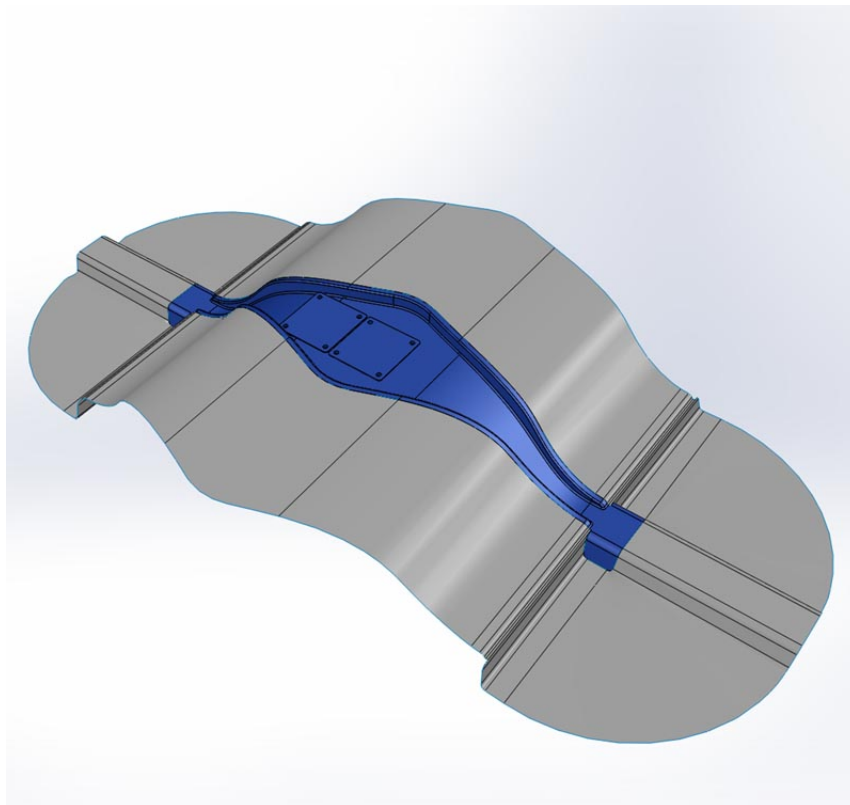


Εικόνα 1.11: Γενική άποψη καλουπιού απλής δομής

Βασική έννοια είναι αυτή της γραμμής και επιφάνειας διαχωρισμού (parting line- parting surface) Πρόκειται για τη νοητή καμπύλη στο χώρο με βάση την οποία η γεωμετρία του αντικειμένου χωρίζεται σε θηλυκή και αρσενική. Η επιλογή του είναι το πρώτο σημαντικό βήμα κατά τον σχεδιασμό του καλουπιού αλλά και του ίδιου του αντικειμένου. Γενικά η διαδικασία είναι αμφίδρομη μεταξύ καλουπιού και αντικειμένου με πολλές παραλλαγές μέχρι το τελικό design. Η επιλογή της καθορίζει αν το αντικείμενο θα είναι εξολκεύσιμο ή θα απαιτούνται μηχανισμοί πλευρικής δράσης, αλλά και το λειτουργικό και αισθητικό αποτέλεσμα που οφείλεται στην δημιουργία της προεξοχής γνωστής και ως flash ή witness line.

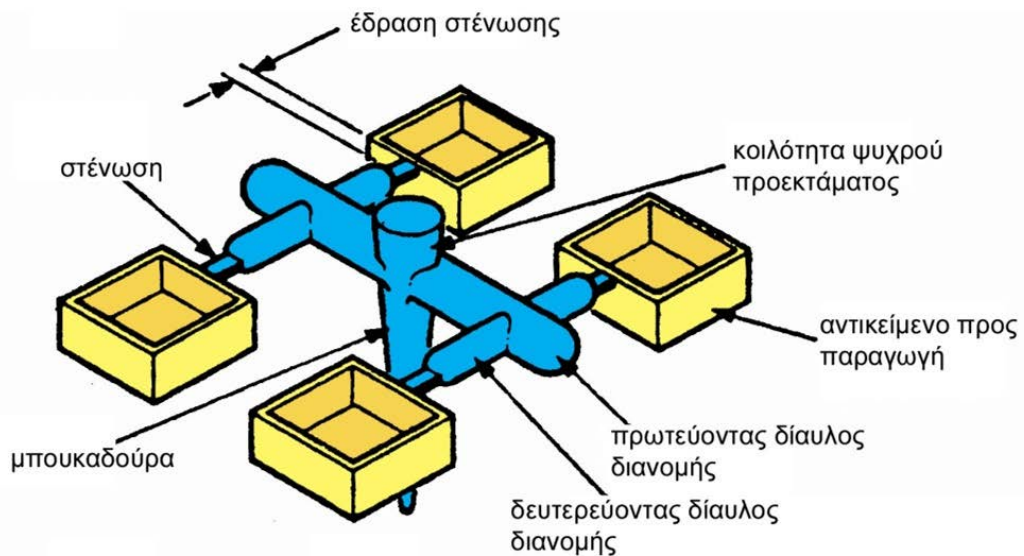


Εικόνα 1.12: Γραμμή διαχωρισμού. Διακρίνεται η αλλαγή των κλίσεων των πλευρών ώστε να είναι δυνατή η εξόλκευση του αντικειμένου

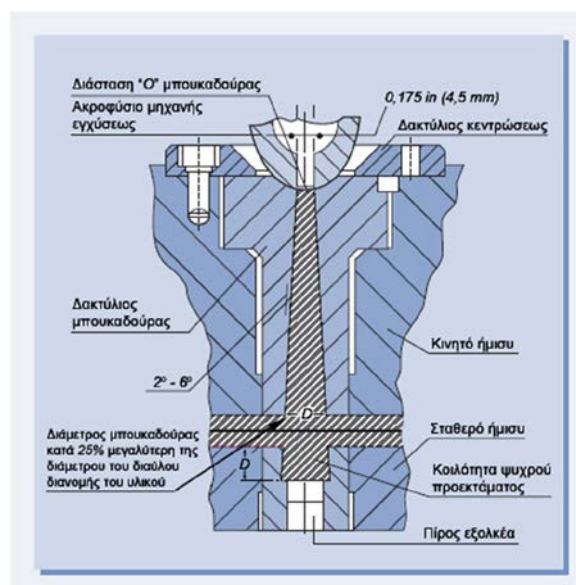


Εικόνα 1.13 Επιφάνεια διαχωρισμού (parting surface). Πρόκειται για το νοητό σύνολο επιφανειών που με γενέτειρα την γραμμή διαχωρισμού, σχεδιάζεται στο περιβάλλον του CAD προκειμένου να χωριστούν οι αντίστροφες γεωμετρίες που αποτελούν τις φόρμες που δίνουν μορφή στο τήγμα πλαστικού.

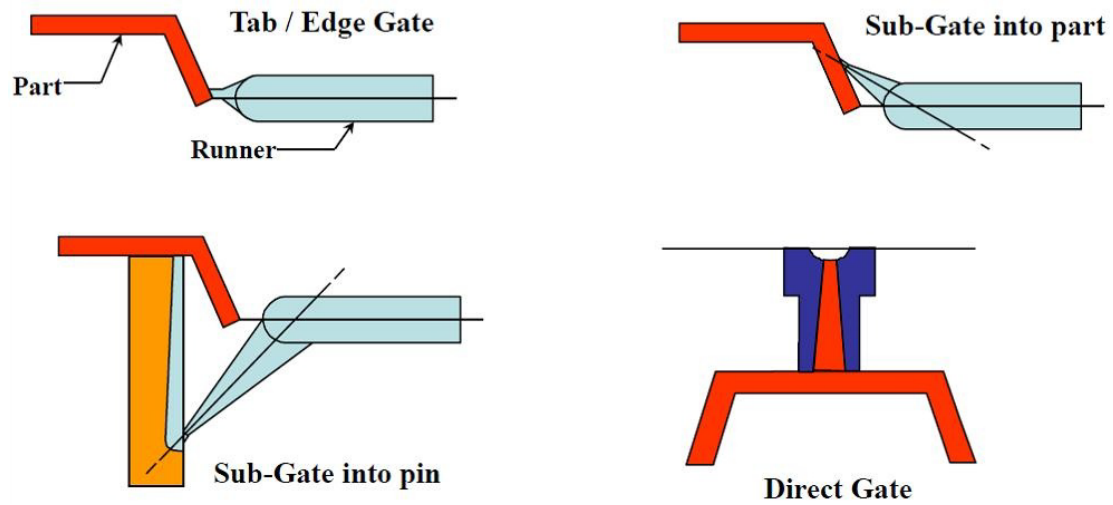
Ακολουθεί ο σχεδιασμός του συστήματος τροφοδοσίας, που έχει σκοπό να παρέχει έναν δίαυλο για τη ροή του τήγματος από το ακροφύσιο της μηχανής έγχυσης μέχρι την κοιλότητα του αντικείμενου. Αποτελείται από το ακροφύσιο ή ψυχρό μπεκ ή μπουκαδούρα (sprue bushing) τα κανάλια παροχής (runners) και την είσοδο στο αντικείμεμο (gate). Σημειώνεται ότι εδώ παρουσιάζονται είδη ψυχρών τροφοδοσιών. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει εδραιωθεί και η χρήση θερμαινόμενων τροφοδοσιών που με τη χρήση αντιστατών, θερμοστοιχείων και πολλαπλών αγωγών επιτυγχάνεται βελτιωμένος έλεγχος της διαδικασίας πλήρωσης, αναβαθμισμένα αισθητικά αποτελέσματα και λιγότερο υλικό φύρας.



Εικόνα 1.14: Κανάλια και είσοδος στο αντικείμεμο

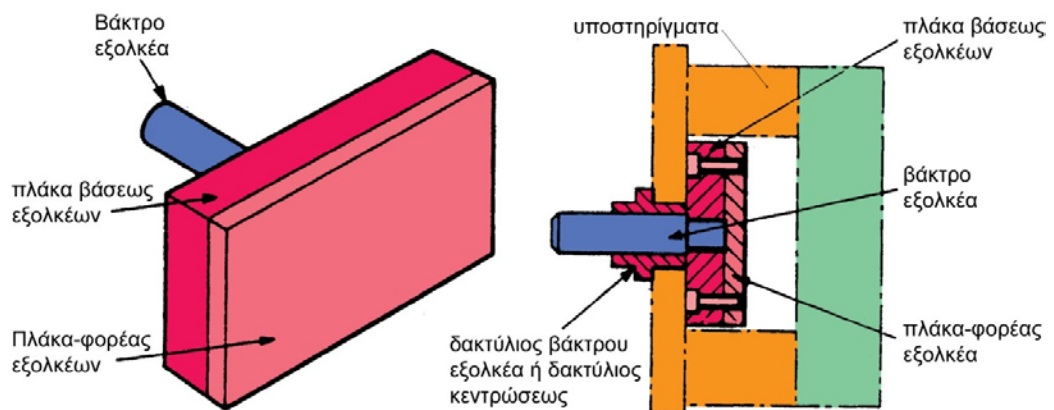


Εικόνα 1.15: Τομή στο μεσοεπίπεδο της κεντρικής τροφοδοσίας- sprue bushing

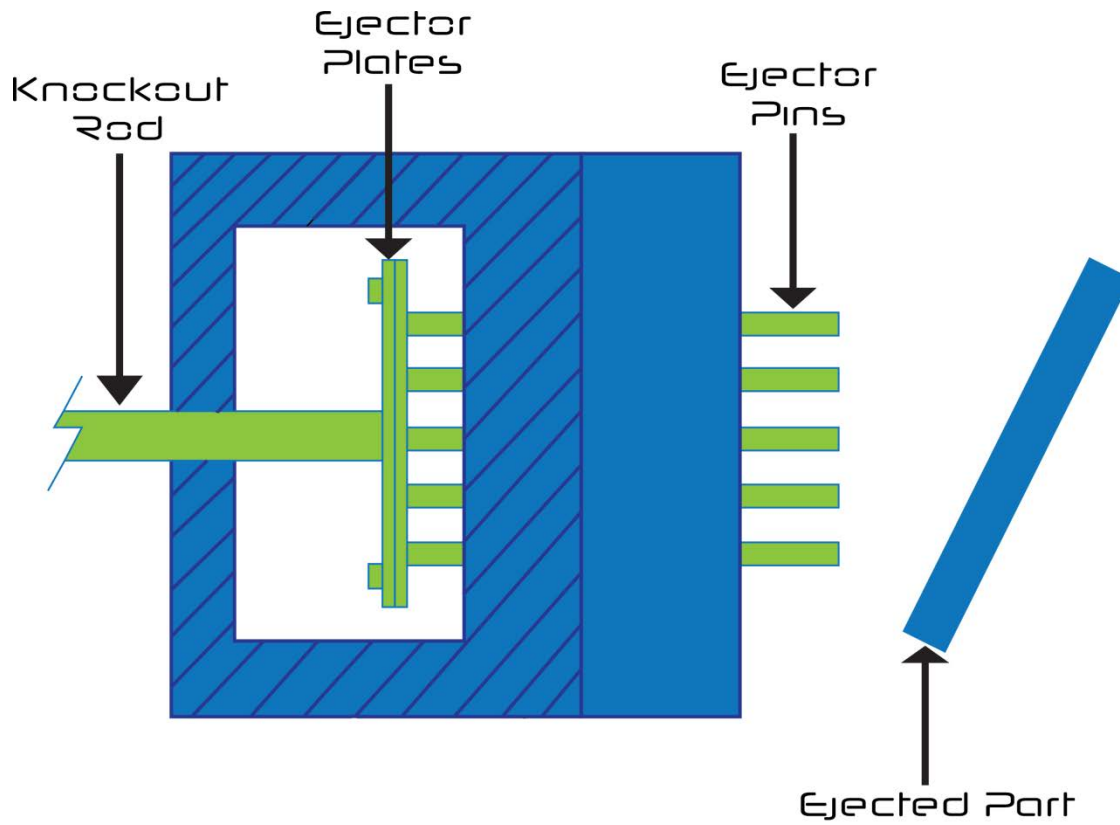


Εικόνα 1.16: Τυπικές μορφές εισόδων του τήγματος στην κοιλότητα του διαμορφώμενου αντικειμένου

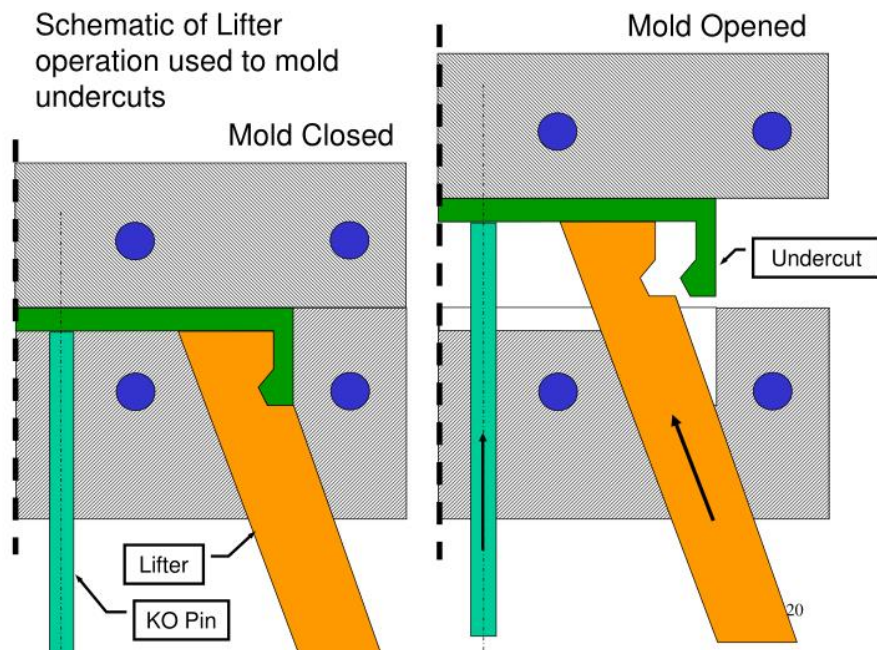
Απαραίτητο στοιχείο σχεδόν όλων των καλουπιών θερμοπλαστικών τύπου Injection είναι το σύστημα εξόλκεσης με το οποίο γίνεται η απομάκρυνση του αντικειμένου από το καλούπι. Παρουσιάζεται σχηματικά ακολούθως:



Εικόνα 1.17 Βασικά εξαρτήματα του μηχανισμού εξόλκεσης



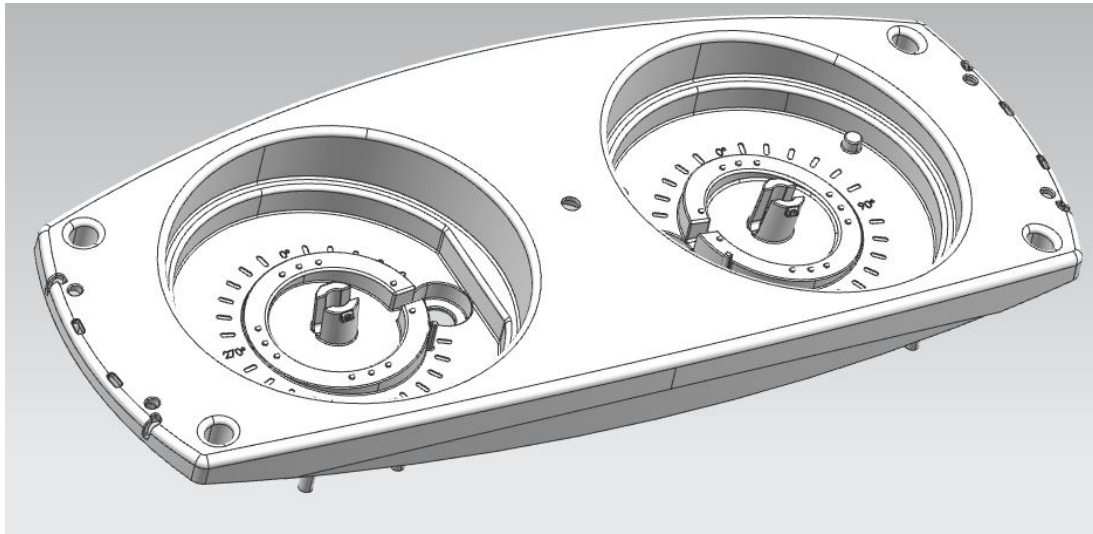
Εικόνα 1.18 Διαδικασία εξόλκευσης



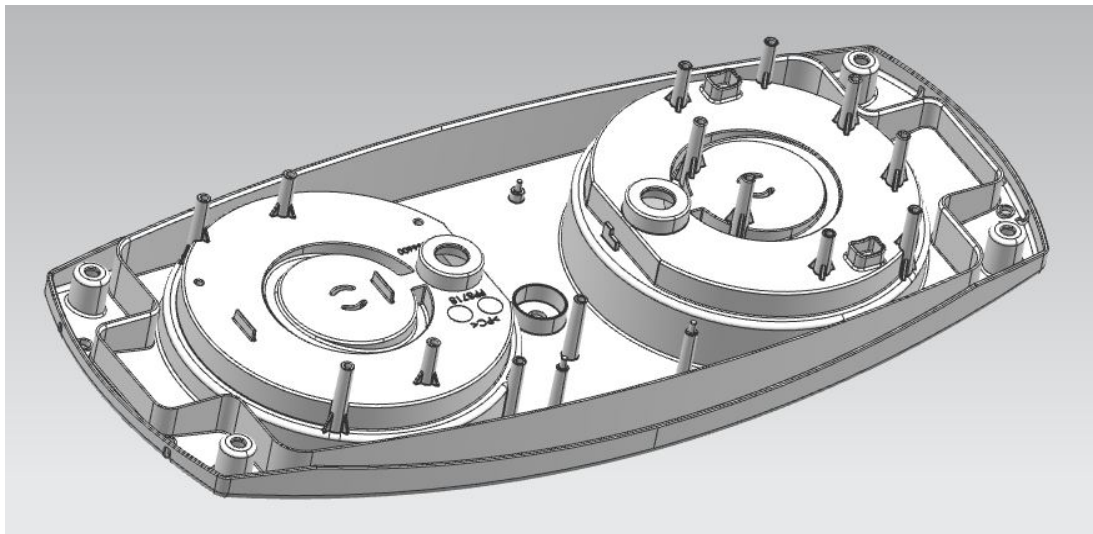
Εικόνα 1.19: Ταυτόχρονη εξόλκευση και απελευθέρωση αρνητικής γεωμετρίας με χρήση συστήματος πλευρικής δράσης τύπου lifter

1.3 Παρουσίαση του τεχνικού ζητήματος

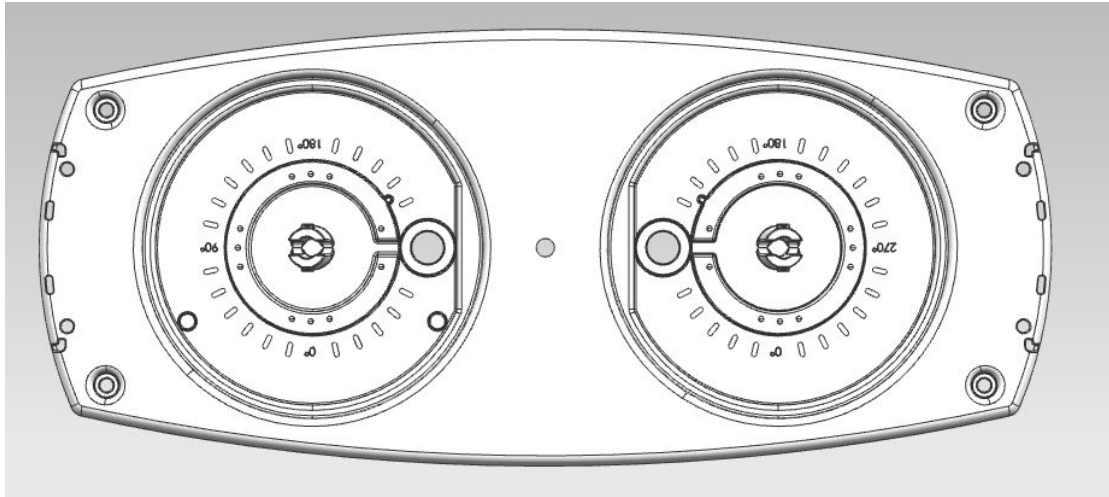
Η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί με το καλούπι ενός συγκεκριμένου θερμοπλαστικού αντικειμένου που αποτελεί υπαρκτό project το οποίο ήρθε σε πέρας στο Μηχανουργείο ΜΟΡΦΗ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΕΠΕ. Θα γίνει ποσοτική διερεύνηση της επίδρασης των γεωμετρικών, λειτουργικών και κατασκευαστικών παραμέτρων στην δημιουργία προεξοχής ή flash κατά μήκος της γραμμής διαχωρισμού. Πρόκειται για το εξής αντικείμενο το οποίο θα αποτελείται από Polycarbonate (PC) χωρίς πρόσθετες υαλώδεις ίνες ενίσχυσης:



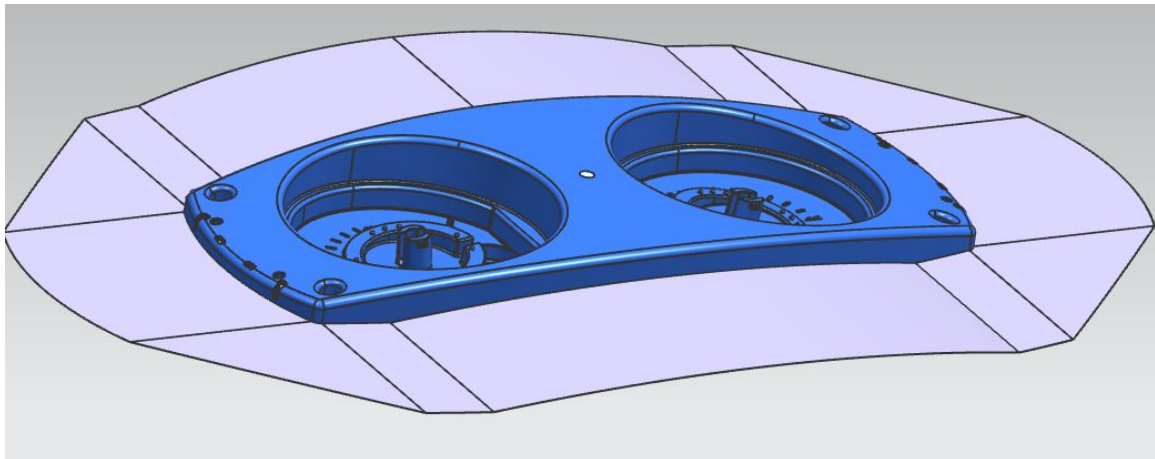
Εικόνα 1.20: Όψη αντικειμένου από την αισθητικά απαιτητική πλευρά



Εικόνα 1.21: Όψη αντικειμένου από την αδιάφορη αισθητικά πλευρά, από την οποία θα γίνει η εξόλκευση προκειμένου να είναι σε αυτήν τα σημάδια βυθίσματος από το χτύπημα των εξολκίων.

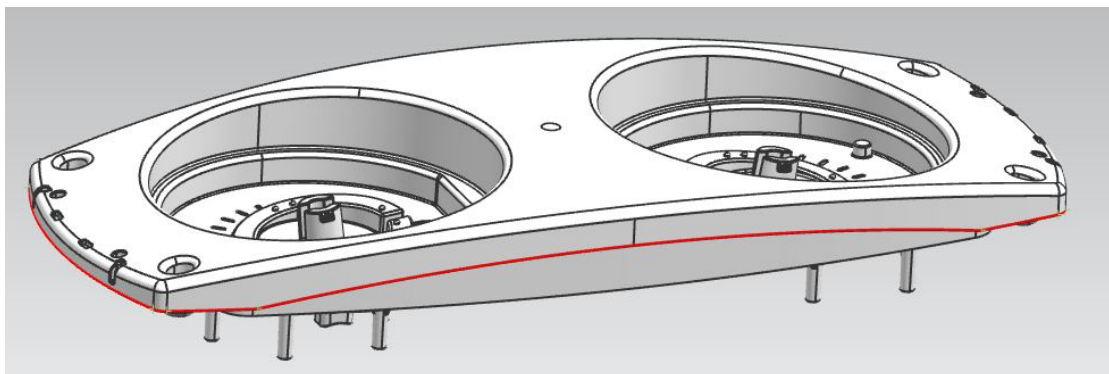


Εικόνα 1.22: Κάτοψη αντικειμένου



Εικόνα 1.23: Επιφάνεια διαχωρισμού

Στην προηγούμενη εικόνα διακρίνεται η επιφάνεια διαχωρισμού ή parting surface όπως αναφέρθηκε, ενώ η τομή της με το αντικείμενο αποτελεί το parting line που φαίνεται στην εικόνα 1.24:



Εικόνα 1.24: Γραμμή διαχωρισμού του υπό μελέτη αντικειμένου

Πάνω σε αυτή τη γραμμή διαχωρισμού θα αναπτυχθεί το flash το οποίο αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η προσέγγιση του προβλήματος θα γίνει σε ενότητες: Γεωμετρικοί/Κινηματικοί παράγοντες, Λειτουργικοί παράγοντες και Κατασκευαστικοί παράγοντες.

Στοιχεία για το αντικείμενο: *Τελικές επιθυμητές διαστάσεις:* 415X169X67 mm

Βάρος αντικειμένου: Περί τα 356 γραμμάρια

Τύπος τροφοδοσίας: Άμεση πάνω στο κομμάτι (Direct Gating)

η οποία θα κόβεται από το αντικείμενο με
το χέρι

Κεφάλαιο 2: Κινηματική Ανάλυση Πλακών Καλουπιού

2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο κινηματικής μελέτης Απαραμόρφωτου Στερεού

Η Κινηματική Ανάλυση ενός μηχανολογικού συναρμολογήματος συνίσταται στην μελέτη της αθροιστικής επίδρασης των διαφόρων διαστασιολογικών και γεωμετρικών ανοχών στη συνολική λειτουργική συμπεριφορά του συναρμολογήματος. Κατά τον

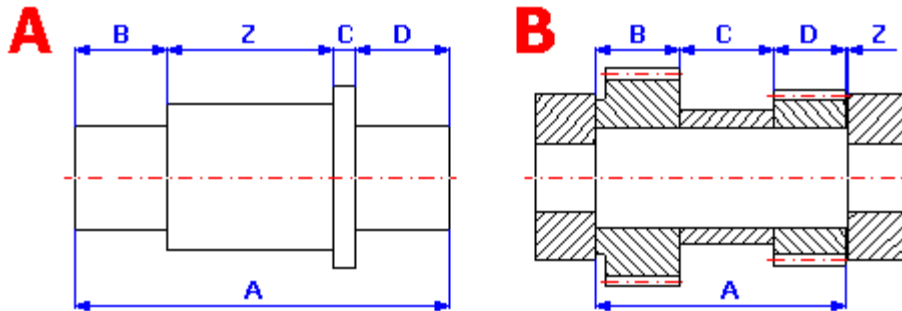
σχεδιασμό οποιουδήποτε μηχανολογικού συνόλου απαιτείται η εκλογή κατάλληλων ανοχών για τη μετάβαση από το ιδεατό πρωτότυπο στο κατασκευάσιμο προϊόν. Καθώς σε κάθε είδος και μορφή κατεργασίας παραγωγής ενός εξαρτήματος υπάρχει η εγγενής έννοια της μεταβλητότητας αναφορικά με τις ονομαστικές διαστάσεις, η εκλογή των κατάλληλων ανοχών αποτελεί την εξισορρόπηση μεταξύ της λειτουργικότητας του συναρμολογήματος και της κατασκευασιμότητάς του. Αν ήταν θεωρητικά δυνατόν να κατασκευαστούν μηχανολογικά εξαρτήματα ακριβώς στις ονομαστικές τους διαστάσεις και σχεδιαστικές προδιαγραφές με απόλυτη επαναληψιμότητα, δεν θα υπήρχε η ανάγκη μελέτης και υπολογισμού ανοχών. Στην πραγματικότητα η όλη έννοια της μεταβλητότητας στην κατασκευαστική υλοποίηση αποτελεί κύρια μεταβλητή κατά τον σχεδιασμό και υπολογισμό, καθοριστική για την εκλογή των διαφόρων μεγεθών. Επιπρόσθετα από την οικονομοτεχνική σκοπιά, η μείωση του εύρους μιας ανοχής αντιστοιχεί σε εκθετική αύξηση του χρόνου και του κόστους της αντίστοιχης κατεργασίας.

Η Ανάλυση Ανοχών (Tolerance Analysis) έχει ως σκοπό τη μελέτη της επίδρασης των διαστασιολογικών και γεωμετρικών ανοχών στην λειτουργική συμπεριφορά του μηχανολογικού συναρμολογήματος. Γενικά επιδιώκεται να προσδιοριστεί η συνδυαστική επίδραση (Stack-Up) που θα έχουν οι πραγματικές διαστάσεις και γεωμετρικές σχέσεις των εξαρτημάτων στην ποσοτική ικανοποίηση των αναγκών για τις όποιες σχεδιάστηκε ο εκάστοτε μηχανισμός/μηχανή/προϊόν. Ακόμη στις υπό μελέτη παραμέτρους υπεισέρχονται και οι διάφορες κινηματικές μεταβλητότητες. Πρόκειται για τις σχέσεις σύνδεσης μεταξύ των εξαρτημάτων ενός συναρμολογήματος (Assembly Mates/Constraints), οι οποίες και καθορίζουν τη μετάδοση των γεωμετρικών και διαστασιολογικών ανοχών δια μέσου των εξαρτημάτων.

Μια βασική κατηγοριοποίηση των τεχνικών Ανάλυσης Ανοχών είναι ως προς τις χωρικές διαστάσεις, δηλαδή τους Βαθμούς Ελευθερίας που αφορούν οι υπό μελέτη διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές και οι κινηματικές σχέσεις. Διακρίνονται σε Μονοδιάστατες (1-Δ), Δισδιάστατες (2-Δ) και Τρισδιάστατες (3-Δ).

Σχετικά με τις Μονοδιάστατες Αναλύσεις, πρόκειται για τεχνικές διερεύνησης της επίδρασης ανοχών κατά έναν Βαθμό Ελευθερίας. Εισάγεται η έννοια της γραμμικής

διαστασιολογικής αλυσίδας ή γραμμικού διαστασιολογικού βρόχου, που είναι ένα σύνολο ανεξάρτητων παράλληλων διαστάσεων ώστε να δημιουργείται ένα γεωμετρικά κλειστό κύκλωμα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1, οι παράλληλες διαστάσεις μπορεί να αφορούν είτε τις θέσεις τεχνικών χαρακτηριστικών σε ένα εξάρτημα (A), είτε τη θέση διαφόρων εξαρτημάτων σε ένα συναρμολόγημα (B).



Σχήμα 2.1: Διαστάσεις κατά μία διεύθυνση

Ένας γραμμικός διαστασιολογικός βρόχος αποτελείται από επιμέρους στοιχεία εισόδου (πχ στο Σχήμα 2.1 οι διαστάσεις A,B,C..) και από κάποιο στοιχείο εξόδου (πχ: Z). Τα στοιχεία εισόδου είναι διαστάσεις με καθορισμένο εύρος ανοχής ενώ το στοιχείο εξόδου είναι το υπό διερεύνηση λειτουργικό αποτέλεσμα, εδώ δηλαδή το εύρος που θα κινηθεί η κατασκευαστική διάσταση ή η παράμετρος συναρμολόγησης (λχ. Ελεύθερη, αμφίβολη ή σφιχτή συναρμογή μεταξύ δύο εξαρτημάτων). Το στοιχείο εξόδου προκύπτει από συνδυασμό των στοιχείων εισόδου, ο οποίος συνδυασμός προκύπτει από την εκάστοτε ακολουθούμενη στρατηγική Ανάλυσης Ανοχών. Από το προαναφερθέν, προκύπτει ότι για το στοιχείο εξόδου, η διάσταση, το επίπεδο και η κλάση ανοχής του είναι συνάρτηση του συνδυασμού των στοιχείων εισόδου δηλαδή συνάρτηση των διαστάσεων και ανοχών αυτών των στοιχείων.

Κατά την 1-Δ Ανάλυση Ανοχών (και για την 2-Δ και για την 3-Δ, όπως θα αναφερθεί παρακάτω) διακρίνονται δύο βασικοί τύποι τεχνικών προβλημάτων ανάλογα με τον καθορισμό της εξαρτώμενης μεταβλητής:

- **Ευθεία Ανάλυση Ανοχών:** Με καθορισμένες τις διαστάσεις εισόδου, τις ανοχές και τα αντίστοιχα εύρη μεταβλητότητας, υπολογίζεται η διάσταση και ανοχή του στοιχείου εξόδου, του τεχνικού αποτελέσματος που ενδιαφέρει δηλαδή. Ουσιαστικά είναι μία διαδικασία αξιολόγησης των επιλεγμένων σχεδιαστικών/κατασκευαστικών παραμέτρων, σχετικά με το κατά πόσο ικανοποιείται τελικά η τεχνική ανάγκη.

- **Αντίστροφη Ανάλυση Ανοχών (Σύνθεση):** Πρόκειται για μέθοδο που σχετίζεται με τη φάση του σχεδιασμού καθώς με τον καθορισμό ενός τελικού στόχου ή/και τεχνικού σκοπού, υπολογίζονται οι ανοχές των επιμέρους σχεδιαστικών παραμέτρων του εξαρτήματος ή στην περίπτωση συναρμολογήματος και οι σχέσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων εξαρτημάτων. Καθορίζεται δηλαδή η απαιτούμενη τεχνική προδιαγραφή ώστε το προϊόν να ικανοποιεί τον λειτουργικό σκοπό και από εκεί προκύπτουν οι επιμέρους μεταβλητές, γενικά με μη-μονοσήμαντο τρόπο λόγω της πεπλεγμένης φύσης του προβλήματος.

Η επιλογή της μεθόδου/στρατηγικής υπολογισμού κατά την Ανάλυση Ανοχών, εν προκειμένω στους 1-Δ διαστασιολογικούς γραμμικούς βρόχους, έχει άμεσο αντίκτυπο στα επιδιωκόμενα κατασκευαστικά εύρη και στην δυνατότητα εναλλαγής/αντικατάστασης των εξαρτημάτων κάποιου συναρμολογήματος (interchangeability). Αυτό σημαίνει ότι σε σημαντικό βαθμό υπογραμμίζεται η πορεία κατασκευής από πλευράς ειδών κατεργασίας και η περιοχή στην οποία θα κινηθεί το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος, αφού πρόκειται για ευθείες συναρτήσεις των επιδιωκόμενων κλάσεων ανοχής και του επιπέδου επαναληψιμότητας των διαστάσεων/ανοχών.

Διακρίνονται οι εξής γενικές κατηγορίες υπολογιστικών μεθόδων:

- **Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού**
- **Στατιστικές μέθοδοι υπολογισμού**
- **Μέθοδος ομαδοποιημένης εναλλαξιμότητας ή επιλεκτικής συναρμολόγησης**

Η απλούστερη και συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η **Μέθοδος Χειρότερης Περίπτωσης (Worst Case-WC)** γνωστή και ως μέθοδος μέγιστων και ελάχιστων τιμών. Η υλοποίησή της συνίσταται στη μελέτη των διαστασιολογικών ανοχών στις ακραίες τιμές που επιτρέπει το καθορισμένο εύρος τους. Ως μέθοδος εγγυάται απόλυτη επαναληψιμότητα συναρμολόγησης και εναλλαξιμότητα εξαρτημάτων, αφού εκ των πραγμάτων διασφαλίζει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά στον δυσμενέστερο συνδυασμό τιμών των ανοχών που μπορεί να προκύψει. Όμως στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές δυσχεραίνει την κατασκευασσιμότητα και αυξάνει το κόστος κατά πολύ καθώς για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου λειτουργικού αποτελέσματος, θα πρέπει οι επιμέρους ανοχές των διαστάσεων των στοιχείων εισόδου να καθοριστούν σε ιδιαίτερα στενά εύρη, ακόμη και αν το ζητούμενο λειτουργικό αποτέλεσμα δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητικό από πλευράς τεχνικών προδιαγραφών. Συμπερασματικά η Μέθοδος Χειρότερης Περίπτωσης έχει πρακτική χρησιμότητα μόνο σε διαστασιολογικούς βρόχους με μικρό αριθμό στοιχείων ή σε εφαρμογές όπου το λειτουργικό αποτέλεσμα δεν εμπεριέχει ιδιαίτερες τεχνικές προκλήσεις. Επίσης εφαρμόζεται είτε σε παραγωγή ολιγάριθμων τεμαχίων είτε σε κατασκευή πρωτοτύπων.

Η μεθοδολογία της WC μεθόδου είναι ο υπολογισμός της προκύπτουσας ανοχής μέσω της άθροισης όλων των επιμέρους ανοχών των στοιχείων εισόδου. Η τελική διάσταση εκφράζεται από την μέση αριθμητική τιμή:

$$\mu = \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i - \sum_{i=k}^n \mu_i \quad (1)$$

Η τιμή της ανοχής για την παραπάνω υπολογισθείσα διάσταση είναι:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (2)$$

Για τις ακρότατες τιμές του εύρους της ανοχής ισχύει:

$$Z_{\min} = \mu - \frac{T}{2} \quad Z_{\max} = \mu + \frac{T}{2} \quad (3)$$

Όπου:

μ_i : Μέση διάσταση του i -οστού στοιχείου του διαστασιολογικού βρόχου

T_i : Ανοχή i -οστού στοιχείου

n : Αριθμός στοιχείων εισόδου διαστασιολογικού βρόχου

$i=1, \dots, k-1$: Στοιχεία του διαστασιολογικού βρόχου με τέτοια κατεύθυνση ώστε να συμμετέχουν αυξητικά στον υπολογισμό της εξόδου

$i=k, \dots, n$: Στοιχεία του διαστασιολογικού βρόχου με τέτοια κατεύθυνση ώστε να συμμετέχουν μειωτικά στον υπολογισμό της εξόδου

Οι Στατιστικές Μέθοδοι βασίζονται στην Θεωρία των Πιθανοτήτων. Η βασική υπόθεση έγκειται στο ότι σε μία τυχαία διαλογή διαστασιολογικών στοιχείων κάποιου εξαρτήματος ή ενός συνόλου εξαρτημάτων, οι πιθανότητες αυτά να παίρνουν ταυτόχρονα τις ακραίες τιμές τους είναι μικρές. Μάλιστα με ένα προκαθορισμένο ποσοστό απορριπτόμενων εξαρτημάτων (scrap/rejection rate), οι ανοχές των επιμέρους στοιχείων της

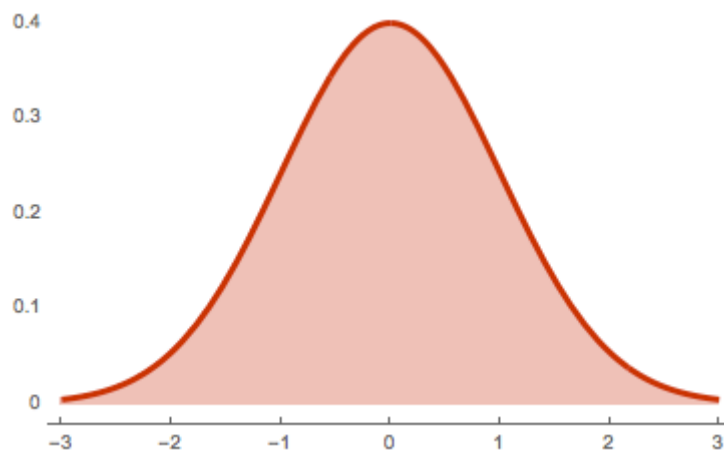
διαστασιολογικής αλυσίδας μπορούν να αυξηθούν στο εύρος τους, διευκολύνοντας την κατασκευή και μειώνοντας το κόστος. Γενικά σε ένα ορθά υπολογισμένο σενάριο ευρείας παραγωγής τα οφέλη από τη διεύρυνση των κατασκευαστικών ανοχών υπερκεράζουν το κόστος των ποιοτικά απορριπτόμενων τεμαχίων (Μη απόλυτη εναλλαξιμότητα εξαρτημάτων/ incomplete assembly interchangeability of components).

Οι διαστάσεις ενός εξαρτήματος υπό καθορισμένες συνθήκες κατασκευής/παραγωγής παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένη μεταβλητότητα γύρω από την μέση τιμή του πεδίου ανοχής. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κατανομή αυτή περιγράφεται μαθηματικά από την **Κανονική Κατανομή ή Κατανομή Gauss**. Η Κανονική Κατανομή αποτελεί σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (το άθροισμα ενός ικανοποιητικά μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων και ισόνομων τυχαίων μεταβλητών προσεγγίζεται από την κανονική κατανομή) τη βάση της στατιστικής συμπερασματολογίας ή επαγωγικής στατιστικής.

Η γραφική παράσταση της σχετιζόμενης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας έχει σχήμα "καμπάνας", και είναι γνωστή ως Γκαουσιανή συνάρτηση ή κωδωνοειδής καμπύλη:

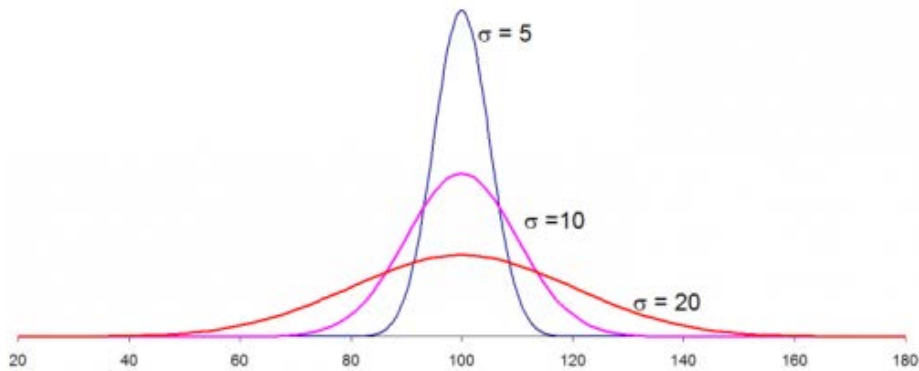
$$f(x | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

όπου μ η μέση τιμή και σ η τυπική απόκλιση.



Σχήμα 2.2: Κανονική κατανομή με $\mu=0$ και $\sigma^2=1$

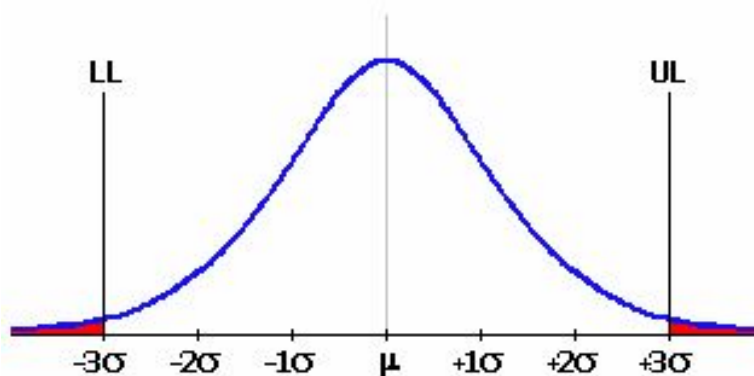
Η μέση τιμή ουσιαστικά καθορίζει την τιμή της διάστασης που εμφανίζεται συχνότερα στο δείγμα ενώ η τυπική απόκλιση την μορφολογία της καμπύλης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 2.3: Επίδραση τυπικής απόκλισης στην μορφή της καμπάνας

Η περιοχή της τομής κάτω από την καμπύλη Gauss με τα άκρα της καθορισμένης ανοχής (άνω-κάτω όρια) αποτελεί το προσδοκώμενο αποτέλεσμα της κατασκευής ενώ εκτός των ορίων έχουμε τα απορριπτόμενα εξαρτήματα.

Στις εφαρμογές μηχανικού, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η λεγόμενη 6-Sigma ή 6σ ανάλυση. Η κατανομή δηλαδή κάποιας διάστασης βρίσκεται σε ένα εύρος 6 τυπικών αποκλίσεων σ από τη μέση τιμή, το άνω όριο και το κάτω σε απόσταση 3σ από τη μέση τιμή. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη Gauss μεταξύ των δύο ορίων αντιπροσωπεύει το 99,73% της συνολικής περιοχής μέσα στην οποία δύναται να πάρει τιμές η εκάστοτε υπό διερεύνηση διάσταση. Το υπολειπόμενο 0,27% αντιπροσωπεύει τα εξαρτήματα που απορρίπτονται. Σε σύγχρονες παραγωγικές διαδικασίες τα προηγούμενα έχουν αναθεωρηθεί σε παραγωγικές διαδικασίες υψηλής τεχνολογίας και η ονομασία “6-Sigma” μπορεί να αναφέρεται σε πιο αυστηρές μεθόδους ελέγχου παραγωγής όπως θα περιγραφεί παρακάτω.



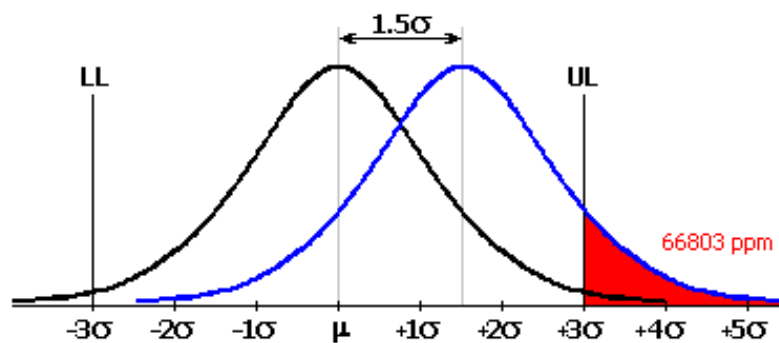
Σχήμα 2.4: Καμπύλη Gauss οριοθετημένη στο $\pm 3\sigma$

Ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδος στατιστικής φύσεως είναι αυτή του **Αθροίσματος Τετραγώνων Υπολοίπων (Residual Sum of Squares-RSS)**. Βάση της μεθόδου αποτελεί η

παραδοχή ότι οι διαστασιολογικές συνιστώσες των εξαρτημάτων κατασκευάζονται με την Ικανότητα της Διαδικασίας (Process capability) στο επίπεδο ποιότητας 3σ.

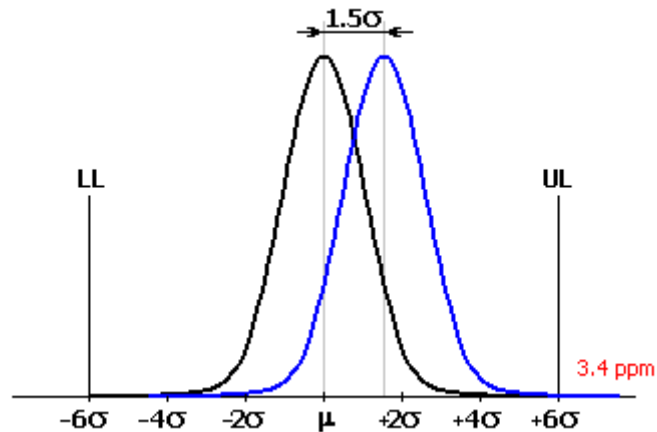
Καθότι οι έννοιες και τεχνικές που σχετίζονται με τον κλάδο του **Στατιστικού Ελέγχου Διαδικασιών/Διεργασιών (Statistical Process Control)** και τους διάφορους δείκτες Ικανότητας των Διαδικασιών αποτελούν βάση των στατιστικών μεθόδων, προτού αναλυθεί η μέθοδος RSS και οι λοιπές στατιστικές μέθοδοι θα γίνει μία συνοπτική παράθεση των βασικών αρχών τους.

Όπως αναφέρθηκε, γενικά στον έλεγχο ποιότητας των κατεργασιών, θεωρούνταν ικανοποιητική η εξασφάλιση επιπέδου ποιότητας $\pm 3\sigma$. Αυτό μεταφράζεται σε περίπου 2700 απορριπτόμενα προϊόντα ανά εκατομμύριο παραγωγής. Πρόκειται για ένα μέγεθος που δεν είναι αποδεκτό σε όλες τις περιπτώσεις παραγωγής, ιδιαίτερα σε παραγωγές εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας. Επιπρόσθετα όταν υπεισέρχονται πραγματικές κατασκευαστικές μεταβλητές στο περιβάλλον παραγωγής λ.χ. φθορά κοπτικών και διαμορφωτικών εργαλείων και αντικατάστασή τους, σφάλματα αλλαγής από φάση σε φάση κατεργασίας, φθορά ιδιοσυσκευών και καλιμπρών, διακύμανση θερμοκρασίας περιβάλλοντος, τότε είναι πρακτικά αδύνατον να κρατηθεί η μέση τιμή κάποιας κατεργαζόμενης διάστασης ακριβώς στο μέσο του εύρους της καθορισμένης ανοχής. Μία τυπική μετατόπιση σε μεγάλες παραγωγές λόγω των προαναφερθέντων είναι της τάξης του 1,5σ. Μία τέτοια μετατόπιση σε μία κλασική προσέγγιση ποιότητας $\pm 3\sigma$ θα σήμαινε 67000 ppm απορριπτόμενα τεμάχια, ένα μέγεθος που δεν μπορεί να γίνει αποδεκτό σε καμία παραγωγική διαδικασία.



Σχήμα 2.5: Μετατόπιση κατανομής παραγωγής λόγω κατασκευαστικών παραγόντων

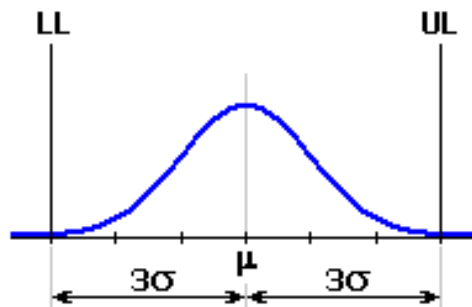
Έτσι η σύγχρονη προσέγγιση “6 Sigma” μπορεί να αναφέρεται σε διασφάλιση ποιότητας επιπέδου 6σ αμφίπλευρα του μέσου της ανοχής της ονομαστικής διάστασης. Σε μία τόσο αποδοτική κατασκευαστική διαδικασία, περιλαμβανομένης και της μετατόπισης κατά 1,5σ, είναι δυνατό να επιτευχθεί απόρριψη μόλις 3,4ppm.



Σχήμα 2.6 Σύγκριση 6σ Ανάλυση

Η μέθοδος 6-Sigma είναι σχετικά πρόσφατα ανεπτυγμένη μέθοδος που εδραιώθηκε μεταξύ 1980 και 1990 από τη Motorola. Βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλες ποσοτικά παραγωγές που ταυτόχρονα απαιτούν διατήρηση υψηλής ποιότητας κατασκευής. Πρόκειται για επέκταση της μεθόδου RSS με την προσθήκη δεικτών απόδοσης των διεργασιών.

Η κλασική μέθοδος RSS όπως αναφέρθηκε βασίζεται στην υπόθεση παραγωγής των στοιχείων της διαστασιολογικής αλυσίδας σε επίπεδο ποιότητας $\pm 3\sigma$ από τη μέση τιμή της ανοχής.



Σχήμα 2.7: Κατανομή κατασκευαστικών παραμέτρων με υπόθεση $\pm 3\sigma$

Οι οριακές τιμές που λαμβάνει η κατανομή εκατέρωθεν της μέσης τιμής της ανοχής είναι το άνω και κάτω όριο της ανοχής αντίστοιχα, δηλαδή έχουμε $\mu \pm 3\sigma$. Η τυπική απόκλιση κάθε στοιχείου εισόδου ορίζεται ως $\sigma_i = \frac{T_i}{6}$.

Η μέση τιμή της διάστασης εξόδου του διαστασιολογικού βρόχου καθορίζεται αθροιστικά:

$$\mu = \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i - \sum_{i=k}^n \mu_i \quad (5)$$

Ενώ η τυπική απόκλιση της εξόδου:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (6)$$

Όπου:

μ_i : Μέση διάσταση του i -οστού στοιχείου του διαστασιολογικού βρόχου

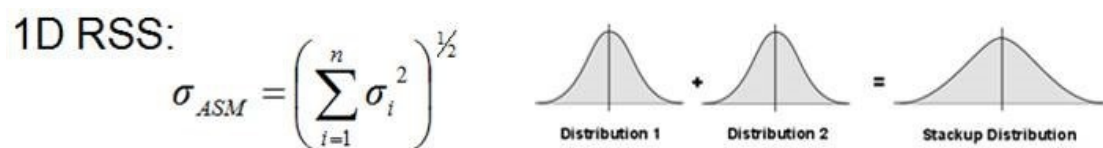
σ_i : Τυπική απόκλιση του i -οστού στοιχείου του διαστασιολογικού βρόχου

T_i : Ανοχή i -οστού στοιχείου

n : Αριθμός στοιχείων εισόδου διαστασιολογικού βρόχου

$i=1, \dots, k-1$: Στοιχεία του διαστασιολογικού βρόχου με τέτοια κατεύθυνση ώστε να συμμετέχουν αυξητικά στον υπολογισμό της εξόδου

$i=k, \dots, n$: Στοιχεία του διαστασιολογικού βρόχου με τέτοια κατεύθυνση ώστε να συμμετέχουν μειωτικά στον υπολογισμό της εξόδου



Σχήμα 2.8: Ποιοτική απεικόνιση 1-Δ μεθόδου RSS

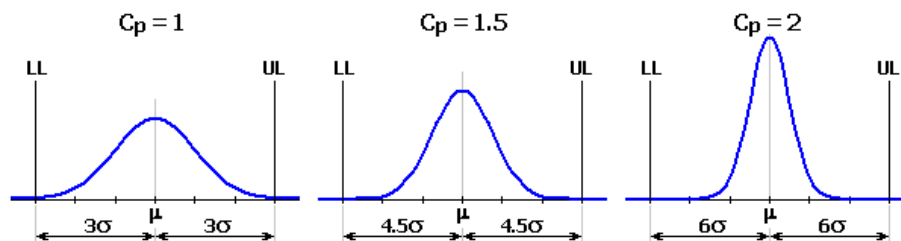
Η αναθεωρημένη προσέγγιση 6σ εισάγει όπως αναφέρθηκε συντελεστές με τους οποίους γίνεται αξιολόγηση της ποιοτικής απόδοσης μίας διεργασίας. Ως διεργασία (Process) ορίζεται ένας ορισμένος συνδυασμός εργαλείων, υλικών, μεθόδων, μηχανών και ανθρώπων που παράγει κάποιο μετρήσιμο αποτέλεσμα, για παράδειγμα μία γραμμή παραγωγής για κάποιο εξάρτημα. Οι διεργασίες αυτές υπάγονται σε κάποια στατιστική μεταβλητότητα που δύναται να αναλυθεί με στατιστικές μεθόδους.

Δύο στοιχειώδεις παράμετροι είναι οι δείκτες ικανότητας διεργασίας C_p και C_{pk} . Ο Δείκτης Ικανότητας C_p αξιολογεί την ποιότητα της διεργασίας κατασκευής συγκρίνοντας το εύρος της ανοχής με το παραδοσιακό εύρος 6σ:

$$C_p = \frac{UL - LL}{6\sigma} \quad (7)$$

Όπου UL και LL το άνω και κάτω όριο της ανοχής.

Έτσι η κλασική προσέγγιση 6σ έχει $C_p=1$ ενώ η σύγχρονη με εύρος $\pm 6\sigma$ έχει $C_p=2$.

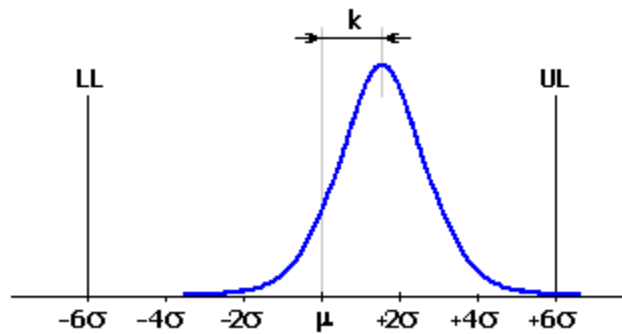


Σχήμα 2.9 Επίδραση ποιότητας στο δείκτη C_p

Ο δείκτης C_{pk} αποτελεί τροποποιημένη μορφή του C_p ώστε να λαμβάνεται υπόψη η μετατόπιση της κατανομής λόγω των λειτουργικών παραγόντων που προαναφέρθηκαν:

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{UL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LL}{3\sigma} \right\} = (1 - k) C_p \quad (8)$$

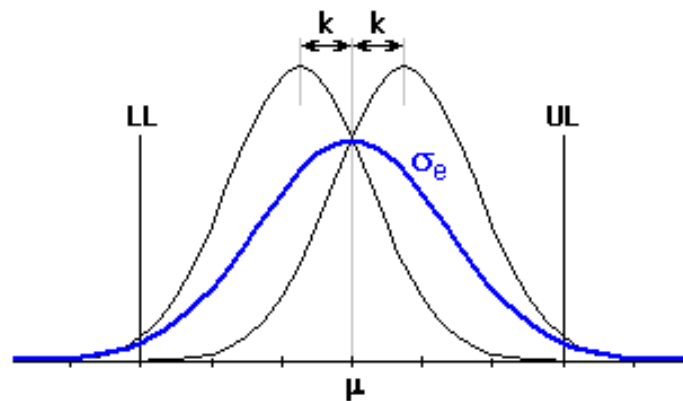
Η παράμετρος k (παράμετρος μέσης μετατόπισης) μπορεί να λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 και καθορίζει τη σχετική τιμή της μετατόπισης της κατανομής ως προς το μισό του εύρους ανοχής. Για τον εμπειρικό κανόνα μετατόπισης κατά 1,5σ, η παράμετρος k λαμβάνει τιμές για 6-Sigma ποιότητα $k=0,25$ και ακολούθως $C_{pk}=1,5$.



Σχήμα 2.10 Παράμετρος μέσης μετατόπισης k

Η ισοδύναμη τυπική απόκλιση σ_e της διαδικασίας υπολογίζεται ως:

$$\sigma_e = \frac{T}{6C_{pk}} \quad (9)$$



Σχήμα 2.11: Ισοδύναμη κατανομή διεργασίας μετά απο αναγωγή με την σ_e

Εφαρμόζοντας τους δείκτες ικανότητας σε κάθε επιμέρους i-οστό διαστασιολογικό στοιχείο, προκύπτει όπως και στη μέθοδο RSS η διάσταση εξόδου με μέση τιμή μ και τυπική

απόκλιση: $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{ei}^2}$, όπου σ_{ei} οι επιμέρους ισοδύναμες τυπικές αποκλίσεις κάθε i-οστού στοιχείου.

Υπάρχουν και άλλα σημαντικά μεγέθη που απαρτίζουν τη Θεωρία Ελέγχου των Διεργασιών. Τέτοια είναι για παράδειγμα τα C_m και C_{mk} τα οποία περιγράφουν τη λεγόμενη ικανότητα μηχανής. Ο δείκτης C_m περιγράφει την αναλογία της επαναληψιμότητας μίας διάστασης που παράγει η μηχανή σε μία συγκεκριμένη κατεργασία προς το εύρος της ανοχής. Παρόμοια με τους συντελεστές των διεργασιών, ο δείκτης C_{mk} διορθώνει τον C_m

λαμβάνοντας υπόψη τη σταδιακή μετατόπιση της κατανομής λόγω λειτουργικών παραγόντων, όπως π.χ. φθορά εργαλείου και αντικατάσταση του.

Ουσιαστικά η ικανότητα μηχανής είναι επιμέρους στοιχείο των δεικτών ικανότητας της διεργασίας. Άλλοι παράγοντες για τους οποίους υπάρχουν αντίστοιχοι δείκτες και επηρεάζουν την ικανότητα της διεργασίας είναι ο παράγοντας του χειριστή της μηχανής, των μετρητικών οργάνων, του κατεργαζόμενου υλικού, του περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία, διακύμανση ηλεκτρικής τάσης), της ακολουθούμενης στρατηγικής με την οποία γίνεται η κατεργασία και μορφοποίηση του εξαρτήματος.

Στα πλαίσια της 1-Δ Ανάλυσης Ανοχών, η **Μέθοδος Επιλεκτικής Συναρμολόγησης**, γνωστή ως **Group Interchangeability Method** ή **Selective Assembly** εφαρμόζεται σε καταστάσεις εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας που όμως δεν χρειάζεται να έχουν απόλυτη εναλλαξιμότητα μεταξύ ιδίων εξαρτημάτων σε ένα συναρμολόγημα. Τα εξαρτήματα ομαδοποιούνται σε διαστασιολογικά σερ με βάση τις διαστάσεις που είναι κρίσιμες για τη λειτουργία του συναρμολογήματος. Αυτό επιτρέπει αρχικά τον καθορισμό ευρύτερων κατασκευαστικών ανοχών στις διαστάσεις ομαδοποίησης. Μετά το πέρας της κατασκευής και την ομαδοποίηση των εξαρτημάτων, δημιουργούνται υποσύνολα συναρμολόγησης, δηλαδή με αφετηρία τον λειτουργικό στόχο γίνεται διαλογή από τα ομαδοποιημένα εξαρτήματα και ταιριάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται τελικά η απαιτητική ανοχή του στοιχείου εξόδου. Ουσιαστικά ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία με την Μέθοδο Χειρότερης Περίπτωσης, με τη διαφορά ότι δεν εφαρμόζεται σε όλες τις επιμέρους ανοχές των στοιχείων εισόδου, αλλά αφορά αυστηροποιημένες επιμέρους ανοχές προσαρμοσμένες για κάθε σχηματισμένο υποσύνολο.

Η Μέθοδος Επιλεκτικής Συναρμολόγησης αποτελεί μία ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδο επίλυσης διαστασιολογικών βρόχων, η οποία επιτρέπει την «χαλάρωση» του εύρους των ανοχών με θετικό αντίκτυπο στη μείωση του κατασκευαστικού κόστους και δυσκολίας. Αρνητικά σημεία της προσέγγισης είναι η μετάθεση των απαιτήσεων στο επίπεδο της συναρμολόγησης πλέον η οποία γίνεται πολλές φορές επίπονη καθώς εμπεριέχει την διαλογή των εξαρτημάτων άρα και αντίστοιχες διαδικασίες μέτρησης και διακρίβωσης. Επίσης όταν απαιτηθεί αντικατάσταση κάποιου εξαρτήματος λόγω φθοράς ή βλάβης, συνήθως συνεπάγεται αντικατάσταση πολλών εξαρτημάτων ώστε να επιτευχθεί το λειτουργικό μέγεθος ή ακόμα και ενός ολόκληρου υποσυναρμολογήματος. Τα προηγούμενα δείχνουν την πιθανή αύξηση του λειτουργικού κόστους μίας μηχανής/συσσκευής που κατά τον σχεδιασμό της παραγωγής της χρησιμοποιήθηκε η παρουσιαζόμενη μέθοδος.

Προκειμένου να γίνει η επιλεκτική συναρμολόγηση συστηματικά αποδοτική, πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης της επιλογής των προς συναρμολόγηση συνδυασμών εξαρτημάτων. Τα διάφορα εξαρτήματα πρέπει να ομαδοποιηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των αποδεκτά λειτουργικών συναρμολογημάτων από ένα δεδομένο αριθμό ήδη κατασκευασμένων εξαρτημάτων. Το πρόβλημα αυτό χωρίζεται σε δύο τεχνικά σκέλη:

Σχεδιαστικό σκέλος του προβλήματος: Εύρεση όλων των ικανών συνδυασμών για τους οποίους η λειτουργική απαίτηση του στοιχείου εξόδου ικανοποιείται. Το συγκεκριμένο σκέλος υλοποιείται προτού ξεκινήσει η φάση της κατασκευής/παραγωγής, συγκεκριμένα κατά τη μελέτη των διαστασιολογικών βρόχων. Ο αριθμός των ικανών συνδυασμών εξαρτάται από τις προσδιόμενες κατασκευαστικές ανοχές κάθε στοιχείου εισόδου. Ο σχεδιασμός κάθε διαστασιολογικού βρόχου πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να επιτυγχάνεται ένας λογικός αριθμός συνδυασμών εξαρτημάτων. Ως λογικός νοείται ένας αριθμός αρκετός ώστε να μην μένουν αχρησιμοποίητα εξαρτήματα ήδη από τη φάση του σχεδιασμού λόγω μη πλήρωσης όλων των υποσυνόλων (απαράδεκτο για λόγους κόστους και παραγωγικότητας) και από την άλλη όχι υπερβολικά μεγάλος που να καταδεικνύει έναν αυθαίρετο ή χονδρικό σχεδιασμό/υπολογισμό των διαστασιολογικών βρόχων.

Σκέλος υλοποίησης της συναρμολόγησης: Πρόκειται για την μεγιστοποίηση του αριθμού των πλήρως συναρμολογούμενων προϊόντων με δεδομένο αριθμό ήδη κατασκευασμένων εξαρτημάτων και ήδη ομαδοποιημένων σε διαστασιολογικά σετ. Αυτό το σκέλος αντιμετωπίζεται αρκετές φορές κατά το στάδιο της παραγωγής ακριβώς πριν ξεκινήσει η εφαρμογή/συναρμολόγηση. Σκοπός είναι να καθοριστεί η βέλτιστη διαδικασία συναρμολόγησης ώστε να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των ολοκληρωμένων συναρμολογημάτων. Το πρόβλημα επιλύεται επιλέγοντας τον βέλτιστο συνδυασμό από τους ήδη ορισμένους συνδυασμούς εξαρτημάτων κατά τη φάση του σχεδιασμού αξιολογώντας ταυτόχρονα τον αριθμό των ολοκληρωμένων προϊόντων που επιτυγχάνει ο κάθε συνδυασμός. Τυπικά χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης οι οποίοι, αρχικά υπολογίζοντας τον μέγιστο και ελάχιστο αριθμό ολοκληρωμένων συναρμολογημάτων για τους διάφορους συνδυασμούς και στη συνέχεια αφαιρώντας σταδιακά και με κάποιο καθορισμένο μοτίβο εξαρτήματα από τα υποσύνολα συναρμολόγησης, κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο μέγιστος εκτιμώμενος αριθμός ολοκληρωμένων προϊόντων να μειώνεται με το μικρότερο δυνατό ρυθμό και ο ελάχιστος να αυξάνεται με τον μέγιστο ρυθμό. Κατά μία έννοια δηλαδή είναι μία ανάλυση ευαισθησίας με είσοδο των αριθμό εξαρτημάτων των υποσυνόλων συναρμολόγησης και έξοδο τον αριθμό ολοκληρωμένων τελικών συναρμολογημάτων. Η λύση συνήθως σε τέτοια προβλήματα δεν είναι μοναδική καθώς με διαφορετικούς συνδυασμούς μπορεί να επιτυγχάνεται ο ίδιος αριθμός ολοκληρωμένων συνόλων. Για το λόγο αυτό και με σκοπό την περαιτέρω μείωση του κόστους κατασκευής (απλοποίηση και επιτάχυνση μονταρίσματος) προστίθεται ως κριτήριο βελτιστοποίησης και ο αριθμός των συνδυασμών εξαρτημάτων κάθε σεναρίου συναρμολόγησης, με προφανή στόχο την ελαχιστοποίησή του.

Η γενίκευση των προαναφερθέντων εννοιών και διαδικασιών της Ανάλυσης Ανοχών οδηγεί στην **Δισδιάστατη (2-Δ)** και **Τρισδιάστατη (3-Δ)** Ανάλυση Ανοχών. Θα παρουσιαστεί η επέκταση της μεθόδου **Χειρότερης Περίπτωσης**, η μέθοδος **Ευθείας Γραμμικοποίησης** και η μέθοδος **Monte Carlo**.

Πρέπει αρχικά να επεκταθεί η έννοια του διαστασιολογικού βρόχου σε στοιχεία άνω της μίας διάστασης. Οι γραμμικοί διαστασιολογικοί βρόχοι που παρουσιάστηκαν ήδη αφορούσαν μόνο παράλληλα διαστασιολογικά στοιχεία σε μία διάσταση. Ως διαστασιολογικοί γράφοι δύο διαστάσεων (2-Δ) ορίζονται τα κλειστά σύνολα διαστάσεων που βρίσκονται πάνω σε ένα ή περισσότερα παράλληλα επίπεδα. Οι διαστάσεις του βρόχου μπορεί να είναι είτε άμεσα καθορισμένες διαστάσεις με ανοχές και εύρη από το κατασκευαστικό σχέδιο, είτε να έχουν προκύψει στη μορφή διάστασης και ανοχής μέσω της ερμηνείας/συνδυασμού γεωμετρικών ανοχών του σχεδίου. Παρομοίως για τους διαστασιολογικούς βρόχους τριών διαστάσεων (3-Δ), πρόκειται για σύνολα διαστάσεων και ανοχών που βρίσκονται επάνω σε παράλληλα και μη επίπεδα.

Ότι αναφέρθηκε παραπάνω για τους μονοδιάστατους διαστασιολογικούς βρόχους έχει ισχύ και στις περιπτώσεις 2-Δ και 3-Δ ανάλυσης. Για τη μέθοδο της **Χειρότερης Περίπτωσης (Worst Case Method)**, συμπληρωματικά με τα δεδομένα της 1-Δ ανάλυσης, λόγω της συνθετότερης φύσης που εισάγουν τα πολυδιάστατα διαστασιολογικά προβλήματα η μέθοδος υλοποιείται με έναν πιο συστηματικό τρόπο. Αρχικά δημιουργούνται σύνολα ακραίων τιμών των διαστάσεων με βάση τις αντίστοιχες καθορισμένες ανοχές. Στις περιπτώσεις όπου έχουμε γεωμετρικά ορισμένες ανοχές, αυτές μετατρέπονται μέσω κατάλληλης ερμηνείας σε εύρη διαστάσεων. Αναφορικά με τις διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές, η χρήση, υλοποίηση και ερμηνεία τους για όλες τις μεθόδους που παρατέθηκαν και θα παρατεθούν, ακολουθεί το πρότυπο Y14.5-2009 κατά ASME, του οποίου κάποιες βασικές αναφορές γίνονται και στο παράρτημα της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια οι διάφοροι συνδυασμοί διαστάσεων δοκιμάζονται αλγοριθμικά και τα αποτελέσματα στο/στα στοιχεία εξόδου αξιολογούνται, επιλέγοντας τελικά τους συνδυασμούς που απέδωσαν τα πιο ακραία αποτελέσματα αμφιπλεύρως. Από την υπολογιστική σκοπιά, ο χρόνος εξαρτάται από τους υπολογιστικούς κύκλους που πρέπει να γίνουν για να δοκιμαστούν όλα τα σετ δυνατών συνδυασμών. Ο αριθμός των κύκλων με τη σειρά του καθορίζεται από τις υποδιαιρέσεις των εύρων ανοχής, άρα τελικά ο χρόνος υπολογισμού αυξάνεται γεωμετρικά με την αύξηση των επιμέρους στοιχείων της διαστασιολογικής αλυσίδας.

Αναλυτικά αυτό μεταφράζεται στον τύπο: $C = k^n$,

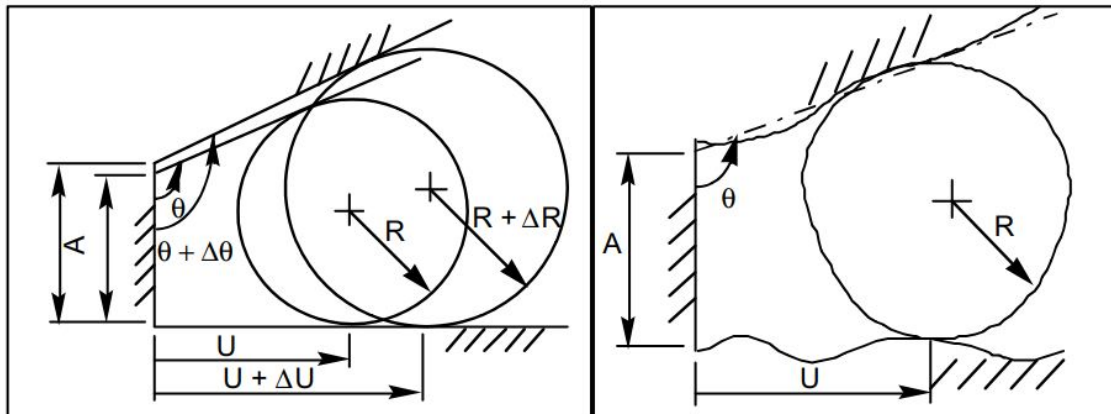
Όπου c: Σύνολο υπολογιστικών κύκλων,

k: Αριθμός υποψήφιων τιμών κάθε επιμέρους διαστασιολογικού στοιχείου

n: Αριθμός επιμέρους διαστασιολογικών στοιχείων του υπό μελέτη βρόχου

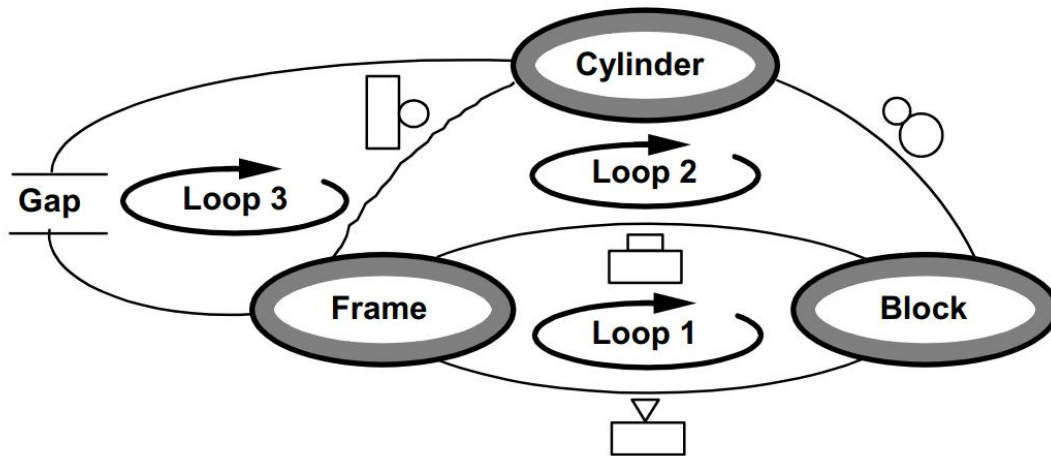
Όπως και στην 1-Δ περίπτωση, η μέθοδος Χειρότερης Περίπτωσης είναι πρακτικά χρήσιμη σε μικρά σχετικά συναρμολογήματα με ήπιες απαιτήσεις λειτουργικών επιδόσεων.

Η μέθοδος **Ευθείας Γραμμικοποίησης (Direct Linearization Method-DLM)**. Πρόκειται για μέθοδο η οποία υλοποιείται με εφαρμογή γραμμικής άλγεβρας και στατιστικών τεχνικών τύπου RSS πάνω σε διανυσματικά ορισμένους διαστασιολογικούς βρόχους. Ως μεταβλητές σε αυτή τη μέθοδο λαμβάνονται οι διαστασιολογικές (μήκη, γωνίες), γεωμετρικές (λ.χ θέση, προφίλ, κυλινδρικότητα κ.α) και κινηματικές (μεταβλητότητα σχέσεων τοποθέτησης μεταξύ των εξαρτημάτων του συναρμολογήματος). Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12, στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι διαστασιολογικές και γεωμετρικές μεταβλητές αποτελούν τις εισόδους του υπό εξέταση βρόχου και η κινηματική μεταβλητή U αποτελεί την καθοριζόμενη από τις εισόδους έξοδο. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται πως καθορίζουν οι διαστάσεις του κυκλικού εξαρτήματος (στην πράξη είναι ένα κυλινδρικό εξάρτημα αλλά εδώ ενδιαφέρει η αναγωγή στο 2-Δ προβαλλόμενο επίπεδο) και η κυκλικότητα του, την τοποθετούμενη τελικά απόσταση U που επιτυγχάνεται στο συναρμολόγημα. Με το παράδειγμα αυτό αποδεικνύεται επίσης ότι οι κινηματικές μεταβλητές έχουν επίδραση και μπορούν να μετρηθούν κατά τη φάση της συναρμολόγησης και όχι νωρίτερα.



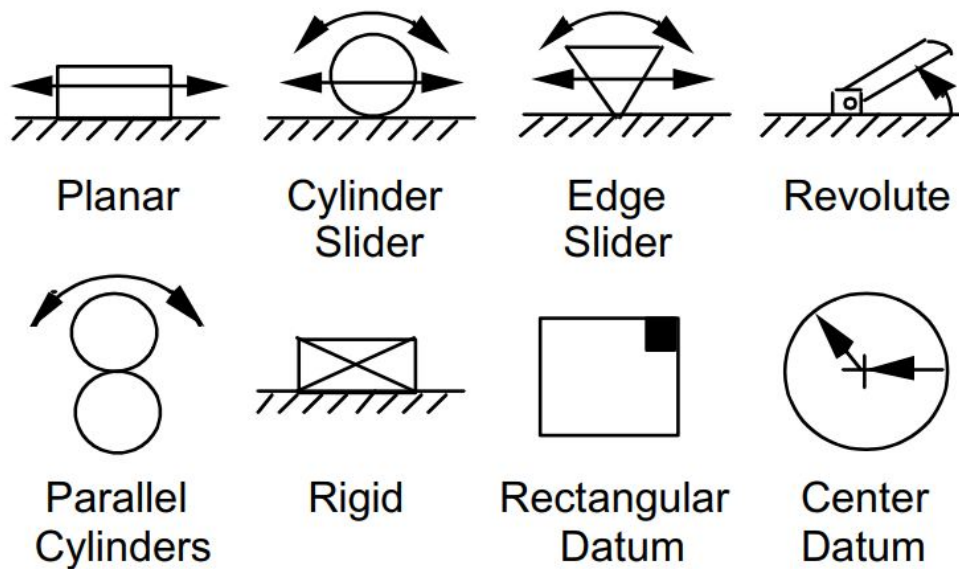
Σχήμα 2.12 Α) Επίδραση διαστασιολογικής μεταβλητής Β) Επίδραση γεωμετρικής μεταβλητής
Και στις δύο περιπτώσεις φαίνεται η επίδραση των διαστασιολογικών και γεωμετρικών μεταβλητών στην κινηματική μεταβλητή U του συναρμολογήματος

Πρώτο στάδιο για την υλοποίηση της μεθόδου είναι η δημιουργία του γράφου του συναρμολογήματος. Ο γράφος αυτός είναι μία μονογραμμική περιγραφή μόνον των σχέσεων συναρμολόγησης μεταξύ των διαφόρων εξαρτημάτων. Τα γεωμετρικά και διαστασιολογικά στοιχεία δεν συμπεριλαμβάνονται στον γράφο, ο οποίος επίσης υποδεικνύει και τον αριθμό των διαστασιολογικών βρόχων που θα απαιτηθούν σε επόμενο στάδιο. Στο σχήμα 2.13 απεικονίζεται ένας γράφος συναρμολογήματος, όπου ταυτόχρονα γίνεται αναγνώριση των κινηματικών σχέσεων μεταξύ των εξαρτημάτων.



Σχήμα 2.13: Παράδειγμα γράφου συναρμολογήματος

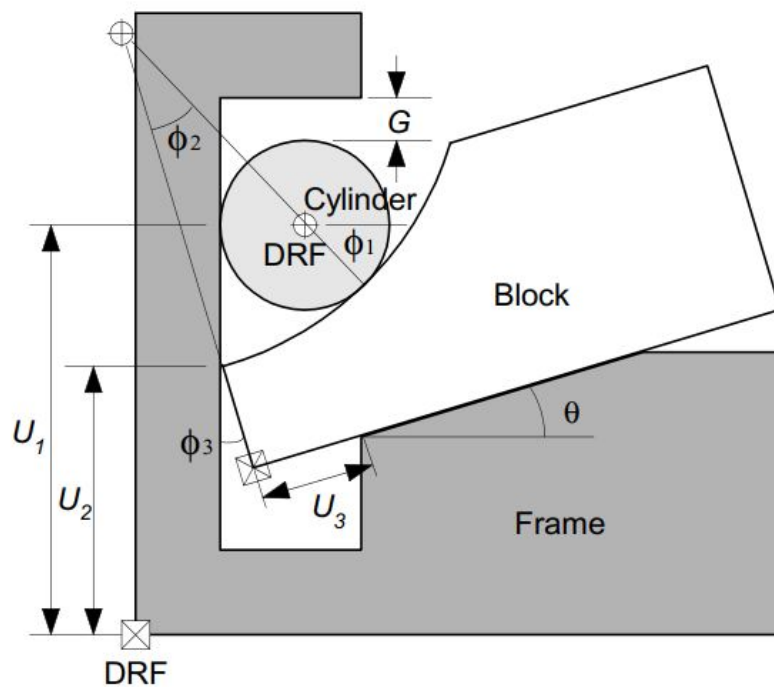
Τα συνήθη σύμβολα κινηματικών περιορισμών (Assembly Constraints) που χρησιμοποιούνται στην 2-Δ Ανάλυση Ανοχών φαίνονται στο σχήμα 2.14. Τα έξι πρώτα αναφέρονται σε περιορισμούς βαθμών ελευθερίας των εξαρτημάτων ενώ τα δύο τελευταία χρησιμοποιούνται για να ορίσουν Data αναφοράς.



Σχήμα 2.14: Συμβολισμός κινηματικών περιορισμών μεταξύ εξαρτημάτων και Datum Αναφοράς

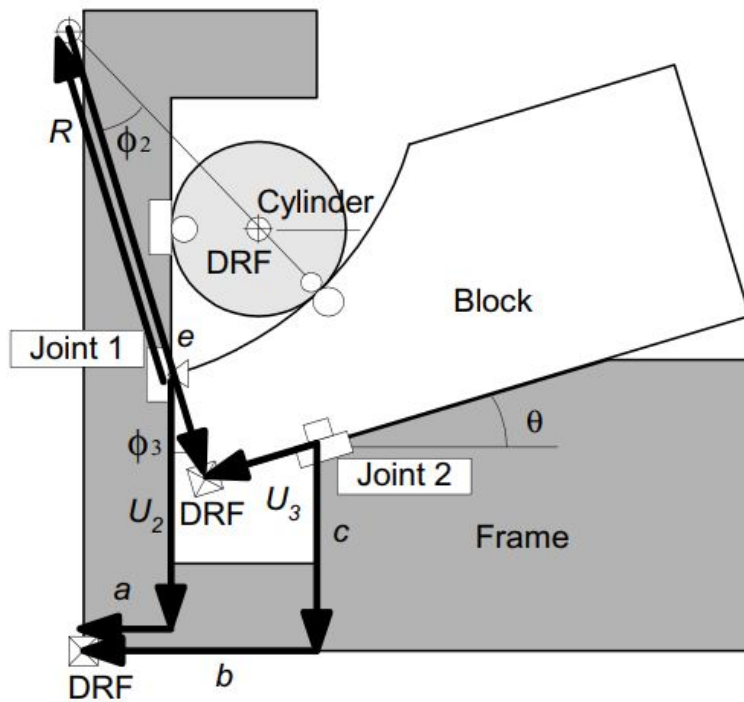
Κάθε εξάρτημα ορίζεται χωρικά με κάποιο Datum Αναφοράς μέσα στο συναρμολόγημα. Αφού γίνει αυτό για όλα τα εξαρτήματα, ορίζεται για κάθε εξάρτημα ένα τοπικό σύστημα αναφοράς με το οποίο γίνεται η τοποθέτηση των διαφόρων features στο κάθε εξάρτημα.

Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τοπικών αναφορών (DRF- Datum Reference Frames). Είναι εμφανείς και οι εξαρτημένες κινηματικές μεταβλητές, τόσο οι γραμμικές (U_1 , U_2 , U_3), όσο και οι γωνιακές καθώς και η G που αποτελεί την τελική λειτουργική προδιαγραφή της οποίας η μεταβλητότητα πρέπει να ελεγχθεί. (Εδώ πρόκειται για διάκενο μεταξύ του κυλίνδρου και του Frame).

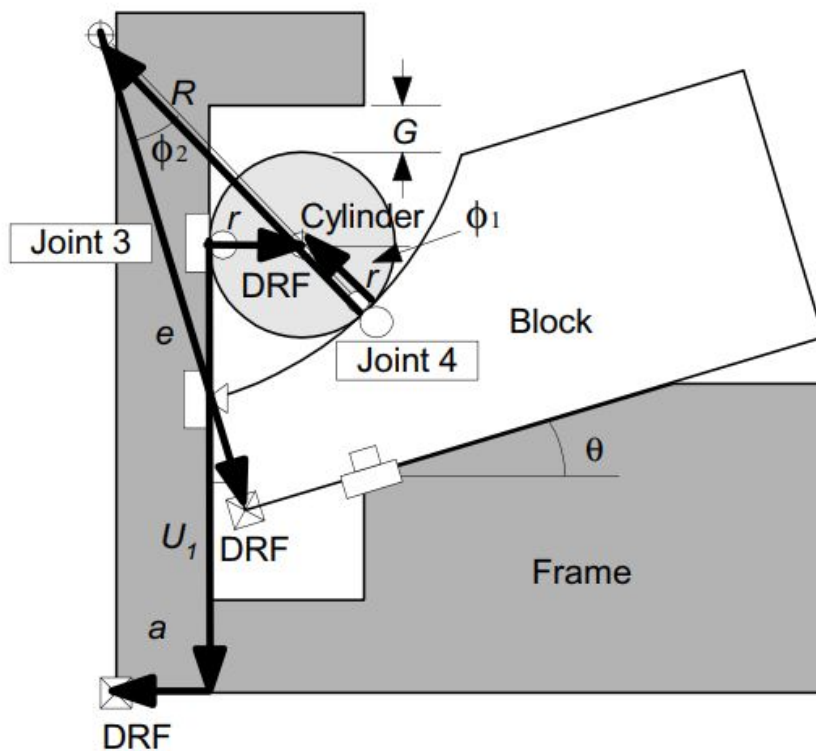


Σχήμα 2.15: Τοπικά συστήματα αναφοράς κάθε εξαρτήματος (DRF)

Στη συνέχεια μέσω της μελέτης και ερμηνείας του συναρμολογήματος εξάγονται οι σχέσεις λόγω επαφής μεταξύ των εξαρτημάτων. Κάθε επαφή ανάλογα με το πώς είναι καθορισμένη λόγω χωροταξίας και λειτουργίας, περιορίζει κάποιους βαθμούς ελευθερίας. Από την προαναφερθείσα διαδικασία δημιουργούνται τελικά διαδρομές αναφοράς που διέρχονται μέσω των επαφών και ουσιαστικά συνδέουν εξάρτημα με εξάρτημα ώστε στη συνέχεια επιτευχθεί βρόχος μεταφοράς των ανοχών. Στη διεθνή ορολογία αυτές οι διαδρομές αναπαριστούνται με διανύσματα και καλούνται Datum Paths, όπως φαίνεται και στα σχήματα 2.16, 2.17. Οι κανόνες με τους οποίους συνθέτονται τα διανύσματα αυτά καθώς και οι βρόχοι που θα αναφερθούν στη συνέχεια της διαδικασίας της μεθόδου ξεφεύγουν από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας και για αυτό προτείνεται στον ενδιαφερόμενο αναγνώστη να αναζητήσει αναλυτικές μεθοδολογίες στην σχετική βιβλιογραφία και στα διεθνή πρότυπα.

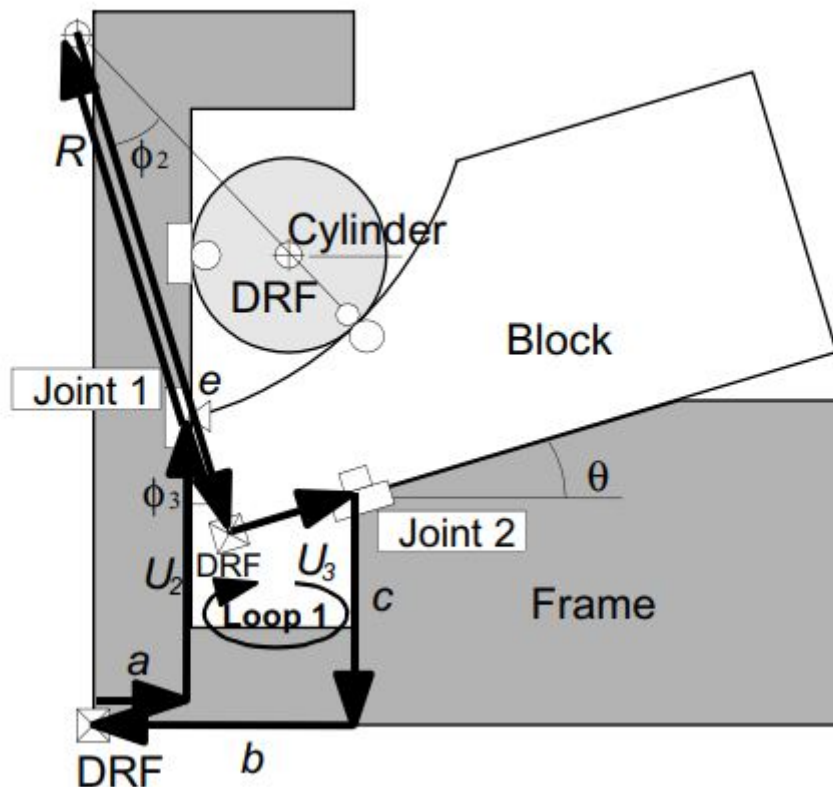


Σχήμα 2.16: Κινηματικές διαδρομές (Datum Paths) δημιουργούμενες μέσω της ερμηνείας των επαφών (α)

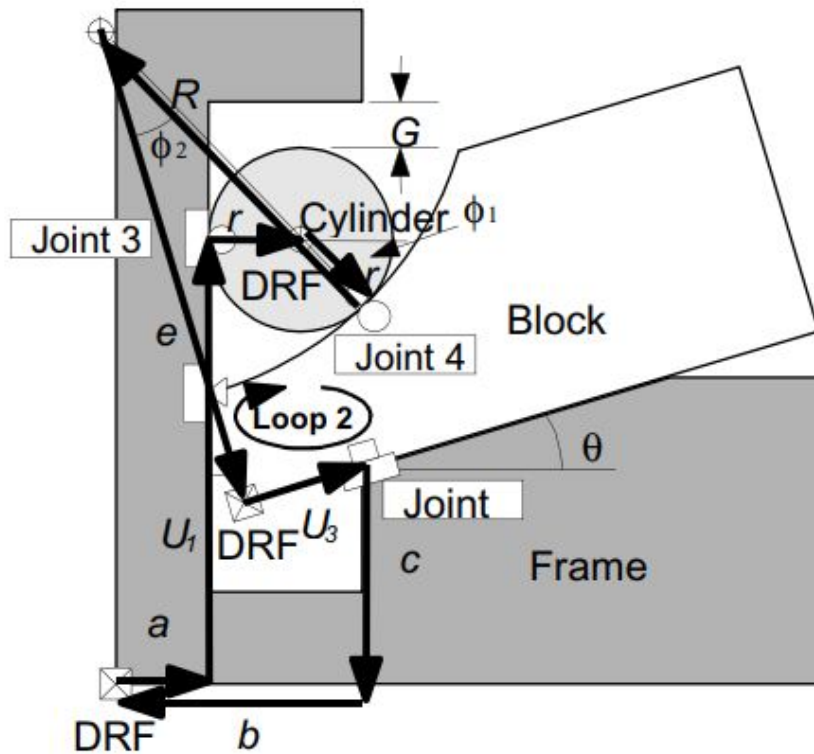


Σχήμα 2.17: Κινηματικές διαδρομές (Datum Paths) δημιουργούμενες μέσω της ερμηνείας των επαφών (β)

Αφού ευρεθούν όλες οι διαδρομές αναφοράς μπορεί πλέον να υλοποιηθεί η στοιχειοθέτηση των διαστασιολογικών βρόχων που αποτελούνται πλέον από διανύσματα (Vector Loops) καθότι υπεισέρχεται και η έννοια της διεύθυνσης στο επίπεδο ή/και στο χώρο, ανάλογα με τις χωρικές διαστάσεις του υπό μελέτη μηχανισμού. Κάθε διάνυσμα αντιπροσωπεύει μία διάσταση/ανοχή είτε ευθέως, είτε μέσω της μετατροπής σε διάσταση και ανοχή κάποιου γεωμετρικού χαρακτηριστικού. Δηλαδή κάθε διάνυσμα συνεισφέρει τελικά στην αθροιστική επίδραση των επιμέρους ανοχών (tolerance stackup). Η στοίχιση διανυσμάτων γίνεται σειριακά ενώνοντας αρχή με τέλος του ενός με το επόμενο διάνυσμα και ουσιαστικά πρόκειται για τη διαδικασία σύνδεσης των προαναφερθέντων Datum Paths. Παρομοίως ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει τους αναλυτικούς κανόνες για την δημιουργία διαστασιολογικών βρόχων πολλών διαστάσεων μέσω των διαστασιακών διανυσμάτων σε εξειδικευμένη βιβλιογραφία. Οι τελικά δημιουργούμενοι βρόχοι του παραπάνω παραδείγματος είναι στα σχήματα 2.18 και 2.19.



Σχήμα 2.18: Vector Loops παραδείγματος (α)



Σχήμα 2. 19: Vector Loops παραδείγματος (β)

Η όλη προαναφερθείσα διαδικασία δημιουργίας των γράφων σκοπεύει στην καθοδήγηση της κατάστρωσης των εξισώσεων που καθορίζουν τις γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ όλων των επιμέρους διαστασιολογικών και διαστασιολογικά ανηγμένων πλέον στοιχείων. Έτσι δημιουργείται η μαθηματική έκφραση που περιγράφει την μετάδοση της επίδρασης κάθε στοιχείου στο τελικό λειτουργικό αποτέλεσμα, κάνοντας έτσι δυνατή την αναλυτική έκφραση της μεταβλητότητας της/των λειτουργικών προδιαγραφών συναρτήσει της μεταβλητότητας του κάθε επιμέρους στοιχείου. Για λόγους συνέχειας παρατίθενται οι εξισώσεις των βρόχων του παραδείγματος.

Βρόχος 1:

$$h_x = a \cos(0) + U_2 \cos(90) + R \cos(90 + \phi_3) + e \cos(90 + \phi_3 - 180) + U_3 \cos(\theta) + c \cos(-90) + b \cos(-180) = 0$$

$$h_y = a \sin(0) + U_2 \sin(90) + R \sin(90 + \phi_3) + e \sin(90 + \phi_3 - 180) + U_3 \sin(\theta) + c \sin(-90) + b \sin(-180) = 0$$

$$h_\theta = 0 + 90 + \phi_3 - 180 + 90 - \theta - 90 - 90 + 180 = 0$$

(10)

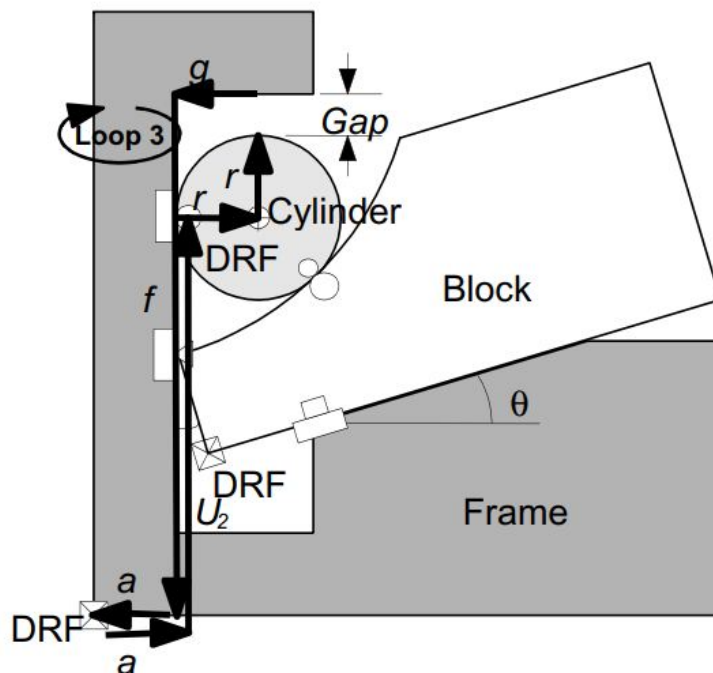
Βρόχος 2:

$$h_x = a \cos(0) + U_1 \cos(90) + r \cos(0) + r \cos(-\phi_1) + R \cos(-\phi_1 + 180) + e \cos(-\phi_1 - \phi_2) + U_3 \cos(\theta) + c \cos(-90) + b \cos(-180) = 0$$

$$h_y = a \sin(0) + U_1 \sin(90) + r \sin(0) + r \sin(-\phi_1) + R \sin(-\phi_1 + 180) + e \sin(-\phi_1 - \phi_2) + U_3 \sin(\theta) + c \sin(-90) + b \sin(-180) = 0$$

$$h_\theta = 0 + 90 - 90 - \phi_1 + 180 - \phi_2 - 180 + 90 - \theta - 90 - 90 + 180 = 0 \quad (11)$$

Το ζητούμενο στοιχείο εξόδου που όπως αναφέρθηκε είναι το διάκενο G (Gap) περιλαμβάνεται στον ανοιχτό διανυσματικό βρόχο εξόδου του σχήματος 2.20. Τον βρόχο κλείνει το διάκενο (Gap) το οποίο είναι η εξαρτώμενη μεταβλητή του παραδείγματος.



Σχήμα 2.20: Ανοιχτός διανυσματικός βρόχος που συμπεριλαμβάνει το στοιχείο εξόδου

Η εξίσωση του τρίτου και ανοιχτού διανυσματικού βρόχου είναι η:

$$\text{Gap} = r \sin(-90) + r \sin(180) + U_1 \sin(-90) + f \sin(90) + g \sin(0) \quad (12)$$

Καθότι οι εξισώσεις που περιγράφουν οι διανυσματικοί βρόχοι είναι συνήθως μη-γραμμικές και σε πεπλεγμένη μορφή και επειδή τις περισσότερες φορές κατά την ανάλυση ανοχών οι μεταβολές των διαστασιακών μεγεθών είναι σχετικά μικρές, μπορούν τα συστήματα των εξισώσεων να γραμμικοποιηθούν με σειρές Taylor 1^{ου} βαθμού, όπως και γίνεται για τις προηγούμενες εξισώσεις του παραδείγματος. Ενδεικτικά γραμμικοποιούνται οι εξισώσεις του 1^{ου} βρόχου:

$$\begin{aligned}
 \delta h_x &= \frac{\partial h_x}{\partial a} \delta a + \frac{\partial h_x}{\partial b} \delta b + \frac{\partial h_x}{\partial c} \delta c + \frac{\partial h_x}{\partial e} \delta e + \frac{\partial h_x}{\partial r} \delta r + \frac{\partial h_x}{\partial R} \delta R + \frac{\partial h_x}{\partial \theta} \delta \theta \\
 &+ \frac{\partial h_x}{\partial \phi_1} \delta \phi_1 + \frac{\partial h_x}{\partial \phi_2} \delta \phi_2 + \frac{\partial h_x}{\partial \phi_3} \delta \phi_3 + \frac{\partial h_x}{\partial U_1} \delta U_1 + \frac{\partial h_x}{\partial U_2} \delta U_2 + \frac{\partial h_x}{\partial U_3} \delta U_3 \\
 \delta h_y &= \frac{\partial h_y}{\partial a} \delta a + \frac{\partial h_y}{\partial b} \delta b + \frac{\partial h_y}{\partial c} \delta c + \frac{\partial h_y}{\partial e} \delta e + \frac{\partial h_y}{\partial r} \delta r + \frac{\partial h_y}{\partial R} \delta R + \frac{\partial h_y}{\partial \theta} \delta \theta \\
 &+ \frac{\partial h_y}{\partial \phi_1} \delta \phi_1 + \frac{\partial h_y}{\partial \phi_2} \delta \phi_2 + \frac{\partial h_y}{\partial \phi_3} \delta \phi_3 + \frac{\partial h_y}{\partial U_1} \delta U_1 + \frac{\partial h_y}{\partial U_2} \delta U_2 + \frac{\partial h_y}{\partial U_3} \delta U_3 \\
 \delta h_\theta &= \frac{\partial h_\theta}{\partial a} \delta a + \frac{\partial h_\theta}{\partial b} \delta b + \frac{\partial h_\theta}{\partial c} \delta c + \frac{\partial h_\theta}{\partial e} \delta e + \frac{\partial h_\theta}{\partial r} \delta r + \frac{\partial h_\theta}{\partial R} \delta R + \frac{\partial h_\theta}{\partial \theta} \delta \theta \\
 &+ \frac{\partial h_\theta}{\partial \phi_1} \delta \phi_1 + \frac{\partial h_\theta}{\partial \phi_2} \delta \phi_2 + \frac{\partial h_\theta}{\partial \phi_3} \delta \phi_3 + \frac{\partial h_\theta}{\partial U_1} \delta U_1 + \frac{\partial h_\theta}{\partial U_2} \delta U_2 + \frac{\partial h_\theta}{\partial U_3} \delta U_3
 \end{aligned} \tag{13}$$

Οι μερικές παράγωγοι υπολογίζονται εύκολα καθώς περιλαμβάνουν απλούς τριγωνομετρικούς όρους. Στη συνέχεια οι εξισώσεις πρέπει να λυθούν ως προς τις μεταβλητές ευαισθησίας, δηλαδή εκείνες που ενδιαφέρουν και αφορούν τις διάφορες ανοχές. Αυτά γράφονται σε μητρική μορφή $[A]\{\delta X\} + [B]\{\delta U\} = \{0\}$ και επιλύοντας ως προς τις μεταβλητές δU τελικά προκύπτει το σύστημα του τύπου $\{\delta U\} = -[B^{-1}]A\{\delta X\}$. Προκειμένου να μην ξεφύγει το παρόν από τους στόχους, δίνεται ακολούθως η εφαρμογή της μητρικής γραφής στο παράδειγμα, χωρίς να αναλύεται διεξοδικά η αλγεβρική διαδικασία:

$$\{\delta X\} = \begin{Bmatrix} \delta a \\ \delta b \\ \delta c \\ \delta e \\ \delta r \\ \delta R \\ \delta \theta \end{Bmatrix} \quad \{\delta U\} = \begin{Bmatrix} \delta U_1 \\ \delta U_2 \\ \delta U_3 \\ \delta \phi_1 \\ \delta \phi_2 \\ \delta \phi_3 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_x}{\partial a} & \frac{\partial h_x}{\partial b} & \frac{\partial h_x}{\partial c} & \frac{\partial h_x}{\partial e} & \frac{\partial h_x}{\partial r} & \frac{\partial h_x}{\partial R} & \frac{\partial h_x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial h_y}{\partial a} & \frac{\partial h_y}{\partial b} & \frac{\partial h_y}{\partial c} & \frac{\partial h_y}{\partial e} & \frac{\partial h_y}{\partial r} & \frac{\partial h_y}{\partial R} & \frac{\partial h_y}{\partial \theta} \\ \frac{\partial h_\theta}{\partial a} & \frac{\partial h_\theta}{\partial b} & \frac{\partial h_\theta}{\partial c} & \frac{\partial h_\theta}{\partial e} & \frac{\partial h_\theta}{\partial r} & \frac{\partial h_\theta}{\partial R} & \frac{\partial h_\theta}{\partial \theta} \\ \frac{\partial h_x}{\partial a} & \frac{\partial h_x}{\partial b} & \frac{\partial h_x}{\partial c} & \frac{\partial h_x}{\partial e} & \frac{\partial h_x}{\partial r} & \frac{\partial h_x}{\partial R} & \frac{\partial h_x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial h_y}{\partial a} & \frac{\partial h_y}{\partial b} & \frac{\partial h_y}{\partial c} & \frac{\partial h_y}{\partial e} & \frac{\partial h_y}{\partial r} & \frac{\partial h_y}{\partial R} & \frac{\partial h_y}{\partial \theta} \\ \frac{\partial h_\theta}{\partial a} & \frac{\partial h_\theta}{\partial b} & \frac{\partial h_\theta}{\partial c} & \frac{\partial h_\theta}{\partial e} & \frac{\partial h_\theta}{\partial r} & \frac{\partial h_\theta}{\partial R} & \frac{\partial h_\theta}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cos(270 + \phi_3) & 0 & \cos(90 + \phi_3) & -U_3 \sin(\theta) \\ 0 & 0 & -1 & \sin(270 + \phi_3) & 0 & \sin(90 + \phi_3) & U_3 \cos(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & \cos(-\phi_1 - \phi_2) & 1 + \cos(-\phi_1) & \cos(-\phi_1 + 180) & -U_3 \sin(\theta) \\ 0 & 0 & -1 & \sin(-\phi_1 - \phi_2) & \sin(-\phi_1) & \sin(-\phi_1 + 180) & U_3 \cos(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & .2924 & 0 & -.2924 & -4.7738 \\ 0 & 0 & -1 & -.9563 & 1 & .9563 & 15.6144 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & .2924 & 1.7232 & -.7232 & -4.7738 \\ 0 & 0 & -1 & -.9563 & -.6907 & .6907 & 15.6144 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[B]=\begin{bmatrix} \frac{\partial h_x}{\partial U_1} & \frac{\partial h_x}{\partial U_2} & \frac{\partial h_x}{\partial U_3} & \frac{\partial h_x}{\partial \phi_1} & \frac{\partial h_x}{\partial \phi_2} & \frac{\partial h_x}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial h_y}{\partial U_1} & \frac{\partial h_y}{\partial U_2} & \frac{\partial h_y}{\partial U_3} & \frac{\partial h_y}{\partial \phi_1} & \frac{\partial h_y}{\partial \phi_2} & \frac{\partial h_y}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial h_\theta}{\partial U_1} & \frac{\partial h_\theta}{\partial U_2} & \frac{\partial h_\theta}{\partial U_3} & \frac{\partial h_\theta}{\partial \phi_1} & \frac{\partial h_\theta}{\partial \phi_2} & \frac{\partial h_\theta}{\partial \phi_3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & \cos(90) & \cos(\theta) & 0 & 0 & -R\sin(90+\phi_3) - e\sin(270+\phi_3) \\ 0 & \sin(90) & \sin(\theta) & 0 & 0 & R\cos(90+\phi_3) + e\cos(270+\phi_3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \cos(90) & 0 & \cos(\theta) & [r\sin(-\phi_1) \\ +e\sin(-\phi_1-\phi_2)] & e\sin(-\phi_1-\phi_2) & 0 \\ \sin(90) & 0 & \sin(\theta) & [-r\cos(-\phi_1) \\ -e\cos(-\phi_1-\phi_2)] & -e\cos(-\phi_1-\phi_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & .95631 & 0 & 0 & 14.3446 \\ 0 & 1 & .29237 & 0 & 0 & 4.3856 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & .95631 & -31.8764 & -52.5968 & 0 \\ 1 & 0 & .29237 & 5.6144 & -16.0804 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$[B^{-1}] = \begin{bmatrix} .7413 & 0 & -10.6337 & -1.0470 & 1 & 38.9901 \\ -.3057 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0457 & 0 & -15 & 0 & 0 & 0 \\ -.0483 & 0 & .6923 & .0483 & 0 & -2.5384 \\ .0483 & 0 & -.6923 & -.0483 & 0 & 1.5384 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Οι ονομαστικές τιμές έχουν ληφθεί από το αρχείο CAD του παραδείγματος.

Τελικά με την αντιστροφή εξάγεται το μητρώο ευαισθησίας.

Αντίστοιχα γραμμικοποιείται και η εξίσωση εξόδου του ανοιχτού βρόχου και λαμβάνεται μία έκφραση ευαισθησίας $\{\delta V\} = [C]\{\delta X\} + [E]\{\delta U\}$ για την λειτουργική προδιαγραφή, εδώ συγκεκριμένα το προαναφερθέν Gap:

$$\begin{aligned} \delta Gap = & \frac{\partial Gap}{\partial a} \delta a + \frac{\partial Gap}{\partial b} \delta b + \frac{\partial Gap}{\partial c} \delta c + \frac{\partial Gap}{\partial e} \delta e + \frac{\partial Gap}{\partial f} \delta f + \frac{\partial Gap}{\partial g} \delta g + \frac{\partial Gap}{\partial r} \delta r + \frac{\partial Gap}{\partial R} \delta R + \frac{\partial Gap}{\partial \theta} \delta \theta \\ & + \frac{\partial Gap}{\partial U_1} \delta U_1 + \frac{\partial Gap}{\partial U_2} \delta U_2 + \frac{\partial Gap}{\partial U_3} \delta U_3 + \frac{\partial Gap}{\partial \phi_1} \delta \phi_1 + \frac{\partial Gap}{\partial \phi_2} \delta \phi_2 + \frac{\partial Gap}{\partial \phi_3} \delta \phi_3 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \delta Gap = & [\sin(-90) + \sin(180)] \delta r + \sin(90) \delta f + \sin(0) \delta g + \sin(-90) \delta U_1 \\ = & -\delta r + \delta f - \delta U_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta Gap = & -\delta r + \delta f - (.3057\delta a - .3057\delta b + \delta c + 1.0457\delta e + 2.4949\delta r - 1.2311\delta R + 11.2825\delta \theta) \\ = & -.3057\delta a + .3057\delta b - \delta c - 1.0457\delta e - 3.4949\delta r + 1.2311\delta R - 11.2825\delta \theta \end{aligned} \quad (23)$$

Η τελευταία εξίσωση δίνει την αναλυτική έκφραση της μεταβλητότητας του διακένου, που στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί όπως αναφέρθηκε την ελεγχόμενη λειτουργική προδιαγραφή. Πάνω σε αυτές τις εξισώσεις που γράφτηκαν σε μητρική μορφή εφαρμόζεται κάποια στατιστική κατανομή στα στοιχεία εισόδου, τέτοια ώστε να περιγράψει με ικανοποιητική προσέγγιση την διασπορά των κατασκευάσιμων μεγεθών μέσα στα ορισμένα από τις διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές εύρη.

Γενικά χρησιμοποιείται μοντελοποίηση τύπου **RSS**, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην 1-Δ ανάλυση. Εδώ δηλαδή για κάθε μεταβλητή ευαισθησίας δU εκφράζεται η διασπορά της στη μορφή: $\delta U = \sqrt{\sum ((S_{ij} \delta x_j)^2)}$, όπου S_{ij} λαμβάνεται από τα μητρώα ενώ το δx_j εκφράζει την κατανομή της διεργασίας. Συνήθως χρησιμοποιείται η ανάλυση επιπέδου $\pm 3\sigma$.

Οπότε για το Gap του παραδείγματος (Η ανάλυση των υπολοίπων μεταβλητών σε στατιστικές συναρτήσεις παραλείπεται) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \delta Gap = & [(S_{41}\delta a)^2 + (S_{42}\delta b)^2 + (S_{43}\delta c)^2 + (S_{44}\delta e)^2 + (S_{45}\delta r)^2 + (S_{46}\delta R)^2 + (S_{47}\delta \theta) + \\ & (S_{48}\delta f)^2 + (S_{49}\delta g)^2]^{.5} \\ = & [(-.30573)^2 \cdot 0.3 + (.30573)^2 \cdot 0.3 + (-1 \cdot 0.3)^2 + (-1.04569 \cdot 0.3)^2 + (-3.4949 \cdot 0.1)^2 \\ & + (1.2311 \cdot 0.3)^2 + (-11.2825 \cdot 0.01745)^2 + (1 \cdot 0.5)^2 + (0 \cdot 0)^2]^{.5} \\ = & \pm 0.8675 \text{ mm} \end{aligned} \quad (24)$$

1)

Η μέθοδος ευθείας γραμμικοποίησης έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η αναλυτική έκφραση των διαστασιολογικών μεγεθών που εξασφαλίζεται από τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων επιτρέπει επιπλέον της ανάλυσης και την άμεση μελέτη της συνεισφοράς των στοιχείων εισόδου στο λειτουργικό αποτέλεσμα με τη διαδικασία

μίας Ανάλυσης Ευαισθησίας. Επίσης συστηματοποιείται η διαδικασία κατάστρωσης των παραπάνω εξισώσεων μέσω των τεχνικών γραμμικών γράφων, κάτι που δίνει τη δυνατότητα της αλγοριθμικής προσέγγισης όταν παρουσιαστεί η ανάγκη ανάλυσης μεγάλου και σύνθετου αριθμού σεναρίων.

Τελευταία, παρουσιάζεται η μέθοδος ανάλυσης ανοχών με εφαρμογή της προσομοίωσης κατά **Monte-Carlo**, μέσω της οποίας υλοποιείται η ανάλυση ανοχών στο καλούπι που μελετάται στην παρούσα εργασία. Για το λόγο αυτό θα γίνει παρουσίαση της διαδικασίας με την οποία υλοποιείται η μέθοδος ταυτόχρονα με την εφαρμογή της στην ποσοτική διερεύνηση της επίδρασης των διαστασιολογικών και γεωμετρικών στοιχείων της καλουπιέρας εμπορίου στην δημιουργία της προεξοχής κατά μήκος της γραμμής διαχωρισμού του.

Η μέθοδος Μόντε Κάρλο (Monte Carlo method), ή πείραμα/προσομοίωση Μόντε Κάρλο, είναι μια στοχαστική διαδικασία όπου με χρήση τυχαίων αριθμών και τη στατιστική προσπαθούμε να λύσουμε ένα πρόβλημα. Σε ένα πείραμα Μόντε Κάρλο χρησιμοποιείται προσομοίωση με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Η μέθοδος Μόντε Κάρλο παρουσιάστηκε το 1949 με την δημοσίευση των Νίκολας Μετρόπολις και Στάνισλαβ Ούλαμ "Η μέθοδος Μόντε Κάρλο" στο περιοδικό Journal of the American Statistics Association. Η ιδέα αυτή ήταν γνωστή και νωρίτερα όπου κάποια προβλήματα στατιστικής λυνόντουσαν με τυχαία δειγματοληψία.

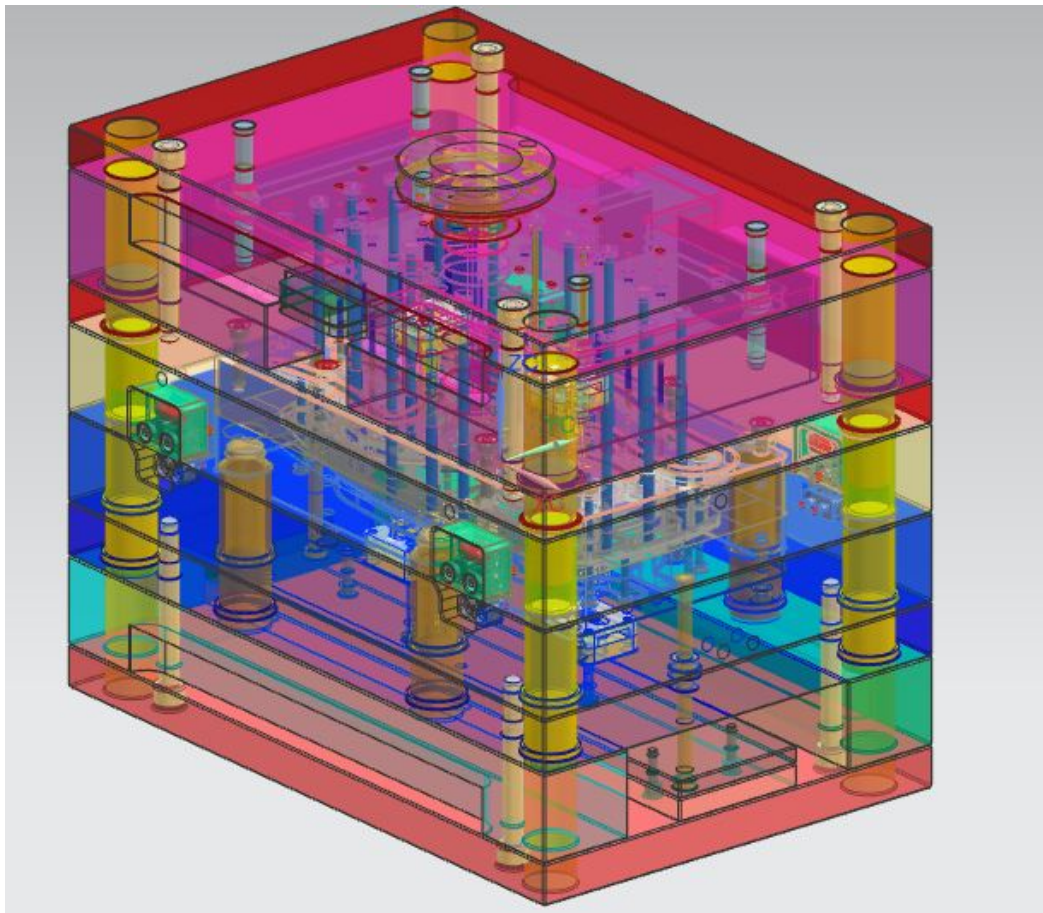
Ένα παράδειγμα πειράματος Μόντε Κάρλο είναι το πρόβλημα του μεθυσμένου ναύτη. Στο πρόβλημα αυτό έχουμε ένα ναύτη μεθυσμένο σε μια πόλη όπου θέλει να βρει την έξοδο. Σε κάθε σταυροδρόμι έχει ίση πιθανότητα να επιλέξει ένα από τους 4 δρόμους. Θέλουμε να βρούμε την πιθανότητα που έχει ο ναύτης να εξέλθει σε κάθε μια από τις εξόδους της πόλης. Αν έχουμε λίγα οικοδομικά τετράγωνα (π.χ. 3x2 οικοδομικά τετράγωνα) η πιθανότητα μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με μαθηματικούς υπολογισμούς. Στην περίπτωση μια πόλης το πρόβλημα γίνεται πολύ δύσκολο να λυθεί με μαθηματικές πράξεις αλλά λύνεται με ένα πείραμα Μόντε Κάρλο και τη χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Χρησιμοποιώντας μια μηχανή τυχαίων αριθμών σε ένα υπολογιστή προσομοιώνουμε την κίνηση του ναύτη μέχρι να εξέλθει από την πόλη. Το πείραμα το τρέχουμε πάρα πολλές φορές και στο τέλος υπολογίζουμε (κατά προσέγγιση) την κάθε πιθανότητα να βγει από κάθε έξοδο της πόλης.

Τα πειράματα Monte Carlo χρησιμοποιούνται για ανάλυση παιχνιδιών όπως το σκάκι ή το Γκο (ασιατικό παιχνίδι στρατηγικής όπως το σκάκι). Χρησιμοποιούνται γεννήτριες τυχαίων αριθμών και βάζουμε δύο εικονικούς παίχτες (υπολογιστές) να παίζουν στην "τύχη". Επαναλαμβάνοντας το πείραμα Μόντε Κάρλο πάρα πολλές φορές επιτυγχάνεται η εκτίμηση σχετικά με το ποια επόμενη κίνηση είναι στατιστικά καλή για να κερδίσει το παιχνίδι ένας παίκτης.

2.2 Υλοποίηση Ανάλυσης Ανοχών μέσω της μεθόδου Monte Carlo στην μελέτη δημιουργίας προεξοχής στο εγχυόμενο αντικείμενο

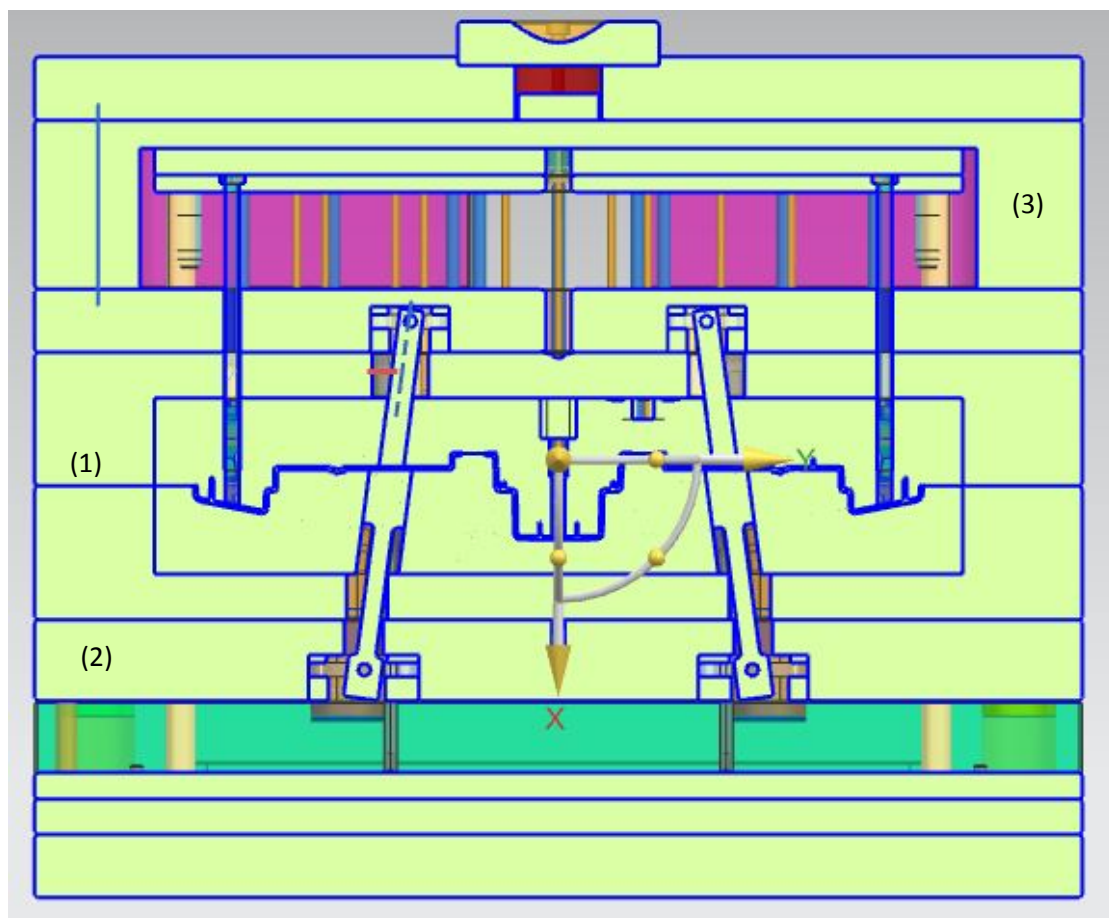
Το τεχνικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί αφορά την επίδραση των κατασκευαστικών γεωμετρικών και διαστασιολογικών παραμέτρων των χαλύβδινων πλακών που απαρτίζουν το υπό διερεύνηση καλούπι injection στην δημιουργία προεξοχής (flash) κατά μήκος της γραμμής διαχωρισμού (parting line), στο τελικό εγχυόμενο πλαστικό προϊόν.

Το καλούπι injection που μελετάται και το αντικείμενο που παράγει παρουσιάστηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο μαζί με την τοποθέτηση του γενικότερου τεχνικού ζητήματος της παρούσας εργασίας. Γενικά η διάταξη του συναρμολογήματος του συγκεκριμένου καλουπιού σε 3D απεικόνιση είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.2: Γενική τριδιάστατη απεικόνιση του υπό μελέτη καλουπιού

Επίσης ακολουθεί μία in-CAD τομή στο κατακόρυφο μεσοεπίπεδο του πλήρους συναρμολογήματος του καλουπιού, όπου διαφαίνεται αρχικά το επίπεδο χωρισμού της καλουπιέρας (όπου καλουπιέρα θα εννοείται στο εξής το υποσυναρμολόγημα μόνο των χαλύβδινων πλακών που απαρτίζουν τη ραχοκοκαλιά του καλουπιού) που βρίσκεται στην αρχή των αξόνων της τομής (1) . Το κάτω μέρος του καλουπιού δηλαδή αυτό που φαίνεται κάτω από την αρχή των αξόνων ονομαζόμενο και ως κινητό μισό του καλουπιού (moving half), είναι αυτό που κινείται κατά τη διαδικασία παραγωγής όντας εδρασμένο στο κινούμενο πλατώ μίας μηχανής injection molding (2), ενώ το πάνω μέρος γνωστό και ως σταθερό μισό (fixed half) είναι το σύνολο του καλουπιού το οποίο είναι “δεμένο” στο ακίνητο μέρος της μηχανής από την οποία γίνεται και η έγχυση του υλικού υπό πίεση μέσω του extruder (3) . Περισσότερα για τις μηχανές injection και την αλληλεπίδραση τους με το καλούπι αναφέρονται στο κεφάλαιο 3 όπου γίνεται η μοντελοποίηση του συστήματος αυτού κατά την λειτουργία του.



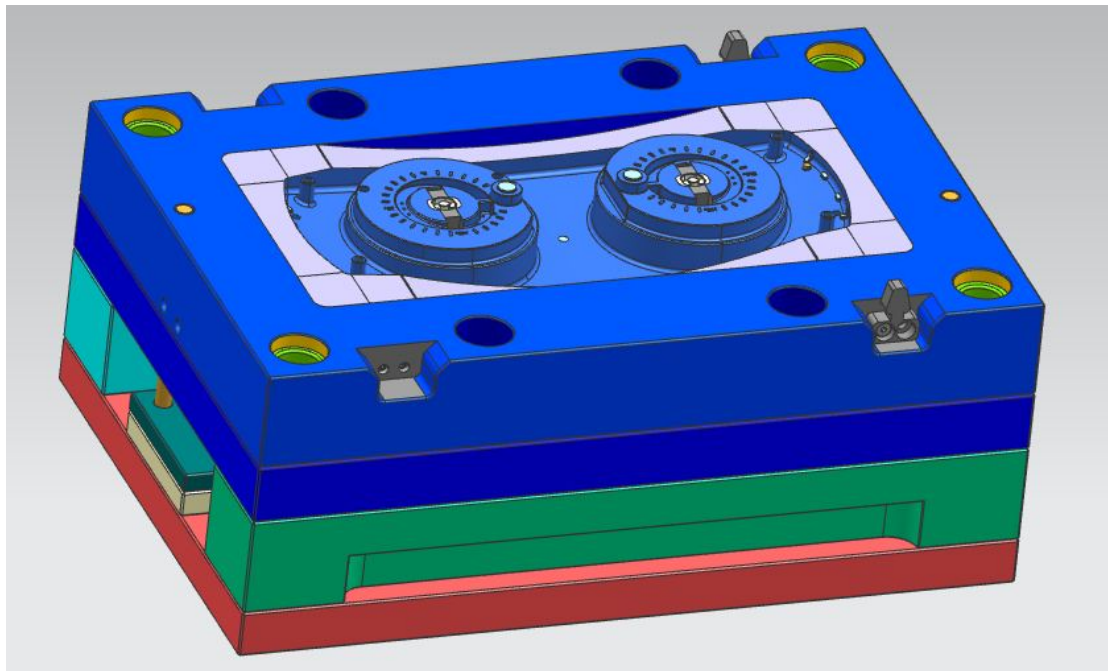
Εικόνα 2.3: Τομή ολικού συναρμολογήματος

Για να γίνει τώρα κατανοητό τι προσπαθεί η παρούσα ενότητα να μελετήσει απεικονίζονται χωριστά το σταθερό και το κινητό μέρος του καλουπιού σε 3-διάστατη άποψη. Σημειώνεται ότι κατασκευαστικά σχέδια για περαιτέρω κατανόηση της δομής του καλουπιού υπάρχουν στο παράρτημα της εργασίας.

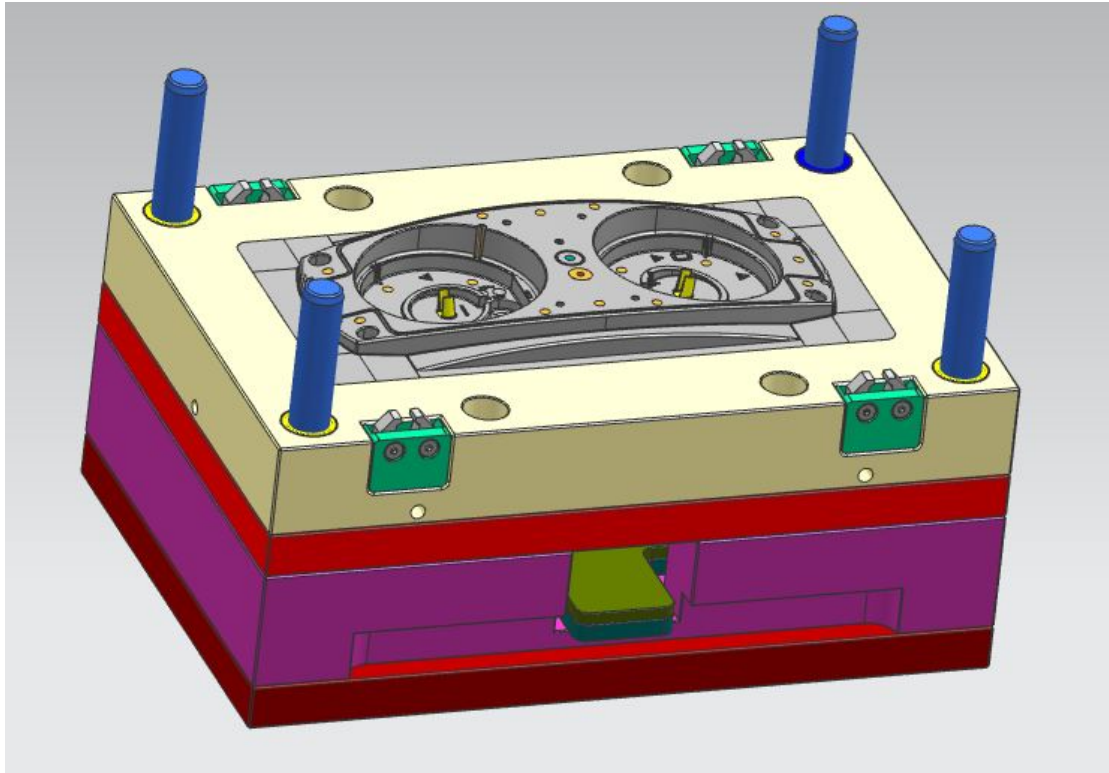
Το κινητό και το σταθερό μέρος λοιπόν πρέπει όταν το καλούπι κλείσει από την κίνηση των πλατών της μηχανής να ευθυγραμμιστεί έτσι ώστε τόσο η μορφή στο κινητό μέρος (θηλυκή γεωμετρία στην προκειμένη περίπτωση) και η μορφή στο σταθερό μέρος (αρσενική γεωμετρία) να ευθυγραμμιστούν όσο τελειότερα είναι δυνατόν, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η δημιουργία σκαλοπατιού στην γραμμή διαχωρισμού, το οποίο σκαλοπάτι είναι αυτό που τελικά δημιουργεί το flash. Σημειωτέον ότι σε αυτό το καλούπι διακρίνεται ότι η μορφολογία που δίνει την ανεστραμμένη μορφή και δημιουργεί το αντικείμενο δεν είναι ενιαία με την εκάστοτε πλάκα, αλλά είναι κατεργασμένη σε ένθετα (εργαλειοχάλυβας P20/Imrax της χαλυβδοπαραγωγού εταιρείας Uddeholm) κυρίως για διευκόλυνση της κατασκευασιμότητας και ελαχιστοποίηση του αφαιρούμενου όγκου κατά την αφαίρεση υλικού.

Τον ρόλο του κεντραρίσματος αναλαμβάνουν οι πείροι και τα δαχτυλίδια του καλουπιού (Pins and bushings) οι οποίοι και φαίνονται στις 3D αναπαραστάσεις στις τέσσερις γωνίες του καλουπιού. Ο κάθε πείρος συναρμόζεται στο απέναντι αντίστοιχο δαχτυλίδι, μέσω ολίσθησης του άξονα στο τρήμα. Εδώ οι πείροι είναι στο σταθερό μέρος και τα δαχτυλίδια στο κινητό, ενώ πρόκειται για εξαρτήματα που οι κατασκευαστές καλουπιών και μητρών προμηθεύονται γενικά από το εμπόριο, πλην ειδικών περιπτώσεων.

Η όλη επίτευξη λοιπόν του κεντραρίσματος εξαρτάται από τη λειτουργία και συναρμογή των ζευγών πείρου-δαχτυλιδιού. Τις διαστασιολογικές και γεωμετρικές παραμέτρους που σχετίζονται με αυτά τα συνεργαζόμενα εξαρτήματα και την επίδραση στο τελικό υλοποιούμενο κεντράρισμα (mold halves alignment) θα εξετάσει η ανάλυση ανοχών μέσω της Monte Carlo.

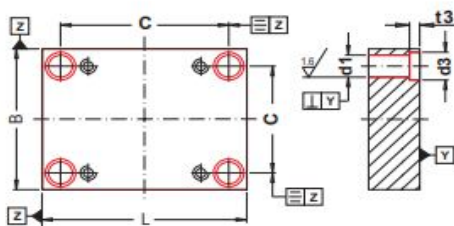


Εικόνα 2.4! Κινητό μέρος του καλουπιού, όπου φαίνονται στις γωνίες με πράσινο χρώμα τα δαχτυλίδια κεντραρίσματος



Εικόνα 2.5 Σταθερό μέρος του καλουπιού, όπου φαίνονται στις γωνίες με κίτρινο χρώμα οι πείροι κεντραρίσματος

Οι πείροι και τα δαχτυλίδια τοποθετούνται κατά τη συναρμολόγηση του καλουπιού σε προδιαμορφωμένες από τον κατασκευαστή οπές στις πλάκες που φωλιάζουν και τα ένθετα της αρσενικής και θηλυκής γεωμετρίας. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν ήδη οι προδιαγραφές των στοιχείων εισόδου. Η καλουπιέρα εδώ είναι της εταιρείας προμήθειας εξαρτημάτων και μηχανισμών για καλούπια και μήτρες Meusburger. Συγκεκριμένα πρόκειται για βάση καλουπιού διαστάσεων 396 X 596mm με κέντρα οπών κατά την έννοια του x (όπου ως x θα χαρακτηρίζεται η μεγάλη διάσταση, ενώ ως y η μικρότερη) 524mm από οπή σε οπή και 324 κατά την έννοια του y, για την οποία όπως φαίνεται και από τον κατάλογο του κατασκευαστή που ακολουθεί, ισχύει για τις γεωμετρικές θέσεις των οπών η διάσταση που συμβολίζεται ως C. Για τις δεδομένες διαστάσεις καλουπιού λαμβάνεται κατά την x διεύθυνση $C_x = 524 \pm 0,014\text{mm}$ και κατά την y $C_y = 324 \pm 0,01\text{mm}$.



C	B / L	F..	d3	+0,5 0
	≤ 296	+0,006 -0,006	t3	+0,2 0
	≤ 496	+0,010 -0,010		
	≤ 1196	+0,014 -0,014		

d1	∅	F..	∅	F 55	I / Y	F..
	14	+0,016 0	13,8	+0,020 0		
	20	+0,018 0	19,7	+0,026 0	0,10	
	26	+0,018 0	25,6	+0,026 0		
	30	+0,020 0	29,5	+0,028 0		
	42	+0,022 0	41,4	+0,030 0		
	54	+0,026 0				
66	+0,030 0					

Εικόνα 2.6: Ανοχές θέσεις πλακών της εταιρείας Uddeholm

Καθότι η υλοποίηση της Monte Carlo θα γίνει σε περιβάλλον CAD με διαστασιολογική αναφορά ως προς το κέντρο του καλουπιού, πρέπει η απόσταση και η ανοχή θέσης των κέντρων των σπών που δίνονται μεταξύ των, να αναχθούν σε διαστάσεις οριζόμενες από το κέντρο του καλουπιού. Γενικά στο διεθνές πρότυπο ορισμού μηχανολογικών ανοχών, η ανοχή μίας διάστασης κατά IT στο ISO 286 δίνεται από τον τύπο:

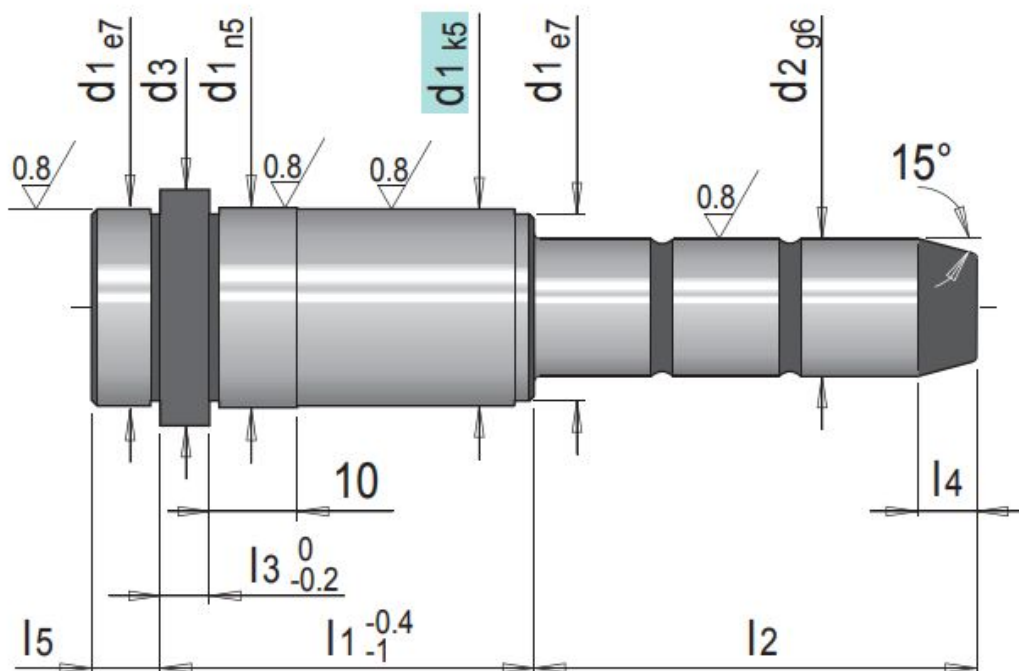
$$T = 10^{0.2 \times (ITG-1)} \cdot (0.45 \times \sqrt[3]{D} + 0.001 \times D) \quad (25)$$

Όπου T η ανοχή σε μm , ITG η κλάση IT (IT Grade) που είναι ένας θετικός ακέραιος εξαρτώμενος από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές και D ο γεωμετρικός μέσος της διάστασης σε mm .

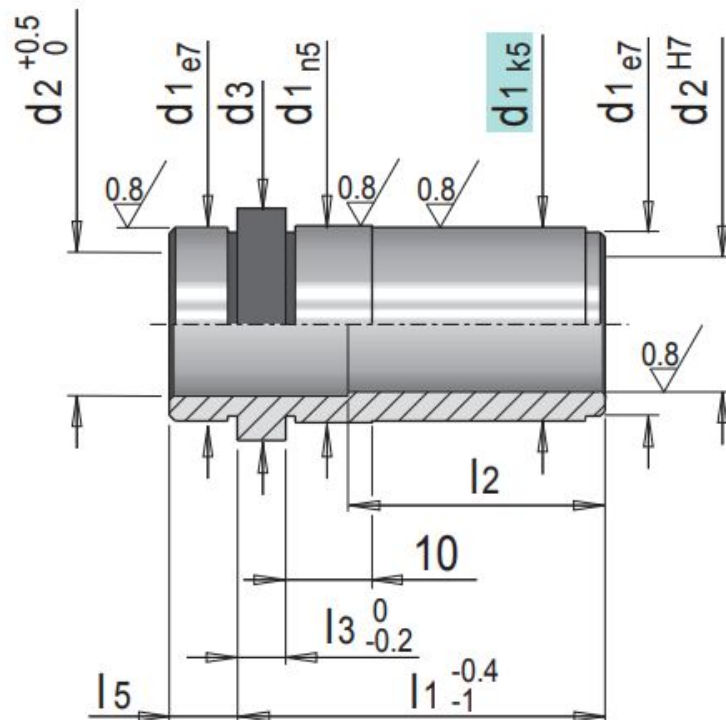
Η παραπάνω σχέση προκύπτει από σειρά Renard, μία γεωμετρική πρόοδο που χρησιμοποιείται σε διάφορα συστήματα για την εκλογή προτιμώμενων αριθμών (preferred numbers/values). Ο όρος $10^{0.2}$ γράφεται και ως $\sqrt[5]{10}$, κάτι που υποδεικνύει ότι πρόκειται για σειρά Renard R5.

Αντικαθιστώντας τις τιμές που δίνονται από τον κατάλογο στον τύπο και κάνοντας δοκιμές για την τιμή του ITG προκύπτει ότι οι τιμές των ανοχών του καταλόγου για τις δεδομένες ονομαστικές διαστάσεις αντιστοιχούν σε $ITG=5$. Έτσι, και καθώς μας ενδιαφέρουν οι διαστάσεις κατά το ήμισυ δηλαδή κατά $x = 524/2=262\text{mm}$ και κατά $y = 324/2=162\text{mm}$ λαμβάνονται ανοχές $S_x = 262 \pm 0,010\text{mm}$ και κατά την $y = 162 \pm 0,008\text{mm}$.

Ακολουθούν τα σχέδια που διαθέτει η εταιρεία Meusburger για τους πείρους και τα δαχτυλίδια, όπου $d1=42\text{mm}$ και $d2=30\text{mm}$



Σχήμα 2.21: Σχέδιο πείρου κεντραρίσματος της εταιρείας Meusburger



Σχήμα 2.22 Σχέδιο δαχτυλιδιού κεντραρίσματος της Meusburger

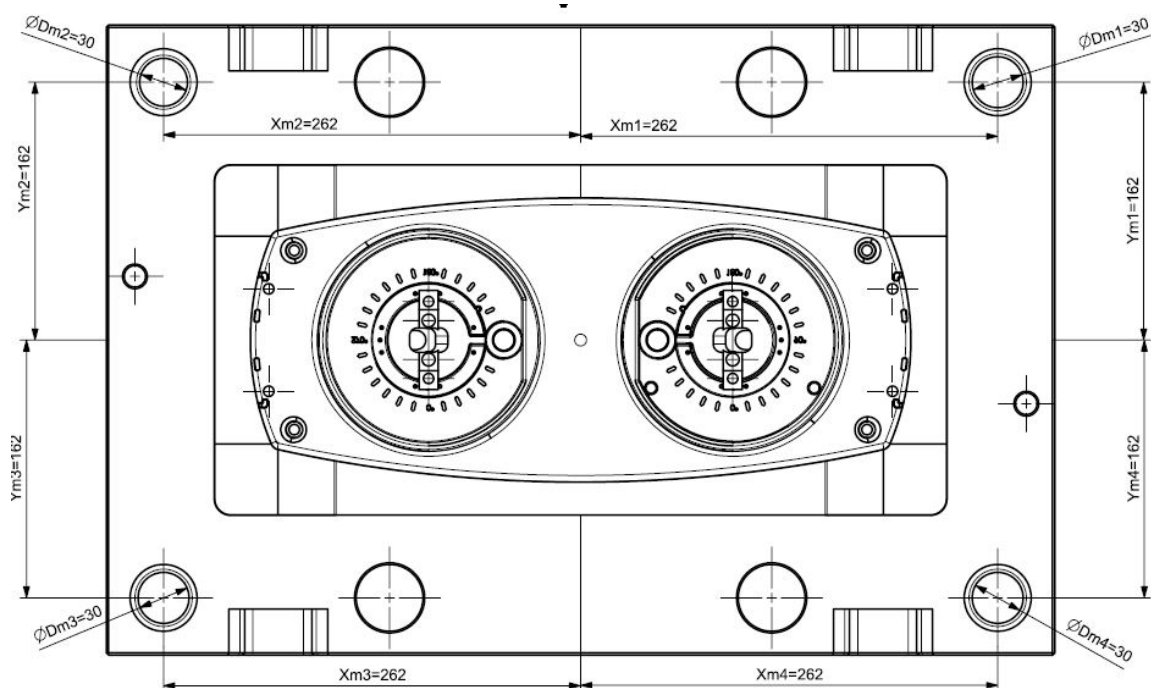
Τα δαχτυλίδια και οι πείροι λόγω της διάστασης $d1$ με ανοχή διάστασης $n5$, φωλιάζουν πάντα στην αντίστοιχη πλάκα του καλουπιού με σφιχτή συναρμογή. Για αυτό το λόγο δεν χρειάζεται να γίνει διερεύνηση της επίδρασης αυτής της συναρμογής (κινηματική μεταβλητή του συναρμολογήματος) αφού μπορούν να θεωρηθούν κλειδωμένα στο κέντρο της εκάστοτε οπής. Η συναρμογή που παρουσιάζει ενδιαφέρον για την ανάλυση είναι η 30 g6/H7 μεταξύ άξονα και τρήματος. Η ανοχή 30 g6 μεταφράζεται σε διαστασιολογικό εύρος ως 29,980-29,993 mm και η ανοχή 30 H7 μεταφράζεται σε 30,000-30,021 mm.

Η εφαρμογή της μεθόδου Μόντε Κάρλο συνίσταται στη δημιουργία συνόλων των μεταβλητών εισόδου από κάποια γεννήτρια τυχαίων αριθμών και στη συνέχεια εφαρμογή των τιμών που εξάγονται στο συναρμολόγημα ώστε να εξαχθεί το στοιχείο εισόδου δηλαδή το λειτουργικό αποτέλεσμα. Στο καλούπι θα συνδυαστούν οι ανοχές των διαμέτρων των αξόνων και τρημάτων με τις γεωμετρικές ανοχές θέσεων των οπών στις πλάκες από τυχαίες τιμές που θα παραχθούν και θα εφαρμοστούν με άμεσο τρόπο στο CAD. Στη συνέχεια θα επιχειρηθούν διάφορες μετακινήσεις και περιστροφές στο επίπεδο (Μετακίνηση στην 3 διάσταση πρακτικά δεν υπάρχει λόγω των δυνάμεων συμπίεσης από τη μηχανή έγχυσης όπως θα περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3) μέχρις ότου το συναρμολόγημα να παρουσιάσει πλήρη δέσμευση των κινηματικών του βαθμών ελευθερίας.

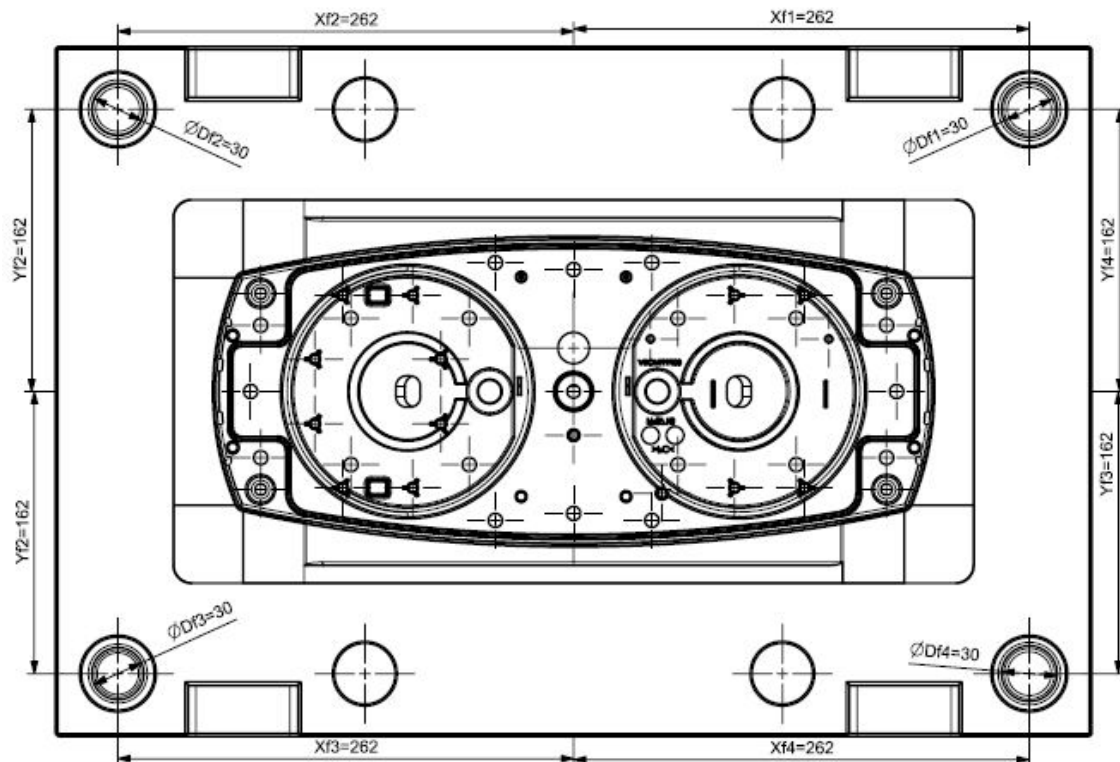
Προκειμένου να δημιουργηθούν τιμές εισόδου, χρησιμοποιείται το περιβάλλον Matlab. Η ανάλυση γίνεται με γνώμονα επίπεδο διεργασίας $\pm 3\sigma$ στις κατασκευασμένες διαστάσεις οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή με όρια αποκοπής για τις τιμές εκτός του εύρους που επιτρέπει η ανοχή. Αυτό σημαίνει ότι γίνεται διαίρεση του εύρους της ανοχής κάθε

διάστασης με το 6 και η τιμή αυτή λαμβάνεται ως τυπική απόκλιση της κατανομής της. Επίσης επειδή έχουμε αμφίπλευρα συμμετρικές όλες τις ανοχές, λαμβάνεται ως μέση τιμή της κάθε κατανομής η ονομαστική της τιμή. Έτσι στο Matlab χρησιμοποιείται η εντολή $r = \text{normrnd}(\mu, \sigma)$, η οποία επιστρέφει μία τυχαία τιμή r μίας κανονική κατανομής με μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση σ .

Για λόγους ονοματολογίας των μεταβλητών, καθώς έχουμε 24 συνολικά μεταβλητές εισόδου, 4 ανοχές σπής των δαχτυλιδιών, 4 ανοχές άξονα των πείρων και 16 ανοχές θέσης (8 σε κάθε πλάκα) ο δείκτης f θα συμβολίζει το σταθερό (fixed) μέρος και ο m το κινητό (moving). Η αρίθμηση θα γίνεται από το 1 έως το 4 ακολουθώντας ωρολογιακή φορά ως προς την κάτοψη του καλουπιού και ως 1 θα λαμβάνεται το άνω δεξιά τεταρτημόριο. Οι 24 μεταβλητές τελικά θα είναι οι: $Df1, Df2, Df3, Df4$ οι διάμετροι των 4 πείρων, $Dm1, Dm2, Dm3, Dm4$ οι διάμετροι των 4 δαχτυλιδιών, $Xf1, Xf2, Xf3, Xf4$ οι ανοχές θέσης των οπών του σταθερού μέρους κατά X , $Yf1, Yf2, Yf3, Yf4$ οι ανοχές θέσης των οπών του σταθερού μέρους κατά Y , $Xm1, Xm2, Xm3, Xm4$ οι ανοχές θέσης των οπών του κινητού μέρους κατά X , $Ym1, Ym2, Ym3, Ym4$ οι ανοχές θέσης των οπών του κινητού μέρους κατά Y , όπως φαίνεται στα ακόλουθα δύο σχέδια.



Σχήμα 2.23: Σχέδιο διαστάσεων Ανάλυσης κινητής πλάκας

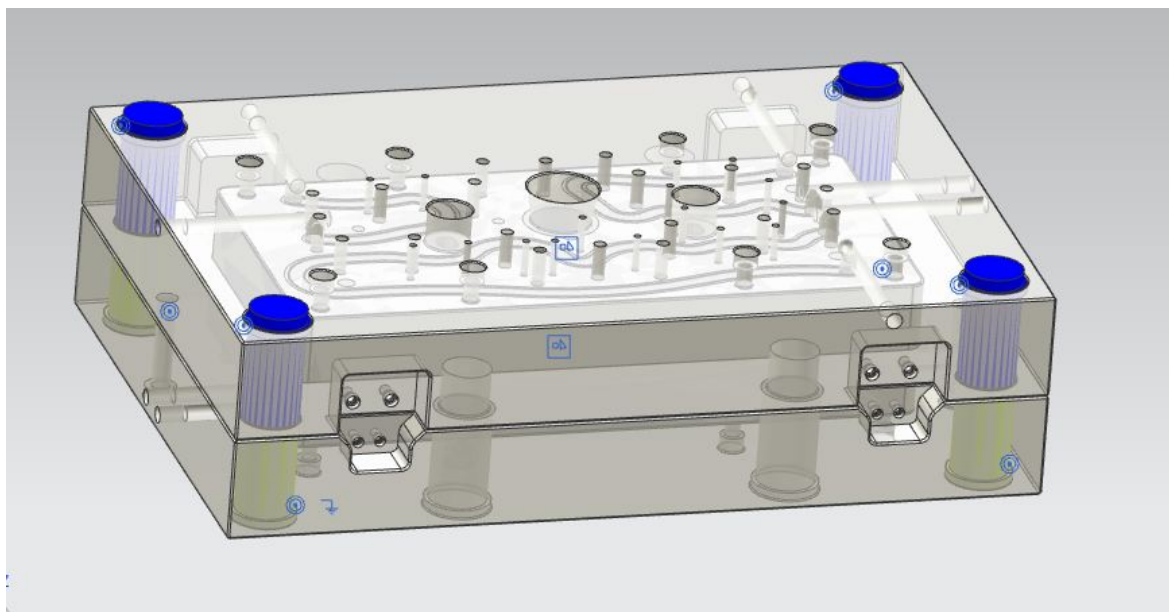


Σχήμα 2.24: Σχέδιο διαστάσεων Ανάλυσης σταθερής πλάκας

Έχοντας εξάγει για κάθε κινηματικό τρέξιμο το σετ των παραπάνω μεταβλητών εισόδων από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών του Matlab, απομονώνεται το υποσυναρμολόγημα μόνο των 2 πλακών του καλουπιού, των ενθέτων και των πείρων-δαχτυλιδιών προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση των δυνατών μετατοπίσεων και δημιουργείται ένα 3D αρχείο στο CAD (περιβάλλον Siemens NX-Unigraphics), αποκλειστικό για κάθε τρέξιμο. Εισάγονται παραμετρικά στο εκάστοτε αντίγραφο του 3D μοντέλου οι διαστάσεις που προέκυψαν για κάθε τρέξιμο της γεννήτριας τυχαίων αριθμών, οι οποίες φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (12 διαφορετικά σετ).

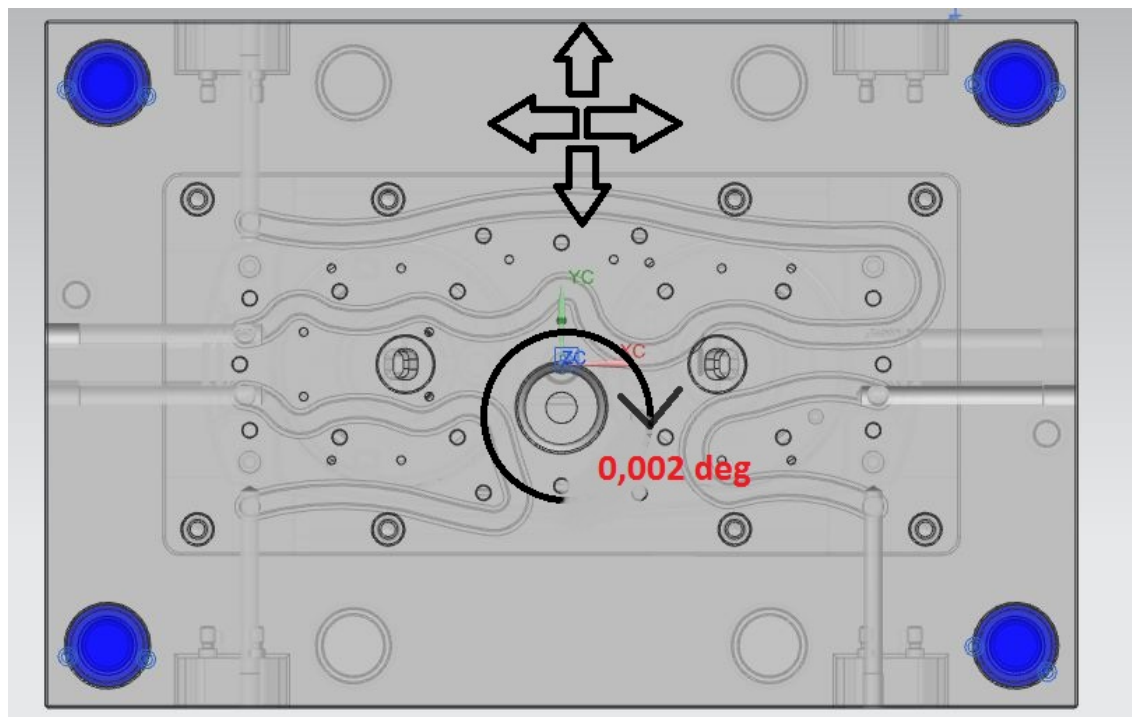
Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα γεννήτριας τυχαίων αριθμών

Variable	Run No	NORMALLY DISTRIBUTED INPUT VARIABLES											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Df1		30,003	30,013	30,013	30,015	30,011	30,023	30,008	30,010	30,010	30,013	30,013	30,015
Df2		30,005	30,014	30,010	30,011	30,004	30,007	30,009	30,002	30,014	30,014	30,010	30,011
Df3		30,011	30,009	30,015	30,011	30,011	30,015	30,013	30,013	30,010	30,009	30,015	30,011
Df4		30,012	30,022	30,008	30,012	30,009	30,003	30,008	30,012	30,007	30,022	30,008	30,012
Xf1		261,999	262,006	262,003	262,003	261,994	262,002	261,997	262,001	262,000	262,006	262,003	262,003
Xf2		262,002	262,001	262,001	261,996	262,003	261,999	261,994	262,002	262,005	262,001	262,001	261,996
Xf3		261,996	262,001	261,997	262,005	261,998	261,999	262,000	262,004	262,002	262,001	261,997	262,005
Xf4		261,999	261,996	261,991	261,999	262,001	261,999	262,003	261,999	262,003	261,996	261,991	261,999
Yf1		161,998	161,993	162,002	161,997	161,999	162,004	161,997	161,997	162,000	161,993	162,002	161,997
Yf2		162,001	161,996	161,998	161,997	161,997	161,999	162,003	162,003	162,001	161,996	161,998	161,997
Yf3		162,003	162,011	161,997	161,998	162,001	162,002	162,000	162,002	162,001	162,011	161,997	161,998
Yf4		162,000	162,009	162,004	162,003	162,002	161,998	162,000	161,999	162,001	162,009	162,004	162,003
Dm1		29,986	29,988	29,988	29,985	29,990	29,984	29,986	29,984	29,987	29,988	29,988	29,985
Dm2		29,985	29,987	29,984	29,989	29,985	29,987	29,986	29,986	29,985	29,987	29,984	29,989
Dm3		29,986	29,990	29,988	29,984	29,989	29,988	29,985	29,985	29,986	29,990	29,988	29,984
Dm4		29,988	29,985	29,987	29,992	29,983	29,986	29,988	29,987	29,986	29,985	29,987	29,992
Xm1		261,995	262,000	261,998	262,000	261,999	262,002	262,004	262,002	262,002	262,000	261,998	262,000
Xm2		261,997	262,000	262,000	262,005	262,004	261,996	261,999	261,996	262,000	262,000	262,001	262,005
Xm3		261,994	262,004	262,001	261,998	262,000	261,999	262,008	262,001	262,000	262,004	262,001	261,998
Xm4		262,000	262,002	262,000	261,998	261,999	261,995	261,996	261,999	261,998	262,002	262,000	261,998
Ym1		161,999	162,002	162,004	162,002	161,994	162,001	161,999	161,996	162,001	162,002	161,999	162,002
Ym2		161,997	162,004	161,999	162,000	161,997	162,003	161,997	162,001	162,000	162,004	161,997	162,000
Ym3		162,003	162,002	161,997	161,997	162,004	162,000	162,005	162,000	161,997	162,002	162,004	161,997
Ym4		162,000	162,005	162,002	162,002	161,996	161,999	161,997	162,003	161,996	162,005	162,002	162,002

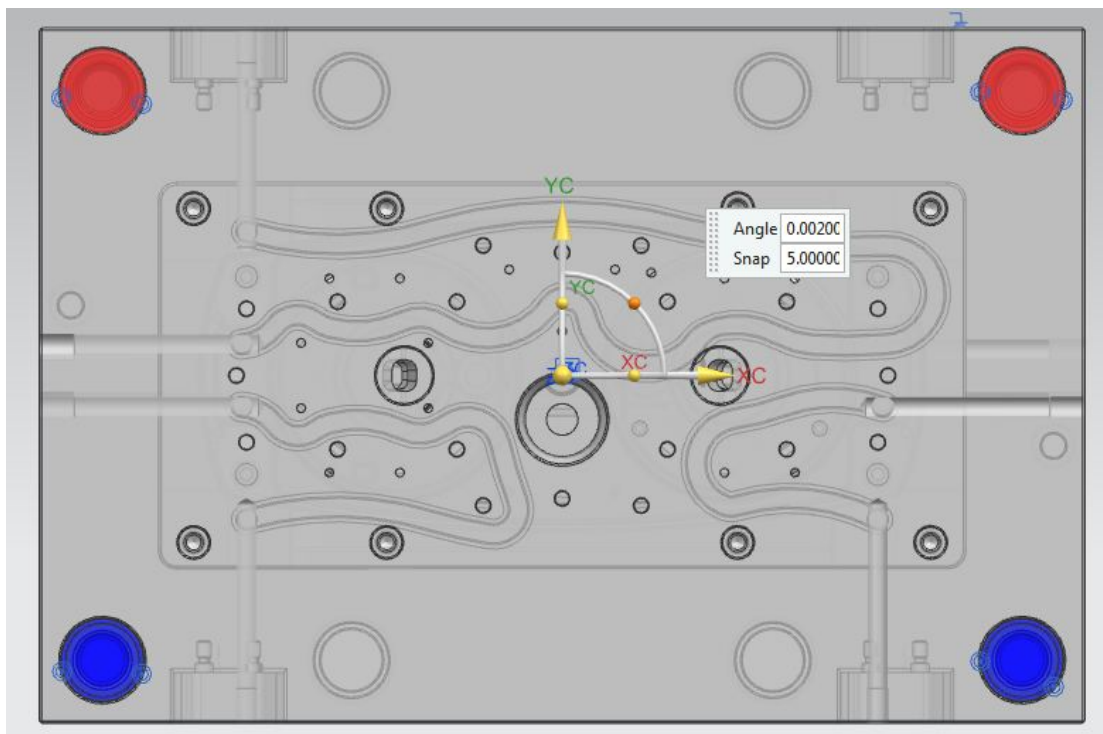


Εικόνα 2.7: Το υπο-συναρμολόγημα που δημιουργήθηκε αποκλειστικά για την προσομοίωση της κίνησης του απολύτου στερεού σώματος

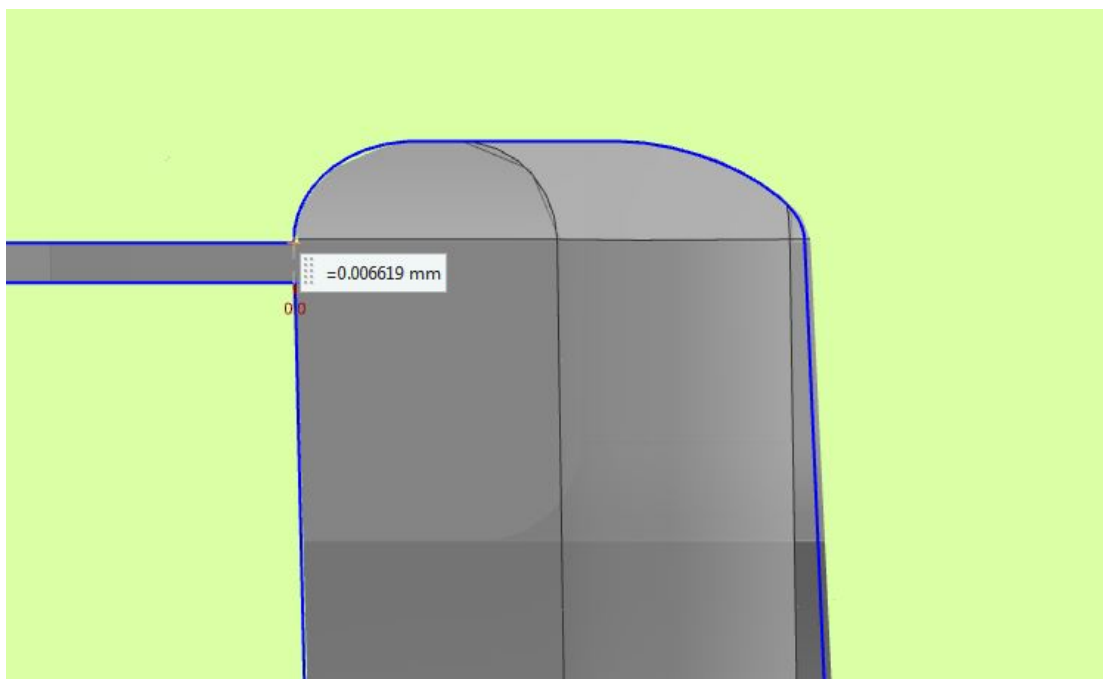
Μέσα στο αρχείο του CAD που φορτώνονται οι μεταβλητές κάθε προσομοίωσης επιδιώκεται να ευρεθεί η μετακίνηση που θα δώσει το χειρότερο σενάριο για την ποσοτική υπόσταση του flash κατά μήκος της γραμμής διαχωρισμού. Όπως αναφέρθηκε οι δυνατές κινήσεις κείτονται στο επίπεδο XY του καλουπιού (Z είναι ο άξονας παράλληλα με το extruder της μηχανής έγχυσης) και συνίστανται σε μετατοπίσεις κατά τον X και Y άξονα και περιστροφή ως προς το κάθετο διάνυσμα του επιπέδου. Οι μετατοπίσεις γίνονται από τον χρήστη του σχεδιαστικού προγράμματος και απαιτούν αρκετές δοκιμές trial and error μέχρι να ευρεθεί η θέση εκείνη που δίνει το μέγιστο μήκος προεξοχής. Ως αποτέλεσμα λαμβάνεται μία τιμή για το μήκος της προεξοχής ως προς τον άξονα X και μία τιμή ως προς τον άξονα Y, μετρούμενη με τα εργαλεία του Cad. Η κάθε δοκιμαζόμενη αλληλουχία κινήσεων τερματίζεται όταν υπάρξει επαφή κλειδώματος μεταξύ κάποιων πείρων ή και δαχτυλιδιών, όπου πρακτικά η καλουπιέρα έχει περιοριστεί κινηματικά. Η επαφή γίνεται αντιληπτή από το χρήστη με τη χρήση του εργαλείου Collision Detection, το οποίο και υποδεικνύει χρωματικά πότε υπάρχει interference μεταξύ εξαρτημάτων του συναρμολογήματος. Για να γίνει η διαδικασία κατανοητή και οπτικά δίνεται το παράδειγμα του πρώτου Run.



Εικόνα 2.8: Παράδειγμα κινήσεων στο Cad για το 1^ο Run. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρειάστηκε μόνο περιστροφή ωρολογιακά για να επιτευχθεί το μέγιστο flash.



Εικόνα 2.9 Εντοπισμός κλειδώματος μέσω Collision Detection, το κόκκινο χρώμα δείχνει τα εξαρτήματα που έχουν επαφή.



Εικόνα 2.10: Μέτρηση του ψαλιδίσματος των ακμών του Parting Line, όπου όταν το καλούπι γεμίσει με υλικό θα δημιουργηθεί προεξοχή-flash.

Τα αποτελέσματα των 12 προσομοιώσεων παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2: Αποτελέσματα των προσομοιώσεων

	RESULTING FLASH (mm), CAD OUTPUT											
Run No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x-dir flash	0,0075	0,009	0,005	0,007	0,007	0,0095	0,006	0,008	0,013	0,011	0,006	0,002
y-dir flash	0,006	0,016	0,006	0,005	0,002	0,006	0,019	0,004	0,005	0,004	0	0,007

Προκειμένου να αξιολογηθούν στατιστικά τα αποτελέσματα εφαρμόζονται τα εξής:

Από τα 12 κινηματικά runs εξάγεται μέση τιμή στον άξονα x $\mu_x=0,0077$ mm =7,7 μ m flash με τυπική απόκλιση $S_x=2,9$ μ m και στον άξονα y $\mu_y=6,7$ μ m και $S_y=5,5$ μ m.

Από τον πίνακα επιλεγμένων τιμών της κατανομής t-Student, για μονόπλευρη κρίσιμη περιοχή και 12-1=11 βαθμούς ελευθερίας, έχουμε για διάστημα εμπιστοσύνης 99% (λόγω ανάλυσης επιπέδου $\pm 3\sigma$) ότι οι τιμές του πιθανοσυνόλου έχουν τυπική απόκλιση ίση με: $\sigma_x=2,718 \times 2,9= 7,8$ μ m και $\sigma_y=14,9$ μ m. Τελικά προκύπτει ότι για το πιθανοσύνολο με πιθανότητα $(1-\alpha)=99\%$ ισχύει:

Για τη διεύθυνση x: $7,7 \pm 7,8 \Rightarrow 15,5$ μ m μέγιστη τιμή

Για τη διεύθυνση y: $6,7 \pm 14,9 \Rightarrow 21,6$ μ m μέγιστη τιμή

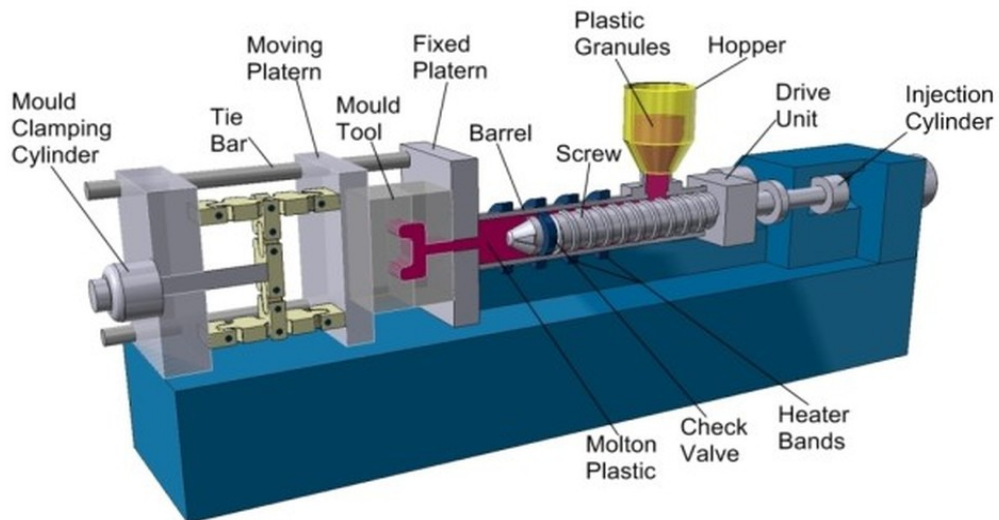
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση της Επίδρασης των Λειτουργικών Παραμέτρων

3.1 Βασικές λειτουργικές αρχές μηχανών Injection

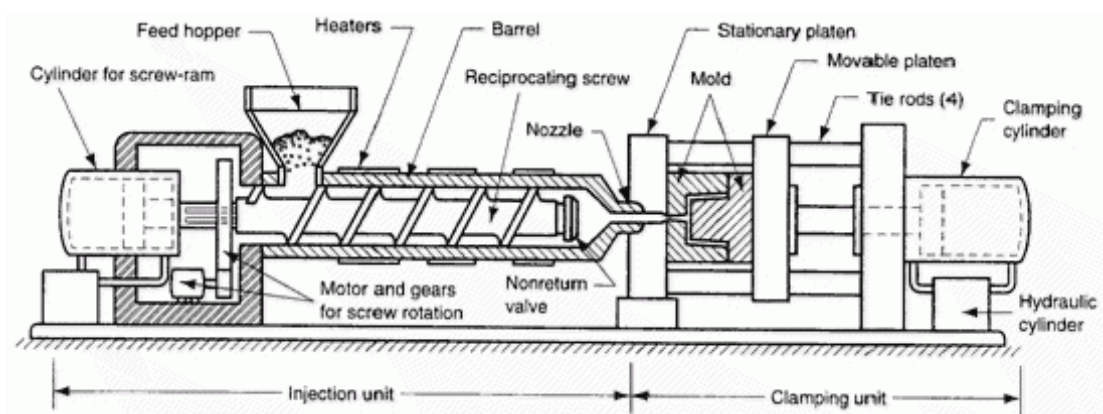
Το δεύτερο τεχνικό σκέλος της παρούσας εργασίας ασχολείται με την επίδραση που έχουν οι λειτουργικές παράμετροι κατά τη διάρκεια και μέχρι το πέρας του κύκλου έγχυσης του πλαστικού από μία δυναμική σκοπιά.

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι το θέμα της συμπεριφοράς του καλουπιού όταν είναι σε λειτουργία πλέον παραγωγής, είναι πολυδιάστατο και πορεί να μελετηθεί σε διάφορα βάθη και στάδια. Βασική ενότητα του προβλήματος αποτελεί η επίδραση των πιέσεων έγχυσης στα διάφορα στάδια που περιλαμβάνει αυτή και η δύναμη κλεισίματος που ασκεί η μηχανή στο καλούπι προκειμένου να παραμείνει όσο το δυνατόν σχετικά ανεπηρέαστο από τη διαδικασία πλήρωσης του πλαστικού. Οι ιδιαίτερα υψηλές τάξεις μεγέθους που παίρνουν τα προαναφερθέντα μεγέθη κατά την λειτουργία δεν αφήνουν περιθώρια αβεβαιοτήτων τόσο κατά τη φάση του σχεδιασμού όσο και της παραγωγής. Λόγω ακριβώς των υψηλών καταπονήσεων, δημιουργούνται φαινόμενα που μπορεί να επηρεάζουν την ποιότητα του παραγόμενου αντικειμένου όπως είναι η περίπτωση του flash που πραγματεύεται και η παρούσα εργασία, όπως επίσης το φαινόμενο της διαφοροποίησης των διαστάσεων του αντικειμένου από τις επιθυμητές προδιαγραφές. Πέρα από αυτά όμως μπορεί να εμφανιστούν δυνητικά πιο επικίνδυνες καταστάσεις όπως αστοχίες σε μηχανισμούς του καλουπιού, ζημιές στις φόρμες αρσενικού και θηλυκού ή ακόμα και αστοχία στην ίδια τη μηχανή Injection. Τα προηγούμενα υποδεικνύουν τη μεγάλη σημασία της ανάλυσης της λειτουργίας προκειμένου να προβλεφθούν και να αποφευχθούν ζημιές οικονομικής και χρονικής φύσεως.

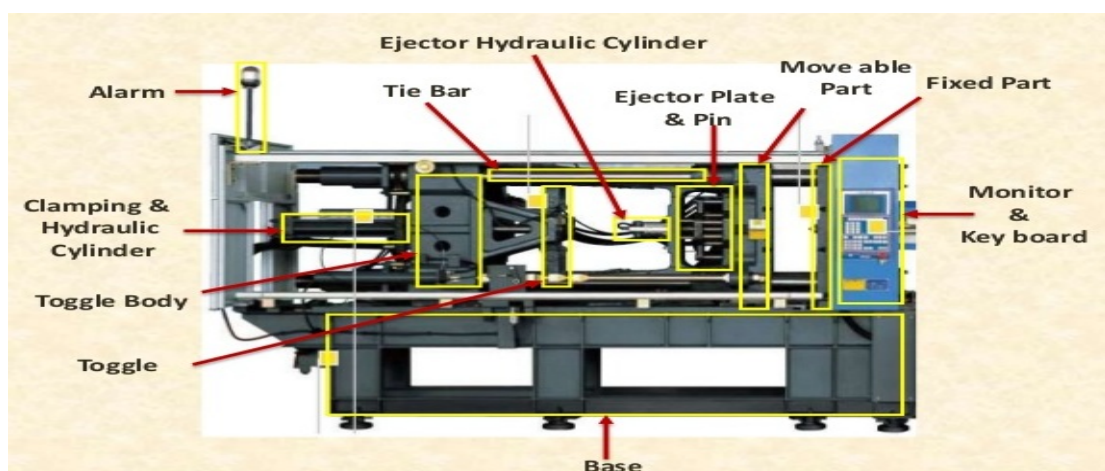
Παρουσιάζεται μέσω των ακόλουθων εικόνων το γενικό layout μίας μηχανής έγχυσης πλαστικού μαζί με το καλούπι, ώστε να γίνει κατανοητή η δομή και να μπορεί να γίνει ευκολότερα κατανοητή η ροή και η παραλαβή των διαφόρων δυνάμεων και των προκαλούμενων παραμορφώσεων.



Εικόνα 3.11: Γενική άποψη κοινής μηχανής injection



Εικόνα 3.12: Τομή μηχανής injection όπου φαίνονται οι βασικοί μηχανισμοί της και που επιτελούν τις απαραίτητες διαδικασίες λειτουργίας.



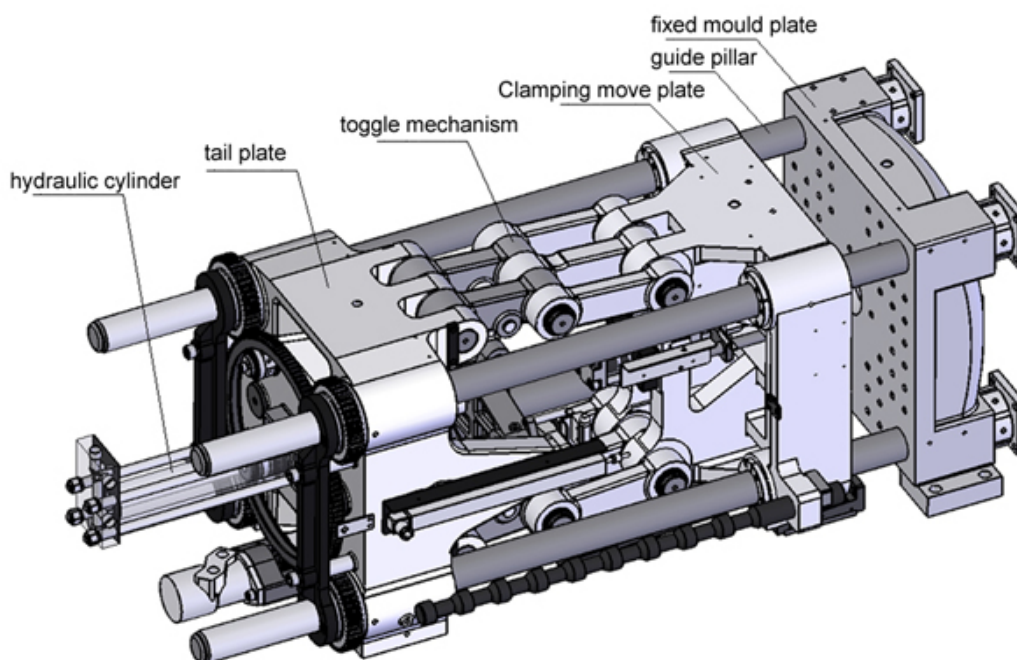
Εικόνα 3.13: Μηχανή injection χωρίς περίβλημα ώστε να συσχετιστούν οι μηχανισμοί που αναφέρθηκαν σε πραγματική εικόνα

Η πίεση στην οποία γίνεται η έγχυση του υλικού από τον εκβολέα (extruder) εξαρτάται γενικά από πολλούς παράγοντες όπως το υλικό (καμπύλη συνεκτικότητας vs θερμοκρασία), τη μορφολογία του αντικειμένου δηλαδή την ύπαρξη στενώσεων που πρέπει να ξεπεραστούν για να γεμίσει πλήρως η κοιλότητα αλλά ταυτόχρονα υπάρχει το θέμα του ελέγχου της αύξησης των διατμητικών τάσεων που πάνω από κάποια τιμή οδηγεί σε διάσπαση των πολυμερικών αλυσίδων του πολυμερούς και τελικά σε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού αντικειμένου. Επίσης βασικό ρόλο έχει η πίεση του γεμίσματος στην πλήρη εξαέρωση της κοιλότητας καθώς επίσης σημαντικός παράγοντας είναι και ο απαιτούμενος χρόνος ολοκλήρωσης του κύκλου παραγωγής ώστε να είναι η διαδικασία της παραγωγής αποδοτική, χρόνος που εξαρτάται φυσικά από την πίεση πλήρωσης.

Ακολουθεί μία επιγραμματική παράθεση των βασικών σταδίων της διαδικασίας χύτευσης θερμοπλαστικών υπό πίεση:

Αρχικά γίνεται προθέρμανση του προς έγχυση υλικού το οποίο έρχεται συνήθως από τους προμηθευτές πλαστικών πρώτων υλών σε μορφή κοκκωδών σωματιδίων ή κοινώς pellets. Ανάλογα τον τύπο του πλαστικού συχνά προηγείται ένα στάδιο αποξήρανσης σε ειδική μηχανή dryer για να αφαιρεθεί η παγιδευμένη υγρασία που δημιουργεί σοβαρά ελαττώματα στο προϊόν αν παραμείνει.

Στη συνέχεια τοποθετείται το καλούπι στη μηχανή, όπου κοχλιώνεται το κινητό μέρος στο κινητό πλατώ, αυτό δηλαδή που βρίσκεται αντικριστά από τον εκβολέα και βρίσκεται σε άμεση ή έμμεση σύνδεση με τον υδραυλικό μηχανισμό που κλείνει και σταθεροποιεί το καλούπι, και το σταθερό στο πλατώ από τη μεριά του εκβολέα (Εικόνα 2.4)



Εικόνα 3.14: Φέρων σύνολο μηχανής τύπου Toggle clamp, όπου διακρίνονται τα πλατώ δεξιά

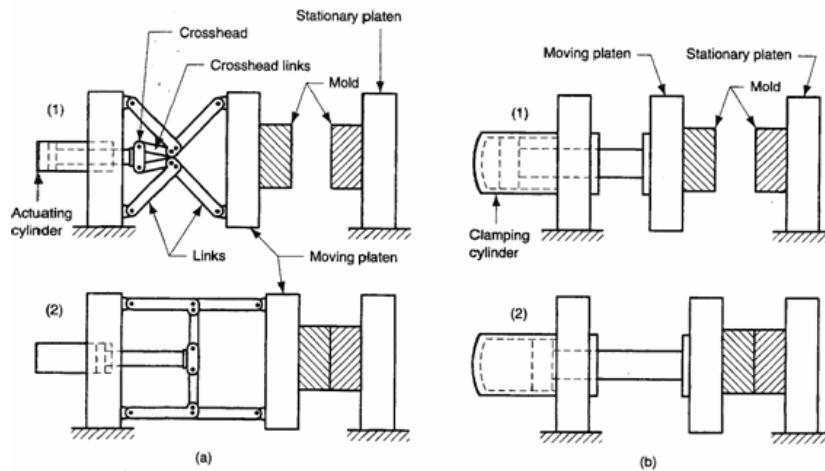
Αφού το καλούπι κεντραριστεί σωστά και γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις διαδρομής του κλεισίματος και του εξολκέα και οι έλεγχοι ασφαλούς λειτουργίας, ξεκινάει το στάδιο του γεμίσματος. Συνήθως επιλέγονται αρχικές τιμές από συνδυασμό τεχνικών δεδομένων και εμπειρίας του χειριστή της χυτόπρεσσας. Τα κυκλώματα ψύξης/θέρμανσης συνδέονται με σωληνώσεις και ρακόρ στο καλούπι, και γίνεται η προθέρμανση του που αποσκοπεί στη διευκόλυνση της ροής του πολυμερούς στις κοιλότητες της μορφής και στον περιορισμό της ανάπτυξης παραμενουσών τάσεων στο χυτό.

Το πρώτο στάδιο είναι αυτό του βασικού γεμίσματος (filling). Κατά το στάδιο αυτό γίνεται το αρχικό γέμισμα της/των κοιλοτήτων σε ποσοστά όγκου που κυμαίνονται από 90% μέχρι 99,9% του αδιαχώρητου όγκου. Στο δεύτερο στάδιο επιχειρείται να γεμίσει πλήρως ο όγκος των κοιλοτήτων, το πολυμερές αντικείμενο να αποτυπώσει όσο τελειότερα είναι δυνατόν την μορφή των τοιχωμάτων της κοιλότητας καθώς και να αποκτήσει την τραχύτητα τους. Η φάση αυτή είναι γνωστή στους παραγωγούς πλαστικών αντικειμένων ως “σιδέρωμα” (Packing and Holding) και είναι μείζονος σημασίας για την επιτυχία της όλης διαδικασίας. Περιλαμβάνει τις φάσεις της μετάβασης από το κύριο γέμισμα στο σιδέρωμα με ταυτόχρονη μετάπτωση της πίεσης και τη φάση της διατήρησης της πίεσης. Η πίεση σιδερώματος αν και συνήθως είναι μειωμένη σε σχέση με την μέγιστη πίεση γεμίσματος, εντούτοις κάθε περίπτωση είναι ξεχωριστή. Τέλος σημαντική μεταβλητή είναι αυτή του χρόνου σιδερώματος που έχει να κάνει μεταξύ άλλων αν θα κρατηθεί ή πίεση μέχρι την πλήρη στερεοποίηση του υλικού ή όχι, κάτι που πάλι εξαρτάται από την κάθε περίπτωση καλουπιού/αντικειμένου/είδους τροφοδοσίας/μηχανής έγχυσης.

Τα στάδια από εκεί και πέρα περιλαμβάνουν την αναμονή ψύξης του αντικειμένου, το άνοιγμα του καλουπιού και των διαφόρων μηχανισμών απελευθέρωσης αρνητικών γεωμετριών και τελικά την εξόλκευση του αντικειμένου, στάδια που δεν υπεισέρχεται σε βάθος η παρούσα εργασία.

Προτού γίνει υπολογιστική ανάλυση ροής στην κοιλότητα του καλουπιού και στη συνέχεια προσδιορισμός των παραμορφώσεων του συνόλου καλουπιού-μηχανής, παρουσιάζονται συνοπτικά και τα διάφορα είδη κλειστικού μηχανισμού των μηχανών injection. Αυτή η αναφορά έχει σκοπό την εξοικείωση με τον φέροντα τα φορτία μηχανισμό της μηχανής ώστε να είναι αιτιολογημένη η επιλογή των οριακών συνθηκών στη φάση της μοντελοποίησης.

Πρώτος συνήθης τύπος είναι αυτός του κλειστικού με αρθρωτά μπράτσα που φαίνεται στη Εικόνα 3.5 (α).

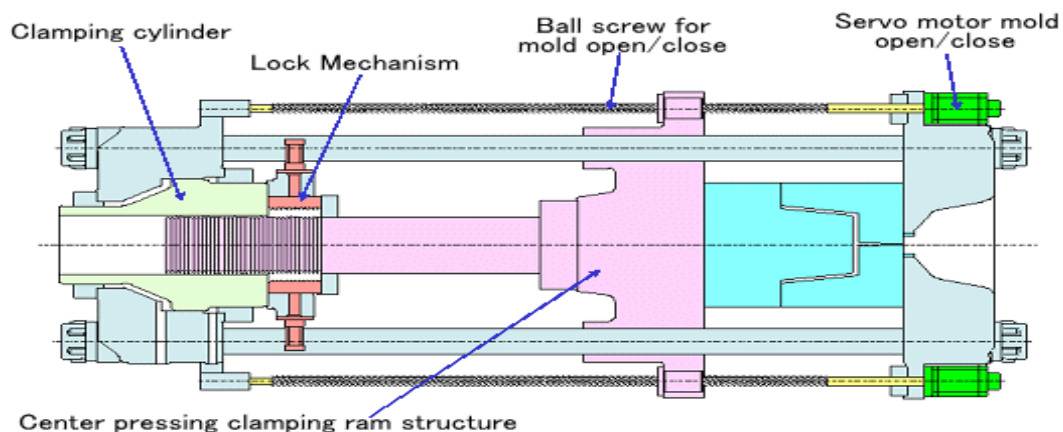


Εικόνα 3.15: (α) Μηχανή με αρθρωτό μηχανισμό κλεισίματος (β) Μηχανή με άμεσο υδραυλικό επενεργητή

Αυτός ο τύπος έχει το πλεονέκτημα του μεταβλητού μηχανικού πλεονεκτήματος. Ο επενεργητής ωθεί το πλατώ μέσω των χιαστί αρθρώσεων, επιτυγχάνοντας γρήγορη απόκριση στην αρχή του κλεισίματος και υψηλή δύναμη κλειδώματος στο τέλος της διαδρομής όπου είναι και το ζητούμενο για να επιτευχθεί υψηλό φορτίο συγκράτησης (clamping force ή tonnage-τονάζ). Συνήθως συναντάται σε μηχανές σχετικά μικρής ονομαστικής δύναμης κλεισίματος.

Ο δεύτερος τύπος που φαίνεται στην εικόνα 3.5 (β) αξιοποιεί μία άμεση σύνδεση του υδραυλικού επενεργητή με το κινητό πλατώ μέσω του βάκτρου. Βασικό πλεονέκτημα είναι ο ακριβής έλεγχος και ρυθμισιμότητα του τονάζ σε όλες τις θέσεις. Αξιοποιείται σε μηχανές δύναμης 150-1000 τόνων. Μία παραλλαγή αυτού του τύπου υλοποιείται με την εφαρμογή μηχανικού κλειδώματος στο υδραυλικό σύστημα για ακόμα υψηλότερα φορτία κλεισίματος.

Υπάρχουν και λιγότερο κλασικές λύσεις όπως οι λύσεις ηλεκτρικών μηχανών (Εικόνα 3.6), με άμεση στήριξη του πλατώ από κοχλιωμένο άξονα και μηχανισμό κλειδώματος.



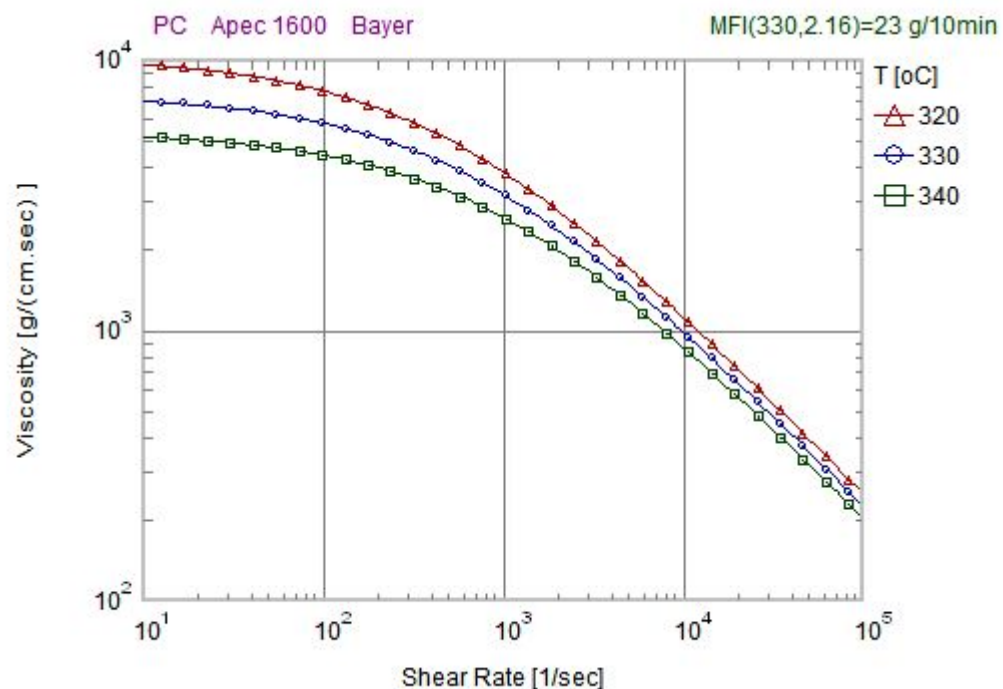
Εικόνα 3.16: Μηχανή με κλειστικό ενεργοποιούμενο από ηλεκτρικό κινητήρα

3.2 Προσομοίωση ροής πλαστικού στις κοιλότητες του υλικού

Η υπολογιστική προσομοίωση της ροικής συμπεριφοράς του πλαστικού τήγματος γίνεται κυρίως για να διερευνηθεί η κατανομή της στατικής πίεσης κατά την φάση του σιδερώματος, η οποία τελικά όπως θα φανεί συμφωνεί πλήρως με τη θεωρητική παραδοχή της πλήρους ομοιομορφίας της κατά ολόκληρη την περιβάλλουσα επιφάνεια του αντικειμένου (πρακτικά υπάρχει συμπεριφορά υδροστατικής πίεσης) λόγω δημιουργίας αδιαχώρητων συνθηκών. Με έναυσμα λοιπόν την διερεύνηση των οριακών συνθηκών της πίεσης οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην μετέπειτα ανάλυση παρμορφώσεων που πρέπει να γίνει, παρατίθενται και άλλα ενδιαφέροντα ευρήματα για τη ροή στο υπό μελέτη καλούπι.

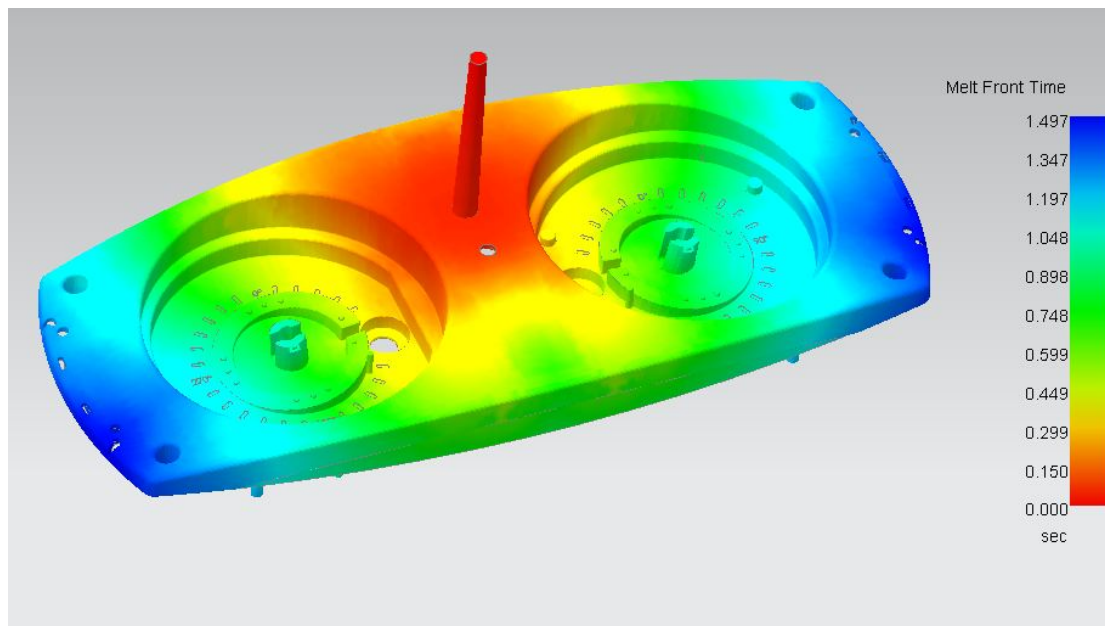
Η Ανάλυση έγινε σε περιβάλλον Moldex3D, λογισμικό που προορίζεται για ειδικευμένες αναλύσεις ροής πλαστικών σε καλούπια και την επίδραση που έχουν τα θερμικά σχεδιαστικά στοιχεία του καλουπιού σε αυτήν.

Το υλικό που ορίστηκε στην ανάλυση είναι Polycarbonate Apac 1600 της εταιρείας Bayer με μέτρο ελαστικότητας 24 GPa και ισοθερμοκρασιακές καμπύλες ιξώδους συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης:

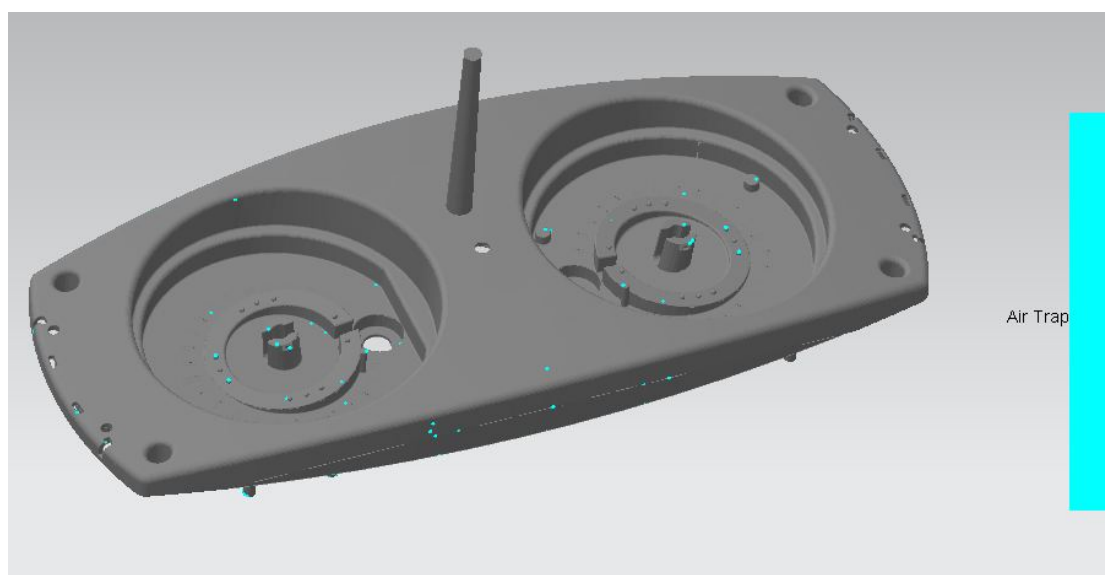


Σχήμα 3.25 Καμπύλες ιξώδους-ρυθμού διάτμησης για διάφορες θερμοκρασίες

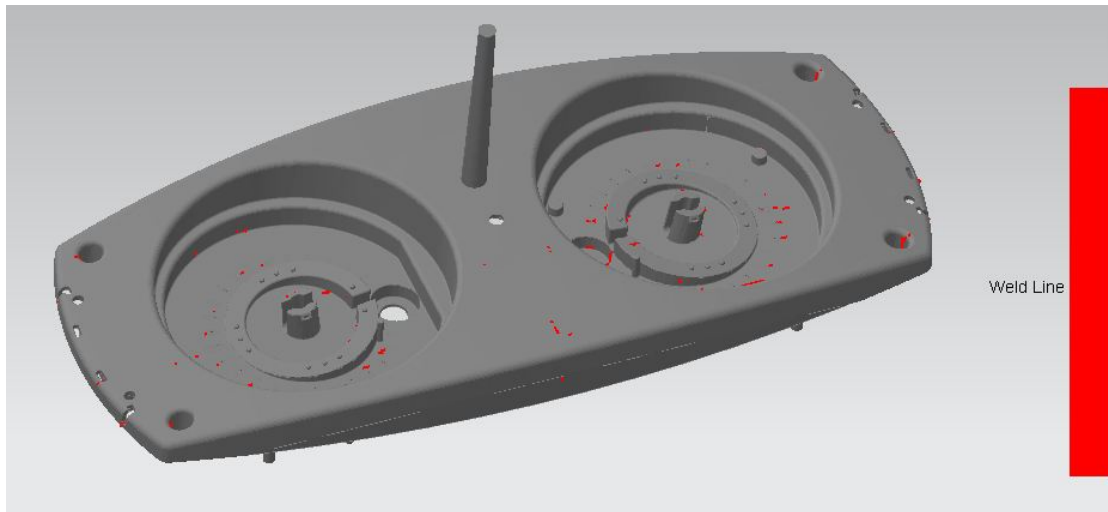
Ως συνοριακές συνθήκες τέθηκαν θερμοκρασία τήγματος στο ακροφύσιο του εκβολέα 290 °C, θερμοκρασία του καλουπιού στους 90°C ενώ ο χρόνος γεμίσματος απαιτήθηκε να είναι 1,5 s και ο χρόνος σιδερώματος 4s, όσο και τελικά υλοποιήθηκε κατά την πραγματική λειτουργική φάση του καλουπιού. Ακολουθούν τα κύρια αποτελέσματα της ανάλυσης:



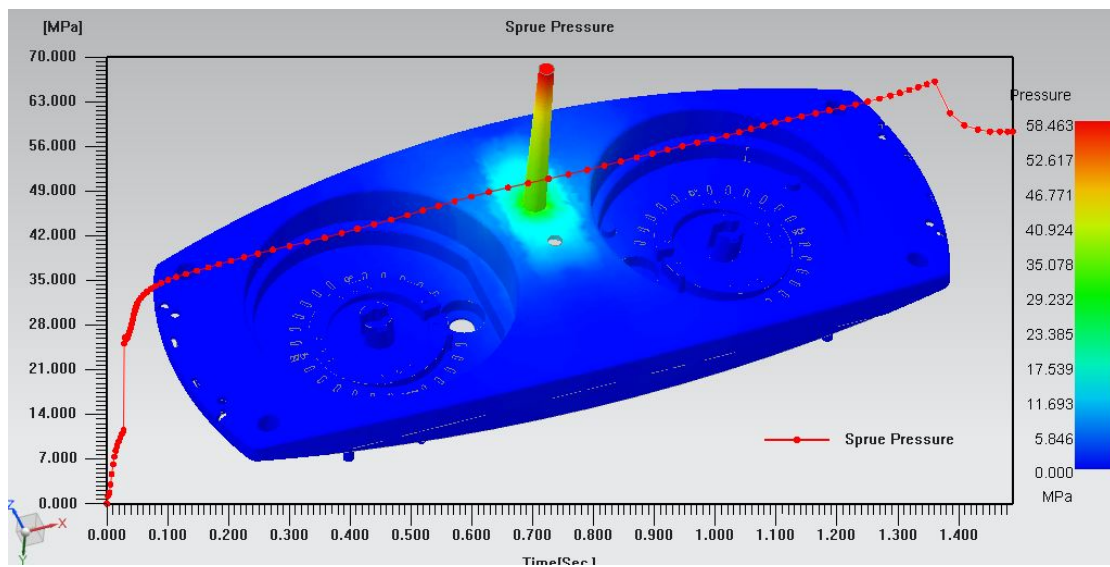
Εικόνα 3.17: Contour χρόνου γεμίσματος κάθε περιοχής του αντικειμένου (χρονική στιγμή κατά την οποία το μέτωπο του τήγματος έχει βρεθεί στο αντίστοιχο σημείο



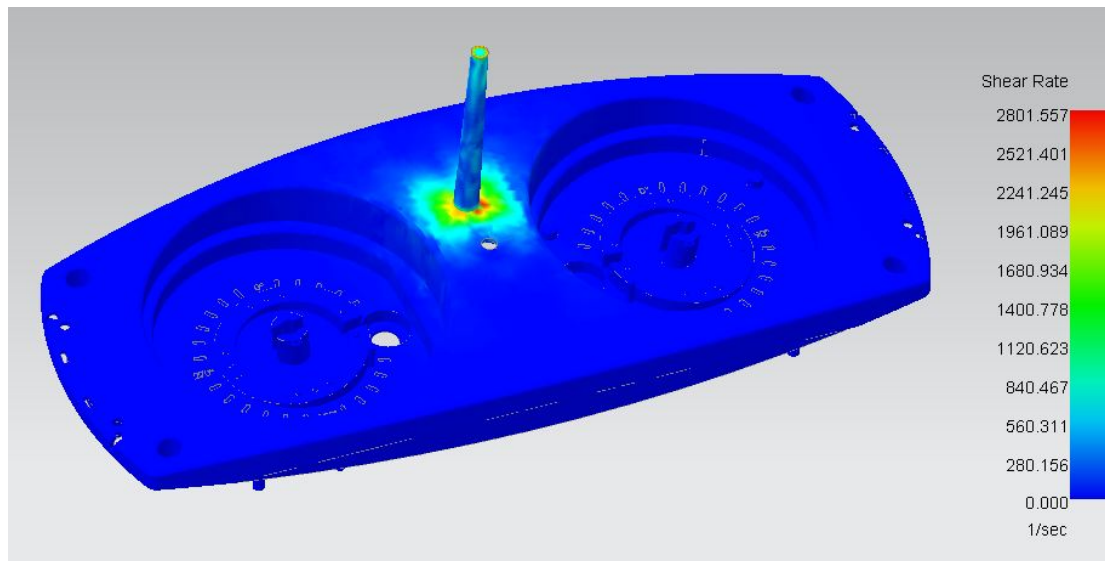
Εικόνα 3.18: Σημεία αυξημένης πιθανότητας παγίδευσης αέρα



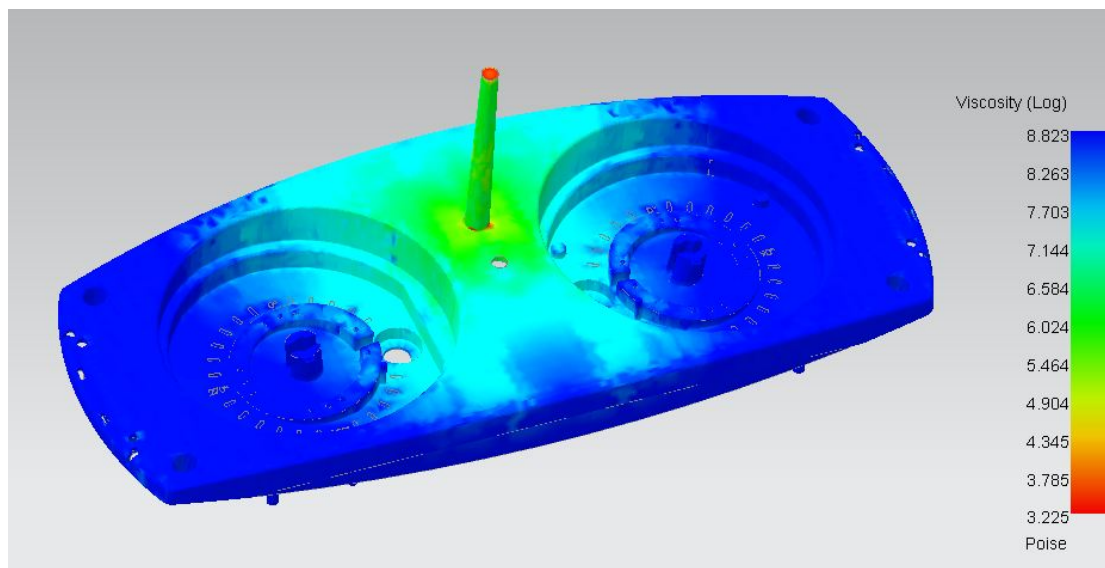
Εικόνα 3.19: Περιοχές σχηματισμού ραφών στο αντικείμενο λόγω επαφής μετώπων του τήγματος



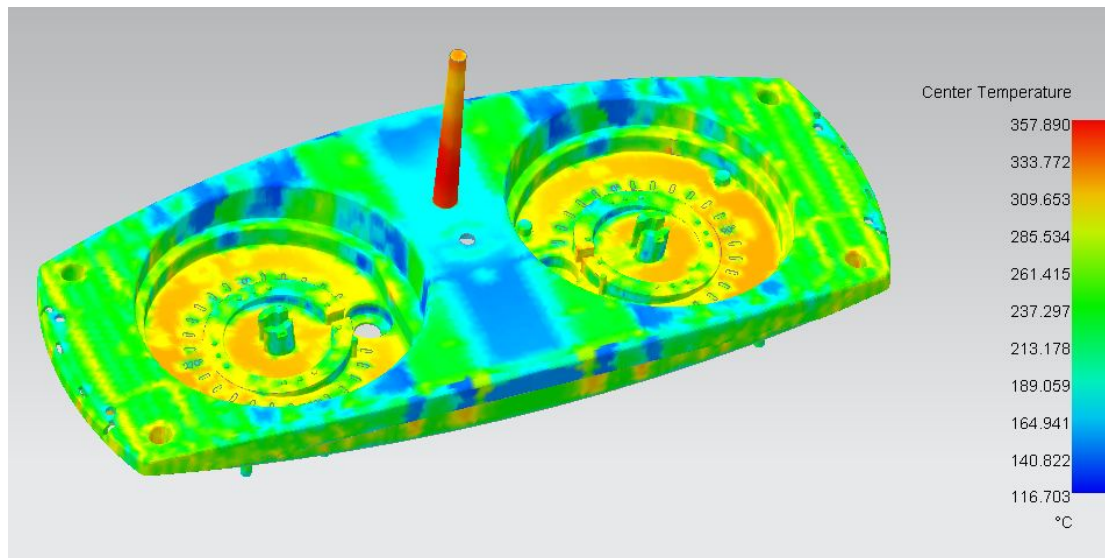
Εικόνα 3.20: Κατανομή στατικών πιέσεων στο τέλος της φάσης του κυρίου γεμίσματος και χρονικό διάγραμμα της μέγιστης στατικής πίεσης στην είσοδο της τροφοδοσίας.



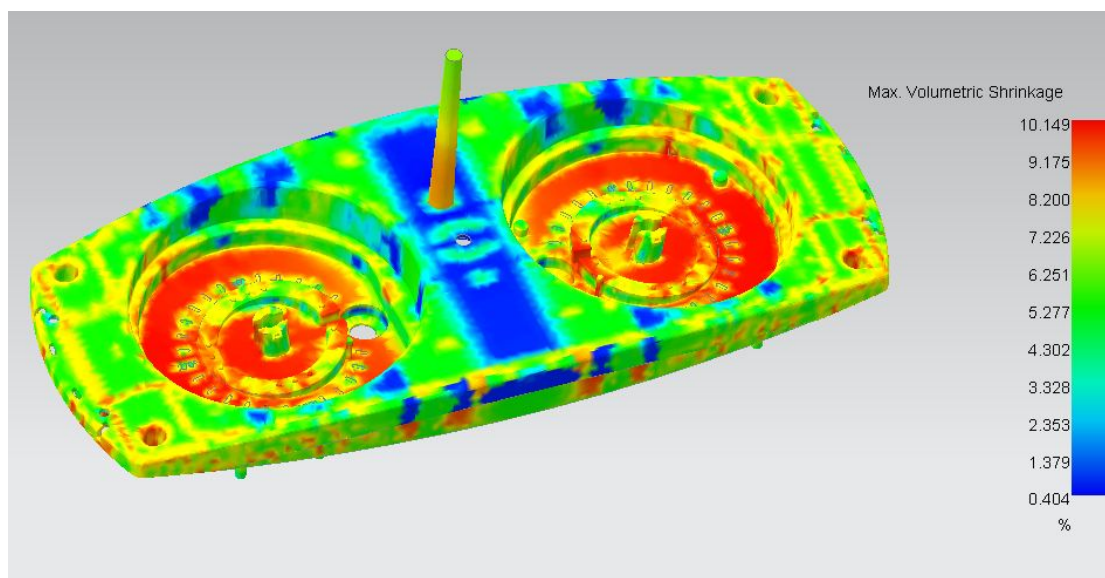
Εικόνα 3.21 Contour ρυθμού διάτμησης



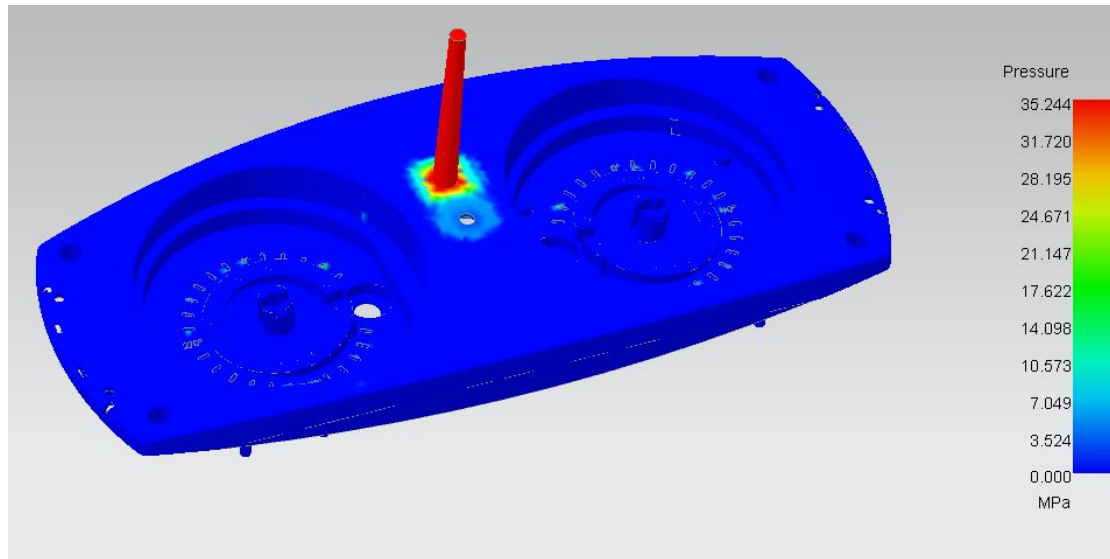
Εικόνα 3.22: Κατανομή ιξώδους συνεκτικότητας λόγω της θιξοτροπικής συμπεριφοράς του πολυμερούς



Εικόνα 3.23: Κατανομή θερμοκρασιών στο τέλος του γεμίσματος (υπόθεση ομοιόμορφα ψυχόμενης επιφάνειας του καλουπιού) στο μεσοεπίπεδο του αντικειμένου.



Εικόνα 3.24: Ογκομετρικό ποσοστό συρρίκνωσης του τήγματος μετά την πλήρη ψύξη του στα διάφορα σημεία της μορφής.



Εικόνα 3.25 Κατανομή της στατικής πίεσης στο τέλος του σιδερώματος.

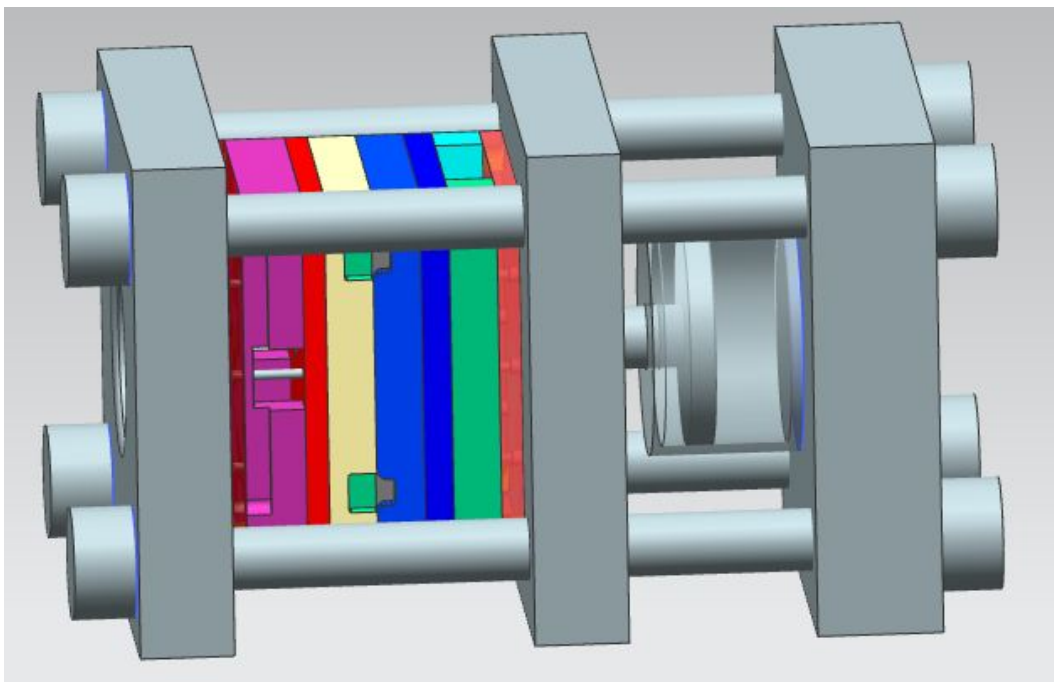
Οι τιμές στην εικόνα 3.15 δεν είναι οι υψηλότερες του σταδίου καθώς το αντικείμενο έχει πλέον στερεοποιηθεί, οπότε τα συμπεράσματα αφορούν κυρίως την ομοιομορφία της πίεσης και όχι τις απόλυτες τιμές της. Η ομοιομορφία αυτή δημιουργεί ουσιαστικά μία κατάσταση που μπορεί να μοντελοποιηθεί με την άσκηση στατικής πίεσης ίδιας τιμής παντού στο αντικείμενο, όπως και θα γίνει στη συνέχεια για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να προσομοιωθεί η παραμόρφωση του καλουπιού.

3.3 Προσομοίωση παραμόρφωσης του συνόλου Καλούπι-Μηχανής μέσω στατικής δομικής ανάλυσης

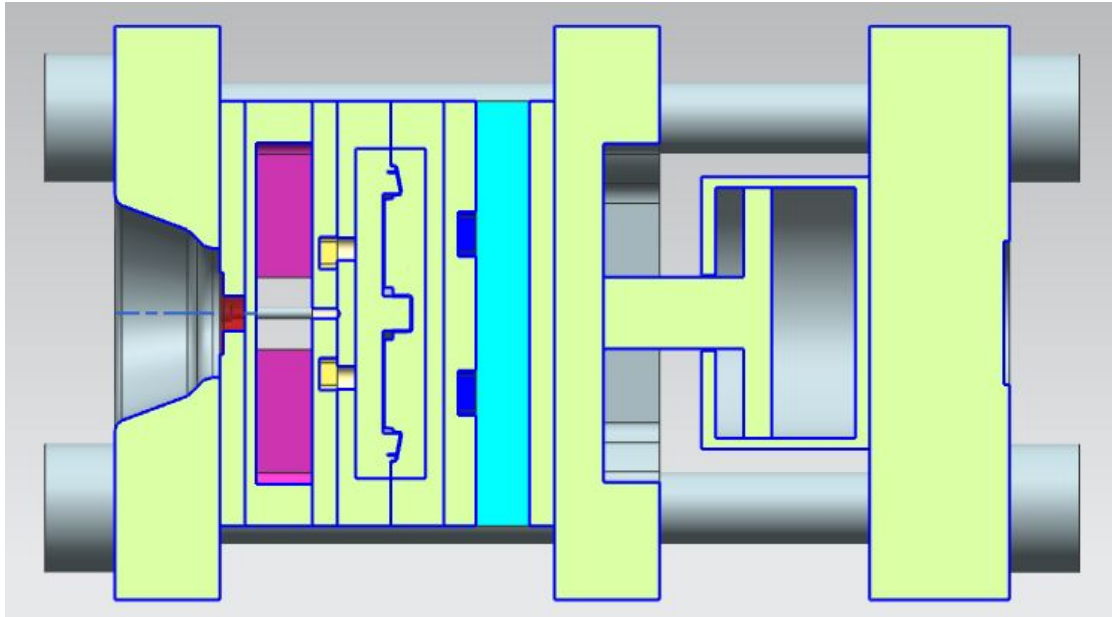
Κατά τη διάρκεια της έγχυσης του τήγματος από τον εκβολέα στο καλούπι αναπτύσσονται τεράστιες πιέσεις της τάξεως των εκατοντάδων bar. Αυτή η πίεση, σε συνδυασμό με την μετωπική επιφάνεια της μορφής που είναι κάθετη στον νοητό άξονα ανοιγοκλεισίματος του καλούπιού αναπτύσσει μία δύναμη που τείνει να ανοίξει το καλούπι. Σε αυτή τη δύναμη ανθίσταται η δύναμη που ασκεί ο υδραυλικός επενεργητής στο κινητό πλατώ της μηχανής (Clamping Force). Τελικά αυτές οι δυνάμεις τείνουν να κάμψουν το καλούπι μαζί με τα ίδια τα πλατώ της μηχανής.

Η όλη παραμορφωσιμότητα του συνόλου καλούπι – πλατώ - φέροντα στοιχεία, οδηγεί σε μία κατάσταση η οποία πρέπει να ελεγχθεί, αφενός επειδή όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου προκαλεί ελαττώματα στο τελικό προϊόν αφετέρου επειδή μπορεί να προκληθούν καταστροφές στο μηχανολογικό σύνολο σε ανεξέλεγκτες καταστάσεις.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί διερεύνηση της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς σχεδιάζεται ένα 3d σύνολο για τις ανάγκες της ανάλυσης, η οποία πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του CAE λογισμικού ANSYS R16.2 στο Static Structural module :



Εικόνα 3.26: 3D στερεό μοντέλο για τους σκοπούς της ανάλυσης FEM



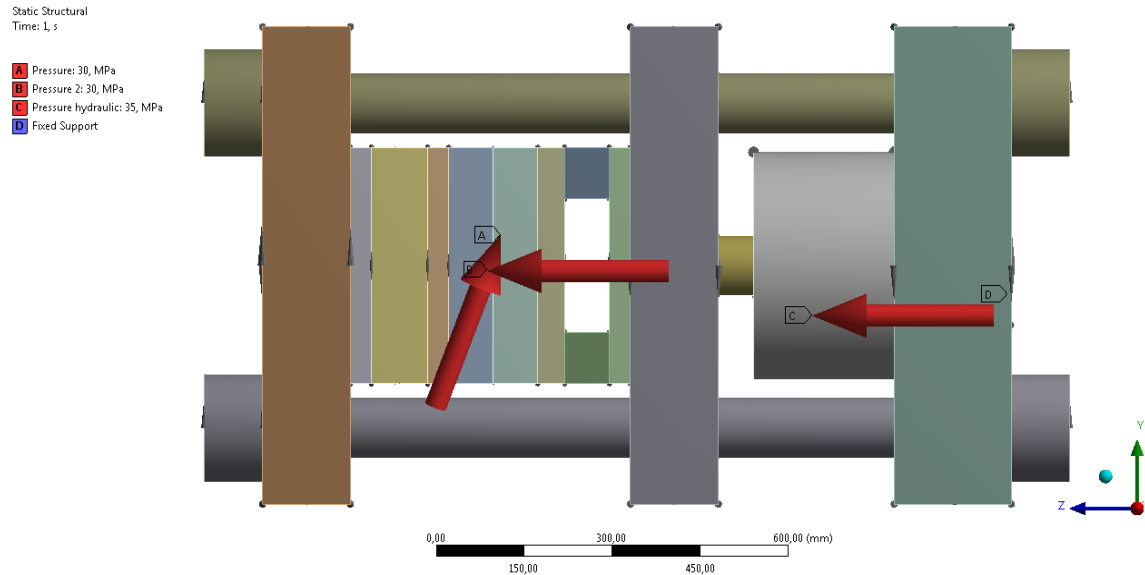
Εικόνα 3.27: τομή 3D στερεού μοντέλου για τους σκοπούς της ανάλυσης FEM

Η μοντελοποίηση του συστήματος για να οριστούν οι οριακές συνθήκες έγινε ως εξής:

Ομοιόμορφη στατική πίεση στις επιφάνειες που ανήκουν στη μορφή, σταθερής τιμής ίσης με 300 bar, η οποία και αντιπροσωπεύει την πίεση σιδερώματος. Υδραυλική πίεση 350 bar στην επιφάνεια του εμβόλου που ωθεί το βάκτρο και κατ' επέκταση το κινητό πλατώ της μηχανής μοντελοποιώντας την ανθιστάμενη δύναμη κλεισίματος (Machine Clamping force). Επίσης εισάγεται στην πλάκα βάσης της μηχανής μία έδραση για να παραλάβει τυχούσες ανισοροπίες δυνάμεων που θα οδηγούσαν την ανάλυση σε κίνηση απαραμόρφωτου συσσωματώματος αντί στατικής ανάλυσης. Πρέπει να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο καλούπι είναι μία σχετικά ειδική περίπτωση λόγω ασύμμετρης τοποθέτησης της τροφοδοσίας του τήγματος και ανάποδης εξόλκευσης. Το τελευταίο σημαίνει ότι το υποσύστημα εξόλκευσης δεν βρίσκεται στο κινητό μέρος του καλουπιού, αλλά στο σταθερό από τη μεριά της τροφοδοσίας. Τα προαναφερθέντα συνηγορούν στο γεγονός ότι αναμένονται πιθανές ασυμμετρίες και υψηλότερες τιμές παραμορφώσεων σε σχέση με μία κλασική δομή καλουπιού.

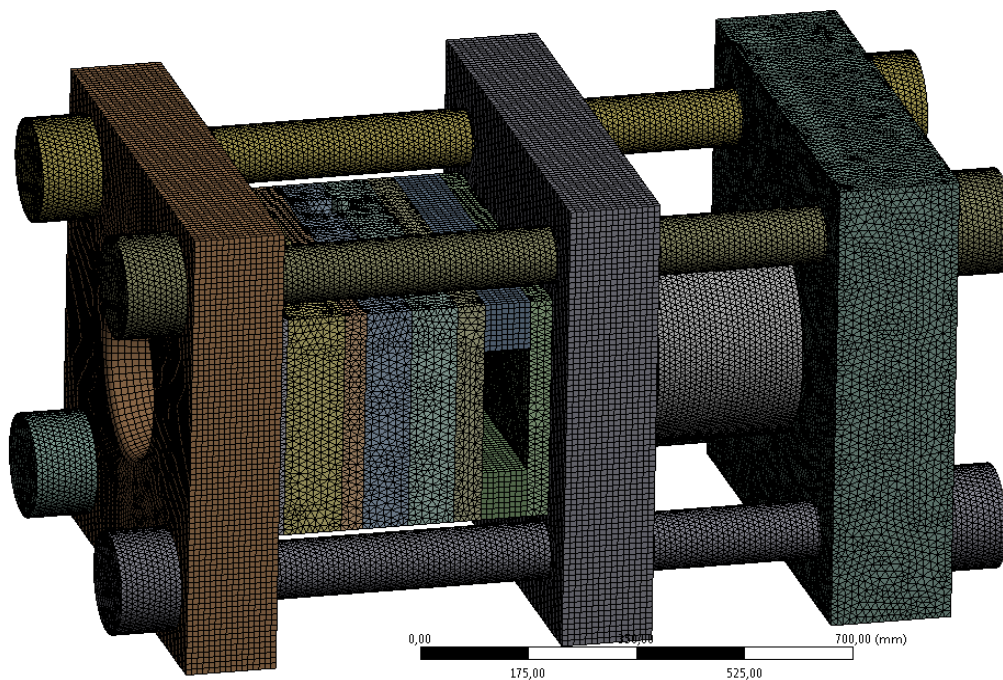
Αναφορικά με τις οριζόμενες ιδιότητες των υλικών όλες οι πλάκες και οι μπάρες (Tie bars) ορίστηκαν ως χάλυβες κατασκευών εκτός των πλατών της μηχανής που έχουν ιδιότητες φαιού χυτοσίδηρου. Επίσης ο κύλινδρος του υδραυλικού επενεργητή και το βάκτρο-έμβολο ορίστηκαν ως απαραμόρφωτα στερεά.

Οι επαφές των σωμάτων ορίστηκαν ως ατριβείς μεταξύ των πλακών και μεταξύ των πλακών-πλατώ καθώς και η αλληλεπίδραση των μπαρών-πλατώ και ως σύνδεσης (bonded) μεταξύ του υδραυλικού συστήματος και των πλατών.



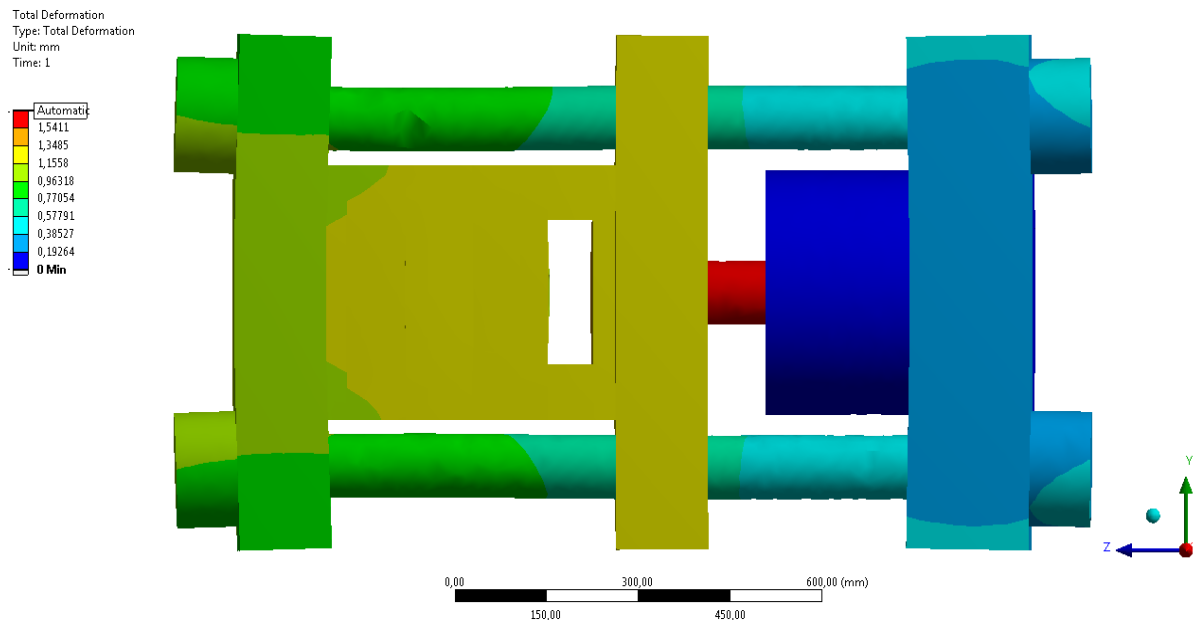
Εικόνα 3.28: Οριακές συνθήκες μοντέλου

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το υπολογιστικό πλέγμα, με σταδιακή πύκνωση του μετά από συνεχή τρεξίματα του μοντέλου εως ότου σταθεροποιήθηκαν οι τιμές των αποτελεσμάτων.



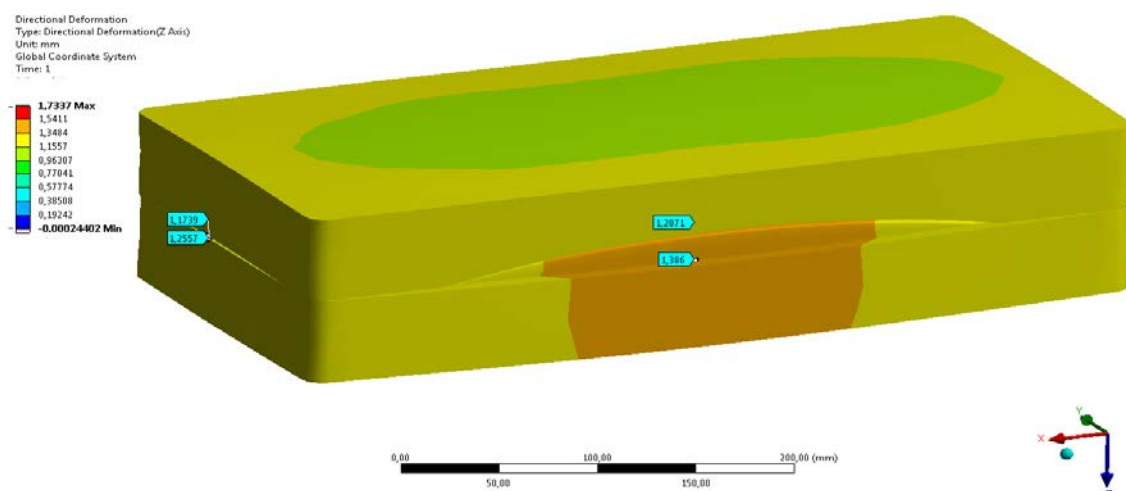
Εικόνα 29: Υπολογιστικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων που ενδιαφέρουν σχετικά με τη δημιουργία της προεξοχής:

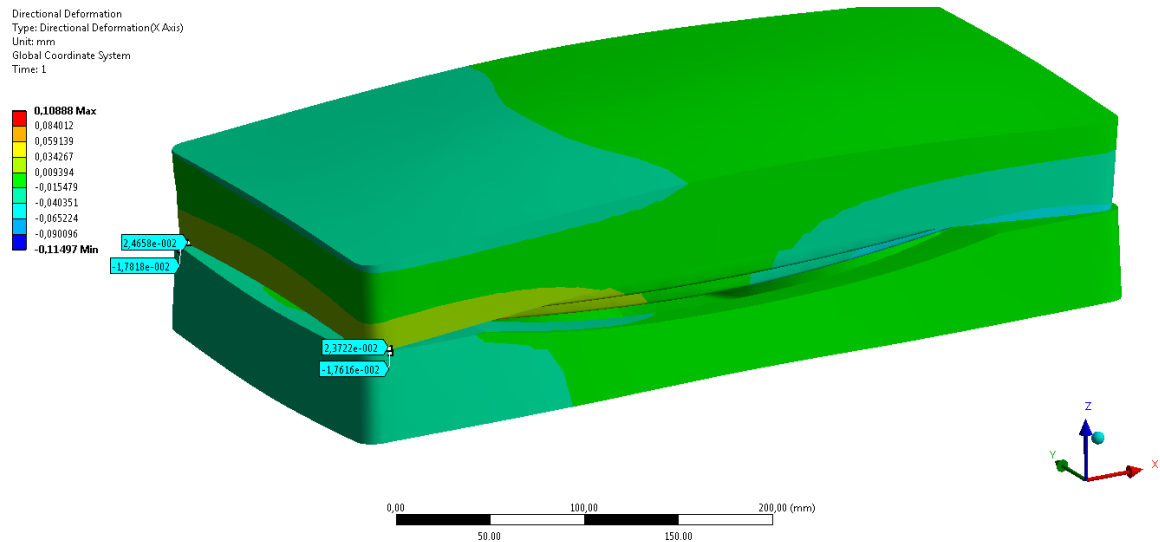


Εικόνα 3.30: Συνολικές μετατοπίσεις καλουπιού-μηχανής. Διακρίνεται η σημαντική κάμψη των πλατών και της βάσης (Scale x30)

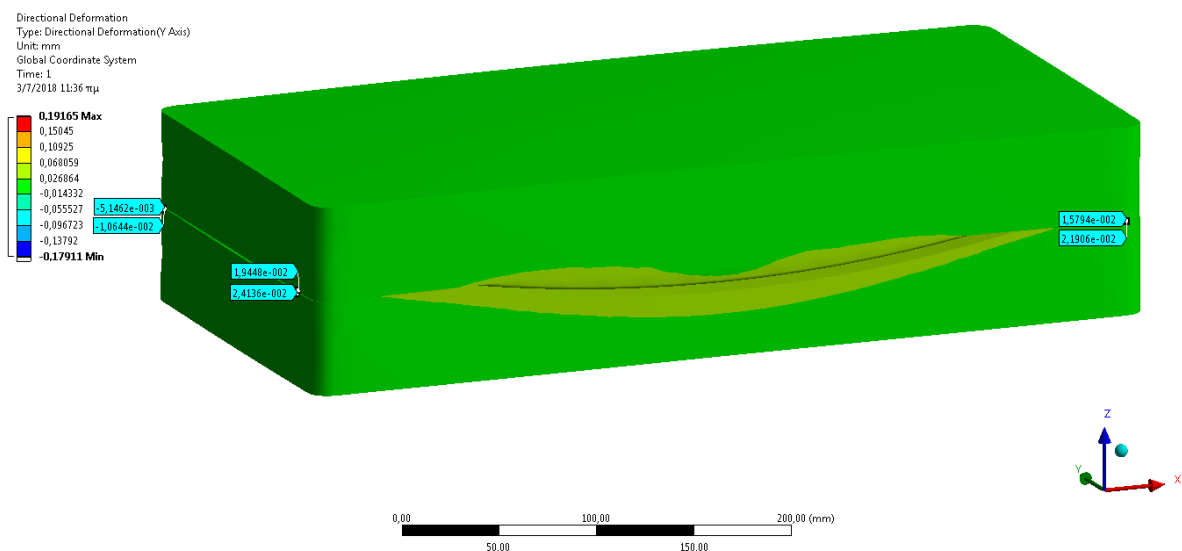
Με χρήση των μετρήσεων probe που δίνει το Ansys βρέθηκαν μέσω των μετατοπίσεων (διαφορές σε αντικρυστά σημεία της γραμμής διαχωρισμού) οι μέγιστες τιμές του ανοίγματος μεταξύ των φορμών μορφής του καλουπιού εξαιτίας της κάμψης και της συνολικής στρέψης που υφίσταται.



Εικόνα 3.31: Μετατοπίσεις κατά Z για τις φόρμες μορφής. Η μέγιστη διαφορά προκύπτει ίση με 0,18mm



Εικόνα 3.32: Μετατοπίσεις κατά X για τις φόρμες μορφής. Η μέγιστη διαφορά προκύπτει ίση με $0,0071\text{mm}=7,1\mu\text{m}$



Εικόνα 3.33: : Μετατοπίσεις κατά Y για τις φόρμες μορφής. Η μέγιστη διαφορά προκύπτει ίση με $0,0047\text{mm}=4,7\mu\text{m}$

Η μετατόπιση ως προς τον άξονα Z δηλαδή τον παράλληλο με τις μείζονες ασκούμενες δυνάμεις είναι πολύ μεγάλη και θα οδηγήσει στη δημιουργία υπερβολικής προεξοχής. Όμως οι μετατοπίσεις σε αυτή τη διεύθυνση είναι θέμα ρυθμίσεως της μηχανής ως προς τη δύναμη κλεισίματος και την πίεση σιδερώματος καθώς και της στιβαρότητας της καλουπιέρας. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί εύκολα να αντιμετωπιστεί.

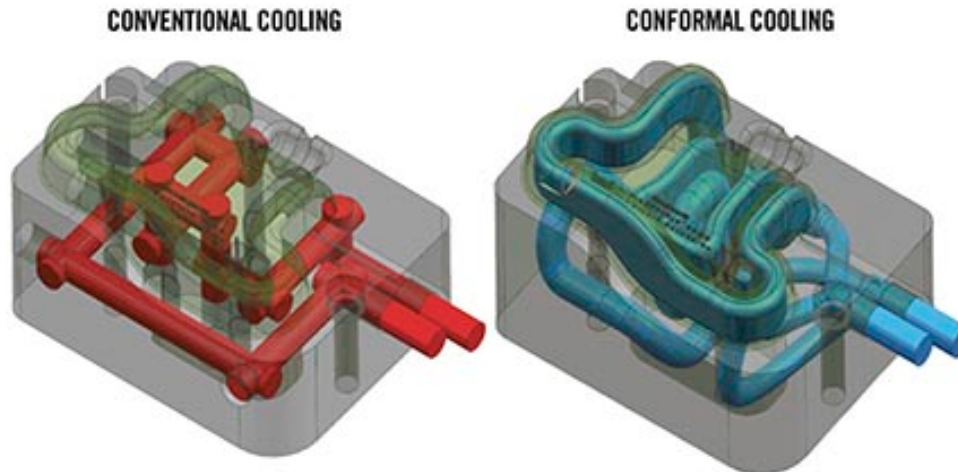
Οι μετατοπίσεις που ενδιαφέρουν και που δεν μπορούν να εξαλειφθούν με απλά μέτρα, προκειμένου και να αθροιστούν με τις τιμές που προέκυψαν από την ανάλυση Monte Carlo είναι αυτές ως προς X και Y που υπολογίζονται στις δυσμενέστερες περιοχές ανάπτυξης τους ίσες με $7,1\mu\text{m}$ και $4,7\mu\text{m}$ αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 4: Επίδραση των παραμέτρων κατά τη φάση κατασκευής του καλουπιού και τρόποι βελτίωσης

4.1 Σχηματισμός γρεζιού και στρώσιμο καλουπιού

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν παράγοντες που αφορούν τη δημιουργία προεξοχής κατά μήκος της γραμμής διαχωρισμού, οι οποίοι δεν σχετίζονται με τη λειτουργία του καλουπιού κατά τη φάση της παραγωγής του αντικειμένου για το οποίο κατασκευάστηκε, ούτε τη συνεισφορά των εξαρτημάτων που οι κατασκευαστές καλουπιών αγοράζουν από κάποια εταιρεία του χώρου (Κεφ.2), αλλά που έχουν να κάνουν με την καθαυτή διαδικασία της κατασκευής.

Γενικά η κλασική διαδικασία κατασκευής ενός καλουπιού και πιο συγκεκριμένα των φορμών που δίνουν τη μορφή στο τελικά ζητούμενο πλαστικό αντικείμενο, δηλαδή το θηλυκό και αρσενικό μέρος των πλακών ή φορμών και τυχόν μηχανισμούς αρνητικών γεωμετριών που φτιάχνονται ως ξεχωριστά κομμάτια για να είναι δυνατή η εξόλκευση του αντικειμένου χωρίς να μπλοκάρει στα αρνητικά σημεία (undercut regions), απαρτίζεται από κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Τυπικές κατεργασίες είναι το φρεζάρισμα και το τρνίρισμα στις οποίες πλέον έχουν εδραιωθεί οι μηχανές CNC, η ηλεκτροδιάβρωση βύθισης (sinker EDM) και σύρματος (wire EDM), το ρεκτιφιάρισμα επιφανειών και διαμέτρων και η διάτρηση. Τα τελευταία χρόνια έχουν εισαχθεί στο χώρο και κατεργασίες προσθήκης υλικού όπως η Direct Metal Laser Sintering, αλλά η εφαρμογή τους προς το παρόν παραμένει πολύ περιορισμένη λόγω κόστους, χρόνου και αδυναμίας επίτευξης μηχανικών ιδιοτήτων συγκρίσιμων με τα ήδη χρησιμοποιούμενα κράματα εργαλειοχάλυβων. Παρενθετικά αναφέρεται η επανάσταση που έχει φέρει η έννοια της προσθήκης υλικού στον τομέα της ψύξης των καλουπιών (Conformal cooling), αφού μπορούν πλέον να κατασκευαστούν εξαιρετικά πολύπλοκες γεωμετρίες που θα ήταν αδύνατο να γίνουν με κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Έτσι μπορούν να δημιουργηθούν ένθετα ψύξης τοπολογικά βελτιστοποιημένα με κριτήριο την αποδοτικότερη ψύξη που συνήθως περιλαμβάνει ψυκτικά κυκλώματα που ακολουθούν γεωμετρικά τις μορφές των αντικειμένων.



Εικόνα 4.34: Σύγκριση ψυχόμενων ενθέτων κατασκευασμένα με αφαίρεση υλικού (α) και προσθήκη υλικού (β)

Καθότι λοιπόν οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού αποτελούν ουσιαστικά στοχευμένη αστοχία του υλικού με την έννοια ότι για να επιτευχθεί αφαίρεση κάποιου όγκου πρέπει να αποσχιστεί από το κατεργαζόμενο τεμάχιο μέσω αστοχίας σε διάτμηση (φρεζάρισμα-τορνίρισμα-διάτρηση), το υλικό διέρχεται από την πλαστική του περιοχή προτού τελικά αστοχήσει. Αυτή είναι η γενεσιουργός αιτία δημιουργίας μικρών προεξοχών μετάλλου κατά διάφορες διευθύνσεις ανάλογα με το είδος της κατεργασίας, την στρατηγική και τις παραμέτρους κοπής. Κοινώς το φαινόμενο είναι γνωστό ως σήκωμα γρεζιού ή στα αγγλικά *burring*. Είναι πρακτικά αδύνατο να εξαλειφθεί πλήρως η ανάπτυξη του φαινομένου αλλά με ορθή επιλογή συνθηκών κατεργασίας και κατάλληλες γεωμετρικές κοπτικών εργαλείων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί.

Σε κάθε περίπτωση όταν το γρέζι (*burr*) αναπτυχθεί πάνω στην επιφάνεια διαχωρισμού τότε κρίνεται επιτακτική η ανάγκη πλήρους αφαίρεσης του επειδή σε αντίθετη περίπτωση δεν θα είναι δυνατό το ορθό κλείσιμο και η ευθυγράμμιση των δύο μισών του καλουπιού. Αυτό αποτελεί μία τεχνική πρόκληση αφού δεν μπορεί εγγυημένα να γίνει αυτό κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αν πρόκειται γενικά για κατεργασίες σε κέντρα CNC, και τελικά απαιτείται η αφαίρεση του με τον συμβατικό τρόπο δηλαδή στο χέρι. Είναι θέμα λοιπόν καθαρά εμπειρίας, γνώσεων και αντίληψης του τεχνίτη που επιτελεί αυτή την εργασία, συνήθως γυαλιστής. Επειδή ακριβώς πρόκειται για χειρωνακτική τέχνη υπάρχει ο κίνδυνος στην προσπάθεια αφαίρεσης του γρεζιού να καταστραφεί η οξεία ακμή, να αφαιρεθεί ωφέλιμο υλικό από τη φόρμα του καλουπιού και τελικά να επέλθει αδυναμία ορθής ευθυγράμμισης στο επίπεδο της γραμμής διαχωρισμού. Αυτό τελικά μεταφράζεται στη δημιουργία προεξοχής. Πρόκειται για φαινόμενο αδύνατο να μοντελοποιηθεί λόγω της φύσης της εργασίας οπότε δεν μπορεί να γίνει ποσοτική διερεύνηση του μεγέθους του *flash* που μπορεί να προκληθεί αφού εξαρτάται πλήρως από την περίπτωση και τον εμπλεκόμενο τεχνίτη. Ένας έμπειρος γυαλιστής μπορεί με τη χρήση τεχνασμάτων να πετύχει αφαίρεση του γρεζιού τέτοια ώστε να είναι πλήρως ανεπαίσθητη η επέμβασή του (διατήρηση ακμής στην τάξη 0,01-0,02 mm). Πάντως είναι ορθή τεχνική να επιδιώκεται η βελτιστοποίηση των διαφόρων παραμέτρων κατά την διάρκεια της κατεργασίας ώστε να αποφεύγεται όσο το δυνατόν και να ελαχιστοποιείται η εμπλοκή του ανθρώπινου παράγοντα.

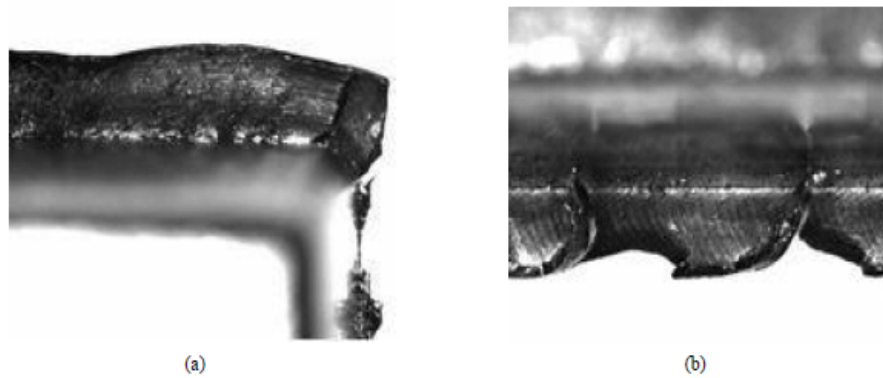
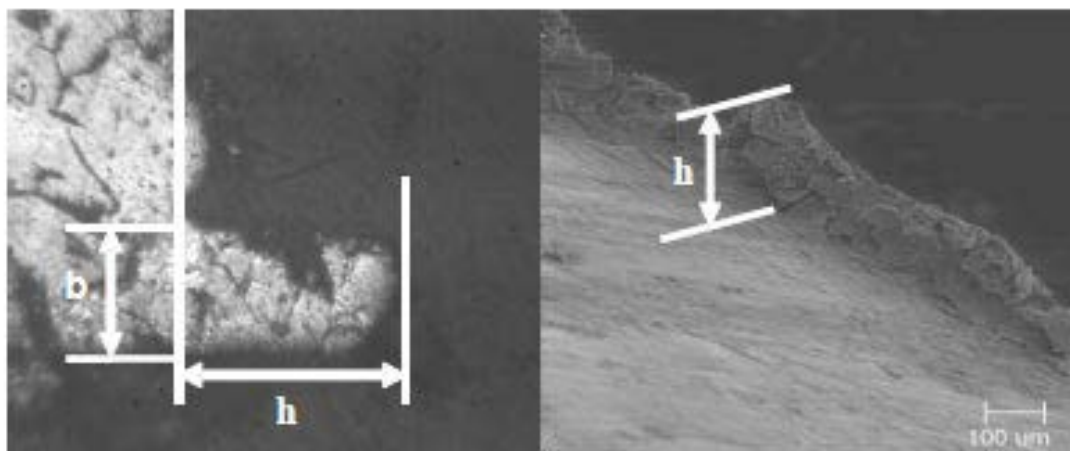


Figure 13. (a) Bottom view of the burr formed during test 16 at region 1 (Mag. 20X); (b) Bottom view of the burr formed during test 16 at region 2 (Mag. 15X).

Εικόνα 4.35 Μεγέθυνση σε ακμή όπου έχει δημιουργηθεί γρέζι πό την κατεργασία

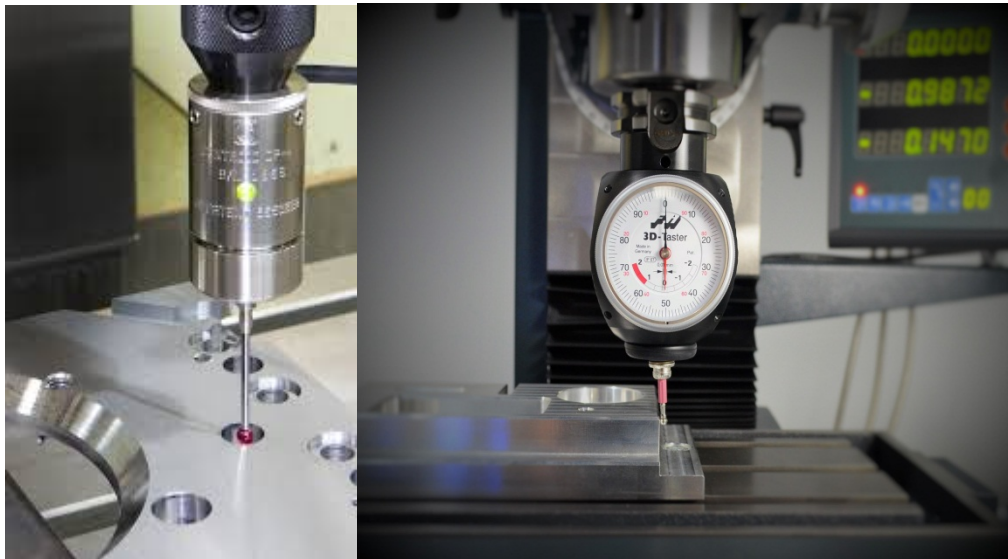


Εικόνα 4.36: Μεγέθυνση σχηματισμού γρεζιού και βασικές διαστασιακές παράμετροι του, από δημοσίευση σχετικού ενδιαφέροντος

4.2 Παράγοντες κατά τη διάρκεια των φάσεων κατεργασίας

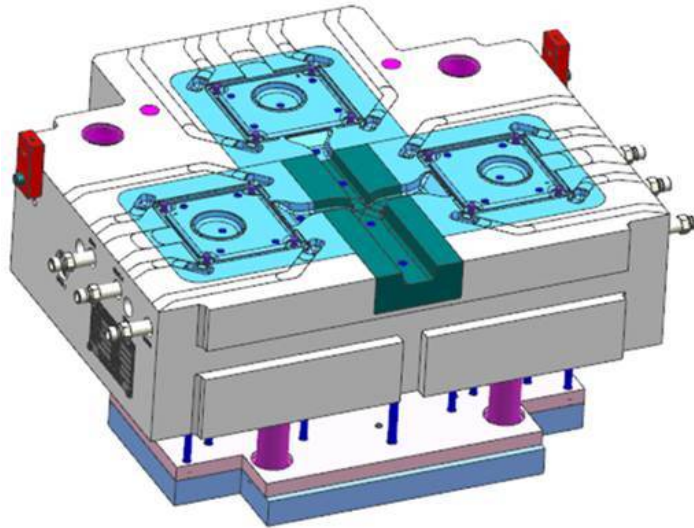
Παρουσιάζονται επιγραμματικά οι βασικές πηγές σφαλμάτων κατά την κατεργασία των φορμών του καλουπιού οι οποίες οδηγούν σε αύξηση του flash.

Αρχικά η πολυπλοκότητα των φορμών των καλουπιών από άποψη γεωμετρίας οδηγεί στην ανάγκη η κατεργασία τους κατά το φρεζάρισμα ή την τόννευση να γίνει σε πάνω από μία φάση (operation-setup). Αυτό οδηγεί σε επαγόμενα σφάλματα από τη διαδικασία των πολλαπλών κεντραρισμάτων που απαιτούνται για να βρεθεί η αρχή των συντεταγμένων με βάση την οποία γίνεται ο χειρισμός και οδήγηση της μηχανής κατεργασίας ή η εκτέλεση των CAM προγραμμάτων. Τα σφάλματα αυτά μεταφράζονται σε σφάλματα ευθυγράμμισης μεταξύ της αρσενικής και θηλυκής φόρμας και τελικά σε flash. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται Touch probes, ψηφιακό και αναλογικό που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του σημείου έναρξης της κατεργασίας.



Εικόνα 37.4: Probes για κεντράρισμα τεμαχίων σε εργαλειομηχανές

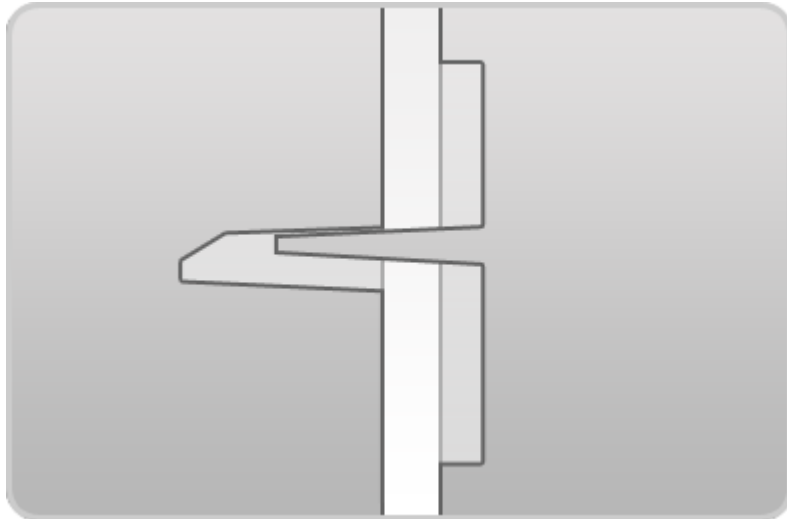
Όταν οι μορφές δεν κατεργάζονται απευθείας στην πλάκα αλλά σε ένθετα (cavity-core inserts) όπως και στο καλούπι που μελετήθηκε, τότε τίθεται το θέμα του ταιριάσματος του ενθέτου στη φωλιά της πλάκας, που εισάγει μία ακόμα συναρμογή η οποία γενικά είναι δύσκολο να οδηγήσει σε συναρμογή τοποθέτησης (locating fit) λόγω παραμορφώσεων των κοπτικών εργαλείων από τις δυνάμεις κοπής. Το πρόβλημα αυξάνεται ποσοτικά με την αύξηση του μεγέθους των φορμών και τελικά συνεισφέρει και αυτό στην τιμή της προεξοχής.



Εικόνα 38.5: Διακρίνονται με γαλάζιο χρώμα τα ένθετα των μορφών μέσα στις λευκές πλάκες

Σημειώνεται ότι οι αιτίες αυτές δεν συνεισφέρουν απαραίτητα με συμμετρικό τρόπο κατά μήκος της γραμμής διαχωρισμού.

Άλλοι παράγοντες μπορεί να δημιουργηθούν όταν τα σημεία διαχωρισμού περιλαμβάνουν το φώλιασμα μίας αρσενικής γεωμετρίας σε μία θηλυκή για να επιτευχθεί διαχωρισμός. Εκεί τίθεται το θέμα της συναρμογής η οποία δεν πρέπει να είναι υπερβολικά ελεύθερη ώστε να διαρρέει υλικό και να δημιουργεί προεξοχή αλλά ούτε και υπερβολικά σφιχτή ώστε να αναπτύσσονται υπερβολικές δυνάμεις στις επιφάνειες κατά το άνοιγμα και κλείσιμο του καλούπιού που τελικά θα οδηγήσει σε πρόωρη φθορά και τελικά ζημιά που θα επιδεινώσει την προεξοχή στα σημεία διαχωρισμού.



Εικόνα 4.6: Κλασικό παράδειγμα shut-off στοιχείου, όπου αρσενική γεωμετρία εισχωρεί σε θηλυκή και πρέπει να επιτευχθεί κατασκευαστικά ορθή συναρμογή.

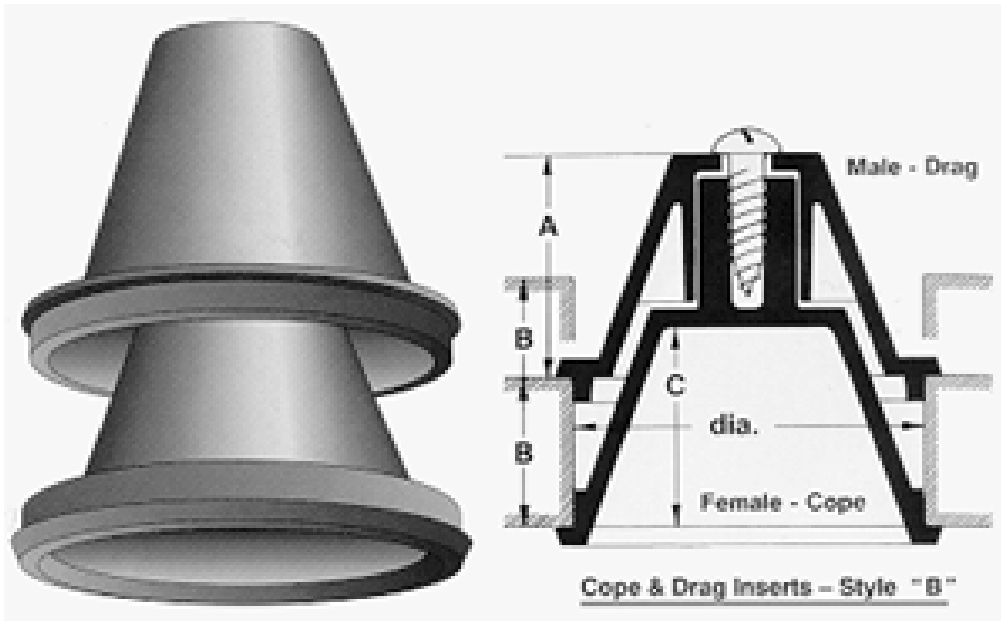
4.3 Προτεινόμενες κατασκευαστικές λύσεις για την αντιμετώπιση και τον έλεγχο της προεξοχής.

Πολλές φορές οι κατασκευαστές καλουπιών σε ιδιαίτερα απαιτητικές εφαρμογές όπου η προεξοχή πρέπει να περιοριστεί, κυρίως σε περιπτώσεις όπου η ύπαρξη της οδηγεί σε λειτουργικά προβλήματα του αντικειμένου αλλά και όταν υπάρχουν αισθητικοί λόγοι κατασκευάζουν οι ίδιοι αν υπάρχει η δυνατότητα σε ρεκτιφιέ αξόνων και οπών, τα σετ πείρων δαχτυλιδιών ταιριάζοντας το κάθε σετ μοναδικά.

Άλλη λύση αποτελούν οι διάφορες προσφερόμενες από κατασκευαστές εξαρτημάτων καλουπιών συσκευές, οι οποίες έχουν ως τεχνικό σκοπό τη βελτίωση της ικανότητας του καλουπιού να αυτοκεντράρει το κινητό με το σταθερό του μέρος. Τέτοιες λύσεις είναι οι κώνοι κεντραρίσματος (taper interlocks), οι κλειδαριές κεντραρίσματος καθώς και τα σετ πείρων-δαχτυλιδιών με ειδικές επιστρώσεις για αύξηση της αντοχής στη φθορά.



Εικόνα 4.7: Διαφόρων ειδών κλειδαριές κεντραρίσματος, διακρίνεται η αρσενική και θηλυκή γεωμετρία τους.



Εικόνα 4.8: Κώνος κεντραρίσματος

Αναφορικά με τον έλεγχο των παραμορφώσεων προτείνεται η χρήση υποστηριγμάτων όπου είναι χωροταξικά δυνατόν μέσα στο καλούπι ώστε να παραλαμβάνονται οι καμπτικές και θλιπτικές τάσεις κατά την λειτουργία του. Για τον ίδιο σκοπό και αν αυτό είναι επιτρεπτό από διαστασιολογικής άποψης μπορούν να αυξηθούν τα πάχη των πλακών και να προστεθούν πλάκες στήριξης ενδιάμεσα των ήδη χρησιμοποιούμενων πλακών.

Κεφάλαιο 5: Αθροιστικά Αποτελέσματα, Προτάσεις βελτίωσης και Μελλοντικές Ιδέες

5.1 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Αναλύσεων

Αθροιστικά από την κινηματική μελέτη του απαραμόρφωτου σώματος για τις πλάκες μορφής του καλουπιού που μελετήθηκε και από την λειτουργική ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων προκύπτει ότι στη χειρότερη περίπτωση δηλαδή εκεί που εμφανίζεται η μέγιστη κάμψη και στρέψη στις φόρμες σε κάθε διεύθυνση η μέγιστη τιμή της προεξοχής προκύπτει ίση με $15,5 \mu\text{m} + 7,1\mu\text{m} = 22,6 \mu\text{m}$ στην X διεύθυνση όπως αυτή ορίστηκε στα CAD μοντέλα και $21,6 \mu\text{m} + 4,7\mu\text{m}=26,3 \mu\text{m}$.

Οι παραπάνω τιμές είναι οι ανώτερες λοιπόν τιμές που λαμβάνει στο υπό μελέτη καλούπι η τιμή της προεξοχής (flash). Στα υπόλοιπα σκέλη της γραμμής διαχωρισμού το προφίλ της τιμής της προεξοχής σε κάθε νοητό σημείο είναι διαφορετικό και σε κάποια σημεία ανάλογα τον συνδυασμό μεταβλητών να μηδενίζεται.

Τα συμπεράσματα προέκυψαν για ότι ήταν δυνατό να υπολογιστεί με βάση δεδομένα που είναι εγγυημένα. Οι παράγοντες που αφορούν την κατασκευή και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 είναι πολύ δύσκολο εως αδύνατο να ποσοτικοποιηθούν λόγω της φύσης τους, τουλάχιστον σε επίπεδο που να έχει νόημα η περαιτέρω άθροιση τους με τα υπόλοιπα υπολογισμένα αποτελέσματα, χωρίς να τα παραμορφώνει σημαντικά, σε σημείο που να χάνεται το νόημα των προηγηθέντων αναλυτικών προσεγγίσεων.

5.2 Προτάσεις Βελτίωσης και Ιδέες για Μελλοντική Υλοποίηση

Αρχικά αναφορικά με το σκέλος της ανάλυσης ανοχών με τη μέθοδο Monte Carlo, θα ήταν ιδανικό να μπορούσαν να γίνουν πολύ περισσότερα κινηματικά τρεξίματα (runs), κάτι που δεν είναι πρακτικό με την υφιστάμενη υλοποίηση επειδή πρέπει ο σχεδιαστής με χειροκίνητο τρόπο να δοκιμάζει συνδυασμούς μετατοπίσεων στο CAD μέχρις ότου πετύχει τη μέγιστη μετατόπιση και άρα το δημιουργούμενο flash.

Στόχος είναι να υλοποιηθεί κατάλληλος αλγόριθμος βελτιστοποίησης ο οποίος σε άμεση συνεργασία με το περιβάλλον του CAD, θα δημιουργεί τυχαία σύνολα διαστάσεων και θα αναζητεί για κάθε σειτ τιμών τη θέση που προκύπτει η μέγιστη τιμή της προεξοχής. Έτσι θα ήταν δυνατή η αποδοτική μελέτη δύσκολων σεναρίων με πολλές μεταβλητές εισόδου για τις οποίες απαιτούνται χιλιάδες διαφορετικά τρεξίματα προκειμένου να μπορούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε εύχρηστο εύρος τιμών (να μην είναι δηλαδή υπερβολικά μεγάλο το εύρος και υπάρχουν αμφιβολίες για το/τα λειτουργικά αποτελέσματα και προδιαγραφές).

Θα μπορούσε ακόμη να συνδυαστεί η παραπάνω αλγοριθμική διαδικασία με κάποιο εμπορικό πακέτο λογισμικού CAE ή με κάποιο in-house ανεπτυγμένο αλγόριθμο πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να επιτυγχάνεται η συνολική μελέτη σε ένα ενιαίο interface.

Ακόμη περαιτέρω ενοποίηση θα επιτυγχάνονταν με μετατροπή του δημιουργούμενου πακέτου δίδοντας του multiphysics δυνατότητες προσομοίωσης. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε να γίνεται για τα διάφορα σενάρια αριθμητική προσομοίωση, που θα λάμβανε υπόψη της σημαντικότερες επιδράσεις των εναλλαγών θερμοκρασίας που υφίσταται το σύνολο καλουπιού-μηχανής καθώς επίσης να λαμβάνονται υπόψη με τη μορφή ανάλυσης ευαισθησίας οι επιδράσεις των διαφόρων εκκεντροτήτων που παρουσιάζονται λόγω κατασκευαστικών ανοχών της μηχανής ή λόγω αδυναμίας τέλει ευθυγράμμισης και εγκατάστασης του καλουπιού στη μηχανή.

Τέλος φαινόμενα φθοράς και κόπωσης, ιδιαίτερα σε καλούπια εκατομμυρίων κύκλων παραγωγής ή καλούπια με απαιτητικές μορφές και πολλαπλές περιοχές κατακόρυφων parting surfaces που δημιουργούν περιοχές υψηλής τοπικής καταπόνησης καθώς και καλούπια με ολισθαίνοντες μηχανισμούς, θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν στην ανάλυση και να καθορίζεται έτσι η αξιοπιστία του σχεδιασμού.

Βιβλιογραφία

- [1] Chase, Kenneth W. "Tolerance analysis of 2-d and 3-d assemblies." *ADCATS Report 94.4* (1999).
- [2] Meadows, James D. *Geometric dimensioning and tolerancing: applications, analysis & measurement (per ASME Y14. 5-2009)*. James D. Meadows & Associates, 2009.
- [3] Τσαγγάρης, Σ. "Μηχανική των ρευστών." *Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ*(2005).
- [4] <http://www.mitcalc.com/doc/tolanalysis1d/help/en/tolanalysis1d.htm>
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Geometric_dimensioning_and_tolerancing
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Student%27s_t-distribution
- [8] <https://www.sinotech.com/resources/tutorials/injection-molded-parts/>
- [9] Narayanaswami, R., and D. Dornfeld. "Burr minimization in face milling: a geometric approach." *Journal of manufacturing science and engineering* 119.2 (1997): 170-177.

Παράρτημα

Παράτιθενται διάφορα σχέδια και μοντέλα του καλουπιού που μελετήθηκε:

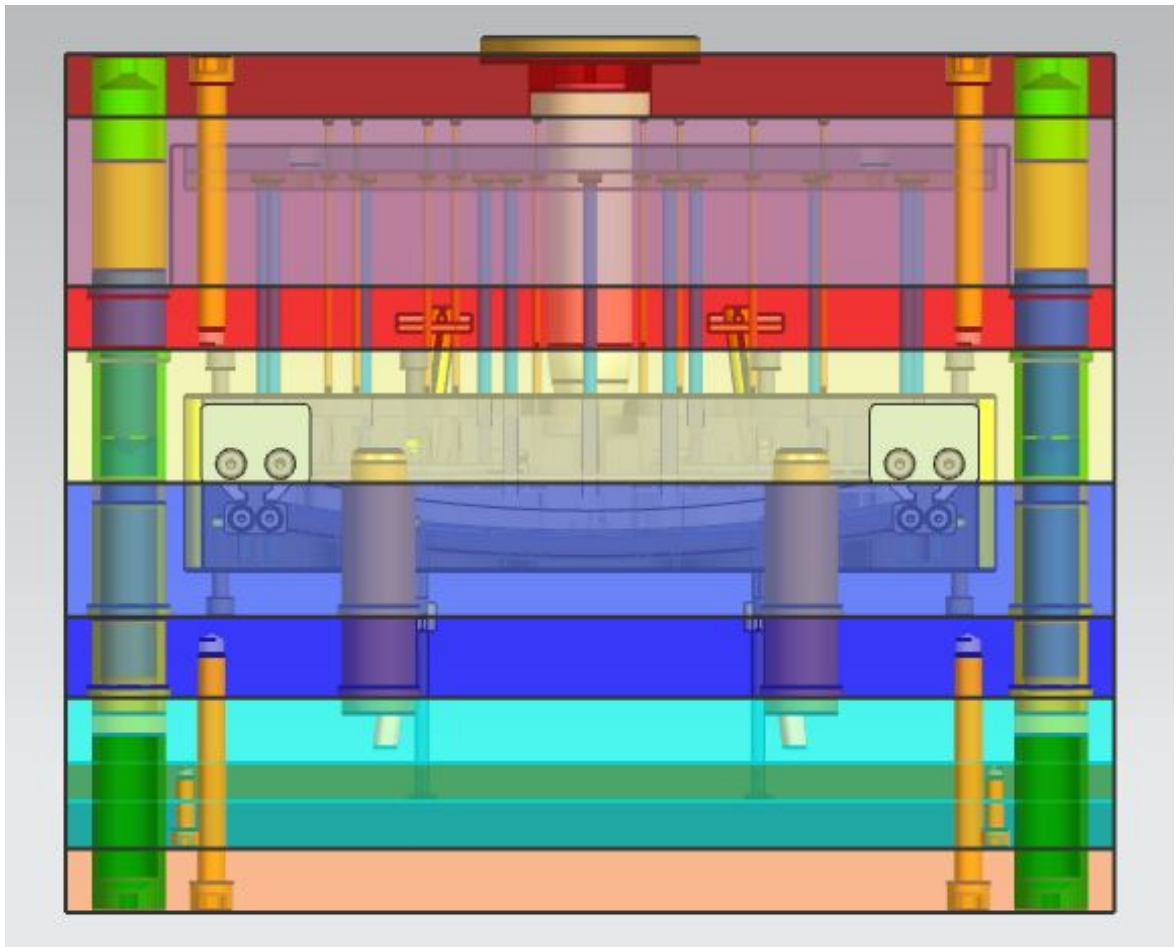


Figure 1: In-CAD όψη καλουπιου A

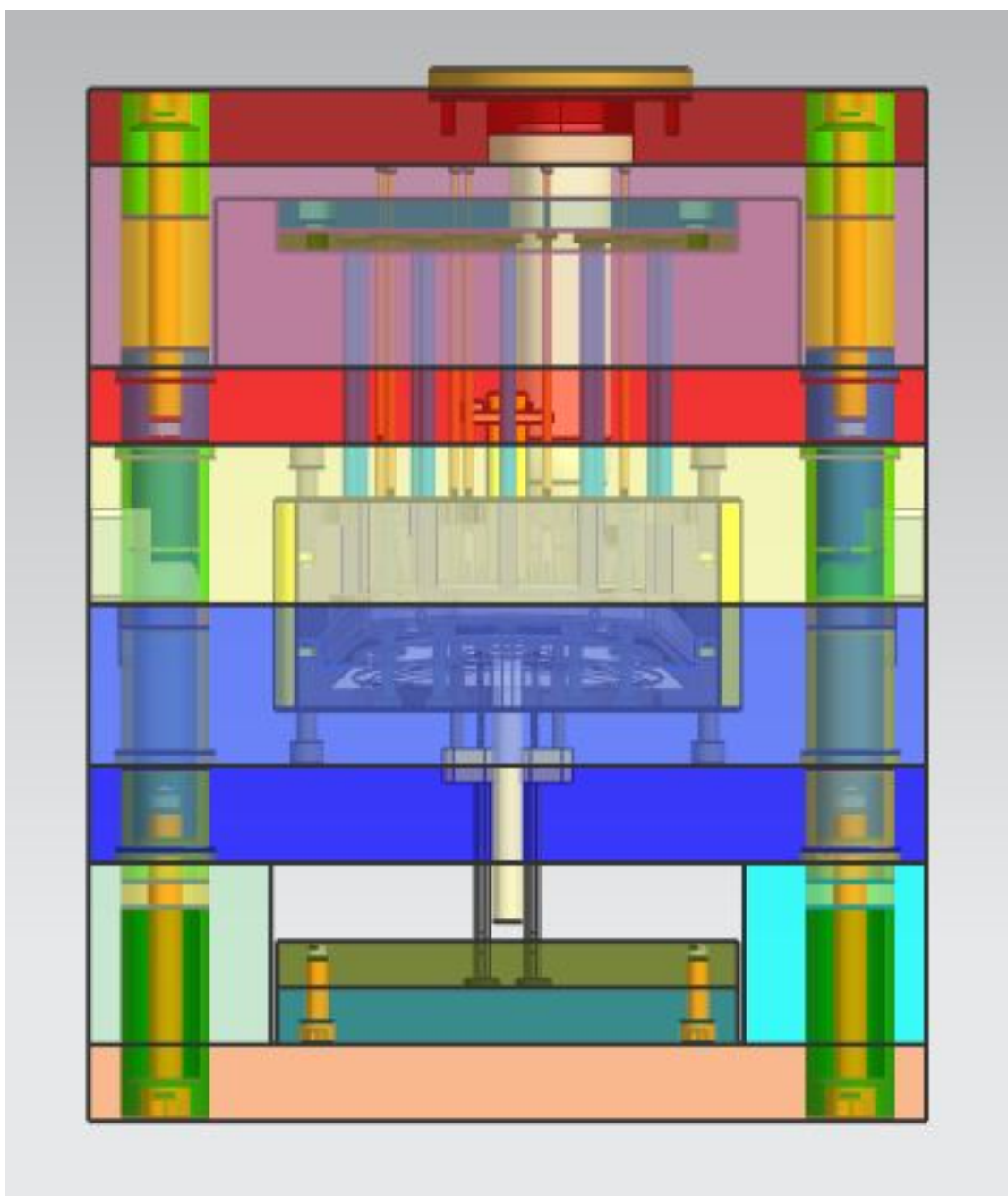


Figure 2 : In-CAD όψη καλουπιου A

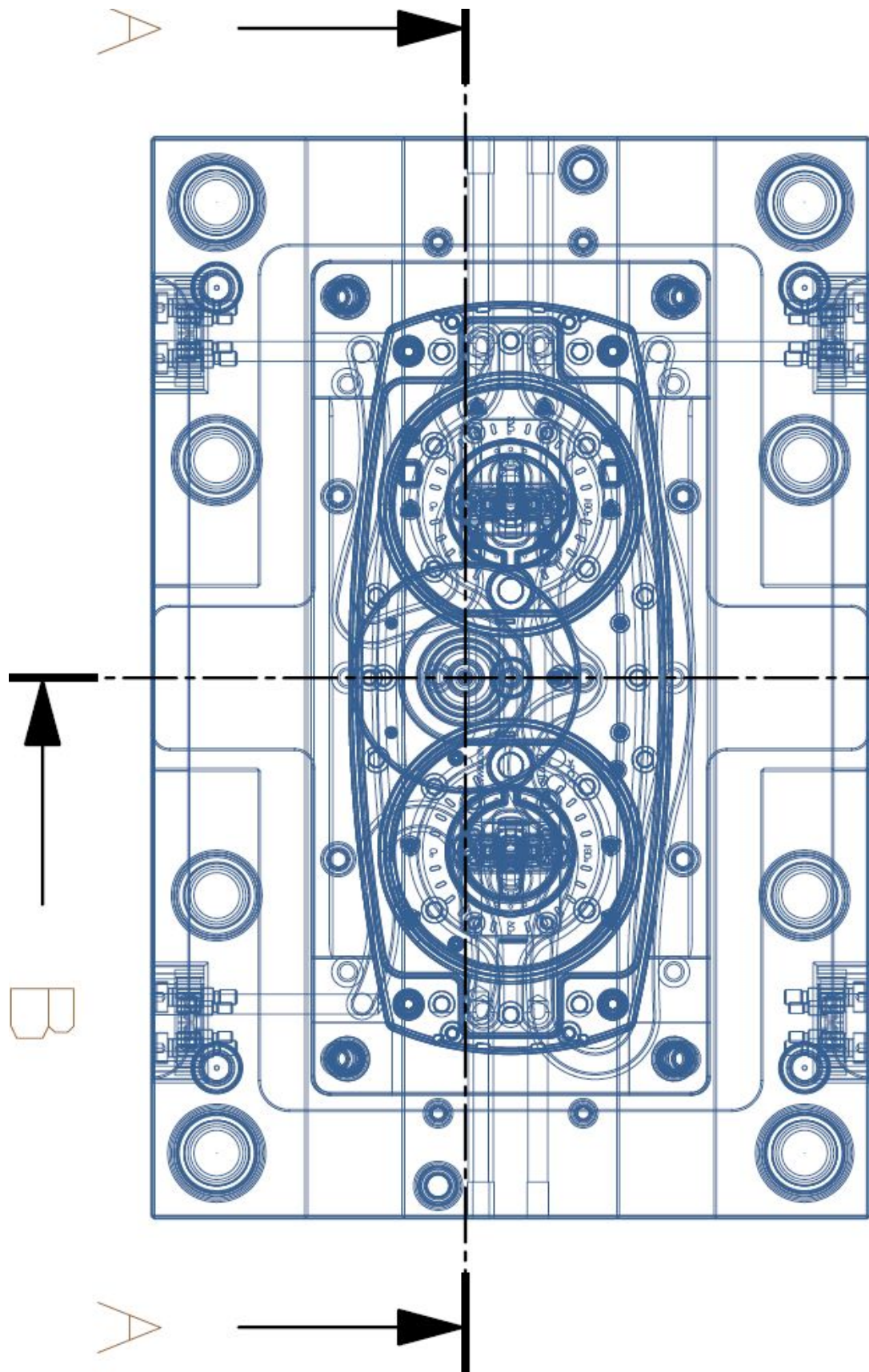


Figure 3: Διάφανη κάτοψη

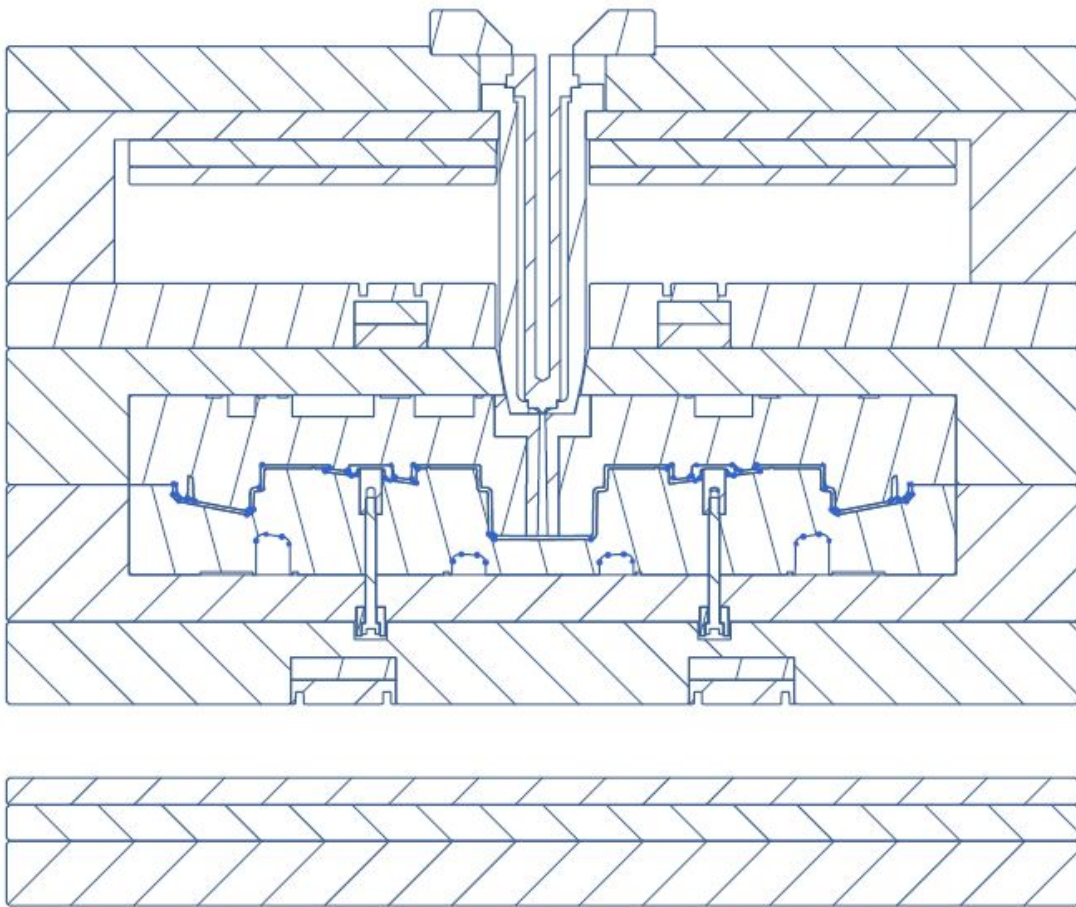


Figure 4: Απλοποιημένη Τομή Α

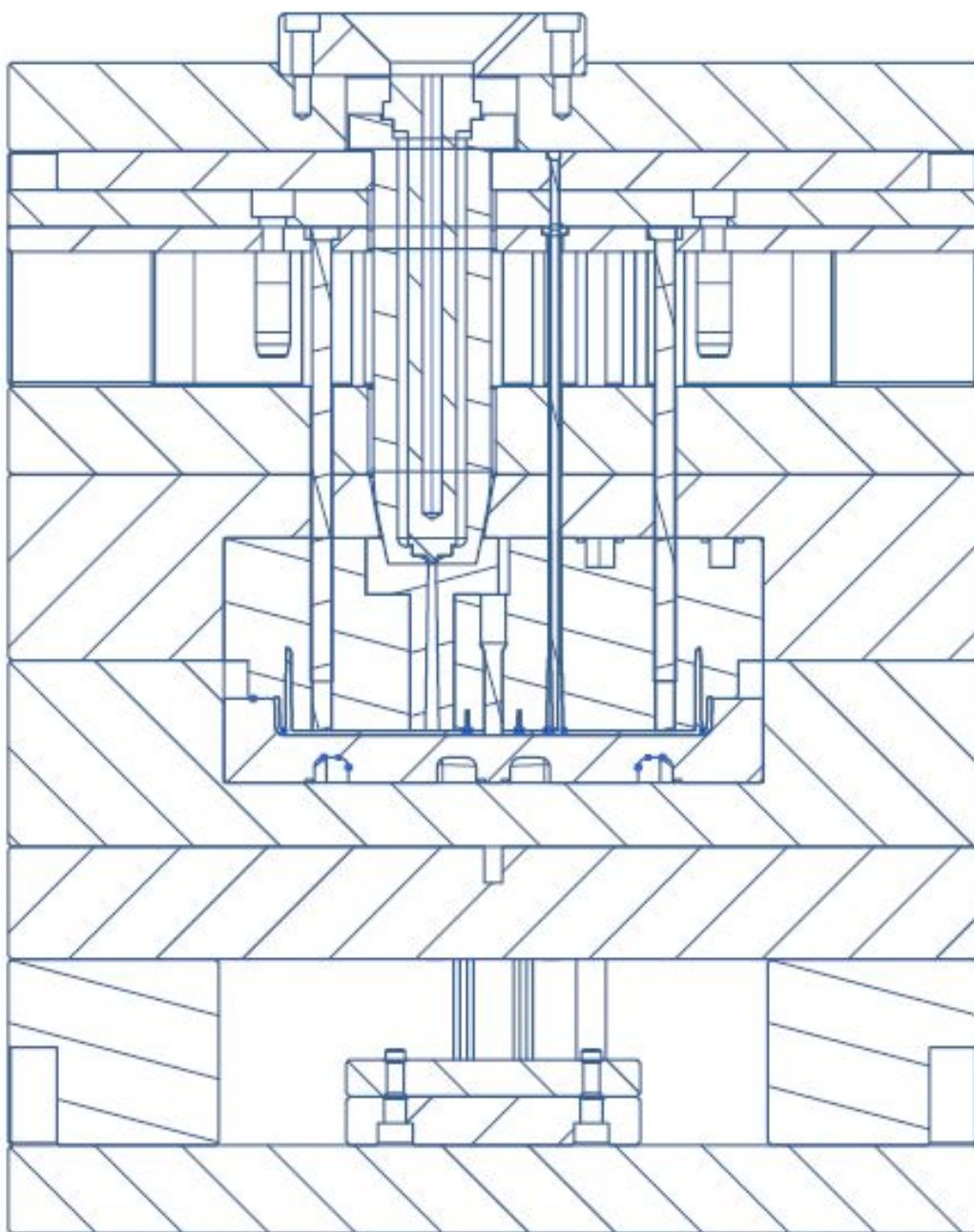


Figure 5: Τομή Β

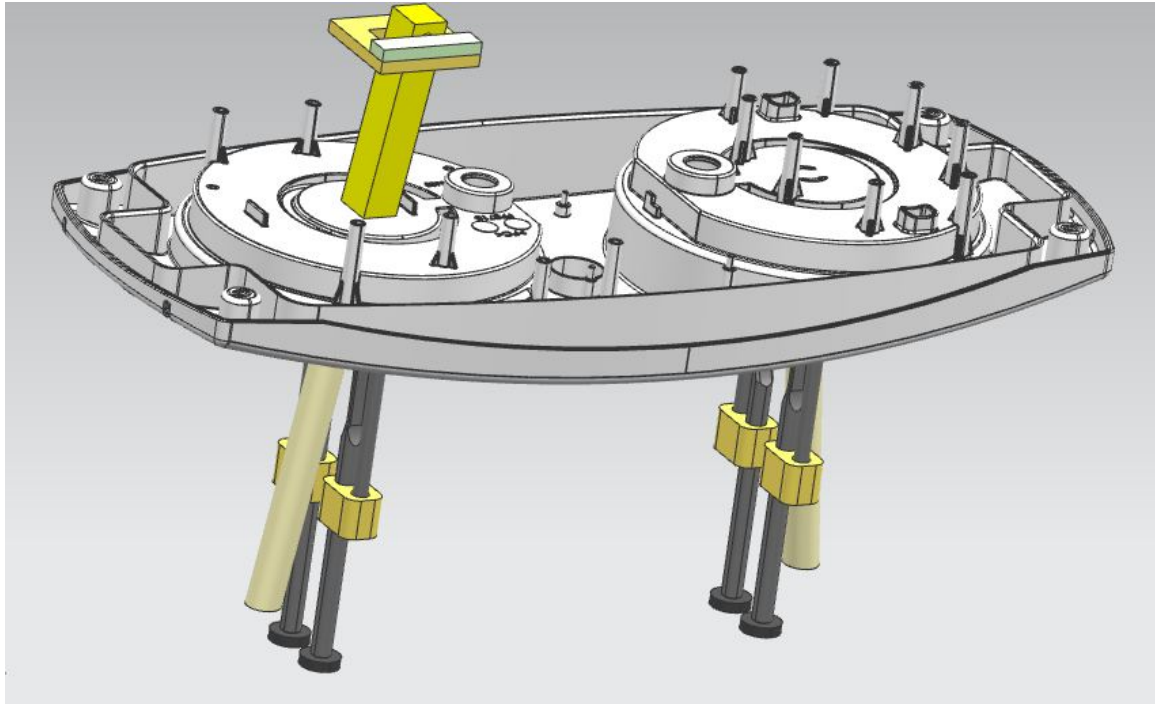


Figure 6: Τρισδιάστατη άποψη των μηχανισμών απελευθέρωσης των αρνητικών γεωμετριών (Lifters)

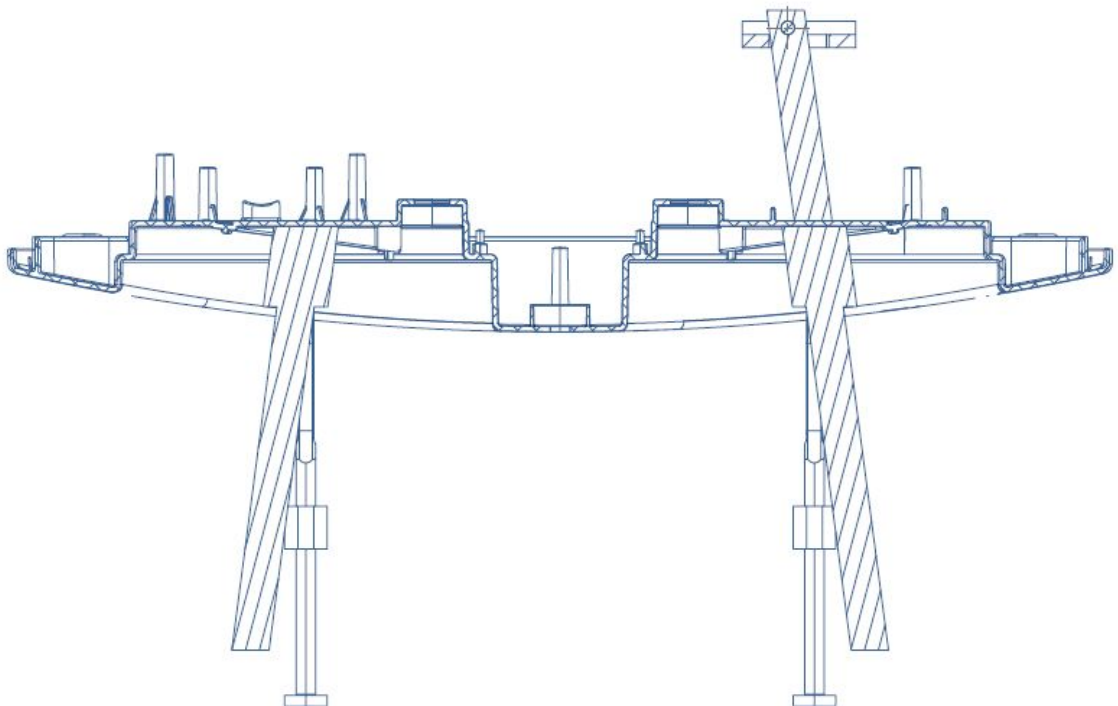


Figure 7: Τομή μεσοεπιπέδου των μηχανισμών απελευθέρωσης των αρνητικών γεωμετριών (Lifters)

