



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

*Ανάλυση και παραμετρικός σχεδιασμός αγωγών ψύξης καλουπιού
θερμοπλαστικών υλικών τύπου Injection σε περιβάλλον CAD-CAE*

Διπλωματική Εργασία

ΜΑΡΙΝΑ ΠΑΠΑΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθ. Β.Σπιτάς

ΑΘΗΝΑ 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται και σχεδιάζεται ένα βελτιωμένο σύστημα ψύξης καλουπιού τύπου Injection. Η ανάλυση της ψύξης εσωτερικά του καλουπιού μελετάται τόσο σε επίπεδο μεταφοράς θερμότητας και υδροδυναμικών φαινομένων όσο και κατασκευαστικό. Με βάση ένα υπάρχον καλούπι σχεδιασμένο και κατασκευασμένο από το μηχανουργείο ΜΟΡΦΗ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΕΠΕ, καθορίζονται παράμετροι για εναλλακτικό σχεδιασμό του κυκλώματος ψύξης. Το μεταβατικό θερμικό φαινόμενο μελετάται σε περιβάλλον ANSYS transient thermal ενώ στο περιβάλλον ANSYS CFX καθορίζονται οι υδροδυναμικές παράμετροι που διέπουν το πρόβλημα ψύξης. Ο κάθε ανασχεδιασμός του καλουπιού πραγματοποιείται στο Solidworks και έπειτα αξιολογείται με κριτήριο την κρυσταλλικότητα που αποκτούν τα θερμοπλαστικά προϊόντα που παράγει το καλούπι σε διάφορες θέσεις. Οι απαιτήσεις κρυσταλλικότητας διαφέρουν για κάθε περιοχή των προϊόντων, εφόσον απαιτούνται διαφορετικές φυσικές ιδιότητες γι' αυτές. Τέλος προτείνεται ένας βέλτιστος σχεδιασμός που αφορά την επιτάχυνση του φαινομένου ψύξης ταυτόχρονα με την ικανοποίηση των περιορισμών κρυσταλλικότητας.

ABSTRACT

In the present thesis, an improved version of an existing injection molds' cooling system is designed. The heat flow inside the mold, the hydrodynamic characteristics of the flow and the construction limitations are the basis of the mold's cooling analysis. The injection mold is manufactured by Morfi Molds Ltd. mechanical workshop and the improvements made are based on a parametric analysis. While the transient heat transfer is determined in ANSYS transient thermal, the hydrodynamic parameters are determined in ANSYS CFX. Each cooling system is redesigned in Solidworks and then is evaluated according to the effect of the cooling rate on each thermoplastics' products' crystallinity. The crystallinity demands vary depending on each selection of the products 'desired physical properties. A final design is proposed, promoting better quality products in consideration of the crystallinity they possess.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο τελευταίο στάδιο αυτό των προπτυχιακών μου σπουδών, οφείλω να ευχαριστήσω όλα τα άτομα τα οποία συνέβαλλαν στην κατάρτισή μου και στην υποστήριξή μου κατά τη διάρκεια αυτών. Αρχικά ευχαριστώ τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Επίκουρο καθηγητή κ. Βασίλειο Σπιτά για την καθοδήγηση του και τη μετάδοση των γνώσεών του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και των προπτυχιακών σπουδών μου στο πλαίσιο εργασιών στα μαθήματά του.

Επιπλέον, ευχαριστώ το μηχανουργείο ΜΟΡΦΗ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΕΠΕ για την προσφορά του στην παρούσα διπλωματική, τόσο της γεωμετρίας του συγκεκριμένου καλουπιού Injection όπως για την μετάδοση της τεχνογνωσίας τους σε συγκεκριμένα θέματα σχεδιασμού του κυκλώματος ψύξης ενός καλουπιού.

Ευχαριστώ τα μέλη και συμφοιτητές του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών για την υποστήριξή τους και την μετάδοση των γνώσεων και της εμπειρίας τους.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου για την συμπαράστασή της.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1. Καλούπια-Χύτευση	11
1.2. Injection-Molding	12
1.3. Ψύξη καλουπιών.....	15
1.4. Επίδραση ψύξης στην ποιότητα του προϊόντος.....	18
1.5. Οργάνωση Κειμένου.....	20
2. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	21
2.1. Συναγωγή.....	21
2.2. Αγωγή.....	21
2.3. Εξίσωση θερμότητας	22
3. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	28
3.1. Ειδική συναγωγιμότητα h	28
3.2. Ανάλυση ευαισθησίας.....	29
3.3. Χαρακτηριστικά ροής-Μοντέλο CFX	37
4. CASE STUDY- ΚΑΛΟΥΠΙ INJECTION MOLD	45
4.1. Επιλογή Καλουπιού	45
4.2. Υλικό Προϊόντος-Βελτιστοποίηση	48
4.3. Μοντέλο υπολογισμού Κρυσταλλικότητας στη βιβλιογραφία	52
4.3.1. Κώδικας Matlab και APDL commands.....	54
5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ.....	55

5.1.	Θερμική Μελέτη Υπάρχοντος Συστήματος Ψύξης Καλουπιού	55
5.2.	Εναλλακτικός Σχεδιασμός, καθορισμός των παραμέτρων	60
5.2.1.	Παράμετροι γεωμετρίας καναλιών	60
5.2.2.	Παράμετροι αναδιάταξης κοιλοτήτων.....	69
5.2.3.	Παράμετροι υλικών	71
5.3.	Αποτελέσματα-Συμπεράσματα	72
	Βιβλιογραφία	74
	Παράρτημα	75
	Παράρτημα Α	75
	Παράρτημα Β	79
	Παράρτημα Γ.....	82

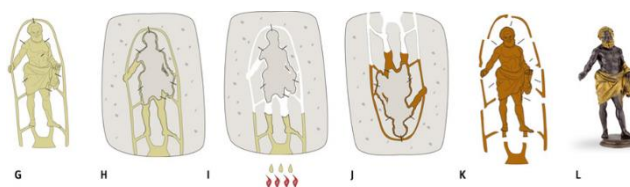
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Καλούπια-Χύτευση

Η χύτευση υλικών σε καλούπια, είναι μια πανάρχαια κατεργασία, με το πρώτο καλούπι να χρονολογείται το 3500π.Χ στην Μεσοποταμία, για παραγωγή χάλκινων εξαρτημάτων από καλούπια φτιαγμένα από πέτρα και ψημένο πηλό. Μια από τις χρησιμότερες τότε χρήσεις των καλουπιών ήταν για την παραγωγή όπλων από μέταλλα. Οι Σουμέριοι από το 2500πΧ είχαν ήδη ανακαλύψει την μέθοδο χύτευσης του χαμένου κεριού (Εικόνα 1.1) καθιστώντας την έτσι ένα από τα αρχαιότερα είδη χύτευσης, το οποίο χρησιμοποιούταν από την Κίνα μέχρι την Ελλάδα το 1700πΧ .

Οι απαιτήσεις στην χύτευση, άρχισαν να αυξάνονται όταν έπρεπε να χυτεύσουν τον χαλκό, αφού έπρεπε να χρησιμοποιηθούν προφυλάξεις από τα θειώδη αέρια που απελευθερώνονται κατά την τήξη του καθώς και μέτρα για να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός του οξυγόνου, ο οποίος καθιστούσε τα καλούπια επισφαλή. Άρχισαν τότε να εμπλουτίζονται τα απαρτιζόμενα μέρη το καλουπιού με ανοίγματα και υποδοχές για την ροή του λιωμένου μετάλλου αλλά και για να εξαερώνεται το καλούπι.

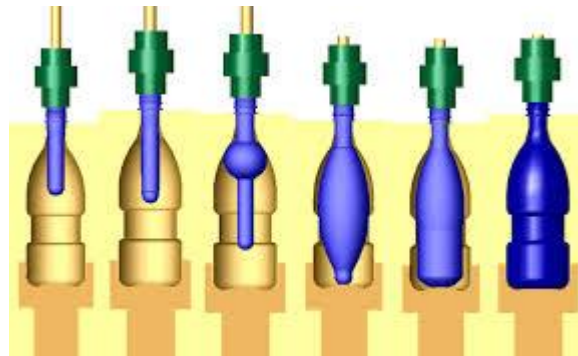
Πλέον στις σύγχρονες μεθόδους χύτευσης, εκτός από το καλούπια μιας χρήσης από άμμο, γύψο και κεραμικά υλικά, υπάρχουν και τα μόνιμα καλούπια. Ενώ στα περισσότερα καλούπια μιας χρήσης χρησιμοποιούνται μονέλλα και πυρήνες και καρδιές για την πρόσδοση μορφής στο παραγόμενο τεμάχιο και το καλούπι καταστρέφεται, στα μόνιμα καλούπια κατασκευασμένα από μέταλλο, το καλούπι επαναχρησιμοποιείται, προσδίδοντας έτσι την δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας.



Εικόνα 1.1 Χύτευση σε άμμο (αριστερά) και χύτευση με την μέθοδο του χαμένου κεριού (δεξιά)

Κάποιες από τις βασικότερες κατεργασίες χύτευσης μόνιμων καλουπιών είναι η χυτοπρεσσαριστή παραγωγή αντικειμένων με υψηλή πίεση εμβόλου για εισαγωγή του μετάλλου στο καλούπι, η χύτευση με χαμηλή πίεση, η χύτευση με την επίδραση του κενού, η φυγοκεντρική χύτευση και η χύτευση σφυρηλάτησης.

Το 1868 ο John. W. Hyatt χρησιμοποίησε ένα μίγμα νιτροκυταρρίνης και καμφοράς για να αντικαταστήσει το ελεφαντόδοντο από το οποίο φτιάχονταν μέχρι τότε οι μπάλες μπιλιάρδου. Μετά από τέσσερα χρόνια το 1872 ήταν ο πρώτος που κατασκεύασε μια μηχανή τύπου injection για να ωθεί το ζεστό αυτό υλικό μέσα σε καλούπι. Η τεχνική αυτή, άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως και άνθισε ιδιαίτερα στην εποχή του Δευτέρου Παγκοσμίου πολέμου για την κατασκευή κουμπιών, χτενών και άλλων αντικειμένων. Πλέον για την κατεργασία πλαστικών, εκτός από τα καλούπια τύπου injection, χρησιμοποιούνται ευρέως και τα φουσητά καλούπια για την παραγωγή μπουκαλιών και σωλήνων (Εικόνα 1.2).

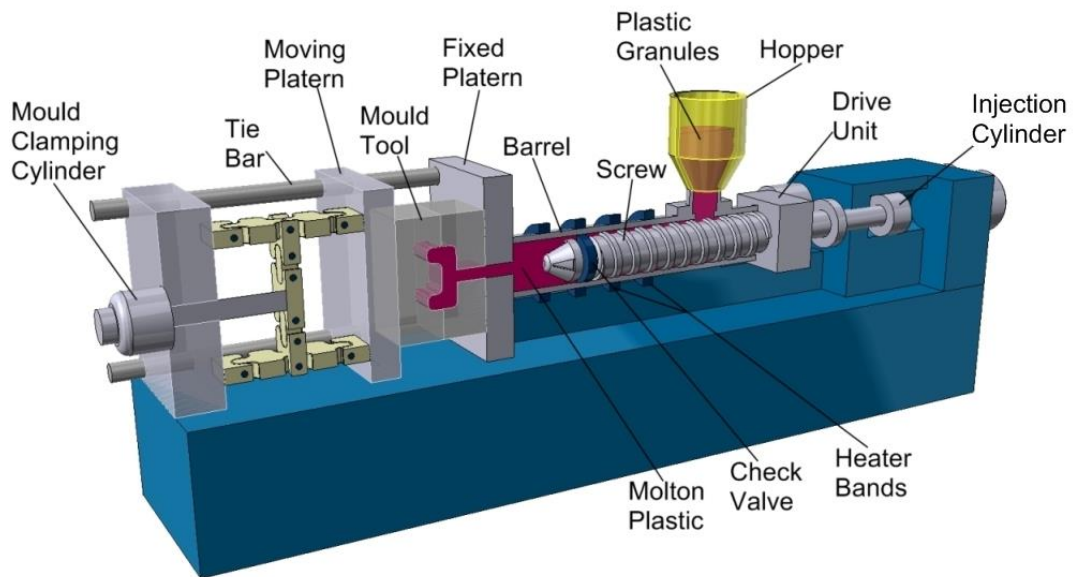


Εικόνα 1.2 Κατεργασία Blow molding

Η παρούσα διπλωματική, διαπραγματεύεται την κατεργασία χύτευσης με έγχυση (Injection Molding).

1.2. Injection-Molding

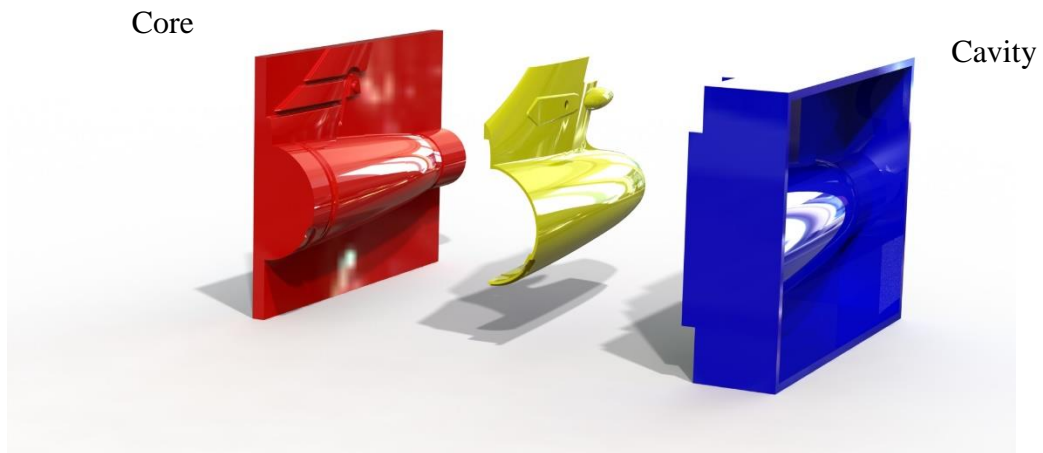
Η κατεργασία injection molding είναι ιδιαίτερα γνωστή για την μορφοποίηση πλαστικών. Αν και με την κατεργασία αυτή μπορούν να μορφοποιηθούν και μέταλλα, τα πιο κοινά υλικά είναι τα υαλώδη, τα ελαστομερή και τα θερμοπλαστικά πολυμερή. Με την κατεργασία αυτή, παράγεται μία ευρεία γκάμα προϊόντων από συσκευασίες και πλαστικά πώματα μπουκαλιών, μέχρι εξαρτήματα αυτοκινήτων, γρανάζια και άλλα στοιχεία μηχανών. Μια τυπική χυτόπρεσσα και τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται, απεικονίζονται στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3 Χυτόπρεσσα

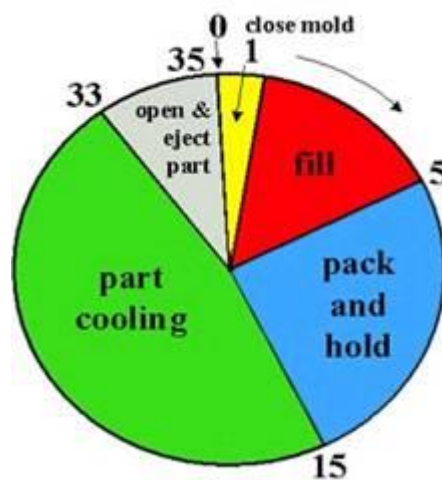
Η παραπάνω χυτόπρεσσα είναι τύπου παλινδρομούντος κοχλία (reciprocating screw). Ένα άλλο είδος χυτόπρεσσας που χρησιμοποιείται λιγότερο είναι αυτό του τύπου εμβόλου (ram ή plunger). Και στις δύο κατεργασίες το υλικό εισάγεται σε ένα ειδικό δοχείο σε μορφή ψηφίδων (pellets). Στη μηχανή τύπου εμβόλου, το τηγμένο πλαστικό ωθείται από το έμβολο στη θερμαινόμενη περιοχή και χρησιμοποιείται πλωτήρας (τύπου τορπίλης) για την διασφάλιση της ομοιόμορφης κατανομής του πολυμερούς στα θερμαινόμενα τοιχώματα παρά το υψηλό ιξώδες του. Στη μηχανή τύπου παλινδρομούντος κοχλία, το πολυμερές θα τακεί στον θάλαμο θέρμανσης και θα αναμιχθεί από την κίνηση του κοχλία ενώ έμβολο θα το ωθήσει στις κοιλότητες του καλουπιού και προσφέρει πιο ομοιογενή τήξη και ιξώδες.

Όσον αφορά τα μέρη από τα οποία απαρτίζεται ένα καλούπι Injection, διακρίνονται οι δύο βασικές πλάκες cavity και core (Εικόνα 1.4). Η πλάκα cavity αφορά την θηλυκή κοιλότητα του καλουπιού που προσδίδει στο προϊόν την εξωτερική του μορφή, ενώ η πλάκα core ή καρδιά είναι το αρσενικό τμήμα του καλουπιού που του προσδίδει την εσωτερική του διαμόρφωση. Τις δύο αυτές πλάκες, συνοδεύουν άλλες πλάκες που χρησιμεύουν στην ευθυγράμμιση του καλουπιού και την συγκράτησή του στην μηχανή, στη συγκεκριμένη περίπτωση οριζόντια.



Εικόνα 1.4 Πλάκες Core-Cavity

Όταν το προϊόν θα είναι έτοιμο να βγει από το καλούπι οι εξολκείς θα φροντίσουν την εκβολή του αντικειμένου (ejection) και έπειτα η διαδικασία θα ξαναρχίσει. Η παραπάνω ακολουθία ενεργειών, συγκροτεί τον κύκλο παραγωγής ενός αντικειμένου από καλούπι με την μέθοδο injection molding.



Εικόνα 1.5 Κύκλος λειτουργίας του καλουπιού

Στην (Εικόνα 1.5), φαίνεται το ποσοστό που καταλαμβάνει η κάθε διαδικασία στο συνολικό κύκλο παραγωγής του αντικειμένου. Ενώ το άνοιγμα του καλουπιού και η αποβολή του υλικού καθώς και το γέμισμα διαρκούν μερικά δευτερόλεπτα, ο χρόνος που καταλαμβάνει η ψύξη του καλουπιού είναι κατά πολύ μεγαλύτερος και μπορεί να κυμανθεί σε 40%-60% του συνολικού κύκλου.

Η ψύξη του πλαστικού μέσα στο καλούπι, είναι επομένως ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί αντικείμενο έρευνας και μελέτης για τη βελτιστοποίηση της κατεργασίας ως προς το κέρδος και την ποιότητα των παραγόμενων αντικειμένων. Είναι επίσης το κομμάτι με το οποίο θα ασχοληθεί η παρούσα διπλωματική.

1.3. Ψύξη καλουπιών

Όπως αναφέρθηκε ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση του συστήματος ψύξης ενός καλουπιού είναι ζωτικής σημασίας για την βιομηχανία, γι' αυτό και έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μηχανισμοί και συστήματα ψύξης. Το κύκλωμα ψύξης, σε κάθε περίπτωση πρέπει να αφαιρεί την θερμότητα από τις κοιλότητες του καλουπιού σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο διατηρώντας παράλληλα μια απαιτούμενη θερμική ομοιομορφία στα τοιχώματα. Ο χρόνος ψύξης τελειώνει όταν το υλικό ή μέρος του υλικού που απαιτεί την περισσότερη ψύξη, θα έχει φτάσει την θερμοκρασία εξόλκευσης κι έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία κρυστάλλωσης του υλικού.

Αν θεωρηθεί το κύκλωμα ψύξης ως ένας εναλλάκτης θερμότητας, αφού η θερμοκρασία του αυξάνεται από την εισροή του ζεστού πολυμερούς και έπειτα ψύχεται από την ενεργοποίηση της ψύξης, τότε από την Αρχή διατήρησης της ενέργειας θα ισχύει

$$\dot{Q}_{\text{περ}} + \dot{Q}_{\text{πολυμ}} + \dot{Q}_{\text{ψυ}} = \dot{Q}_{\text{καλ}} \quad (1)$$

όπου

$\dot{Q}_{\text{καλ}}$: Η θερμική ενέργεια που συσσωρεύεται στο καλούπι

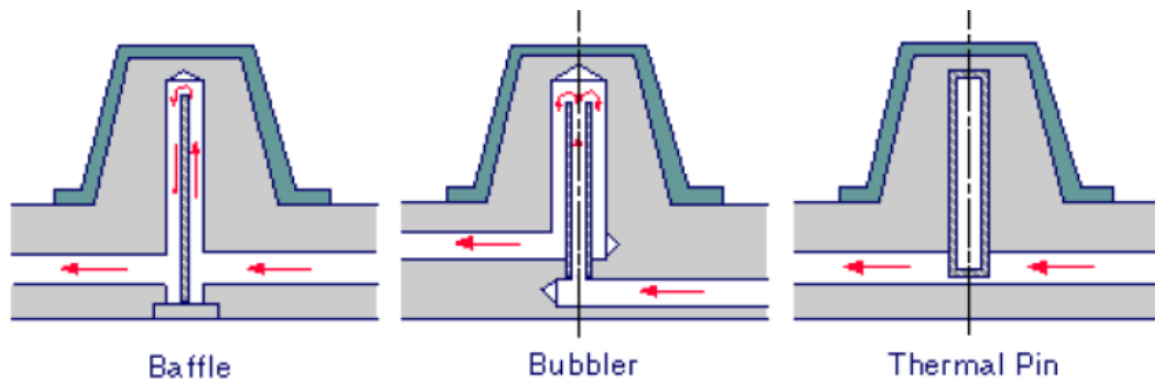
$\dot{Q}_{\text{περ}}$: Η θερμότητα που αφορά συναλλαγή με το περιβάλλον

$\dot{Q}_{\text{πολυμ}}$: Η θερμότητα που αφορά συναλλαγή με το πολυμερές

$\dot{Q}_{\text{ψυ}}$: Η θερμότητα που αφορά συναλλαγή με το ψυκτικό υγρό

Ο πιο απλός και συνηθισμένος τρόπος ψύξης ενός καλουπιού είναι η κατασκευή ψυκτικών καναλιών στο εσωτερικό του, από τα οποία περνάει κάποιο ψυκτικό υγρό ή απλό νερό που ψύχει το καλούπι. Τα κανάλια αυτά είναι κυρίως κυκλικής διατομής αν και τα τετραγωνικής επίσης χρησιμοποιούνται αφού διαθέτουν μεγαλύτερη επιφάνεια και άρα καλύτερη ψύξη και μπορούν να διαφέρουν ως προς την διάταξη και τη διάμετρό τους ανάλογα με την κάθε περίπτωση ψύξης.

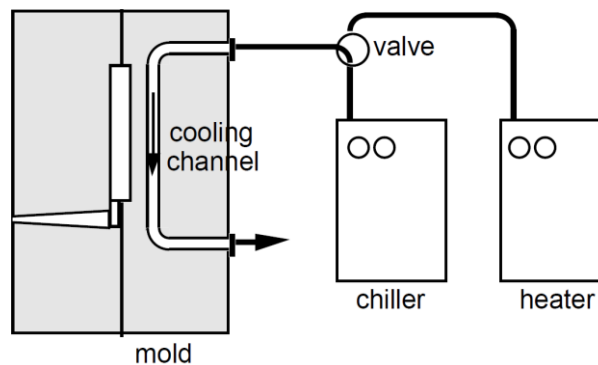
Στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην ψύξη των καλουπιών εκτός από τα κανάλια ψύξης είναι οι πλάκες ψύξης, τα κανάλια με baffles και τα κανάλια με bubblers (Εικόνα 1.6) . Οι πλάκες ψύξης, κατασκευάζονται από κράματα χαλκού έχοντας έτσι υψηλή θερμική αγωγιμότητα ενώ οι baffles είναι εξαρτήματα, τα οποία τοποθετούνται σε 90 μοίρες κλίση σε σχέση με το κυρίως ψυκτικό κανάλι και ωθούν το ψυκτικό υγρό προς την πάνω διεύθυνση για αποτελεσματικότερη ψύξη σε περιοχές που δεν προσεγγίζονται από κάποιο ψυκτικό κανάλι. Οι bubblers μοιάζουν κατασκευαστικά με τους baffles με την διαφορά ότι τοποθετείται ένας σωλήνας στη μέση τους στον οποίο εισέρχεται το ψυκτικό υγρό το οποίο αναβλύζει και ρέει εξωτερικά του σωλήνα ώστε να μπορεί να γυρίζει προς την έξοδο των καναλιών. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται παράλληλα κυκλώματα ενώ η σύνδεση των baffles σχηματίζει κυκλώματα σε σειρά.



Εικόνα 1.6 Baffle (αριστερά) , Bubbler (μέση) , Thermal Pin (δεξιά)

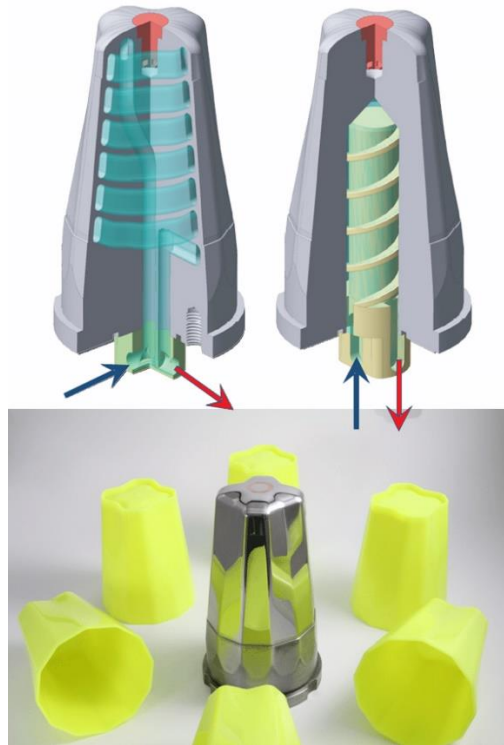
Η ψύξη σε ένα καλούπι μπορεί να επιτευχθεί με πολύ απλούς τρόπους όπως με την βύθιση του σε λουτρό νερού, με την σύνδεση της εισόδου των καλουπιών με σωλήνες από παροχή νερού και στην έξοδο επίσης με σωλήνες που καταλήγουν σε δεξαμενή με νερό είτε εάν αφορά γραμμή παραγωγής με τους ψύκτες (chillers). Ο chiller (Εικόνα 1.7) είναι μια μηχανή που απομακρύνει θερμότητα από το ρευστό είτε μέσω της συμπύκνωσης ατμών, είτε μέσω ψυκτικού κύκλου απορρόφησης. Αυτό το ρευστό περνάει έπειτα από εναλλάκτη θερμότητας και ψύχεται. Ο chiller διαθέτει σύστημα ελέγχου με το οποίο ο χειριστής μπορεί να επιλέξει την θερμοκρασία του νερού και την πίεση της αντλίας για τις απαιτήσεις παροχής. Έτσι μεταβάλλοντας αυτά τα δύο ο χειριστής μπορεί να μεταβάλλει τις ιδιότητες του νερού και να επιτυγχάνει κάθε φορά την επιθυμητή ψύξη. Τυπικοί λόγοι που μπορούν να οδηγήσουν σε αναρρύθμιση του chiller είναι οι παράγοντες που αλλάζουν την ποιότητα της έγχυσης (όπως η πίεση και η θερμοκρασία έγχυσης) καθώς και οι παράγοντες που αλλάζουν τη

θερμοκρασία του καλουπιού (όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η διάρκεια της κατεργασίας).



Εικόνα 1.7 Έλεγχος μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας ψυκτικά και θερμαντικά μέσα

Τα κανάλια ψύξης, με τα οποία ασχολείται η παρούσα διπλωματική, παραδοσιακά κατασκευάζονται με τρυπάνι σε φρέζα. Εάν επιθυμείται η διακλάδωση ενός ψυκτικού καναλιού τότε χρησιμοποιούνται ειδικές τάπες οι οποίες οδηγούν το νερό στη διεύθυνση που θέλει ο σχεδιαστής του καλουπιού. Ένας άλλος τρόπος να δημιουργηθούν κυκλώματα ψύξης τα οποία απαιτούν μία διαφορετική γεωμετρία από αυτή ενός σωλήνα που, είναι η διαμόρφωση κοιλοτήτων με κονδύλι από την φρέζα. Ένας οικονομικότερος τρόπος κατασκευής κυκλωμάτων ψύξης είναι με τόρνο, απαιτείται βέβαια περισσότερη δεξιότητα από τον χειριστή. Προηγμένες κατασκευές κυκλωμάτων ψύξης είναι αυτή με την κατεργασία Direct Metal Laser Sintering, στο οποίο το καλούπι εκτυπώνεται από 3d-εκτυπωτή καθιστώντας έτσι εφικτή την κατασκευή γεωμετρίας οποιουδήποτε είδους ψυκτικού καναλιού στο εσωτερικό του (conformal cooling Εικόνα 1.8), χωρίς να περιορίζεται σε ευθείς σωλήνες που επιβάλλει το τρυπάνι. Καθίσταται ωστόσο, το κόστος αυτών των καλουπιών προς το παρόν απαγορευτικό για μαζική παραγωγή προϊόντων.



Εικόνα 1.8 Ψυκτικά κανάλια με conformal cooling (αριστερά) και με baffle (δεξιά)

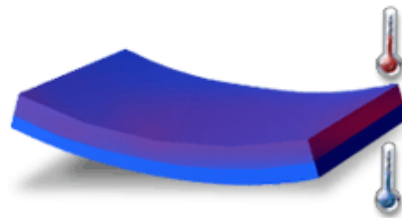
1.4. Επίδραση ψύξης στην ποιότητα του προϊόντος

Εκτός από την εύρεση βέλτιστου κυκλώματος ψύξης για οικονομικούς λόγους, επιδιώκεται ψύξη που θα αποδώσει προϊόν με τις απαραίτητες προδιαγραφές. Η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του καλουπιού, μπορεί είναι καθοριστική για τις διαστάσεις του προϊόντος, το βάρος του, την ποιότητα επιφανείας του, την εξόλκευση, τις μηχανικές του ιδιότητες και για την συρρίκνωση του αντικειμένου (shrinkage) και την σκέβρωσή του (warpage).

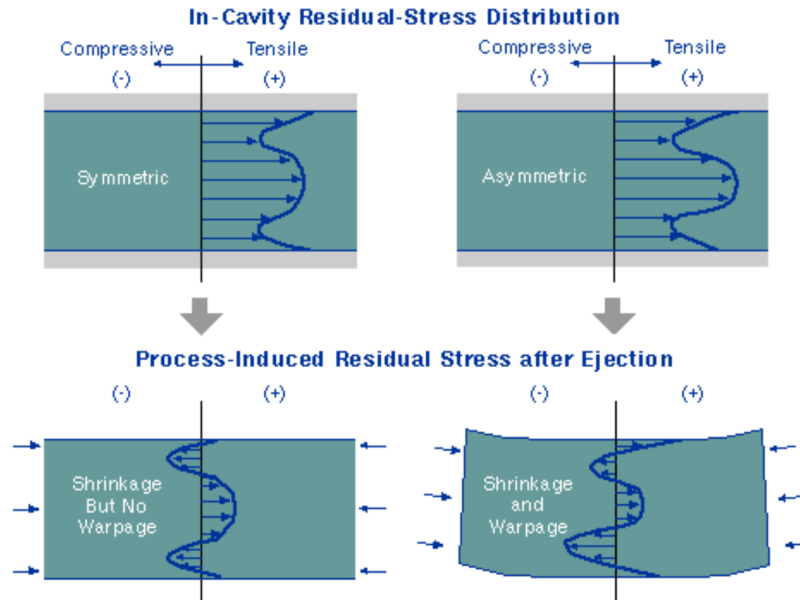
Η παρούσα διπλωματική μελετά την έγχυση θερμοπλαστικών πολυμερών. Αυτά αποτελούνται από γραμμικά μακρομόρια, που με τη θέρμανση μαλακώνουν και ρέουν, λόγω χαλάρωσης των μοριακών δεσμών και αφού μορφοποιηθούν, αποψύχονται και στερεοποιούνται.

Όταν ο ρυθμός απόψυξης είναι πολύ μικρός, οι πολυμερικές αλυσίδες έχουν το χρόνο να διευθετηθούν σε παράλληλες μεταξύ τους διατάξεις προσδίδοντας μεγάλη κρυσταλλικότητα ενώ αν συμβαίνει τ' αντίθετο με τη στερεοποίηση προκύπτει άμορφο υλικό. Ενώ τα περισσότερα τηγμένα πολυμερή είναι άμορφα και τα μόρια δεν βρίσκονται σε συγκεκριμένη διάταξη, στα κρυσταλλικά πολυμερή εμφανίζεται κρυσταλλική δομή κατά την ψύξη, η οποία μαζί με την άμορφη αποτελεί φάση ισορροπίας στο τελικό στάδιο.

Η κρυσταλλοποίηση των πολυμερών οδηγεί σε μια πιο αυστηρή διάταξη και άρα σε αντίστοιχη αύξηση της πυκνότητάς τους. Η μεταβολή της πυκνότητας είναι περίπου τόση όσο το ποσοστό συρρίκνωσης. Η άμορφη δομή των πολυμερών «κλειδώνεται» για γρήγορους ρυθμούς ψύξης, αλλά είναι πολύ κοινή η ύπαρξη πιο αργής ψύξης στην μία πλευρά του αντικειμένου ενώ στην άλλη πιο γρήγορης. Αυτό προκαλεί πιο άμορφη δομή στην μία πλευρά και πιο κρυσταλλική στην άλλη. Εφόσον η κρυσταλλική πλευρά θα παρουσιάσει μεγαλύτερη πυκνότητα και άρα μεγαλύτερη συρρίκνωση θα δημιουργηθούν αρκετές παραμένουσες τάσεις (Εικόνα 1.10) στο εσωτερικό του αντικειμένου αφού η μία πλευρά συρρικνώνεται περισσότερο από την άλλη (Εικόνα 1.9) . Με την σειρά της η σκέβρωση είναι αποτέλεσμα φαινομένων ανομοιόμορφης συρρίκνωσης και των παραμενουσών τάσεων μέσα στο υλικό.



Εικόνα 1.9 Θερμική Ανομοιομορφία που προκαλεί σκέβρωση (warpage)



Εικόνα 1.10 Συρρίκνωση και μετά σκέβρωση ως αποτέλεσμα παραμενουσών τάσεων

Το φαινόμενο της συρρίκνωσης μπορεί να επηρεαστεί ακόμα από την πίεση της έγχυσης του πολυμερούς στο καλούπι, από την πολύ υψηλή θερμοκρασία έγχυσης και από την υψηλή θερμοκρασία του καλουπιού.

1.5. Οργάνωση Κειμένου

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρατίθενται κάποια εισαγωγικά στοιχεία ως προς τις μεθόδους ψύξης των καλουπιών καθώς και της ποιότητας των παραχθέντων προϊόντων ανάλογα με αυτές. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύονται και προσδιορίζονται οι έννοιες της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή και συναγωγή στο εσωτερικό του καλουπιού. Στο τρίτο κεφάλαιο προσδιορίζεται το υδροδυναμικό μοντέλο που διέπει το πρόβλημα. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η επιλογή του ως προς μελέτη καλουπιού, τα χαρακτηριστικά του και το υπάρχον σύστημα ψύξης. Προσδιορίζονται επίσης τα κριτήρια βελτιστοποίησης σε συνάρτηση με τις επιθυμητές κρυσταλλικές ιδιότητες του υλικού του πολυμερούς του προϊόντος. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθεται ο παραμετρικός σχεδιασμός για βελτιωμένο κύκλωματος ψύξης καθώς και τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων, οι συγκρίσεις μεταξύ τους και ο τελικός σχεδιασμός.

2. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η μεταφορά θερμότητας μέσα σε ένα καλούπι γίνεται με αγωγή και συναγωγή. Η συναγωγή αφορά τις περιοχές που το ρευστό έρχεται σε επαφή με τα στερεά τοιχώματα του καλουπιού. Συναγωγή έχουμε επίσης όταν το ζεστό τηγμένο πλαστικό, εισέρχεται στις κοιλότητες του καλουπιού κατά την έγχυση. Με μικρότερα ρεύματα θερμότητας, παρουσιάζεται συναγωγή και στο ζεστό καλούπι με τον αέρα που τον περιβάλλει. Η αγωγή αφορά τη μεταφορά θερμότητας στα στερεά κομμάτια του καλουπιού, δηλαδή το κυρίως μέρος του αλλά και την επαφή με τους εξολκείς κλπ. Βοηθητικά εξαρτήματα για τη συναρμολόγηση του καλουπιού στη μηχανή καθώς και την ίδια την επαφή του καλουπιού με το ρευστό.

2.1. Συναγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή εμφανίζεται στην επιφάνεια των τοιχωμάτων του καλουπιού, στους ψυκτικούς αγωγούς, που έρχονται σε επαφή με το ψυκτικό υγρό. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού και από τη ροή του. Στην περίπτωση της συναγωγής μέσα στα κανάλια ψύξης του καλουπιού, προκύπτει εξαναγκασμένη συναγωγή η οποία προκαλείται από την παροχή της αντλίας ή ακόμα και την παροχή απλά από τη βρύση. Για έναν σωλήνα συγκεκριμένα, η ροή θερμότητας που συναλλάσσεται είναι

$$Q = h A (T_{wall} - T_{wat}) \quad (2- 1)$$

όπου

h : Ειδική συναγωγιμότητα

A : Επιφάνεια διεπαφής υγρού-τείχους

T_{wall} και T_{wat} : Θερμοκρασία τοιχώματος και θερμοκρασία νερού αντίστοιχα

Η μελέτη της ειδικής συναγωγιμότητας h και κατ' επέκταση του φαινομένου της συναγωγής, αποτελεί σημαντικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής, που μελετάται πιο διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3.

2.2. Αγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε ένα καλούπι εμφανίζεται στο κυρίως σώμα-μέταλλο του καλουπιού, εφόσον υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές στο σώμα του. Για στερεό

σώμα στο οποίο η θερμοκρασία $T(x, t)$ εξαρτάται από τον χρόνο t και μεταβάλλεται κατά τη διάσταση του μήκος x , η πυκνότητα παροχής θερμότητας περιγράφεται από την απλή εξίσωση Fourier:

$$q = -k A \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad (2- 1)$$

Σύμφωνα με την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας, προκύπτει η εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας. Σε μία διάσταση και μη μόνιμη μεταφορά θερμότητας είναι:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2- 2)$$

Όπου

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{m^2}{s} \right): \quad \text{Η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα του υλικού.}$$

2.3. Εξίσωση θερμότητας

Η Εξίσωση θερμότητας ή αλλιώς εξίσωση Fourier, για διάδοση θερμότητας στις 3 διαστάσεις του χώρου και για μη μόνιμη μεταφορά θερμότητας δίνεται για κυλινδρικές συντεταγμένες από τον τύπο:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2- 4)$$

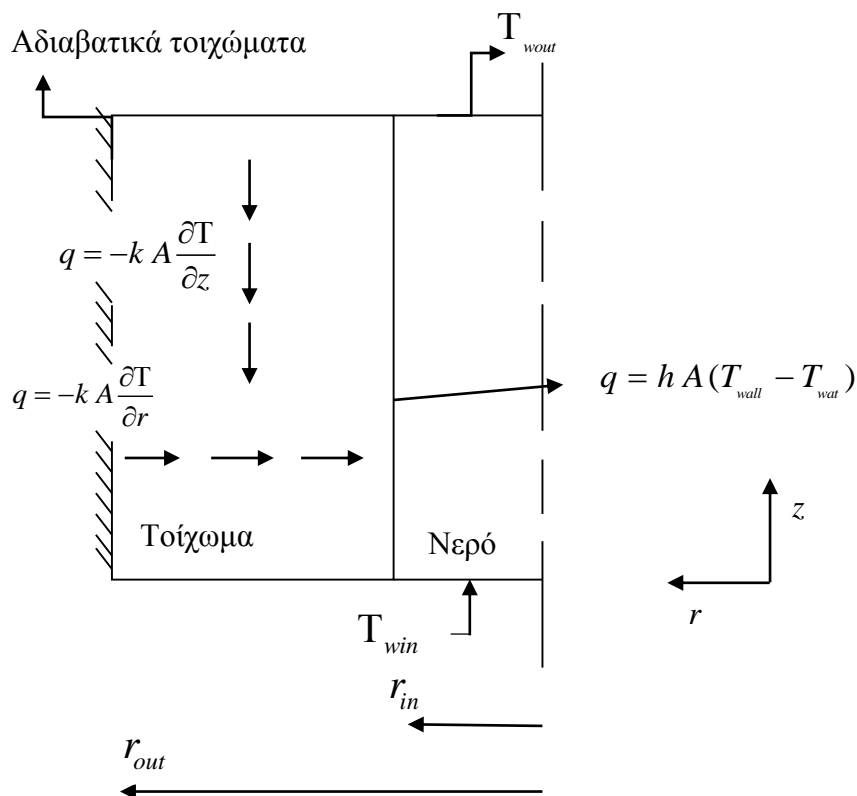
όπου $T(r, z, \varphi, t)$.

Για το τοίχωμα γύρω από ένα κανάλι ψύξης, η μεταφορά θερμότητας γίνεται στις 2 διευθύνσεις και σε μη μόνιμες συνθήκες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1. Οπότε η εξίσωση , μετατρέπεται σε

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-5)$$

Το νερό, εισέρχεται σε μία θερμοκρασία εισόδου πάντα ίδια T_{win} και εξέρχεται σε διαφορετική κάθε φορά T_{wout} . Αυτό συμβαίνει γιατί το νερό ψύχει σε κάθε πέρασμά του κάθε φορά τοίχωμα που έχει όλο και χαμηλότερη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται το ίδιο η θερμοκρασία του σε κάθε πέρασμα. Αυτό καθιστά και το φαινόμενο

μεταβατικό ως προς τον χρόνο. Το τοίχωμα από την μεριά του, προσδίδει ένα ποσό θερμότητας στο νερό για να το ζεστάνει το οποίο είναι διαφορετικό κατά την έννοια του z , εφόσον το νερό έχει διαφορετική θερμοκρασία κατά μήκος του σωλήνα. Ένα φαινόμενο που λαμβάνει χώρα την ίδια χρονική στιγμή, είναι η μεταφορά θερμότητας με αγωγή εσωτερικά του τοιχώματος κατά την έννοια του z λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς του. Θερμοκρασιακή διαφορά και άρα ρεύμα θερμότητας προκύπτει και κατά την ακτινική διεύθυνση r . Το φαινόμενο απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1 :



Εικόνα 2.1 Διάδοση μεταφοράς θερμότητας σε ψυκτικό κανάλι

Εντέλει το μαθηματικό μοντέλο μαζί με τις συνοριακές συνθήκες στα τοιχώματα και την αρχική συνθήκη συντάσσεται ως εξής:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-6)$$

Αρχική συνθήκη (Α.Σ.) $T(r, z, 0) = T_o$

$$1^{\text{η}} \text{ Συνοριακή συνθήκη (Σ.Σ.1)} \quad h A (T_{\text{wall}} - T_{\text{wat}}) = -k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{in}}}$$

$$r = r_{\text{in}}$$

$$2^{\text{η}} \text{ Συνοριακή συνθήκη (Σ.Σ.2)} \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{out}}} = 0$$

$$r = r_{\text{out}}$$

Το φαινόμενο αρχίζει με μια ενιαία θερμοκρασία στο τείχος T_o . Στην εσωτερική διεπιφάνεια νερού-τοιχώματος, το ρεύμα θερμότητας που δημιουργείται από την συναγωγή, μετατρέπεται σε αντίστοιχο ρεύμα θερμότητας που θα διαδοθεί με αγωγή στο εσωτερικό του τοιχώματος. Η δεύτερη συνοριακή συνθήκη, αφορά τα αδιαβατικά τοιχώματα στην εξωτερική διάμετρο του καναλιού ψύξης. Η θεώρηση αυτή γίνεται, αφού μέσα σε ένα καλούπι, τα ψυκτικά κανάλια διατάσσονται συμμετρικά και ανάμεσα σε δύο κανάλια, το «πεδίο» κατανομών ρεύματος θερμότητας που θα παράγουν, θα αλληλοεξουδετερώνεται, δημιουργώντας έτσι μηδενικό πεδίο και άρα αδιαβατικά τοιχώματα.

Η διαφορική εξίσωση θα επιλυθεί με την μέθοδο των χωριζόμενων μεταβλητών σε δύο υποπροβλήματα. Το πρώτο θα αφορά την εξάρτηση αποκλειστικά από τον χρόνο και το δεύτερο θα αφορά την εξάρτηση από τις δύο διαστάσεις. Παράλληλα θα αδιαστατοποιηθεί το πρόβλημα με τις αδιάστατες μεταβλητές ως εξής :

$$\theta = \frac{T - T_{\text{wall}}}{T_{\text{wall}} - T_{\text{wat}}}$$

$$\tau = \frac{a t}{r_{\text{out}}^2}$$

$$\xi = \frac{r}{r_{\text{out}}}$$

$$\eta = \frac{z}{L}$$

Θα είναι πλέον σε αδιάστατη μορφή $\theta = \theta(\xi, \eta, \tau)$ και το μοντέλο αναδιαμορφώνεται ως εξής :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} + \frac{r_{out}^2}{L^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (2-7)$$

A.Σ. $\theta(\xi, \eta, 0) = 1$

Σ.Σ.1 $\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} = 0$

Σ.Σ.2 $\frac{\partial \theta}{\partial \xi} + Bi \theta = 0$, όπου $Bi = \frac{h r_{out}}{k}$ ο αριθμός Biot.

Η μεταβλητή αδιαστατοποίησης με την μέθοδο των χωριζόμενων μεταβλητών θα είναι $\theta(\xi, \eta, \tau) = G(\tau) \Phi(\xi, \eta)$ και η διαφορική εξίσωση μετασχηματίζεται σε :

$$\frac{G'}{G} = \frac{1}{\Phi} \left(\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) \right) + \varepsilon^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} = -\lambda^2 \quad (2-8)$$

όπου $\varepsilon = \frac{r_{out}^2}{L^2}$ και $-\lambda^2$ η αρνητική σταθερά χωρισμού μεταβλητών που θα ισούνται τα δύο μέλη της εξίσωσης.

Προκύπτουν δύο διαφορετικά συστήματα που η επίλυση του καθενός θα δώσει την συνολική ζητούμενη.

Το πρώτο σύστημα $\frac{G'}{G} = -\lambda^2$ θα δώσει την $G(\tau) = A e^{-\lambda^2 \tau}$.

Το δεύτερο σύστημα θα είναι το :

$$\frac{1}{\Phi} \left(\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) \right) + \varepsilon^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} = -\lambda^2 \quad (2-9)$$

με δύο συνοριακές συνθήκες:

Σ.Σ.1 $\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} = 0$

Σ.Σ.2 $\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + Bi \Phi \right|_{\xi=\frac{r_{in}}{r_{out}}} = 0$

Με την σειρά της αυτή η διαφορική εξίσωση θα λυθεί επίσης με την μέθοδο των χωριζόμενων μεταβλητών με $\Phi(\xi, \eta) = f(\xi)g(\eta)$ και άρα η διαφορική εξίσωση θα μετασχηματιστεί στην :

$$\frac{1}{f} \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial f}{\partial \xi} \right) = -\frac{e^2}{g} \frac{\partial^2 g}{\partial \eta^2} - \lambda^2 = \beta^2 \quad (2-10)$$

Αυτή χωρίζεται σε δύο προβλήματα ιδιοτιμών. Το πρώτο πρόβλημα είναι :

$$\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial f}{\partial \xi} \right) + \beta^2 f = 0 \quad (2-11)$$

$$\Sigma. \Sigma. 1 \quad f'(\xi)g(\eta) \Big|_{\xi=1} = 0$$

$$\Sigma. \Sigma. 2 \quad \frac{\partial f(\xi)}{\partial \xi} + Bi f(\xi) \Big|_{\xi=\alpha=\frac{r_{in}}{r_{out}}} = 0$$

Από τη λύση της εξίσωσης προκύπτει μια εξίσωση Bessel πρώτου βαθμού :

$$f(\xi) = c_1 J_o(\beta\xi) + c_2 Y_o(\beta\xi) \quad (2-12)$$

Από την ικανοποίηση της πρώτης οριακής συνθήκης προκύπτει : $c_2 = c_1 \frac{-J_1(\beta)}{Y_1(\beta)}$, αφού από

τις ιδιότητες των συντελεστών Bessel είναι $J_o' = -J_1$. Η εξίσωση γίνεται :

$$f(\xi) = c_1 \frac{(J_o(\beta\xi) Y_1(\beta) + J_1(\beta) Y_o(\beta\xi))}{Y_1(\beta)} \quad (2-13)$$

Από την δεύτερη οριακή συνθήκη $f'(a) = -Bi f(a)$ είναι

$$\lambda_n [J_1(\lambda_n a) Y_1(\lambda_n r_{out}) - J_1(\lambda_n r_{out}) Y_1(\lambda_n a)] = Bi [J_o(\lambda_n a) Y_1(\lambda_n r_{out}) - J_1(\lambda_n r_{out}) Y_o(\lambda_n a)]. \quad \text{H}$$

ιδιοσυνάρτηση αυτού του προβλήματος είναι η :

$$\varphi_n(r) = J_o(\lambda r) Y_1(\lambda r_{out}) - J_1(\lambda r_{out}) Y_o(\lambda r) \quad (2-14)$$

Το δεύτερο πρόβλημα είναι μια συνήθης διαφορική εξίσωση :

$$\frac{\partial^2 g}{\partial \eta^2} + \gamma^2 g = 0 \quad (2-15)$$

όπου $\gamma^2 = \frac{(\lambda^2 + \beta^2)}{e^2}$ με γενική λύση

$$g(\eta) = c_1 \cos(\gamma\eta) + c_2 \sin(\gamma\eta) \quad (2-16)$$

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα οριακών τιμών, δεν μπορούν να προσδιοριστούν οι συντελεστές c_1 και c_2 αφού δεν έχουν προσδιορισθεί οι συνοριακές συνθήκες που αφορούν το $\eta = 0$ στην αρχή του σωλήνα και $\eta = 1$ σε μήκος L από την αρχή του σωλήνα.

Εφόσον θα πρέπει να υποτεθούν αυτές οι δύο συνοριακές συνθήκες, η αναλυτική επίλυση σταματά σε αυτό το σημείο και ακολουθεί η μελέτη της μεταφοράς θερμότητας με τα υπολογιστικά πακέτα του ANSYS CFX και ANSYS transient thermal.

3. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

3.1. Ειδική συναγωγιμότητα h

Το φαινόμενο της ροής του ρευστού μέσα στο ψυκτικό κανάλι, είναι απαραίτητο να αναλυθεί, προτού διεξαχθούν θερμικές μελέτες ως προς την ψύξη του καλουπιού. Ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει την ποιότητα της ψύξης σε ένα ψυκτικό κανάλι είναι η ειδική συναγωγιμότητα h . Αυτή με τη σειρά της, εξαρτάται από διάφορα μεγέθη και για εξαναγκασμένη συναγωγή στο εσωτερικό ενός σωλήνα σε πλήρως ανεπτυγμένες συνθήκες, όπως παρουσιάζεται σ' ένα κανάλι ψύξης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$h = Nu \frac{k}{d}$$

$Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^n$, η εξίσωση Dittus-Boelter με $n = 0,4$ για ρευστό που θερμαίνεται.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

$$Re = \frac{d v}{\nu}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

όπου

Nu : Ο αριθμός Nusselt

Re : Ο αριθμός Reynolds

Pr : Ο αριθμός Prandl

μ : Το δυναμικό Ιξώδες σε $kg/(m \cdot s)$

ν : Το κινηματικό Ιξώδες σε m^2/s

ρ : Η πυκνότητα σε kg/m^3

v : Η ταχύτητα ρευστού σε m/s

d : Η διάμετρος σωλήνα σε m

C_p : Η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση σε $J/(kg \cdot K)$

k : Η θερμική αγωγιμότητα σε $W/(m \cdot K)$

Χρησιμοποιώντας διαδοχικά τις παραπάνω σχέσεις, η ειδική συναγωγιμότητα h δίνεται από συναρτήσει όλων των παραπάνω μεγεθών ως:

$$h = 0,023 \left(\frac{d \nu \rho}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{\mu C_p}{k} \right)^{0,4} \frac{k}{d} \quad (3-1)$$

με μονάδες μέτρησης $\frac{W}{(m^2 K)}$.

Στην παραπάνω εξίσωση, η ειδική συναγωγιμότητα h εξαρτάται από επτά μεγέθη, εκ των οποίων τα τέσσερα μεταβάλλονται ανάλογα με την θερμοκρασία του ρευστού. Αυτά είναι η πυκνότητα ρ , το δυναμικό ιξώδες μ , η θερμική αγωγιμότητα k και η ειδική θερμοχωρητικότητα C_p .

Στο Κεφάλαιο 3.2 παρατίθεται ο έλεγχος ευαισθησίας που έγινε για την εξάρτηση του h από τα παραπάνω μεγέθη.

3.2. Ανάλυση ευαισθησίας

Από τα ρευστά που χρησιμοποιούνται για την ψύξη των καλουπιών, από τα πιο αποδοτικά και συγχρόνως οικονομικά άρα και συχνά χρησιμοποιούμενο είναι το νερό. Με αυτό, θα διεξαχθούν όλες οι παρακάτω αναλύσεις.

Το εύρος θερμοκρασιών που είναι πιθανό να αναπτυχθούν στο νερό κατά την κίνησή του μέσα στο είδος καλουπιού που θα μελετηθεί, κυμαίνεται από $20^\circ C - 40^\circ C$. Από την βιβλιογραφία και για το συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών βρέθηκαν οι τιμές των ρ και C_p σε πίνακες, ενώ βρέθηκαν και οι εξισώσεις υπολογισμού των μ και k συναρτήσεων των θερμοκρασιών:

$$\mu(T) = 1,684 \times 10^{-3} - 4,2624 \times 10^{-5} T + 5,062 \times 10^{-7} T^2 - 2,244 \times 10^{-9} T^3 \quad (3-2)$$

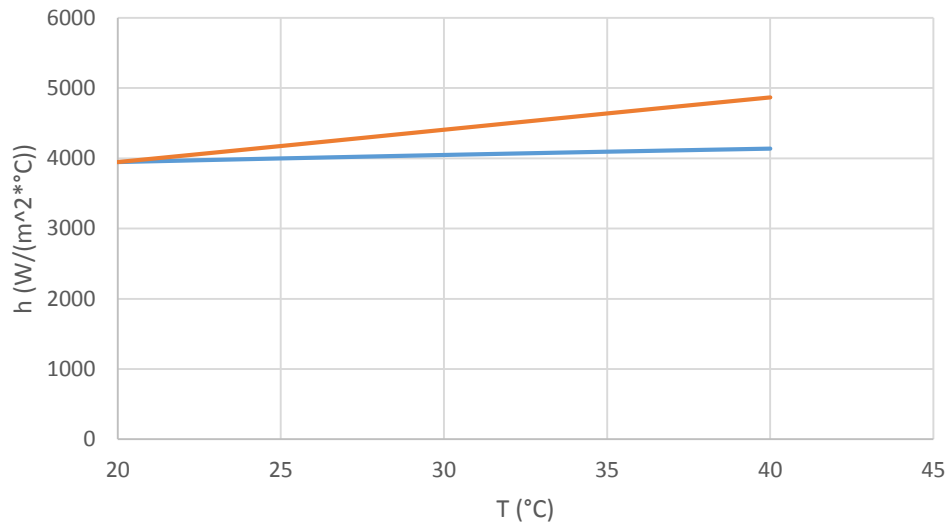
$$k(T) = 0,5636 + 1,946 \times 10^{-3} T - 8,151 \times 10^{-6} T^2 \quad (3-3)$$

με μονάδες μέτρησης που ορίστηκαν παραπάνω.

Στα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 3.1, Διάγραμμα 3.2, Διάγραμμα 3.3, Διάγραμμα 3.4), σχεδιάζονται δύο καμπύλες: η μία αφορά κάθε φορά την τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας h όταν όλα τα μεγέθη ρ , μ , k , C_p μεταβάλλονται με την θερμοκρασία και η δεύτερη αφορά την τιμή του h όταν δεν μεταβάλλεται μόνο ένα από τα παραπάνω μεγέθη. Αυτό γίνεται, για να εξακριβωθεί η βαρύτητα με την οποία επηρεάζει το κάθε μέγεθος το h . Για τους υπολογισμούς, θεωρούνται διάμετρος σωλήνα $d = 10mm$ και

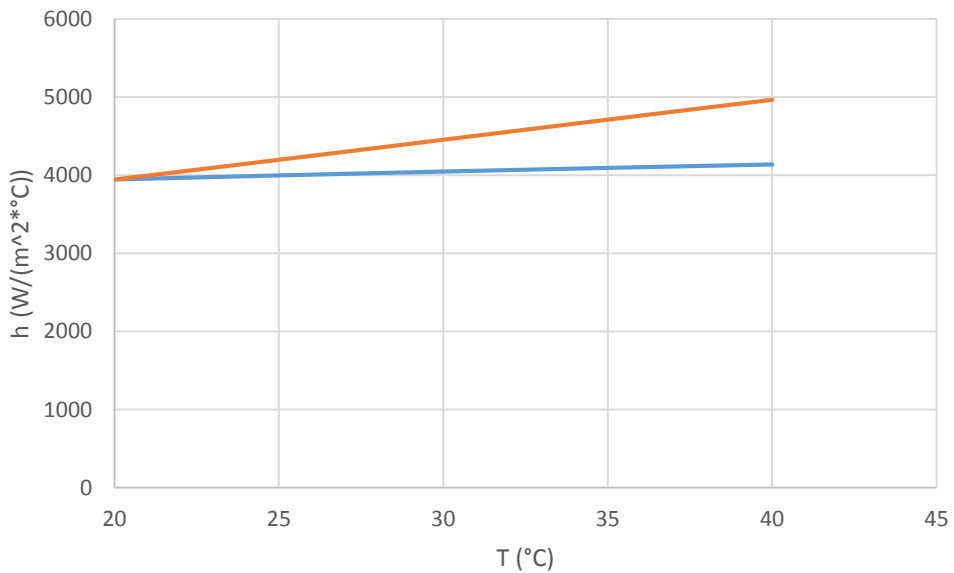
ταχύτητα του ρευστού $u = 0,8 m/s$, επιλογές που θα δικαιολογηθούν σε παρακάτω παράγραφο.

ρ σταθ.

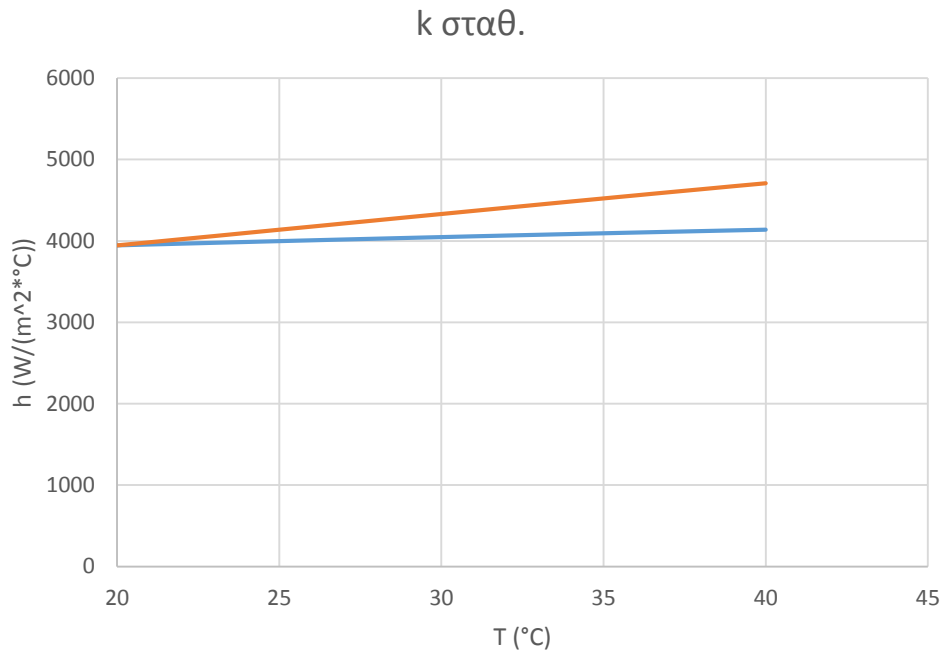


Διάγραμμα 3.1 h για όλα τα μεγέθη μεταβαλλόμενα (πορτοκαλί) και για h μόνο ρ σταθερή (μπλε)

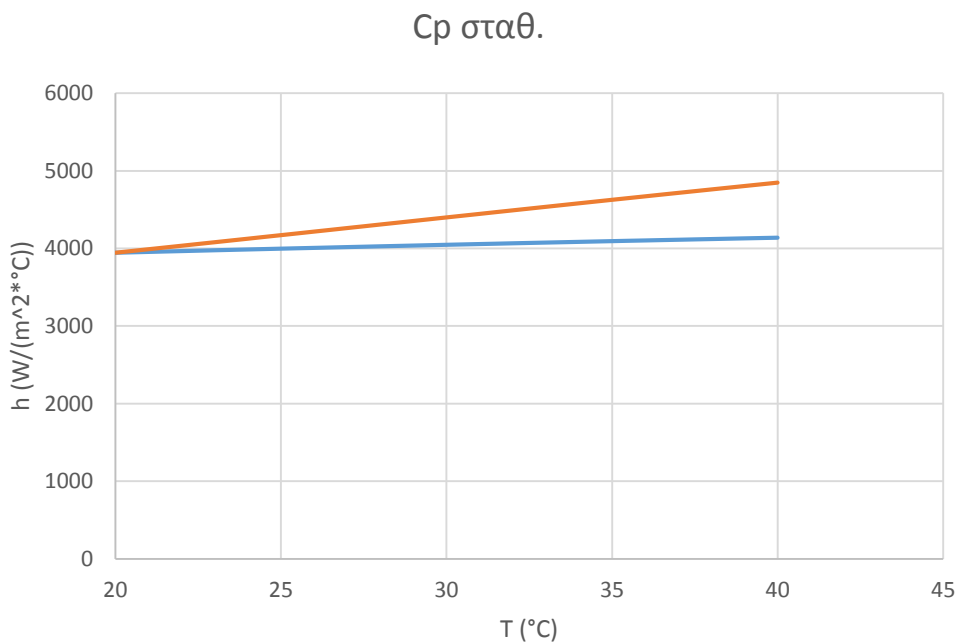
μ σταθ.



Διάγραμμα 3.2 h για όλα τα μεγέθη μεταβαλλόμενα (πορτοκαλί) και για h μόνο μ σταθερό (μπλε)



Διάγραμμα 3.3 h για όλα τα μεγέθη μεταβαλλόμενα(πορτοκαλί) και για h μόνο k σταθερό (μπλε)



Διάγραμμα 3.4 h για όλα τα μεγέθη μεταβαλλόμενα(πορτοκαλί) και για h μόνο C_p σταθερό(μπλε)

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι όλα τα παραπάνω μεγέθη ενδέχεται να επηρεάσουν την τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας h . Πρέπει να εξακριβωθεί ο βαθμός στον οποίο αυτό γίνεται, ώστε εάν διαπιστωθεί ότι είναι αρκετά μικρός (της τάξεως του

1% ~ 2%), να αμεληθεί ακόμα και αυτή η μεταβολή. Το κριτήριο για την διαπίστωση αυτή, θα είναι η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον αγωγό συγκρινόμενη από τον αλγόριθμο υπολογισμού στον οποίο όλα τα μεγέθη αλλάζουν , με το μοντέλο στο ANSYS CFX στο οποίο όλα είναι σταθερά και έχουν ληφθεί για θερμοκρασία των 20°C . Επιδιώκεται

$$\frac{T_{out-ANSYS} - T_{out-αλγορ.}}{T_{out-αλγορ.}} = 1\% \sim 2\% .$$

Για να βρεθεί αυτή η θερμοκρασία εξόδου από το μοντέλο στο ANSYS CFX, θα πρέπει ο σωλήνας να χωριστεί σε πεπερασμένα στοιχεία, που περιέχουν στοιχειώδη όγκο ρευστού, το μέγεθος των οποίων δεν θα επιτρέπει μεγάλες διαφοροποιήσεις της ειδικής συναγωγιμότητας h ($\frac{h(T_{water-out}) - h(T_{water-in})}{h(T_{water-in})} = 1\% \sim 2\%$), υπολογισμένη πρώτα στη

θερμοκρασία εισόδου του νερού και έπειτα στη θερμοκρασία εξόδου του από το πεπερασμένο στοιχείο νερού.

Έστω ότι το κρίσιμο μήκος του πεπερασμένου στοιχείου που αναζητείται είναι $L_{crit} = 10mm$. Η μέση ταχύτητα του ρευστού είναι $u = 0,8m/s$. Το νερό εισέρχεται με θερμοκρασία $T_{water-in} = 20^{\circ}C$. Λόγω μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, το νερό προσλαμβάνει ρεύμα θερμότητας :

$$q_I = C_p (T_w) \dot{m} (T_{wat-out} - T_{wat-in}) \quad (3- 6)$$

Το ίδιο ποσό ρεύματος θερμότητας εγκαταλείπει το τείχος λόγω συναγωγής σύμφωνα με :

$$q_I = h(T_{wat-in}) A (T_s - T_w) \quad (3- 7)$$

όπου

$$A = \pi d L_{crit} : \quad \text{Η επιφάνεια συναγωγής}$$

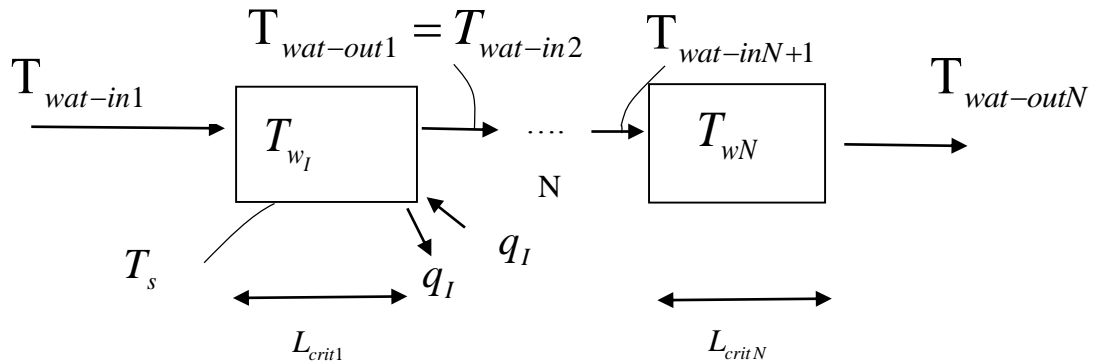
$$T_s : \quad \text{Η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του αγωγού}$$

$$T_w : \quad \text{Η θερμοκρασία του στοιχειώδους όγκου ρευστού}$$

Η θερμοκρασία του στοιχειώδους όγκου ρευστού υπολογίζεται ως η μέση θερμοκρασία της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου:

$$T_{wl} = \frac{T_{wat-in} + T_{wat-out}}{2} \quad (3- 8)$$

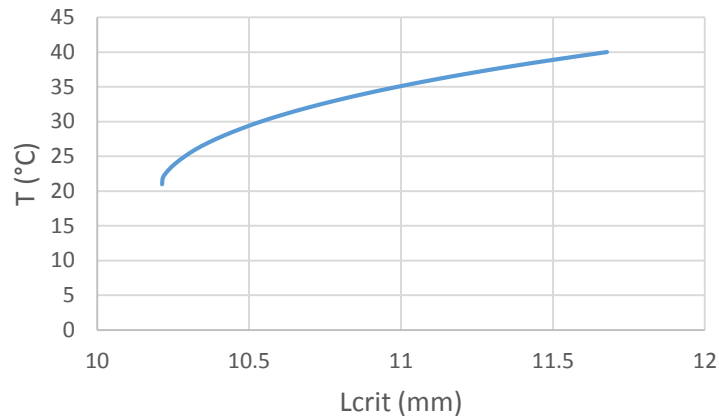
Ο δείκτης I αναφέρεται στο πρώτο πεπερασμένο στοιχείο και άρα στο πρώτο βήμα που αφορά την θερμοκρασία εισόδου στους 20°C . Η ίδια διαδοχή υπολογισμών θα πραγματοποιηθεί για τις διαφορετικές κάθε φορά θερμοκρασίες εισόδου νερού στο πεπερασμένο στοιχείο από το εύρος λειτουργίας $20^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$. Στην Εικόνα 3.1, φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του αλγορίθμου:



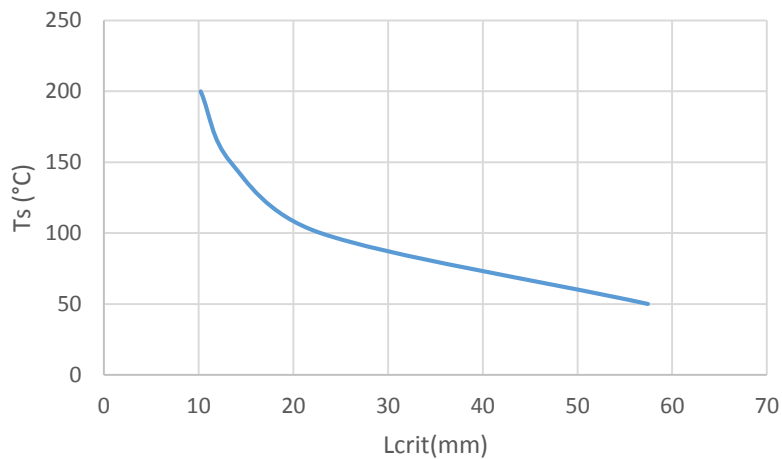
Εικόνα 3.1 Αλγόριθμος υπολογισμού θερμοκρασίας εξόδου νερού από πεπερασμένο όγκο ρευστού. Από τη Σχέση (3-6), υπάρχουν όλα τα δεδομένα για να υπολογιστούν το ρεύμα θερμότητας Q_i και έπειτα, από τη Σχέση (3-7), μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία εξόδου του νερού $T_{wat-out}$. Υπολογίζεται αυτό το μέγεθος και για διάφορες θερμοκρασίες του τείχους T_s .

Με χρήση συναρτήσεων «what-if-analysis» και «goal seek» στο Excel, θα προκύψουν όλες οι τιμές « L_{crit} = μήκος πεπερασμένου στοιχείου» που ικανοποιούν το κριτήριο της μικρής αυτής μεταβολής της ειδικής συναγωγιμότητας h .

Προκύπτει το Διάγραμμα 3.5 για την πρώτη δοκιμή θερμοκρασίας τείχους $T_s = 200^{\circ}\text{C}$ ενώ για κάθε θερμοκρασία τείχους T_s το κρίσιμο μήκος πεπερασμένου θα αλλάζει σύμφωνα με το Διάγραμμα 3.6:



Διάγραμμα 3.5 Μεταβολή κρίσιμου μήκος πεπερασμένου στοιχείου L_{crit} συναρτήσει θερμοκρασιών εισόδου ρευστού (T) στο στοιχειώδη όγκο ρευστού και θερμοκρασία τοιχωμάτων $T_s = 200^\circ C$



Διάγραμμα 3.6 Μεταβολή κρίσιμου μήκος πεπερασμένου στοιχείου L_{crit} συναρτήσει θερμοκρασιών τοιχώματος αγωγού (T_s)

Παρατηρείται ότι όσο η θερμοκρασία εισόδου του νερού αυξάνει, αυξάνονται συνεχώς και τα κρίσιμα μήκη πεπερασμένων στοιχείων και όσο η θερμοκρασία του τοιχώματος αυξάνεται, μειώνεται το κρίσιμο μήκος του πεπερασμένου στοιχείου.

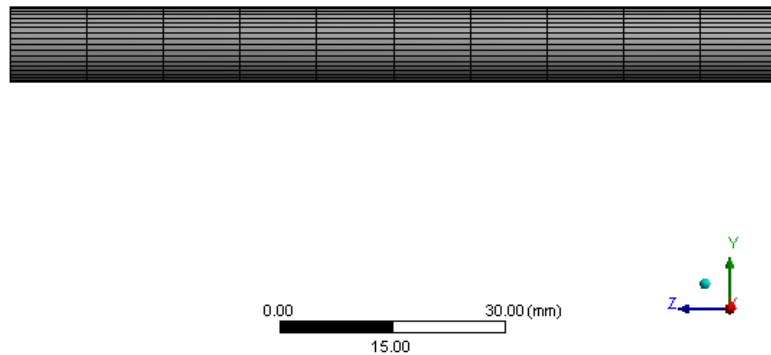
T_s (°C)	L_{crit} (mm)
50	57,4
100	22,9
150	13,4
200	10,2

Πίνακας 1 Κρίσιμο μήκος πεπερασμένου στοιχείου L_{crit} για διάφορες θερμοκρασίες τοιχώματος T_s

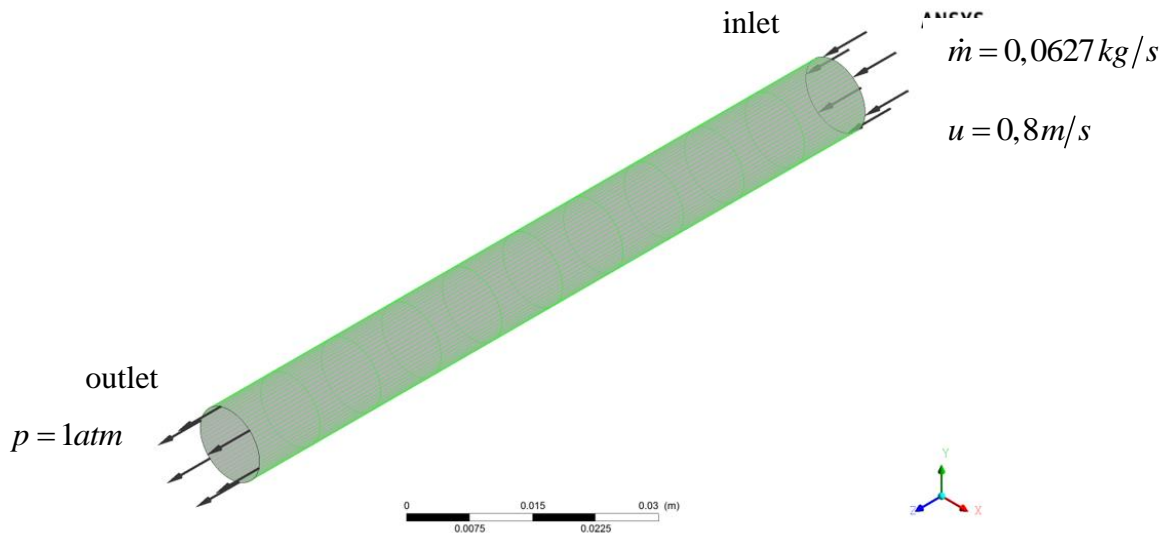
Η πιο αυστηρή απαίτηση που προκύπτει από τον Πίνακα 1 είναι $L_{crit} = 10,2mm$.

Έστω ότι σχηματίζεται ένας αγωγός με μήκος $L = 102mm$. Αυτός ο σωλήνας, θα έχει δηλαδή δέκα υποδιαίρεσεις πεπερασμένων στοιχείων κρίσιμου μήκους στο πλέγμα του (Εικόνα 3.2). Με τον ίδιο αλγόριθμο όπως προηγουμένως, είναι εφικτή η εύρεση της θερμοκρασίας του νερού στην έξοδο του σωλήνα.

Έστω τώρα ότι ο ίδιος σωλήνας σχεδιάζεται στο ANSYS CFX αλλά αντί τα ρ, μ, k, C_p να μεταβάλλονται με την θερμοκρασία, παραμένουν σταθερά και ίσα με την τιμή τους στους $20^\circ C$. Στο μοντέλο ορίζονται αρχικές συνθήκες στην είσοδο $\dot{m} = 0,0627 kg/s$ και $u = 0,8m/s$ (Εικόνα 3.3) καθώς και πίεση περιβάλλοντος στην έξοδο, επιλογές που θα εξηγηθούν στο επόμενο Κεφάλαιο.



Εικόνα 3.2 Πλέγμα αγωγού με 10 διαμερίσεις κρίσιμο μήκος πεπερασμένου στοιχείου



Εικόνα 3.3 Ορισμός παραμέτρων στο ANSYS CFX (παροχής μάζας και ταχύτητα στην είσοδο και πίεση περιβάλλοντος στην έξοδο)

Εάν διαπιστωθεί ότι για διάφορα μοντέλα στα οποία διαφοροποιείται ένα μέγεθος, σε αυτή την περίπτωση η θερμοκρασία του τείχους T_s , η θερμοκρασία εξόδου του νερού στην έξοδο του σωλήνα δεν διαφέρει όσο καθορίστηκε προηγουμένως στο ANSYS σε σχέση με τον αλγόριθμο, θα μπορέσει να προκύψει ένα ενιαίο h για όλο το ψυκτικό κανάλι. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακας 2:

T_s (°C)	$T_{out-αλγορ.}$ (°C)	$T_{out-ANSYS}$ (°C)	$\frac{T_{out-ANSYS}}{T_{out-αλγορ.}}$
50	21,57	21,65	1,004
100	24,23	24,41	1,007
150	26,97	27,17	1,007
200	29,79	29.92	1,004

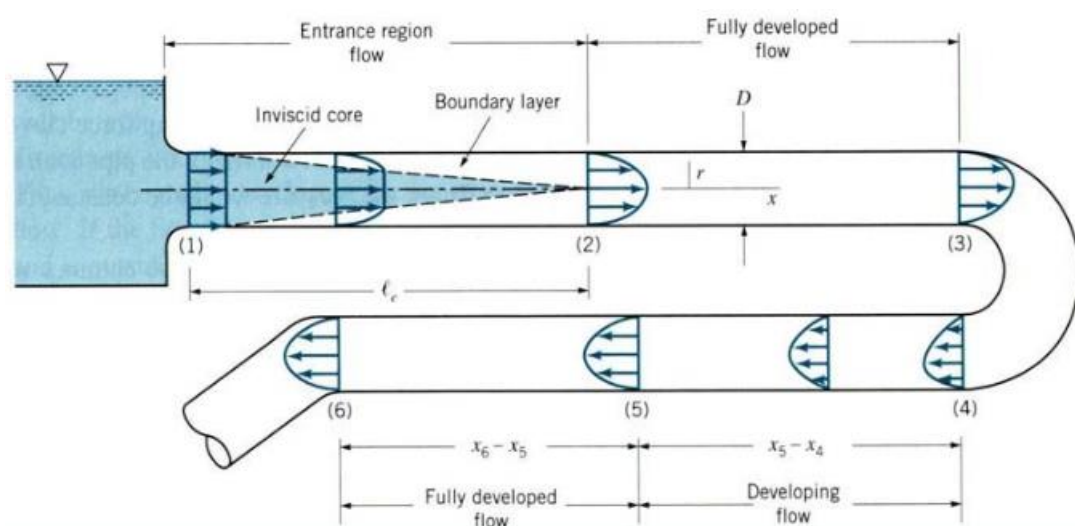
Πίνακας 2 Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμου-ANSYS

Παρατηρείται ότι η μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του νερού με την μέθοδο υπολογισμού του αλγορίθμου σε σχέση με αυτή στο μοντέλο του ANSYS είναι πολύ μικρότερη της τάξεως του 0,7%, οπότε μπορεί να θεωρηθεί σταθερή η ειδική συναγωγιμότητα h στους 20°C .

3.3. Χαρακτηριστικά ροής-Μοντέλο CFX

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποδείχθηκε η ανεξαρτησία της ειδικής συναγωγιμότητας h από τις παραμέτρους ρ, μ, k, C_p για το μοντέλο που μελετάται μέσω προσομοιώσεων με το ANSYS CFX. Σε αυτό το κεφάλαιο επεξηγούνται οι παράμετροι που ορίστηκαν στο πρόγραμμα όσον αφορά την ανάπτυξη της ροής και την τύρβη καθώς και την μονιμότητα της ροής.

Εξετάζεται αρχικά η ανάπτυξη της ροής. Το μοντέλο που εξετάστηκε αφορά το κανάλι μήκους $L = 102mm$. Η ροή στο ψυκτικό κανάλι σωλήνα θα γίνει πλήρως ανεπτυγμένη μετά από κάποιο κρίσιμο μήκος L_e . Αν θεωρηθεί ότι η είσοδος του καναλιού συνδεθεί με σωλήνα που έρχεται από παροχή βρύσης, η ανάπτυξη της ροής θα έχει τη μορφή της Εικόνας 3.4.

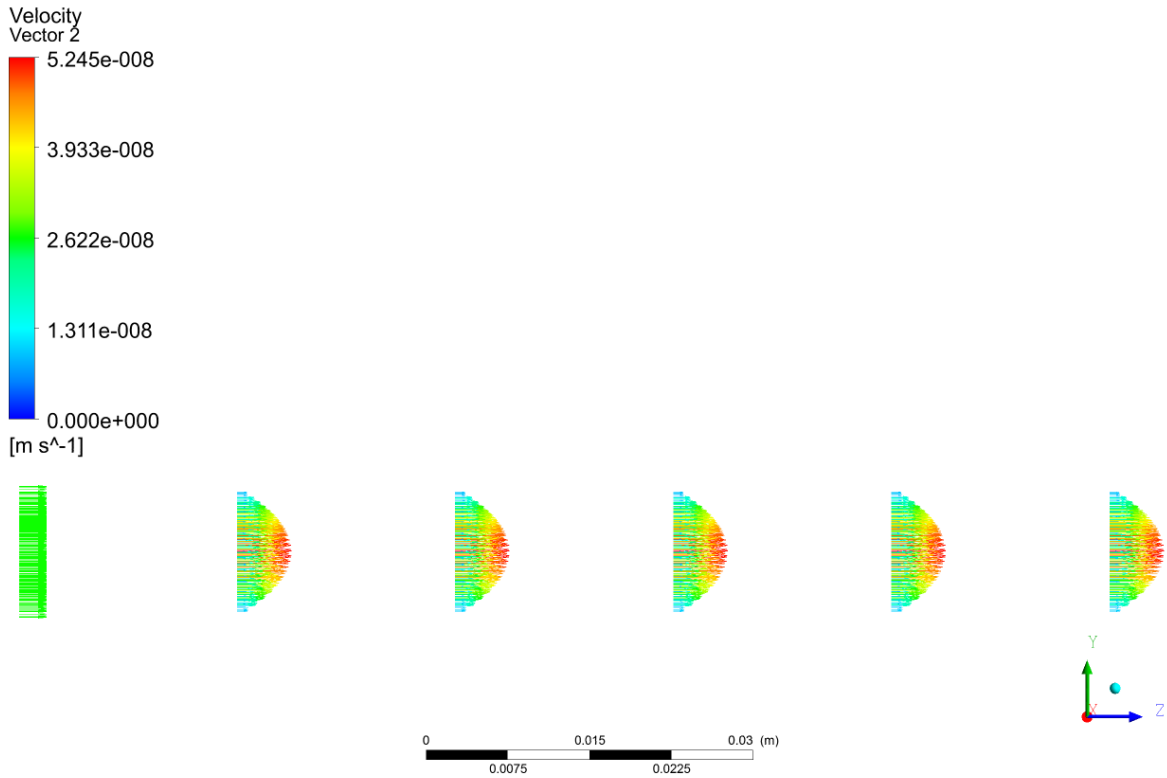


Εικόνα 3.4 Ανάπτυξη ροής μέσα σε σωλήνωση

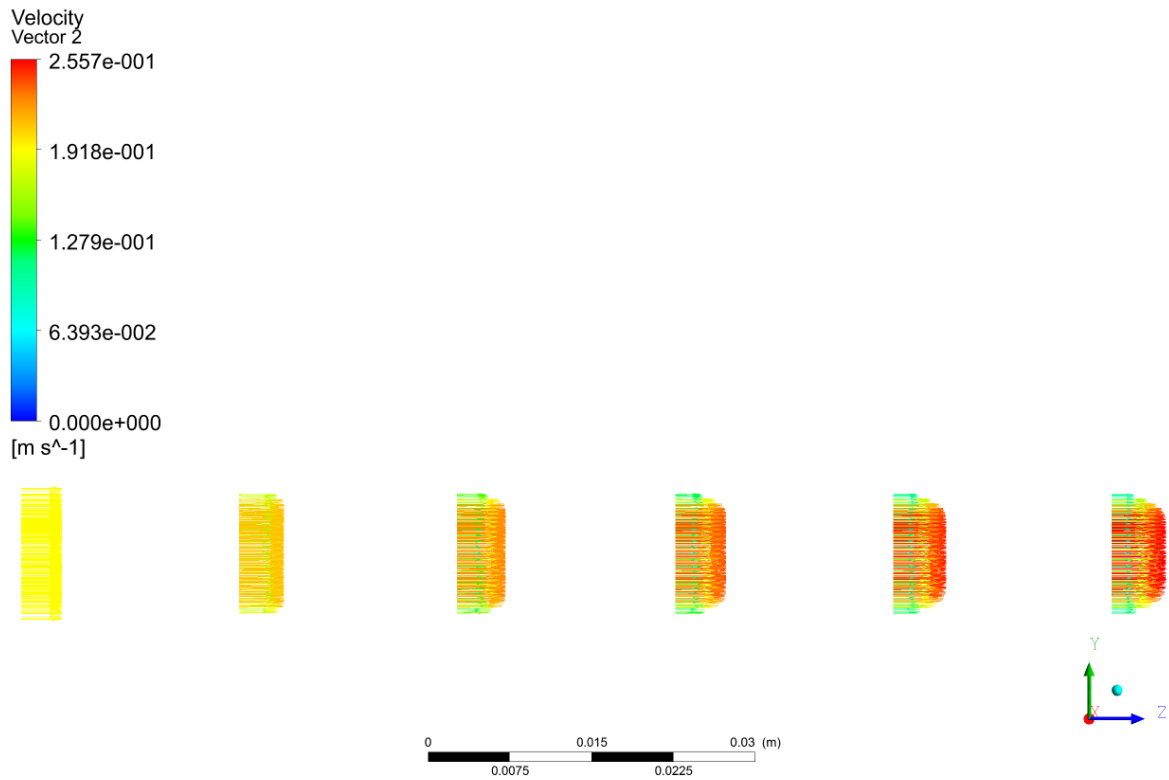
Στην Εικόνα 3.3, διακρίνονται στην είσοδο του καναλιού η περιοχή inlet και στην έξοδο η περιοχή outlet, ενώ το υπόλοιπο είναι το λεπτό τείχος wall. Σαν είσοδο θα επιλέγονται κάθε φορά ένα ζευγάρι ταχύτητας u και παροχής μάζας \dot{m} ώστε να προκύπτει ροή με συγκεκριμένο αριθμό Reynolds. Το νερό στο outlet θα βγαίνει σε πίεση περιβάλλοντος $p_{atm} = 1bar$. Για τις περιπτώσεις τύρβης επιλέγεται μοντέλο «k-ε» ενώ ως συνθήκη ολίσθησης στα τοιχώματα ορίζεται η «no slip wall».

Για την εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας του μοντέλου του CFX ως προς το παραπάνω μοντέλο της ροής μέσα σε σωλήνα, παρατηρούνται τα διάφορα προφίλ ταχυτήτων για κάθε διαφορετικό αριθμό Reynolds, σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του καναλιού. Όπως

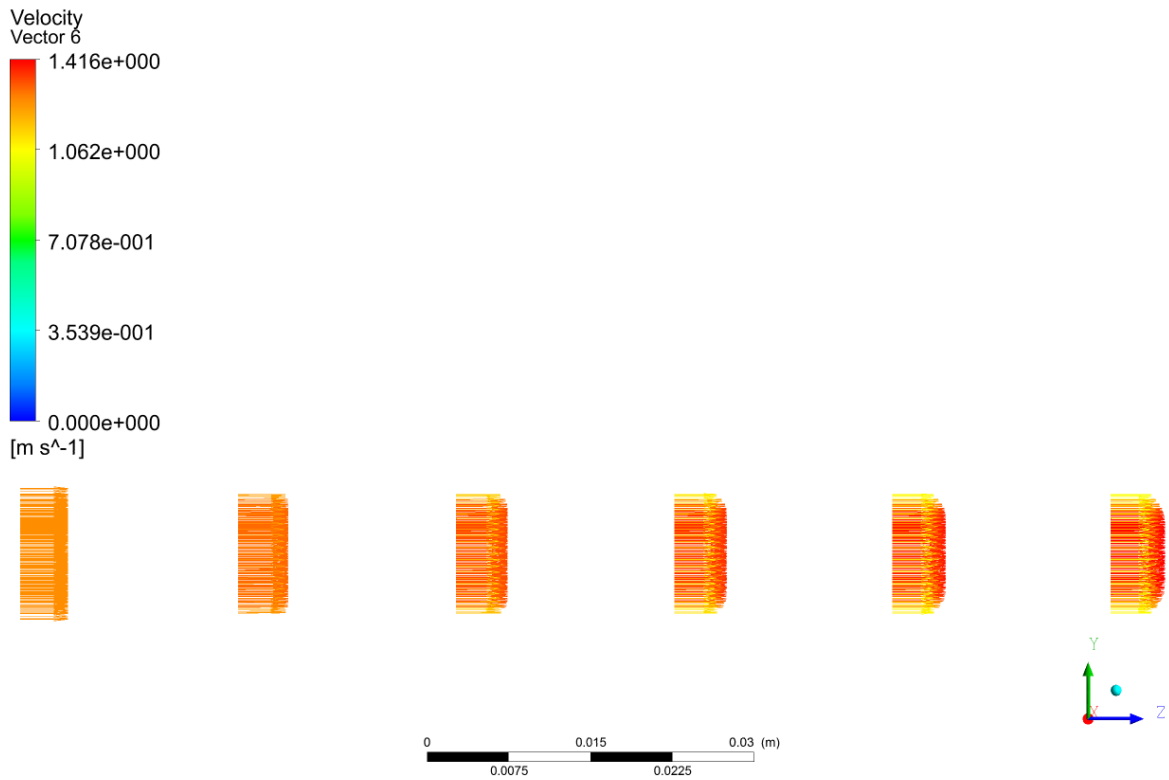
ήταν αναμενόμενο, για $Re = 300$ η ροή έχει προφίλ στρωτής ροής (Εικόνα 3.5), για την οριακή τιμή $Re = 2300$ που η ροή αλλάζει από στρωτή σε τυρβώδη, παρατηρείται η ενδιάμεση φάση στρωτής-τυρβώδης (Εικόνα 3.6) και για $Re = 15000$ που ροή είναι καθαρά τυρβώδης με μεγάλη ένταση, παρατηρείται το τυρβώδες προφίλ πλήρους ανάπτυξης (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.5 Προφίλ ταχυτήτων για $Re = 300$



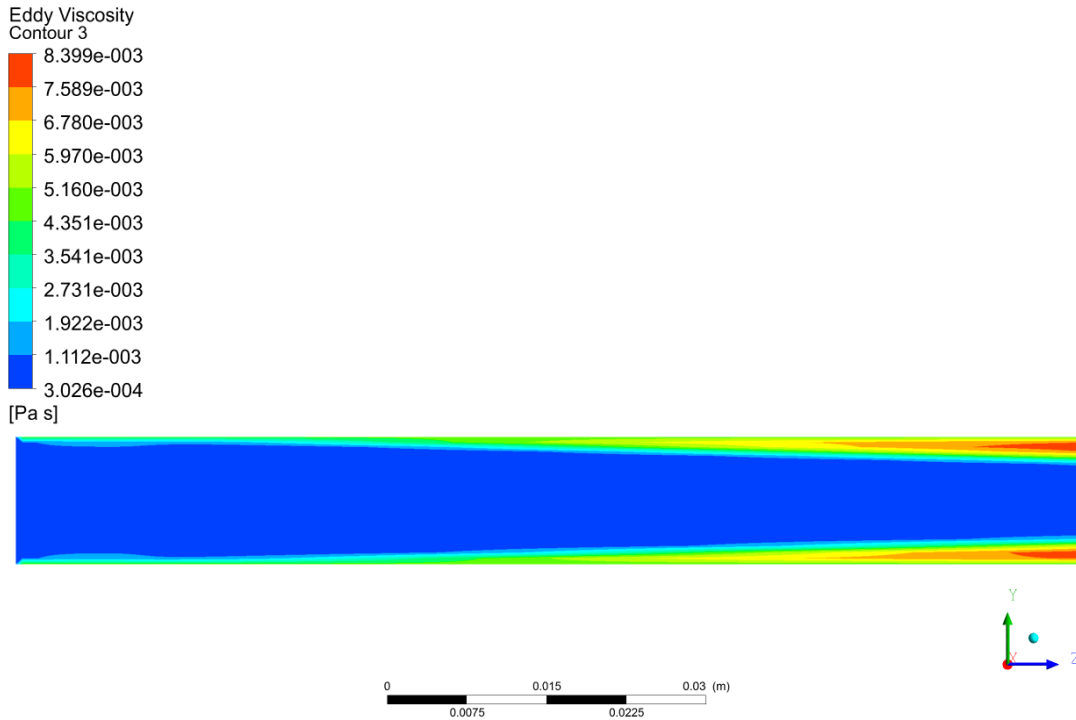
Εικόνα 3.6 Προφίλ ταχυτήτων για $Re = 2300$



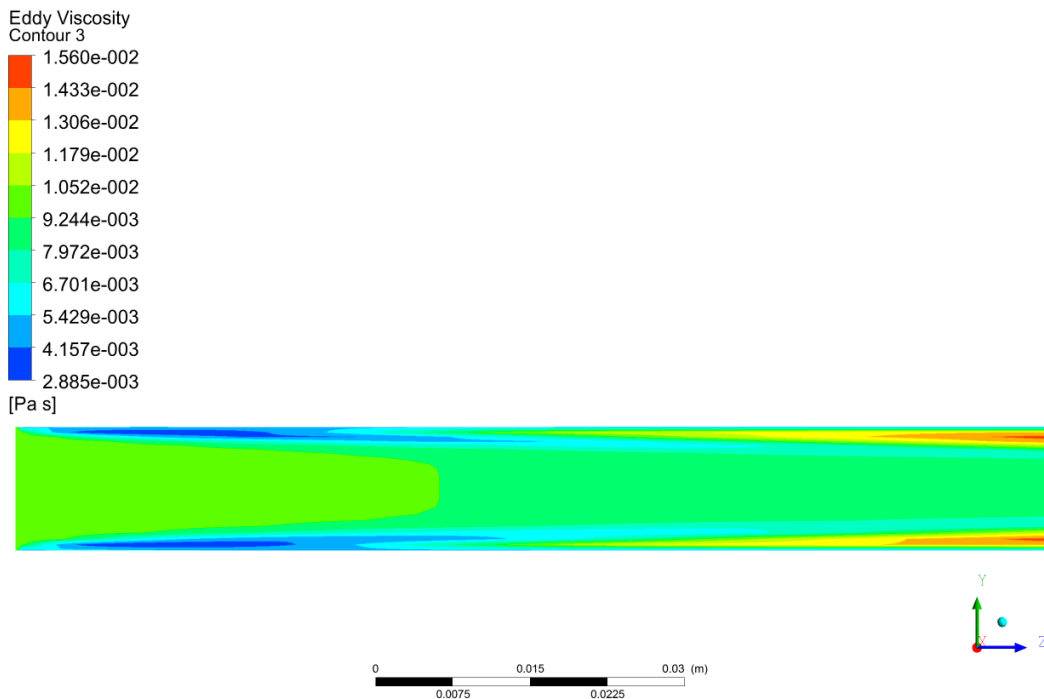
Εικόνα 3.7 Προφίλ ταχυτήτων για $Re = 15000$

Εάν επιπλέον, υποθεθεί ότι ο σωλήνας παροχής είναι μεγάλου μήκους και η ροή έχει ήδη αναπτυχθεί πριν την είσοδο στο ψυκτικό κανάλι, τότε η ροή στην είσοδο είναι εξαρχής πλήρως ανεπτυγμένη. Σε έναν σωλήνα κυκλικής διατομής, η πλήρης ανάπτυξη της ροής επέρχεται έπειτα από το κρίσιμο μήκος $L_c = 0,06 D Re$. Αυτό σημαίνει ότι θα χρειαστεί να βρεθεί το κρίσιμο μήκος αυτό και από εκεί να εξαχθεί το προφίλ ταχυτήτων στην έξοδο, το οποίο θα αποτελεί στο εξής την είσοδο στο ψυκτικό κανάλι για τους μετέπειτα υπολογισμούς που θα γίνουν.

Η τύρβη εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds και άρα από το κινηματικό ιξώδες ν , την διάμετρο του κυκλικού αγωγού d και την μέση ταχύτητα της ροής u_m . Από τους παραπάνω αριθμούς Reynolds επιλέγονται αυτοί οι οποίοι υποδηλώνουν τυρβώδη ροή. Στα ψυκτικά κανάλια του καλουπιού, επιδιώκεται τυρβώδης ροή (Reynolds > 5000). Πιο συγκεκριμένα, για αποδοτικότερη ψύξη, επιδιώκονται υψηλοί αριθμοί Reynolds, όμως όπως έχει παρατηρηθεί από την βιβλιογραφία όταν ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει το 10000 δεν προσδίδεται παραπάνω ποιότητα στην ψύξη, ενώ παράλληλα αυξάνονται οι απαιτήσεις του συστήματος (πίεση αντλίας κλπ.) καθιστώντας το κύκλωμα αυτό ακριβότερο. Στο μοντέλο που αναλύεται, επιλέγεται $Re = 8000$ με ταχύτητα εισόδου ρευστού $u = 0,8 m/s$. Οι παρακάτω εικόνες (Εικόνα 3.8 και Εικόνα 3.9) αφορούν το μέγεθος της τυρβώδους συνεκτικότητας, η οποία δεν είναι ιδιότητα του ρευστού, είναι 4-6 φορές μεγαλύτερη από την κινηματική συνεκτικότητα και εξαρτάται από την πυκνότητα, την κλίση ταχύτητας και τα χαρακτηριστικά της τύρβης.



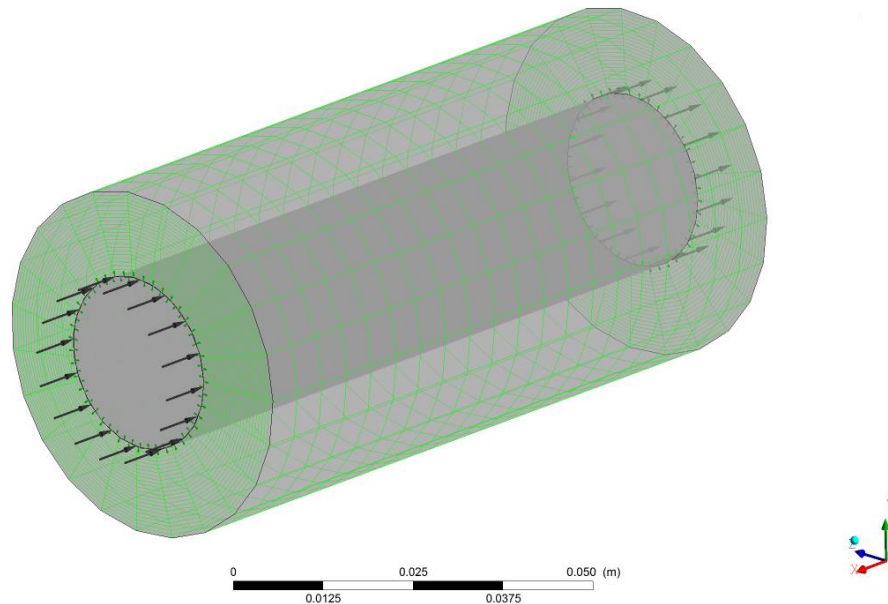
Εικόνα 3.8 Προφίλ τυρβώδους συνεκτικότητας για $Re = 2300$



Εικόνα 3.9 Προφίλ τυρβώδους συνεκτικότητας για $Re = 15000$

Όλες οι παραπάνω προσομοιώσεις, έγιναν για λεπτά τοιχώματα θερμοκρασίας $T_s = 200^\circ C$ και για μόνιμη ροή. Αφού έχει διαπιστωθεί η εγκυρότητα των υδροδυναμικών στοιχείων του μοντέλου, θα προσδοθεί πάχος στο τοίχωμα (Εικόνα 3.10) και θα ορισθούν αδιαβατικά

τα τοιχώματα στην εξωτερική διάμετρο του αγωγού για να μελετηθεί το μεταβατικό φαινόμενο, όπως ορίστηκε στο μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου. Εξετάζονται τόσο το μεταβατικό φαινόμενο όσο και η κατανομή θερμότητας εσωτερικά του τοιχώματος. Η διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου έχει οριστεί 100sec και το πάχος του σωλήνα είναι



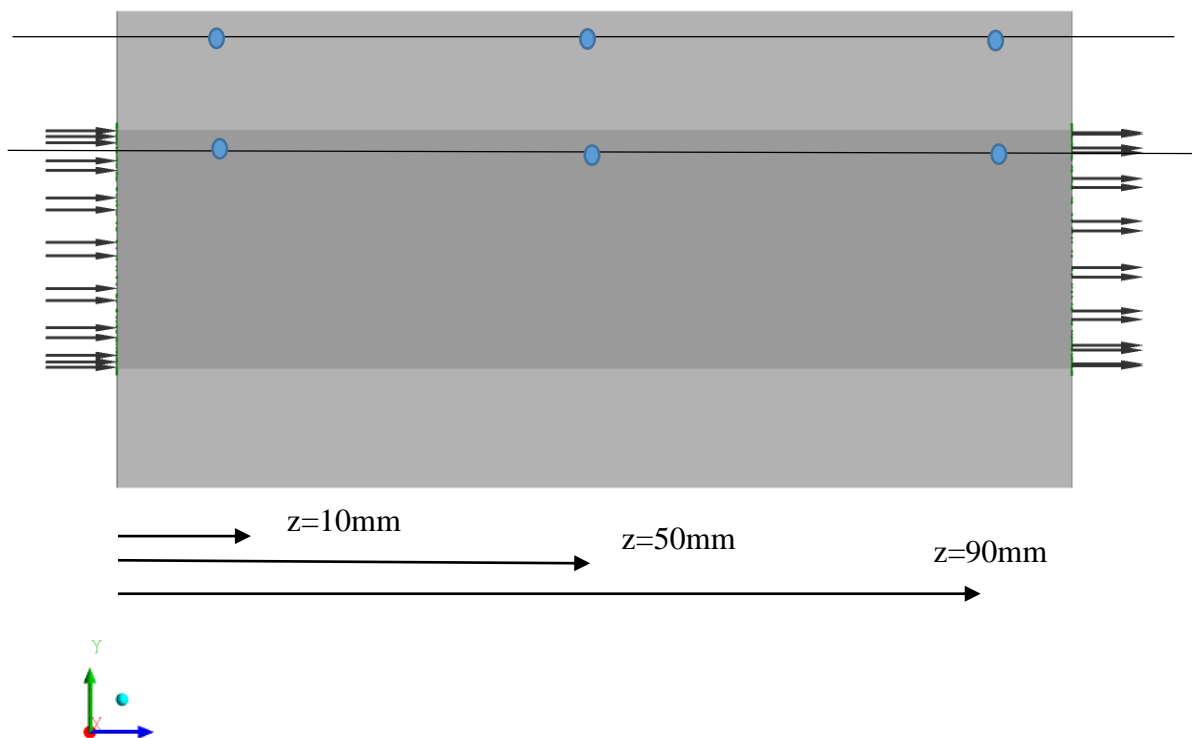
Εικόνα 3.10 Αγωγός με πάχος

Ένα από τα κριτήρια διαπίστωσης της εγκυρότητας του μοντέλου είναι η απαίτηση της συνέχειας παροχής μάζας σε κάθε διατομή του αγωγού, σε κάθε χρονική στιγμή του μεταβατικού φαινομένου. Ένα άλλο κριτήριο εγκυρότητας είναι η παρακολούθηση της μεταβολής του μεγέθους της θερμοκρασίας T σε κάθε χρονική στιγμή σε κάθε διατομή του αγωγού σε διάφορες ακτινικές αποστάσεις.

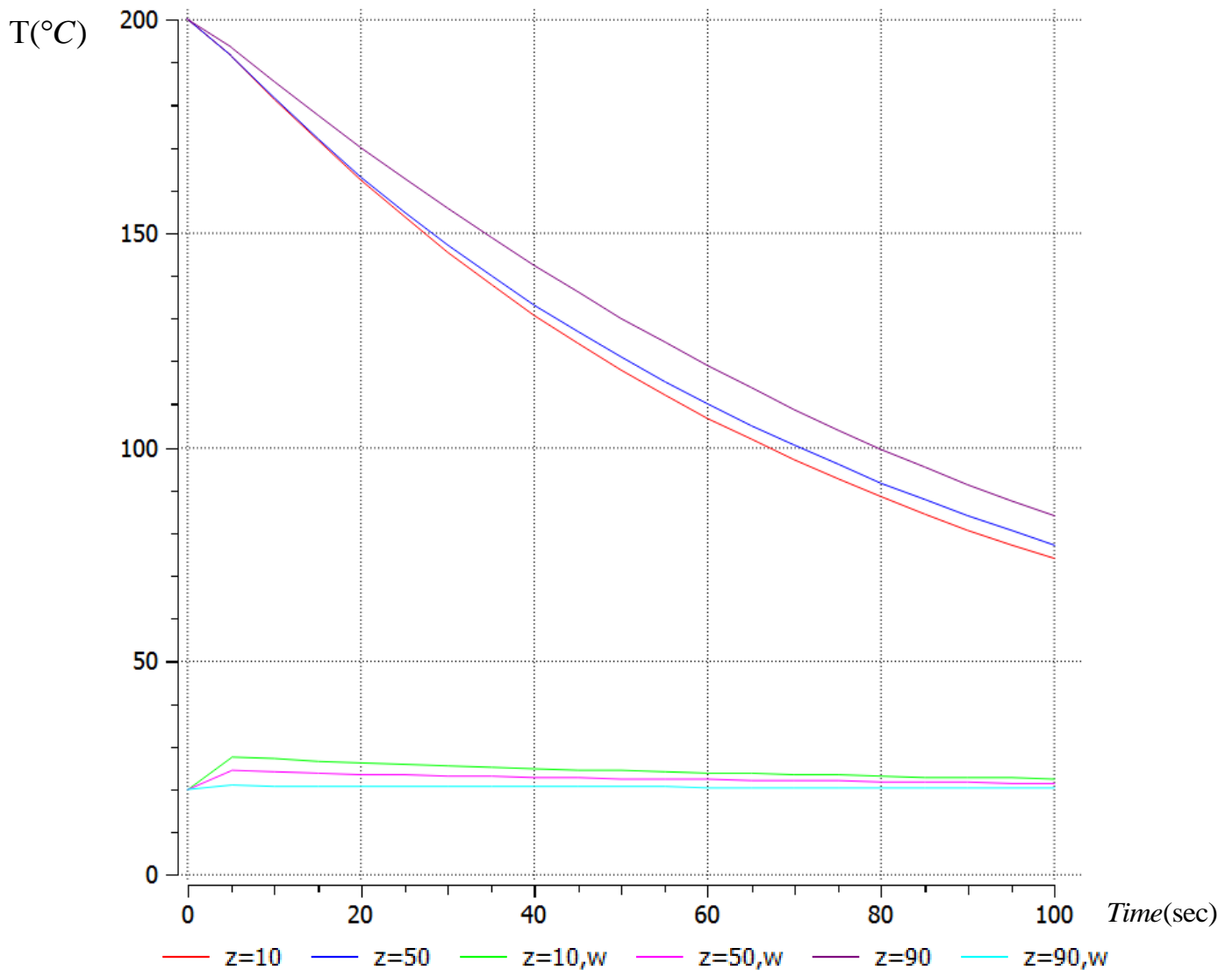
Τα παραπάνω κριτήρια, μπόρεσαν να εξακριβωθούν ως προς την εγκυρότητά τους με έναν κώδικα σε γλώσσα Perl (Παράρτημα Α). Γι' αυτόν τον κώδικα αρχικά πρέπει να αρχίσει η εγγραφή στο session file με “start recording”, να φορτωθούν τα transient results από το session που έχει γίνει η ανάλυση, έπειτα να εξαχθούν τα αποτελέσματα που χρειάζονται (θερμοκρασίες και παροχή μάζας σε κάθε διατομή) και μετά να σταματήσει η εγγραφή στο αρχείο του session. Αυτό το αρχείο θα τροποποιηθεί κατάλληλα για να εισαχθεί ως ένα σύνολο εντολών στο command editor το οποίο μόλις θα εκτελεστεί θα παράγει αρχεία .csv για κάθε χρονική στιγμή. Στο Παράρτημα Α δίνεται ο κώδικας, ο οποίος εξάγει αποτελέσματα με βήμα 5sec στο σύνολο των 100sec σε μεταβλητές οι οποίες ορίζονται στο ANSYS CFX και λαμβάνουν τη μέση θερμοκρασία των κόμβων σε κάθε διατομή. Μία

τέτοια εντολή εκχώρησης τιμής στην παραπάνω μεταβλητή συντάσσεται ως $temp3 = areaAve(Temperature)@Plane3$ και αφορά το Plane 3 το οποίο βρίσκεται σε απόσταση $20mm$ από την αρχή του αγωγού.

Προέκυψε για το μήκος ψυκτικού καναλιού που μελετάται η μεταβολή της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο (Διάγραμμα 3.7) ,σε τρία σημεία του καναλιού και σε δύο ακτινικές αποστάσεις, όπως εμφανίζονται στην Εικόνα 3.11:



Εικόνα 3.11 Σημεία (μπλε) στον αγωγό στα οποία λαμβάνεται η θερμοκρασία για διάφορες τιμές του μήκους του αγωγού

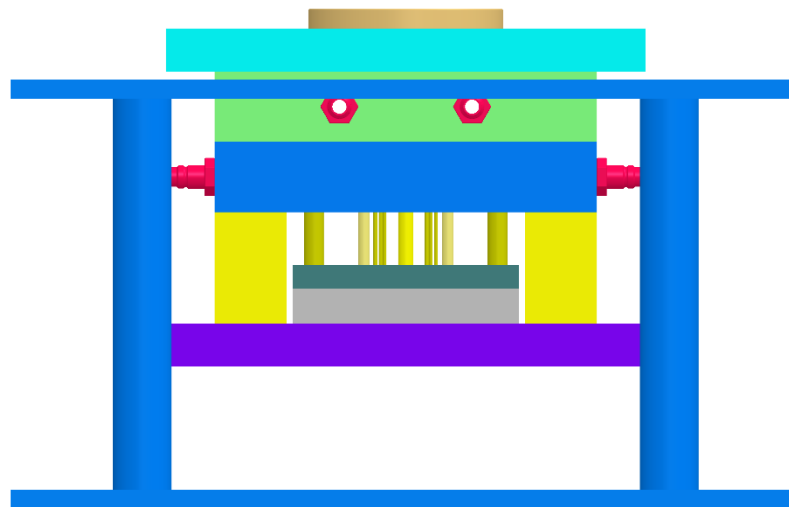


Διάγραμμα 3.7 Κατανομή θερμοκρασιών κατά μήκος του αγωγού σε δύο ακτινικές αποστάσεις

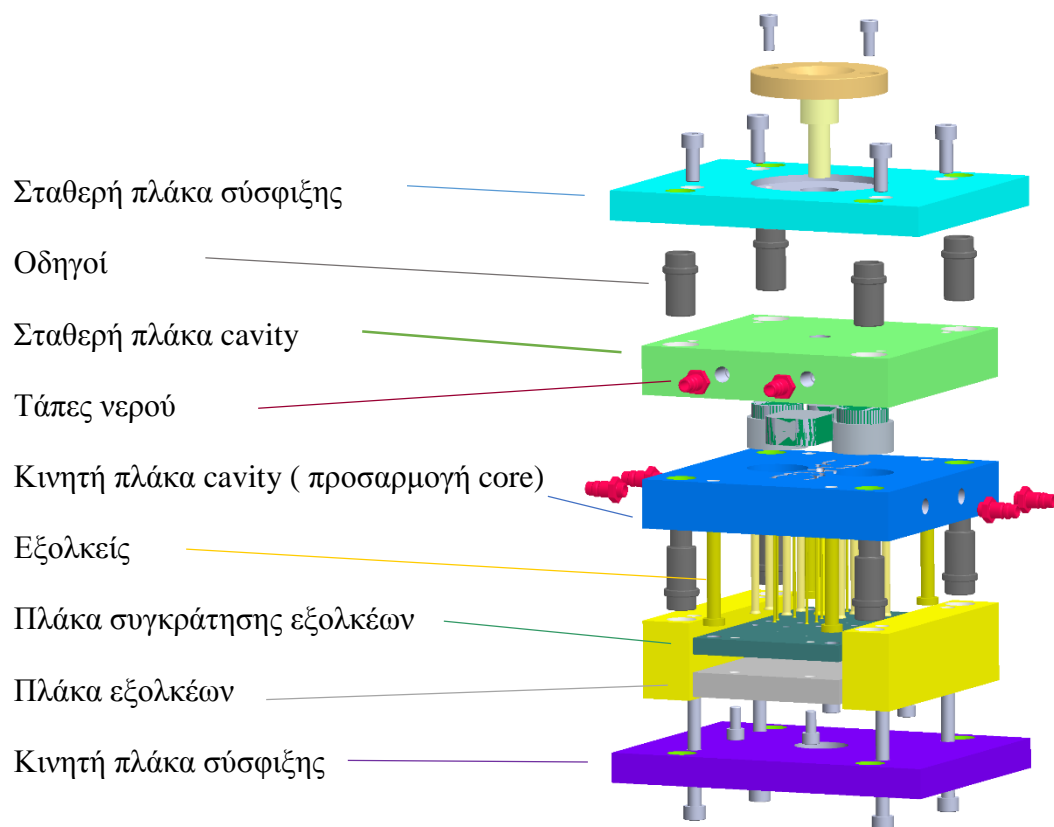
4. CASE STUDY- ΚΑΛΟΥΠΙ INJECTION MOLD

4.1. Επιλογή Καλουπιού

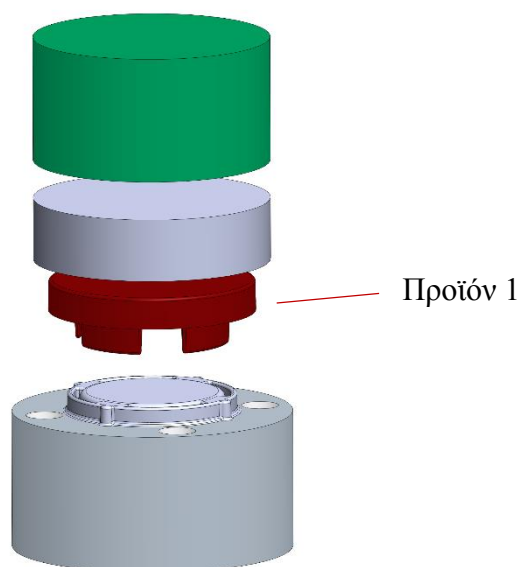
Η επιλογή του προς μελέτη καλουπιού έγινε με τη συνεργασία του μηχανουργείου ΜΟΡΦΗ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΑΕ. . Εφόσον η διαδικασία του ανασχεδιασμού του κυκλώματος ψύξης, θα βασίζεται στην βελτιστοποίηση ενός υπάρχοντος συστήματος ψύξης, έπρεπε να επιλεγθεί ένα καλούπι, που επιδέχεται βελτίωση ως προς τον σχεδιασμό των καναλιών του. Γεωμετρίες καλουπιών, που εμπόδιζαν οποιοδήποτε άλλο σχεδιασμό καθώς και φουσητά καλούπια, τα οποία περιέχουν ήδη αρκετά περίπλοκα κυκλώματα, απορρίφθηκαν. Το καλούπι που παρουσιάζεται παρακάτω, προσφέρει έδαφος για διαφορετικό σχεδιασμό των καναλιών ψύξης και μπορεί να επιδεχθεί αποδοτικότερη ψύξη για καλύτερη ποιότητα των προϊόντων που παράγει. Ολόκληρο το καλούπι απεικονίζεται στην Εικόνα 4.1 και τα μέρη από τα οποία απαρτίζεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.1 Καλούπι Case-Study



Εικόνα 4.2 Exploded view- στοιχεία καλουπιού



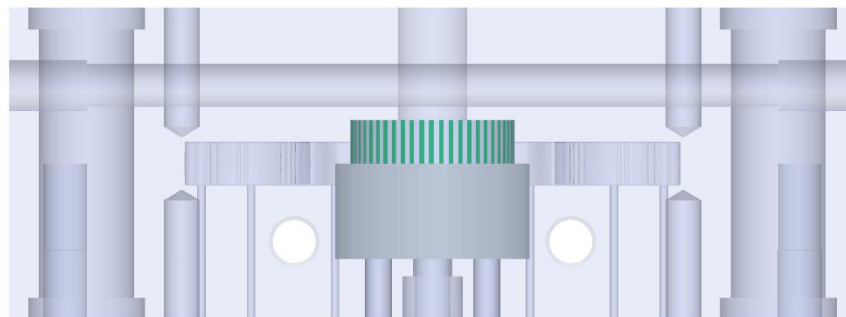
Εικόνα 4.3 Γεωμετρία που στερεώνεται στην πλάκα core για παραγωγή του προϊόντος

Το συγκεκριμένο καλούπι, παράγει δύο σειτ πλαστικών προϊόντων τα οποία τα οποία χρησιμοποιούνται σε σωλήνες led . Το Προϊόν 1 (τάπα) , τοποθετείται ως καπάκι στον σωλήνα ενώ το Προϊόν 2(στήριγμα) , στερεώνεται στον τοίχο για να συγκρατεί τον σωλήνα. Το μηχανουργείο έχει κατασκευάσει την γεωμετρία της Εικόνα 4.3 ξεχωριστά, αφού διευκολύνεται η κατασκευή της σε σχέση με το αν ήταν ενσωματωμένη στην πλάκα core.

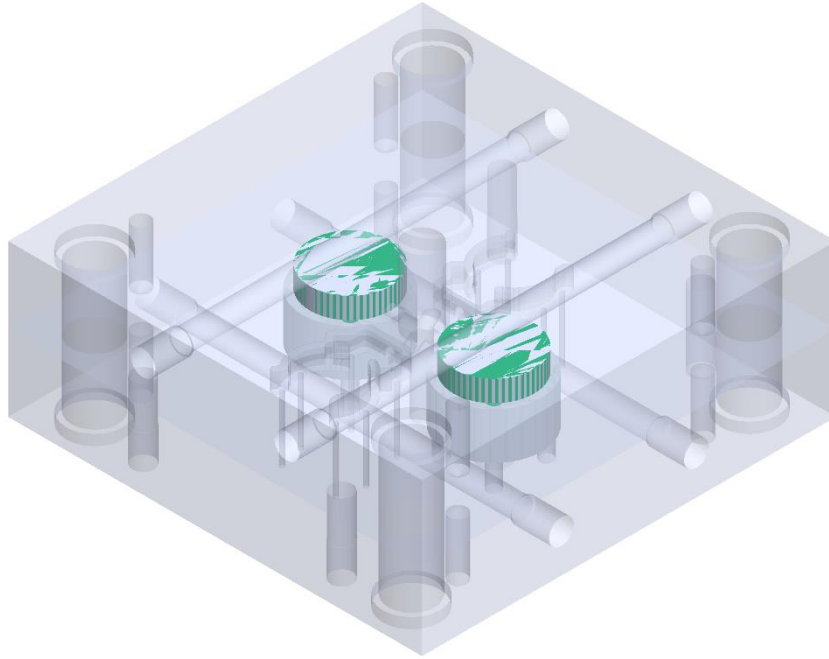


Εικόνα 4.4 Τα παραγόμενα προϊόντα στην διάταξη που βρίσκονται στο καλούπι

Ως προς το κύκλωμα ψύξης, το καλούπι διαθέτει έναν αρκετά απλό σχεδιασμό. Διαθέτει τέσσερα ψυκτικά κανάλια, δύο για την πλάκα cavity και δύο για την πλάκα core (Εικόνα 4.5 και Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.5 Ψυκτικά κανάλια στις πλάκες cavity και core



Εικόνα 4.6 Ισομετρική προβολή των ψυκτικών καναλιών

4.2. Υλικό Προϊόντος-Βελτιστοποίηση

Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται τα εξαρτήματα, είναι το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE). Παρατηρείται ότι σε διαφορετικές περιοχές των προϊόντων, εμφανίζεται διαφορετική διαφάνεια υλικού καθώς και διαφορές στην μεταξύ τους ελαστικότητα. Αυτές είναι ενδείξεις διαφορετικού ποσοστού κρυσταλλικότητας της κάθε περιοχής και του κάθε προϊόντος, κάτι που σχετίζεται άμεσα με την ψύξη του καλουπιού όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 1. Είναι λοιπόν, η ποιότητα που έχει αποκτήσει το πλαστικό προϊόν μετά την εξόλκευσή του, το βασικό κριτήριο με το οποίο θα σχετίζεται η διαδικασία ανασχεδιασμού του κυκλώματος ψύξης.

Αρχικά είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των απαιτήσεων των ιδιοτήτων των προϊόντων. Αυτές οι απαιτήσεις αφορούν τη λειτουργικότητά τους. Εφόσον το στήριγμα, χρησιμοποιείται για την συγκράτηση σωλήνων (πιθανώς μεγαλύτερης διαμέτρου απ' ότι αυτή που μπορεί να υποδεχτεί χωρίς να παραμορφωθεί), απαιτείται να είναι καμπτικό και να έχει μεγαλύτερη ελαστικότητα. Αυτό σημαίνει ότι επιδιώκεται να είναι αρκετά άμορφο. Όμως δεν πρέπει όλα τα σημεία να ψυχθούν τόσο γρήγορα για να επιτευχθεί μία χαμηλή κρυσταλλικότητα.

Για την εύρεση της περιοχής που αναζητείται, διεξάγεται στατική μελέτη για δύο περιπτώσεις καταπονήσεων. Η πρώτη αφορά την καταπόνηση εάν κάποιος κάμψει τους

βραχίονες του προϊόντος και η δεύτερη φορά την φυσική λειτουργία του προϊόντος όταν το διαπερνά ένας σωλήνας led (οπότε φορτίζεται αντίθετα) (Εικόνα 4.7).



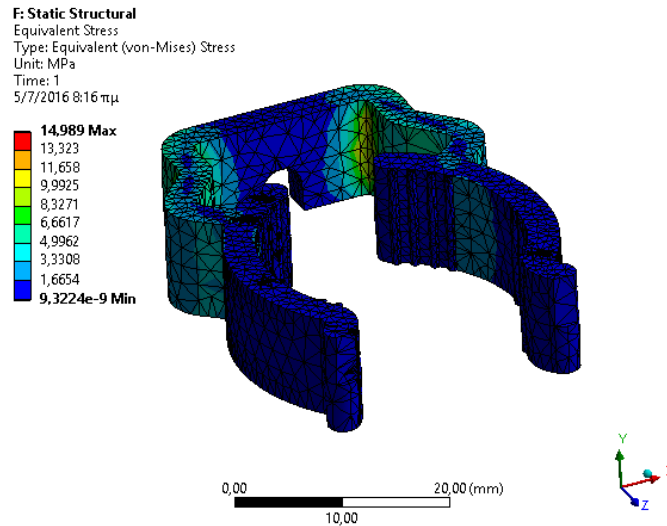
Εικόνα 4.7 Δύο διαφορετικές περιπτώσεις καταπονήσεων

Σε κάθε περίπτωση το αντικείμενο πακτώνεται στον τοίχο. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 18168 στοιχεία. Ορίζεται επίσης το υλικό του πολυαιθυλενίου στον Πίνακα 3:

Μέτρο ελαστικότητας $E = 0,8GPa$	Πυκνότητα $\rho = 950kg/m^3$
Λόγος Poisson $\nu = 0,46$	Θερμική αγωγιμότητα $k = 0,43W/(mK)$
Τάση διαρροής $\sigma_y = 15MPa$	Ειδική θερμοχωρητικότητα $Cp = 2250J/(kg K)$

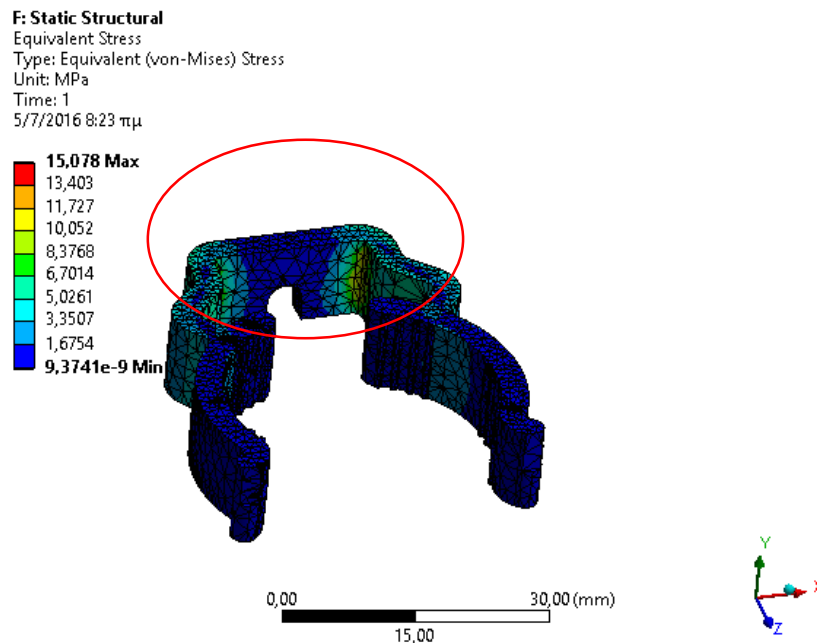
Πίνακας 3 Πίνακας ιδιοτήτων υλικού προϊόντος

Για φορτία της τάξης των 5N οι κατανομές των τάσεων για την πρώτη περίπτωση καταπόνησης εμφανίζονται στην Εικόνα 4.8:



Εικόνα 4.8 Κατανομή τάσεων για πρώτη περίπτωση καταπόνησης

Για την δεύτερη περίπτωση καταπόνησης οι κατανομές των τάσεων εμφανίζονται στην Εικόνα 4.9 :



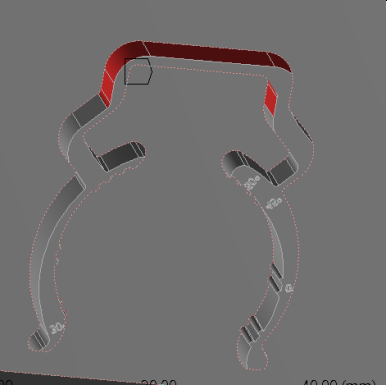
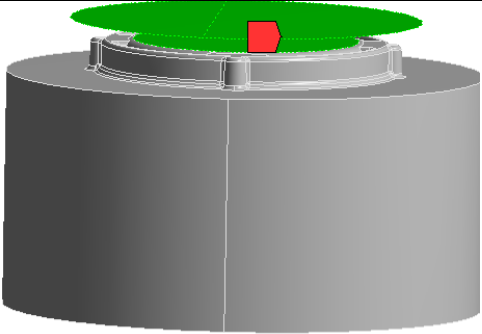
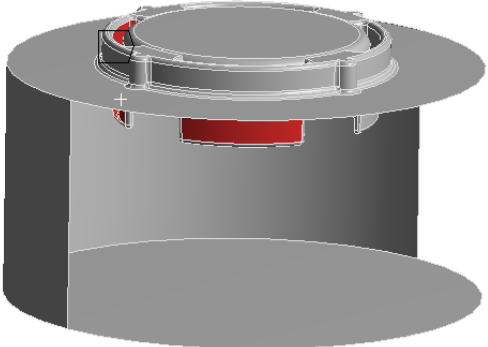
Εικόνα 4.9 Κατανομή τάσεων για την δεύτερη περίπτωση καταπονήσεων

Παρατηρείται ότι η περιοχή που σημειώνεται με κόκκινο κύκλο στην (Εικόνα 4.9) είναι αυτή που φορτίζεται περισσότερο και αυτή που θα απαιτηθεί η πιο άμορφη δομή.

Η τάπα δεν δέχεται κάποια φόρτιση, εφόσον «κουμπώνει» στο σωλήνα led και παραμένει εκεί. Μπορεί επομένως να διαθέτει μεγαλύτερη κρυσταλλικότητα και άρα να είναι πιο ψαθυρή απ' ότι το στήριγμα. Είναι ωστόσο σημαντικό οι τέσσερις «υποδοχείς» που

φαίνονται στην Εικόνα 4.3 να ψυχθούν ομοιόμορφα, καθώς διαθέτουν λεπτό πάχος και κινδυνεύουν να υποστούν συρρίκνωση και σκέβρωση.

Καθορίζονται δηλαδή οι προδιαγραφές για τον ρυθμό ψύξης (άρα βαθμός κρυσταλλικότητας) και η ομοιομορφία ψύξης για κάθε περιοχή των τοιχωμάτων του καλουπιού και κατ' επέκταση των περιοχών του πολυμερούς των προϊόντων. Οι απαιτούμενες τιμές κρυσταλλικότητας προκύπτουν από παρατήρηση της ελαστικότητας διαφόρων πλαστικών με γνωστή κρυσταλλικότητα, ενώ το κριτήριο της ομοιομορφίας καθορίζεται βασικό ή μη ανάλογα με το πάχος στην κάθε περιοχή και το ενδεχόμενο σκέβρωσης. Όλες οι παραπάνω προδιαγραφές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4:

Αρ. Περιοχής	Επιλεγμένα faces στο καλούπι	Κρυσταλλικότητα	Ομοιομορφία Ψύξης
1(Sel1)		~30%	Μη βασική
2(Sel2)		~50%	Μη βασική
3(Sel3)		(όπως Sel2)	Βασική

Πίνακας 4 Περιοχές ενδιαφέροντος και απαιτήσεις κρυσταλλικότητας και ομοιομορφίας ψύξης

4.3. Μοντέλο υπολογισμού Κρυσταλλικότητας στη βιβλιογραφία

Η επίδραση του ρυθμού ψύξης στην κρυσταλλικότητα του πολυαιθυλενίου μελετήθηκε σύμφωνα με την [1].

Εφόσον πρόκειται για ψύξη κάτω από διαφορετική θερμοκρασία σε κάθε χρονικό διάστημα, πρόκειται για μη ισόθερμη διεργασία. Στη δημοσίευση καταγράφηκαν οι ιδιότητες 2 υλικών πολυαιθυλενίου το ένα χαμηλής πυκνότητας και το άλλο υψηλής πυκνότητας, έπειτα από πειράματα Διαφορικής Ανιχνευτικής Θερμιδομετρίας (DSC). Επιλέγεται το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και τα δεδομένα γι' αυτό αφού με αυτό χτεύονται τα προϊόντα. Η κρυσταλλικότητα του υλικού δίνεται από τον τύπο:

$$x(t) = x(\infty) \left(1 - \exp\left(\int_0^t Z(T(t)) n t^{n-1} dt \right) \right) \quad (4-1)$$

όπου

- n : Ο εκθέτης Avrami
- Z : Σταθερά μεταβολής
- $x(\infty)$: Η κρυσταλλικότητα για άπειρο χρόνο t

Με t συμβολίζεται ο χρόνος στον οποίο λαμβάνει χώρα η κρυσταλλοποίηση, δηλαδή από 387K μέχρι 394K. Για $t=0$ αντιστοιχείται η θερμοκρασία των 394K. Παρατίθεται η καμπύλη (Διάγραμμα 4.1) για την οποία υπολογίζεται η μεταβολή της κρυσταλλικότητας, για το υλικό 2, για διαφορετικό ρυθμό ψύξης.

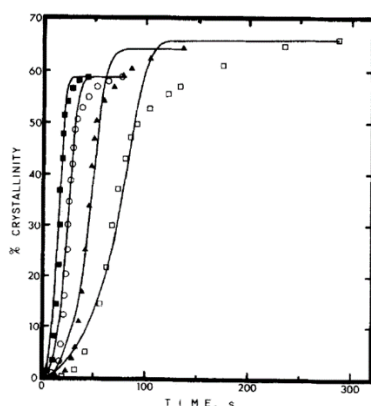


Fig. 7. Percent crystallinity as a function of time for EX2 at various cooling rates.
 ■: 20°C/min.; ○: 10°C/min.;
 ▲: 5°C/min.; □: 2.5°C/min.
 —: Nonisothermal kinetic model

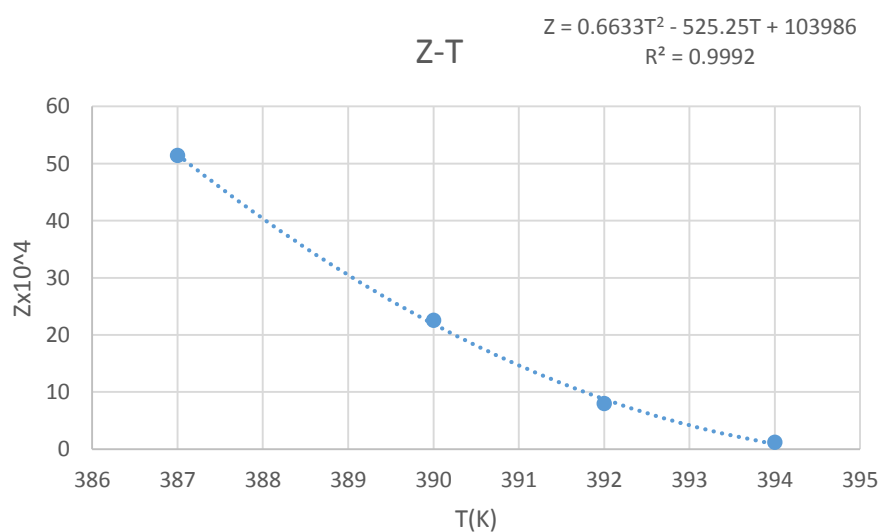
Διάγραμμα 4.1 Μεταβολή κρυσταλλικότητας για διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης

Για μη ισόθερμη μεταβολή λαμβάνεται η τιμή του n για τη θερμοκρασία των 394K δηλαδή $n = 2,2$ ενώ η τιμή της $x(\infty) = 58$ όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 4.1 για ρυθμούς ψύξης οι οποίοι αναμένονται από την ψύξη του καλουπιού (πιο αναλυτικά Κεφάλαιο 5).

Όπου το μέγεθος $Z(T(t))$ υπολογίζεται έπειτα από παρεμβολή στο Excel (Διάγραμμα 4.2), από τα εξής στοιχεία πινάκων που δίνονται από [1] (Πίνακας 5):

Θερμοκρασία Κρυσταλλοποίησης(K)	$Z \times 10^4$
387	51,43
390	22,56
392	7,989
394	1,206

Πίνακας 5 Δεδομένα Z από την [1]



Διάγραμμα 4.2 Z συναρτήσει της θερμοκρασίας T

Περιγράφονται λοιπόν τα παραπάνω στοιχεία ως εξής :

$$Z(T) = 0,6633T^2 - 525,25T + 103986$$

Η Εξίσωση (4-1) διαμορφώνεται ως εξής

$$x(t) = 58 \left(1 - \exp\left(\int_0^t (0,6633T(t)^2 - 525,25T(t) + 103986)2,2t^{1,2} dt\right) \right) \quad (4-3)$$

4.3.1. Κώδικας Matlab και APDL commands

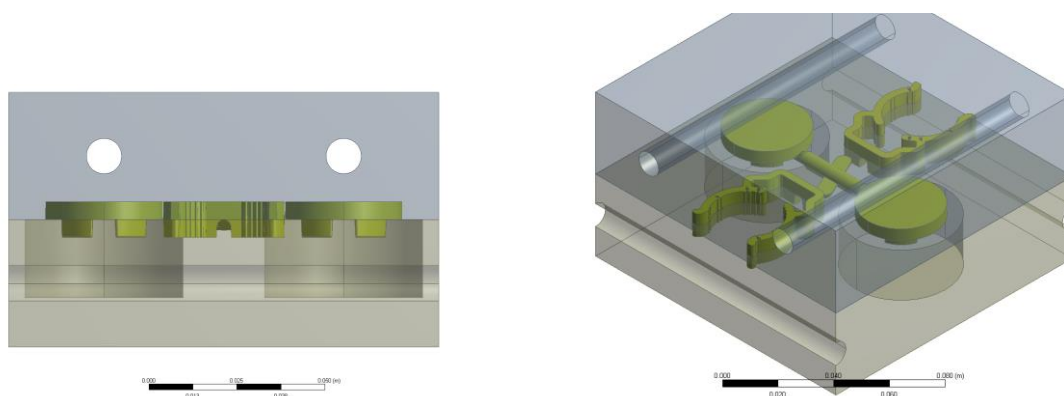
Για την εύρεση της τιμής της κρυσταλλικότητας σύμφωνα με την Εξίσωση (4-3) είναι απαραίτητη η εύρεση της $T(t)$ για κάθε μοντέλο που σχεδιάζεται ένα διαφορετικό κύκλωμα ψύξης. Εφόσον πρόκειται για μεταβατικό θερμικό φαινόμενο, είναι πάλι απαραίτητη η εξαγωγή των θερμοκρασιών T για κάθε χρονική στιγμή. Γι' αυτό τον σκοπό, χρησιμοποιήθηκε κώδικας στην γλώσσα του APDL, ο οποίος παρατίθεται στο Παράρτημα Β. Αυτός ο κώδικας, εισάγεται στα Solution commands και επιλέγεται κάθε φορά η περιοχή ενδιαφέροντος (named selections). Με εντολή DO-ENDDO, είναι εφικτή η προσπέλαση όλων των χρονικών διαστημάτων και η εξαγωγή αποτελεσμάτων σε κάθε χρονική στιγμή, σε αρχεία .dat με την κατάλληλη μορφή.

Τα αρχεία δεδομένων τα επεξεργάζεται έπειτα ο κώδικας Matlab που παρατίθεται στο Παράρτημα Γ, ώστε να προκύψουν οι τιμές της κρυσταλλικότητας για κάθε διαφορετική $T(t)$, αφού έχει γίνει παρεμβολή των θερμοκρασιών T με τον χρόνο t . Η παρεμβολή γίνεται για θερμοκρασίες που αφορούν συγκεκριμένους κόμβους της περιοχής ενδιαφέροντος κάθε φορά. Ο κώδικας χρησιμοποιεί ένα τέχνασμα με το οποίο απορρίπτει τις τιμές που βρίσκονται εκτός του εύρους θερμοκρασιών 394-387K και αρχίζει την μέτρηση του χρόνου t στην θερμοκρασία 394K. Εφόσον επιθυμείται η εύρεση του χρόνου στον οποίο επιτυγχάνεται η κρυσταλλοποίηση σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, θα πρέπει να μετρηθεί από την αρχική θερμοκρασία στην οποία ξεκινά η ψύξη του καλουπιού και η ανάλυση (εδώ $T=200^{\circ}C$ ή $T=150^{\circ}C$).

5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

5.1. Θερμική Μελέτη Υπάρχοντος Συστήματος Ψύξης Καλουπιού

Πρωταρχικό βήμα στην εύρεση εναλλακτικών και βέλτιστων σχεδιασμών κυκλωμάτων ψύξης του καλουπιού, είναι η διεξαγωγή θερμικής μελέτης με το ANSYS transient thermal. Η γεωμετρία εισάγεται στο περιβάλλον Geometry του ANSYS Αρχικά, καθορίζονται τα υλικά τόσο του μετάλλου του καλουπιού, όσο και του πολυαιθυλενίου του προϊόντος. Με το feature fill του ANSYS (Εικόνα 5.1) καθίσταται εφικτό το «γέμισμα» των κοιλοτήτων του καλουπιού και έπειτα καθορίζεται γι' αυτά το υλικό του πολυμερούς.



Εικόνα 5.1 Fill υλικού στο καλούπι

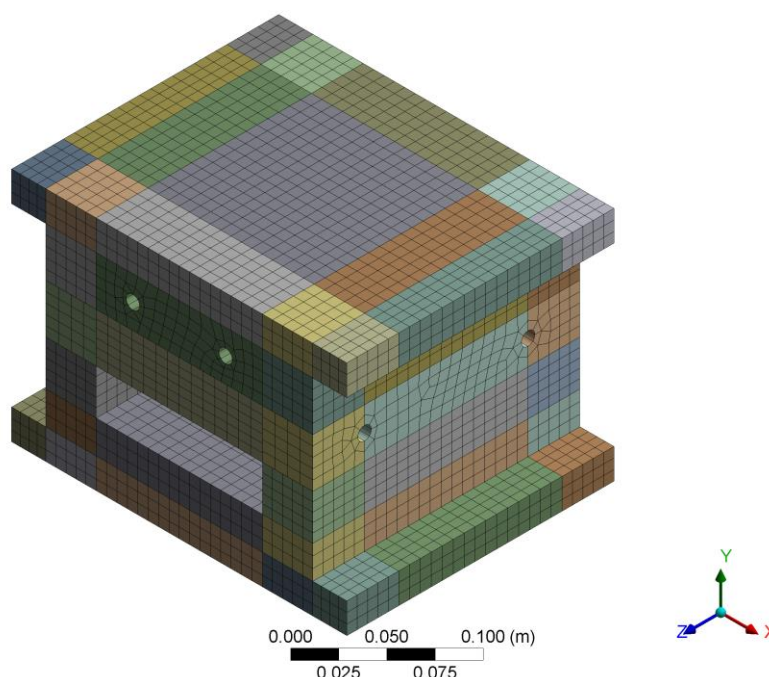
Ένα σύνηθες υλικό που χρησιμοποιείται στα καλούπια injection molding είναι ο χάλυβας P20 . Στον Πίνακα 6 παρατίθενται οι ιδιότητες των παραπάνω υλικών:

	Χάλυβας-P20	HDPE(πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας)
Πυκνότητα $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	7861	950
Θερμική αγωγιμότητα $k(\text{W}/(\text{mC}))$	41,5	0,43
Ειδική θερμοχωρητικότητα $C_p(\text{J}/(\text{KgC}))$	434	2250

Πίνακας 6 Ιδιότητες υλικών καλουπιού και προϊόντων

Το ANSYS εισάγει μόνο του τις επαφές(contacts) οι οποίες ελέγχονται ως προς την εγκυρότητά τους, εφόσον είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την μετάδοση των θερμικών φορτίων. Ορίζονται επίσης όλα τα named selection των περιοχών ενδιαφέροντος, έτσι όπως ορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του πλέγματος του μοντέλου. Η γεωμετρία χωρίστηκε σε πιο μικρές, ώστε να προκύψει ένα πιο ομοιόμορφο πλέγμα (Εικόνα 5.2). Στα σημεία του μοντέλου, στα οποία δεν επικεντρώνεται η έρευνα των παραμέτρων, έχει χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο μήκος πεπερασμένων στοιχείων, απ'ότι στις πλάκες cavity και core. Το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων είναι 112528.



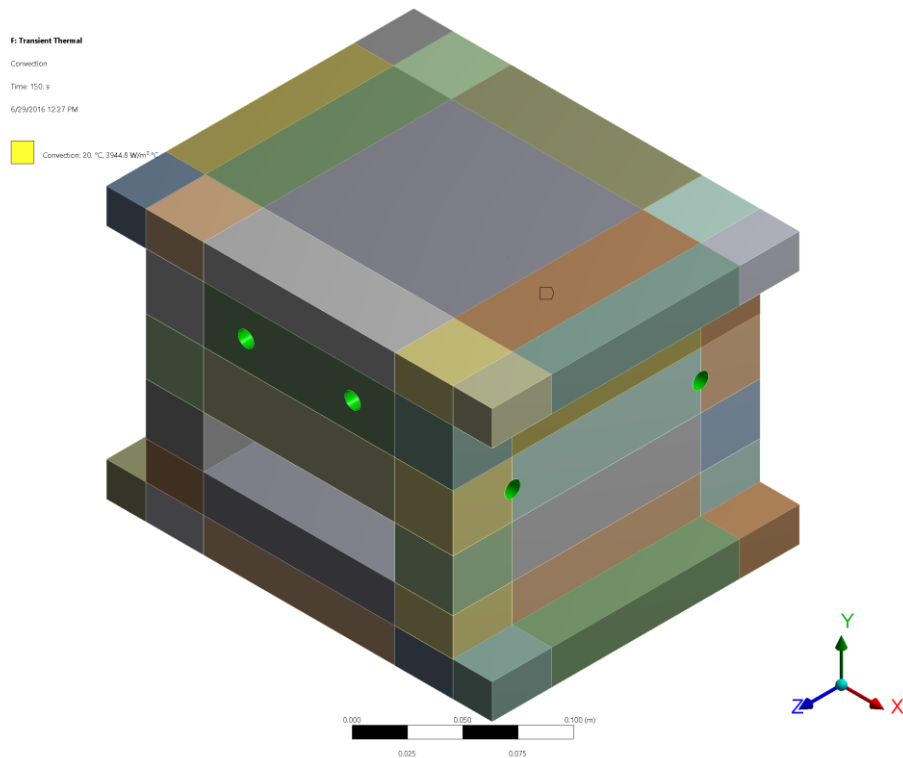
Εικόνα 5.2 Πλέγμα Καλουπιού

Τα καλούπια injection mold πριν αρχίσουν τον κύκλο λειτουργίας τους, προθερμαίνονται σε θερμοκρασίες $150-200^{\circ}\text{C}$. Αυτό πραγματοποιείται για να διευκολυνθεί η ροή του πολυμερούς στις κοιλότητες του καλουπιού και να αποφευχθεί η ανάπτυξη τάσεων στο χυτό. Εφόσον το πολυαιθυλένιο τήκεται σε θερμοκρασίες $388-408\text{K}$, κρίνεται σκόπιμη η αρχική θερμοκρασία σε όλο το καλούπι να είναι $T_0 = 200^{\circ}\text{C}$.

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4, οι ιδιότητες της κρυσταλλικότητας των προϊόντων καθορίζονται για την περιοχή ενδιαφέροντος $394\text{K}-387\text{K}$. Με βήμα 1sec και για τη διάρκεια των 200sec της ανάλυσης, όλες οι περιοχές ενδιαφέροντος θα έχουν θερμοκρασία

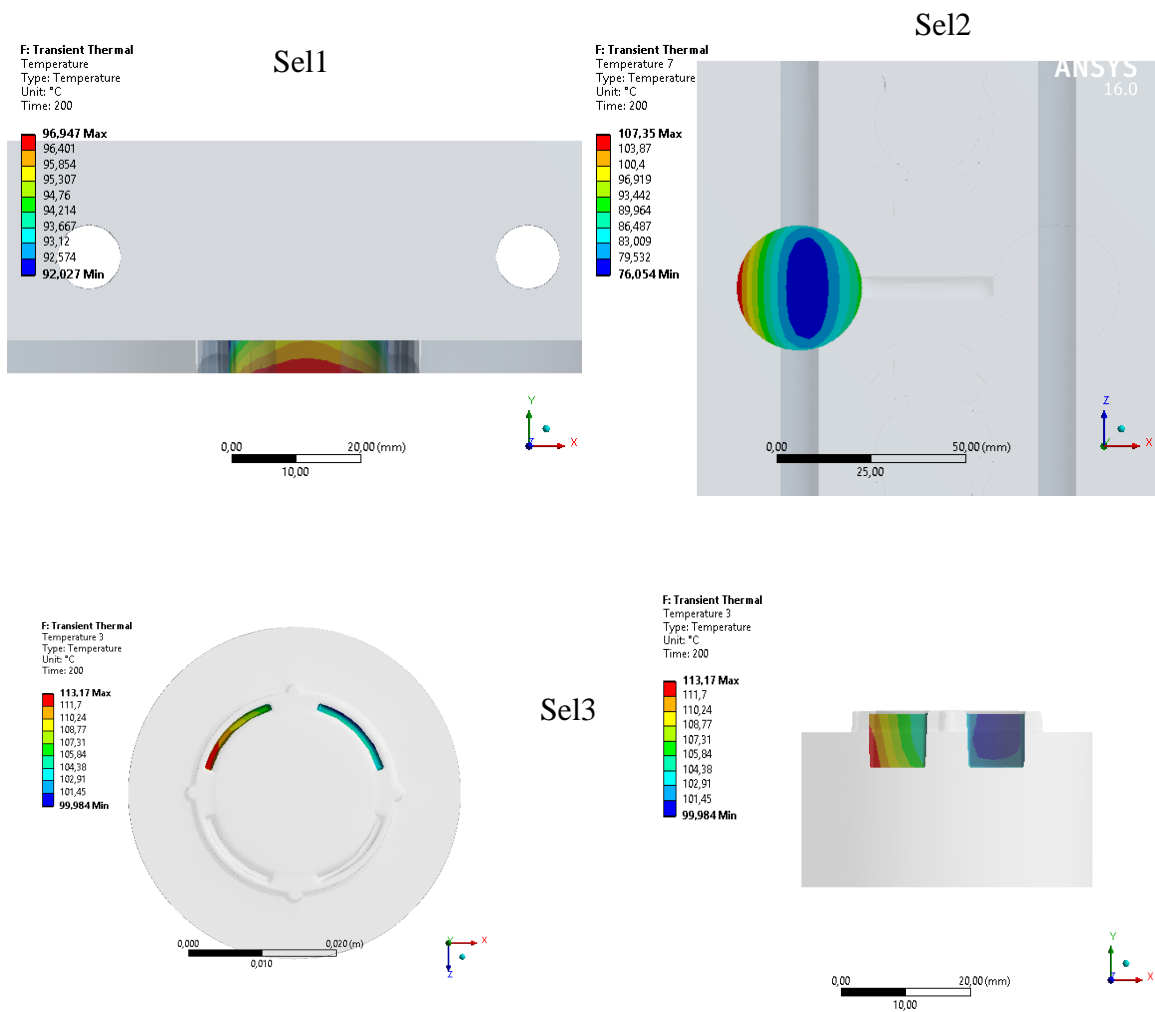
μικρότερη των 387K. Το μοντέλο θα κληθεί να επιλύσει μη γραμμικές εξισώσεις και γι' αυτό επιλέγεται ο Direct Solver.

Ως προς τα φορτία, ορίζεται στις επιφάνειες των ψυκτικών καναλιών που απεικονίζονται στην Εικόνα 5.3, φορτίο συναγωγής convection με $h = 3945 (W / (m^2K))$ όπως υπολογίζεται από το Κεφάλαιο 3 για $20^{\circ}C$.

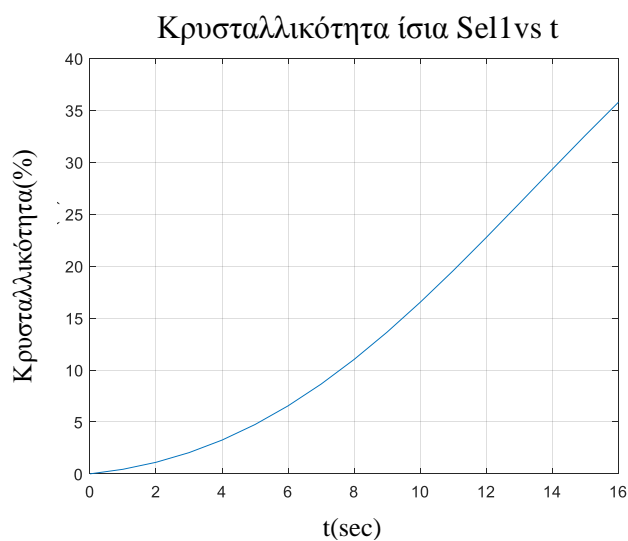


Εικόνα 5.3 Συνθήκη συναγωγής στα τοιχώματα του καλουπιού-ψυκτικών καναλιών

Από την επίλυση του μοντέλου προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.4 για τις περιοχές ενδιαφέροντος:

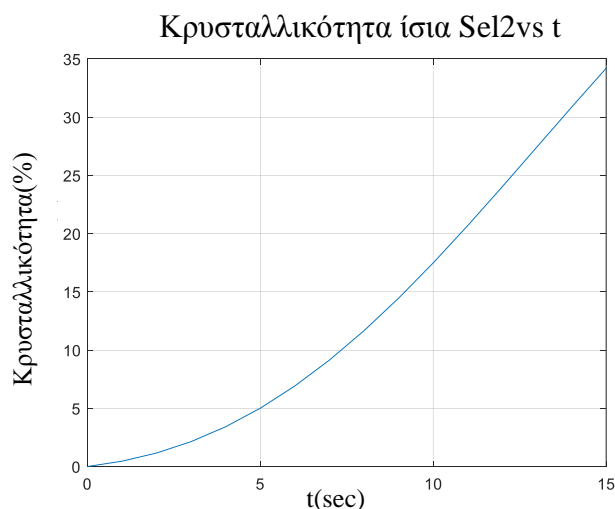


Εικόνα 5.4 Κατανομές θερμοκρασιών σε κάθε περιοχή ενδιαφέροντος για ευθείς αγωγούς
 Στο σχεδιασμό με τους ευθείς αγωγούς ψύξης η κρυσταλλικότητα συναρτήσει του χρόνου που δίνεται για την περιοχή Sel1 μεταβάλλεται σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.1 :



Διάγραμμα 5.1 Κρυσταλλικότητα στην περιοχή Sel1 με ευθείς αγωγούς συναρτήσει του χρόνου

Αντίστοιχα η κρυσταλλικότητα συναρτήσει του χρόνου για την περιοχή Sel2 μεταβάλλεται σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.2.



Διάγραμμα 5.2 Κρυσταλλικότητα στην περιοχή Sel2 με ευθείς αγωγούς συναρτήσει του χρόνου

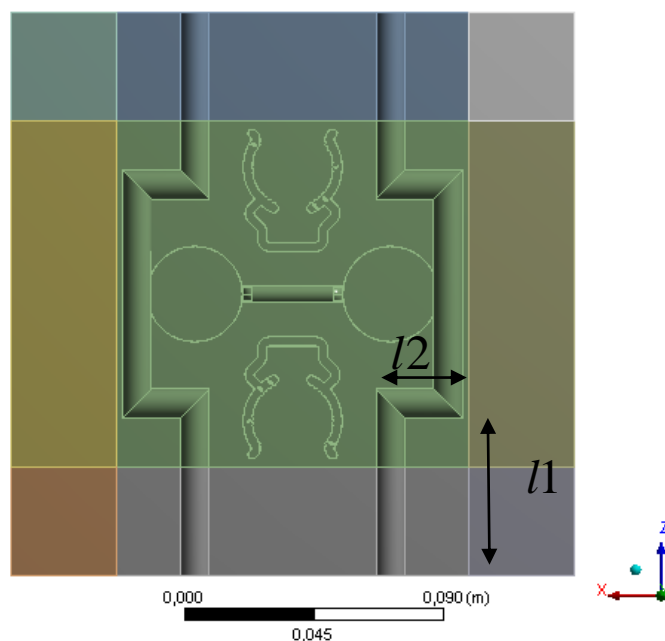
Από το Διάγραμμα 5.1 και Διάγραμμα 5.2 φαίνεται ότι η κρυσταλλοποίηση διαρκεί 16sec για την περιοχή Sel1 με τελική τιμή $x_{Sel1} = 35,75\%$, ενώ 15sec για την περιοχή Sel2 με τελική τιμή $x_{Sel2} = 34,8\%$. Η τελική τιμή κρυσταλλικότητας θα είναι αυτή η οποία θα αντιστοιχεί στην θερμοκρασία των 387K και αυτή που επιζητείται κάθε φορά. Παρόλο που η $x_{Sel1} = 35,75\%$ είναι μια τιμή χαμηλής σχετικά κρυσταλλικότητας για το στήριγμα, παρατηρείται ότι αυτός ο σχεδιασμός, πιθανώς να είναι «πολύ γρήγορος» επιφέροντας έτσι ανομοιομορφία ψύξης στις περιοχές από τις οποίες απαρτίζεται η τάπα. Μεγάλο μέρος της περιοχής Sel2 βρίσκεται στους $76^{\circ}C$, προκαλώντας αρκετά μικρή κρυσταλλικότητα $x_{Sel2} = 34,8\%$ ενώ οι τέσσερις υποδοχείς βρίσκονται μόνο στο εύρος θερμοκρασιών $114 - 100^{\circ}C$, το οποίο επίσης δημιουργεί ανομοιομορφία μεταξύ δύο πλαϊνών υποδοχών. Ταυτόχρονα, θα ήταν επιθυμητός ο περιορισμός του μεγαλύτερου μέρους ψύξης στα στηρίγματα και λιγότερου στις τάπες, κάτι που δεν επιτυγχάνεται με αυτόν τον σχεδιασμό, αφού η περιοχή Sel2 είναι αυτή που βρίσκεται πιο κοντά στο ψυκτικό κανάλι.

5.2. Εναλλακτικός Σχεδιασμός, καθορισμός των παραμέτρων

5.2.1. Παράμετροι γεωμετρίας καναλιών

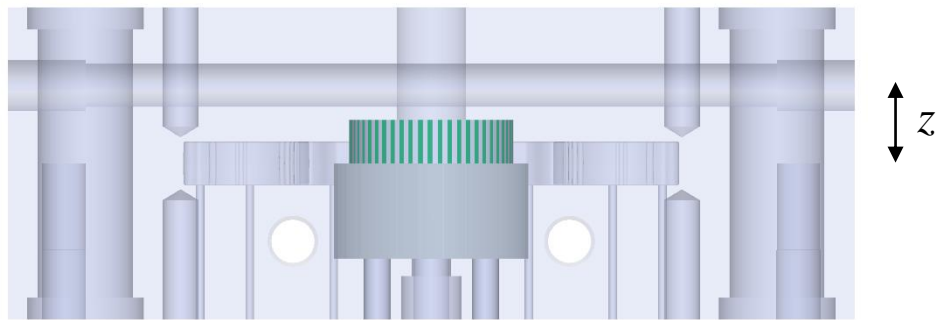
Το ερώτημα που προκύπτει είναι πως θα επιδράσει μία διαφορετική τοποθέτηση των καναλιών ψύξης ώστε να μην ψύχεται τόσο γρήγορα αυτή τη ζώνη στο κέντρο της περιοχής Sel2 της τάπας.

Εκτός από τα κανάλια ψύξης σε ευθεία, χρησιμοποιούνται ευρέως και τάπες για κατεύθυνση της ροής, έπειτα από διάνοιξη τρυπών σε διάφορες διευθύνσεις. Έτσι επιτυγχάνονται διάφορες διατάξεις καναλιών. Μία κοινή γεωμετρία παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.5:



Εικόνα 5.5 Παράμετροι μηκών ψυκτικού καναλιού για παράδειγμα πλάκας με $l_1=70\text{mm}$ και $l_2=25\text{mm}$

Το «σπάσιμο» αυτό, προσφέρει τη δυνατότητα να μειωθούν οι πολύ γρήγοροι ρυθμοί ψύξης στο κέντρο της τάπας και να ψυχθούν περιοχές οι οποίες παραμένουν πιο θερμές. Ξεχωρίζουν οι 2 παράμετροι l_1 και l_2 ως τα μήκη που απεικονίζονται στην παραπάνω Εικόνα. Αυτή η διαμόρφωση πραγματοποιείται στην πλάκα cavity ενώ στην πλάκα core διατηρούνται τα ευθεία κανάλια ψύξης.



Εικόνα 5.6 Παράμετρος z

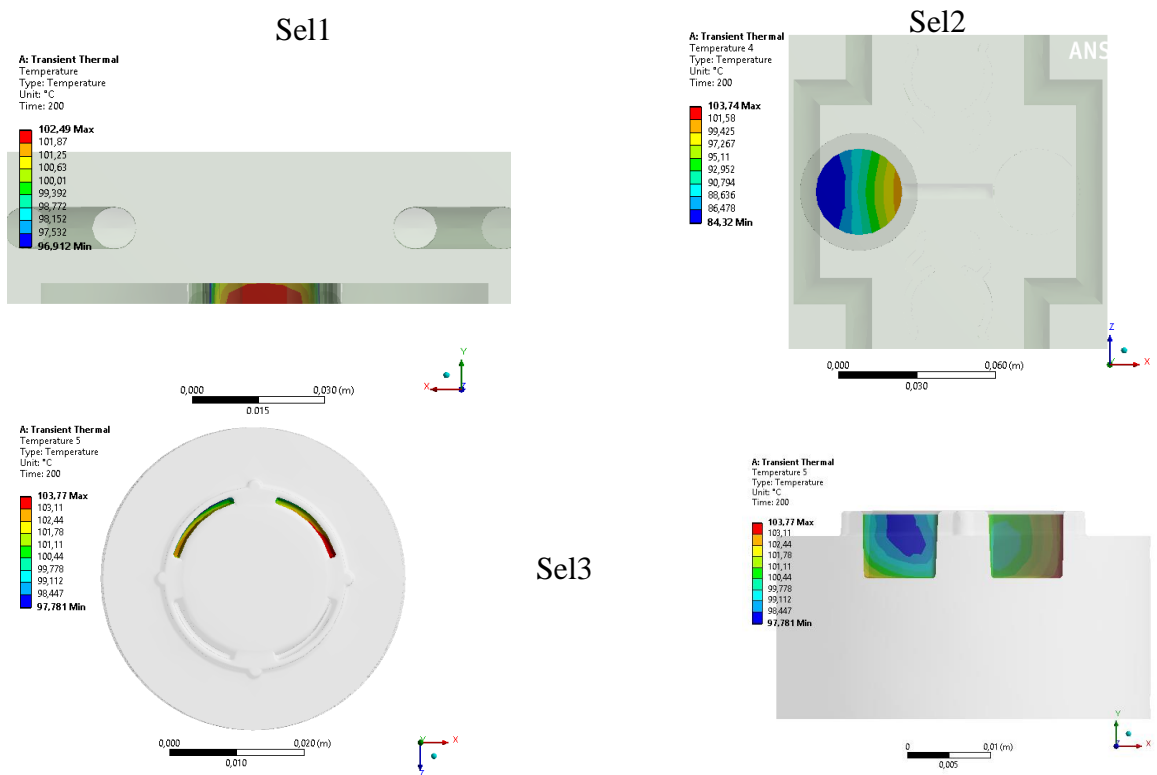
Αυτό πραγματοποιείται γιατί το πρόβλημα δεν είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα του ύψους z για το Προϊόν 1 (Εικόνα 5.6). Παραμετρικά θα μεταβάλλεται μόνο το ύψος z στην πλάκα cavity για να μειωθεί η ταχύτατη ψύξη στη μεσαία ζώνη της περιοχής Sel2 του προϊόντος 1.

Στο ANSYS transient thermal επιλύονται τα μοντέλα για τους παρακάτω συνδυασμούς του Πίνακας 7 για την διερεύνηση της επίδρασής τους στην ψύξη :

A/A συνδυασμού	$l1$ (mm)	$l2$ (mm)	Z(mm)
1 ($l1-60-l2-20$)	60	20	18
2 ($l1-80-l2-20$)	80	20	18
5 ($l1-60-l2-30$)	60	30	18
6 ($l1-80-l2-30$)	80	30	18
7 ($l1-80-l2-30-z21$)	80	30	21
8 ($l1-60-l2-30-z25$)	60	30	25

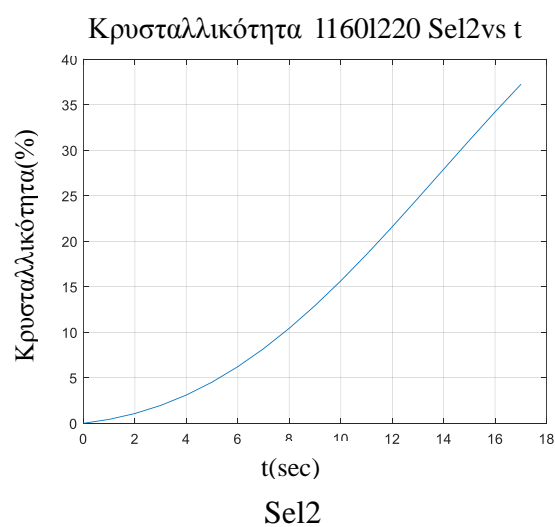
Πίνακας 7 Συνδυασμοί μηκών $l1$, $l2$ και z για παραμετρική διερεύνηση της ψύξης

Ξεκινώντας από τον πρώτο συνδυασμό $l1-80-l2-20$ λαμβάνονται οι κατανομές της θερμοκρασίας της Εικόνα 5.7:



Εικόνα 5.7 Κατανομές θερμοκρασιών για 11 – 60 – 12 – 20

Από την παραπάνω ανάλυση, παρατηρείται ότι το «σπάσιμο» της γεωμετρίας επιτυγχάνει την μείωση του ρυθμού ψύξης της περιοχής Sel2 που πλέον για τον ίδιο χρόνο ψύξης η μεσαία ζώνη βρίσκεται στους 88°C και όχι στους 76°C. Επίσης εξομαλύνεται και η ανομοιομορφία κατανομών στην περιοχή Sel3 καθώς και αυτή μεταξύ των περιοχών Sel3-Sel2. Οι κρυσταλλικότητες των περιοχών Sel1 και Sel2 παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.8:

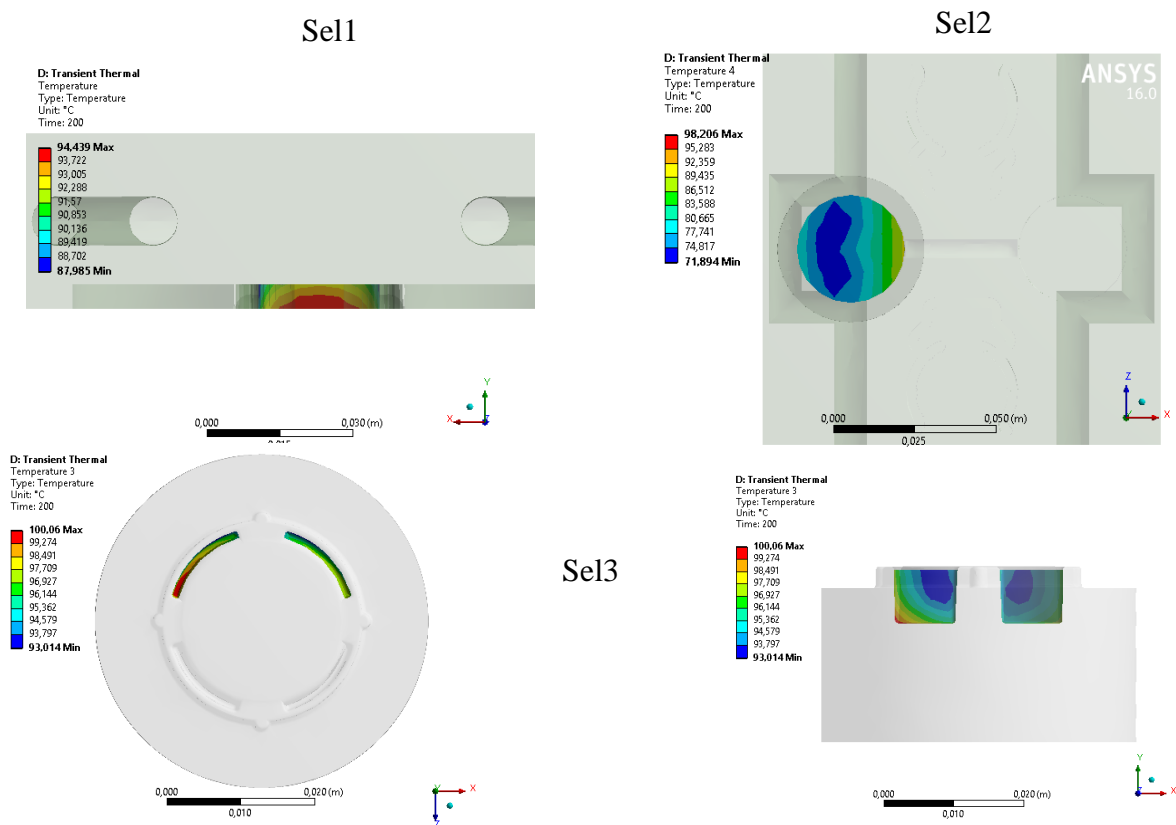


Εικόνα 5.8 Διαγράμματα μεταβολής κρυσταλλικότητας συναρτήσει του χρόνου στις περιοχές Sel1 (αριστερά) και Sel2 (δεξιά) για $I1 - 60 - I2 - 20$

Είναι λοιπόν $x_{Sel1} = 35,75\%$ και $x_{Sel2} = 37,22\%$, κάτι το οποίο δεν πληροί τις προϋποθέσεις κρυσταλλικότητας.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για όλους τους συνδυασμούς του Πίνακα 7 και παρατίθενται οι εικόνες με τις κατανομές των θερμοκρασιών παρακάτω. Στο τέλος παρατίθεται και ο Πίνακας 8 που δείχνει την συνοπτικά την κρυσταλλικότητα που έχει αποκτήσει το κάθε προϊόν μετά το πέρας των 387K καθώς και το εύρος των θερμοκρασιών της περιοχής Sel3.

Για τον δεύτερο συνδυασμό, η κατανομή θερμοκρασιών στις περιοχές ενδιαφέροντος παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.9:



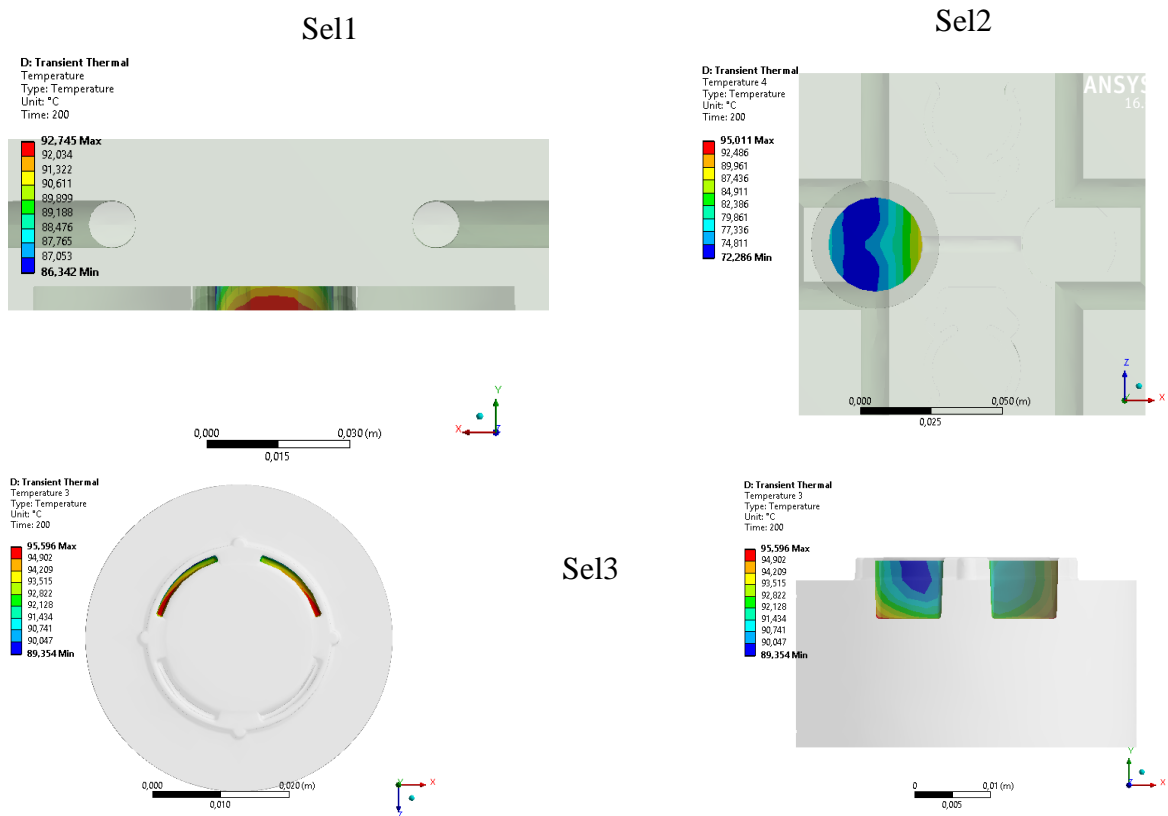
Εικόνα 5.9 Κατανομές θερμοκρασιών για $I1 - 80 - I2 - 20$

Σε σχέση με το προηγούμενο «σπάσιμο», αυτή η γεωμετρία οδηγεί στην μετατόπιση της μεσαίας ζώνης (που εμφανίστηκε στους ευθείς αγωγούς ψύξης) υψηλών ρυθμών ψύξης στην περιοχή Sel2 προς τα αριστερά. Ενώ η κρυσταλλικότητα της περιοχής Sel1 υπολογίζεται $x_{Sel1} = 32,56\%$ και βρίσκεται πιο κοντά στις προδιαγραφές, η περιοχή Sel2 έχοντας ψυχθεί πιο γρήγορα έχει ακόμα μικρότερη κρυσταλλικότητα από την προηγούμενη

περίπτωση $xSel2 = 35,56\%$, κάτι που δεν είναι αποδεκτό. Η ομοιομορφία, είναι ικανοποιητική ανάμεσα στους πλαϊνούς υποδοχείς της τάπας.

Στους προηγούμενους δύο συνδυασμούς η κρυσταλλικότητα της περιοχής Sel2 υπολογίστηκε πολύ μικρότερη από την απαιτούμενη. Γι' αυτό στους επόμενους δύο αυξήθηκε το μήκος l2 (το ψυκτικό κανάλι απομακρύνθηκε από το Προϊόν 1) και διερευνήθηκαν οι νέοι ρυθμοί ψύξης.

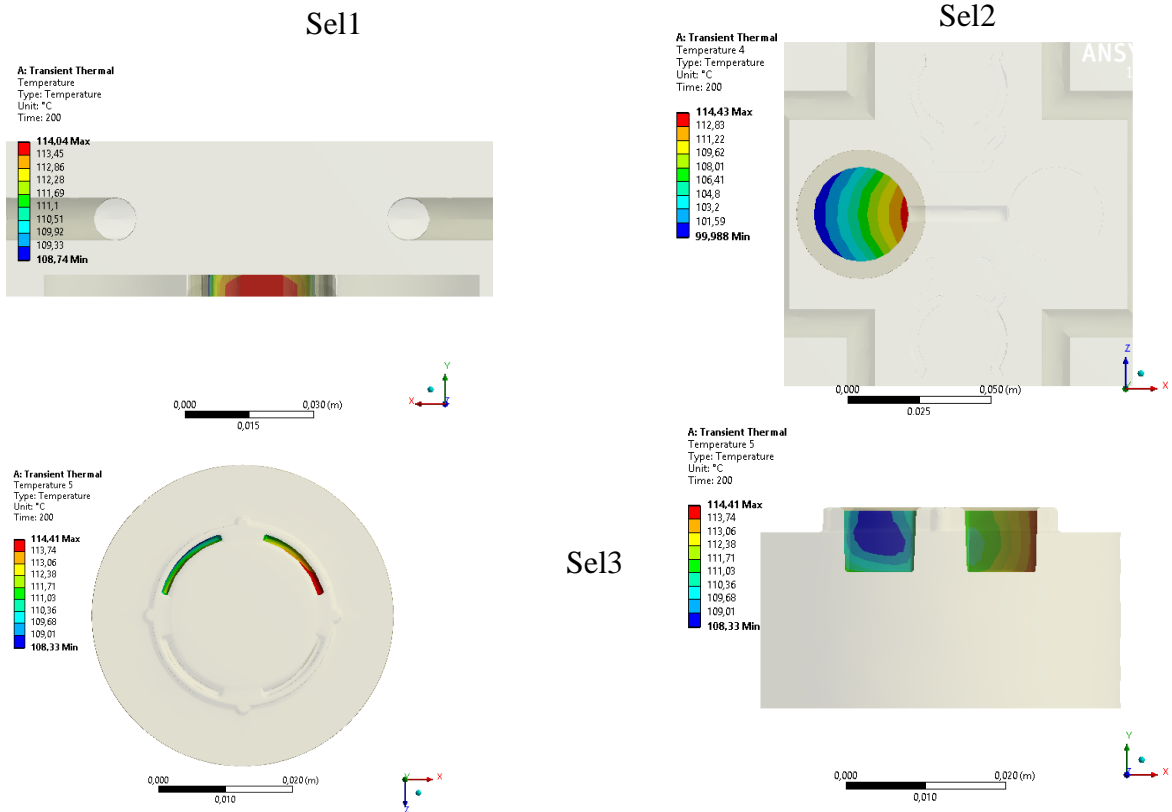
Για τον συνδυασμό l1 – 80 – l2 – 30 η κατανομή θερμοκρασιών στις περιοχές ενδιαφέροντος παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.10:



Εικόνα 5.10 Κατανομές θερμοκρασιών για l1 – 80 – l2 – 30

Σε αυτή την περίπτωση είναι $xSel1 = 32,55\%$ και $xSel2 = 30,82\%$, κάτι που κάνει ακόμα πιο άμορφη την περιοχή Sel2 σε σχέση με όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Για τον συνδυασμό l1 – 60 – l2 – 30 η κατανομή θερμοκρασιών στις περιοχές ενδιαφέροντος παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.11:

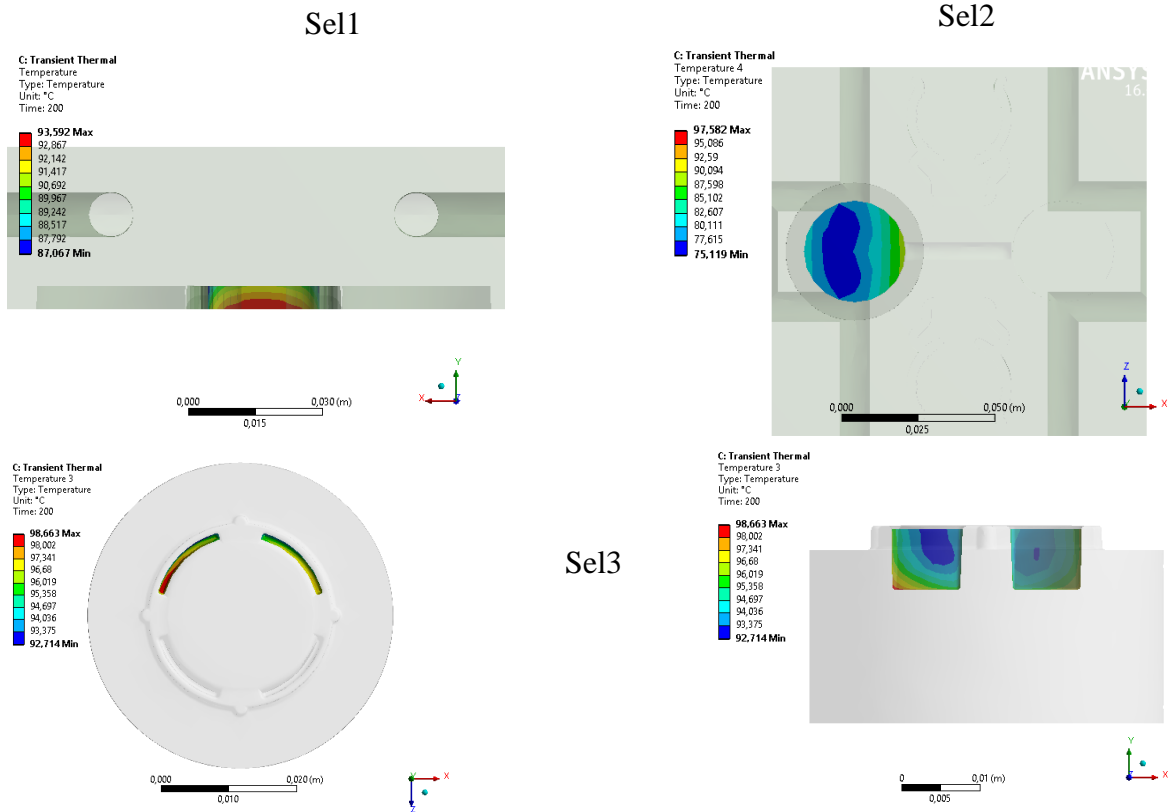


Εικόνα 5.11 Κατανομές θερμοκρασιών για $I1 - 60 - I2 - 30$

Προκύπτουν κρυσταλλικότητες $x_{Sel1} = 38,60\%$ και $x_{Sel2} = 39,91\%$. Παρατηρείται ότι με αυτόν τον σχεδιασμό, αυξάνεται η κρυσταλλικότητα της περιοχής Sel2, όπως είναι επιθυμητό, αλλά όχι τόσο όσο έχει προδιαγραφεί. Η περιοχή Sel1 εμφανίζει πιο αργούς ρυθμούς ψύξης και γίνεται πιο κρυσταλλική, κάτι το οποίο δεν επιθυμείται.

Στους επόμενους δύο συνδυασμούς, θα διερευνηθεί πως επιδρά η παράμετρος z της απόστασης των καναλιών από την διαχωριστική γραμμή cavity-core.

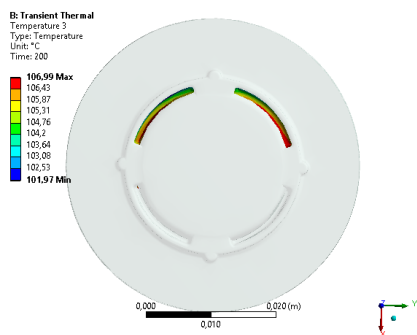
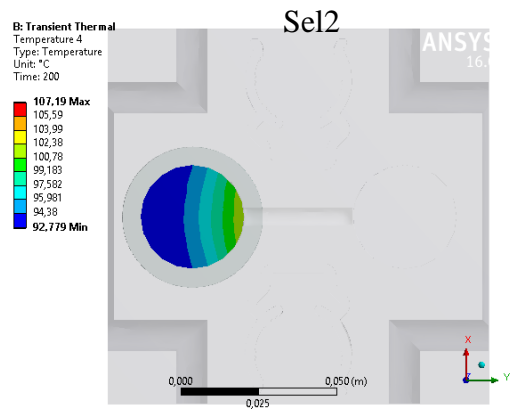
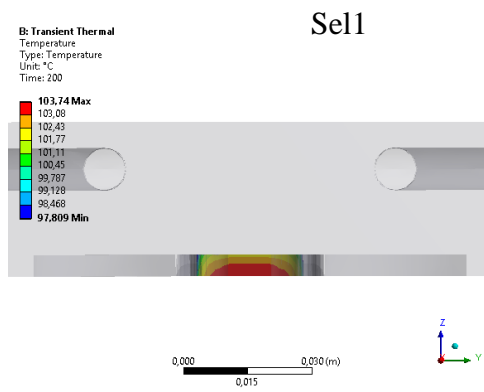
Για την πρώτη περίπτωση $I1 - 80 - I2 - 30 - z21$ λαμβάνεται το ίδιο μοντέλο, μόνο που τώρα απομακρύνονται τα ψυκτικά κανάλια από τα προϊόντα. Οι κατανομές των θερμοκρασιών παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.12 :



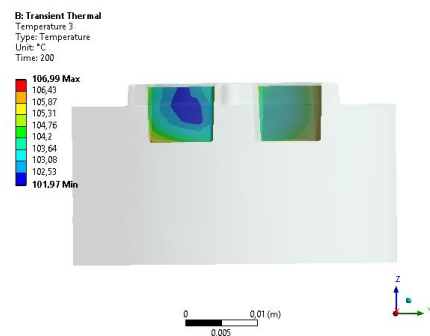
Εικόνα 5.12 Κατανομές θερμοκρασιών για $l1 - 80 - l2 - 30 - z21$

Οι κρυσταλλικότητες που προκύπτουν είναι $x_{Sel1} = 30,83\%$ και $x_{Sel2} = 30,83\%$. Αυτή η κρυσταλλικότητα είναι πολύ καλή για την περιοχή Sel1 αλλά όχι για την Sel2.

Για την περίπτωση τώρα $l1 - 60 - l2 - 30 - z25$ οι κατανομές θερμοκρασιών παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.13:



Sel3



Εικόνα 5.13 Κατανομές θερμοκρασιών για $l1 - 60 - l2 - 30 - z25$

Σε αυτή την περίπτωση είναι $xSel1 = 34,2\%$ και $xSel2 = 34,2\%$. Οι περιπτώσεις δηλαδή για τις οποίες απομακρύνεται το ψυκτικό κανάλι, καταλήγουν σε ίδιες τιμές κρυσταλλικότητας στα δύο προϊόντα.

Παρατίθεται στο τέλος ο Πίνακας 8 με συνοπτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων:

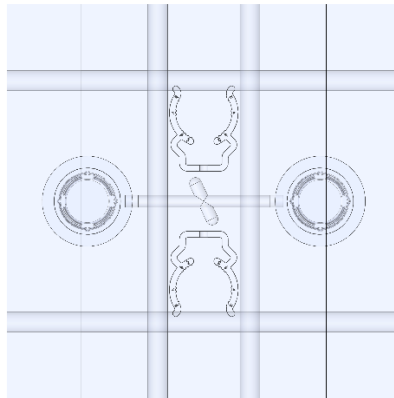
		Εύρος θερμοκρασιών(°C)	Κρυσταλλικότητα (%)
I1-60-I2-20	Sel1	96-102	35,75
	Sel2	84-103	37,22
	Sel3	97-103	
I1-80-I2-20	Sel1	87-94	32,56
	Sel2	72-98	35,56
	Sel3	93-100	
I1-60-I2-30	Sel1	108-114	38,60
	Sel2	100-114	39,91
	Sel3	108-114	
I1-80-I2-30	Sel1	86-93	32,55
	Sel2	73-95	30,87
	Sel3	89-96	
I1-80-I2-30-z21	Sel1	87-94	30,83
	Sel2	75-98	30,83
	Sel3	93-99	
I1-60-I2-30-z25	Sel1	98-104	34,20
	Sel2	93-107	34,20
	Sel3	102-107	

Πίνακας 8 Τιμές κρυσταλλικότητας και εύρος θερμοκρασιών κάθε περιοχής συνοπτικά

5.2.2. Παράμετροι αναδιάταξης κοιλοτήτων

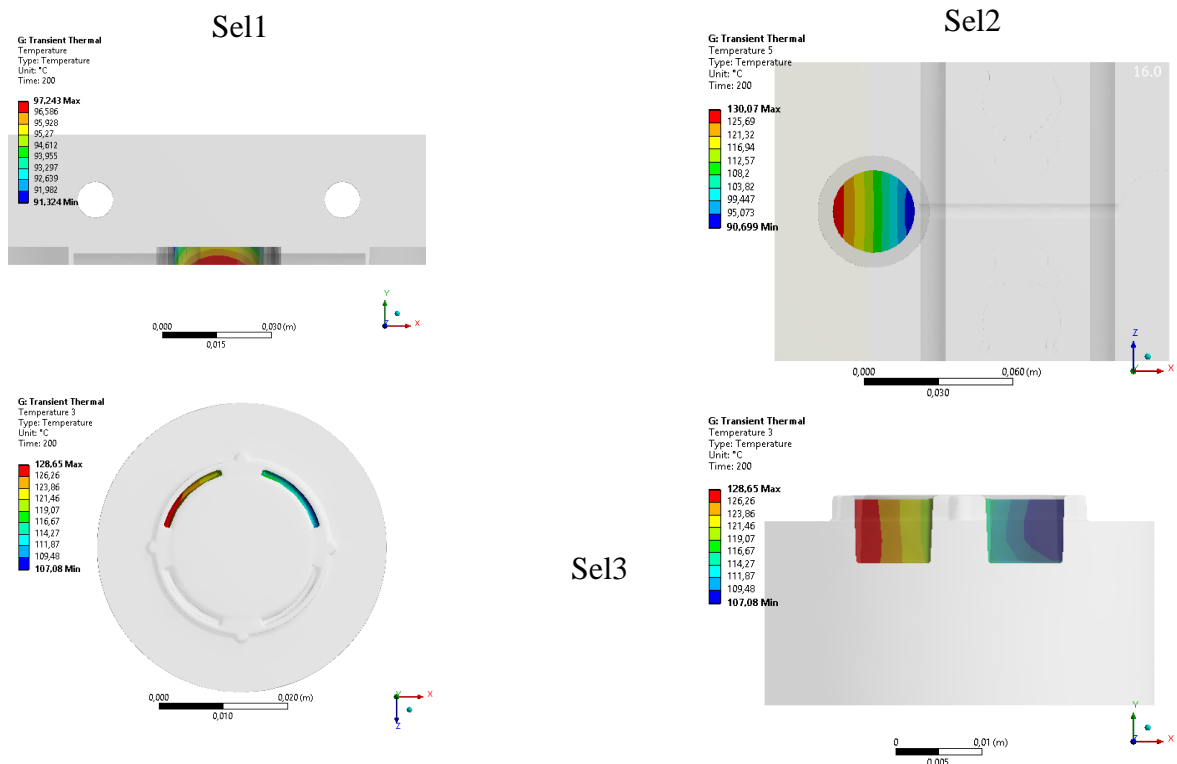
Όλοι οι παραπάνω πιθανοί συνδυασμοί, δεν κατάφεραν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις κρυσταλλικότητας του Προϊόντος 1, ενώ ο ρυθμός ψύξης που επιτυγχανόταν του προσέδιδε αρκετά μικρή κρυσταλλικότητα, περίπου στο 35% ή και λιγότερη.

Έτσι, στο ζητούμενο αυτόν μικρότερο ρυθμό ψύξης, λήφθηκε η απόφαση να αναδιαταχθεί η ίδια η θέση που χυτεύεται το Προϊόν 1 και να απομακρυνθεί από τα κανάλια ψύξης. Για την περίπτωση των αγωγών ψύξης σε ευθεία, η διάταξη απεικονίζεται στην Εικόνα 5.14:



Εικόνα 5.14 Γεωμετρία πλακών cavity-core για απομακρυσμένο το Προϊόν 1

Οι κατανομές θερμοκρασιών σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.15 :

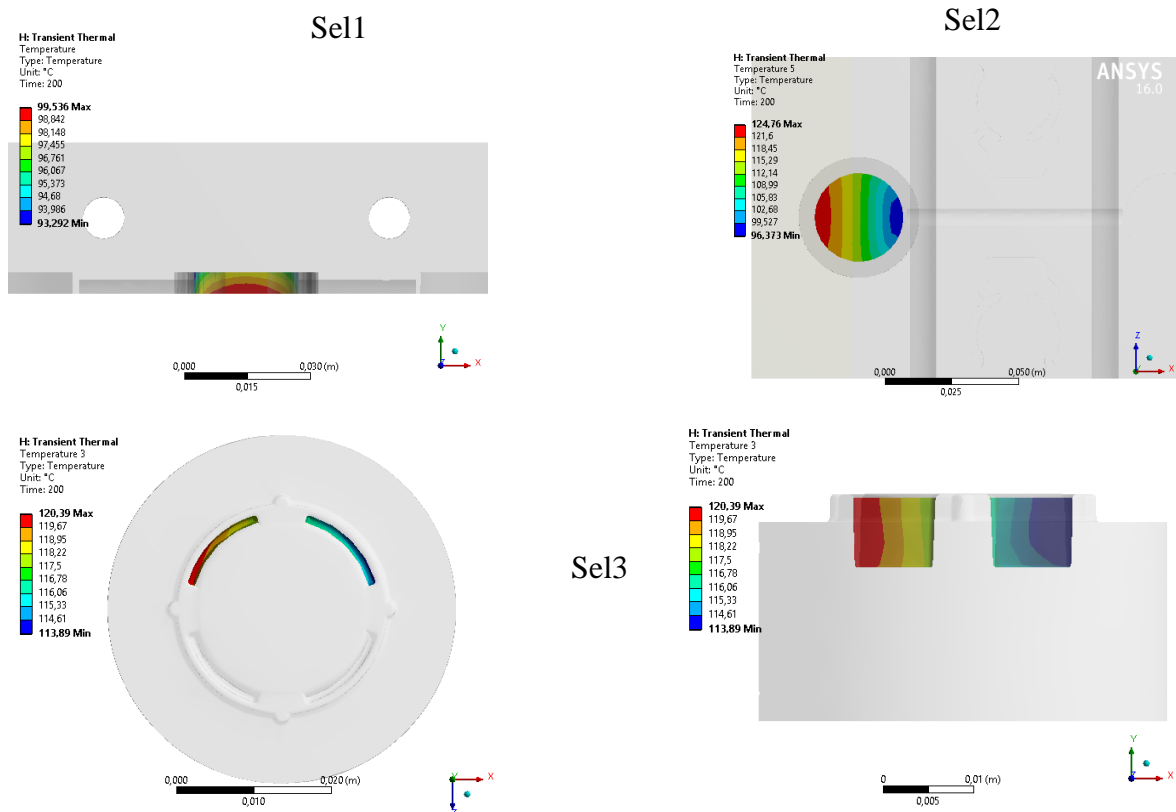


Εικόνα 5.15 Κατανομές θερμοκρασιών για το απομακρυσμένο Προϊόν 1

Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρούνται κρυσταλλικότητες $x_{Sel1} = 34,19\%$ και $x_{Sel2} = 44,4\%$. Με αυτόν τον σχεδιασμό, οι τιμές των κρυσταλλικοτήτων σε κάθε περιοχή είναι πιο κοντά στις επιθυμητές και διατηρούν την απαίτηση της μεγάλης κρυσταλλικότητας στην περιοχή Sel2 ενώ της μικρής στην Sel1. Το μειονέκτημα σε αυτόν το σχεδιασμό είναι η μεγάλη ανομοιομορφία που παρατηρείται στους υποδοχείς του Προϊόντος 1 η οποία φτάνει τους $27^{\circ}C$.

5.2.3. Παράμετροι υλικών

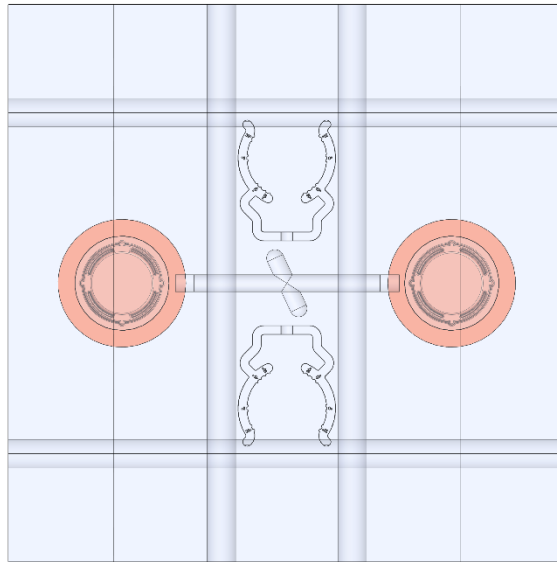
Από την παραπάνω διερεύνηση, ενώ ήταν εφικτή η επίτευξη διαφορετικών ρυθμών ψύξης, παρουσιάστηκαν αρκετές θερμοκρασιακές ανομοιομορφίες στις περιοχές ενδιαφέροντος. Μία συνήθης τακτική για την εξομάλυνση αυτών των ανομοιομορφιών είναι η κατασκευή των πλακών cavity και core από κράματα χαλκού. Εάν ωστόσο είναι επιθυμητή η απομόνωση συγκεκριμένων περιοχών, τοποθετούνται ενθέματα χαλκού κοντά στις συγκεκριμένες γεωμετρίες. Ο χαλκός έχει το χαρακτηριστικό της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας, οπότε έτσι θα μπορούσε να ενισχυθεί το ρεύμα θερμότητας με αγωγή και να τείνουν να εξομαλυνθούν οι θερμοκρασιακές διαφορές. Ο χαλκός έχει θερμική αγωγιμότητα $k = 385(W/(mK))$ ενώ το μέταλλο που χρησιμοποιείται στο υπόλοιπο καλούπι έχει $k = 41,5(W/(mK))$. Έπειτα από ορισμό υλικού κράματος χαλκού στα τεμάχια υποδοχών του Προϊόντος 1, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν παρουσιάζουν τις εξής κατανομές θερμοκρασιών της Εικόνα 5.16 :



Εικόνα 5.16 Κατανομές θερμοκρασιών για το απομακρυσμένο Προϊόν 1 με ένθεμα χαλκού

Παρατηρούνται κρυσταλλικότητες $x_{Sel1} = 32,55\%$ και $x_{Sel2} = 47,85\%$, ενώ το εύρος των θερμοκρασιών στους υποδοχείς της περιοχής Sel3 έχει μειωθεί στους μόλις 7 βαθμούς

κελσίου σε σύγκριση με το μοντέλο χωρίς τη χρήση του Χαλκού η οποία είχε σχεδόν 27 βαθμούς κελσίου. Αυτό είναι ένα αποδεκτό εύρος και μαζί με τις πιο κοντινές ως προς τον στόχο τιμές κρυσταλλικότητας, ο τελευταίος είναι ο τελικός σχεδιασμός για το ψυκτικό κύκλωμα του καλουπιού (Εικόνα 5.17).



Εικόνα 5.17 Τελικός σχεδιασμός με ενθέματα χαλκού

5.3. Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Η διερεύνηση όλων των παραπάνω σχεδιασμών του ψυκτικού κυκλώματος του καλουπιού, βασίστηκαν σε μία μεθοδολογία εύρεσης μίας βέλτιστης λύσης μέσω της ικανοποίησης των κριτηρίων της κρυσταλλικότητας και της θερμικής ομοιομορφίας. Ο τελευταίος σχεδιασμός αποδείχτηκε να είναι αυτός που ικανοποιεί και τα δύο κριτήρια ταυτόχρονα, προσφέροντας τον κατάλληλο ρυθμό ψύξης του καλουπιού.

Μελλοντικά, αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να γίνει με την αυστηρή έννοια της βελτιστοποίησης και την εισαγωγή αντικειμενικών συναρτήσεων με καθορισμένα κριτήρια. Αυτά τα κριτήρια, θα είχαν την βάση τους στην αποφυγή των φαινομένων shrinkage και warpage επηρεασμένα από την κρυσταλλικότητα, ενώ θα λάμβαναν υπόψη τους και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν αυτά τα μεγέθη, όπως το πόσο γρήγορα γίνεται η έγχυση, το σύστημα των αγωγών παροχής του πολυμερούς προς τα προϊόντα, την θερμοκρασία του πολυμερούς και άλλους παράγοντες.

Επίσης, εφόσον έχει αναπτυχθεί ένα αριθμητικό μοντέλο για την ανάλυση του υδροδυναμικού φαινομένου και της μεταφοράς θερμότητας, θα μπορούσε αυτό να

χρησιμοποιηθεί και για την μελέτη της συμπεριφοράς του ρευστού και σε περίεργες γεωμετρίες του ψυκτικού καναλιού από τα U turn που χρησιμοποιούνται ευρέως, μέχρι κανάλια τύπου conformal. Ανάλογα με την μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας ή θα μπορούσαν έπειτα να καθοριστούν οι συνθήκες φόρτισης στα τοιχώματα των καναλιών ψύξης στο μοντέλο του ANSYS transient thermal.

Βιβλιογραφία

- [1]CHU, M. R. (1983). Isothermal and Nonisothermal Crystallization of Polyethylene. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, 5.
- [2]ΚΑΚΑΤΣΙΟΣ, Ξ. (2006). *Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μαζής*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμεών.
- [3]www.vaxasoftware.com/doc_eduen/qui/caloresph2o.pdf
- [4]www.thermexcel.com/english/tables/eau_atm.htm
- [5]www.gplastics.com/pdf/hdpe.pdf
- [6]www.materialseng.org/pmwiki/pmwiki.php/CFX/Cfx-batch
- [7]www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6239
- [8]www.itia.ntua.gr/getfile/116/3/documents/2000HydrometTransport.pdf
- [9]www.padtinc.com/blog/the-focus/peeling-away-the-vmask
- [10]www.mechanicsandmachines.com/?p=306
- [11]www.cs.mtu.edu/~shene/COURSES/cs201/NOTES/chap05/REAL-out-F.html
- [12]www.ptonline.com/columns/cooling-tips-for-crystalline-polymers

Παράρτημα

Παράρτημα Α

Ο κώδικας σε Perl για το ANSYS CFX είναι :

```
# Session file started: 2016/07/04 20:51:16
```

```
# CFX-16.0 build 2014.11.14-23.10-133146
```

```
# To avoid unnecessary file pre-processing and modifications, include
```

```
# COMMAND FILE at the top of your session file.
```

```
# If it is not included, the file is assumed to be older and will be
```

```
# modified for backward compatibility.
```

```
COMMAND FILE:
```

```
CFX Post Version = 16.0
```

```
END
```

```
DATA READER:
```

```
Clear All Objects = false
```

```
Append Results = false
```

```
Edit Case Names = false
```

```
Open to Compare = false
```

```
Multi Configuration File Load Option = Last Case
```

```
Open in New View = true
```

```
Keep Camera Position = true
```

```
Load Particle Tracks = true
```

Files to Compare =

END

DATA READER:

Domains to Load=

END

> load filename=C:\Users\marina\Documents\gewmetriakaikylin_files\dp0\CFX\CFX\

Fluid Flow CFX_001.res, force_reload=\

true

! \$List=getValue("DATA READER","Timestep List"); #this looks for all trn.files

! print "\$List \n";

! @Wert=split(/,/, \$List);

! \$lastFrame=\$List[\$#timestepList];

! foreach \$List(@Wert){

> load timestep = \$List #load the timestep

! print "calculating for TIMESTEP \$List \n";

! (\$time, \$timeunits) = evaluate("Time");

EXPORT:

ANSYS Export Data = Element Heat Flux

ANSYS File Format = ANSYS

ANSYS Reference Temperature = 0.0 [C]

ANSYS Specify Reference Temperature = Off

ANSYS Supplemental HTC = 0.0 [W m⁻² K⁻¹]

Additional Variable List =

BC Profile Type = Custom

Export Connectivity = Off

Export Coord Frame = Global

Export File = C:/Users/marina/Documents/gewmetriakaikylin_files/user_files/
\$List.csv

Export Geometry = On

Export Location Aliases = Temp

Export Node Numbers = Off

Export Null Data = On

Export Type = BC Profile

Export Units System = Current

Export Variable Type = Hybrid

External Export Data = None

Include File Information = Off

Include Header = On

Location = Adiabatic

Location List = /PLANE:Plane 1,/PLANE:Plane 10,/PLANE:Plane 11,/PLANE:Plane \
12,/PLANE:Plane 2,/PLANE:Plane 3,/PLANE:Plane 4,/PLANE:Plane 5,/PLANE:Plane
6,\
PLANE:Plane 7,/PLANE:Plane 8,/PLANE:Plane 9

Null Token = null

Overwrite = On

Precision = 8

Separator = ", "

Spatial Variables = X,Y,Z

Variable List = T10, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, Variable 1

Vector Brackets = ()

Vector Display = Scalar

END

>export

Session file stopped: 2016/07/04 20:52:46

!}

Παράρτημα Β

Ο κώδικας σε APDL για το ANSYS transient thermal (αφορά την περίπτωση των αγωγών σε ευθεία) :

```
! Commands inserted into this file will be executed immediately after the ANSYS /POST1
command.

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V,
A)
! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent
solver unit system.
! See Solving Units in the help system for more information.

/POST1
RESUME
alls
*GET,numb_sets,ACTIVE,0,SET,NSET !get number of results sets
set,first
!
CMSEL,s,Selection1
!
*get,nummax,NODE,,num,max
*get,numnode,NODE,,count
*dim,mask,array,nummax
*vget,mask(1),NODE,,NSEL
*dim,nodal_data_full,array,nummax,1
*dim,nodal_data_comp,array,numnode,1
*dim,nodeid_full,array,nummax !array for containing NODE ID
*dim,nodeid_comp,array,numnode !array for containing NODE ID for ONLY selected nodes
*vfill,nodeid_full,ramp,1,1 !array from 1-to-nummnode (1,2,3,...)
!
*do,i_set,1,numb_sets,1
*GET,current_time,ACTIVE,0,SET,TIME
!Retrieving DATA
*vmask,mask(1)
*vget,nodal_data_full(1,1),node,,TEMP
!
*vmask,mask(1)
*vfun,nodal_data_comp(1,1),COMP,nodal_data_full(1,1)
*vmask,mask(1)
*vfun,nodeid_comp(1,1),COMP,nodeid_full(1,1)
!
*cfopen,Temperature_isia_Sell_%current_time%,DAT
*vwrite,nodal_data_comp(1),nodeid_comp(1)
%F %F
*cfclos
!
set,next !read next set
*ENDDO !end loop
!sel2
alls
*GET,numb_sets,ACTIVE,0,SET,NSET !get number of results sets
set,first
!
CMSEL,s,Selection2
!
*get,nummax,NODE,,num,max
*get,numnode,NODE,,count
*dim,mask,array,nummax
*vget,mask(1),NODE,,NSEL
*dim,nodal_data_full,array,nummax,1
*dim,nodal_data_comp,array,numnode,1
*dim,nodeid_full,array,nummax !array for containing NODE ID
*dim,nodeid_comp,array,numnode !array for containing NODE ID for ONLY selected nodes
*vfill,nodeid_full,ramp,1,1 !array from 1-to-nummnode (1,2,3,...)
!
*do,i_set,1,numb_sets,1
*GET,current_time,ACTIVE,0,SET,TIME
```

```

!Retrieving DATA
*vmask,mask(1)
*vget,nodal_data_full(1,1),node,,TEMP
!
*vmask,mask(1)
*vfun,nodal_data_comp(1,1),COMP,nodal_data_full(1,1)
*vmask,mask(1)
*vfun,nodeid_comp(1,1),COMP,nodeid_full(1,1)
!
*cfopen,Temperature_isia_Sel2_%current_time%,DAT
*vwrite,nodal_data_comp(1),nodeid_comp(1)
%F %F
*cfclos
!
set,next !read next set
*ENDDO !end loop

!sel3
alls
*GET,numb_sets,ACTIVE,0,SET,NSET !get number of results sets
set,first
!
CMSEL,s,Selection3
!
*get,nummax,NODE,,num,max
*get,numnode,NODE,,count
*dim,mask,array,nummax
*vget,mask(1),NSEL
*dim,nodal_data_full,array,nummax,1
*dim,nodal_data_comp,array,numnode,1
*dim,nodeid_full,array,nummax !array for containing NODE ID
*dim,nodeid_comp,array,numnode !array for containing NODE ID for ONLY selected nodes
*vfill,nodeid_full,ramp,1,1 !array from 1-to-nummnode (1,2,3,...)
!

!
*do,i_set,1,numb_sets,1
*GET,current_time,ACTIVE,0,SET,TIME
!Retrieving DATA
*vmask,mask(1)
*vget,nodal_data_full(1,1),node,,TEMP
!
*vmask,mask(1)
*vfun,nodal_data_comp(1,1),COMP,nodal_data_full(1,1)
*vmask,mask(1)
*vfun,nodeid_comp(1,1),COMP,nodeid_full(1,1)
!
*cfopen,Temperature_isia_Sel3_%current_time%,DAT
*vwrite,nodal_data_comp(1),nodeid_comp(1)
%F %F
*cfclos
!
set,next !read next set
*ENDDO !end loop
!sel4
alls
*GET,numb_sets,ACTIVE,0,SET,NSET !get number of results sets
set,first
!
CMSEL,s,Selection4
!
*get,nummax,NODE,,num,max
*get,numnode,NODE,,count
*dim,mask,array,nummax
*vget,mask(1),NSEL
*dim,nodal_data_full,array,nummax,1
*dim,nodal_data_comp,array,numnode,1
*dim,nodeid_full,array,nummax !array for containing NODE ID
*dim,nodeid_comp,array,numnode !array for containing NODE ID for ONLY selected nodes
*vfill,nodeid_full,ramp,1,1 !array from 1-to-nummnode (1,2,3,...)
!

!
*do,i_set,1,numb_sets,1
*GET,current_time,ACTIVE,0,SET,TIME

```



```

!Retrieving DATA
*vmask,mask(1)
*vget,nodal_data_full(1,1),node,,TEMP
!
*vmask,mask(1)
*vfun,nodal_data_comp(1,1),COMP,nodal_data_full(1,1)
*vmask,mask(1)
*vfun,nodeid_comp(1,1),COMP,nodeid_full(1,1)
!
*cfcopen,Temperature_isia_Sel4_%current_time%,DAT
*vwrite,nodal_data_comp(1),nodeid_comp(1)
%F %F
*cfclos
!
!
set,next !read next set
*ENDDO !end loop

!
*del,nodal_data_full,nopr
*del,nodal_data_comp,nopr
*del,mask,nopr
*del,nummax,nopr
*del,numnode,nopr
*del,nodeid_full,nopr
*del,nodeid_comp,nopr

ALLS

```

Παράρτημα Γ

Ο κώδικας στη Matlab για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων (αφορά την περίπτωση των αγωγών σε γεωμετρία $11-60-12-20$ και την εύρεση της κρυσταλλικότητας της περιοχής Sell) :

```
clear all
clc
%%
%%
nodeid(:,1)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_1.dat','',[0 1 209 1]);
C(:,2)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_1.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,3)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_2.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,4)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_3.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,5)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_4.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,6)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_5.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,7)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_6.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,8)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_7.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,9)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_8.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,10)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_9.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,11)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_10.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,12)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_11.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,13)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_12.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,14)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_13.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,15)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_14.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,16)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_15.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,17)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_16.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,18)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_17.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,19)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_18.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,20)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_19.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,21)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_20.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,22)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_21.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,23)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_22.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,24)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_23.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,25)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_24.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,26)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_25.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,27)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_26.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,28)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_27.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,29)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_28.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,30)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_29.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,31)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_30.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,32)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_31.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,33)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_32.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,34)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_33.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,35)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_34.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,36)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_35.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,37)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_36.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,38)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_37.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,39)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_38.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,40)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_39.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,41)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_40.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,42)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_41.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,43)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_42.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,44)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_43.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,45)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_44.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,46)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_45.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,47)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_46.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,48)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_47.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,49)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_48.dat','',[0 0 209 0]);
```



```

C(:,170)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_169.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,171)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_170.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,172)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_171.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,209)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_172.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,174)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_173.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,175)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_174.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,176)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_175.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,177)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_176.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,178)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_177.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,179)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_178.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,180)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_179.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,181)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_180.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,182)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_181.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,183)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_182.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,184)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_183.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,185)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_184.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,186)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_185.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,187)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_186.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,188)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_187.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,189)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_188.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,190)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_189.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,191)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_190.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,192)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_191.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,193)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_192.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,194)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_193.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,195)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_194.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,196)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_195.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,197)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_196.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,198)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_197.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,199)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_198.dat','',[0 0 209 0]);
C(:,200)=dlmread('Temperature_2060corh_Sell_199.dat','',[0 0 209 0]);

C(:,1)=200;
%%βρίσκει τους κόμβους στην περιοχή ενδιαφέροντος για εκτίμηση μέσου όρου
t=0:1:199;
k1=find(nodeid==158187)
k2=find(nodeid==146368)
k3=find(nodeid==158205)
k4=find(nodeid==158191)
k5=find(nodeid==158193)
k6=find(nodeid==158220)
k7=find(nodeid==158210)
k8=find(nodeid==158209)
k9=find(nodeid==160057)
k10=find(nodeid==146608)
k11=find(nodeid==160068)
k12=find(nodeid==158205)
k13=find(nodeid==146368)
k14=find(nodeid==158187)
k15=find(nodeid==158210)
k16=find(nodeid==158220)
k17=find(nodeid==158193)

%%κρατάει τιμές θερμοκρασιών μόνο γι'αυτούς τους κόμβους
Tk=zeros(1,200)
for j=1:200
Tk(1,j)=C(k1,j)+273;
Tk(2,j)=C(k2,j)+273;
Tk(3,j)=C(k3,j)+273;
Tk(4,j)=C(k4,j)+273;

```

```

Tk(5,j)=C(k5,j)+273;
Tk(6,j)=C(k6,j)+273;
Tk(7,j)=C(k7,j)+273;
Tk(8,j)=C(k8,j)+273;
Tk(9,j)=C(k9,j)+273;
Tk(10,j)=C(k10,j)+273;
Tk(11,j)=C(k11,j)+273;
Tk(12,j)=C(k12,j)+273;
Tk(13,j)=C(k13,j)+273;
Tk(14,j)=C(k14,j)+273;
Tk(15,j)=C(k15,j)+273;
Tk(16,j)=C(k16,j)+273;
Tk(17,j)=C(k17,j)+273;
end

for j=1:200
    T(1,j)=mean(Tk(:,j));
end
Tkeep=T;

for j=1:200
    closeto387(1,j)=abs(T(1,j)-(273+114));
    closeto394(1,j)=abs(T(1,j)-(273+121));
end
[min1,deikt1]=min(closeto387)
[min2,deikt2]=min(closeto394)

sunt=polyfit(t,T,1)
syms t
T=sunt(1,1)*t+sunt(1,2)
t11=(solve(T==394,t));
t22=(solve(T==387,t));
t1=double(t11)
t2=double(t22)
clearvars t T

T=Tkeep;
T(:,[(deikt1+1):200])=[] %διώχνει τις στήλες είναι μετα 387K
T(:,[1:(deikt2-2)])=[]%διώχνει τις στήλες που είναι πριν 394K

for i=1:(length(T)-1)
    deltT394_387(1,i)=abs(T(i+1)-T(i));
end

t=zeros(1,length(deltT394_387));
t(1,1)=0;
for i=2:length(deltT394_387)
    t(i)=t(i-1)+1;
end

suntA=-(394-387)/(t(1,length(t))-t(1,1)); %κλίση suntA θερμοκρασίας
χρόνου
suntC=394; %y=ax+b το b suntC
suntAC=[suntA suntC];

pin2060corhs=zeros(length(t),6);
pin2060corhs(:,1)=t;
for j=1:length(t)
    pin2060corhs(j,2)=polyval(suntAC,t(1,j));

```

```

end

Tp=[387 390 392 394];
Z=[51.43*10^(-4) 22.56*10^(-4) 7.989*10^(-4) 1.206*10^(-4)];
zp=polyfit(Tp,Z,2); %παρεμβολή για σταθερά μεταβολής

pin2060corhs(:,3)=zp(1,1)*pin2060corhs(:,2).^2+zp(1,2)*pin2060corhs(:,2)+
zp(1,3);
pin2060corhs(:,4)=2.2;
pin2060corhs(:,5)=pin2060corhs(i,1).^(pin2060corhs(:,4)-1);
pin2060corhs(:,6)=58;

orisma=zeros(length(pin2060corhs(:,1)),1);
orisma(:,1)=pin2060corhs(:,3).*pin2060corhs(:,4).*pin2060corhs(:,5);
%όρισμα ολοκληρώματος

embadon=zeros(size(orisma(:,1))-1);%εμβαδόν ολοκληρώματος
embadon(1,1)=0;
coolrate(1,1)=pin2060corhs(2,1)-pin2060corhs(1,1);
for j=2:(size(orisma(:,1))-1)
    embadon(j,1)=(orisma(j,1)+orisma(j+1,1))*(pin2060corhs(j-1,2)-
pin2060corhs(j,2))/2+embadon(j-1,1);
    coolrate(1,j)=(pin2060corhs(j,1)-pin2060corhs(j-1,1));
end
embadon(length(orisma(:,1)),1)=sum(embadon(1:(length(orisma(:,1))-1),1));
%υπολογισμός κρυσταλλικότητας
krustallikothta2060sell=zeros(length(pin2060corhs(:,1)),1)
for i=1:length(pin2060corhs(:,1))
    krustallikothta2060sell(i,1)=pin2060corhs(i,6)*(1-exp(-embadon(i,1)))
end
end

figure
plot(pin2060corhs(1:(length(pin2060corhs(:,1))-
1),1),krustallikothta2060sell(1:(length(krustallikothta2060sell(:,1))-
1),1))
grid on
title('krustallikothta 2060 Sell vs t')
xlabel('t(s)')
ylabel('krustallikothta(%)')

```