ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

“Υπολογιστική διερεύνηση της αποδοτικότητας της χρήσης νανορευστών ως ψυκτικού μέσου στη λείανση”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπισμπίκος Ιάσων

Επιβλέπων: Μαρκόπουλος Άγγελος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2019

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία εκπονήθηκε από το εργαστήριο κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σκοπό έχει να διερευνήσει την επίδραση των νανορευστών ως ψυκτικά υγρά στην κατεργασία της λείανσης.

Για την ευκαιρία – δυνατότητα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Άγγελο Μαρκόπουλο, ο οποίος και μου εμπιστεύθηκε την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Επίσης η καθοδήγηση του υποψήφιου διδάκτορα Νίκου Κάρκαλου υπήρξε καθοριστική στην επιτυχή ολοκλήρωση της.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η κατεργασία της επιφανειακής λείανσης. Σκοπός ήταν η ανάλυση της επίδρασης που έχουν τα νανορευστά ως ψυκτικά υγρά στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην κατεργασία της λείανσης. Έμπνευση αποτέλεσε η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια για την χρήση και εμπορική εκμετάλλευση των νανορευστών ως ψυκτικά υγρά στις κατεργασίες.

Αρχικά, μετά από μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί η διάταξη τεμαχίου – ψυκτικού υγρού βασισμένο στο μοντέλο του Jaeger, με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου Comsol Multiphysics. Το βασικό πρόβλημα που εξετάστηκε ήταν η ανάλυση των θερμοκρασιών στο τεμάχιο, λόγω κινούμενης πηγής θερμότητας και την επίδραση των νανορευστών ως ψυκτικά υγρά.Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μοντελοποίησης, το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για προσομοίωση της κατεργασίας υπό διαφορετικές συνθήκες.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με σκοπό τη διερεύνηση και σύγκριση της επίδρασης απλού ψυκτικού υγρού με ψυκτικό υγρό με νανορευστά, σε τρία διαφορετικά μοντέλα. Αρχικά εξετάσθηκε το πιο απλό μοντέλο κινούμενης πηγής για τρία διαφορετικά βάθη κοπής, τόσο σε δισδιάστατο όσο και σε τρισδιάστατο μοντέλο.Επίσης, έγινε σύγκριση μεταξύ ομοιόμορφης και τριγωνικής πηγής θερμότητας. Στη συνέχεια, έγιναν διάφορες προσομοιώσεις στο μοντέλο με τις δύο περιοχές τεμαχίου – ψυκτικού υγρού για διάφορες τιμές του ύψους του στρώματος του ψυκτικού υγρού και διάφορες ταχύτητες εισόδου.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ένα διφασικό μοντέλο για την περιγραφή του ψυκτικού υγρού με νανορευστά και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματά του με αυτά των προηγούμενων μοντέλων. Το διφασικό μοντέλο φαίνεται να είναι πιο ρεαλιστικό από το μοντέλο των δύο περιοχών και ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε αρκετές αλλαγές παραμέτρων και παρουσιάζει εξαιρετικές προοπτικές για μελλοντική χρήση.

Abstract

In this diploma thesis the surface grinding process was modeled and simulated with the finite element method. The purpose of this simulation was to analyze the effect of nanofluids as coolants on the temperatures developed in the grinding process. This work was inspired from the research that has been carried out in recent years on applications and the commercial exploitation of nanofluids as coolants.

Initially, following a study of the relevant literature, it was chosen to model the Jaeger model workpiece - coolant using the Comsol Multiphysics computational package. The main problem examined was the analysis of the temperatures in the workpiece due to the moving heat source and the influence of nanofluids as coolants. After the modeling process was completed, the model was simulated for different conditions.

Simulations were conducted to investigate and compare nanofluids to water in three different models. Initially, the simplest model of moving source for three different cutting depths was examined, in two-dimensional and three-dimensional model. Also, a comparison was done between uniform and triangular heat sources. Various simulations were then made on the model with the two areas workpiece – coolant for different height of the coolant region of the coolant and various input speeds.

Finally, comparisons were made between the two phase model and the two-zone model for two speeds and two coolant regions. The two phase model appears to be more realistic than the model of the two regions and responds satisfactorily to several parameter changes but needs further investigation and improvement.

Περιεχόμενα

Δομή Εργασίας [Κεφάλαιο 1] ..... - 6 -
Κατεργασία Λείανσης [Κεφάλαιο 2] ..... - 6 -
Γενικά Στοιχεία [2.1] ..... - 6 -
Είδη Λείανσης [2.2] ..... - 7 -
Βασικά στοιχεία της κατεργασίας [2.3] ..... - 9 -
Συνθήκες Λείανσης [2.4] ..... - 10 -
Η θερμότητα κατά την λείανση [Κεφάλαιο 3] ..... - 10 -
Γενικά [3.1] ..... - 10 -
Υγρά Κοπής [3.1.1] ..... - 11 -
Μειονεκτήματα Χρήσης Υγρών Κοπής [3.1.2] ..... - 12 -
Είδη Υγρών Κοπής [3.1.3] ..... - 12 -
Βιομηχανικές Χρήσεις Υγρών Κοπής [3.1.4] ..... - 14 -
Νανορευστά Ως Υγρά Κοπής[3.2] ..... - 14 -
Γενικά [3.2.1] ..... - 14 -
Ορισμός Νανορευστών [3.2.2] ..... - 15 -
Πλεονεκτήματα [3.2.3] ..... - 16 -
Γενικές Εφαρμογές Νανορευστών [3.2.4] ..... - 17 -
Ιδιότητες [3.2.5] ..... - 19 -
Μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών [3.2.6] ..... - 27 -
Συναγωγή θερμότητας στα νανορευστά [3.2.7] ..... - 30 -
Μοντέλα Λείανσης [Κεφάλαιο 4] ..... - 33 -
Θερμικά Μοντέλα Λείανσης [4.1] ..... - 33 -
Μοντέλα λείανσης με υγρό κοπής [4.1.1] ..... - 35 -
Κινηματικά Μοντέλα Λείανσης [4.1.2] ..... - 36 -
Κινηματικο-εμπειρικά μοντέλα [4.1.3] ..... - 39 -
Προσομοίωση Διεργασιών Λείανσης Με Πεπερασμένα Στοιχεία [4.1.4] ..... - 39 -
Μοντέλα προσομοίωσης Euler – Lagrange [4.1.5] ..... - 40 -
Βασικά Στοιχεία για την Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία (FEA) [4.1.6] ..... - 41 -
Διάφορες Εφαρμογές Προσομοίωσης [4.1.7] ..... - 42 -
Υλοποίηση Υπολογιστικού Μοντέλου Λείανσης στο Comsol [Κεφάλαιο 5] ..... - 46 -
Το Πακέτο Λογισμικού Comsol Multiphysics [5.1] ..... - 47 -
Σχεδιασμός της Γεωμετρίας των Μοντέλων [5.2] ..... - 47 -

Σχεδιασμός του κατεργαζόμενου τεμαχίου και της επιφάνειας του ψυκτικού υγρού [5.2.1]- 48 -
Επιλογή υλικών[5.3] ..... - 51 -
Κινούμενη πηγή θερμότητας[5.4.2] ..... - 53 -
Μοντελοποίηση ψυκτικού υγρού στο απλό μοντέλο[5.4.3] ..... - 55 -
Αρχικές-Συνοριακές Συνθήκες και περιορισμοί μοντέλου δύο περιοχών[5.4.4] ..... - 56 -
Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης (meshing)[5.5] ..... - 58 -
Ρυθμίσεις επίλυσης[5.6] ..... - 59 -
Ρυθμίσεις για το χρονικό βήμα (Time stepping)[5.6.1] ..... - 60 -
Λοιπά χαρακτηριστικά σχετικά τη διαδικασία της επίλυσης[5.6.2] ..... - 60 -
Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων[Κεφάλαιο 6] ..... - 61 -
Απλό μοντέλο κινούμενης πηγής θερμότητας[6.1] ..... - 63 -
Βάθος κοπής 0.02 mm[6.1.1] ..... - 63 -
Βάθος κοπής 0.05 mm[6.1.2] ..... - 65 -
Βάθος κοπής 0.08 mm[6.1.3] ..... - 67 -
2D vs 3D [6.1.4] ..... - 70 -
Σύγκριση ομοιόμορφης – τριγωνικής πηγής [6.1.5] ..... - 73 -
Μοντέλο με δύο περιοχές τεμαχίου – ψυκτικού υγρού [6.2] ..... - 76 -
Ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h1 = 1mm [6.2.1] ..... - 77 -
Ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h2 = 0.5mm [6.2.2] ..... - 80 -
Ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h3 = 0.3mm [6.2.3] ..... - 84 -
Ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h4 = 0.2mm [6.2.4] ..... - 87 -
Ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h5 = 0.1mm [6.2.5] ..... - 90 -
Επαλήθευση μοντέλου [6.2.6] ..... - 96 -
Διφασικό μοντέλο [6.3] ..... - 99 -
Διφασικό μοντέλο με αλλαγή φάσης (Phase Change) [6.3.1] ..... - 102 -
Σύνοψη και μελλοντικές κατευθύνσεις [Κεφάλαιο 7] ..... - 104 -
Βιβλιογραφία ..... - 105 -

Δομή Εργασίας [Κεφάλαιο 1]

- **Κεφάλαιο 1: Δομή Εργασίας:** Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της εργασίας. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η κατεργασία της λείανσης (ως «κλασική κατεργασία»).
- **Κεφάλαιο 2: Η κατεργασία της λείανσης:** Παρουσιάζονται τα είδη λείανσης ανάλογα με τη δυναμική – γεωμετρία των τεμαχίων και τα βασικά στοιχεία που ορίζουν την κατεργασία (τεμάχιο, εργαλειομηχανή, δυναμική της κατεργασίας, λειαντικός τροχός, υγρό λείανσης, περιβάλλον λείανσης). Συνεχίζουμε με αναλυτική παρουσίαση των παραμέτρων της κατεργασίας (αποβολή υλικού, βάθος κοπής, ισοδύναμο πάχος αποβλήτου, ρυθμός αποβολής υλικού και επιφάνεια επαφής, ειδική ενέργεια, δυνάμεις και ισχύς κατεργασίας).
- **Κεφάλαιο 3: Η θερμότητα κατά τη λείανση:** Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στο ρόλο της θερμότητας στις κοπές, καθώς και η συνεισφορά των υγρών κοπής για την αντιμετώπισή της.Ακόμα, ορίζονται τα νανορευστά και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματά τους έναντι των συμβατικών υγρών κοπής.
- **Κεφάλαιο 4: Μοντέλα λείανσης:** Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στα θερμικά μοντέλα λείανσης, με τα οποία συσχετίζονται οι παράμετροι της κατεργασίας με τις παραγόμενες θερμοκρασίες, για την ανάλυση των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας στη λείανση.
- **Κεφάλαιο 5: Υπολογιστικά μοντέλα:** Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα υπολογιστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα Comsol. Περιγράφονται η κατασκευή της γεωμετρίας, η επιλογή των υλικών και οι επιλογές των φυσικών παραμέτρων. Επιπλέον περιγράφεται η κατασκευή του πλέγματος, καθώς και οι ρυθμίσεις που τέθηκαν για την επίλυση του προβλήματος.
- **Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα:** Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα μοντέλα που δημιουργήθηκαν.
- **Κεφάλαιο 7: Σύνοψη και μελλοντικές κατευθύνσεις:** Στην τελευταία ενότητα γίνεται μια ανακεφαλαίωση των κύριων ευρημάτων της εργασίας, καθώς και κάποιες προτάσεις για την εξέλιξη των μοντέλων.

Κατεργασία Λείανσης [Κεφάλαιο 2]

Γενικά Στοιχεία [2.1]

Η λείανση ως κατεργασία αποτελεί μια από τις «αρχαιότερες» (υφίσταται περισσότερα από 2000 χρόνια), και αποτελούσε μέθοδο κατασκευής εργαλείων, όπλων, αντικειμένων

καθημερινής χρήσης, αλλά χρησιμοποιήθηκε και για ανάγκες κατεργασίας υλικών μεγάλων δομικών κατασκευών – έργων. Φυσικά εξελίχθηκε και σήμερα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες κατεργασίες της βιομηχανίας με πληθώρα εφαρμογών σε όλα τα κατασκευαστικά πεδία. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι αρχές και τα μεγέθη που «ορίζουν» την κατεργασία.

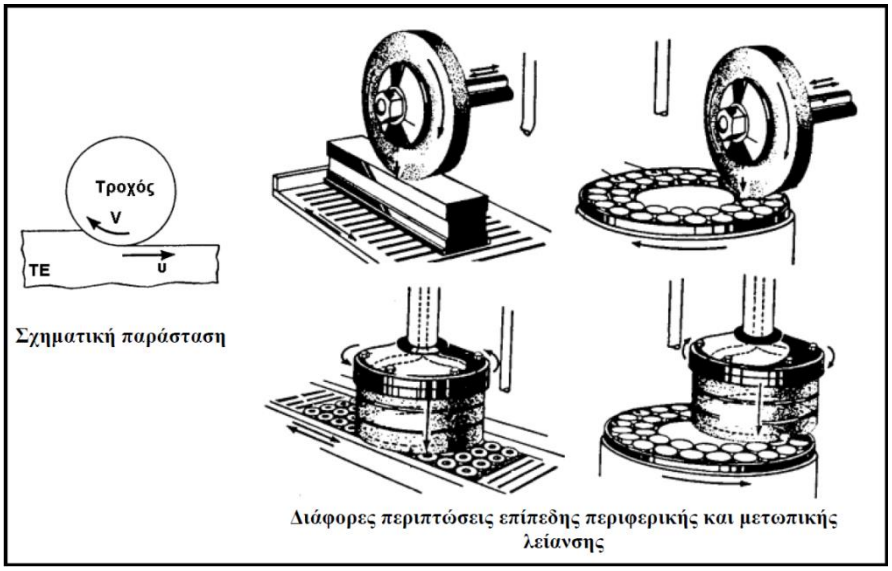
Η λείανση στη σύγχρονη κατασκευαστική βιομηχανία περιγράφει την μέθοδο κατά την οποία κατεργαζόμαστε ένα τεμάχιο με κοπτικό εργαλείο υψηλής ταχύτητας λειαντικό μέσο το οποίο μπορεί να είναι είτε τροχός (abrasive wheel), είτε κάποιο σπογγώδες υλικό (abrasive pad), είτε κάποιος ιμάντας (abrasive belt).Ο λειαντικός τροχός αποτελείται από πολλές κοπτικές ακμές, τους λειαντικούς κόκκους (abrasives, grits), οι οποίοι είναι άμορφοι χωρίς καθορισμένη γεωμετρία.Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ενεργούν ταυτόχρονα στην αποβολή υλικού μεγάλος αριθμός λειαντικών κόκκων.Άρα, η λείανση είναι κατεργασία κοπής πολλαπλής σημειακής επαφής [1] .Περιλαμβάνει διαδικασίες στίλβωσης, λείανσης, και «τελικής υπερ-λείανσης - φινιρίσματος» (“superfinishing”). Η λείανση καθιερώθηκε από τα μέσα του 20ου αιώνα ως κατεργασία δομική για προϊόντα υψηλής τεχνολογίας.

Η κατεργασία της λείανσης αποτελεί «λογική» και «φυσική» επιλογή για κατεργασία εξαιρετικά σκληρών υλικών. Αποτελεί ιδανική κατεργασία για βαμμένους χάλυβες, κράματα αεροναυπηγικής, οξείδια του αλουμινίου, καρβίδια του πυριτίου, και άλλα δυσκατέργαστα υλικά. Με την συγκεκριμένη κατεργασία μπορούμε να διαχειριστούμε εκτός από πολύ σκληρά υλικά, και εύθραυστα (π.χ. εξαιρετικής σκληρότητας κεραμικά υλικά). Ταυτόχρονα επιτυγχάνουμε υψηλή ακρίβεια, επιθυμητές ανοχές. Για τεμάχια όπως εξαρτήματα μηχανών, με ανάγκη απόλυτης ευθυγράμμισης – ευθύτητας και ανοχές στα όρια των «μικρομέτρων» η λείανση θεωρείται ιδανική κατεργασία. Η τραχύτητα και η ποιότητα επιφανείας αποτελούν θεμελιώδεις παράγοντες σωστής λειτουργίας των εξαρτημάτων. Με σωστή επιλογή παραμέτρων λείανσης (λειαντικού μέσου, εργαλειομηχανής, ρυθμού αποβολής υλικού), μπορούμε να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Τέλος, ένα πλεονέκτημα έναντι εναλλακτικών κατεργασιών είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος της κατεργασίας.

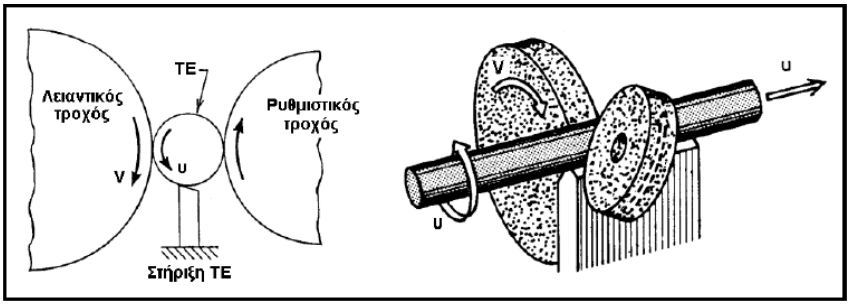
Είδη Λείανσης [2.2]

Με βάση τη γεωμετρία της κατεργασίας διακρίνεται σε:

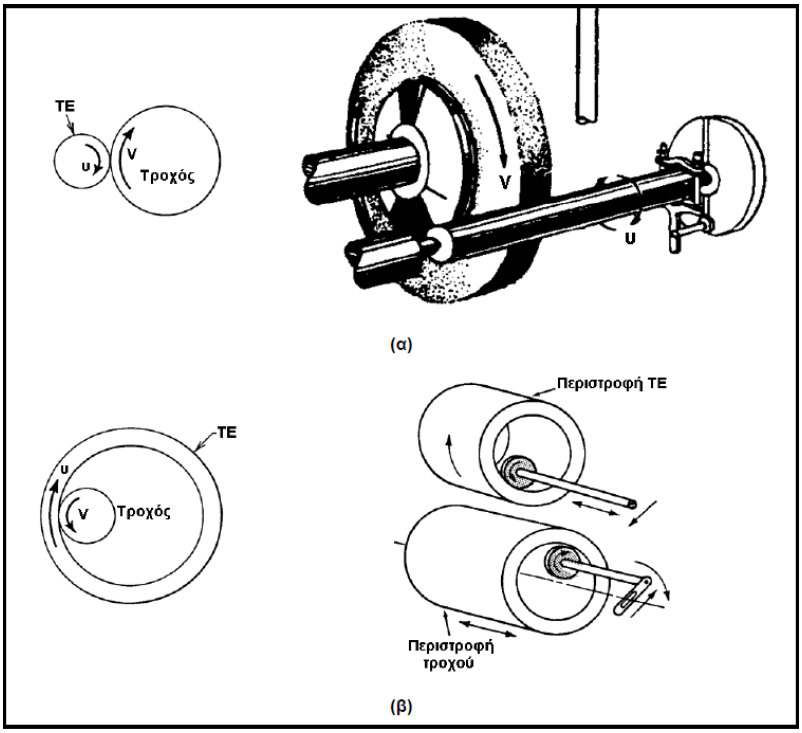
- **Επίπεδη λείανση:** Πρόκειται για λείανση επίπεδων επιφανειών και διακρίνεται σε περιφερική και μετωπική λείανση, ανάλογα με τη διάταξη του κοπτικού τμήματος του τροχού ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια [Σχήμα 1.1].
- **Άκεντρη λείανση:** Το τεμάχιο λειαίνεται ελεύθερο μεταξύ δύο τροχών [Σχήμα 1.2].
- **Κυλινδρική λείανση:** Κατεργασία κυλινδρικών επιφανειών και διακρίνεται σε εξωτερική και εσωτερική κυλινδρική λείανση [Σχήμα 1.3].
- **Λείανση μορφής:** Ο λειαντικός τροχός έχει ειδικά διαμορφωμένο περίγραμμα το οποίο αποδίδει στο τεμάχιο κατά την κατεργασία [Σχήμα 1.4]
- **Αποκοπή με λειαντικό τροχό:** Ο λειαντικός τροχός έχει πολύ μικρό πάχος (3 mm) και ικανή ελαστικότητα και εκτελεί κατεργασία αποκοπής στο τεμάχιο (σωλήνας, άξονας κλπ.) [Σχήμα 1.5]



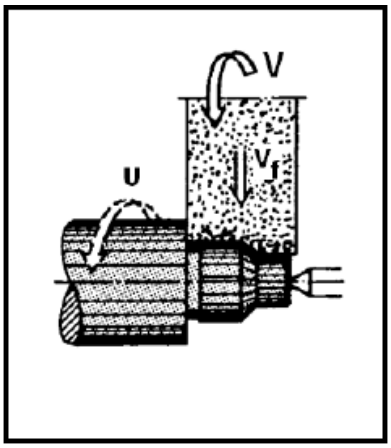
Επίπεδη Λείανση [Σχήμα 1.1] [1]



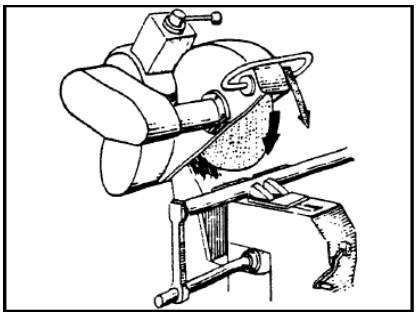
Άκεντρη Λείανση [Σχήμα 1.2] [1]



Κυλινδρική Λείανση [Σχήμα 1.3] [1]



Λείανση Μορφής [Σχήμα 1.4] [1]



Αποκοπή Με Λειαντικό Τροχό [Σχήμα 1.5] [1]

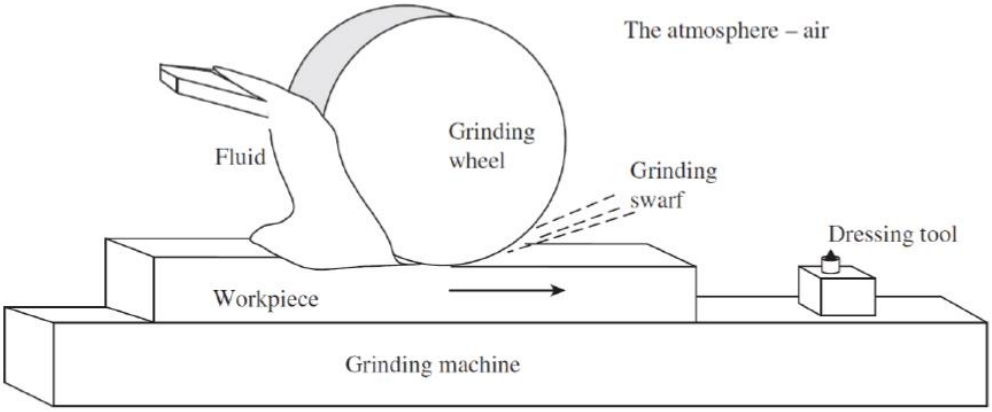
Βασικά στοιχεία της κατεργασίας [2.3]

Τα στοιχεία αυτά είναι βασικά και απαραίτητα για την κατεργασία, ενώ ο υπολογισμός τους είναι απαραίτητος για τη σωστή λειτουργία και «συνεργασία» αυτών, ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Τα στοιχεία αυτά είναι η εργαλειομηχανή, ο λειαντικός τροχός (ή γενικότερα το λειαντικό μέσο), το τεμάχιο, το υγρό λείανσης (αν υπάρχει), το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία και τα παραχθέντα ρινίσματα (απόβλητα) λείανσης [σχήμα 1.6]. Οι λεπτομέρειες που «ορίζουν» το σύστημά μας είναι:

- **Τεμάχιο:** υλικό, σχήμα, σκληρότητα, στιβαρότητα, θερμικές και χημικές ιδιότητες.
- **Εργαλειομηχανή:** τύπος, σύστημα ελέγχου, ακρίβεια, στιβαρότητα, θερμοκρασιακή και μηχανική σταθερότητα.
- **Δυναμική της κατεργασίας:** η γεωμετρία και η κινηματική τεμαχίου – λειαντικού τροχού, καθώς και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση (παράμετροι όπως ταχύτητες, ρυθμοί πρόωσης τροχού και τεμαχίου).
- **Λειαντικός τροχός:** είδος λειαντικού μέσου, μέγεθος κόκκων, δεσμοί, δομή, σκληρότητα, ταχύτητα, στιβαρότητα, χημικές και θερμικές ιδιότητες.
- **Υγρό λείανσης:** παροχή, ταχύτητα, πίεση, φυσικές χημικές και θερμικές ιδιότητες.
- **Περιβάλλον λείανσης:** θερμοκρασία και ποσοστό υγρασίας.

Τα στοιχεία που συμμετέχουν στην κατεργασία δημιουργούν ένα πολύπλοκο σύστημα. Η επιφάνεια του υλικού του τεμαχίου θερμαίνεται, και της επιβάλλεται «βίαιη αλληλεπίδραση» με το λειαντικό μέσο, το λειαντικό υγρό και την ατμόσφαιρα. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι άμεσα συνδεδεμένο και εξαρτώμενο από το είδος του υλικού, και των χημικών διεργασιών που εξελίσσονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας με δεδομένες τις υψηλές ταχύτητες και θερμοκρασίες. Είναι σημαντικό λοιπόν

να προσδιορίζεται η χημική και μηχανική συμπεριφορά του τεμαχίου, λαμβάνοντας υπ όψη το σύνολο των προαναφερθέντων παραγόντων.



Βασικά Στοιχεία Κατεργασίας Λείανσης [Σχήμα 1.6]

Συνθήκες Λείανσης [2.4]

- Ταχύτητα κοπής ή περιφερική ταχύτητα τροχού, V
  Ισχύει: $V = \pi\ D\ n$ (m/s)
  Όπου: D η διάμετρους του τροχού, n η ταχύτητα περιστροφής (στροφές) του τροχού
- Ταχύτητα κατεργαζόμενου τεμαχίου, u
  Στην κυλινδρική λείανση είναι η περιφεριακή γραμμική ταχύτητα, ενώ στην επίπεδη λείανση αντιστοιχεί στην ταχύτητα της παλινδρομικής κίνησης της τράπεζας.Είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα κοπής (u<<V)
- Πλευρική πρόωση του τροχού ανά στροφή τεμαχίου
- Βάθος λείανσης (a)

Η θερμότητα κατά την λείανση [Κεφάλαιο 3]

Γενικά [3.1]

Η παραγόμενη θερμότητα κατά την κοπή είναι μία από τις κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά την σωστή διεξαγωγή της κοπής. Για παράδειγμα, η θερμότητα επηρεάζει τις δυνάμεις κοπής, αυξάνει την ταχύτητα φθοράς του κοπτικού εργαλείου και μειώνει τη διάρκεια ζωής του, προκαλεί θερμική καταπόνηση στο κατεργαζόμενο τεμάχιο,

έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις κοκ.Πιο συγκεκριμένα, στην κατεργασία της λείανσης, οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε επιφανειακό κάψιμο (Burn) και δημιουργία ρωγμών, καταστροφή της μεταλλικής δομής στο υπόστρωμα της επιφάνειας, μείωση της επιφανειακής σκληρότητας καθώς και παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια του τεμαχίου. Στις κατεργασίες κοπής συνυπάρχουν και οι τρεις μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας (με επαφή, αγωγή και ακτινοβολία).Για παράδειγμα η μεταφορά θερμότητας μέσα στο απόβλιττο, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο και τον συγκρατητή του λαμβάνει χώρα με επαφή, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ψυκτικού υγρού/αέρα και αποβλίττου/κοπτικού εργαλείου/τεμαχίου γίνεται με συναγωγή, ενώ η ακτινοβολία είναι περιορισμένη στις συμβατικές κατεργασίες κοπής[4].

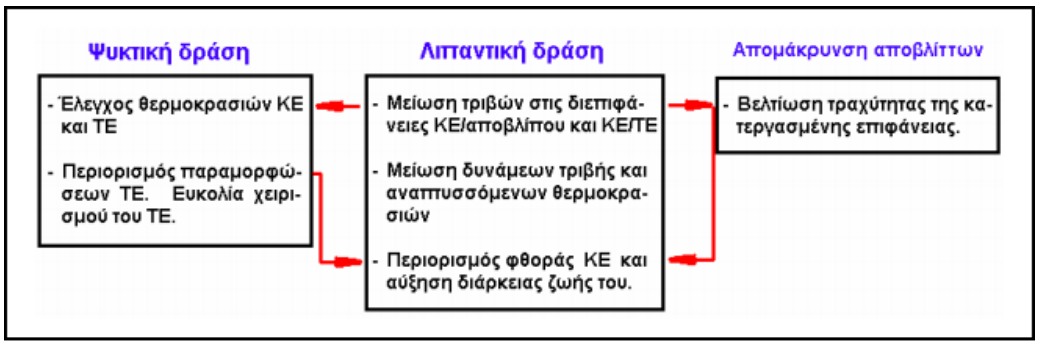
Υγρά Κοπής [3.1.1]

Ένας από τους τρόπους αντιμετώπισης της υψηλής θερμοκρασίας στις κατεργασίες κοπής είναι η χρήση ψυκτικών υγρών.Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης της τριβής και της απορρόφησης θερμότητας από αυτά [4].

Οι κύριες δράσεις των υγρών κοπής είναι:

- Ψυκτική δράση
- Λιπαντική δράση
- Απομάκρυνση των αποβλίττων

Η ψυκτική δράση έχει ως αποτέλεσμα τον έλεγχο των θερμοκρασίων του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου, καθώς και περιορισμό των παραμορφώσεων του τεμαχίου που προσδίδει ευκολία στο χειρισμό του.Πολύ σημαντική είναι και η λιπαντική δράση τους, αφού μειώνουν τις τριβές στις διεπιφάνειες κοπτικού εργαλείου/αποβλίττου και κοπτικού εργαλείου/τεμαχίου, το οποίο συνδέεται και με την ψυκτική του ικανότητα.Ένα ακόμα πλεονέκτημα των υγρών κοπής είναι ότι περιορίζεται η φθορά του κοπτικού εργαλείου και αυξάνεται η διάρκεια ζωής του το οποίο προσδίδει μεγάλο οικονομικό όφελος.Τέλος, με την απομάκρυνση των αποβλίττων βελτιώνεται σημαντικά η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας [Σχήμα 2.1].



Δράσεις Υγρών Κοπής [Σχήμα 2.1] [4]

Μειονεκτήματα Χρήσης Υγρών Κοπής [3.1.2]

Παρά τα σημαντικά οφέλη που προσφέρει η χρήση των υγρών κοπής, υπάρχουν και ανεπιθύμητες παρενέργειες:

• Φυσιολογικές παρενέργειες στον άνθρωπο (τοξικοί ατμοί, δυσάρεστες οσμές, καπνοί, δερματίτιδες).

• Οξείδωση ή διάβρωση του υλικού του τεμαχίου ή των διαφόρων μερών της εργαλειομηχανής που έρχονται σε επαφή με τα υγρά κοπής.

• Επιβάρυνση του φυσικού περιβάλλοντος μετά την χρήση και απομάκρυνσή τους.

Είδη Υγρών Κοπής [3.1.3]

Τα υγρά κοπής διακρίνονται σε δύο μεγάλες ομάδες:

• Τα έλαια κοπής, που εμφανίζουν αυξημένη λιπαντική δράση.

• Τα υδατικά υγρά κοπής, που εμφανίζουν αυξημένη ψυκτική δράση.

Α. Χημικώς μη ενεργά έλαια κοπής

Λιπαρά έλαια (χοιρινό λίπος, βαμβακέλαιο, κραμβέλαιο κλπ.)

• Οξειδώνονται εύκολα.

• Σχηματίζουν διαβρωτικά οξέα.

• Είναι σχετικά ακριβά.

• Υπερέχουν των ορυκτελαίων.

Ορυκτέλαια

• Συνήθως είναι λεπτόρρευστα.

• Κατάλληλα για ελαφρές κατεργασίες.

Μίγματα ορυκτελαίων και λιπαρών ελαίων

• Η περιεκτικότητα του λιπαρού ελαίου στο μίγμα κυμαίνεται μεταξύ 10-30%.

Β. Χημικώς ενεργά έλαια κοπής

• Πρόκειται για ορυκτέλαια με ειδικά πρόσθετα υψηλής πίεσης που περιέχουν κυρίως S ή Cl ή P.

• Τα πρόσθετα στοιχεία σχηματίζουν με τις τριβόμενες επιφάνειες θειούχες, χλωριούχες ή φωσφορούχες χημικές ενώσεις, αντίστοιχα.

• Ανάλογα με το είδος του πρόσθετου στοιχείου, τα χημικώς ενεργά έλαια κοπής διακρίνονται σε: θειωμένα, χλωριωμένα, θειοχλωριωμένα κλπ.

• Τα χλωριωμένα έλαια κοπής περιέχουν πρόσθετα Cl και είναι κατάλληλα για κατεργασίες μαλακών μετάλλων ή σε ελαφρές κατεργασίες κοπής.

• Τα θειωμένα έλαια μεγάλης λιπαρότητας περιέχουν πρόσθετα S και έχουν πολύ καλές αντισυγκολλητικές (αποφυγή σχηματισμού ψευδοακμής) και λιπαντικές (μείωση τριβής/φθοράς) ικανότητες.

• Τα θειοχλωριωμένα έλαια είναι πιο δραστικά.

• Τα φωσφορο-θειωμένα έλαια είναι κατάλληλα για μεγάλη γκάμα εφαρμογών.

Γ. Γαλακτώματα

• Προκύπτουν με προσθήκη διαλυτού ελαίου σε νερό υπό ορισμένη αναλογία.

• Το διαλυτό έλαιο αποτελείται από ορυκτέλαιο, κατάλληλο παράγοντα γαλακτωματοποίησης και αντισκωριωτική ουσία.

• Ο ρόλος του γαλακτωματοποιητή είναι η διασπορά του ελαίου μέσα στο νερό με τη μορφή πολύ μικρών σταγονιδίων, διαμέτρου 10-9–10-6 cm. Σχηματίζεται έτσι κολλοειδές διάλυμα, διαφανές ή θολό (σαπουνέλαιο).

• Η παρασκευή ενός γαλακτώματος γίνεται με αργή προσθήκη ελαίου στο νερό (ποτέ το αντίστροφο) και συνεχή ανάδευση για την ομογενοποίηση του διαλύματος.

• Η αναλογία νερού/ελαίου στο γαλάκτωμα του γαλακτώματος εξαρτάται από το υλικό ΤΕ και το είδος της κατεργασίας, π.χ. σε γενικές κατεργασίες η αναλογία κυμαίνεται μεταξύ 10:1 – 30:1, ενώ σε κατεργασίες λείανσης μεταξύ 60:1 – 80:1.

Δ. Υδατικά διαλύματα

• Είναι διαλύματα ανόργανων αλάτων σε νερό, π.χ. διάλυμα 1% Na2CO3,διάλυμα βόρακα ή Na3PO4, διάλυμα NaNO2 και τριαιθυλοαμίνης κλπ.

• Είναι εξαιρετικά ψυκτικά μέσα και προφυλάσσουν τεμάχιο και εργαλειομηχανή από οξείδωση.

• Βελτίωσή τους αποτελούν τα χημικά ψυκτικά υγρά κοπής, που προκύπτουν με προσθήκη και άλλων χημικών ουσιών (πολυγλυκόλες, βορικά άλατα κλπ.) και εμφανίζουν ταυτόχρονα και κάποια λιπαντική ικανότητα.

Βιομηχανικές Χρήσεις Υγρών Κοπής [3.1.4]

Η επιλογή του υγρού κοπής γίνεται με βάση:

1. Το είδος της κατεργασίας σε συνδυασμό με ορισμένα χαρακτηριστικά της (συνθήκες κατεργασίας, συνεχής ή διακοπτόμενη λειτουργία εργαλειομηχανής, ρυθμός αφαίρεσης υλικού κλπ.) και τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.
2. Αν η κοπή είναι κατεργασία εκχόνδρισης ή αποπεράτωσης.
3. Το υλικό τεμαχίου.
4. Το υλικό κοπτικού εργαλείου.

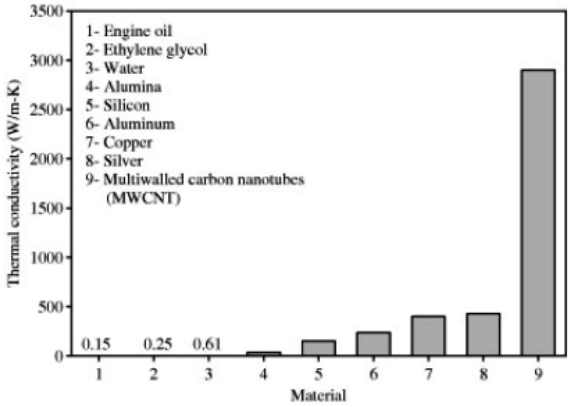
Σε γενικές γραμμές: Τα έλαια κοπής ασκούν λιπαντική δράση σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες κοπής (<30m/min).Τα απλά έλαια χρησιμοποιούνται σε ελαφρές κατεργασίες, ενώ τα έλαια με πρόσθετα υψηλής πίεσης εφαρμόζονται σε βαριές κατεργασίες.Τέλος, σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής ενδείκνυται η χρήση υδατικών υγρών κοπής (προτιμάται η ψυκτική δράση).

Νανορευστά Ως Υγρά Κοπής[3.2]

Γενικά [3.2.1]

Οι συμβατικές μέθοδοι βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς βασίζονται στην αύξηση των επιφανειών μεταφοράς θερμότητας για τη συναλλαγή θερμότητας με τη χρήση κάποιου ρευστού. Αυτή η τεχνική ωστόσο απαιτεί μια μη επιθυμητή αύξηση στο μέγεθος του συστήματος της θερμικής διαχείρισης. Επιπλέον, οι σχετικά φτωχές θερμοφυσικές ιδιότητες συμβατικών ρευστών μεταφοράς θερμότητας όπως το νερό, η αιθυλενογλυκόλη (ethylene glycol- EG) ή το λάδι περιορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ψυκτική τους απόδοση. Συνεπώς προκύπτει η ανάγκη για την ανάπτυξη προηγμένων και πρωτοποριακών τεχνικών και υλικών μεταφοράς θερμότητας τα οποία θα καλύπτουν τις σύγχρονες και μελλοντικές ανάγκες χωρίς να έχουν άλλου είδους ανεπιθύμητες παρενέργειες.
Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών πολλοί επιστήμονες εργάστηκαν στην κατεύθυνση αυτή, στην προσπάθεια τους να αναπτύξουν ρευστά που να παρέχουν καλύτερη ψυκτική ή θερμαντική συμπεριφορά συγκρινόμενα με τα συμβατικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας. Μια από τις προτεινόμενες μεθόδους ήταν η *διείσδυση αιωρούμενων μεταλλικών ή μη μεταλλικών στερεών σωματιδίων* σε υγρό με σκοπό την αύξηση της θερμικής του αγωγιμότητας, την οποία είχε πρωτοεισάγει σε διατριβή του ο *Maxwell* περισσότερο από έναν αιώνα πριν (1873). Η ιδέα αυτή βασίζεται στην γνωστή ιδιότητα των στερεών και ιδιαίτερα

των μετάλλων να κατέχουν πολλή μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (W/mK) από τα ρευστά (υγρά, αέρια). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού σε θερμοκρασία δωματίου είναι περίπου 700 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του νερού και περίπου 3000 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του λαδιού.



Σύγκριση θερμικής αγωγιμότητας υλικών [Σχήμα 3.1] [5]

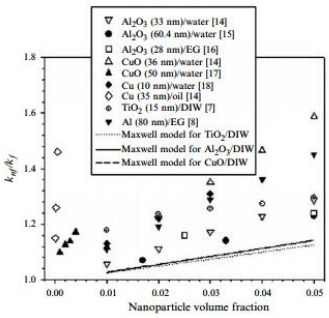
Ωστόσο το κύριο πρόβλημα των προσπαθειών που ακολούθησαν εστιαζόταν στο μέγεθος των σωματιδίων που χρησιμοποιούνταν από τους ερευνητές. Όλες οι μελέτες γύρω από την θερμική αγωγιμότητα των αιωρημάτων περιορίζονταν στη χρήση σωματιδίων τάξεως μεγέθους χιλιοστόμετρου ή μικρομέτρου τα οποία παρουσίαζαν μικρή έως καθόλου σταθερότητα, γρήγορη ιζηματοποίηση, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα κατακάθονταν στο υγρό ενώ ήταν μεγάλα για τη χρήση τους σε μικροσυστήματα. Παράλληλα συχνά έφραζαν τα ροϊκά κανάλια και αυξανόταν η πτώση πίεσης στο ρευστό. Αν το ρευστό κυκλοφορούσε ταχύτερα για να εμποδιστεί η κατακάθιση των σωματιδίων τα μικροσωματίδια συχνά κατέστρεφαν τα τοιχώματα των συσκευών μεταφοράς θερμότητας (αγωγούς, κανάλια) και τα αχρήστευαν.
Τα παραπάνω προβλήματα με τη χρήση των μικροσωματιδίων οδήγησε τους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι θα έπρεπε να μελετηθεί η χρήση ακόμα μικρότερης τάξεως μεγέθους σωματιδίων, των **νανοσωματιδίων** ($nm = 10^{-9}\ m$) . Πρώτος ο Choi (1995) από το Εθνικό Εργαστήριο της Argonne των Η.Π.Α. (Argonne National Laboratory), πρότεινε και πέτυχε τη διασπορά νανοσωματιδίων σε κοινά βιομηχανικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας και εισήγαγε τον όρο «**νανορευστό»**.
Η τεχνολογία των νανορευστών αποτελεί ένα νέο διεπιστημονικό πεδίο, όπου συναντιούνται η νανοεπιστήμη, η νανοτεχνολογία και η θερμική μηχανική, και αναμένεται να γνωρίσει σπουδαία εξέλιξη στα επόμενα χρόνια. Στην έρευνα πάνω στα νανορευστά εκτός από πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους και μικρές επιχειρήσεις ή πολυεθνικές εταιρίες που αποβλέπουν σε κέρδη από την χρήση τους σε μελλοντικές εφαρμογές (κυρίως για τη χρησιμοποίησή τους σαν υψηλής απόδοσης ψυκτικά μέσα).

Ορισμός Νανορευστών [3.2.2]

Ο όρος **νανορευστά** ορίζει μία νέα κατηγορία ρευστών μεταφοράς

θερμότητας τα οποία παρουσιάζουν κατά πολύ βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες, ιδιαίτερα αναφορικά με τη θερμική τους αγωγιμότητα και δημιουργούνται με τη διασπορά και την αιώρηση σωματιδίων μεγέθους μικρότερου των 100nm**.** Στις περισσότερες εφαρμογές ωστόσο το μέγεθος των εν λόγω σωματιδίων δεν ξεπερνάει τα 50nm [9].

Παρά τις αντιπαραθέσεις και τα διάσπαρτα πειραματικά δεδομένα στα θερμικά χαρακτηριστικά των νανορευστών, είναι αδιαμφισβήτητο ότι τα νανορευστά προσφέρουν αυξημένη θερμική αγωγιμότητα και συναγωγή τα οποία αυξάνουν όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των νανοσωματιδίων και δείχνουν ξεκάθαρα ότι τα νανορευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά σαν προηγμένα ψυκτικά υγρά.



Θερμική αγωγιμότητα νανορευστών σε σχέση με το μέγεθος των νανοσωματιδίων [6]

Πλεονεκτήματα [3.2.3]

Η επίδραση που αναμένεται να έχει η χρήση των νανορευστών σε κατεργασίες και εφαρμογές μεταφοράς θερμικής ενέργειας είναι τεράστια δεδομένου ότι οι διαφόρων ειδών εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία και η απόδοση τους είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία της. Μερικά από τα πλεονεκτήματα
της χρήσης των νανορευστών αναλύονται παρακάτω.

1) Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας και της σταθερότητας: Λόγω ότι η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του αντικειμένου είναι επιθυμητή η χρήση αντικειμένων όσο το δυνατόν μεγαλύτερης επιφάνειας. Τα νανοσωματίδια παρέχουν μεγαλύτερους λόγους επιφάνειας/ όγκου συγκριτικά με τα μικροσωματίδια και τα σωματίδια μεγέθους χιλιοστόμετρου με αποτέλεσμα να αυξάνει η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας και η σταθερότητα των αιωρημάτων. Για παράδειγμα ένα σωματίδιο διαμέτρου 10nm παρουσιάζει 1000 φορές μεγαλύτερο λόγο επιφάνειας/ όγκου από ένα αντίστοιχο διαμέτρου 10μm. Παράλληλα σωματίδια μεγέθους μικρότερου από 20nm φέρουν το 20% των ατόμων τους στην επιφάνεια τους με αποτέλεσμα να τα κάνουν άμεσα διαθέσιμα για θερμική αλληλεπίδραση. Λόγω του τόσο μικρού μεγέθους τους τα νανοσωματίδια έχουν την ικανότητα να κυκλοφορούν ομαλά σε κανάλια και αγωγούς διαμέτρου μικρομέτρου ενώ το μέγεθος τους εμποδίζει την κατακάθισή τους κάνοντας ταυτόχρονα τα αιωρήματα περισσότερο σταθερά.

2) Ελαχιστοποίηση φραξίματος καναλιών/ αγωγών: Τα νανορευστά δεν αποτελούν μόνο προτιμότερο μέσο για μεταφοράς θερμότητας γενικά, αλλά

παρουσιάζονται ιδανικά και για εφαρμογές μικροκαναλιών όπου παρουσιάζονται υψηλά θερμικά φορτία. Ο συνδυασμός μικροκαναλιών με τη κυκλοφορία σε αυτά νανορευστών, παρέχει μεγάλες επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας και αυξημένες τιμές θερμικής αγωγιμότητας του ρέοντος ρευστού. Κάτι τέτοιο ήταν μέχρι πρότινος αδύνατο αφού συχνά τα κανάλια αυτά έφραζαν από σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους (π.χ. μικροσωματίδια).
3) Ανάπτυξη των μικροσκοπικών συστημάτων: Η τεχνολογία νανορευστών συνεισφέρει στην προώθηση της σύγχρονης βιομηχανικής τάσης για τη "μικροσκοπικοποίηση" (miniaturization) των συστημάτων και εξοπλισμών, παρέχοντας τη δυνατότητα σχεδιασμού και χρήσης μικρότερων και ελαφρύτερων συστημάτων μεταφοράς ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται στις βιομηχανίες χώρος και μείωση κόστους.
4) Μείωση της αντλητικής ισχύος: Η αύξηση της μεταφοράς θερμότητας σε εναλλάκτες με χρήση συμβατικών ρευστών είναι δυνατή με την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού. Ωστόσο μια τέτοια αύξηση ταχύτητας απαιτεί περισσότερη αντλητική ισχύ που αντίστοιχα σημαίνει μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας. Η ροή νανορευστού με καθορισμένη ταχύτητα στον ίδιο σύστημα μεταφοράς θερμότητας βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας λόγω αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας χωρίς να απαιτείται σημαντική διαφοροποίηση της αντλητικής ισχύος. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει πάντως να συνυπολογίζεται η αύξηση στο ιξώδες που επέρχεται από την διασπορά των νανοσωματιδίων στο κυρίως ρευστό και αυξάνει τις απώλειες πίεσης άρα απαιτεί και περισσότερη αντλητική ισχύ για να τις υπερκαλύψει. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι για δεδομένο *θερμικό καθήκον (heat duty)* η απαιτούμενη ογκομετρική παροχή νανορευστού είναι μέχρι και 4 φορές μικρότερη σε σύγκριση με του νερού, με αποτέλεσμα και η αντίστοιχη πτώση πίεσης να είναι μέχρι και 6 φορές χαμηλότερη. Άρα παρόλο που το νανορευστό έχει μεγαλύτερο ιξώδες και προκαλεί μεγαλύτερη πτώση πίεσης για δεδομένη ογκομετρική παροχή, όταν η σύγκριση γίνεται βάσει του θερμικού καθήκοντος του εναλλάκτη, αποδεικνύεται ότι η πτώση πίεσης του νανορευστού και συνεπώς η αντλητική ισχύς είναι σημαντικά χαμηλότερη εξαιτίας της μικρότερης παροχής του.

Γενικές Εφαρμογές Νανορευστών [3.2.4]

Με βάση τα παραπάνω πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα νανορευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πολλών θερμικών συστημάτων και κατεργασιών κοπής. Οι κυριότερες από
αυτές είναι:

- **Μεταφορές:** Η βιομηχανία των μεταφορών μπορεί να ωφεληθεί σημαντικά από τα νέα ρευστά μεταφοράς θερμότητας. Τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται όπως τα ψυκτικά μηχανής, τα λάδια μηχανής, τα αυτόματης μετάδοσης ρευστά και άλλα συνθετικά υψηλής θερμοκρασίας ρευστά παρέχουν μικρή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με τις δυνατότητες των νανορευστών. Η χρήση των νανορευστών θα έδινε τη δυνατότητα για μικρότερες, ελαφρύτερες μηχανές, αντλίες, ψυγεία αυτοκινήτων κτλ. [14]. Η μείωση αυτή του όγκου των οχημάτων θα επέτρεπε την κατασκευή ελαφρύτερων οχημάτων με βελτιωμένη σχέση διανυόμενης απόστασης ανά λίτρο καυσίμου. Αντίστοιχα τα νανορευστά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση της θερμότητας από μεγαλύτερης ισχύος μηχανές χωρίς να απαιτείται αύξηση του μεγέθους του συστήματος ψύξης. Η κυκλοφορία λιγότερο ενεργοβόρων οχημάτων θα οδηγούσε στην εξοικονόμηση

χρημάτων και μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.
Ένας πολύ υποσχόμενο ψυκτικό μέσο για τις μηχανές αποτελεί η αιθυλενογλυκόλη (Ethylene Glykol- EG) με αιωρούμενα νανοσωματίδια. Το συγκεκριμένο μέσο έχει σαν πλεονέκτημα την χαμηλή πίεση λειτουργίας του η οποία μειώνει το συνολικό κόστος του ψυκτικού συστήματος. Παράλληλα έχει και υψηλότερο σημείο βρασμού που δίνει τη δυνατότητα στο ψυκτικό σύστημα να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες, άρα και στο ψυκτικό μέσο να αποβάλει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας. Μεγαλύτερη απόρριψη θερμότητας επιτρέπει μια ποικιλία βελτιώσεων στο σχεδιασμό των μηχανών, που περιλαμβάνουν και μηχανές μεγαλύτερης ιπποδύναμης.
Τέλος η έρευνα για τα νανορευστά στρέφεται και στην ψύξη αυτομάτων κιβώτιων ταχύτητας όπου για μεγάλες στροφές λειτουργίας αναπτύσσονται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Πειράματα με αιωρήματα σωματιδίων οξειδίου του αλουμινίου Al_2O_3 και οξειδίου του χαλκού CuO διεσπαρμένα σε μηχανέλαιο έδειξαν σαφή βελτίωση στην ψύξη των κιβωτίων σε σχέση με τα συμβατικά μέσα.
Όπως σε όλες τις περιπτώσεις όμως έτσι και σε αυτήν των μεταφορών και την αυτοκινητοβιομηχανίας πριν την πλήρη εφαρμογή των νανορευστών θα πρέπει να λυθούν πιθανά προβλήματα που αφορούν στην κατακάθιση ή συσσωμάτωση των σωματιδίων και τη διάβρωση της επιφάνειας των αγωγών.

- **Μικρομηχανικά συστήματα:** Η μικροσκοπικοποίηση είναι μια τάση που τα τελευταία χρόνια κερδίζει συνεχώς έδαφος στην επιστήμη και την τεχνολογία. Τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας κατά τη λειτουργία τους, με τα συμβατικά ψυκτικά μέσα να μην μπορούν να ανταποκριθούν σε τέτοιες αυξημένες απαιτήσεις για ψύξη. Μελλοντικοί μικροεπεξεργαστές για υπολογιστές πολύ υψηλών επιδόσεων έχουν σχεδιαστεί οι οποίοι θα παράγουν ισχύ της τάξης των 100-300 W/cm². Παράλληλα λόγω του μικροσκοπικού μεγέθους τους, στα συγκεκριμένα συστήματα δεν είναι δυνατή χρήση ρευστών «ενισχυμένων» με σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους, αφού φράζουν τα κανάλια ψύξης και καθιστούν τη ροή του ρευστού αδύνατη. Αντίθετα το μέγεθος των νανοσωματιδίων τους επιτρέπει την ανεμπόδιστη διέλευση από τα κανάλια ψύξης των MEMS με αποτέλεσμα τα νανορευστά να αποτελούν την ιδανική επιλογή ψυκτικού μέσου για τέτοια μικροσυστήματα κάτω από ιδιαίτερες συνθήκες ροής θερμότητας. Πειράματα που έχουν διεξαχθεί για τη χρήση νανορευστών σε μικροσκοπικούς αγωγούς για την ψύξη μονάδων CPU, φορητών ή σταθερών υπολογιστών έχουν δείξει σημαντική πτώση της θερμικής αντίστασης των αγωγών σε σχέση με τη χρήση απιονισμένου νερού στην ίδια περίπτωση.
- **Συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού:** Τα νανορευστά θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας των σύγχρονων βιομηχανικών συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού, κλιματισμού και ψύξης. Μελετούνται διάφορες πρωτοποριακές μέθοδοι όπως η άντληση ψυκτικού μέσου από ένα σημείο που εδράζεται το ψυκτικό στοιχείο σε άλλο. Η τεχνολογία νανορευστών θα μπορούσε να κάνει τη συγκεκριμένη διεργασία ενεργειακά περισσότερο αποδοτική και περισσότερο οικονομική. Από πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει για θέρμανση κτηρίων με χρήση νανορευστών σε πολύ ψυχρές περιοχές της γης [D.P.Kulkarni, D.K.Das, R.S.Vaijjha] έχει διαπιστωθεί ότι η εφαρμογή τους μπορεί να επιφέρει έως και 38% μείωση της απαιτούμενης ενέργειας.
- **Ιατρική:** Μαγνητικά νανοσωματίδια διασκορπισμένα σε υγρά του σώματος (βιορευστά) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν οχήματα μεταφοράς για φάρμακα ή ακτινοβολία προσφέροντας νέες τεχνικές ίασης π.χ. για τον καρκίνο. Λόγω των ιδιοτήτων της επιφάνειας τους τα νανοσωματίδια είναι ιδιαίτερα κολλητικά σε καρκινικά κύτταρα σε σχέση με τα υγιή με αποτέλεσμα μαγνητικά νανοσωματίδια διεγερμένα από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) να προσφέρουν νέες τεχνικές κατά του

καρκίνου.

- **Άλλες εφαρμογές:** Η χρήση των νανορευστών μελετάται σε πληθώρα άλλων εφαρμογών εκτός από τις προαναφερθείσες. Η εφαρμογή των νανορευστών εξετάζεται στην παρούσα φάση στις κατεργασίες κοπής ως ψυκτικά υγρά με σκοπό τη μείωση της θερμοκρασίας και τη βελτίωση της κατεργαζόμενης επιφάνειας του τεμαχίου.Ακόμα, μελετάται ως προς την ασφάλεια και την οικονομική αποδοτικότητα της στη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας, ή στον τομέα του διαστήματος όπου οι αντίστοιχες συσκευές αναπτύσσουν ιδιαίτερα υψηλά ποσά πυκνότητας ισχύος. Στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τα νανορευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη μεταφορά θερμότητας από τους ηλιακούς συλλέκτες στις δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας και να αυξήσουν την πυκνότητα ενέργειας.

Ιδιότητες Νανορευστών [3.2.5]

Θεωρητική προσέγγιση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών:
Από τη διατριβή του Maxwell (19ος) αιώνας και μετά διάφορα θεωρητικά μοντέλα καταρτίστηκαν ώστε να εξηγήσουν τη βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα αιωρημάτων στερεών σωματιδίων και να μπορούν να προβλέπουν τη θερμική συμπεριφορά τους. Τα μοντέλα αυτά (Maxwell-1873, Hamilton and Crosser-1962, Bruggeman, Wasp) ωστόσο είχαν καταρτιστεί για αιωρήματα σωματιδίων μεγέθους χιλιοστού ή μικροσωματιδίων, με αποτέλεσμα να μην ανταποκρίνονται στις μοναδικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα νανοσωματίδια. Παράλληλα λάμβαναν υπ' όψιν μόνο τις αγωγιμότητες των συστατικών των μιγμάτων, τη σύνθεση τους και το σχήμα των διασκορπισμένων σωματιδίων, *ενώ αμελούσαν σημαντικούς παράγοντες όπως το μέγεθος και την κίνηση των σωματιδίων (κίνηση Brown), τη θερμοκρασία,* το *διασκορπισμό και το διεπιφανειακό στρώμα στη διεπιφάνεια σωματιδίου/ υγρού*.
Το μοντέλο του Maxwell (1881) δημιουργήθηκε με σκοπό την να καθορίσει την ηλεκτρική ή θερμική αγωγιμότητα υγρών- στερεών αιωρημάτων *για μικρές ογκομετρικές συστάσεις και μεγάλου σχετικά μεγέθους σφαιρικών σωματιδίων.* Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας που προκύπτει από αυτό το μοντέλο είναι:

$$(1)\quad k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\varphi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\varphi} k_b$$

όπου k_p **ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του σωματιδίου, k_b ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του συνεχούς μέσου (ρευστού), και φ η ογκομετρική σύσταση του αιωρήματος.**

Οι Hamilton- Crosser (1962) μετέτρεψαν ελαφρώς το μοντέλο του Maxwell έτσι ώστε να ανταποκρίνεται πλέον και σε μη-σφαιρικά σωματίδια εισάγοντας έναν εμπειρικό συντελεστή σχήματος *n=3/ψ* όπου ψ είναι η σφαιρικότητα του σωματιδίου οριζόμενη ως ο λόγος της επιφάνειας μιας σφαίρας με όγκο ίσο με αυτόν του σωματιδίου προς την επιφάνεια του σωματιδίου. Το μοντέλο που προκύπτει είναι:

(2)

$$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)\varphi}{k_p + (n-1)k_b + (k_b - k_p)\varphi} k_b$$

την οποία προτιμάμε κυρίως για την απλότητα της και για τα αξιόπιστα αποτελέσματά της. Η παραπάνω μέθοδος είναι αυτή που συναντάται συχνότερα από κάθε άλλη στη σχετική με τα νανορευστά διεθνή βιβλιογραφία.

Τέλος ο **Bruggeman** πρότεινε ένα μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν και τις πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων του μίγματος (συνεχούς μέσου-*σφαιρικών σωματιδίων*). Το μοντέλο του Bruggeman ενώ μοιάζει πολύ με αυτό του Maxwell όταν χρησιμοποιείται για μίγματα με στερεό χαμηλής ογκομετρικής συγκέντρωσης έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και όταν η συγκέντρωση των σωματιδίων είναι υψηλή.

(3)

$$\varphi\left(\frac{\mathrm{k}_p - \mathrm{k}_{eff}}{\mathrm{k}_p - 2\,\mathrm{k}_{eff}}\right) + (1-\varphi)\left(\frac{\mathrm{k}_b - \mathrm{k}_{eff}}{\mathrm{k}_b + 2\,\mathrm{k}_{eff}}\right) = 0$$

Αυτή τη στιγμή δεν υπάρχει κάποιο επαρκές μοντέλο που να προβλέπει και να εξηγεί ακριβώς την «ανώμαλη» συμπεριφορά της θερμικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν τα νανορευστά στις πειραματικές μετρήσεις. Οι ερευνητές ωστόσο στην προσπάθεια τους να κατανοήσουν το φαινόμενο έχουν καταλήξει σε διάφορες ημιεμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας διφασικών μιγμάτων.
Οι Yu και Choi (2003) πρότειναν μια παραλλαγή του μοντέλου του Maxwell το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση και τις ξεχωριστές ιδιότητες του διεπιφανειακού νανο-στρώματος μεταξύ των σωματιδίων και του συνεχούς μέσου. Αντικατέστησαν έτσι στη σχέση του Maxwell το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας kp με ένα διαμορφωμένο συντελεστή k_{pe} ο οποίος ορίζεται ως

(4)

$$k_{pe} = \frac{[2(1-\gamma)+(1+\beta)^3(1+2\gamma)\gamma]}{-1(1-\gamma)+(1+\beta)^3(1+2\gamma)} k_p$$

όπου *γ=klayer/kp* είναι ο λόγος της θερμικής αγωγιμότητας του νανο-στρώματος προς τη θερμική αγωγιμότητα του στερεού σωματιδίου και *β=h/r* ο λόγος του πάχους του νανο-στρώματος προς την ακτίνα των σωματιδίων. Έτσι η εξίσωση του Maxwell παίρνει τελικά τη μορφή:

(5)

$$k_{eff} = \frac{k_{pe}+2k_b+2(k_{pe}-k_b)(1-\beta)^3\varphi}{k_{pe}+2k_b-(k_{pe}-k_b)(1+\beta)^3\varphi} k_b$$

Το παραπάνω μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολύ λεπτά νανο-στρώματα της τάξεως των 10nm, ενώ φανερώνει ότι η εισαγωγή μικρότερου μεγέθους σωματιδίων (<10nm) έχει καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με την θερμική αγωγιμότητα από την αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στο ρευστό.
Παράλληλα **Οι Yu και Choi** πρότειναν μια παραλλαγή του μοντέλου των Hamilton-Crosser το οποίο θα περιλαμβάνει την επίδραση του διεπιφανειακού στρώματος μεταξύ ρευστού- σωματιδίων για μη σφαιρικά σωματίδια. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας πήρε τη μορφή:

(6)

$$k_{eff} = \left(1+\frac{n\varphi_{eff}\mathrm{A}}{1-\varphi_{eff}\mathrm{A}}\right)k_b$$, όπου

$$A = \frac{1}{3}\sum_{j=a,b,c} \frac{\mathrm{k}_{pj}-\mathrm{k}_b}{\mathrm{k}_{pj}+(n-1)\mathrm{k}_b}$$ και $$\varphi_{eff} = \varphi\frac{\sqrt{(\alpha^2+t)}\sqrt{(\mathrm{b}^2+t)}\sqrt{(\mathrm{c}^2+t)}}{\sqrt{abc}}$$

είναι η αντίστοιχη ογκομετρική συγκέντρωση σύνθετων ελλειψοειδών, τα οποία είναι μια φανταστική σύνθεση ελλειπτικών σωματιδίων (α>b>c) περιτριγυριζόμενα από νάνο- στρώμα.
Τέλος ο συντελεστής n είναι ένας γενικός εμπειρικός συντελεστής σχήματος.
($n = 3\Psi^{-\alpha}$, όπου σε αυτήν την περίπτωση α είναι μια εμπειρική παράμετρος και Ψ η σφαιρικότητα του σωματιδίου.)

Το παραπάνω μοντέλο καταφέρνει να προβλέψει τη θερμική αγωγιμότητα αιωρήματος νανοσωλήνων άνθρακα (CNT- carbon nanotubes) σε λάδι, ωστόσο αποτυγχάνει να εξηγήσει τη μη- γραμμική συμπεριφορά της θερμικής αγωγιμότητας για νανορευστά μεταλλικών σωματιδίων και οξειδίων του μετάλλου.
Ο Xue ανέπτυξε ένα μοντέλο για τη θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών βασιζόμενο στη θεωρία της πόλωσης το οποίο περιλαμβάνει και την επίδραση της διεπιφάνειας μεταξύ του συνεχούς μέσου και των σωματιδίων.

(7)

$$9(1-\frac{\varphi}{\lambda})\frac{k_{eff}-k_b}{2k_{eff}+k_b}+\frac{\varphi}{\lambda}\left[\frac{k_{eff}-k_{c.x}}{k_{eff}+B_{2,x}(k_{c,x}-k_{eff})}+4\frac{k_{eff}-k_{c.y}}{2k_{eff}+(1-B_{2,x})(k_{c,y}-k_{\mathrm{eff}})}\right]=0$$

όπου *λ=abc/[(α+t)(b+t)(c+t)]* και α,b,c σταθερές των υποθετικών ελλειπτικών σύνθετων νανοσωματιδίων, που αποτελούνται από νανοσωματίδια περιβεβλημένα από διεπιφανειακό νάνο-στρώμα.
κcj είναι η διηλεκτρική σταθερά και B2x ο συντελεστής εκπόλωσης.

Το παραπάνω μοντέλο ωστόσο θεωρήθηκε ανεπιτυχές αφού αποδείχθηκε στην πράξη ότι ο Xue χρησιμοποίησε λανθασμένες τιμές για τους συντελεστές. Ερευνητές χρησιμοποιώντας αργότερα τις σωστές τιμές για τις παραμέτρους στην εξίσωση του Xue απέδειξαν ότι το μοντέλο αυτό έδινε υψηλότερες τιμές για τη θερμική αγωγιμότητα από τις μετρούμενες στα πειράματα. Άρα η ακρίβεια και η εγκυρότητα του παραπάνω μοντέλου διερευνάται.
Οι Xue και Xu βασίστηκαν στο μοντέλο του Bruggeman για να καταστρώσουν μια εξίσωση που λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του διεπιφανειακού στρώματος αντικαθιστώντας τη θερμική αγωγιμότητα των νανοσωματιδίων με την υποθετική θερμική αγωγιμότητα των «σύνθετων νανοσωματιδίων». Η σχέση που προέκυψε είναι:
(8)

$$(1-\frac{\varphi}{\alpha})\frac{k_{eff}-k_b}{2k_{eff}+k_b}+\frac{\varphi}{\alpha}\frac{(k_{eff}-k_2)(2k_2+k_1)-\alpha(k_1-k_2)(2k_2+k_{eff})}{(2k_{eff}+k_2)(2k_2+k_1)+2\alpha(k_1-k_2)(k_2-k_{eff})}=0$$

όπου α είναι ο ογκομετρικός λόγος σφαιρικού και σύνθετου νανοσωματιδίου,k1 k2 οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας του νανοσωματιδίου και του περιβλήματος αντίστοιχα. Το παραπάνω μοντέλο φαίνεται να συμφωνεί με τις πειραματικές μετρήσεις για μείγματα CuO/νερού και CuO/EG (οξείδιο χαλκού σε νερό και οξείδιο χαλκού σε αιθυλενογλυκόλη).
Ο Xie (2005) υπολόγισε το διεπιφανειακό νάνο-στρώμα με γραμμική διανομή της θερμικής αγωγιμότητας και πρότεινε ένα μοντέλο που λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του πάχους του νάνο-στρώματος, το μέγεθος των νανοσωματιδίων, την ογκομετρική τους συγκέντρωση στο συνεχές μέσο και τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού, των νανοσωματιδίων και του νάνο-στρώματος. Η σχέση που προέκυψε είναι:

(9)

$$k_{eff} = (1 + 3\Theta\varphi_{\Gamma} + \frac{3\Theta^2\varphi_{\Gamma}^2}{1-\Theta\varphi_{\Gamma}})\,\mathrm{k}_b, \text{ όπου}$$

$$\Theta = \frac{\beta_{lb}[(1+\gamma)^3 - \beta_{pl}/\beta_{bl}]}{(1+\gamma)^3 + 2\beta_{lb}/\beta_{pl}},\ \beta_{lb} = \frac{k_1 - k_b}{k_1 + 2k_b},\ \beta_{pl} = \frac{k_p - k_1}{k_p + 2k_1} \text{ και } \beta_{bl} = \frac{k_b - k_1}{k_b + 2k_1}$$

Ενώ γ=δ/rp είναι ο λόγος πάχους του νάνο-στρώματος και του νανοσωματιδίου. Ο όρος φτ είναι ο διαμορφωμένος ογκομετρικός λόγος συγκέντρωσης του νανοσωματιδίου και του νάνο-στρώματος στο νανορευστό, $\varphi_{\Gamma} = \varphi(1+\gamma)^3$.

Τα παραπάνω μοντέλα που αναπτύχθηκαν κατηγοριοποιούνται σαν *στατικά μοντέλα* αφού υποθέτουν την ύπαρξη στατικών νανοσωματιδίων στο συνεχές μέσο και στηρίζονται στα υπάρχοντα κλασσικά μοντέλα θερμικής αγωγιμότητας των Maxwell και Hamilton-Crosser.

Μια άλλη κατηγορία μοντέλων που εξετάζεται σχετικά με την αριθμητική προσέγγιση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι τα ***δυναμικά μοντέλα***. Οι σχέσεις αυτές βασίζονται στην παραδοχή ότι τα νανοσωματίδια έχουν πλευρική, ακανόνιστη κίνηση μέσα στο συνεχές μέσο- κίνηση Brown. Η κίνηση αυτή πιστεύουν οι ερευνητές ότι είναι υπεύθυνη για μεταφορά ενέργειας είτε απευθείας μέσω συγκρούσεων μεταξύ των σωματιδίων είτε εμμέσως μέσω συναγωγής η οποία βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας.

Ο Xuan (2003) εισήγαγε ένα μοντέλο το οποίο στηρίζεται στο αρχικό μοντέλο του Maxwell ενώ λαμβάνει υπ' όψιν και την κίνηση Brown των νανοσωματιδίων.

(10)

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b - 2(k_b - k_p)\varphi}{k_p + 2k_b + (k_b - k_p)\varphi} k_b + \frac{\rho_p \varphi c_p}{2}\sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \mu}}$$

Όπου kb η σταθερά του Boltzmann,rc η φαινομενική ακτίνα των συστάδων. Το συγκεκριμένο μοντέλο παρόλο που λαμβάνει υπ' όψιν και τη συσχέτιση της θερμοκρασίας δεν συμφωνεί με τα αποτελέσματα των πειραματικών διατάξεων.

Ο Kumar (2004) πρότεινε επίσης ένα μοντέλο για το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που να περιλαμβάνει την επίδραση της θερμοκρασίας και της κίνησης Brown.

(11) $k_{eff} = k_b + c\dfrac{2k_b T\varphi r_b}{\pi v d_p^2 k_b (1-\varphi) r_p} k_b$

όπου c είναι μια σταθερά, ν είναι το δυναμικό ιξώδες του συνεχούς μέσου και dp είναι η διάμετρος των σωματιδίων.
Ωστόσο και για το συγκεκριμένο μοντέλο εξετάζεται η εγκυρότητά του για υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων.

Οι Jang και Choi ανέπτυξαν ένα μοντέλο πάνω στην ιδέα ότι η κίνηση Brown συνεισφέρει στην μικρο-συναγωγή. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπ' όψιν τις συγκρούσεις μεταξύ των μορίων του συνεχούς μέσου (kb(1-φ)) , τη θερμική διάχυση των νανοσωματιδίων (kp φ), τις συγκρούσεις των σωματιδίων λόγω τις κίνησης Brown και τη θερμική αλληλεπίδραση των κινούμενων σωματιδίων με τα μόρια του συνεχούς μέσου fh δτ . Η σχέση που προκύπτει είναι:

(12)

$$k_{eff} = k_b(1-\varphi) + k_p\varphi + 3C\frac{d_b}{d_p}k_b \operatorname{Re}_{dp}^2 \operatorname{Pr}\varphi$$

Όπου $h \sim (k_b / d_p)\operatorname{Re}_{dp}^2 \operatorname{Pr}^2$ και $\delta \sim 3dp$ αντιπροσωπεύουν το συντελεστή συναγωγής θερμότητας για τη ροή και το πάχος του διεπιφανειακού στρώματος αντίστοιχα. Η εγκυρότητα του παραπάνω μοντέλου διερευνάται αφού οι δύο ερευνητές θεώρησαν ότι οι μακροσκοπικές σχέσεις συναγωγής θερμότητας για ροή γύρω από σφαίρα ισχύουν αντίστοιχα και για τις νάνο-διαστάσεις του προβλήματος. Η συσχέτιση της ροής ωστόσο γύρω από σφαίρα υποθέτει ότι ο αριθμός Reynolds εξαρτάται από γραμμικά από τη διάμετρο αυτής.

Ο Prasher πρότεινε ένα μοντέλο σύμφωνα με το οποίο η συναγωγή θερμότητας που παρατηρείται λόγω της κίνησης Brown είναι ο κύριος λόγος της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Χρησιμοποιώντας το συντελεστή συναγωγής θερμότητας h μετέτρεψε το αρχικό μοντέλο του Maxwell καταλήγοντας στη σχέση:

(13)

$$k_{eff} = (1 + A\operatorname{Re}^m \operatorname{Pr}^{0.333}\varphi)\left[\frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\varphi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\varphi}\right]k_b$$

Όπου $h = k_b / a(1 + A\operatorname{Re}^m \operatorname{Pr}^{0.333}\varphi)$ και A,m σταθερές.

Ο αριθμός Reynolds μπορεί να γραφτεί σαν: $\mathrm{Re} = \frac{1}{\nu}\sqrt{\frac{18k_bT}{\pi\rho_p d_p}}$

Το μοντέλο του Prasher παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι περιέχει άγνωστες σταθερές π.χ. m οι οποίες μπορούν να οριστούν μόνο ταιριάζοντας τις με τα πειραματικά δεδομένα.

Οι **Koo και Kleinstreuer (2004)** εισήγαγαν ένα μοντέλο που περιλαμβάνει τις επιδράσεις του μεγέθους των σωματιδίων, την ογκομετρική τους συγκέντρωση στο συνεχές μέσο, τη συσχέτιση της θερμοκρασίας καθώς και την επίδραση της κίνησης Brown στη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Ο τύπος που προέκυψε είναι:

(14)

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\varphi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\varphi} k_b + 5*10^4 \beta\varphi\rho_p c_p \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p D}} f(T,\varphi)$$

Το πρώτο τμήμα της παραπάνω σχέσης προκύπτει απευθείας από τον κλασσικό τύπο του Maxwell ενώ στο δεύτερο λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση της κίνησης Brown. Ο όρος f(T,φ) μεταβάλλεται ανάλογα με την ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο (φ) ενώ η παράμετρος β σχετίζεται με την κίνηση των σωματιδίων.

Τέλος **ο Xue** (2005) πρότεινε ένα μοντέλο βασισμένο στη θεωρία του Maxwell για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών που περιέχουν νανοσωλήνες άνθρακα (CNT's). Στο μοντέλο αυτό λαμβάνονται υπ΄ όψιν ο λόγος μήκους- διαμέτρου των νανοσωλήνων καθώς και το επίπεδο διασκορπισμού τους στο συνεχές μέσο. Ο τύπος που προέκυψε είναι:

(15)

$$k_{eff} = k_b \frac{1-\varphi+2\varphi\dfrac{k_p}{k_p-k_b}\ln\dfrac{k_p+k_b}{2k_b}}{1-\varphi+2\varphi\dfrac{k_b}{k_p-k_b}\ln\dfrac{k_p+k_b}{2k_b}}$$

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Maxwell	$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\phi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\phi} k_b$ (5.1)	Καθορίζει τη θερμική αγωγιμότητα υγρών- στερεών αιωρημάτων για μικρές ογκομετρικές συστάσεις και μεγάλου σχετικά μεγέθους σφαιρικών σωματιδίων.
Hamilton- Crosser	$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_b + (k_b - k_p)\phi} k_b$ (5.2)	Ανταποκρίνεται και σε μη-σφαιρικά σωματίδια εισάγονταις έναν εμπειρικό συντελεστή σχήματος $n=3/\psi$ όπου ψ είναι η σφαιρικότητα του σωματιδίου.
Bruggeman	$\phi(\frac{k_p - k_{eff}}{k_p - 2k_{eff}}) + (1-\phi)(\frac{k_b - k_{eff}}{k_b + 2k_{eff}}) = 0$ (5.3)	Λαμβάνει υπ' όψιν και τις πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων του μίγματος (συνεχούς μέσου- σφαιρικών σωματιδίων. Χρησιμοποιείται και για υψηλές τιμές του φ.

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Yu- Choi (1)	$k_{eff} = \frac{k_{pe} + 2k_b + 2(k_{pe} - k_b)(1-\beta)^3\phi}{k_{pe} + 2k_b - (k_{pe} - k_b)(1+\beta)^3\phi} k_b$ (5.5)	Λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση και τις ξεχωριστές ιδιότητες του διεπιφανειακού νανο-στρώματος μεταξύ των σωματιδίων και του συνεχούς μέσου.
Yu- Choi (2)	$k_{eff} = \left(1 + \frac{n\phi_{eff}A}{1-\phi_{eff}A}\right)k_b$, (5.6)	Περιλαμβάνει την επίδραση του διεπιφανειακού στρώματος μεταξύ ρευστού σωματιδίων για μη σφαιρικά σωματίδια, προβλέπει τη θερμική αγωγιμότητα αιωρήματος CNT's σε λάδι.
Xue	$9(1-\frac{\phi}{\lambda})\frac{k_{eff}-k_b}{2k_{eff}+k_b} + \frac{\phi}{\lambda}[\frac{k_{eff}-k_{c,x}}{k_{eff}+B_{2,x}(k_{c,x}-k_{eff})} + 4\frac{k_{eff}-k_{c,y}}{2k_{eff}+(1-B_{2,x})(k_{c,y}-k_{eff})}] = 0$ (5.7)	Βασιζόμενο στη θεωρία της πόλωσης το οποίο περιλαμβάνει και την επίδραση της διεπιφάνειας μεταξύ του συνεχούς μέσου και των σωματιδίων

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Xue- Xu	$\left(1-\frac{\phi}{\alpha}\right)\frac{k_{eff}-k_b}{2k_{eff}+k_b}+\frac{\phi}{\alpha}\frac{(k_{eff}-k_2)(2k_2+k_1)-a(k_1-k_2)(2k_2+k_{eff})}{(2k_{eff}+k_2)(2k_2+k_1)+2a(k_1-k_2)(k_2-k_{eff})}=0$ (5.8)	Λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του διεπιφανειακού στρώματος αντικαθιστώντας τη θερμική αγωγιμότητα των νανοσωματιδίων με την υποθετική θερμική αγωγιμότητα των «σύνθετων νανοσωματιδίων». Κατάλληλο για αιωρήματα CuO/νερού και CuO/EG.
Xie	$k_{eff}=(1+3\Theta\phi_T+\frac{3\Theta^2\phi_T^2}{1-\Theta\phi_T})k_b$ (5.9)	Λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του πάχους του νάνο-στρώματος, το μέγεθος των νανοσωματιδίων, την ογκομετρική τους συγκέντρωση στο συνεχές μέσο και τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού, των νανοσωματιδίων και του νάνο-στρώματος.

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Xuan	$k_{eff}=\frac{k_p+2k_b-2(k_b-k_p)\phi}{k_p+2k_b+(k_b-k_p)\phi}k_b+\frac{\rho_p\phi c_p}{2}\sqrt{\frac{k_BT}{3\pi r_c\mu}}$, (5.10)	Λαμβάνει υπ' όψιν και την κίνηση Brown των νανοσωματιδίων.
Kumar	$k_{eff}=k_b+c\frac{2k_BT\phi r_b}{\pi\nu d_p^2k_b(1-\phi)r_p}k_b$, (5.11)	Περιλαμβάνει την επίδραση της θερμοκρασίας και της κίνησης Brown.
Jang- Choi	$k_{eff}=k_b(1-\phi)+k_p\phi+3C\frac{d_b}{d_p}k_b\,\mathrm{Re}_{d_p}^2\,\mathrm{Pr}\,\phi$, (5.12)	Λαμβάνει υπ' όψιν τις συγκρούσεις μεταξύ των μορίων του συνεχούς μέσου $(k_b(1-\phi))$, τη θερμική διάχυση των νανοσωματιδίων $(k_p\phi)$, τις συγκρούσεις των σωματιδίων λόγω τις κίνησης Brown και τη θερμική αλληλεπίδραση των κινούμενων σωματιδίων με τα μόρια του συνεχούς μέσου $(fh\delta_T)$.

Συνοπτικός Πίνακας Σχέσεων 1

Μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών [3.2.6]

Τεχνικές Μέτρησης

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, σε αυτές της ***μόνιμης κατάστασης (Steady-State Methods)*** και σε αυτές της ***μη μόνιμης κατάστασης (Transient Methods).***

Στην πρώτη κατηγορία ανήκει η μέθοδος παράλληλων πλακών σε μόνιμη κατάσταση (steady-state parallel-state) ή του θερμαινόμενου δίσκου (hot plate) και αυτή της θερμαινόμενης πλάκας σε οιονεί μόνιμη κατάσταση (quasi-steady state heating plate).

Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται τεχνικές διακύμανσης θερμοκρασίας (temperature oscillation) και παραλλαγές της **μεθόδου θερμαινόμενου σύρματος** σε μη-μόνιμη κατάσταση (transient hot-wire).

Μέθοδος Παραλλήλων Πλακών σε Μόνιμη Κατάσταση

(15)

$q_X = -k\dfrac{dT}{dx}$, συνολική θερμική αγωγιμότητα k

(16)

$k_{eff} = \dfrac{kS - k_g S_g}{S - S_g}$, keff νανορευστού όπου k*g* και *Sg* είναι η θερμική αγωγιμότητα και η επιφάνεια διατομής των γυάλινων διαχωριστών και όπου *S* είναι η επιφάνεια διατομής της πάνω χάλκινης πλάκας.

Μέθοδος Θερμαντικών Πλακών σε Περίπου Μόνιμη Κατάσταση
(17)
$k = \dfrac{q\delta}{2\Delta T}$ (Carslaw & Jaeger) όπου *q* είναι η σταθερή ροή θερμότητας από τη θερμαντική επιφάνεια, *δ* το πάχος του δείγματος, *ΔT=(T3-T4)* η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμαντικής επιφάνειαςκαι της μονωτικής κάτω επιφάνειας σε περίπου μόνιμη κατάσταση.

Μέθοδος Διακύμανσης Θερμοκρασίας
(18)
$k_{eff} = a * \rho * c_p$

Μέθοδος Θερμαινόμενου Σύρματος σε Μη-Μόνιμη Κατάσταση
(Παραλλαγή του νόμου του Fourier)
(19)
$k = \dfrac{q}{4\pi(T_2 - T_1)}\ln\left(\dfrac{t_2}{t_1}\right)$, όπου q είναι η εφαρμοσμένη ηλεκτρική ισχύς και T1 T2 οι θερμοκρασίες στις χρονικές στιγμές *t1* και *t2* αντίστοιχα.

Μέτρηση του ιξώδους [3.2.7]

Η μέτρηση και διερεύνηση της μεταβολής του ιξώδους, αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικούς παράγοντες για τη μελέτη των νανορευστών και των εφαρμογών τους.
Το ιξώδες ή συνεκτικότητα είναι η ιδιότητα ενός ρευστού να ανθίσταται στη διάτμηση του, δηλαδή στην κίνηση ενός στοιχείου ως προς το διπλανό του, και για το λόγο αυτό ονομάζεται και εσωτερική τριβή.
Η αντίσταση όμως αυτή προκαλεί πτώση πίεσης στο ρευστό η οποία με τη

σειρά της όταν εμφανίζεται σε βιομηχανικές εφαρμογές που περιέχουν ροή ρευστού απαιτεί αύξηση της αντλητικής ισχύος
(20)

$W = \frac{V_{nf}\ \Delta P}{\eta_{pump}}$, όπου W η αντλητική ισχύς, *V* η ογκομετρική παροχή του νανορευστού, ηpump συντελεστής απόδοσης της αντλίας και ΔP η πτώση πίεσης .
Ιδιαίτερα στη στρωτή ροή(Re<2300) η πτώση πίεσης είναι ανάλογη του ιξώδους του ρευστού.
(21)
$\Delta P = 32\frac{u_m \mu L}{D^2}$, όπου *u* η μέση ταχύτητα της ροής του ρευστού, μ το ιξώδες, L το μήκος του αγωγού και D η διάμετρος του.

Καταλαβαίνει έτσι κανείς την αναγκαιότητα καταμέτρησης της μεταβολής του ιξώδους των νανορευστών, αφού μια αύξηση του σε μεγάλο βαθμό θα μπορούσε να ''ακυρώσει'' τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας.
Γενικά, το ιξώδες αυξάνεται καθώς προστίθενται τα διάφορα είδη νανοσωματιδίων.

Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει κάποιο γενικό μοντέλο που να μπορεί να αποδώσει τη μεταβολή του ιξώδους των νανορευστών σε σχέση με το αρχικό συνεχές μέσο.Υπάρχουν διάφορα μοντέλα(Einstein,Krieger,Dougherty,Nielsen,Batchelor) που περιγράφουν τη μεταβολή στο ιξώδες για αιωρήματα στερεών σωματιδίων σε νευτώνεια ρευστά, παρουσιάζουν όμως σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις.
Ωστόσο από μελέτες ερευνητών όπως **ο Maiga** (*Al*2 *O*3 /νερό και *Al*2 *O*3/αιθυλενογλυκόλη)**, οι Tseng και Lin** (*TiO*2 **/**νερό) **και ο Kulkarni** (CuO/νερό) προέκυψαν κάποιες σχέσεις για συγκεκριμένα νανορευστά τα αποτελέσματα των οποίων συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικώς μετρούμενα.
Το πρόβλημα των παραπάνω σχέσεων είναι ότι δεν έχουν κάποιο φυσικό υπόβαθρο, καθώς και ότι δεν μπορούν να εφαρμοστούν για κάθε είδος νανορευστού.

(22) Einstein: $\frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + 2\varphi$, όπου φ η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο.

(23) Krieger/Dougherty: $\frac{\mu_{nf}}{\mu} = (1 - \frac{\varphi}{\varphi_m})^{-[\eta]\varphi_\mu}$, όπου [η]=2,5 για σφαιρικά σωματίδια και $\varphi_m = 0,62$

(24) Batchelor: $\frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + 2,5\varphi + 6,2\varphi^2$ **,** όπου φ η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο.

(25) Maiga (Al_2O_3/νερό): $\frac{\mu_{nf}}{\mu} = (1 + 7,3\varphi + 123\varphi^2)$

(26) Maiga (Al_2O_3/αιθυλενογλυκόλη): $\frac{\mu_{nf}}{\mu} = (1 - 0,19\varphi + 306\varphi^2)$

(27) Tseng και Lin (TiO_2/νερό): $\frac{\mu_{nf}}{\mu} = 13,47e^{35.98\varphi}$

(28)Kulkarni(CuO/νερό):

$$\ln \mu_{nf} = -(2.8751 + 53.548\varphi - 107.12\varphi^2) + (1078.3 + 15857\varphi + 20587\varphi^2)(1/\mathrm{T})$$

Συναγωγή θερμότητας στα νανορευστά [3.2.8]

Η προσθήκη νανοσωματιδίων στο συνεχές μέσο για την παραγωγή των νανορευστών επιδρά σε όλους τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ειδική συναγωγιμότητα h με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας. Έτσι η μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας με την προσθήκη των νανοσωματιδίων αποτελεί καλύτερο δείκτη για τα πλεονεκτήματα της χρήσης των νανορευστών σε βιομηχανικές εφαρμογές, από την απλή μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας.

Πιο συγκεκριμένα τα νανοσωματίδια προκαλούν αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού γεγονός που με τη σειρά του προκαλεί αύξηση στην τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας η οποία όμως τείνει να αντισταθμιστεί λόγω της παράλληλης αύξησης στην τιμή του ιξώδους.

Παράλληλα μείωση παρατηρείται και στην τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του νανορευστού cp από τη στιγμή που τα μέταλλα και τα οξείδια του μετάλλου τα οποία διασπείρονται στα συμβατικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας έχουν κατά πολύ μικρότερες τιμές ειδικής θερμοχωρητικότητας από αυτά. Η **θερμοχωρητικότητα των νανορευστών (c_{pnf})** εξαρτάται σχεδόν γραμμικά από την ογκομετρική συγκέντρωση των νανοσωματιδίων στο συνεχές μέσο ενώ για την αριθμητική της προσέγγιση χρησιμοποιούνται **οι εξισώσεις**

των Xuan- Roetzel και Pak- Cho με τα αποτελέσματα τους να συμφωνούν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό με τα πειραματικώς μετρούμενα.

(29)

$$c_{p,nf} = \frac{\varphi\rho_{\rho}c_{p,p} + (1-\varphi)\rho_b c_{p,b}}{\rho_{nf}}$$, Xuan-Roetzel

(30)

$$c_{p,nf} = \varphi c_{p,p} + (1-\varphi)\rho_b c_{p,b}$$, Pak-Cho

όπου στις παραπάνω σχέσεις cpp η ειδική θερμοχωρητικότητα των σωματιδίων και cpb, η αντίστοιχη του συνεχούς μέσου, φ η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων και ρnf η πυκνότητα του νανορευστού, ρp των σωματιδίων και ρb του συνεχούς μέσου.

Τέλος η **νέα πυκνότητα** του νανορευστού είναι μεγαλύτερη από αυτή του αρχικού συνεχούς μέσου ενώ μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά με αρκετά καλή προσέγγιση με τα πειραματικά δεδομένα από τη σχέση:

(31)

$\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1-\varphi)\rho_b$, όπου ρnf η πυκνότητα του νανορευστού, ρp των σωματιδίων και ρb του συνεχούς μέσου.

Ερευνητής	Σχέση		Ροή	Παρατηρήσεις
Jung	$Nu = 0.014\phi^{0.095}\,\mathrm{Re}^{0.4}\,\mathrm{Pr}^{0.6}$	(8.12)	Στρωτή	Πλήρως ανεπτυγμένη ροή σε αγωγούς διαστάσεων μm για αιώρημα Al_2O_3/νερό
Maiga	$Nu = 0.086\,\mathrm{Re}^{0.55}\,\mathrm{Pr}^{0.5}$	(8.16)	Στρωτή	Πλήρως ανεπτυγμένη ροή, σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας, για $\mathrm{Re} \le 1000$, $6 \le \mathrm{Pr} \le 753$ και $\phi \le 10\%$ Αιρωρήματα Al_2O_3/νερό και Al_2O_3/EG
	$Nu = 0.28\,\mathrm{Re}^{0.35}\,\mathrm{Pr}^{0.36}$	(8.17)	Στρωτή	Πλήρως ανεπτυγμένη ροή, σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων για $\mathrm{Re} \le 1000$, $6 \le \mathrm{Pr} \le 753$ και $\phi \le 10\%$. Αιρωρήματα Al_2O_3/νερό και Al_2O_3/EG.
Xuan-Li	$Nu = 0.0059(1{,}0 + 7{,}6286\phi^{0{,}6886}Pe_d^{\,0.001})\,\mathrm{Re}^{0.9238}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$	(8.5),	Τυρβώδης	Για αιώρημα Cu/νερό

Ερευνητής	Σχέση		Ροή	Παρατηρήσεις
Gnielinski	$Nu = 0.012(\mathrm{Re}^{0.87} - 280)\,\mathrm{Pr}^{0.4}$	(8.6)	Τυρβώδης	Για $1{,}5 \le \mathrm{Pr} \le 500$, $3*10^3 \le \mathrm{Re} \le 10^6$ Για αιωρήματα CuO/EG-νερό και Al_2O_3/EG-νερό.
Maiga	$Nu = 0.085\,\mathrm{Re}^{0.71}\,\mathrm{Pr}^{0.35}$	(8.11)	Τυρβώδης	Για $6{,}6 \le \mathrm{Pr} \le 13.9$ και $10^4 \le \mathrm{Re} \le 5*10^5$ Για αιώρημα Al_2O_3/νερό.
Pak-Cho	$Nu = 0.021\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.5}$	(8.8)	Τυρβώδης	Για $6{,}54 \le \mathrm{Pr} \le 12{,}33$ και $10^4 \le \mathrm{Re} \le 10^5$. Για αιωρήματα Al_2O_3/νερό και TiO_2/νερό.
Kumar-Krisha	$Nu = 0.0256\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$	(8.9)	Τυρβώδης	Για αιωρήματα Al_2O_3/νερό, CuO/νερό
	$Nu = 0.027\,\mathrm{Re}^{0{,}8}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$	(8.10)	Τυρβώδης	Για αιώρημα Cu/νερό

Συνοπτικός Πίνακας Σχέσεων 3

Μοντέλα Λείανσης [Κεφάλαιο 4]

Θερμικά Μοντέλα Λείανσης [4.1]

Τα θερμικά μοντέλα είναι απαραίτητα ώστε να συσχετίζουν τις παραμέτρους της κατεργασίας με τις παραγόμενες θερμοκρασίες, όσον αφορά την ανάλυση των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας στη λείανση. Τα περισσότερα από αυτά τα θερμικά μοντέλα βασίζονται στην πρώιμη εργασία των Carslaw και Jaeger το 1942 και 1959 [12], στην οποία μία ομοιόμορφη ροή θερμότητας θεωρείται επίπεδη πηγή θερμότητας και κινείται με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος μιας επιφάνειας ενός στερεού. Το πρώτο αναλυτικό μοντέλο στη θερμική ανάλυση για λεπτή λείανση εισήχθη το 1952 από τους Outwater και Shaw[15], οι οποίοι μοντελοποίησαν τη μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια εδάφους που βασιζόταν σε μια συρόμενη πηγή θερμότητας στην επίπεδη διάτμηση. Ωστόσο, για την αποφυγή της δυσκολίας υπολογισμού του ολοκληρώματος του μοντέλου του Jaeger, προτάθηκε από τον Takazawa το 1966 [16] ένας τύπος που το προσέγγιζε και είχε τη δυνατότητα να προσδιορίζει τις μέγιστες θερμοκρασίες τόσο στην επιφάνεια επαφής, όσο και κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου. Από την άλλη, το 1968 και 1970, οι Des Ruisseaux και Zerkle [17] μελέτησαν την επίδραση της ψύξης της επιφάνειας λόγω του ψυκτικού υγρού και βρήκαν ότι για συγκεκριμένους αριθμούς Peclet και συντελεστές συναγωγής, δε συμβαίνει αξιοσημείωτη ψύξη λόγω συναγωγής στη ζώνη επαφής. Παραπάνω μοντέλα αναπτύχθηκαν από τους Salje και Brandin, το 1974, το 1977 και το 1978 στα οποία συμπεριλαμβάνονται οι περισσότερες παράμετροι όπως η περιφερειακή ταχύτητα του τεμαχίου, η ταχύτητα λείανσης και η ισοδύναμη διάμετρος ως γεωμετρική μεταβλητή.
Η καλύτερη λύση για μια κινούμενη πηγή θερμότητας, φαίνεται να είναι μία τριγωνική κατανομή θερμότητας σε ολόκληρη τη ζώνη επαφής, την οποία έδειξε το 1978 ο Snoeys [18], ενώ παράλληλα αναπτύχθηκε από τον Rowe ένα μοντέλο που βασίζεται στις σύνθετες ιδιότητες του τροχού λείανσης το 1988. Με αυτό το μοντέλο, προσδιορίζεται η αναλογία της ενέργειας που μεταφέρεται στο τεμάχιο, γνωστή και ως λόγος καταμερισμού της θερμότητας Rw (ποσοστό της ενέργειας που μεταφέρεται από τη λείναση στο τεμάχιο) με μία απλή μέθοδο. Για μεγαλύτερες γωνίες κώνου, ο Lavine [19] μοντελοποίησε τη μεταφορά θερμότητας εντός κωνικών κόκκων το 1989 λαμβάνοντας μια μέση τιμή 45° για την αξιολόγηση του. Ωστόσο, η τροποποίηση του παραπάνω κωνικού μοντέλου που έγινε το 1991 από τον Rowe [20], συμπεριέλαβε την επίδραση στο λόγο διάτμησης της παροδικής θέρμανσης στη ζώνη επαφής και έδειξε πως μειώνεται. Οι Malkin και Guo το 1995 [21] μελετώντας το πρόβλημα της παροδικής μεταφοράς θερμότητας σε ολισθαίνουσα πηγή θερμότητας, κατέστησαν εφικτή την ανάλυση της επίδρασης του χρόνου όταν η πηγή θερμότητας κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του δοκιμίου. Ο Kopalinsky[22] χρησιμοποίησε τις δυνάμεις κοπής και τις τριβές των κόκκων λείανσης για να προσδιορίσει τη ροή θερμότητας στη λείανση το 1984. Ενώ το 2004 ο Fricker[23] χρησιμοποίησε ένα θερμικό μοντέλο για την πρόβλεψη των προφίλ χρόνου- θερμοκρασίας για κατεργασία σκλήρυνσης.

Τα θερμικά μοντέλα των παραπάνω δημοσιεύσεων, είναι κατάλληλα για τις συνηθισμένες συνθήκες όπου το βάθος κοπής είναι συνήθως λιγότερο από 0.1 mm και έτσι αμελείται το βάθος λείανσης. Για συνθήκες κοπής μεγαλύτερου βάθους, όπως είναι η λείανση HEDG (High Efficiency Deep Grinding - Λείανση Μεγάλου Βάθους και Υψηλής Απόδοσης), τα βάθη κοπής κυμαίνονται από 1 ως 10 mm και υπάρχει σφήνα μεταξύ της επιφάνειας επαφής του τροχού και της επιφάνειας φινιρίσματος του τεμαχίου, γεγονός το οποίο αλλάζει σημαντικά το μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας, με μεγάλες τιμές στους αριθμούς Peclet λόγω μεγάλης πρόωσης. Ο αριθμός Peclet είναι αδιάστατος, εκφράζεται ως ο λόγος της θερμικής

ενέργειας συναγωγής του ρευστού προς τη θερμική ενέργεια που διαχέεται εντός του ρευστού και εξαρτάται από την πυκνότητα και το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Πρόσφατα, και συγκεκριμένα το 2001 αναπτύχθηκε από τους Rowe και Jin το μοντέλο πηγής θερμότητας κυκλικού τόξου με σκοπό να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις μεγάλης γωνίας επαφής και μεγάλου αριθμού Peclet. Η γωνία επαφής περιλαμβάνεται στο μοντέλο των Rowe-Jin για την περιγραφή του κυκλικού τόξου της επιφάνειας επαφής, ενώ στο μοντέλο των Carslaw- Jaeger η συγκεκριμένη γωνία ισούται με το μηδέν. Για την ανάλυση του προβλήματος θερμότητας σε λείανση μεγάλου βάθους κοπής αναπτύχθηκε ένα μοντέλο κινούμενης πηγής θερμότητας σε κεκλιμένο επίπεδο τόσο από τους Jin και Cai, όσο και από τον Rowe και στο οποίο η γωνία του κεκλιμένου επιπέδου καθορίζεται από τη γωνία επαφής. Οι Jin και Cai κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η γωνία επαφής του κεκλιμένου επιπέδου έχει σοβαρότερη επίδραση στις θερμοκρασίες για τις συνθήκες HEDG(High Efficiency Deep Grinding - Λείανση Μεγάλου Βάθους και Υψηλής Απόδοσης). Ακόμα, ο Rowe επεσήμανε το γεγονός πως η θερμοκρασία στο επίπεδο φινιρίσματος θα μπορούσε να είναι πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία επαφής σε HEDG και πως η "ψυχρή λείανση" καθίσταται δυνατή ακόμα και αν υπάρχει υψηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού. Το μοντέλο του κυκλικού τόξου μελετήθηκε περαιτέρω από τους Jin και Rowe, οι οποίοι συμπεριέλαβαν την παροδική επίδραση της μεταφοράς θερμότητας. Βρέθηκε πως για σχετικά μικρό αριθμό Peclet (L=1) επιτυγχάνεται μια σταθερή κατάσταση μόνο όταν η απόσταση που διανύει ο τροχός υπερβεί κατά 5 φορές το μήκος επαφής.

Ένα βασικό ζήτημα αποτελεί το γεγονός πως για την ακριβή πρόβλεψη της θερμοκρασίας στη λείανση, απαιτείται η γνώση της κατανομής της θερμότητας στα διάφορα θερμικά βάθη στις ζώνες λείανσης, δηλαδή στο τεμάχιο, στον τροχό λείανσης, τους λειαντικούς κόκκους και στο απόβλιττο. Εξαιτίας όμως της πολυπλοκότητας της κατεργασίας, συχνά καθορίζεται από τις πειραματικές μετρήσεις. Στο μοντέλο Hahn το 1962, υπολογίστηκε για το λόγο αυτό ο λόγο καταμερισμού της θερμότητας τεμαχίου-τροχού Rws, ο οποίος εξαρτάται από την ακτίνα επαφής των λειαντικών κόκκων και ο οποίος παραμένει σχεδόν σταθερός για ένα συγκεκριμένο λειαντικό υλικό και ένα συγκεκριμένο τεμάχιο, ενώ ο λόγος Rws της εισερχόμενης θερμότητας μεταβάλλεται. Η ροή θερμότητας προς το απόβλιττο εκτιμήθηκε από την ενέργεια του αποβλίττου. Η ενέργεια μπορεί να βρεθεί εξισώνοντας τη μέγιστη θερμοκρασία στην επιφάνεια του τεμαχίου με αυτήν της σύνθετης επιφάνειας, η οποία αποτελείται από τους λειαντικούς κόκκους και το υγρό λείανσης. Μια διαφορετική προσέγγιση προτάθηκε το 1989 από τους Lavine, Malkin και Jen στην οποία οι λειαντικοί κόκκοι και το υγρό λείανσης δεν συνέθεταν μία σύνθετη επιφάνεια. Το ενεργειακό μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως απαιτεί τιμές για τη φθορά στην επίπεδη περιοχή και για το σχήμα των κόκκων, οι οποίες δεν ειναι γνωστές επακριβώς και έτσι χρησιμοποιήθηκαν προσεγγιστικές τιμές στην ανάλυση. Πιο σύνθετα θερμικά μοντέλα αναπτύχθηκαν από τους Lavine, Jen και Demetriou το 1989, το 1991 και το 2000. Σε αυτά, η μεταφορά θερμότητας του τεμαχίου, των λειαντικών κόκκων και του υγρού λείανσης συμψηφίζονται ώστε να προκύψει ένα συνολικό θερμικό σύστημα που θα εκτιμά τη θερμοκρασία λείανσης. Εκτός από τις έρευνες για την ανάλυση της ροής της θερμότητας, βασιζόμενος στο μοντέλο του Jaeger, ο Bei ασχολήθηκε το 1964 με την τριγωνική ροή θερμότητας και αποτελεί μία από τις πρώτες προσπάθειες για τον καθορισμό της ροής θερμότητας στη ζώνη λείανσης με ρεαλιστικό τρόπο και η οποία σύμφωνα με περαιτέρω μελέτες προσδίδει τη ροή θερμότητας με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με τα αρχικά μοντέλα του Jaeger. Σημαντική επίδραση στη θερμοκρασία έχει επίσης και το μήκος επαφής του τροχού με το τεμάχιο λόγω της ελαστικής του παραμόρφωσης.

Μοντέλα λείανσης με υγρό κοπής [4.1.1]

Με σκοπό τη μείωση της ειδικής ενέργειας λείανσης, τη μείωση της θερμοκρασίας στη ζώνη λείανσης αλλά και την αύξηση της διάρκειας ζωής του τροχού, χρησιμοποιούνται κατάλληλα λιπαντικά και ψυκτικά υγρά. Το 1992, οι Guo και Malkin[25] ανέλυσαν θεωρητικά τη ροή του υγρού προβλέποντας την ταχύτητα του, το βάθος διείσδυσης και την απαραίτητη ροή στη ζώνη λείανσης με βασικές παραδοχές: αμελητέα βαρυτική δύναμη και δισδιάστατη ροή υγρού. Τη συγκεκριμένη ανάλυση τροποποίησαν το 1996 οι Chang[26] ώστε να συμπεριληφθεί και η επίδραση της υδροστατικής πίεσης που δημιουργείται από την επιφάνεια του τροχού λείανσης και του τεμαχίου και προέκυψαν αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, το 1991 διεξήχθη έρευνα για τη μοντελοποίηση της ροής του υγρού κάτω από τον τροχό λείανσης από τους Schumack, οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα σχέδιο διαταραχής στην περίπτωση λείου τροχού με μικρό διάκενο μεταξύ του τροχού και του τεμαχίου καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως οι εξισώσεις Navier- Stokes πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση με σωστό τρόπο της ροής του υγρού στην κατάλληλη γεωμετρία. Ωστόσο, για την απλοποίηση των εξισώσεων Navier- Stokes προτείνεται η υπόθεση των HagenPoiseulle, η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση της πίεσης στο τόξο του τροχού καθώς και την επίδραση της κλίσης της πίεσης κατά την περιστροφή του τροχού. Τόσο ο Hryniewicz όσο και ο Reynolds ασχολήθηκαν με τη ροή του ρευστού το 2001, με τον δεύτερο να ερευνά τη στρωτή και την τυρβώδη ροή κάνοντας χρήση της εξίσωσης Reynolds και της τροποποιημένης εξίσωσης Reynolds, με έμφαση στην υδροδυναμική πίεση που αναπτυσσόταν στη ζώνη επαφής. Οι Nguyen και Zhang διαπίστωσαν το 2005 [27] πως η χρήση του τροχού λείανσης με θάλαμο υγρού κατά διαστήματα, μειώνει σημαντικά την ποσότητα του ψυκτικού υγρού που χρησιμοποιείται καθώς και βελτιώνει την επιφάνεια. Έτσι, αφού χρησιμοποίησαν την αστάθεια (jet instability) των Weber και Newton και έλαβαν υπόψη τις παραμέτρους για λείανση, ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη του ρυθμού ροής που παρέχεται το υγρό (mist flow rate). Σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση της θερμότητας λείανσης που μπορεί να προκαλέσει θερμική βλάβη στην επιφάνεια του τεμαχίου έχει η ψύξη μέσω συναγωγής.

Το 1968 ο Des Resuisseaux[28] εισήγαγε το συντελεστή υγρού λείανσης για μεταφορά θερμότητας στο μοντέλο των Carslaw- Jaeger και θεωρητικά απέδειξε τη σημαντικότητα της ψύξης με υγρό στην παραγόμενη θερμοκρασία της επιφάνειας. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή φανερώνει την αποδοτικότητα της ψύξης στη ζώνη λείανσης η οποία είναι σημαντική μεταβλητή για τον καθορισμό της επιφανειακής θερμοκρασίας του τεμαχίου. Επειδή η τιμή του συντελεστή όχι μόνο δεν είναι εύκολα υπολογίσιμη, αλλά ακόμα και η εκτίμηση θεωρείται πολύ δύσκολη, οι περισσότερες προηγούμενες έρευνες επικεντρώθηκαν στη διανομή της ενέργειας της συνολικής θερμότητας λείανσης για να εκτιμηθεί η επιφανειακή θερμοκρασία του τεμαχίου. Οι Jin, Stephenson και Rowe ανέπτυξαν το 2003 ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή εντός της ζώνης λείανσης και τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι τιμές του συντελεστή είναι αρκετά υψηλότερες από τις προηγούμενες. Η ταχύτητα του τροχού και το πάχος του προφίλ του υγρού επηρεάζουν τις τιμές του συντελεστή συναγωγής. Αφού το πάχος του προφίλ επηρεάζεται με τη σειρά του από την ταχύτητα του τροχού, το πορώδες, το μέγεθος των κόκκων και το μέγεθος του ακροφυσίου, γίνεται σαφές πως για λείανση με

μεγάλο βάθος (όπως HEDG) η ανώτερη τιμή του πάχους του προφίλ του υγρού επιτυγχάνεται εύκολα λόγω της αυξημένης πίεσης και του υψηλού ρυθμού παροχής του ψυκτικού. Έναν διαφορετικό τρόπο για την εύρεση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ανάλογα με τις παραμέτρους λείανσης και της παροχής ψυκτικού πρότειναν οι Wittmann το 2006. Ακόμα, ο υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τριγωνική ολισθαίνουσα πηγή θερμότητας. Αρκετές προσπάθειες έγιναν για την πειραματική μέτρηση του χρήσιμου ρυθμού ροής υγρού λείανσης. Ενώ οι Guo και Malkin τόσο το 1992 όσο και το 2001 έβγαλαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα συγκρίνοντας τους προβλεπόμενους ρυθμούς ροής με τα πειραματικά δεδομένα, οι Gviashville, Webster και Rowe ανέπτυξαν ένα μοντέλο, που με βάση την πίεση του ψυκτικού στη ζώνη επαφής, υπολόγιζε το ρυθμό ροής. Μέσω της αντίστροφης ανάλυσης της μεταφοράς θερμότητας στη λείανση, οι Guo και Malkin κατέληξαν σε τρεις μεθόδους:

- τη μέθοδο αντιστοίχισης θερμοκρασίων (temperature matching)
- τη μέθοδο ολοκλήρωσης (integral)
- τη διαδοχική μέθοδο (sequential)

, κάθε μία από τις οποίες αξιολογήθηκε τόσο για την ακρίβεια, όσο και για τη σταθερότητα με ψηφιακή προσομοίωση. Οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόστηκαν για λείανση χάλυβων με τροχούς Al2O3 και CBN ώστε να εκτιμηθεί περαιτέρω η ροή θερμότητας και ο συντελεστής για συναγωγή. Η πρώτη μέθοδος έχει μειονέκτημα στη μέτρηση των σφαλμάτων, ενώ η τρίτη μέθοδος αν και παρέχει σταθερά αποτελέσματα παραλείπει αρκετές λεπτομέρειες.

Κινηματικά Μοντέλα Λείανσης [4.1.2]

Οι πρώτες προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση του τομέα της κινηματικής στη λείανση, έγιναν το 1969 από τους Yoshikawa, Kassen και από το Law το 1973, στις οποίες γινόταν περιγραφή επίπεδων ή/και κυλινδρικών επιφανειών λείανσης με τη χρήση δισδιάστατου μοντέλου, υπολογίζοντας την τραχύτητα ή τις διατομές του τεμαχίου και του αποβλίττου. Η κύρια ιδέα των βασικών κινηματικών προσεγγίσεων έγκειται στη μοντελοποίηση του προφίλ επιφάνειας και της επιφανειακής τραχύτητας του τεμαχίου, είτε προς τη διεύθυνση της λείανσης, είτε κάθετα προς αυτήν. Ο Yoshikawa επικεντρώθηκε το 1968 στη διάταξη των κόκκων και τη γεωμετρία του αποβλίττου, ενώ αντίθετα, το 1969, ο Kassen στο πάχος και το μήκος του αποβλίττου καθώς και στον αριθμό δυναμικών κόψεων των κόκκων.

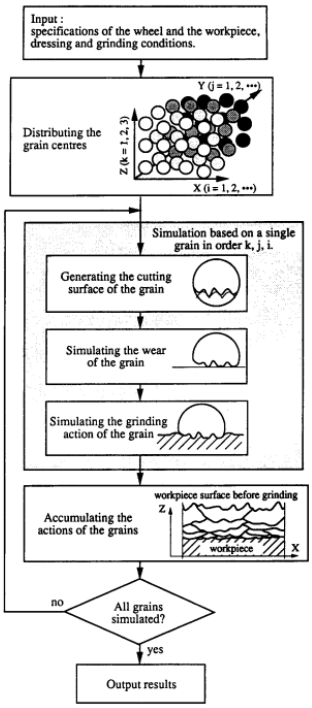
Οι θεμελιώδεις ιδέες των κινηματικο-γεωμετρικών μοντέλων λείανσης έχουν κοινό στοιχείο με τις βασικές κινηματικές προσεγγίσεις το γεγονός πως και τα δύο μοντέλα εξαρτώνται από τη γεωμετρική διείσδυση του τροχού στο τεμάχιο. Σε αντίθεση με τις δισδιάστατες βασικές κινηματικές προσεγγίσεις, το κύριο σημείο στα συγκεκριμένα μοντέλα είναι ο πλήρης υπολογισμός της γεωμετρικής διείσδυσης μεταξύ του τροχού και του τεμαχίου σε ένα υψηλότερο επίπεδο διακριτοποίησης. Έτσι, ο υπολογισμός του όγκου του τεμαχίου που

αφαιρείται γίνεται συναρτήσει της σχετικής κίνησης μεταξύ του τεμαχίου και του τροχού με την άμεση μοντελοποίηση της επαφής του κάθε κόκκου με το τεμάχιο. Γίνεται με αυτόν τον τρόπο δηλαδή μια πιο ολοκληρωμένη διαδικασία ανάλυσης και βαθύτερη κατανόηση του μικροσκοπικού επιπέδου της λείανσης. Η εμφάνιση ισχυρότερων υπολογιστικών συστημάτων από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 όχι μόνο έκαναν εφικτές τις αριθμητικές προσομοιώσεις με τη χρήση τρισδιάστατων κινηματικο-γεωμετρικών μοντέλων, αλλά τις έκαναν και πιο ρεαλιστικές βελτιστοποιώντας συγκεκριμένες εφαρμογές λείανσης. Τα κινηματικό-γεωμετρικά μοντέλα αναπτύχθηκαν το 1982 από τον Koning, ακολούθησε το 1983 ο Steffens , ο Goerne το 1986 . Το 1991 ο Fawcett , το 1995 από τον Domala, το 1996 από τον Chen και τον τον Inasaki, το 1998 Warnecke, το 1999 από τον Koshy και Zitt . Συνέχισαν μελέτες το 2000 οι Kempa και Cooper,το 2002 οι Gong , Tuerich και τον Zhou και το 2004 ο Becker. Η διαφορά με τις βασικές κινηματικές προσεγγίσεις οι οποίες έχουν ως κύρια παράμετρο εξόδου την επιφανειακή τραχύτητα, είναι πως τα κινηματικό-γεωμετρικά μοντέλα έχουν παραμέτρους εξόδου τη διατομή του αποβλίττου, τις ειδικές δυνάμεις λείανσης του τεμαχίου και την ταχύτητα του τροχού, σύμφωνα με τις οποίες υπολογίζονται οι δυνάμεις κάθε κόκκου, η κατανομή της πίεσης καθώς και στατιστικές παράμετροι για το πάχος του αποβλίττου και για τον αριθμό των κινηματικών κόκκων. Η πλειοψηφία των παραπάνω μοντέλων θεωρεί πως η αφαίρεση του υλικού γίνεται με ιδανικό τρόπο, δηλαδή οι κόκκοι του τροχού αφαιρούν το σύνολο του όγκου του υλικού χωρίς να ληφθεί υπόψη η πλαστική παραμόρφωση των κόκκων. Ωστόσο, ορισμένα μοντέλα περιλαμβάνουν προηγμένες περιγραφές που επιτρέπουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της ζώνης επαφής και του τεμαχίου.

Η γενική προσέγγιση του κινηματικό-γεωμετρικού μοντέλου είναι εξαιρετικά ευέλικτη, δεν περιορίζεται στη σχέση του τεμαχίου με τους λειαντικούς κόκκους και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για εσωτερική και εξωτερική λείανση, όσο και για γωνιακή λείανση. Το 1982 και το 1987, οι Konig και Stephens ανέπτυξαν μοντέλα τροχού λείανσης με βάση τις σαρωμένες επιφάνειες του τροχού, παρουσιάζοντας μια μέθοδο προσομοίωσης κλειστού βρόγχου που βασιζόταν στην εργασία του Steffens.Η συγκεκριμένη μέθοδος περιλαμβάνει τον επαναληπτικό αριθμητικό υπολογισμό της διαδικασίας λείανσης χρησιμοποιώντας παραμέτρους όπως η τοπογραφία του τροχού, παράμετροι set-up των εργαλειομηχανών, η θερμική αγωγιμότητα και τις μηχανικές και ελαστικές ιδιότητες του συστήματος της εργαλειομηχανής με το τεμάχιο. Οι παράμετροι που προκύπτουν από την παραπάνω μοντελοποίηση είναι η εφαπτομενική και η κάθετη συνιστώσα της δύναμης, η θερμοκρασία και η τραχύτητα του τεμαχίου και γίνεται δυνατή η περιγραφή της ροής της θερμότητας κατά το μήκος της ζώνης επαφής.

Ο Inasaki [29] παρουσίασε το 1996 ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της απόδοσης της λείανσης, όπου μοντελοποιήθηκε η τοπογραφία του τροχού λείανσης με την αποθήκευση μεγάλου αριθμού μετρούμενων προφίλ της επιφάνειας του τροχού, γύρω 23 από την περίμετρο του. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι οι δυνάμεις κοπής, η κανονική και η εφαπτομενική δύναμη λείανσης, η ισχύς και η τραχύτητα του τεμαχίου. Από την άλλη, ο Chen[30] όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 κάνοντας χρήση μεγάλου αριθμού σφαιρών που είχαν κατανεμηθεί τυχαία στον τροχό, δημιούργησε το 1996 και το 1998 την τρισδιάστατη τοπογραφία του τροχού λείανσης. Η προσομοίωση της κινηματικής του κάθε κόκκου, όπως και η διερεύνηση της ελαστικής του παραμόρφωσης έχει απόδοση κοπής της τάξης του 75%

σύμφωνα με τον Chen, άρα το 25% του μη παραμορφωμένου αποβλίττου παραμένει στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Παράμετροι εισόδου θεωρούνται οι φυσικές ιδιότητες του υλικού, ο προσδιορισμός του τροχού, ενώ προκύπτουν οι δυνάμεις λείανσης, το προφίλ της επιφάνειας του τεμαχίου και η τραχύτητα του τεμαχίου. Το 1998 και το 1999, οι Warnecke και Zitt ανέπτυξαν μια δομημένη προσομοίωση για τη λείανση σε επίπεδη επιφάνεια και για τη λείανση εσωτερικά και εξωτερικά του τεμαχίου. Ο Zitt επικεντρώθηκε στις κινηματικές σχέσεις της λείανσης και τη δημιουργία ενός σύνθετου, τριών διαστάσεων μοντέλου τροχού, ενώ παράλληλα η προκαταρκτική εργασία για τη μοντελοποίηση διεξήχθη το 1991 και το 1994 από τους Warnecke, Merz και Spiegel. Η περιγραφή του τροχού λείανσης δίδεται τόσο από τη μακρογεωμετρία, όσο και από τη μικρογεωμετρία. Η πρώτη δείχνει ένα ιδανικό κυκλικό προφίλ γύρω από την περιφέρεια του τροχού, το οποίο έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει λάθη και μη ομοιόμορφη φθορά του τροχού. Αντίθετα, η μικρογεωμετρία περιγράφεται από τη στοχαστική κατανομή των κόκκων στο τρισδιάστατο χώρο. Τα δεδομένα που προκύπτουν έπειτα από την προσομοίωση είναι το πάχος του μη παραμορφωμένου αποβλίττου, το μήκος του αποβλίττου, η επιφάνεια του τεμαχίου και οι δυνάμεις λείανσης. Στο μοντέλο του Koshy το 1999[31] , η προσομοίωση αφορούσε το διαμάντι και βασιζόταν σε τρισδιάστατους τροχούς λείανσης των οποίων οι κόκκοι ήταν σφαιρικοί με κανονικά διανεμημένη διάμετρο. Δεδομένο ήταν η τοπογραφία του τροχού, ενώ απαραίτητες ήταν και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού του τεμαχίου. Ο κύριος στόχος ήταν να διερευνηθεί η επιρροή του υλικού του τεμαχίου ως προς την τραχύτητα του. Σε περαιτέρω προσομοιώσεις το 2003, ο Koshy τοποθέτησε τους κόκκους σε συγκεκριμένο μοτίβο με αποτέλεσμα να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του τροχού λείανσης.



Διάγραμμα προσομοίωσης Chen [Σχήμα 3.1] [30]

Κινηματικο-εμπειρικά μοντέλα [4.1.3]

Στα κινηματικό-εμπειρικά μοντέλα προκύπτουν παρόμοια δεδομένα εξόδου με τα κινηματικό-γεωμετρικά μοντέλα με διαφορά όμως τον τρόπο υπολογισμού των χαρακτηριστικών και των αποτελεσμάτων της διαδικασίας. Δηλαδή, ενώ τα κινηματικό-γεωμετρικά μοντέλα κάνουν τους υπολογισμούς από τη διαδρομή κίνησης του εργαλείου, τα κινηματικό-εμπειρικά χρησιμοποιούν εμπειρικές και αναλυτικές εξισώσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η προσομοίωση κυλινδρικής λείανσης σε βύθιση το 1993 από τον Chiu , όπου μέσω αναλυτικών και εμπειρικών μαθηματικών μοντέλων προβλέπονται οι δυνάμεις λείανσης, η ισχύς, ο πραγματικός ρυθμός αφαίρεσης υλικού, η θερμική διαστολή, η φθορά του τροχού λείανσης, η τραχύτητα και η καμπυλότητα του τεμαχίου. Εκτός από το μοντέλο του Chiu, υπάρχει και το μοντέλο του Hecker το 2003, το οποίο βασίστηκε στο πιθανολογικό μοντέλο μη παραμορφωμένου αποβλίττου που εκφράστηκε στην κατανομή πιθανοτήτων του Rayleigh. Τα πεδία εφαρμογής της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι για κυλινδρική και επιφανειακή λείανση, εγκάρσια και σε βύθιση. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι το πάχος του αποβλίττου, η κανονική δύναμη ανά κόκκο, η συνολική δύναμη λείανσης, η τραχύτητα του τεμαχίου και το βάθος της πλαστικής παραμόρφωσης.

Προσομοίωση Διεργασιών Λείανσης Με Πεπερασμένα Στοιχεία [4.1.4]

Λόγω της συνεχούς αύξησης της πολυπλοκότητας των προβλημάτων κατεργασίας και των γεωμετρικών σχημάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτά έπρεπε να αναπτυχθούν λογισμικά που να τα επιλύουν. Δημιουργήθηκε δηλαδή η ανάγκη προσεγγιστικού υπολογισμού πολλών και περίπλοκων διαφορικών εξισώσεων για την περιγραφή των κατεργασιών. Στα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται γίνεται προσπάθεια να συνδεθούν παράγοντες και συνθήκες κοπής μιας κατεργασίας με τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, τα απόβλιττα, τις τάσεις και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος η οποία με την βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να βρει εφαρμογή σε όλα τα προβλήματα κατεργασιών. Το 1944 ο Merchant πρότεινε το πρώτο αναλυτικό μοντέλο που έθεσε τα πλαίσια για τη μοντελοποίηση της ορθογωνικής κοπής. Με την εφεύρεση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος, οι τεχνικές με πεπερασμένα στοιχεία (FEM-Finite Element Method) άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ερευνητές για τη μοντελοποίηση των κατεργασιών. Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των

πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται σε τετράγωνα, τρίγωνα ή πολύγωνα και ενώνονται αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία με κόμβους. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο. Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που μας ενδιαφέρουν περισσότερο και αραιότερα σε περιοχές μικρότερου ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων. Στη συνέχεια δίνονται ιδιότητες στα στοιχεία ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιούν και καθορίζονται οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος λύνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που είναι σε μητρωική μορφή και υπολογίζονται οι τιμές κάθε βαθμού ελευθερίας . Όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν, τόσο πιο καλά προσεγγίζεται το πραγματικό πρόβλημα που έχει άπειρους κόμβους. Ωστόσο ο υπολογισμός κάθε πεπερασμένου στοιχείου απαιτεί υπολογιστικό χρόνο και έτσι δεν είναι δυνατό να αυξηθεί απεριόριστα ο αριθμός των κόμβων αν είναι επιθυμητό το αποτέλεσμα σε σύντομο χρόνο. Η χρήση του υπολογιστή επιβάλλεται για την μοντελοποίηση ενός προβλήματος FEM και εκτός των γρήγορων υπολογισμών μπορεί επιπλέον να δώσει τα αποτελέσματα σε πιο παραστατική μορφή.

Μοντέλα προσομοίωσης Euler – Lagrange [4.1.5]

Δύο είναι τα βασικότερα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση κατεργασιών κοπής, του Euler και του Lagrange. Κατά τη διατύπωση του Euler, το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι χωρικά σταθερό και το υλικό ρέει μέσα από αυτό προκειμένου να προσομοιώσει το σχηματισμό του αποβλίττου. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι η ποσότητα των στοιχείων για την μοντελοποίηση του κομματιού προς κατεργασία και του αποβλίττου είναι μικρή και το γεγονός ότι δεν υφίστανται στρέβλωση, δεδομένου ότι το πλέγμα είναι εκ των προτέρων γνωστό, άρα και η μορφή του αποβλίττου. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί δύσκολο προγραμματισμό και από πειραματικά δεδομένα πρέπει να είναι ήδη γνωστά ,πριν από την κατασκευή του μοντέλου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως από ερευνητές για την προσομοίωση της σταθερής κατάστασης της διαδικασίας κοπής. Στη μέθοδο Lagrange, τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα με το υλικό και το εργαλείο σε σχέση με το τεμάχιο. Το απόβλιττο σχηματίζεται με τη χρήση ενός κριτηρίου διαχωρισμού μπροστά από την ακμή του εργαλείου. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη παραμόρφωση του πλέγματος που παρατηρείται κατά την προσομοίωση. Λόγω της σύνδεσης του πλέγματος στο υλικό του τεμαχίου το πλέγμα καταστρέφεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης στη ζώνη κοπής. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα εφαρμόζεται ένας συνεχής επανασχηματισμός (remeshing) του πλέγματος και μια προσαρμογή του πλέγματος που επιβαρύνουν τον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμού. Πλέον ,το μοντέλο του Lagrange προτιμάται περισσότερο από το μοντέλο του Euler στον τομέα της έρευνας. Ενώ παράλληλα έχουν αναπτυχθεί μοντέλα που χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό και των δύο μεθόδων δίνοντας έμφαση στα προτερήματα τους. Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιεί την τεχνική του διαχωρισμού των κόμβων με τη μέθοδο διάδοσης ρωγμής για να μελετήσει την περιοχή αποκόλλησης του αποβλίττου από το τεμάχιο. Έτσι όταν ο τελευταίος κόμβος της κοπτικής ακμής πλησιάζει πιο κοντά από μια απόσταση τον κόμβο του τεμαχίου και ικανοποιούνται ορισμένες φυσικές παράμετροι, αυτός με την σειρά του διασπάται σε δύο κόμβους. Και οι δύο

μέθοδοι στοιχίζουν υπολογιστικά αρκετά και συγχρόνως απαιτείται τοπική πύκνωση του πλέγματος του τεμαχίου κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με το κοπτικό εργαλείο.

Βασικά Στοιχεία για την Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία (FEA) [4.1.6]

Η μέθοδος FEA (Πεπερασμένω Στοιχείων) και η μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (FDM), εφαρμόζονται για μοντέλα τα οποία περιγράφουν μέσω διαφορικών εξισώσεων, όπως οι διαφορικές εξισώσεις του Lame, έναν μεγάλο αριθμό φυσικών διαδικασιών. Στις παραπάνω μεθόδους, η πραγματική διαδικασία μετασχηματίζεται σε ένα μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία οριοθετούνται από στοιχεία-κόμβους. Συγκεκριμένα, στη FDM σχηματίζεται μια δομή πλέγματος από τα στοιχεία και οι επιμέρους εξισώσεις επιλύονται από ένα σύστημα εξισώσεων. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η δυσκολία για την εφαρμογή της σε σχήματα περίπλοκης γεωμετρίας και πως δεν είναι εφικτή η ανάλυση ενός μέρους της πλεγματικής δομής αλλά ολόκληρης. Ωστόσο, η FDM αποτελεί το κατάλληλο μοντέλο για την ανάλυση της θερμικής αγωγιμότητας στη λείανση για ορισμένα προβλήματα κατά τα έτη 1995, 1998, 2000 και 2003.

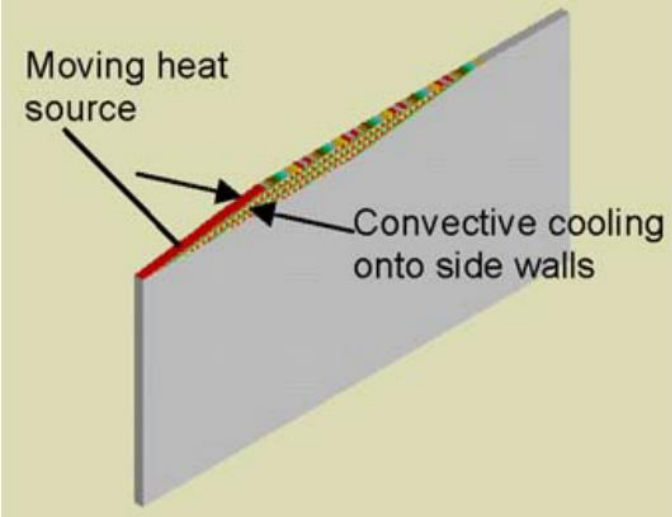
Στη FEA, οι διαφορικές εξισώσεις επιλύονται εφαρμόζοντας τις λεγόμενες “συναρτήσεις σχήματος ή συναρτήσεις παρεμβολής”, οι οποίες οδηγούν σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με γνωστές τις μηχανικές ιδιότητες του τεμαχίου και το θερμικό ή μηχανικό φορτίο. Η ακαμψία εξαρτάται από το υλικό και τη γεωμετρία του τεμαχίου. Το πλεονέκτημα στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η δυνατότητα δημιουργίας ακανόνιστων πλεγμάτων για σύνθετες δομές, καθώς και η δυνατότητα προσαρμογής του πλέγματος τοπικά, ιδιαίτερα χρήσιμο για μεγάλα μοντέλα. Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα FEA μπορούν να διαχωριστούν σε μακροσκοπικές και μικροσκοπικές έννοιες για την προσομοίωση των κατεργασιών λείανσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμόζεται η μακροσκοπική προσομοίωση προκειμένου να υπολογιστούν οι επιδράσεις της θερμότητας και της μηχανικής επιφανειακής πίεσης σε ολόκληρο το τεμάχιο, όσον αφορά την κατανομή της θερμοκρασίας. Οι υπολογισμοί βασίζονται κυρίως στα θερμομηχανικά και ελαστομηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού, ενώ δεν συμπεριλαμβάνεται η συμπεριφορά του υλικού στην πλαστική παραμόρφωση και ο σχηματισμός του αποβλίττου. Αντίθετα, η μικροσκοπική προσομοίωση περιορίζεται σε αναλύσεις της ζώνης επαφής. Με αυτόν τον τρόπο μοντελοποιείται ένα μικρό τμήμα του τεμαχίου. Η μικροσκοπική προσομοίωση αποτελεί την πιο λεπτομερή προσέγγιση της πραγματικής διαδικασίας λείανσης μέχρι σήμερα, αλλά πρέπει να περιλαμβάνει την ελαστικό-πλαστική συμπεριφορά του υλικού και το σχηματισμό του αποβλίττου. Ωστόσο, δεν υπάρχει η δυνατότητα από τους Η/Υ να αναπτύξουν επαρκώς ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για ολόκληρο τον τροχό λείανσης στις μικροσκοπικές προσομοιώσεις, ή να συμπεριληφθεί ο σχηματισμός του αποβλίττου στις μακροσκοπικές προσομοιώσεις.

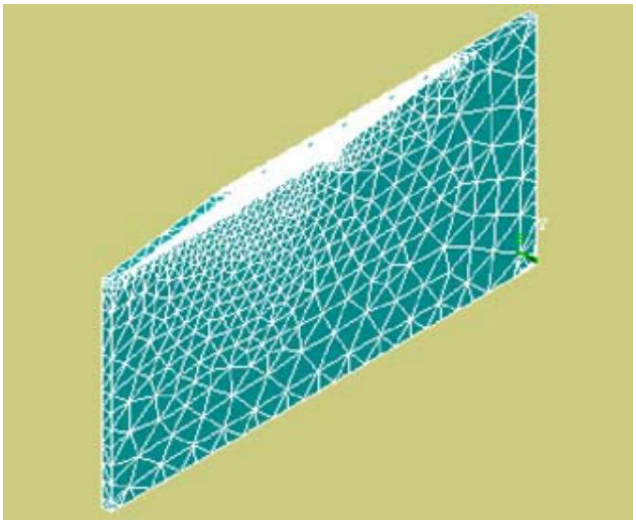
Για τη διεξαγωγή λείανσης σε εικονικό περιβάλλον, είναι απαραίτητο να μειωθούν οι μεταβλητές τους συστήματος, ενώ στη συνέχεια γίνεται ολοκλήρωση όλων των σχετικών παραμέτρων της κατεργασίας και των οριακών συνθηκών. Οι παράμετροι εισόδου για μια τυπική προσομοίωση FEA είναι η γεωμετρία του τεμαχίου, οι δυνάμεις λείανσης, οι παράμετροι της διαδικασίας, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ψυκτικού και του τεμαχίου, οι συνθήκες ψύξης και οι οριακές συνθήκες. Ο τροχός λείανσης στα

περισσότερα μακροσκοπικά μοντέλα του 1999 παρουσιάζεται ως ο συνδυασμός της πηγής θερμότητας και της επιφανειακής πίεσης, ο οποίος μετακινείται πάνω στο τεμάχιο με την ταχύτητα πρόωσης. Για να προκύψουν ρεαλιστικές παράμετροι πρέπει να περιγραφεί με ακριβή τρόπο η κατανομή της πηγής θερμότητας εντός της ζώνης επαφής μεταξύ του τεμαχίου και του τροχού λείανσης. Επειδή όμως αυτή η μέθοδος προσδιορισμού του προφίλ της πηγής θερμότητας είναι αρκετά χρονοβόρα, τα προφίλ συχνά θεωρούνται ιδανικά, με την υπόθεση πως είναι ορθογώνια, τριγωνικά, παραβολικά ή τραπεζοειδούς μορφής για απλούστευση της διαδικασίας. Για το σχεδιασμό αυτών των απλουστευμένων πηγών θερμότητας, είναι αναγκαίο να είναι γνωστές οι τιμές για την πυκνότητα θερμοροής qw . Είναι γνωστό πως η πυκνότητα ροής εκτός από τις παραμέτρους της διαδικασίας (όπως η ταχύτητα κοπής) και τις γεωμετρικές συνθήκες επαφής (το μήκος επαφής , το πλάτος του τροχού στη ζώνη επαφής), εξαρτάται και από τη διάχυση ενέργειας , τη διανομή της θερμότητας και την αξονική δύναμη. Για την προσομοίωση μιας πραγματικής διαδικασίας λείανσης απαιτείται να ληφθεί υπόψη το ψυκτικό υγρό. Μια εφικτή προσέγγιση παρουσιάστηκε το 1970 και το 1980 από τους Lowin και Des Ruisseaux[32]. Με τη χρήση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας “α”, λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις στην επιφάνεια του τεμαχίου του ψυκτικού και της απαγωγής της θερμότητας. Μέσω πειραμάτων από το 1985, 1991, 1995, 1999 ως το 2001 ή μέσω συνθηκών ροής για επίπεδη πλάκα με εξαναγκασμένη συναγωγή (αναλυτική μέθοδος), καθορίζεται και η τιμή του “α”.

Διάφορες Εφαρμογές Προσομοίωσης [4.1.7]

Έρευνες έδειξαν ότι οι περισσότερες βλάβες κατά τη διαδικασία λείανσης σε χάλυβες προέρχονται από τη θερμότητα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσίασαν την προσομοίωση ως ένα κατάλληλο εργαλείο για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων που προκαλούνται από την κατεργασία. Η προσομοίωση FEA επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της κατεργασίας και βοηθά το χρήστη στην ανάλυση σύνθετων πειραματικών αποτελεσμάτων. Αρκετά μοντέλα FEA αναπτύχθηκαν για την επιφανειακή λείανση. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο εφαρμόστηκε το 2000, το 2004 και το 2005 από τον Hoffmeister[33, 34, 35] για να προσομοιώσει την κατανομή της θερμοκρασίας κατά τη λείανση.Το 2016, μια άλλη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων βασίστηκε στο μοντέλο του Jaeger για δύο διαστάσεις και είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών πεδίων στο τεμάχιο. Το συγκεκριμένο μοντέλο το οποίο μετέπειτα βελτιώθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των κρίσιμων θερμοκρασιών για τις επιδράσεις στη σκλήρυνση. Μια ακόμη μέθοδος είναι η τρισδιάστατη προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων για τη διερεύνηση της παροδικής μεταφοράς θερμότητας σε συνθήκες HEDG το 2004 από τους Jin και Stephenson[36]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η στατική κατάσταση μεταφοράς θερμότητας επιτυγχάνεται μόλις επιτυγχάνεται το μέγιστο μήκος επαφής. Ακόμα, μελετάται η επίδραση της ψύξης του τοιχώματος με συναγωγή από το υγρό κατά τη λείανση σε λεπτές πλάκες χάλυβα 2 χιλιοστών (mm) [Εικόνα 3.2].



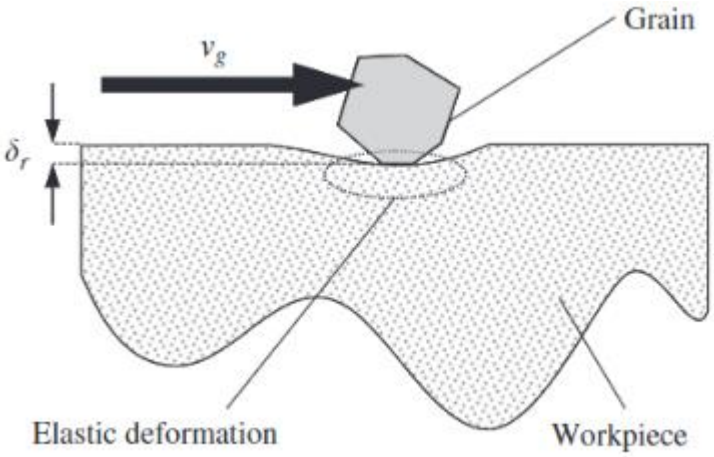


Γεωμετρία και πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων 3d σε μεταφορά θερμότητας σε HEDG[Εικόνα 3.2][36]

Η μέθοδος FEA εφαρμόζεται επίσης για την προσομοίωση προφίλ τεμαχίων που έχουν κατεργαστεί. Ο καθορισμός του προφίλ του φορτίου βοηθά στο να γίνει αντιληπτή η φθορά του εργαλείου στα πειράματα. Ακόμα, είναι σημαντικό το γεγονός πως ήδη έχει συμπεριληφθεί η επίπτωση μιας τυχαίας αλλαγής σε μία παράμετρο της διαδικασίας και έτσι μπορούν να προσδιοριστούν εκ των προτέρων οι νέες παράμετροι. Ένα επιπλέον παράδειγμα της εφαρμογής των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο υπολογισμός τόσο των θερμοκρασιών, όσο και των τάσεων στη λείανση σκληρυμμένου χάλυβα το 2001 από τους Moulik και Yang[37]. Το θερμικό φορτίο κατά τη διάρκεια της λείανσης προσομοιώνεται ως μία ομοιόμορφα ή τριγωνικά κατανεμημένη πηγή θερμότητας, η οποία κινείται σε ολόκληρη την επιφάνεια ενός θερμικά μονωμένου συστήματος. Οι υπολογισμένες θερμικές κατανομές βασίζονται στην ανάλυση των επιδράσεων της πρόωσης, της ροής θερμότητας και έχουν παρόμοιες τιμές με αυτές των πειραμάτων.

Η μέθοδος FEA βρίσκει εφαρμογή στην έρευνα για επιφανειακή λείανση του 100Cr6 με κορούνδιο και CBN, όπου μέσω μιας αναλυτικής προσέγγισης βασισμένη στους Jaeger και Carslaw και του μοντέλου Πεπερασμένω στοιχείων υπολογίζεται η θερμοκρασία της ζώνης επαφής. Τα αποτελέσματα και των δύο προσεγγίσεων ήταν σε συμφωνία για βάθος κοπής 120 μm κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου. Οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν για το εργαλείο cBN ήταν περίπου οι μισές σε σχέση με αυτές του κορουνδίου. Με βάση τις θερμοκρασιακές κατανομές που προέκυψαν, υπολογίστηκαν με τη χρήση ενός άλλου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων οι παραμένουσες τάσεις και για τα δύο υλικά το 1986. Θα μπορούσε να αποδειχθεί πως η λείανση με κορούνδιο προκαλεί εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις, ενώ μπορεί να αμεληθεί η θερμική επίδραση στις παραμένουσες τάσεις στην περίπτωση λείανσης με CBN.

Η ενσωμάτωση του τεμαχίου και του τροχού λείανσης σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία ακόμα προσέγγιση. Ένα σύστημα "πολλαπλών σωμάτων" που συμπεριλαμβάνει τον τροχό και το τεμάχιο αναπτύχθηκε το 1999 από τον Λαμπρόπουλο Ιωάννη προκειμένου να διερευνηθούν οι επιδράσεις στη ζώνη επαφής. Με τα δεδομένα που παρατηρήθηκαν μπορεί να προβλεφθεί το πώς αντιδρά ο τροχός λείανσης στους κραδασμούς λόγω κατεργασίας. Αυτό επηρεάζει τους μηχανισμούς αφαίρεσης υλικού ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού Η έννοια της μικροσκοπικής προσομοίωσης βασίζεται στη δοκιμή χάραξης μοναδικού κόκκου. Διάφορα τέτοια μοντέλα αναπτύχθηκαν από το 1999 έως το 2008 για την ανάλυση της θερμοκρασίας και των τάσεων κατά το σχηματισμό του αποβλίττου και αποτελούνται από ένα σύστημα που περιλαμβάνει τον κάθε κόκκο ξεχωριστά και το τεμάχιο. Με αυτήν την προσέγγιση είναι εφικτή η προσομοίωση της πραγματικής διαδικασίας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3.

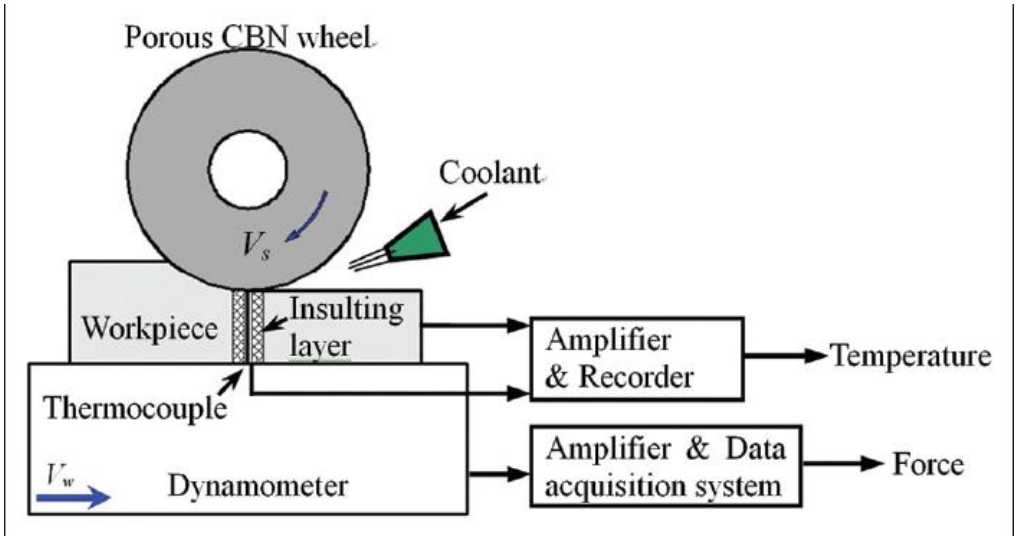


Γενικό μικροσκοπικό μοντέλο λείανσης [Εικόνα 3.3]

Παρόμοια δημοσίευση έγινε και το 2016,από τους Zahedi και Azarhoushang μελετώντας την αλληλεπίδραση μεταξύ των κόκκων cBN Και του κατεργαζόμενου τεμαχίου 100Cr6, μοντελοποιώντας τον λειαντικό τροχό χρησιμοποιώντας την ακριβή τοπογραφία του και μια

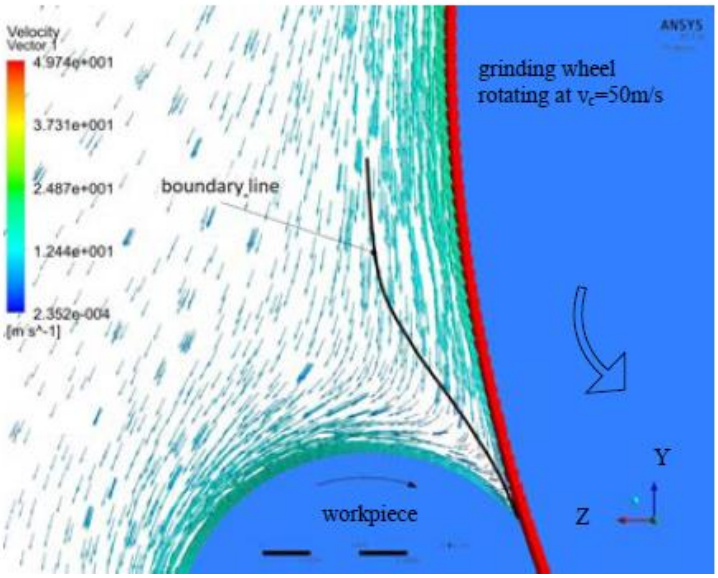
συνάρτηση πιθανής πυκνότητας για τη στοχαστική διανομή των κόκκων cBN.Οι χαμηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με το μικρό πάχος αποβλίττου οδηγούν στον κακό σχηματισμό αποβλίττου και στην αύξηση του λόγου της μικροχάραξης, ενώ υψηλές ταχύτητες κοπής και μεγάλα πάχη οδηγούν σε έναν αυξημένο λόγο μικροκοπής. Οι φθορές στα άκρα του τροχού και η κυματοειδής μορφή, συχνά οφείλονται στην ανισότροπη συμπεριφορά του υλικού και στις υπερβολικές αξονικές πιέσεις. Έτσι, η ύπαρξη τροχών λείανσης με τη δυνατότητα να λειτουργούν με ασφάλεια σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες είναι απαραίτητη.

Το 2015 έγινε πειραματική μελέτη της θερμοκρασίας και της φθοράς του λειαντικού τροχού CBN από τους Zheng Li, J.H. Xu και Wenfeng Ding για τη βελτίωσή τους σε συνθήκες HEDG.[Εικόνα 3.4] [39]



Πειραματική διάταξη για μέτρηση των θερμοκρασίων και των δυνάμεων που αναπτύσσονται [Εικόνα 3.4][39]

Τέλος, το 2017 [38] έγινε μια μελέτη της αλληλεπίδρασης της ροής του ψυκτικού υγρού από το ακροφύσιο και του αέρα γύρω από τον λειαντικό τροχό στην κυλινδρική λείανση χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πακέτο ANSYS.Η μοντελοποίηση ήταν τρισδιάστατη με τον λειαντικό τροχό να περιστρέφεται και το τεμάχιο να είναι ακίνητο με ελάχιστο κενό ανάμεσά τους.Επίσης, δημιουργήθηκε πλέγμα περιμετρικά των στερεών (λειαντικού τροχού και τεμαχίου) για μοντελοποίηση του ψυκτικού υγρού ως νερό, το οποίο εισέρχεται από το άνω όριο [Εικόνα 3.5].Με βάση τα αποτελέσματα γίνονται συγκρίσεις των διάφορων παροχών ψυκτικού υγρού για την ίδια ποιότητα επιφανείας του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Μοντελοποίηση λειαντικού τροχού και κατεργαζόμενου τεμαχίου [Εικόνα 3.5] [38]

Υλοποίηση Υπολογιστικού Μοντέλου Λείανσης στο Comsol [Κεφάλαιο 5]

Για την επίλυση προβλημάτων στα οποία η πολυπλοκότητά τους σε διάφορα στάδια καθιστούν αδύνατη την επίλυσή τους, συχνά καταφεύγουμε στη χρήση διαφόρων αριθμητικών μεθόδων. Μια από τις πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM), που αποτελεί μια εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων, και η βάση για τη χρησιμοποίησή της τέθηκε τη δεκαετία του ’40. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μια πολύπλοκη περιοχή, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, που ονομάζονται Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements), τα οποία συνθέτουν ένα πλέγμα,

στους κόμβους του οποίου υπολογίζονται προσεγγιστικά οι ζητούμενες προς επίλυση τιμές. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική επίλυση διαφόρων φυσικών προβλημάτων σε μόνιμες ή μεταβατικές καταστάσεις. Συνήθως, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα στάδια:

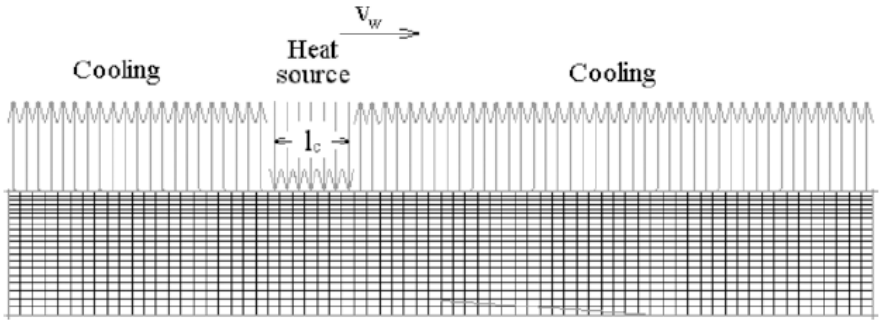
1. Η γεωμετρική κατασκευή του μοντέλου, η οποία υλοποιείται σε ένα πρόγραμμα CAD.
2. Η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία του γεωμετρικού μοντέλου, καθώς και η εισαγωγή επιπλέον δεδομένων για τον τρόπο επίλυσης (pre processing).
3. Η επίλυση των παραπάνω δεδομένων, με χρήση της κατάλληλης υπολογιστικής μεθόδου από τον επιλύτη (solver).
4. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της επίλυσης, με τη χρήση του Μετεπεξεργαστή (post processor) για την απεικόνιση και μελέτη των αποτελεσμάτων της επίλυσης του προβλήματος.

Το Πακέτο Λογισμικού Comsol Multiphysics [5.1]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την υπολογιστική προσομοίωση και μελέτη των φαινομένων μεταφοράς από κινούμενη πηγή θερμότητας σε τεμάχια από χάλυβα (C45, 100Cr6, Cr12) , χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol Multiphysics 5.2a. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση διάφορων εφαρμογών στο πεδίο του μηχανικού, μέσω της επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων (partial differential equations) με τις αρχικές και συνοριακές τους συνθήκες. Βασίζεται σε προηγμένες αριθμητικές μεθόδους για την μοντελοποίηση και επίλυση σύνθετων φυσικών προβλημάτων και διαθέτει ευρεία γκάμα φυσικών εφαρμογών όπως δομική ανάλυση, ηλεκτρικά φαινόμενα, μεταφορά θερμότητας, ακουστική, ρευστά και οπτική, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για σχεδιασμό εφαρμογών συζευγμένων φυσικών φαινομένων. Επίσης, παρέχει στο μηχανικό κατάλληλο σχεδιαστικό περιβάλλον για μοντελοποίηση σε δύο ή τρεις διαστάσεις καθώς και αλληλεπίδραση με άλλα προγράμματα όπως η MATLAB και το AutoCad. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί το γεγονός ότι οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στις παρακάτω υποενότητες παρέχονται από το βασικό εγχειρίδιο του Comsol [107] στον τομέα της μηχανικής στερεών.

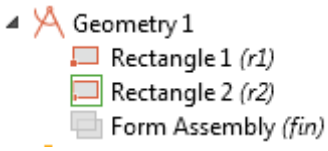
Σχεδιασμός της Γεωμετρίας των Μοντέλων [5.2]

Προκειμένου να υπάρχει συγκριτική δυνατότητα των παραμέτρων που θα εξετασθούν στο επόμενο κεφάλαιο, αποφασίσθηκε η δημιουργία τριών μοντέλων, 1) του πιο απλού μοντέλου μιας γεωμετρίας με κινούμενη πηγή θερμότητας το οποίο να προσομοιάζει αυτή του paper [11], βασισμένο στο μοντέλο του Jaeger λαμβάνοντας υπόψιν και την επίδραση του ψυκτικού υγρού, 2) το μοντέλο με δύο περιοχές τεμαχίου – ψυκτικού υγρού και 3) το διφασικό μοντέλο, τόσο σε δισδιάστατη (2D) όσο και τρισδιάστατη (3D) γεωμετρία.



Εικόνα 4.1 Θερμικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων επιφανειακής λείανσης [11]

Η γεωμετρία αποτελείται ουσιαστικά από δύο βασικά μέρη: μόνο το ορθογώνιο τεμάχιο για το απλό μοντέλο και για τα υπόλοιπα το ορθογώνιο τεμάχιο και μια μικρή επιφάνεια στο άνω όριο του τεμαχίου συνδεδεμένα μεταξύ τους σαν ζευγάρι (Identity Pair) με την οποία μοντελοποιείται το ψυκτικό υγρό..Για το σχεδιασμό της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκαν ως επιθυμητές μονάδες μέτρησης μήκους τα mm. Στην εικόνα 4.2 φαίνονται συνοπτικά όλες οι γεωμετρικές οντότητες και διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή της γεωμετρίας.



Εικόνα 4.2 Οι βασικοί γεωμετρικοί υποκόμβοι της γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκε

Σχεδιασμός του κατεργαζόμενου τεμαχίου και της επιφάνειας του ψυκτικού υγρού [5.2.1]

Για το σχεδιασμό του τεμαχίου ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Έχοντας ανοίξει τον πλοηγητή Model Wizard, που εμφανίζεται όταν ανοίξουμε το Comsol, επιλέγουμε σύστημα συντεταμένων για 2D γεωμετρία (αντίστοιχα επιλέγουμε 3D γεωμετρία).

2. Για την κατασκευή του τεμαχίου παραμετροποιήθηκαν κάποιες βασικές διαστάσεις, που φαίνονται στον **πίνακα 4.1**.

Περιγραφή διάστασης	Όνομα μεταβλητής	Τιμή (2D)	Τιμή (3D)
Μήκος	L	35 mm	35 mm
Ύψος	H	5 mm	5 mm
Πλάτος	W	-	5 mm

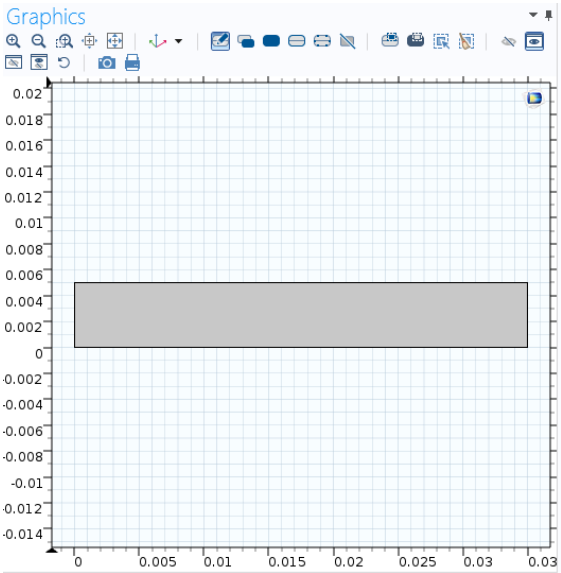
Πίνακας 4.1 Βασικές παράμετροι γεωμετρίας

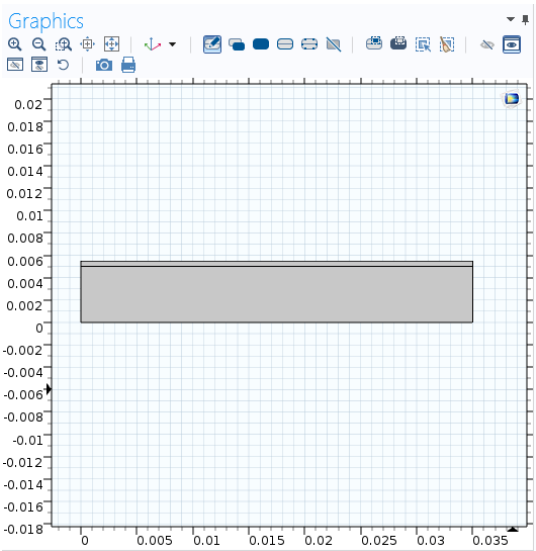
Για την κατασκευή του τεμαχίου επιλέχθηκε η κατασκευή ορθογωνίου, με τη διαδικασία **Geometry→Rectangle**, και επιλογή των επιθυμητών διαστάσεων.

3. Για την κατασκευή της επιφάνειας του ψυκτικού υγρού, ορθογωνίου 35 mm x 1 mm, με παρόμοια διαδικασία με παραπάνω, έτσι ώστε η κάτω πλευρά του να συμπίπτει με άνω όριο του τεμαχίου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

4. Με την εντολή **Geometry→Form Assembly→Identity Pair** συνδέθηκαν οι δυο γεωμετρικές οντότητες που δημιουργήθηκαν: του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του ορθογωνίου που αντιστοιχεί στο ψυκτικό υγρό.

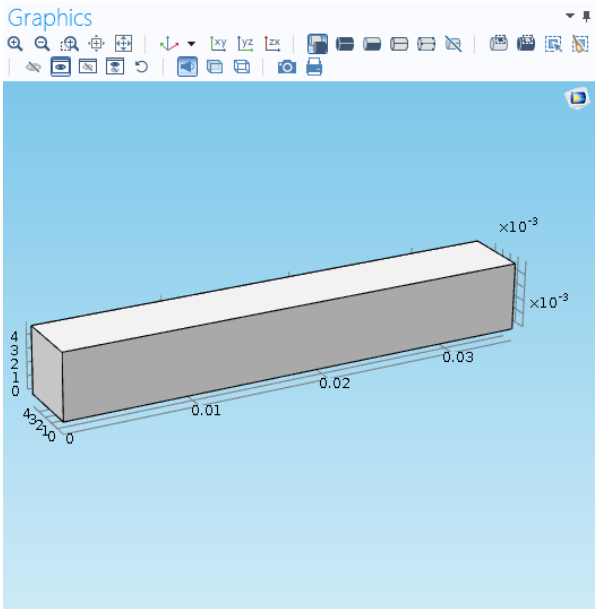
Μετά την επιλογή **Build all** από την ενότητα της γεωμετρίας, οριστικοποιούνται τα μέρη που αποτελείται, τα οποία είναι: 2 τομείς, 4 σύνορα και 4 κορυφές.
Τελικά, μέσω όλων των παραπάνω βημάτων, δημιουργήθηκε η επιθυμητή αρχική γεωμετρία για την υπολογιστική προσομοίωση. Πρέπει να αναφερθεί, ότι αν και σε αρκετές προσομοιώσεις η γεωμετρία άλλαξε, ως προς το ύψος του ορθογωνίου που αντιστοιχεί στο ψυκτικό υγρό, τα βήματα για την υλοποίησή της είναι όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Έτσι, η εικόνα της τελικής γεωμετρίας που προέκυψε παρουσιάζεται στις εικόνες 4.3, 4.4.

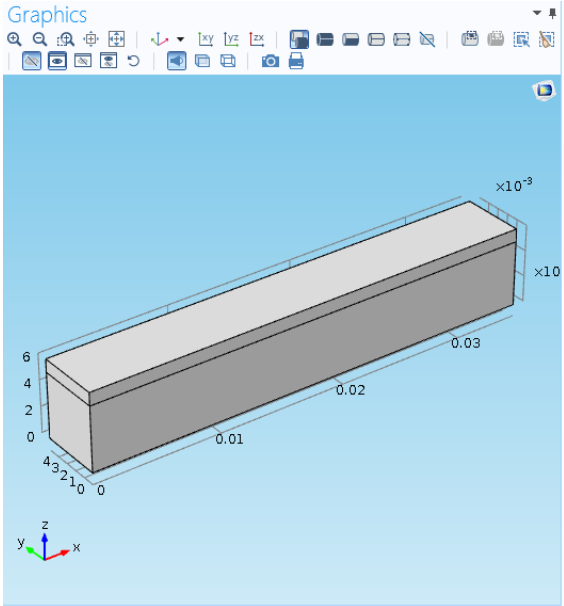




Εικόνα 4.3 Τελική 2D γεωμετρία στη διεπιφάνεια του προγράμματος του α)απλού μοντέλου

β) μοντέλου δύο περιοχών





Εικόνα 4.4 Τελική 3D γεωμετρία στη διεπιφάνεια του προγράμματος του α)απλόυ μοντέλου

β) μοντέλου δύο περιοχών

Επιλογή υλικών[5.3]

Η επιλογή των υλικών έγινε με βάση το ίδιο paper που έχει αναφερθεί και παραπάνω. Τα υλικά των τεμαχίων που επιλέγονται είναι διάφορα είδη χάλυβα, όπως 100Cr6(chromium molybdenum high carbon), C45(medium carbon steel) και Cr12(High carbon and high chromium). Το υλικό της γεωμετρίας που αντιπροσωπεύει το ψυκτικό υγρό, επιλέχθηκε αρχικά ως νερό(Materials→Built in→Water). Παρότι είναι πολύ καλά ενημερωμένη η βιβλιοθήκη υλικών του Comsol, αυτά τα υλικά είναι αρκετά εξειδικευμένα οπότε επιλέχθηκε structural steel (Materials→Built in→Structural Steel) και άλλαξα τις βασικές τους ιδιότητες. Η εντολή **Materials→Add Material** προσθέτει παραπάνω υλικά στο μοντέλο, και καθιστά δυνατή την εισαγωγή τους σε γεωμετρικές οντότητες. Οι βασικές ιδιότητες των παραπάνω υλικών, καθώς και η γεωμετρική οντότητα που εφαρμόζονται, φαίνονται στον **πίνακα 4.2** .

Υλικό	100Cr6	C45	Cr12
Περιοχή	Τεμάχιο	Τεμάχιο	Τεμάχιο
Cp (J/kg K)	460	500	450
Θερμική αγωγιμότητα k (W/m K)	25	46	62
Πυκνότητα ρ (kg/m^3)	7700	7850	7003

Πίνακας 4.2 Βασικές ιδιότητες υλικών

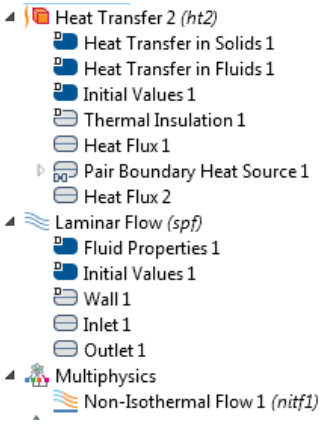
Επίσης, στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι βασικές ιδιότητες των νανορευστών που χρησιμοποιήθηκαν, βασισμένες στο paper [40]

Νανορευστό	Al2O3(3%)	MHS3(2.5% Al2O3 + 1.5% SiO2)
Cp (J/kg K)	0.910373*Cpwater	0.9*Cpwater
Πυκνότητα ρ (kg/m^3)	119.1+0.97*ρwater	132.25+0.96*ρwater
Θερμική αγωγιμότητα k (W/m K)	1.09*kwater	1.14*kwater
Δυναμική συνεκτικότητα μ (Pa s)	40.59051*μwater	42.29*μwater

Πίνακας 4.3 Βασικές ιδιότητες νανορευστών

Ρυθμίσεις φυσικών μοντέλων[5.4]

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο, θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε η φυσική του προβλήματος, ώστε να προσομοιωθεί η επαφή και η μεταφορά θερμότητας τεμαχίου-ψυκτικού υγρού αλλά και της κινούμενης πηγής θερμότητας με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι κόμβοι που δημιουργήθηκαν στην ενότητα της φυσικής:



Εικόνα 4.5 Υποκόμβοι των επιλογών φυσικής

Επιλογή φυσικής[5.4.1]

Για την μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας, από τα διαθέσιμα είδη φυσικών που παρέχει το Comsol στο χρήστη, η πιο κατάλληλη ενότητα φυσικής είναι η μεταφορά θερμότητας στα στερεά (Heat Transfer in Solids) για το απλό μοντέλο και για το μοντέλο με τις δύο γεωμετρίες είναι αυτή της συζυγής μεταφοράς θερμότητας (Conjugate Heat Transfer), η οποία έχει σαν διαθέσιμες επιλογές στρωτή ροή (Laminar Flow) και τυρβώδης ροής (Turbulent Flow).Από τις προαναφερθείσες επιλογές επιλέχθηκε η στρωτή ροή.Στις κατεργασίες λείανσης είναι σημαντική η στρωτή ροή του ψυκτικού υγρού για να πετύχει κανείς την επιθυμητή ποιότητα της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Για τη μεταφορά θερμότητας στα στερεά, σε ένα χρονοεξαρτώμενο πρόβλημα, όπως το δικό μας, για να βρεθεί το θερμοκρασιακό πεδίο το Comsol χρησιμοποιεί την παρακάτω εξίσωση:

(32)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q$$

Για τη μεταφορά θερμότητας στα υγρά χρησιμοποιείται η εξής εξίσωση:

(33)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T = \alpha_p T \left(\frac{\partial p_A}{\partial t} + u \nabla p_A \right) + \tau : S + \nabla(k\nabla T) + Q$$

Για τη στρωτή ροή του υγρού, επιλύονται οι εξισώσεις Navier-Stokes μαζί με την εξίσωση της συνέχειας.

(34)

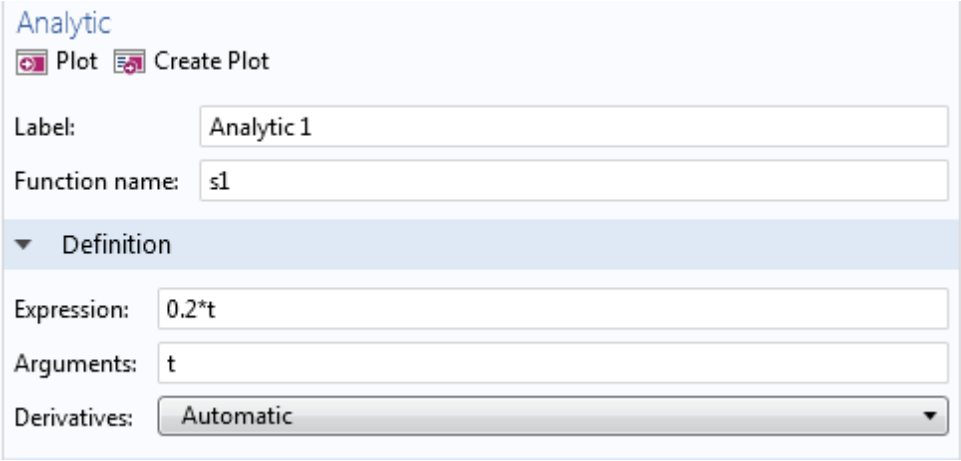
$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\nabla u\right) = -\nabla p + \nabla\left(\mu(\nabla u + (\nabla u)^T\right) - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)\mathrm{I}) + F$$

(35)

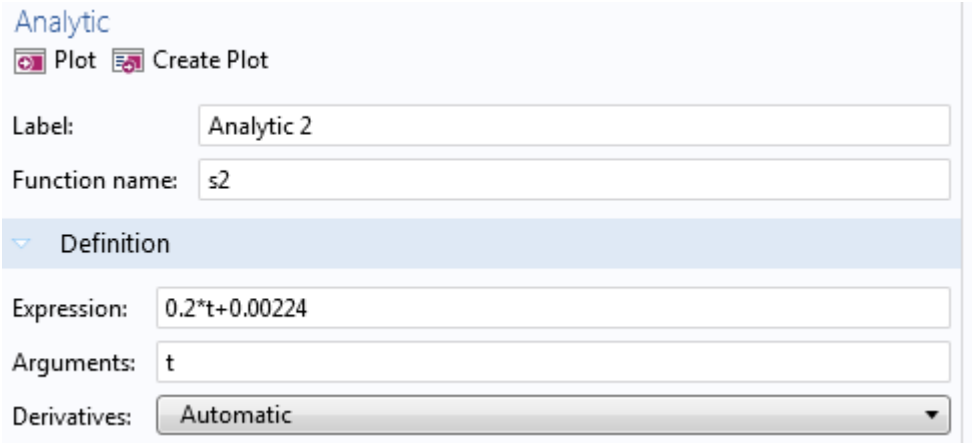
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0$$

Κινούμενη πηγή θερμότητας[5.4.2]

Για τη δημιουργία της κινούμενης πηγής θερμότητας δημιουργήθηκαν δύο αναλυτικές συναρτήσεις (Global Definitions→Function→Analytic) για τα όρια που θα κινείται, λαμβάνοντας υπόψιν και το μήκος επαφής της πηγής.

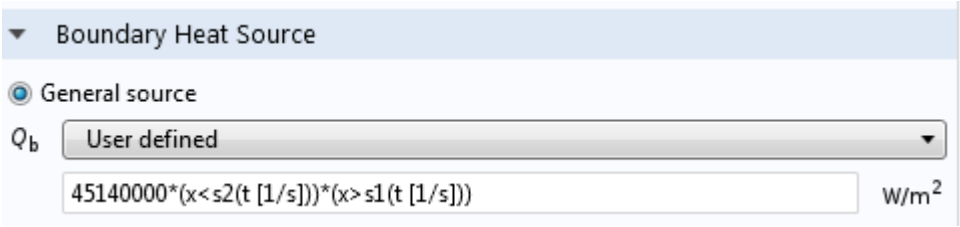


Εικόνα 4.6 Κάτω όριο κινούμενης πηγής "s1"



Εικόνα 4.7 Άνω όριο κινούμενης πηγής "s2"

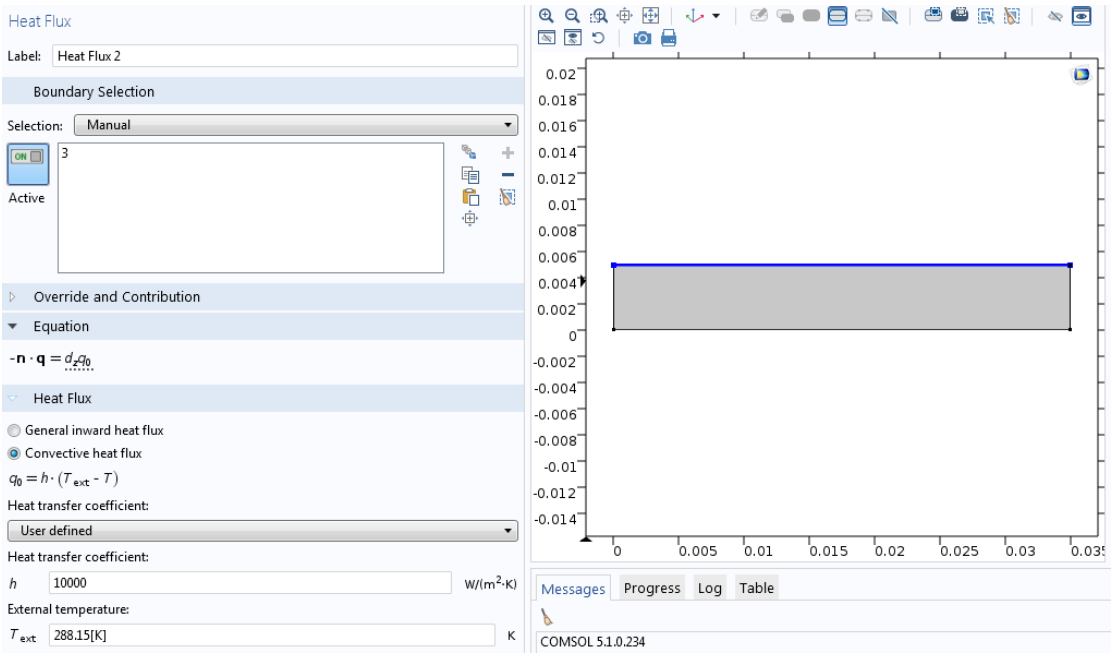
Στη συνέχεια προστέθηκε η πηγή θερμότητας (Pair Boundary Heat Source) στο όριο επαφής τεμαχίου-ψυκτικού υγρού στο Comsol με βάση τα στοιχεία που δίνει το paper:



Εικόνα 4.8 Κινούμενη πηγή θερμότητας στο Comsol

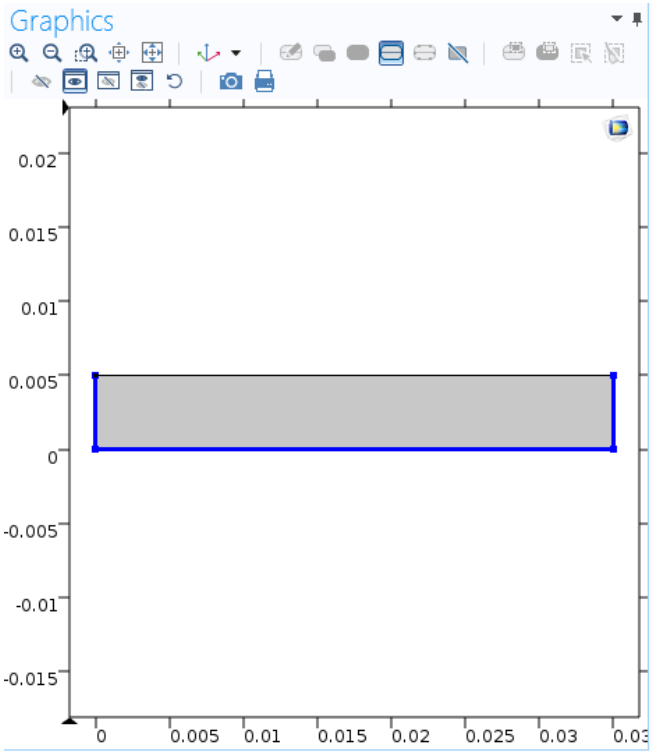
Μοντελοποίηση ψυκτικού υγρού στο απλό μοντέλο[5.4.3]

Για τη μοντελοποίηση του ψυκτικού υγρού στο απλό μοντέλο, προστέθηκε μια επιπλέον ροή θερμότητας (Heat Flux) στο άνω όριο της γεωμετρίας του τεμαχίου με δυνατότητα επιλογής του συντελεστή συναγωγής του υγρού και της εξωτερικής θερμοκρασίας, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.9 Μοντελοποίηση ψυκτικού υγρού στο απλό μοντέλο

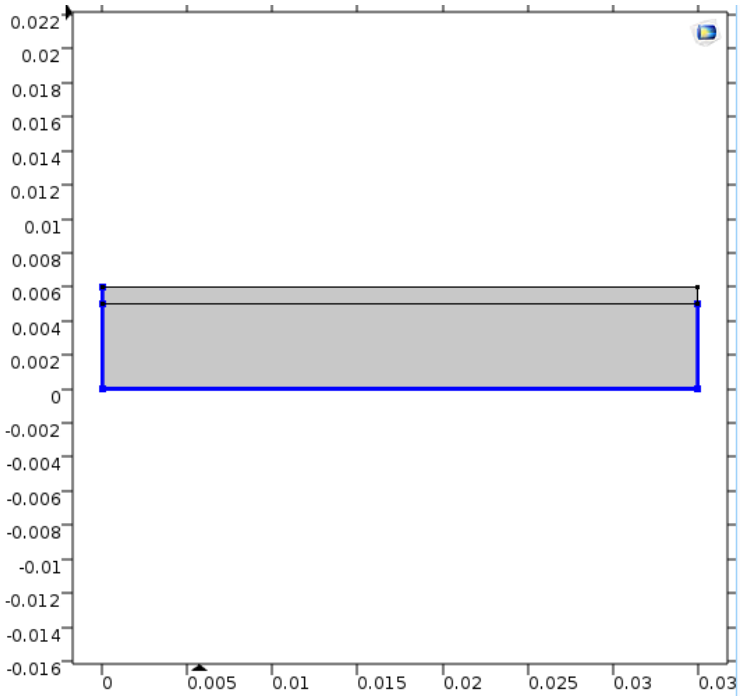
Είναι θερμικά μονωμένο παντού εκτός από το άνω όριο



Εικόνα 4.10 Θερμική μόνωση (μπλε: μονωμένες περιοχές)

Αρχικές-Συνοριακές Συνθήκες και περιορισμοί μοντέλου δύο περιοχών[5.4.4]

Σύμφωνα και με το paper, το τεμάχιο είναι θερμικά μονωμένο παντού, εκτός από την περιοχή που έρχονται σε επαφή το τεμάχιο με το ψυκτικό υγρό, την άνω επιφάνεια του ψυκτικού υγρού και στην έξοδό του όπου βρίσκεται σε ελεύθερη φυσική συναγωγή με τον αέρα. Επικρατεί η συνοριακή συνθήκη μη ολίσθησης στα άνω και κάτω όρια του ψυκτικού υγρού.



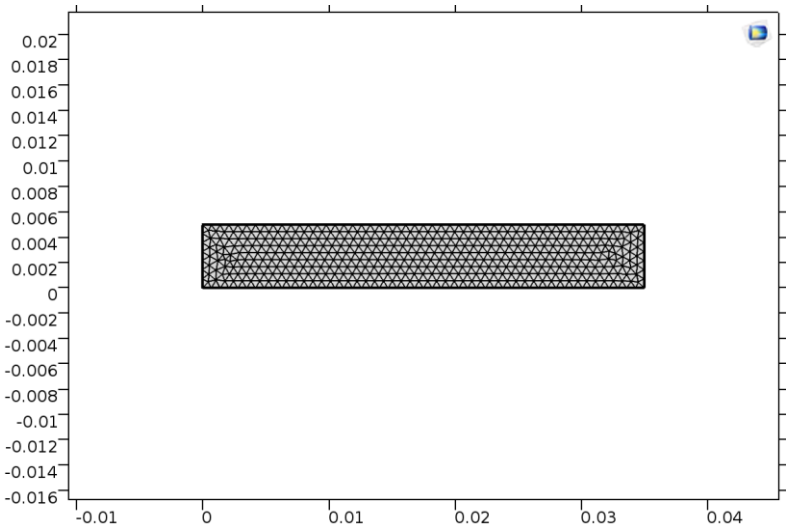
Εικόνα 4.11 Θερμική μόνωση (μπλε: μονωμένες περιοχές)

Η αρχική θερμοκρασία που επικρατεί τόσο στο τεμάχιο όσο και στο ψυκτικό υγρό, είναι αυτή του περιβάλλοντος, T=288.15K (15 ^{o} C).

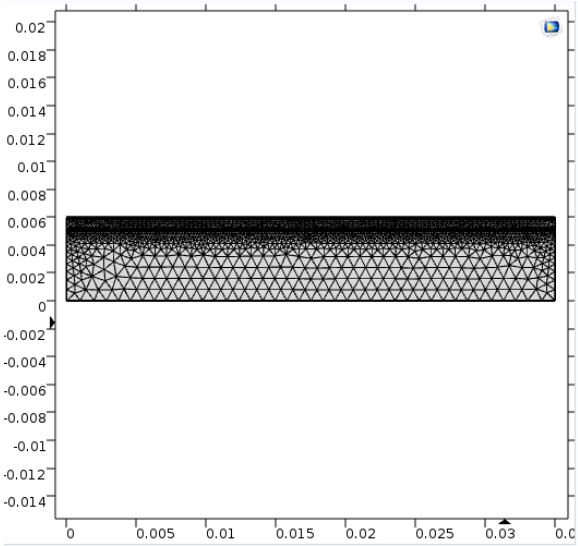
Η αρχική ταχύτητα εισόδου του νερού επιλέχθηκε 3 m/s.

Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης (meshing)[5.5]

Για την κατασκευή του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, το Comsol έχει τη δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος εννέα κατηγοριών, ξεκινώντας από υπερβολικά αραιό (extremely coarse) μέχρι υπερβολικά πυκνό (extremely fine) αλλά και κατευθυνόμενο από το χρήστη, στην ενότητα **Mesh**. Στην παρούσα περίπτωση, η πλεγματοποίηση επιλέχθηκε να γίνει πυκνή (Fine) για τη δισδιάστατη (2D) γεωμετρία και αραιή (Coarse) για την τρισδιάστατη (3D) γεωμετρία. Μετά την επιλογή **Build all**, η τελική πλεγματοποίηση παράγει γύρω στα 6348 πεπερασμένα στοιχεία τομέα και 726 πεπερασμένα στοιχεία συνόρων για τη δισδιάστατη (2D) γεωμετρία, ενώ για την τρισδιάστατη (3D) γεωμετρία παράγει 22114 πεπερασμένα στοιχεία τομέα, 5866 πεπερασμένα στοιχεία συνόρων και 500 πεπερασμένα στοιχεία ακμών. Οι ακριβείς τιμές έχουν μια ελαφριά διαφοροποίηση καθώς εξαρτώνται από τις διαστάσεις της τελικής γεωμετρίας, καθώς έτρεξαν προσομοιώσεις για διαφορετικά "πάχη" ψυκτικού υγρού.Στις εικόνες 4.10 και 4.11 φαίνεται η πλεγματοποιημένη γεωμετρία του απλού μοντέλου και του μοντέλου με τις δύο περιοχές.

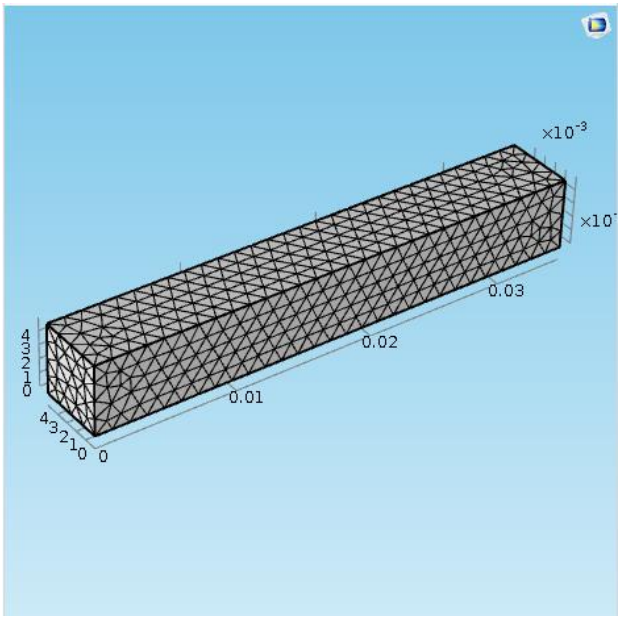


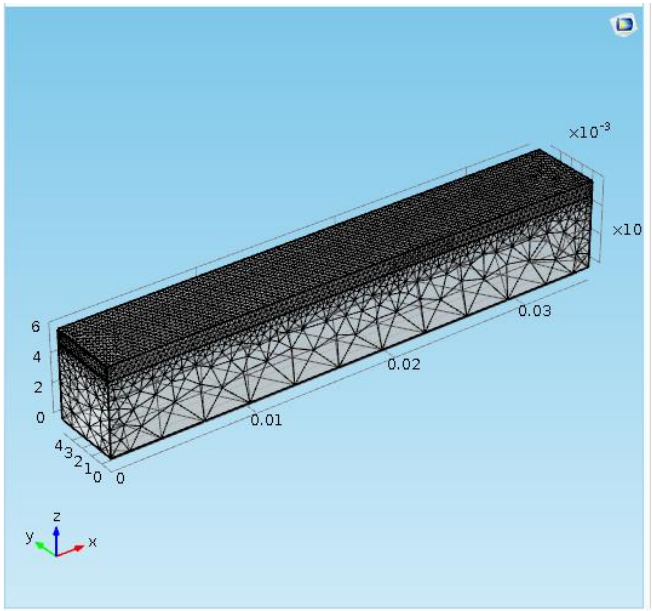
α)



β)

Εικόνα 4.12 Πλεγματοποιημένη εικόνα γεωμετριών 2D για το α) απλό μοντέλο β) μοντέλο δύο περιοχών





α) β)

Εικόνα 4.13 Πλεγματοποιημένη εικόνα γεωμετριών 3D για το α) απλό μοντέλο β) μοντέλο δύο περιοχών

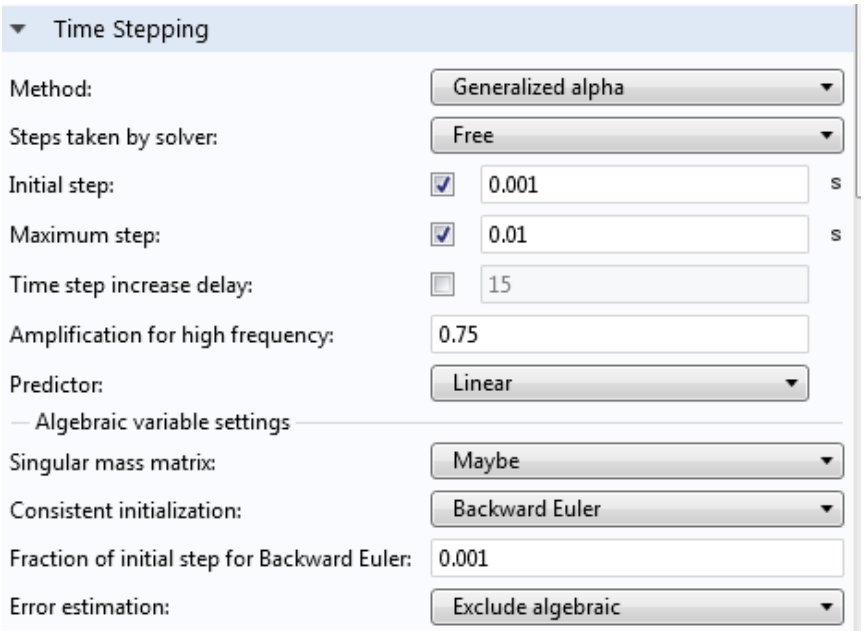
Ρυθμίσεις επίλυσης[5.6]

Οι ρυθμίσεις της επίλυσης του προβλήματος βρίσκονται στην ενότητα Study.Προκειμένου να προσθέσουμε το είδος της επίλυσης που επιθυμούμε, επιλέγουμε Add Study→Time dependent.Η επιλογή δυναμικής ανάλυσης είναι οριακά αποδεκτή για προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, αλλά μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σύγκλισης στην επίλυση αν δεν χρησιμοποιηθεί επαρκώς μικρό μέγιστο χρονικό βήμα.Επιπλέον, σε σχέση με μια στατική ανάλυση προβλέπεται να έχει πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Αρχικά, θέλουμε να ρυθμίσουμε τις χρονικές παραμέτρους με τις οποίες θα τρέξει η προσομοίωση, δηλαδή τον αρχικό και τελικό χρόνο, καθώς και το χρονικό μεσοδιάστημα που θα επιστρέφεται η λύση:

Χρονική μονάδα: Second
Αρχικός χρόνος: 0 s
Τελικός χρόνος: 0.1 s
Ενδιάμεσος χρόνος υπολογισμού: 0.001 s
Σχετική ανοχή: 0.001

Ρυθμίσεις για το χρονικό βήμα (Time stepping)[5.6.1]

Γενικά, οι ρυθμίσεις που αφορούν το χρονικό βηματισμό της λύσης χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή. Το πρώτο βήμα που χρειάζεται να γίνει είναι η επιλογής της μεθόδου επίλυσης. Από τις τρεις διαθέσιμες (BDF, Generalized-α και Runge Kutta), επιλέχθηκε η **Generalized-α**, η οποία θεωρείται ότι, μέσω της παραμέτρου α, ελέγχει καλύτερα την απόσβεση και έχει καλύτερη ακρίβεια αλλά είναι λιγότερο ευσταθής, γι' αυτό καλό είναι να επιλέγεται αρκετά μικρό μέγιστο βήμα. Μέσω δοκιμών, αλλά και προτάσεων από το εγχειρίδιο του Comsol, τέθηκαν οι παρακάτω ρυθμίσεις για τα χαρακτηριστικά του χρονικού βηματισμού:



Εικόνα 4.14 Διεπιφάνεια για το χρονικό βηματισμό (Time stepping)

Λοιπά χαρακτηριστικά σχετικά τη διαδικασία της επίλυσης[5.6.2]

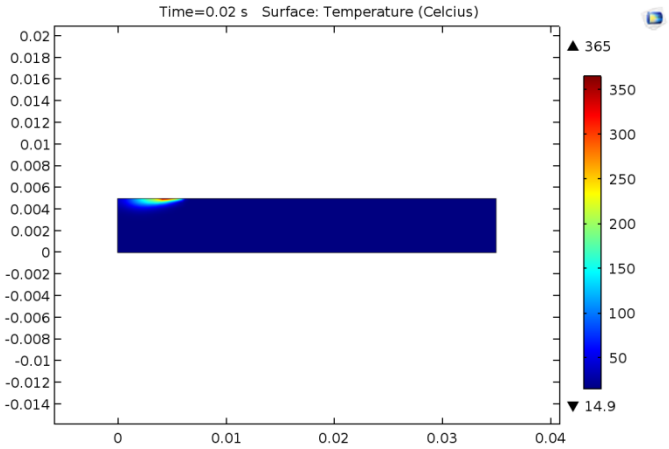
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε υπολογιστή με λειτουργικό Windows 7, με τετραπύρηνο επεξεργαστή 2.66 GHz Q9450 με κρυφή μνήμη 12MB και μνήμη RAM 4GB DDR3 1600 MHz. Ο χρόνος επίλυσης της κάθε προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε κυμάνθηκε μεταξύ 10 – 25 min ανάλογα την προσομοίωση.Χρησιμοποιήθηκαν πολλά δοκιμαστικά μοντέλα (που αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό), που βοήθησαν καθοριστικά στην κατανόηση της λειτουργίας διαφόρων χαρακτηριστικών του προγράμματος, μέχρι τα τελικά μοντέλα, των οποίων η παρουσίαση θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων[Κεφάλαιο 6]

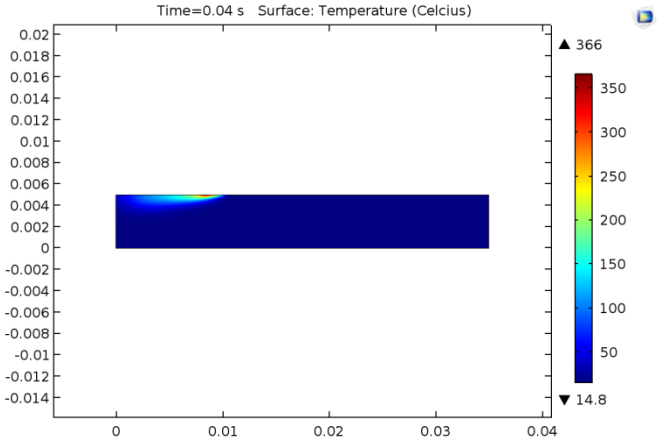
Στο παρόν κεφάλαιο πρόκειται να γίνει η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις τρεις διαφορετικές κατηγορίες προσομοιώσεων που εξετάστηκαν.Αυτές επιγραμματικά είναι:

1. Απλό μοντέλο κινούμενης πηγής
2. Δύο περιοχές τεμαχίου – ψυκτικού υγρού
3. Διφασικό μοντέλο

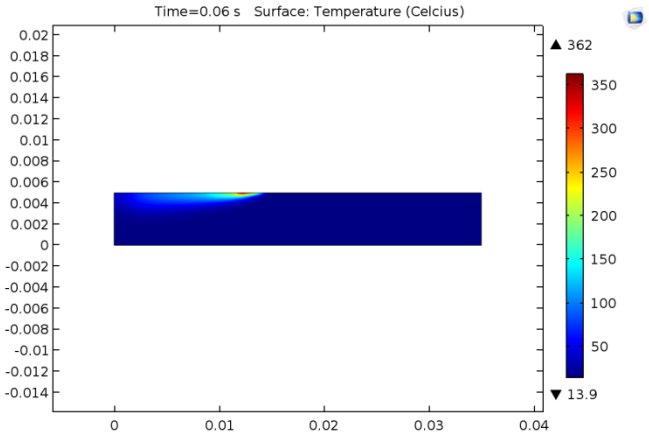
Οι παραπάνω περιπτώσεις επιλέχθηκαν με το σκεπτικό της δημιουργίας ενός υπολογιστικού μοντέλου που θα προσεγγίζει και θα ανταποκρίνεται ρεαλιστικά στα μοντέλα που περιγράφονται στη βιβλιογραφία της επιφανειακή λείανσης, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση των νανορευστών ως ψυκτικά υγρά στη θερμοκρασία του τεμαχίου σε σχέση με το νερό.Στις εικόνες 6.1(α-ε) φαίνεται ενδεικτικά η πορεία της προσομοίωσης του απλού μοντέλου για τεμάχιο 35 x 5 mm,υλικού C45 και βάθος κοπής 0.02 mm, που βασίστηκε στο paper[11] για τις χρονικές στιγμές των 0.02s, 0.04s, 0.06s, 0.08s, 0.01s.



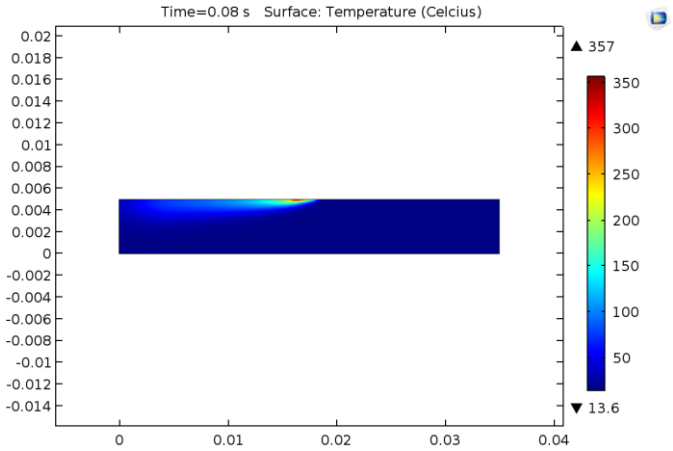
α)



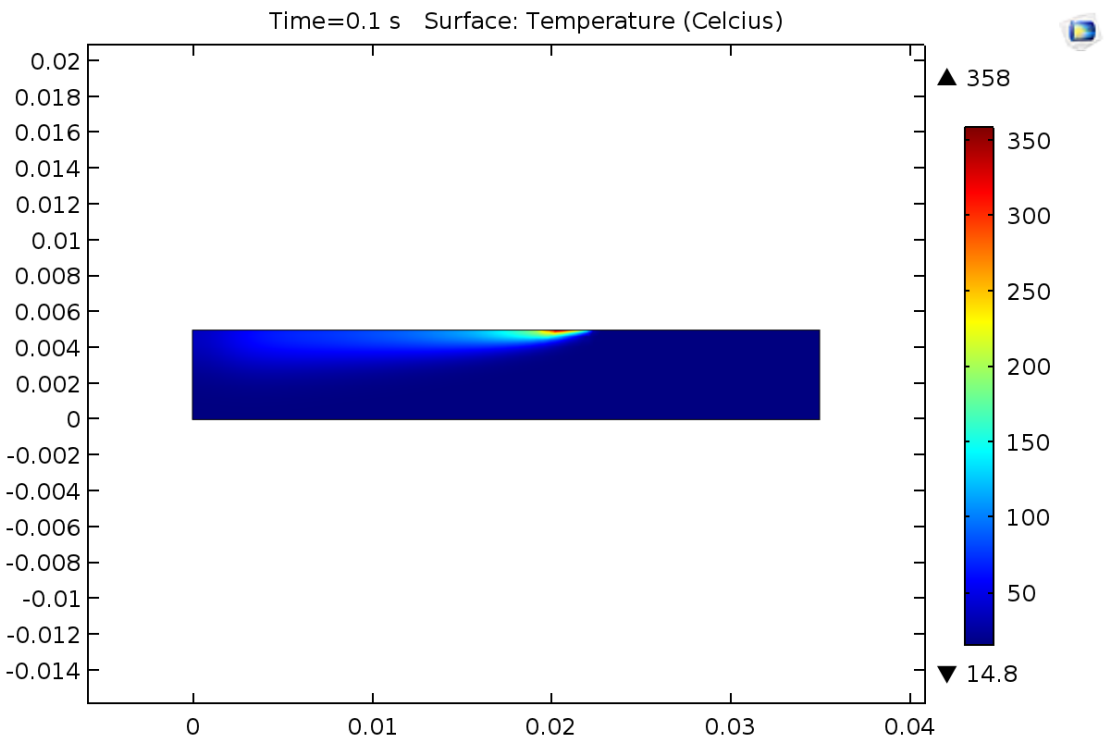
β)



γ)



δ)



ε)

Σε όλες τις περιπτώσεις που περιγράφονται στα επόμενα υποκεφάλαια, το μοτίβο της κινούμενης πηγής θερμότητας είναι όπως περιγράφηκε παραπάνω.Οι εικόνες 5.1, όπως και όλα τα γραφήματα των επόμενων υποκεφαλαίων, δημιουργήθηκαν στην ενότητα των αποτελεσμάτων του Comsol, από τη διαδρομή Results→1D/2D plot group.Οι κύριες μεταβλητές του προγράμματος οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και διερευνήθηκαν για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι:

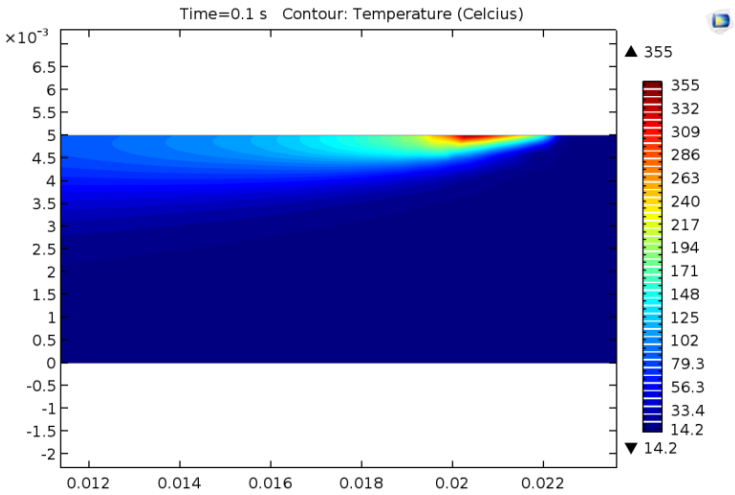
- T – Temperature: απεικόνιση κατανομής θερμοκρασίας
- ht.tfluxy – Total heat flux, y component: συνολική ροή θερμότητας

Απλό μοντέλο κινούμενης πηγής θερμότητας[6.1]

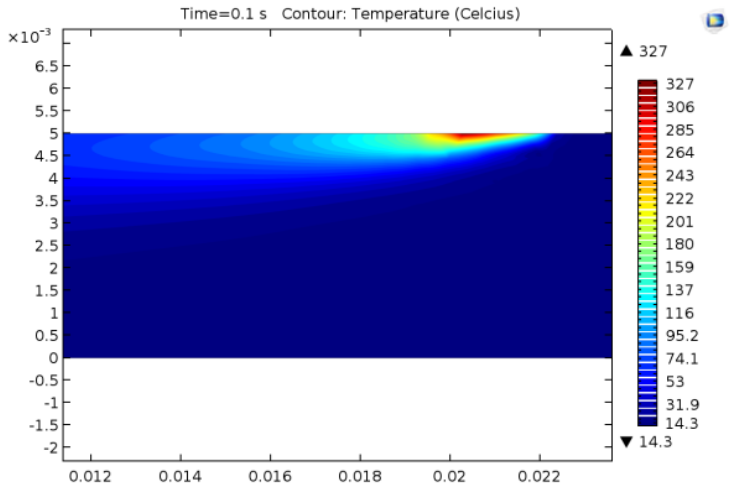
Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα χρησιμοποιηθεί το πιο απλό μοντέλο βασισμένο στο paper[], με υλικό τεμαχίου C45, θα μελετηθεί πόσο θα ήταν η πτώση θερμοκρασίας αν χρησιμοποιηθούν νανορευστά αντί του νερού (h≈1000 W/(m^2K)) για τρία διαφορετικά βάθη κοπής.Ακόμα, θα γίνει σύγκριση μεταξύ δισδιάστατης και τρισδιάστατης γεωμετρίας του συγκεκριμένου μοντέλου, αλλά και ομοιόμορφης με τριγωνικής πηγή θερμότητας.

Βάθος κοπής 0.02 mm[6.1.1]

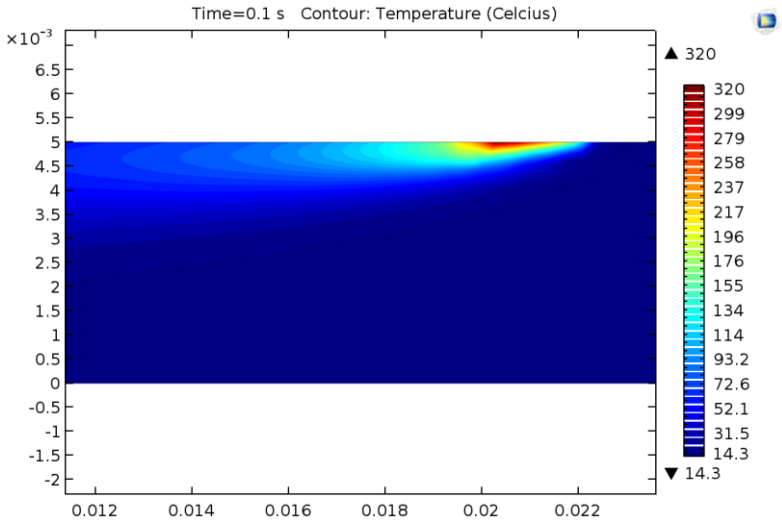
Το βάθος κοπής των 0.02 mm αποτελεί την πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε στο παρόν υποκεφάλαιο.Το μήκος επαφής της πηγής για το συγκεκριμένο βάθος κοπής είναι 2.24 mm και η ροή θερμότητας 45,14 W/mm^2.Στην εικόνα 5.1.1 φαίνεται το διάγραμμα της θερμοκρασίας για όλη την επιφάνει του τεμαχίου, για το νερό, το νανορευστό Al2O3 (3%) και το MHS3 (2.5% Al2O3 + 1.5% SiO2).



α)

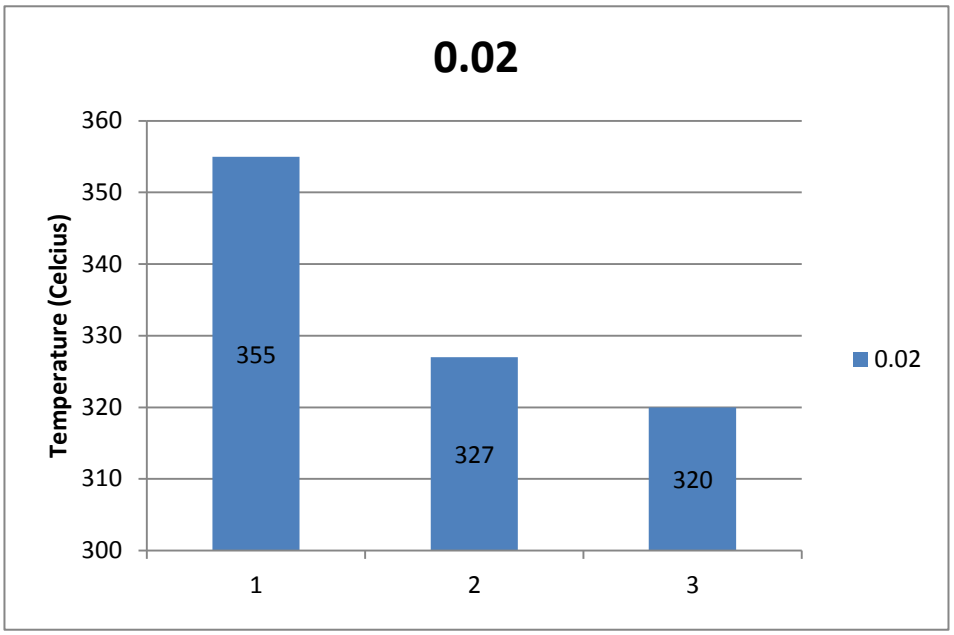


β)



γ)

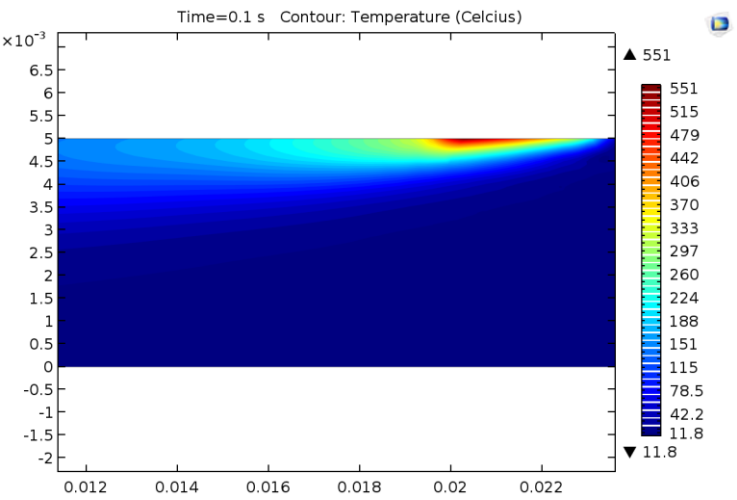
Εικόνα 6.1.2 Θερμοκρασίες τεμαχίου για α) νερό, β)Al2O3, γ) MHS3



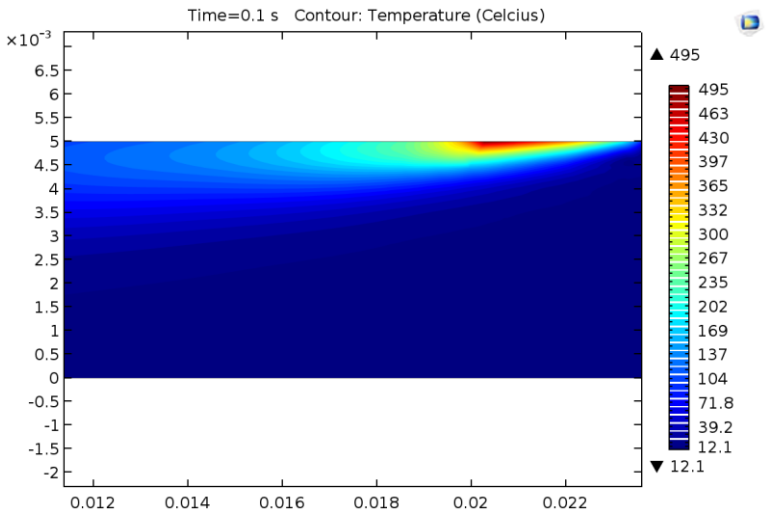
Εικόνα 6.1.3 Θερμοκρασίες τεμαχίου για 1) νερό, 2)Al2O3, 3) MHS3

Βάθος κοπής 0.05 mm[6.1.2]

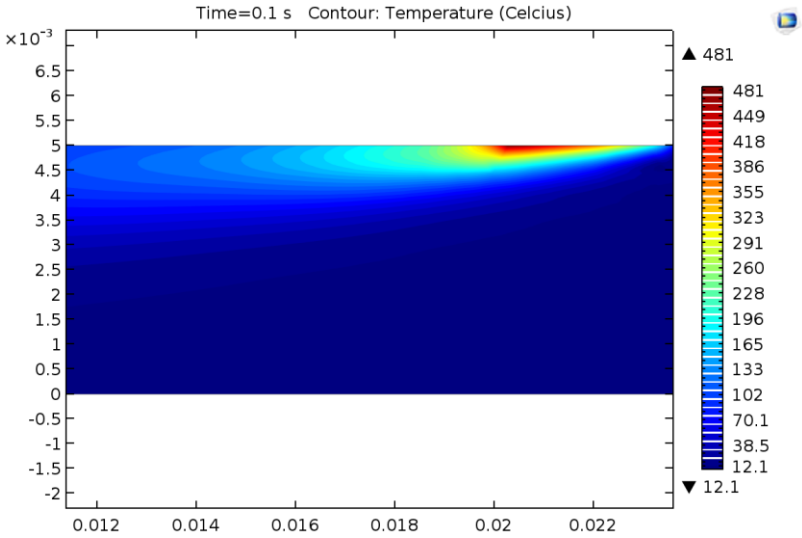
Το βάθος κοπής των 0.05 mm αποτελεί τη δεύτερη περίπτωση που εξετάστηκε.Το μήκος επαφής της πηγής για το συγκεκριμένο βάθος κοπής είναι 3.54 mm και η ροή θερμότητας 54.62 W/mm^2.



α)

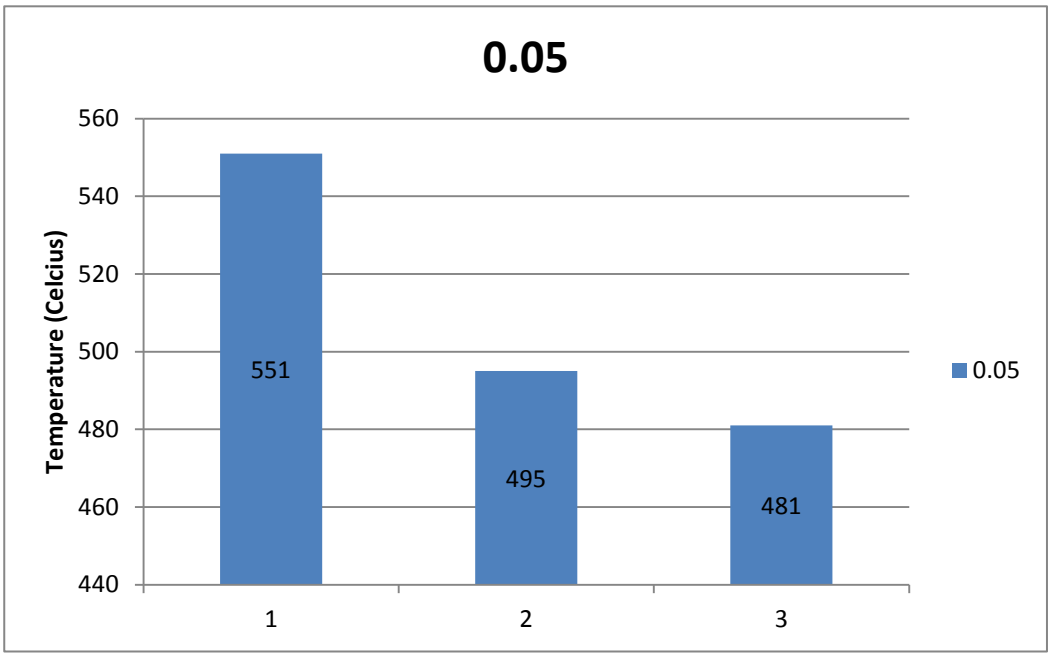


β)



γ)

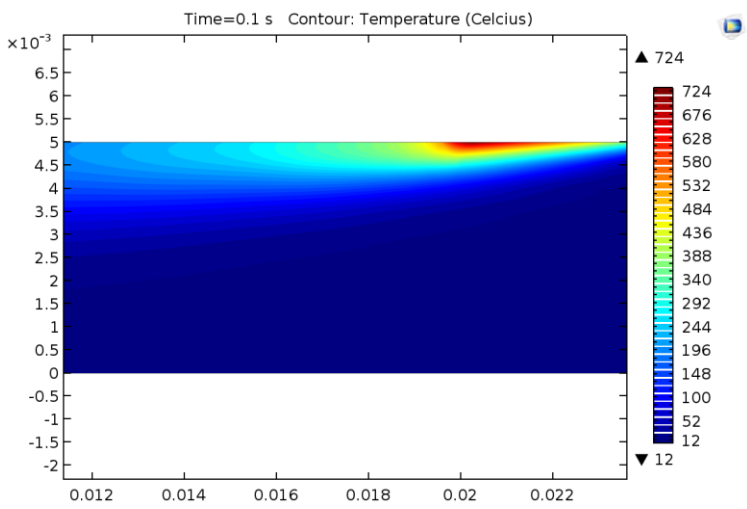
Εικόνα 6.1.4 Θερμοκρασίες τεμαχίου για α) νερό, β)Al2O3, γ) MHS3



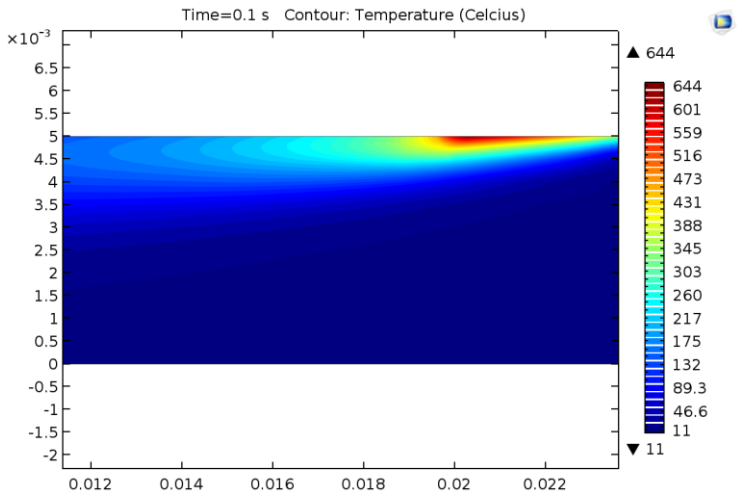
Εικόνα 6.1.5 Θερμοκρασίες τεμαχίου για 1) νερό, 2)Al2O3, 3) MHS3

Βάθος κοπής 0.08 mm[6.1.3]

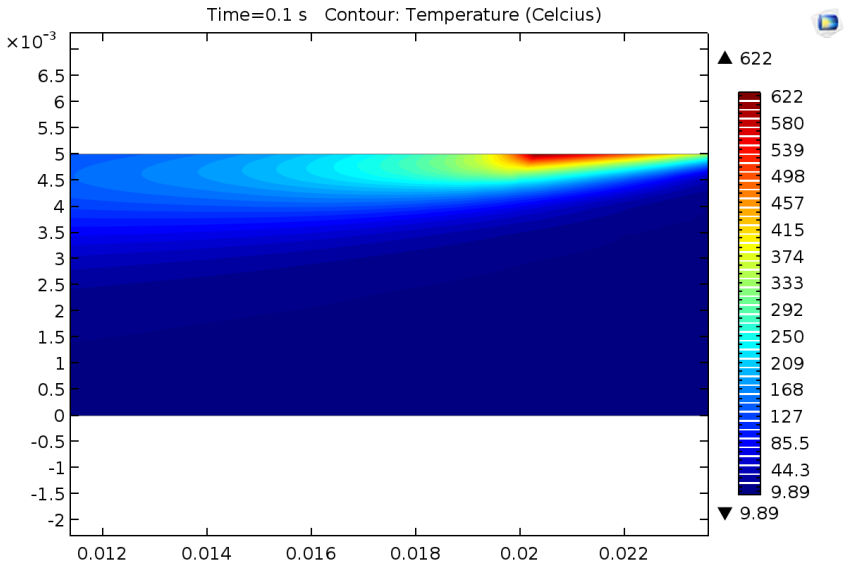
Το βάθος κοπής των 0.08 mm αποτελεί την τρίτη περίπτωση που εξετάστηκε.Το μήκος επαφής της πηγής για το συγκεκριμένο βάθος κοπής είναι 4.47 mm και η ροή θερμότητας 64 W/mm^2.



α)

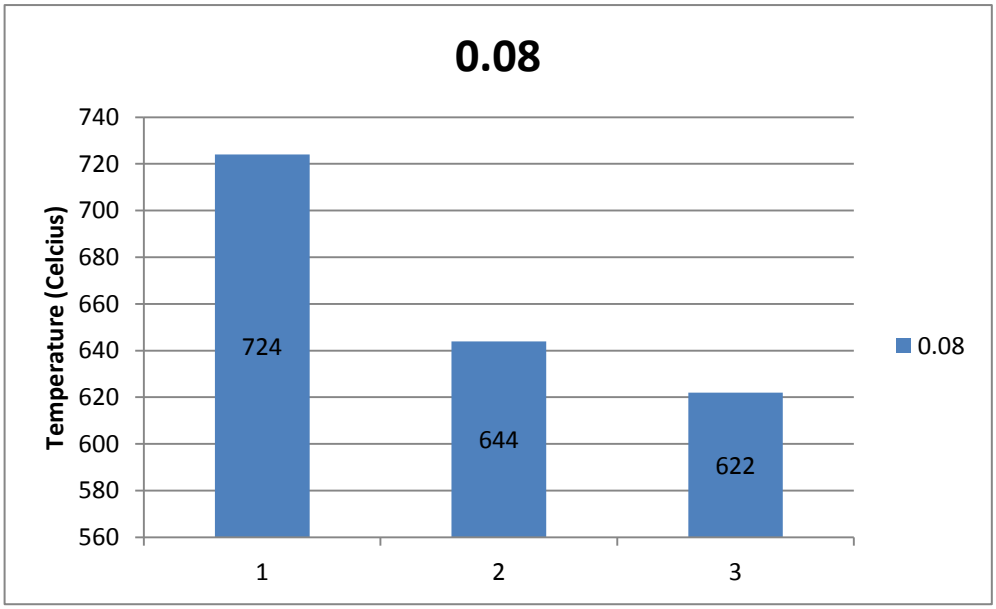


β)



γ)

Εικόνα 6.1.6 Θερμοκρασίες τεμαχίου για α) νερό, β)Al2O3, γ) MHS3



Εικόνα 6.1.7 Θερμοκρασίες τεμαχίου για 1) νερό, 2)Al2O3, 3) MHS3

Φαίνεται ξεκάθαρα η επίδραση του βάθους κοπής στη θερμοκρασία του τεμαχίου, καθώς όσο πιο μεγάλο είναι τόσο αυξάντονται και οι θερμοκρασίες.Χαρακτηριστικά, όταν αυξηθεί το βάθος κοπής από 0.02 mm σε 0.05 mm οι θερμοκρασίες αυξάνονται περίπου 200 βαθμούς Κελσίου με ψυκτικό υγρό το νερό (αύξηση 55%), για το νανορευστό Al2O3 168 βαθμούς Κελσίου (αύξηση 51%) και για το νανορευστό MHS3 181 βαθμούς κελσίου (αύξηση 50%).Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα και για την αύξηση του βάθους κοπής από 0.05 mm σε 0.08 mm.Παράλληλα, είναι φανερό ότι με την επιλογή νανορευστών ως ψυκτικά υγρά αντί νερού όπως φαίνεται και στις εικόνες 5.1.1, 5.1.3, 5.1.5, πετυχαίνεται μείωση της θερμοκρασίας του τεμαχίου 8 – 10 %.

Συγκεκριμένα, για βάθος κοπής 0.02 mm η θερμοκρασία μειώθηκε για το νανορευστό Al2O3 κατά 8 % (355→327 ◦C) σε σχέση με το νερό, ενώ για το MHS3 μειώθηκε 2% επιπλέον.Ακόμα, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει το βάθος κοπής τόσο μεγαλύτερη επίδραση έχουν τα νανορευστά στη μείωση της θερμοκρασίας.Για βάθος κοπής 0.05 mm, με νανορευστό Al2O3 η θερμοκρασία μειώθηκε 10 % (51 ◦C) και με MHS3 επιπλέον 2.8 % (14 ◦C), ενώ για βάθος κοπής 0.08 mm η μείωση ήταν ακόμα μεγαλύτερη για το πρώτο νανορευστό (11%, 80 ◦C), ενώ στο δεύτερο νανορευστό μειώθηκε 3.4 % (22 ◦C) επιπλέον.

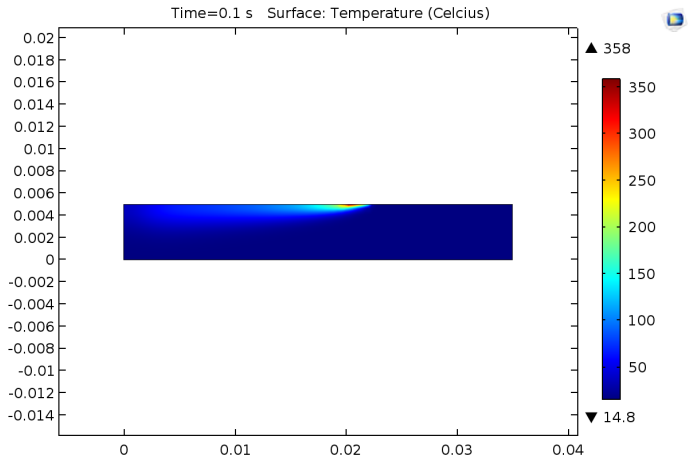
2D vs 3D [6.1.4]

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα γίνει σύγκριση δισδιάστατου - τρισδιάστατου μοντέλου.

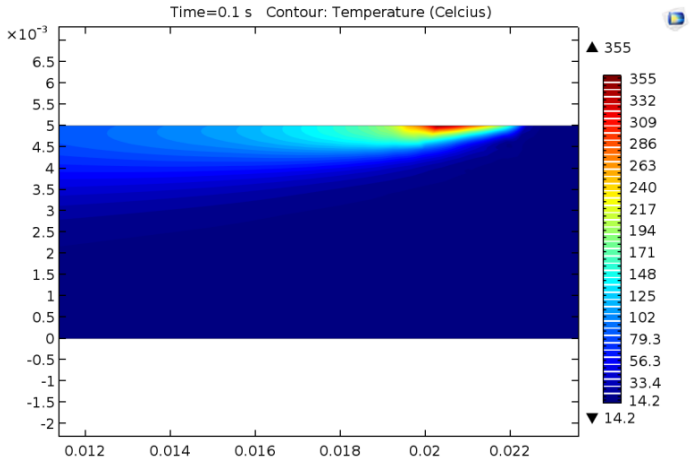
Για τη σύγκριση αυτή χρησιμοποιήθηκε το νερό ως ψυκτικό υγρό και στις δύο περιπτώσεις, για τα βάθη κοπής 0.02 mm και 0.05 mm.

Χαρακτηριστικά τρισδιάστατου μοντέλου: 35 x 5 x 5 [mm]

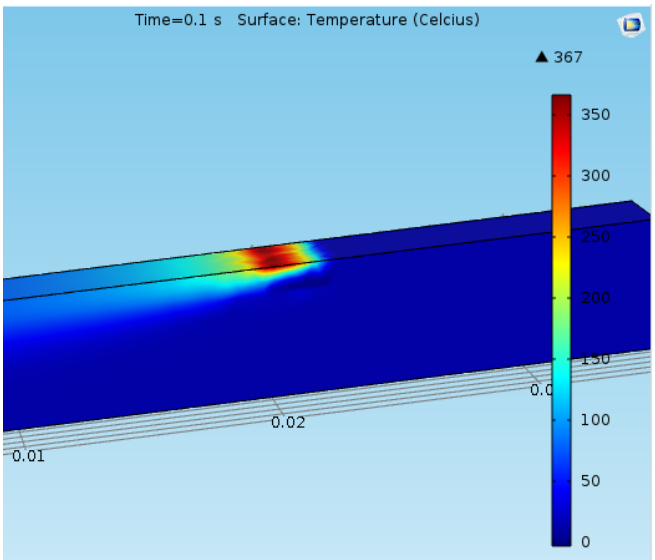
Στις εικόνες 6.1.8 και 6.1.9 φαίνονται οι θερμοκρασίες για το δισδιάστατο και το τρισδιάστατο μοντέλο για τα δύο βάθη κοπής.



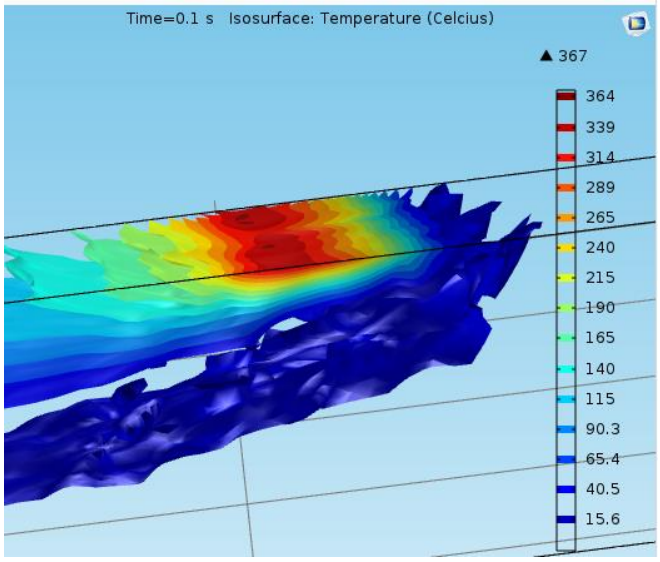
α)



β)

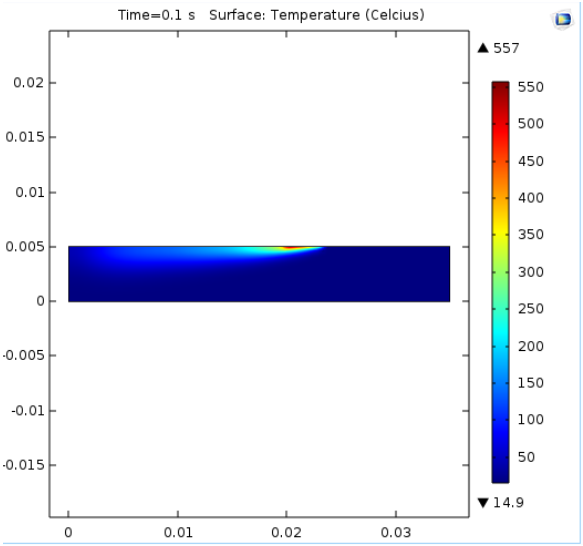


γ)

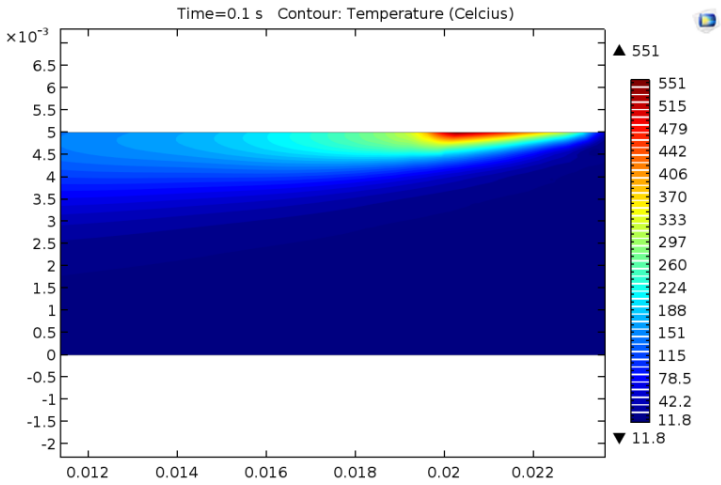


δ)

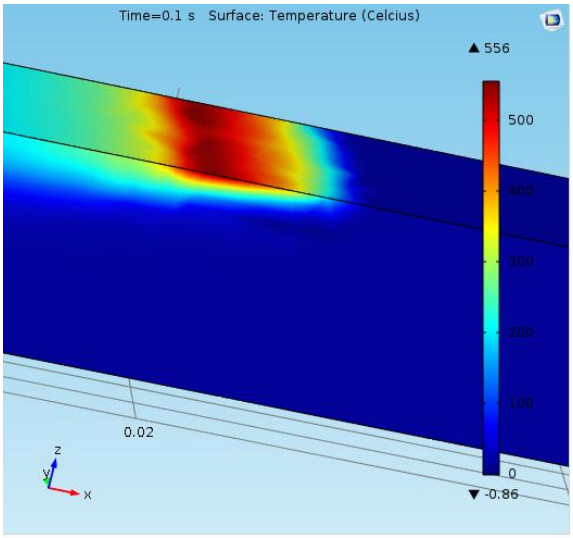
Εικόνα 6.1.8 Θερμοκρασίες τεμαχίου για α,β)Δισδιάστατο μοντέλο γ,δ)Τρισδιάστατο μοντέλο



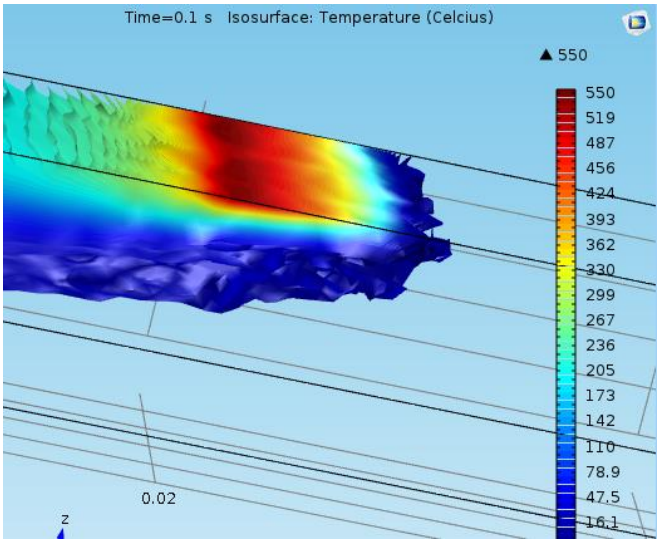
α)



β)

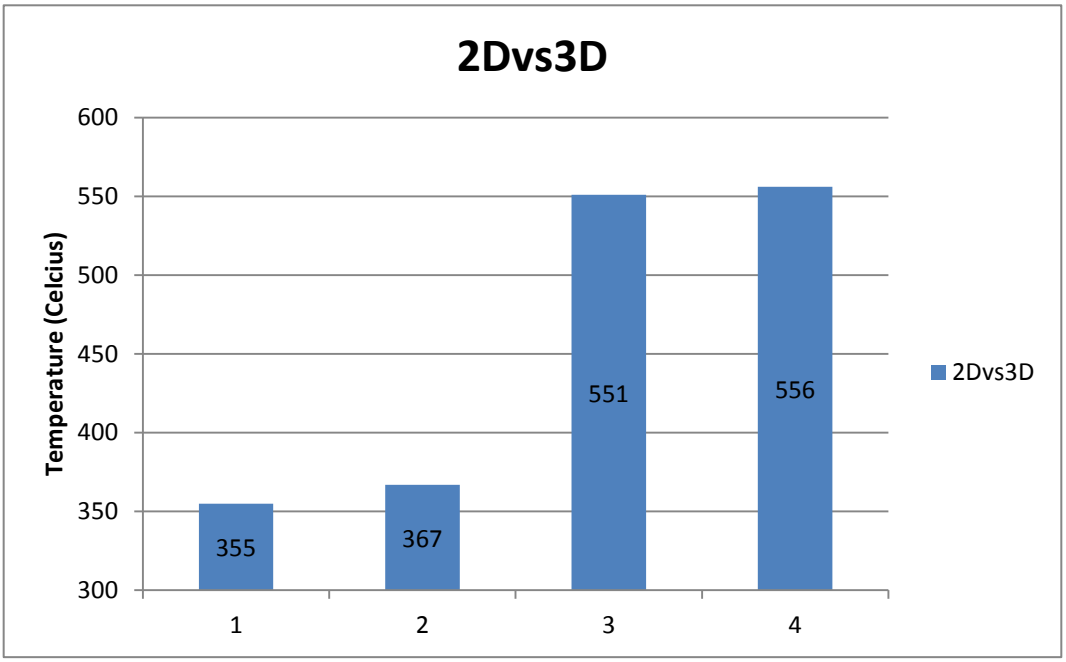


γ)



δ)

Εικόνα 6.1.9 Θερμοκρασίες τεμαχίου για α,β)Δισδιάστατο μοντέλο γ,δ)Τρισδιάστατο μοντέλο



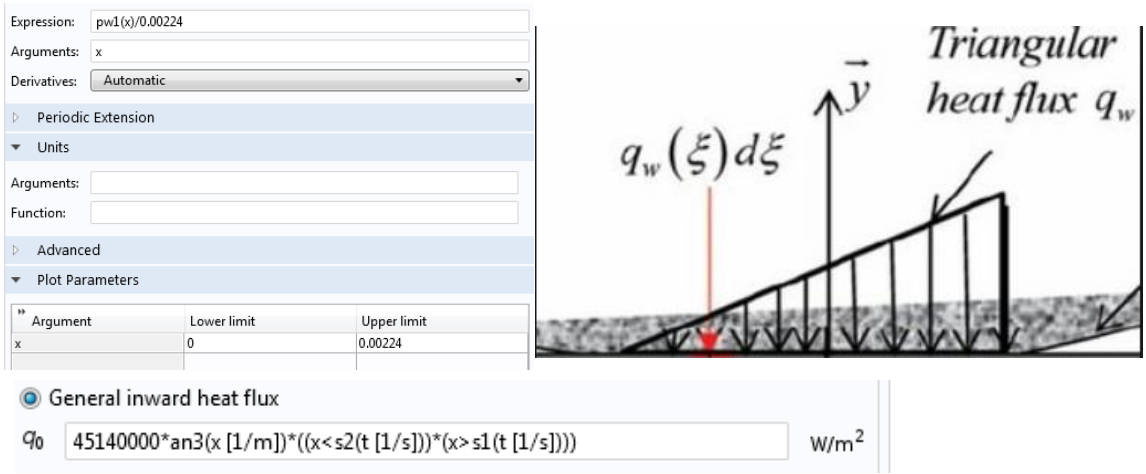
Εικόνα 6.1.10 Θερμοκρασίες τεμαχίου για 1)2D 0.02mm, 2)3D 0.02mm, 3) 2D 0.05mm, 4) 2)3D 0.05mm

Οι διαφορές στα μοντέλα δισδιάστατης και τρισδιάστατης γεωμετρίας είναι πολύ μικρές έως αμελητέες, άρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για οικονομία το 2D γιατί το 3D δε προσέφερε κάτι ιδιαίτερο σε αυτή την περίπτωση.

Σύγκριση ομοιόμορφης – τριγωνικής πηγής [6.1.5]

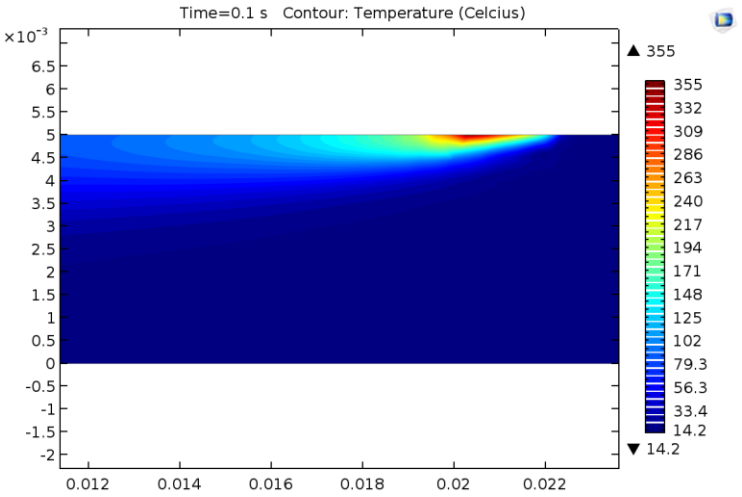
Στο παρόν υποκεφάλαιο θα γίνει σύγκριση ομοιόμορφης με τριγωνικής πηγής θερμότητας, στο δισδιάστατο μοντέλο,βάθος κοπής 0.02 mm και 0.05 mm, ψυκτικό υγρό νερό.

Για τη δημιουργία του μοντέλου τριγωνικής πηγής θερμότητας χρησιμοποιήθηκε μια συνάρτηση που παίρνει τιμές από 0 έως το μήκος επαφής και διαιρείται με το μήκος επαφής, η οποία πολλαπλασιάζεται με τη ροή θερμότητας.

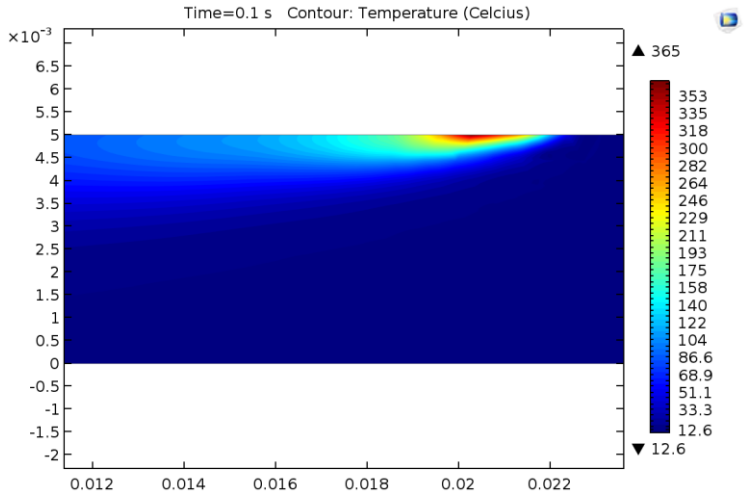


Εικόνα 6.1.11 Μοντέλο τριγωνικής πηγής θερμότητας

Στις εικόνες 5.1.12 και 5.1.13 φαίνονται οι θερμοκρασίες για το μοντέλο με την ομοιόμορφη και την τριγωνική πηγή θερμότητας για τα δύο βάθη κοπής.

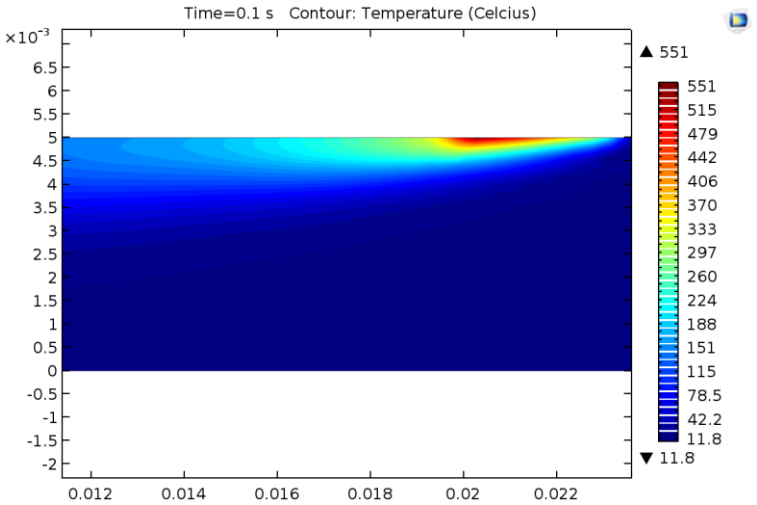


α)

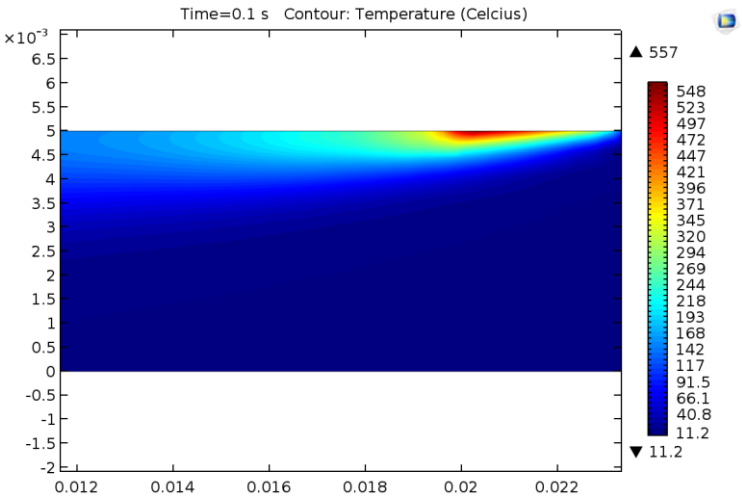


β)

Εικόνα 6.1.12 Θερμοκρασίες τεμαχίου για α)Ομοιόμορφη πηγή και β)Τριγωνική πηγή

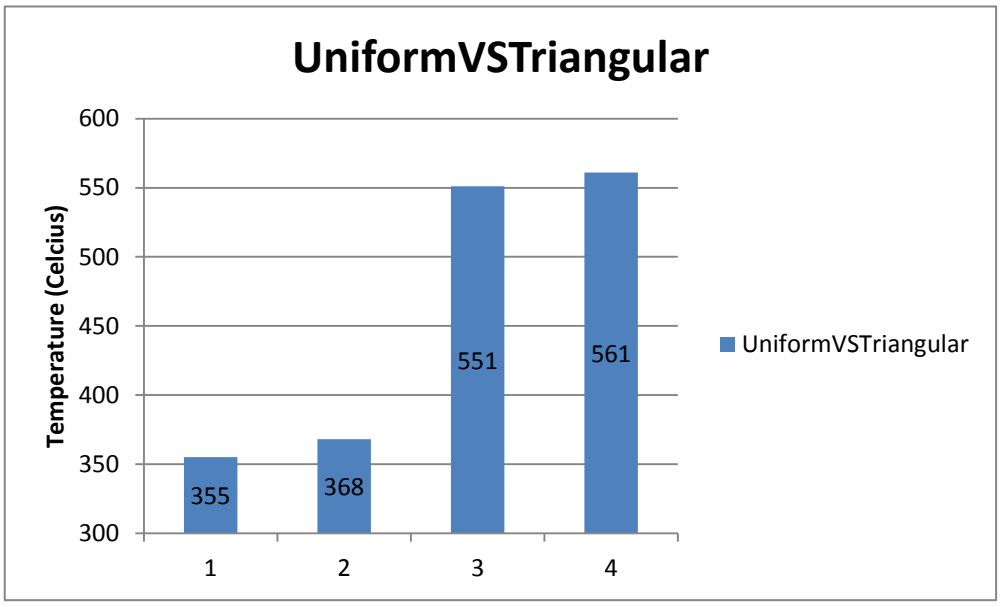


γ)



δ)

Εικόνα 6.1.13 Θερμοκρασίες τεμαχίου για γ)Ομοιόμορφη πηγή και δ)Τριγωνική πηγή

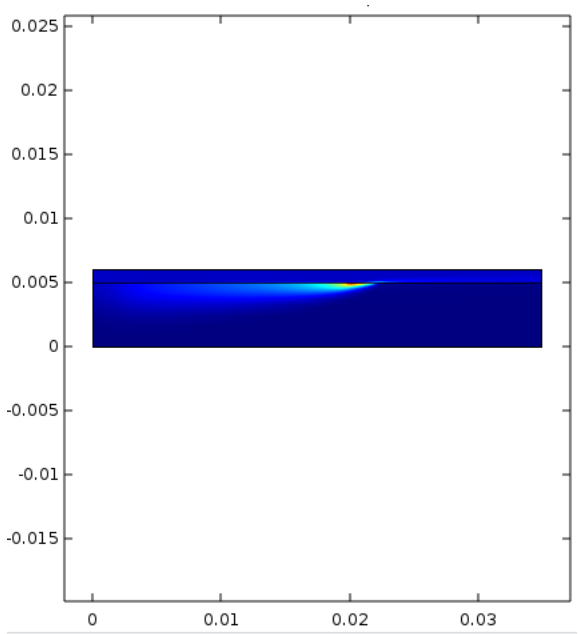


Εικόνα 6.1.14 Θερμοκρασίες τεμαχίου για 1)Ομοιόμορφη πηγή 0.02mm, 2)Τριγωνική πηγή 0.02mm, 3)Ομοιόμορφη πηγή 0.05mm, 4)Τριγωνική πηγή 0.05mm

Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται η τριγωνική πηγή θερμότητας για καλύτερη ακρίβεια στα μοντέλα.Στη δική μας περίπτωση οι διαφορές είναι μικρές, οπότε και στα επόμενα μοντέλα θα χρησιμοποιηθεί η ομοιόμορφη πηγή θερμότητας.

Μοντέλο με δύο περιοχές τεμαχίου – ψυκτικού υγρού [6.2]

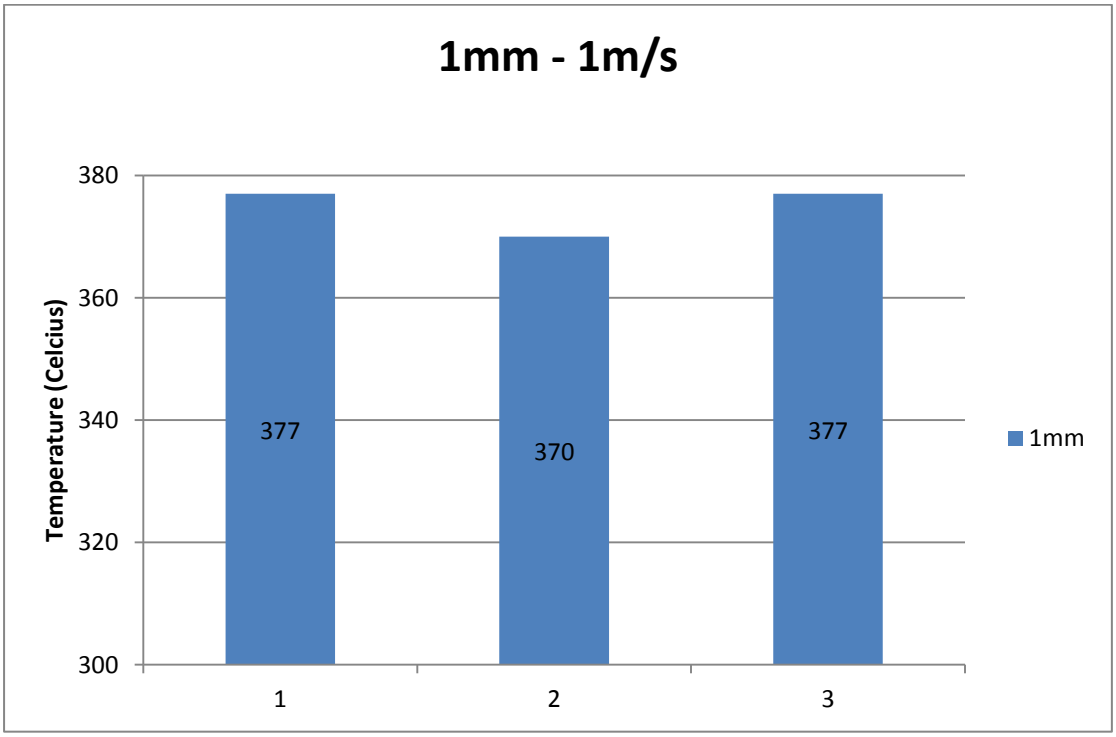
Για την ενότητα αυτή πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τρία διαφορετικά ύψη της περιοχής του ψυκτικού υγρού (1mm, 0.5mm, 0.1mm) και τέσσερις ταχύτητες εισόδου του ψυκτικού υγρού (1 m/s, 3 m/s , 5 m/s , 10 m/s), για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3.Χρησιμοποιήθηκε υλικό τεμαχίου C45, ομοιόμορφη πηγή θερμότητας και βάθος κοπής 0.02 mm.Ενδεικτικά στην εικόνα 5.2 φαίνεται το μοντέλο με τις δύο περιοχές.Στο τέλος της ενότητας υπάρχει συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για όλες τις μεταβλητές.



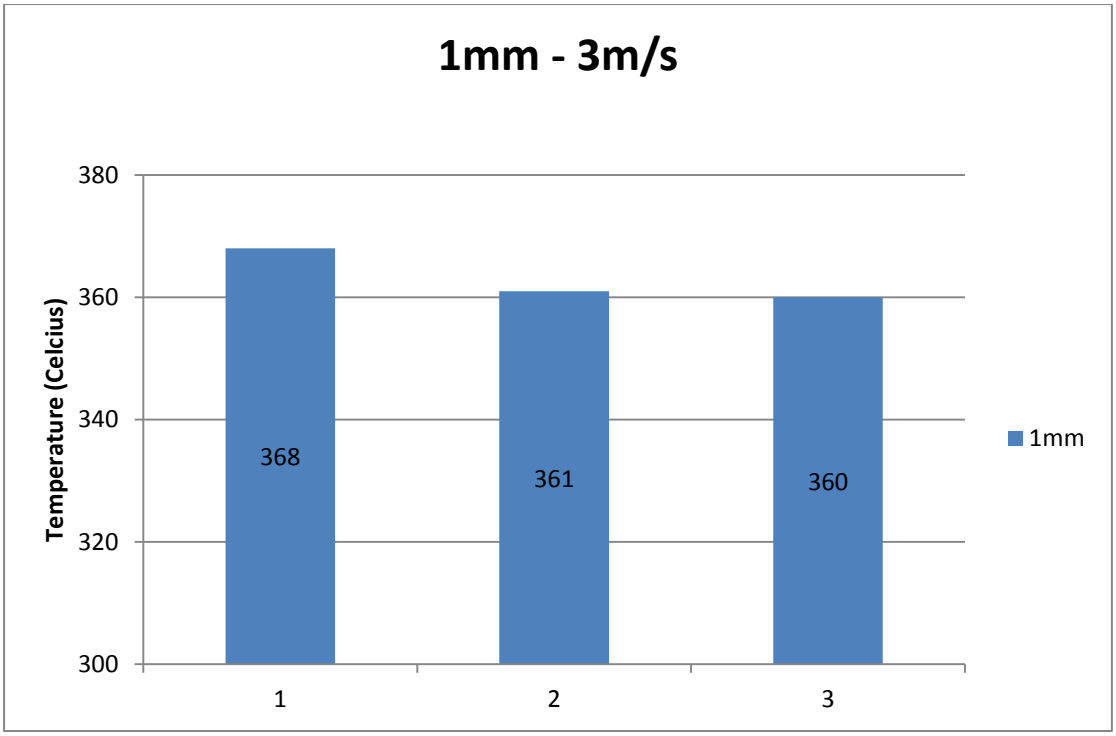
Εικόνα 6.2 Μοντέλο δύο περιοχών, τεμαχίου – ψυκτικού υγρού, ύψος ψυκτικού υγρού h1=1 mm

Ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h1 = 1mm [6.2.1]

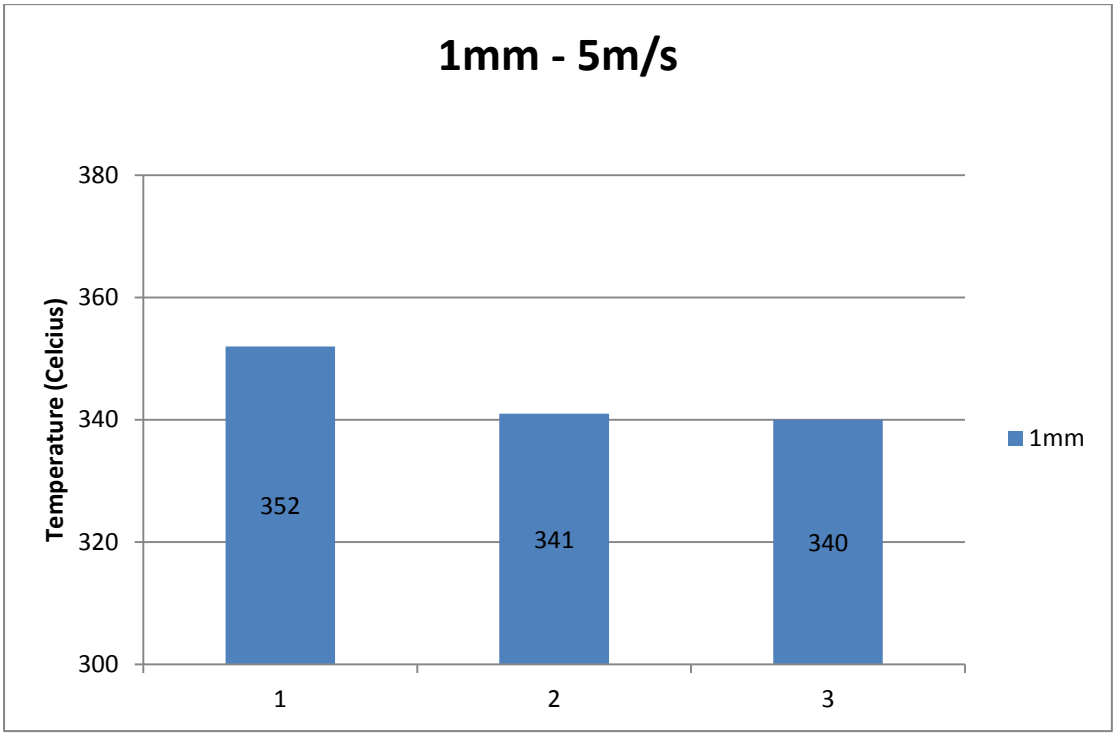
Στην πρώτη υποενότητα του μοντέλου αυτού φαίνονται όλα τα διαγράμματα με ύψος h1=1mm, για τις τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες εισόδου του ψυκτικού υγρού και για όλα τα είδη των ψυκτικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν.



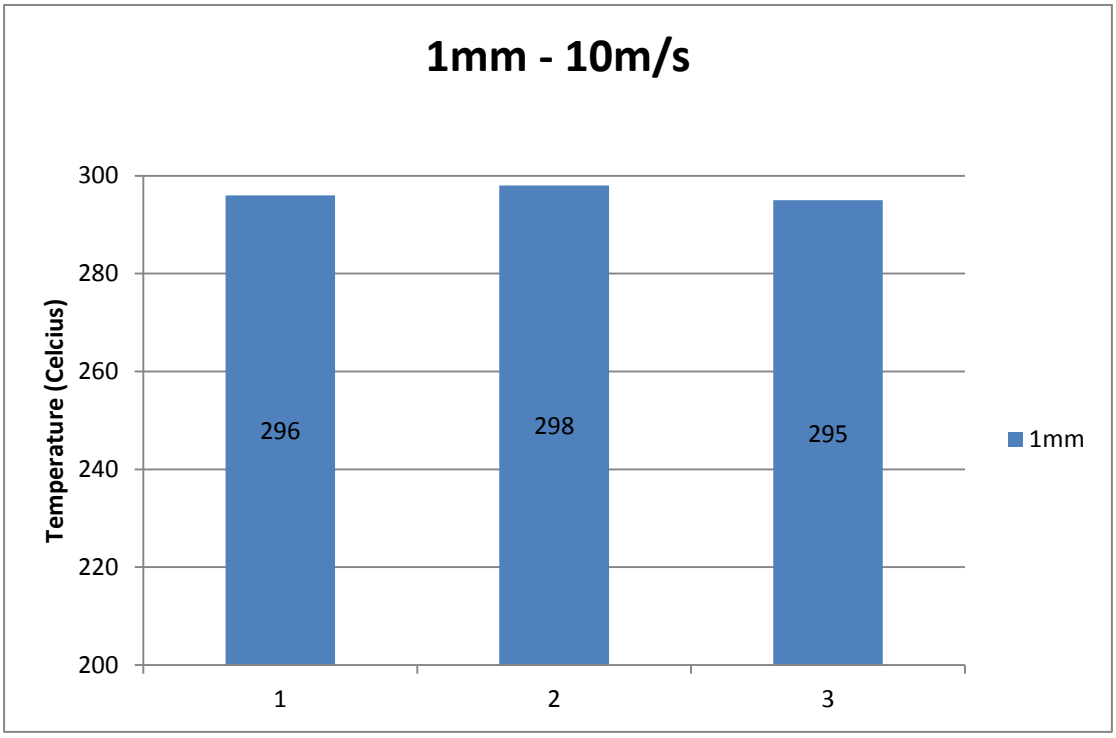
Εικόνα 6.2.1 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 1 m/s



Εικόνα 6.2.2 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 3 m/s



Εικόνα 6.2.3 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 5 m/s



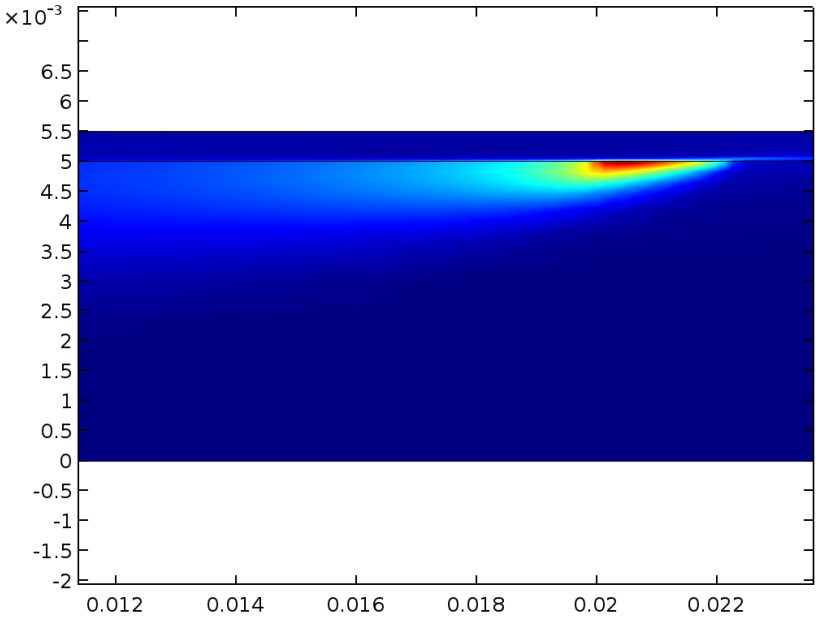
Εικόνα 6.2.5 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 10 m/s

Coolant(1mm)	Velocity(m/s)	Maximum Temperature(Celcius)	h(W/m^2)	C45	Depth Of Cut(mm)
Water	1	377	240		0,02
	3	368	246		
	5	352	755		
	10	296	833		
Al2O3(3%)	1	370	635		
	3	361	450		
	5	341	1456		
	10	298	1161		
MHS3	1	377	687		
	3	360	623		
	5	340	1440		
	10	295	1304		

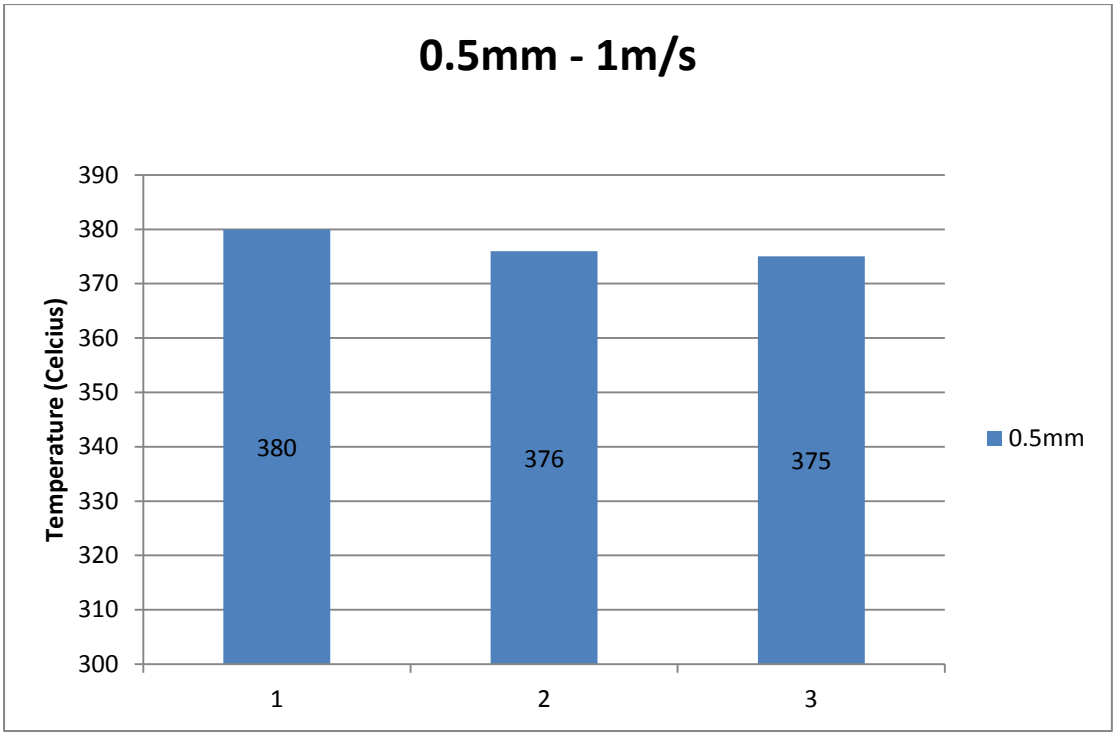
Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h1=1mm

Πάχος περιοχής ψυκτικού υγρού h2 = 0.5mm [6.2.2]

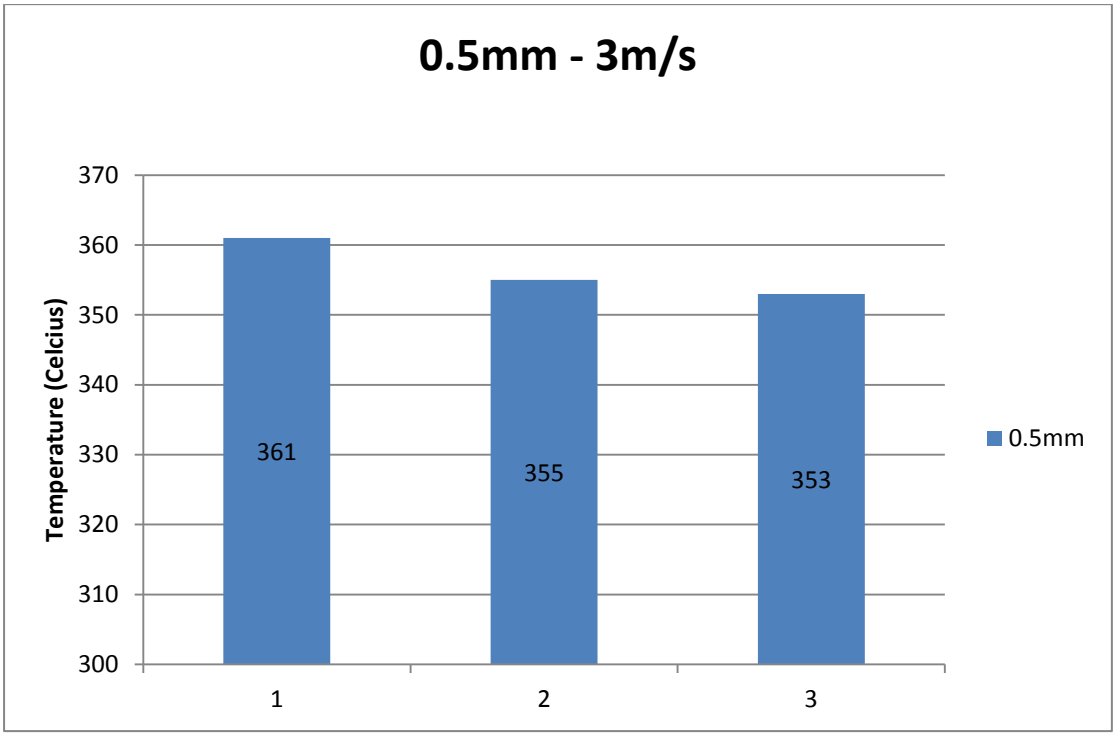
Στη δεύτερη υποενότητα του μοντέλου αυτού φαίνονται όλα τα διαγράμματα με ύψος h2=0.5 mm, για τις τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες εισόδου του ψυκτικού υγρού και για όλα τα είδη των ψυκτικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν.



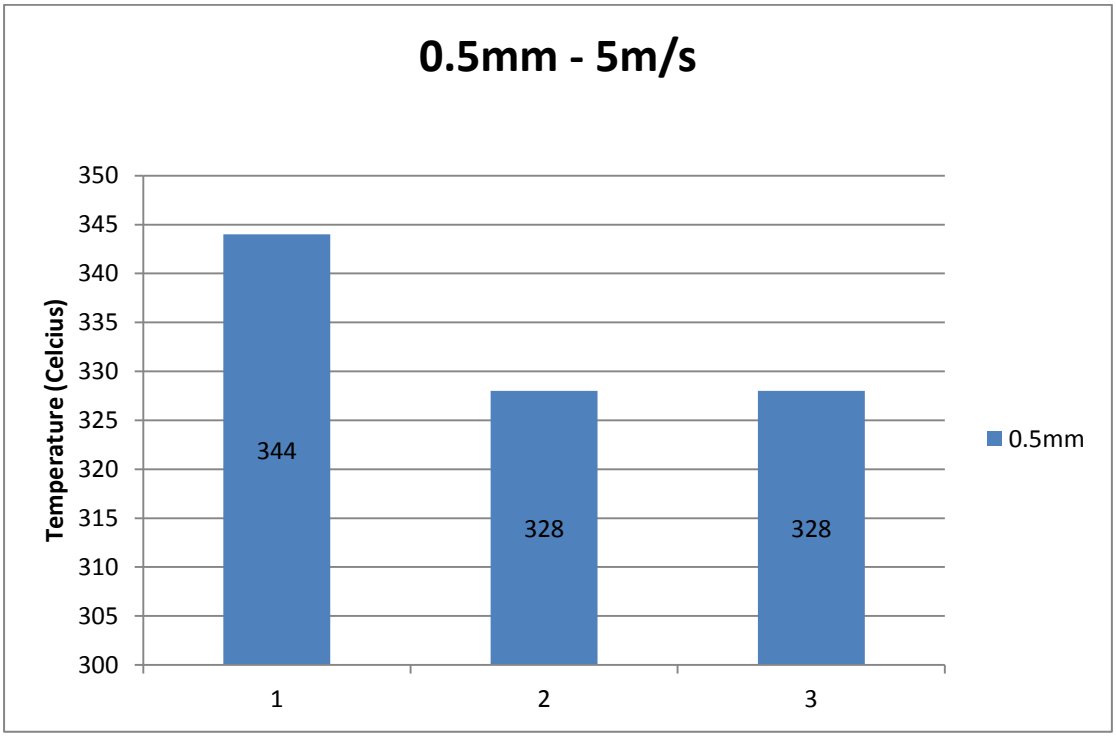
Εικόνα 6.2.6 Μοντέλο δύο περιοχών τεμαχίου – ψυκτικού υγρού, με ύψος ψυκτικού υγρού h2=0.5 mm



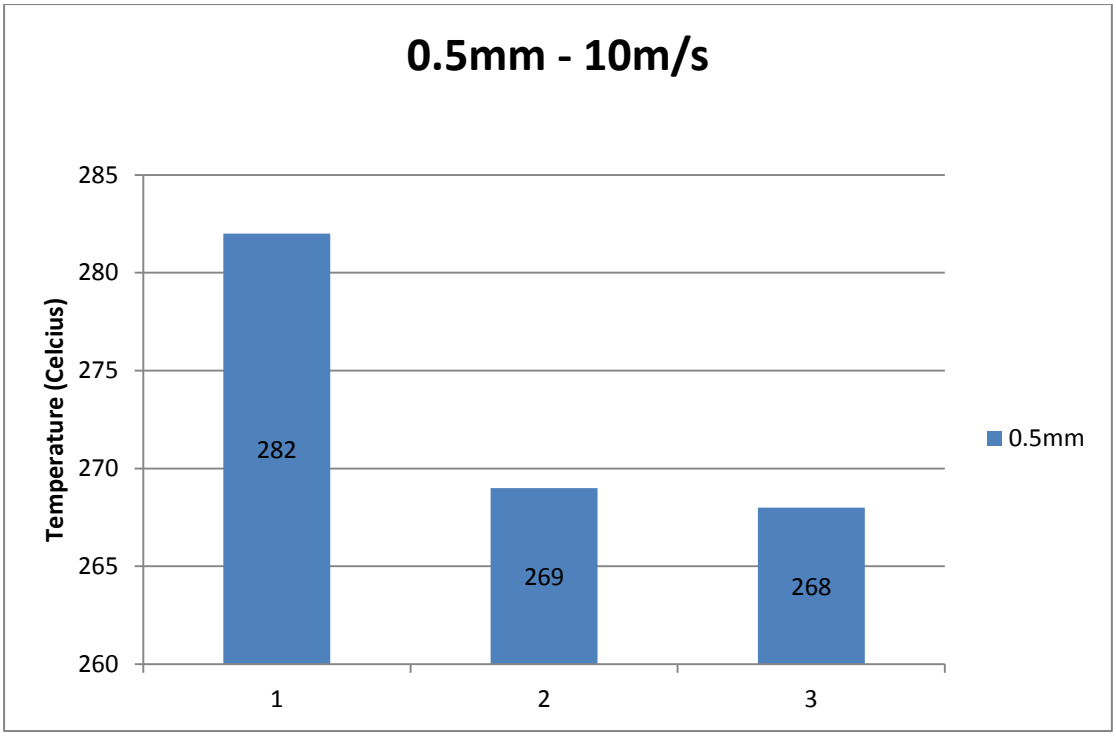
Εικόνα 6.2.7 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 1 m/s



Εικόνα 6.2.8 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 3 m/s



Εικόνα 6.2.9 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 5 m/s



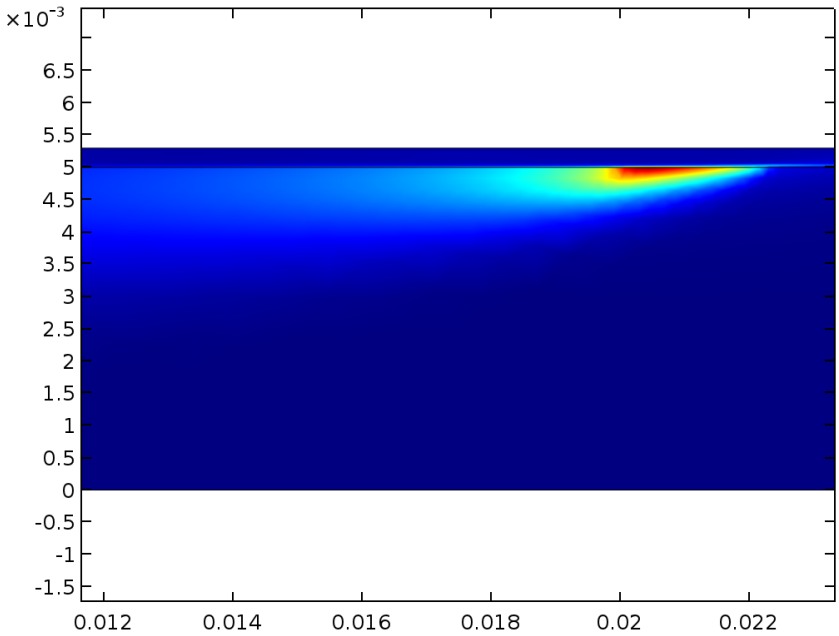
Εικόνα 6.2.10 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 10 m/s

Coolant(0.5mm)	Velocity(m/s)	Maximum Temperature(Celcius)	h(W/m^2)	C45	Depth Of Cut(mm)
Water	1	380	557		0,02
	3	361	527		
	5	344	686		
	10	282	811		
Al2O3(3%)	1	376	669		
	3	355	844		
	5	328	1336		
	10	269	1687		
MHS3	1	375	685		
	3	353	863		
	5	328	1392		
	10	268	1862		

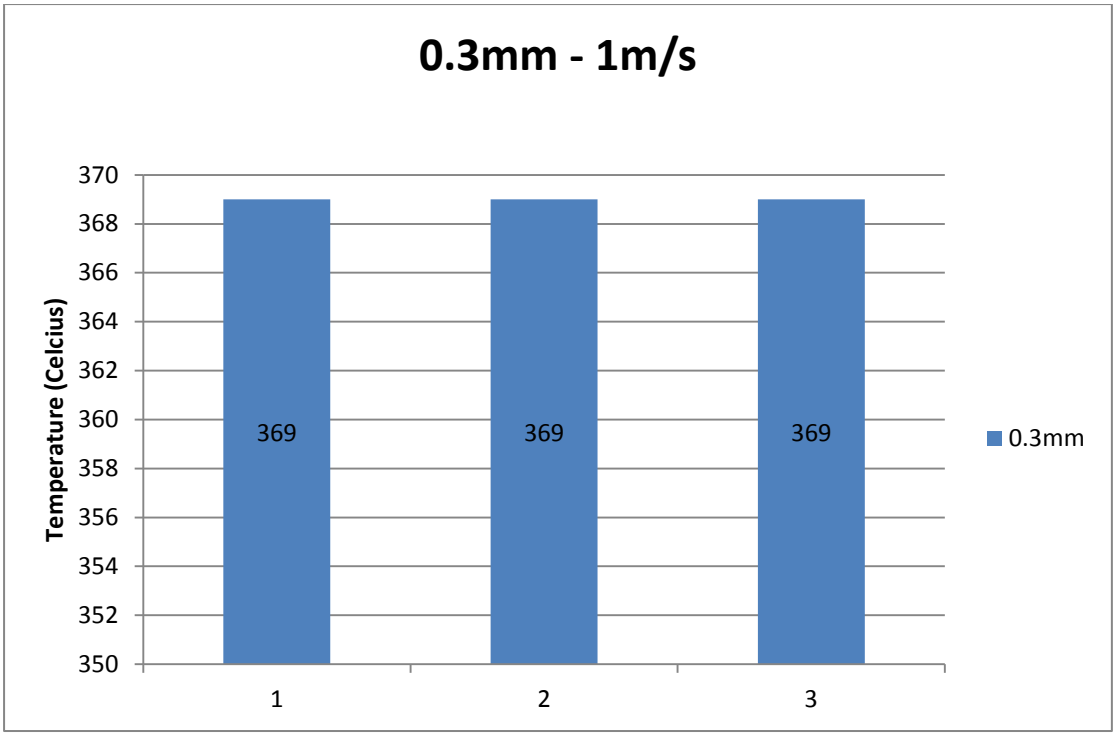
Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για ύψος ψυκτικού υγρού h2=0.5mm

Ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h3 = 0.3mm [6.2.3]

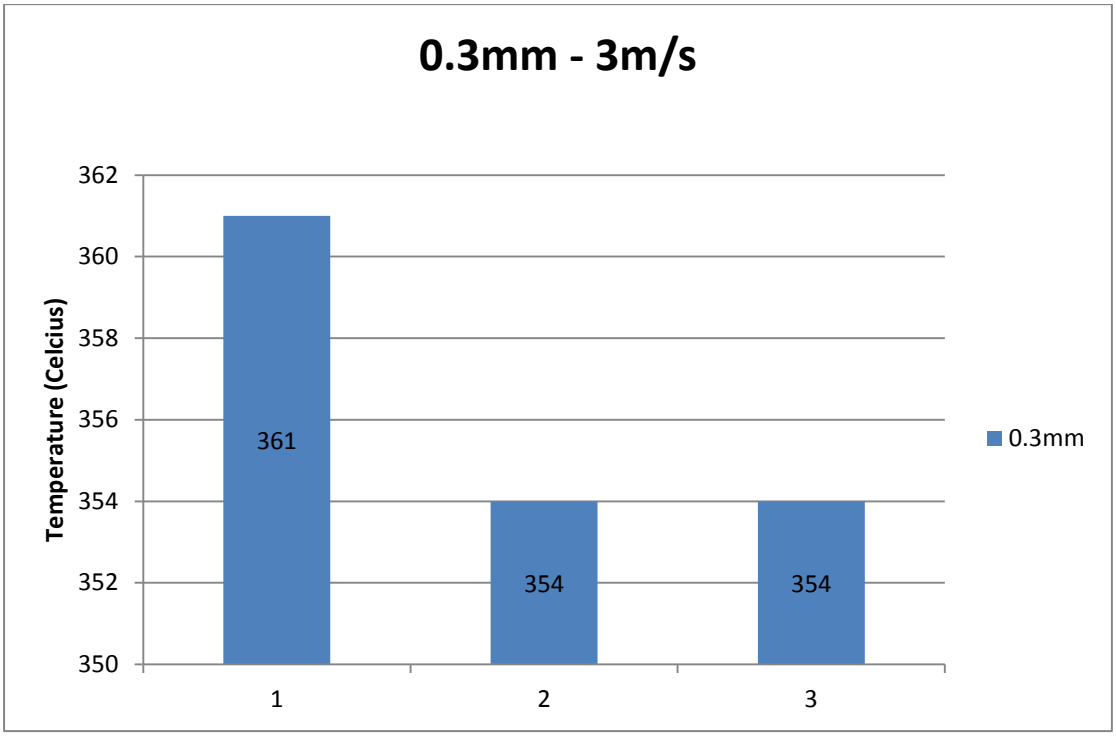
Στην τρίτη υποενότητα του μοντέλου αυτού φαίνονται όλα τα διαγράμματα με ύψος h3=0.3 mm, για τις τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες εισόδου του ψυκτικού υγρού και για όλα τα είδη των ψυκτικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν.



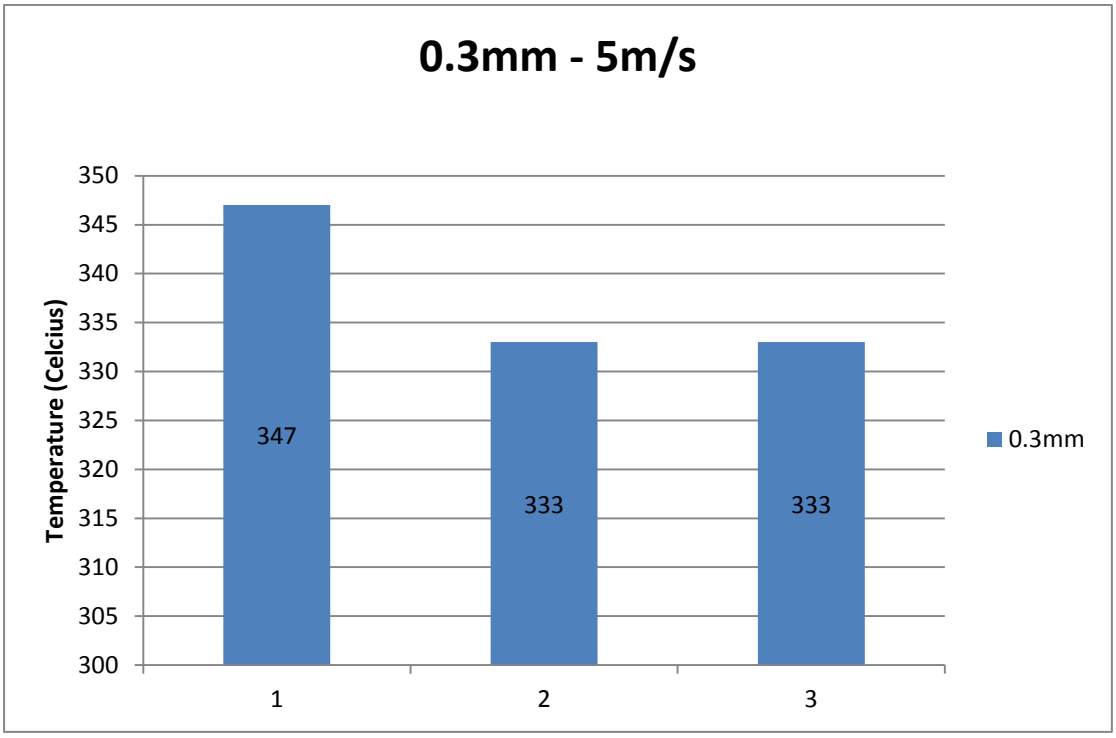
Εικόνα 6.2.11 Μοντέλο δύο περιοχών τεμαχίου – ψυκτικού υγρού, με ύψος ψυκτικού υγρού h3=0.3 mm



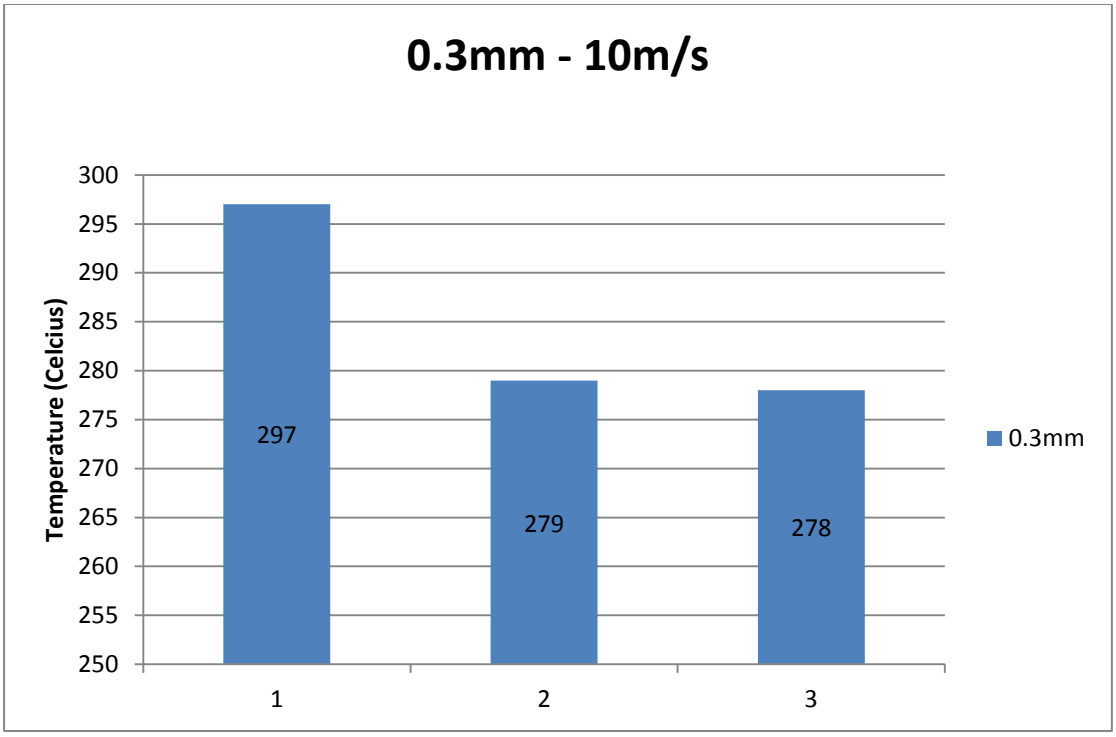
Εικόνα 6.2.12 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 1 m/s



Εικόνα 6.2.13 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 13 m/s



Εικόνα 6.2.14 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 5 m/s



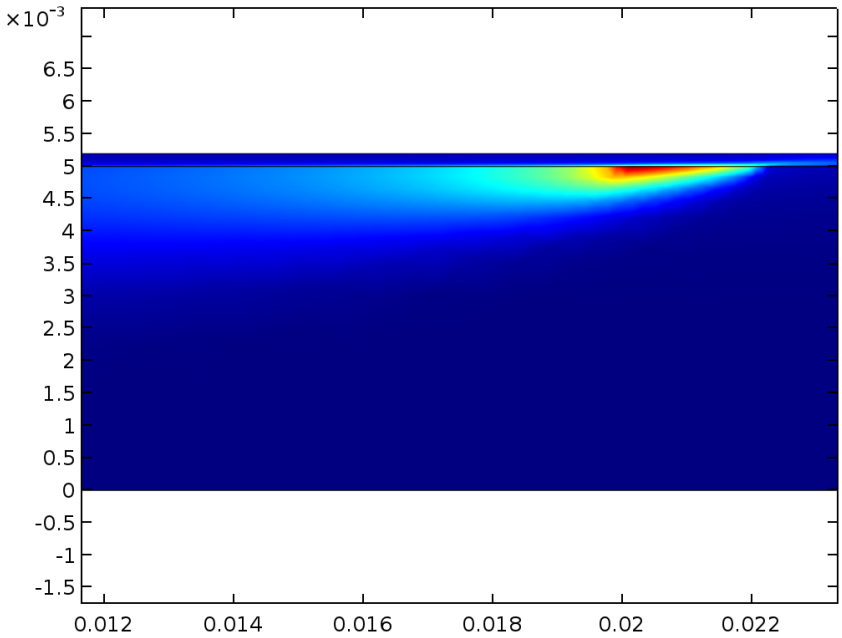
Εικόνα 6.2.15 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 10 m/s

Coolant (0.3mm)	Velocity (m/s)	Maximum Temperature (Celcius)	H (W/m^2)	C45	Depth Of Cut (mm)
Water	1 3 5 10	369 361 347 297	1564 996 1022 1307		0,02
Al2O3(3%)	1 3 5 10	369 354 333 279	2381 1728 686 1947		
MHS3	1 3 5 10	369 354 333 278	2476 1519 838 2779		

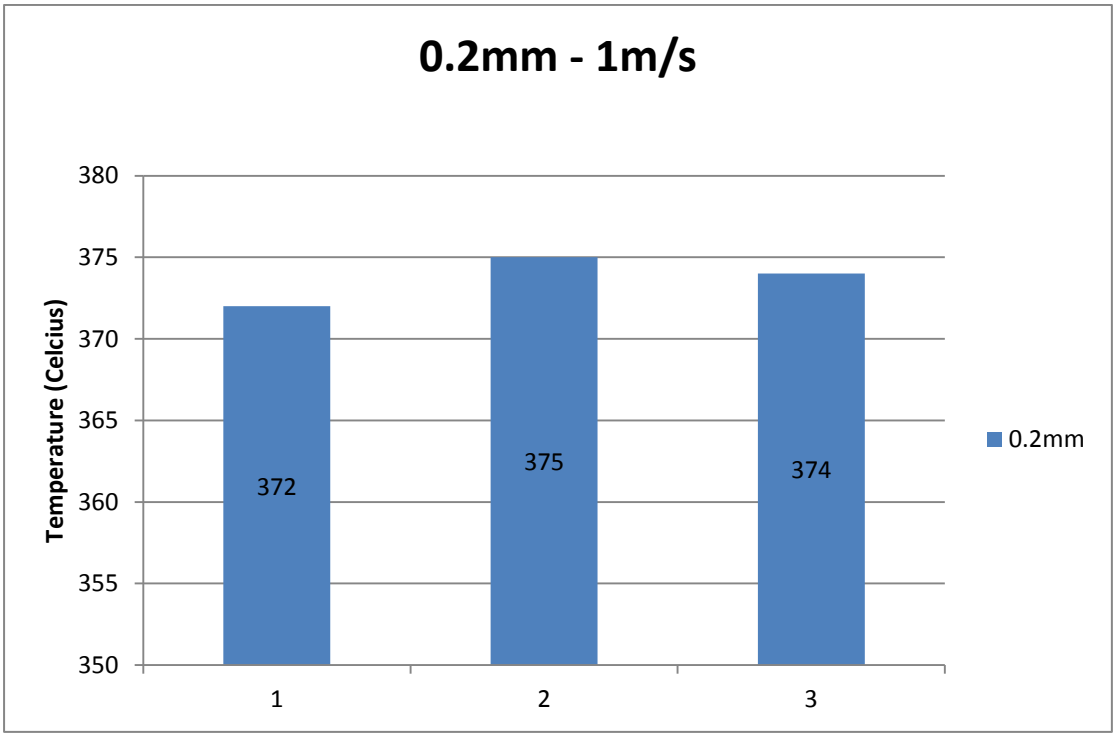
Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για πάχος ψυκτικού υγρού h3=0.3mm

Ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h4 = 0.2mm [6.2.4]

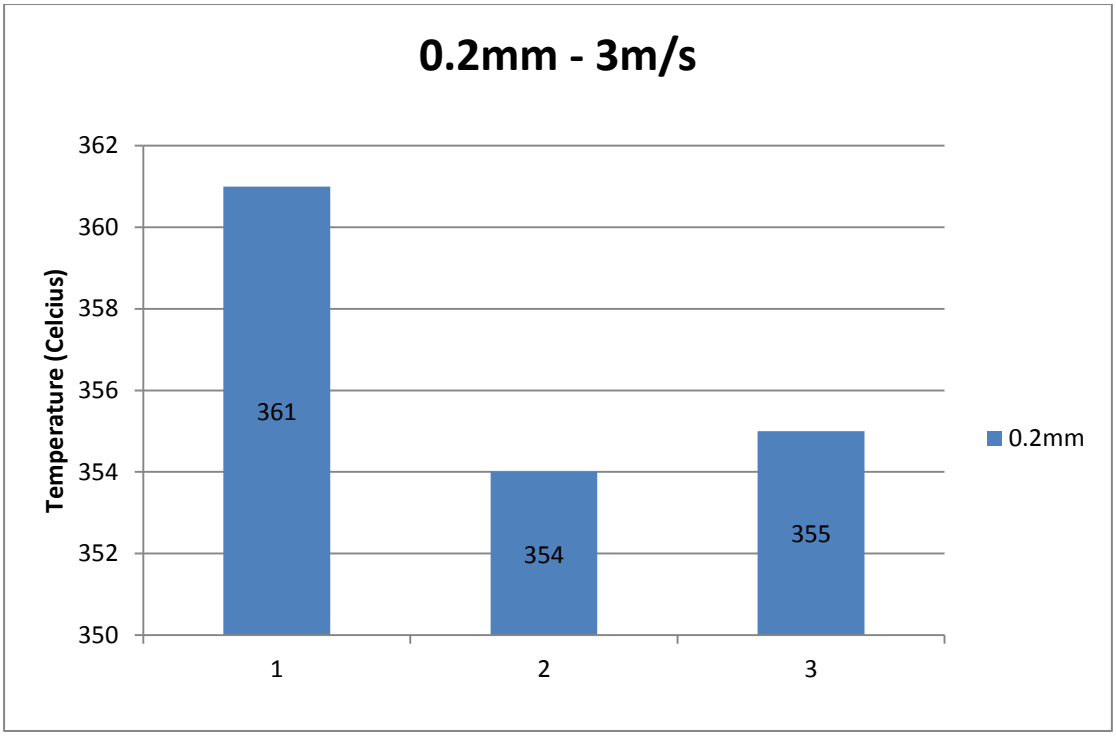
Στην τρίτη υποενότητα του μοντέλου αυτού φαίνονται όλα τα διαγράμματα με ύψος h4=0.2 mm, για τις τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες εισόδου του ψυκτικού υγρού και για όλα τα είδη των ψυκτικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν. Μας ενδιαφέρει να διερευνήσουμε την τιμή του ύψους της περιοχής του υγρού και της ταχύτητας εισόδου , γιατί είναι παράμετροι που δεν είναι διαθέσιμες άμεσα, ιδίως το ύψος που είναι παράμετρος μοντέλου και δε μετριέται.



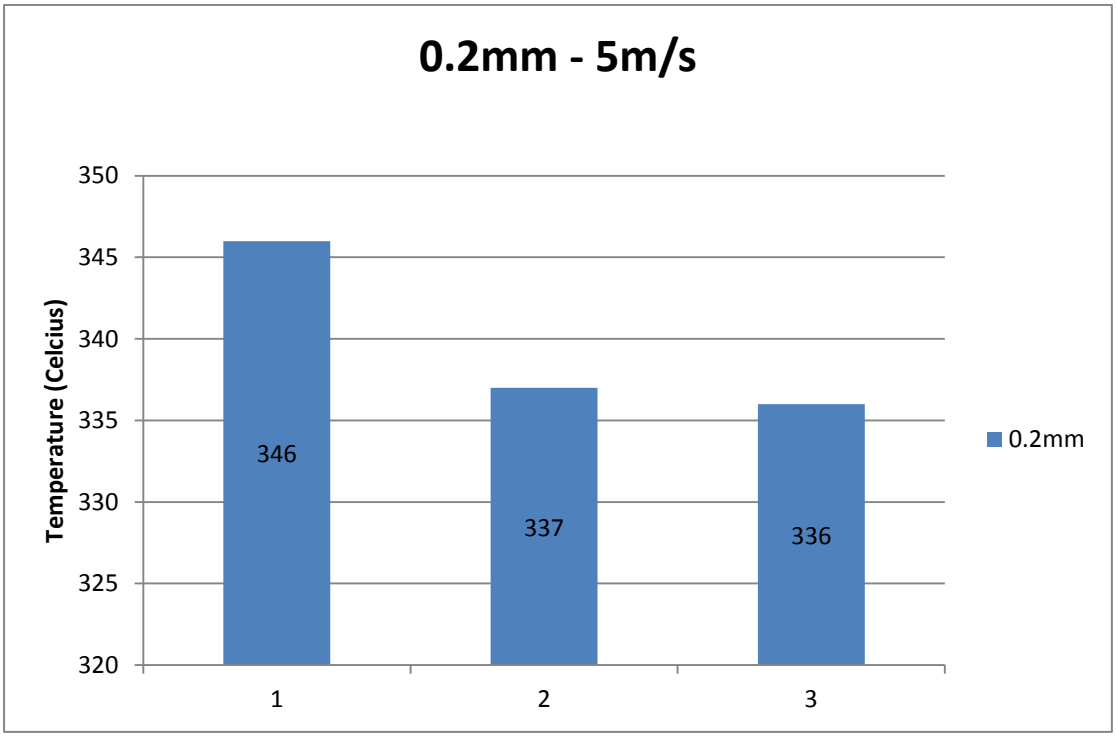
Εικόνα 6.2.16 Μοντέλο δύο περιοχών τεμαχίου – ψυκτικού υγρού, με ύψος ψυκτικού υγρού h4=0.2 mm



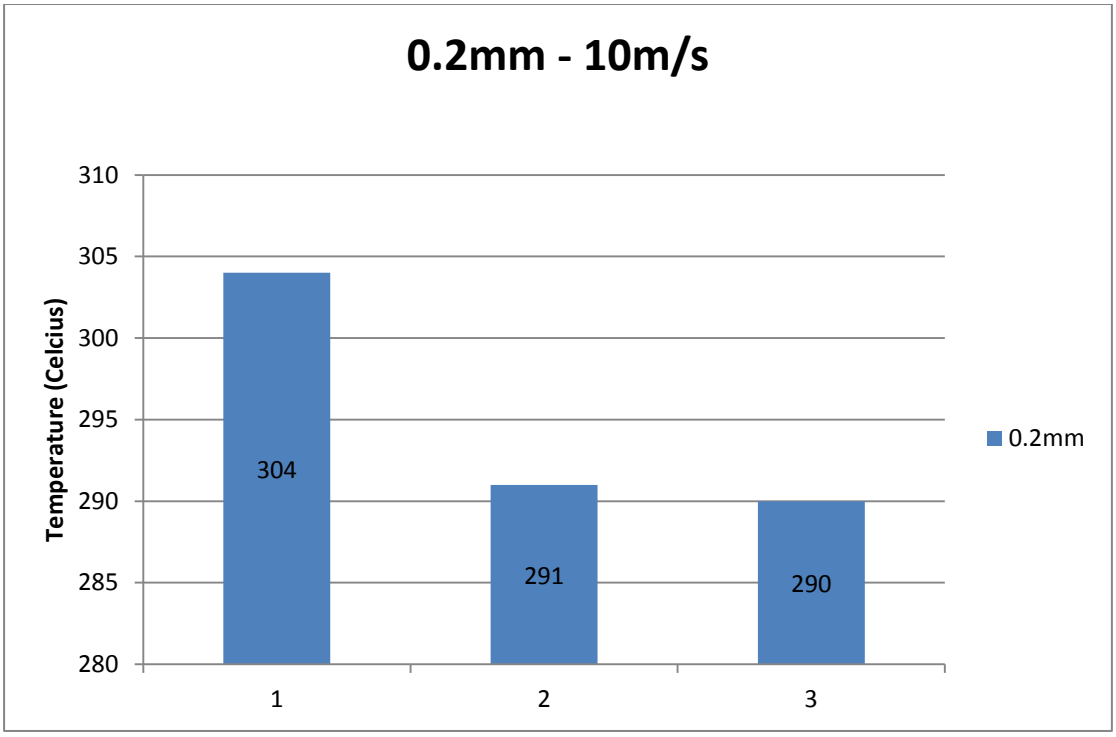
Εικόνα 6.2.17 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 1 m/s



Εικόνα 6.2.18 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 13 m/s



Εικόνα6.2.19 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 5 m/s



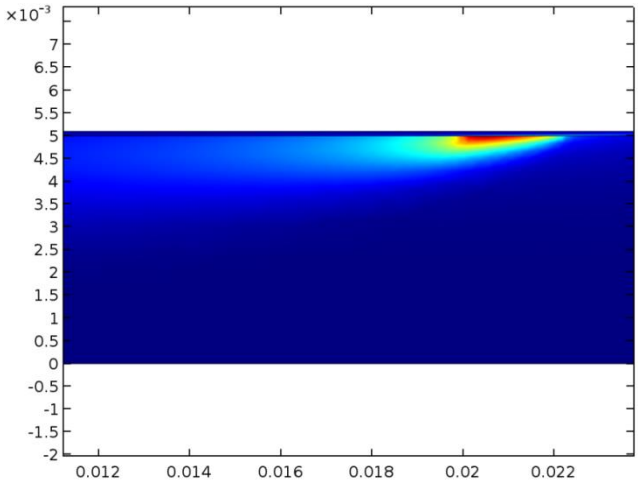
Εικόνα 6.2.20 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 10 m/s

Coolant (0.2mm)	Velocity (m/s)	Maximum Temperature (Celcius)	H (W/m^2)	C45	Depth Of Cut (mm)
Water	1 3 5 10	372 361 346 304	2637 1646 1549 1766		0,02
Al2O3(3%)	1 3 5 10	375 354 337 291	3886 2972 1493 900		
MHS3	1 3 5 10	374 355 336 290	4103 3276 1797 1696		

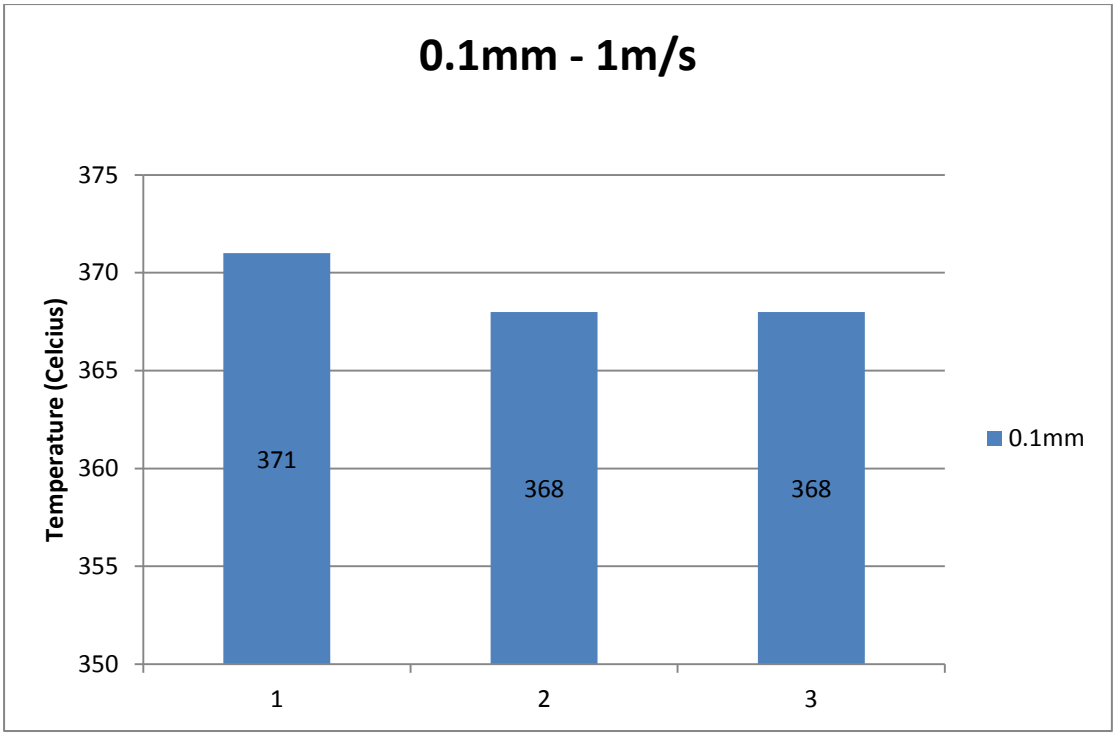
Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για πάχος ψυκτικού υγρού h4=0.2mm

Ύψος περιοχής ψυκτικού υγρού h5 = 0.1mm [6.2.5]

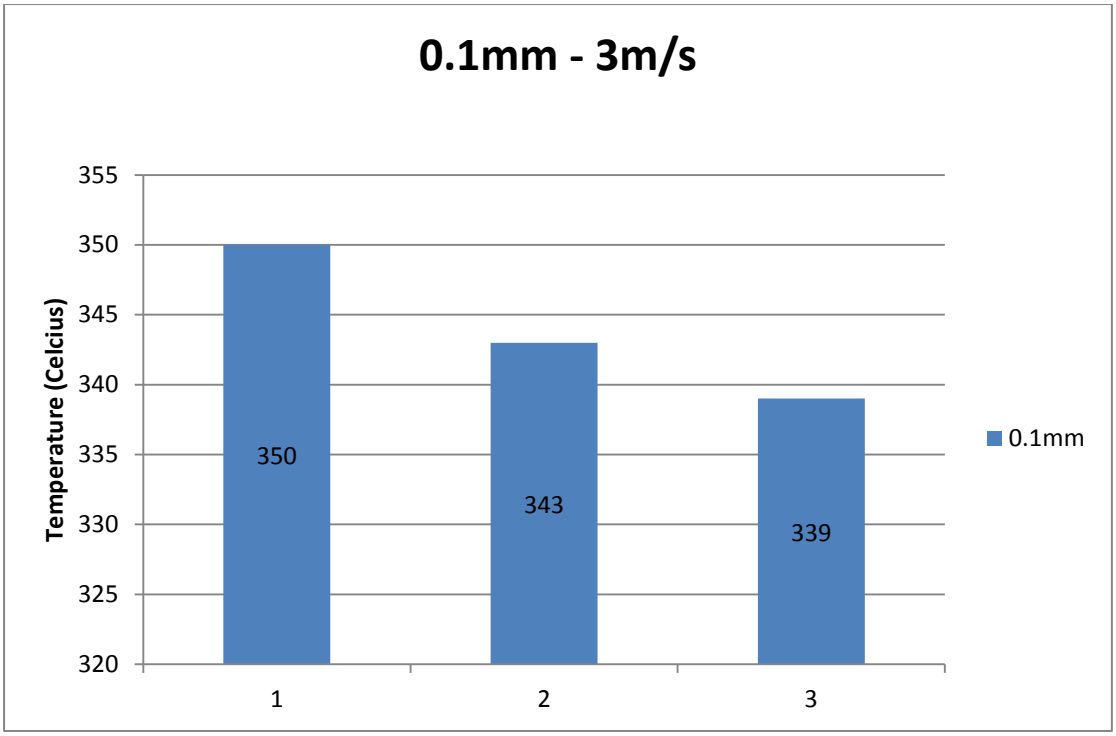
Στην τρίτη υποενότητα του μοντέλου αυτού φαίνονται όλα τα διαγράμματα με πάχος h5=0.1 mm, για τις τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες εισόδου του ψυκτικού υγρού και για όλα τα είδη των ψυκτικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν.



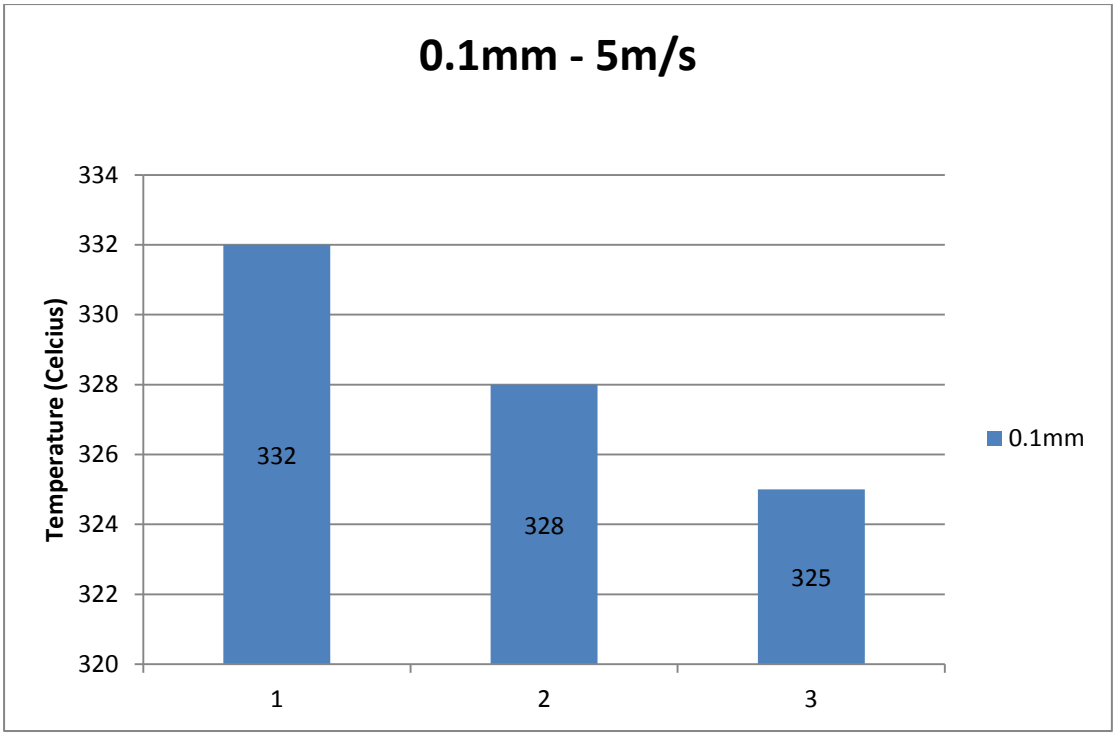
Εικόνα 6.2.21 Μοντέλο δύο περιοχών τεμαχίου – ψυκτικού υγρού, με πάχος ψυκτικού υγρού h5=0.1 mm



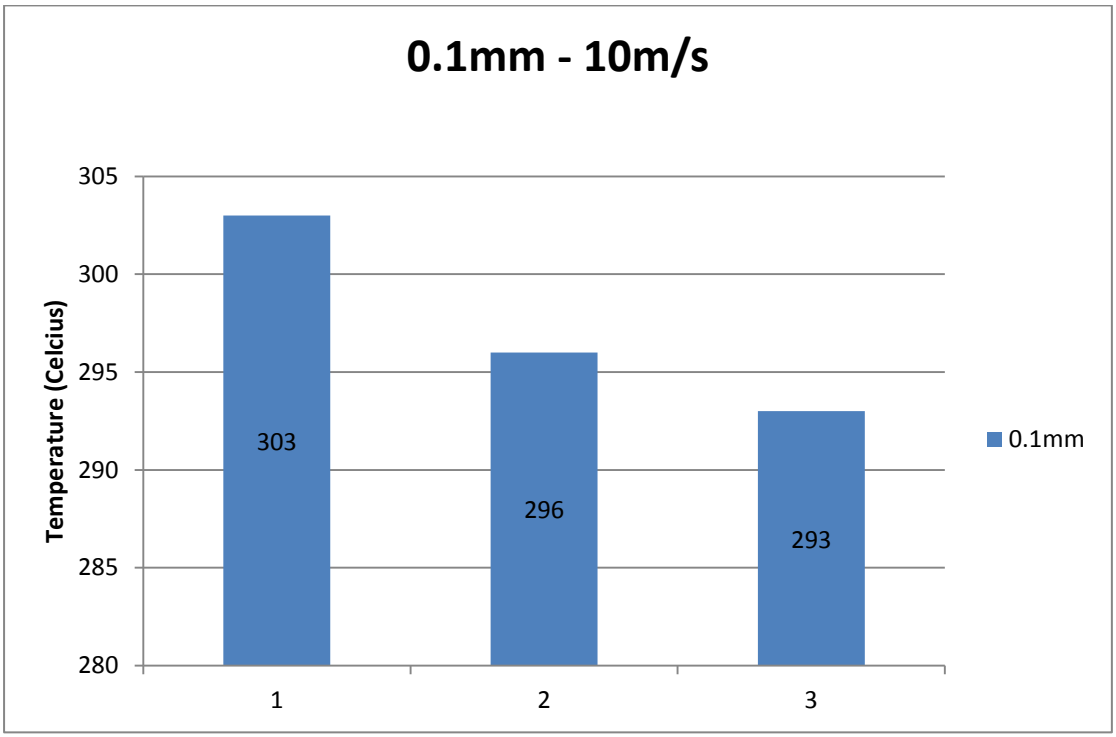
Εικόνα 6.2.22 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 1 m/s



Εικόνα 6.2.23 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 3 m/s



Εικόνα 6.2.24 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 5 m/s



Εικόνα 6.2.25 Θερμοκρασίες τεμαχίου για νερό, νανορευστό Al2O3 και νανορευστό MHS3, με ταχύτητα εισόδου 10 m/s

Coolant(0.1mm)	Velocity(m/s)	Maximum Temperature(Celcius)	h(W/m^2)	C45	Depth Of Cut(mm)
Water	1	371	4784		0,02
	3	350	3858		
	5	332	3777		
	10	303	4013		
Al2O3(3%)	1	368	6800		
	3	343	5764		
	5	328	6224		
	10	296	3004		
MHS3	1	368	7389		
	3	339	6345		
	5	325	6350		
	10	293	3461		

Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για ύψος ψυκτικού υγρού h5=0.1mm

Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για όλα τα πάχη ψυκτικού υγρού

Coolant (1mm)	Velocity (m/s)	Maximum Temperature (Celcius)	H (W/m^2)	C45	Depth Of Cut (mm)
Water	1	377	240		0,02
	3	368	246		
	5	352	755		
	10	296	833		
Al2O3(3%)	1	370	635		
	3	361	450		
	5	341	1456		
	10	298	1161		
MHS3	1	377	687		
	3	360	623		
	5	340	1440		
	10	295	1304		
Coolant (0.5mm)	**Velocity (m/s)**	**Maximum Temperature (Celcius)**	**H (W/m^2)**	**C45**	**Depth Of Cut (mm)**
Water	1	380	557		0,02
	3	361	527		
	5	344	686		
	10	282	811		
Al2O3(3%)	1	376	669		
	3	355	844		
	5	328	1336		
	10	269	1687		
MHS3	1	375	685		
	3	353	863		
	5	328	1392		
	10	268	1862		
Coolant (0.3mm)	**Velocity (m/s)**	**Maximum Temperature (Celcius)**	**H (W/m^2)**	**C45**	**Depth Of Cut (mm)**
Water	1	369	1564		0,02
	3	361	996		
	5	347	1022		
	10	297	1307		
Al2O3(3%)	1	369	2381		
	3	354	1728		
	5	333	686		
	10	279	1947		
MHS3	1	369	2476		
	3	354	1519		
	5	333	838		
	10	278	2779		

Coolant (0.2mm)	Velocity (m/s)	Maximum Temperature (Celcius)	H (W/m^2)	C45	Depth Of Cut (mm)
Water	1	372	2637		0,02
	3	361	1646		
	5	346	1549		
	10	304	1766		
Al2O3(3%)	1	375	3886		
	3	354	2972		
	5	337	1493		
	10	291	900		
MHS3	1	374	4103		
	3	355	3276		
	5	336	1797		
	10	290	1696		
Coolant(0.1mm)	**Velocity(m/s)**	**Maximum Temperature(Celcius)**	**h(W/m^2)**	**C45**	**Depth Of Cut(mm)**
Water	1	371	4784		0,02
	3	350	3858		
	5	332	3777		
	10	303	4013		
Al2O3(3%)	1	368	6800		
	3	343	5764		
	5	328	6224		
	10	296	3004		
MHS3	1	368	7389		
	3	339	6345		
	5	325	6350		
	10	293	3461		

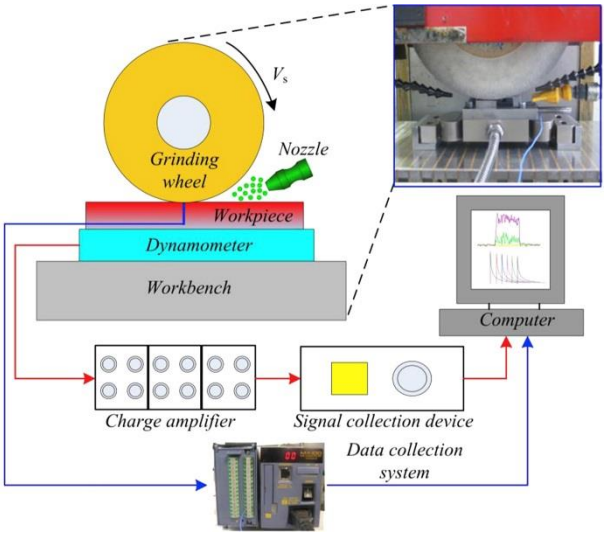
Παρατηρούμε ότι γενικά η θερμοκρασία μειώνεται αρκετά με την αύξηση της ταχύτητας εισόδου του ψυκτικού υγρού, ανεξάρτητα με το είδος και το πάχος του, κάτι που είναι αναμενόμενο.Με την αλλαγή της ταχύτητας από 1→3 m/s η μέγιστη θερμοκρασία μειώνεται από 2.5 % - 8 %, από 3→5 m/s η μέγιστη θερμοκρασία μειώνεται από 4.3 % - 8 % και από 5→10 m/s η μέγιστη θερμοκρασία μειώνεται από 9 % - 18 %.

Ακόμα, με τη μείωση του πάχους του ψυκτικού υγρού από 1→0.5 mm οι θερμοκρασίες δεν αλλάζουν σημαντικά παρά μόνο στις δύο υψηλότερες ταχύτητες, 5 και 10 m/s.Στην περίπτωση της μείωσης του πάχους του ψυκτικού υγρού από 0.5→0.1 mm στις ταχύτητες για το νερό, 1, 3 και 5 m/s, η θερμοκρασία μειώνεται κατά δέκα βαθμούς περίπου, ενώ στα 10 m/s η ταχύτητα αυξάνεται ελαφρώς.Το ίδιο μοτίβο ακολουθείται και για τα νανορευστά, μόνο που στην ταχύτητα των 5 m/s οι θερμοκρασίες παραμένουν ίδιες, ενώ παρατηρούμε ότι στα 10 m/s αυξάνεται σημαντικά η θερμοκρασία (περίπου 10%).

Η επιλογή νανορευστών αντί του νερού ως ψυκτικού υγρού μειώνει τη θερμοκρασία κατά 2% στις ταχύτητες 1 και 3 m/s.Στα 10 m/s επίσης η μείωση είναι μικρή.Η επίδραση των νανορευστών φαίνεται να είναι πιο σημαντική στην ταχύτητα των 5 m/s όπου υπάρχει μείωση 4.6%, στο μοντέλο με πάχος ψυκτικού υγρού 0.5 mm.

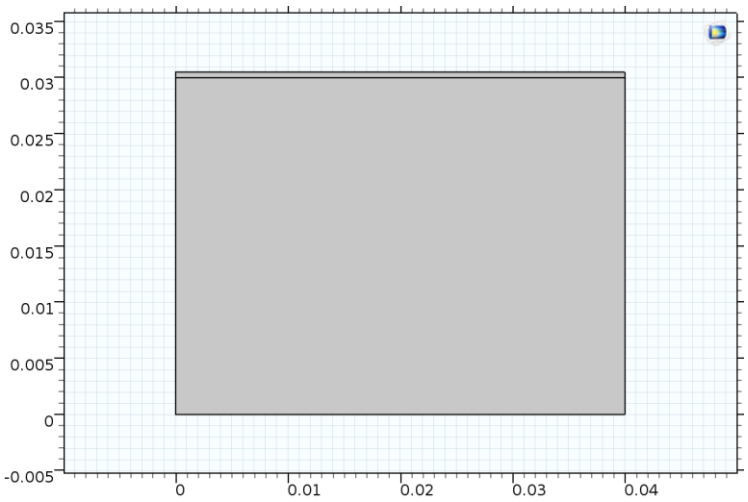
Επαλήθευση μοντέλου [6.2.6]

Για να γνωρίζουμε ότι τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο μας είναι σωστά, έγινε επαλήθευση των αποτελεσμάτων με πειραματική διάταξη του paper [13].Χρησιμοποιήθηκε τεμάχιο χάλυβα 100Cr6, διαστάσεων 40 x 30 mm, τροχός 300 mm,βάθος κοπής 0.01 mm, μέγιστη ισχύς 4.5 kW και συγκέντρωση νανορευστών 6 %.Στην εικόνα 5.2.17 φαίνεται η διάταξη της πειραματικής εγκατάστασης.

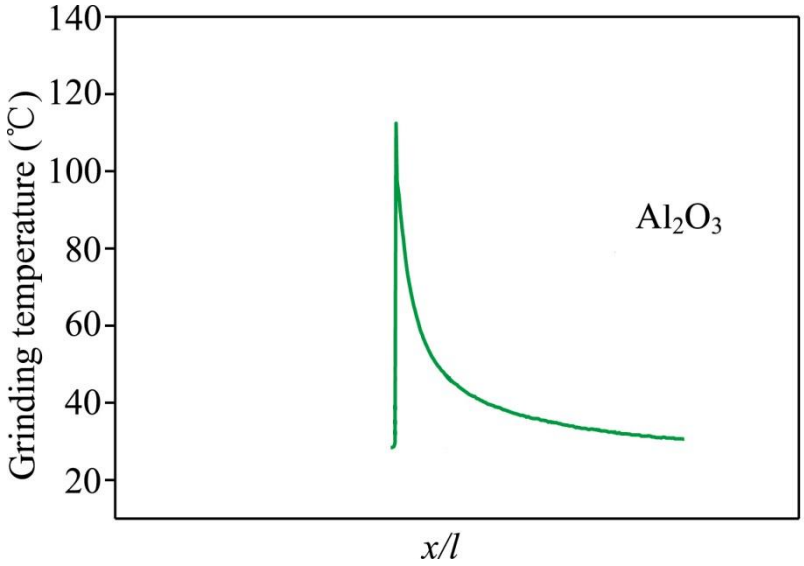


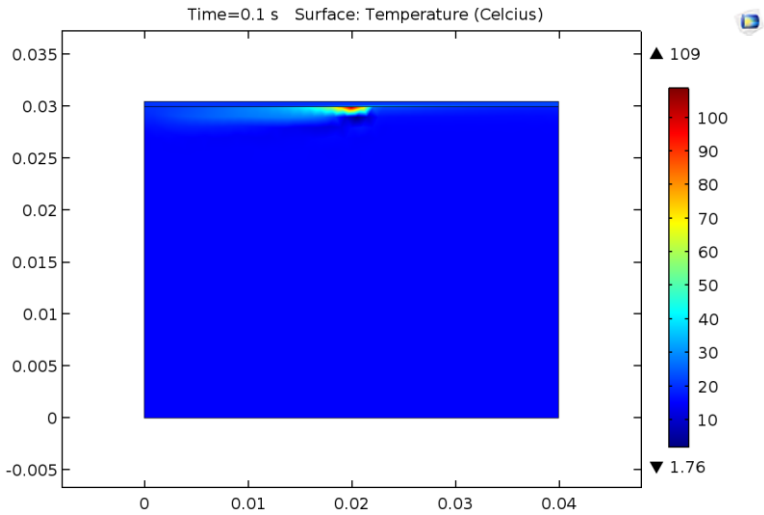
Εικόνα 6.2.28 Πειραματική διάταξη paper

Στην εικόνα 5.2.18 φαίνεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο comsol, με πάχος ψυκτικού υγρού 0.5 mm και ταχύτητα εισόδου 3 m/s.



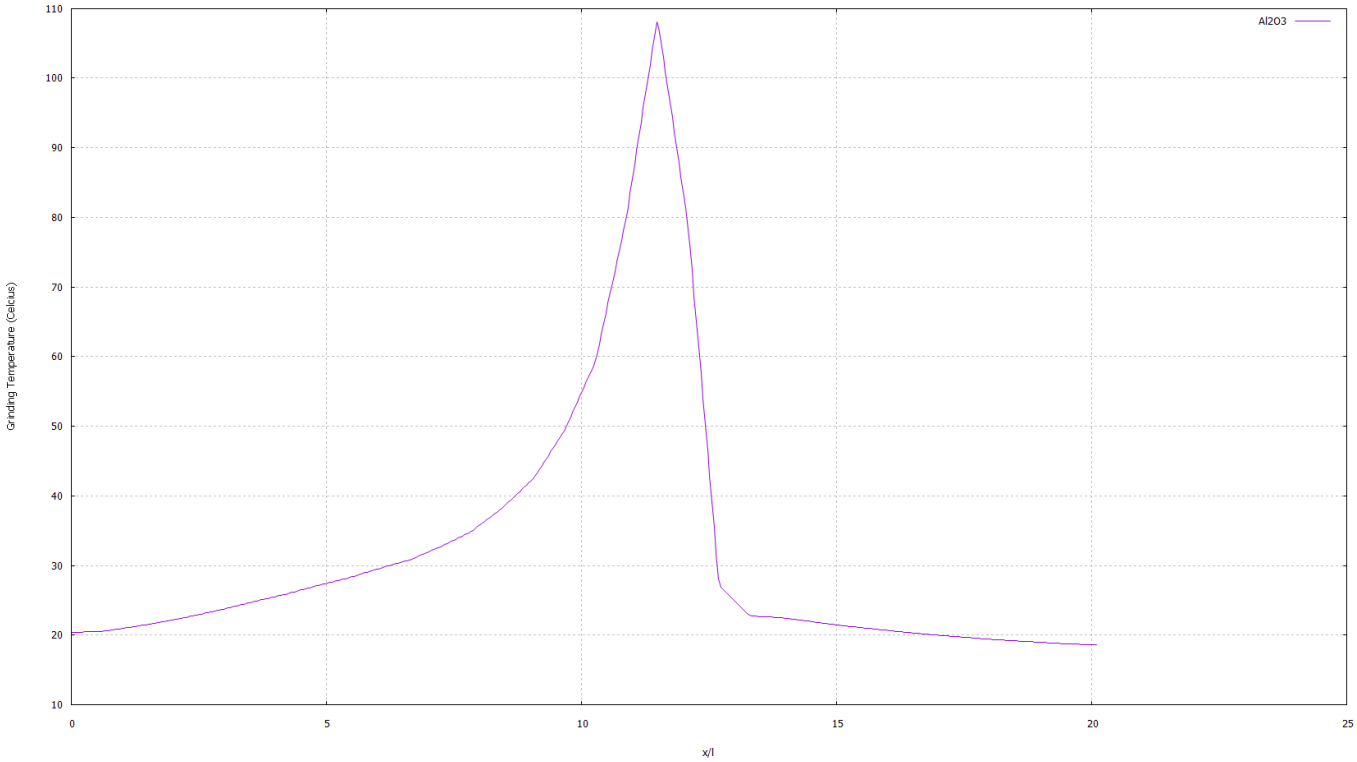
Εικόνα 6.2.29 Δισδιάστατο μοντέλο Comsol





α) β)

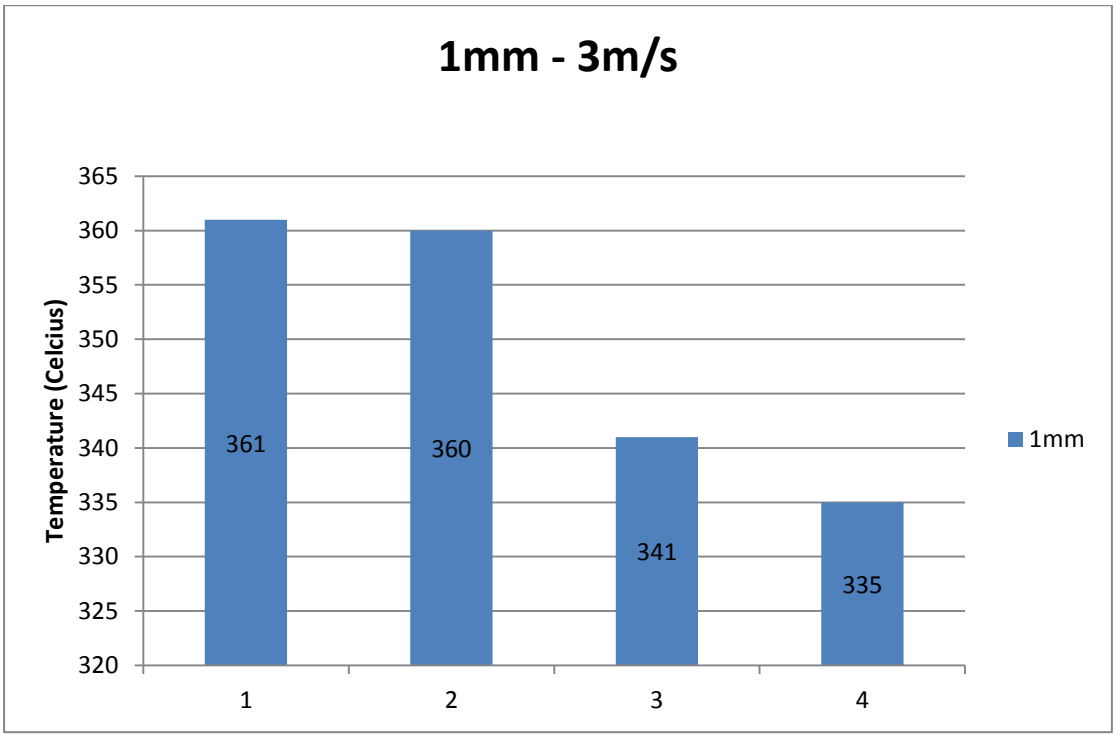
γ)



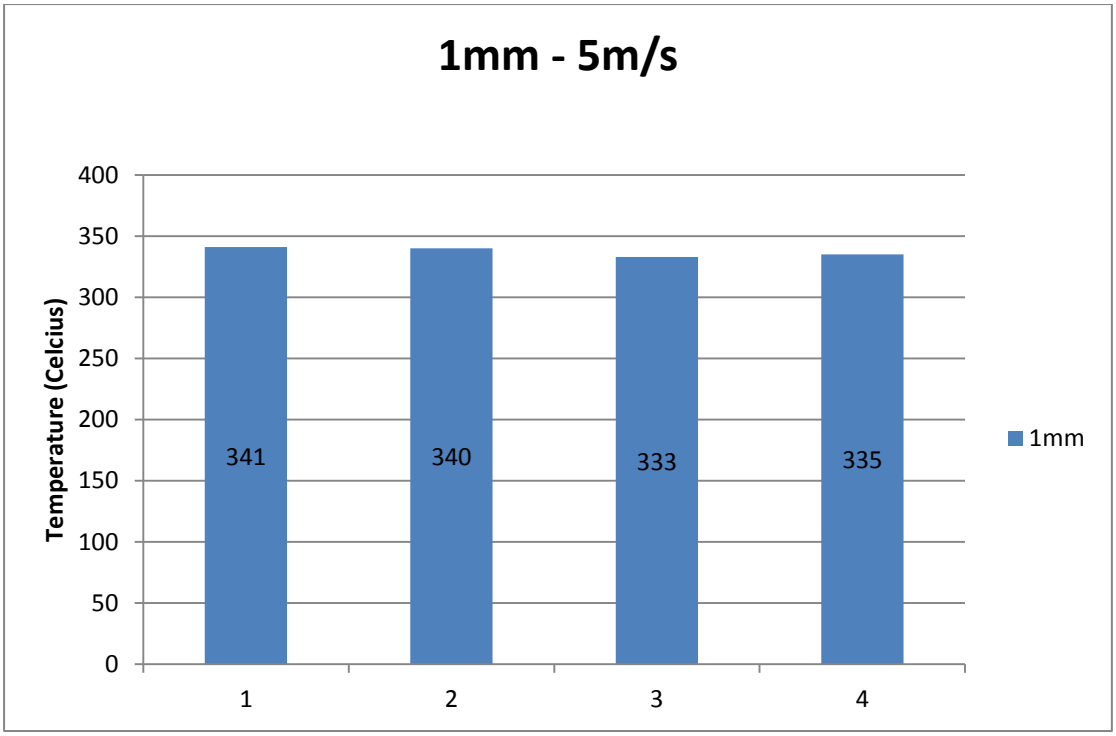
Εικόνα 6.2.30 Κατανομή θερμοκρασιών για α)Πειραματική διάταξη, β,γ)Μοντέλο Comsol

Διφασικό μοντέλο [6.3]

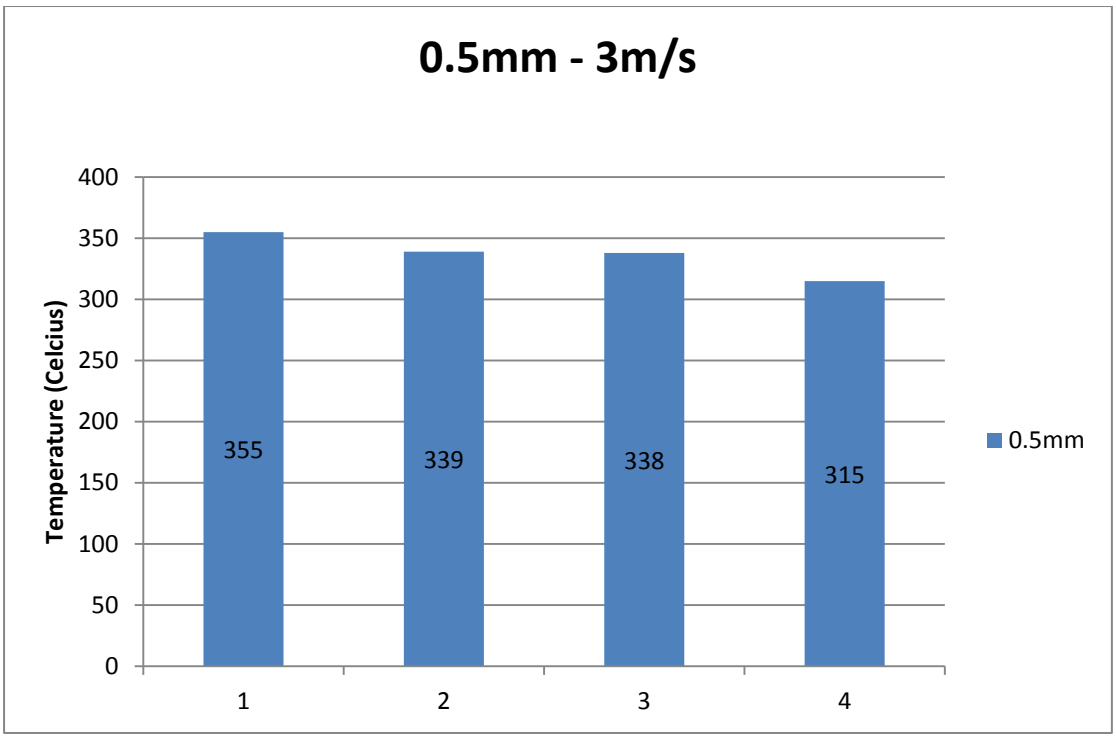
Για την ενότητα αυτή θα γίνει σύγκριση μεταξύ του διφασικού μοντέλου και του μοντέλου της προηγούμενης ενότητας, με τις δύο περιοχές τεμαχίου – ψυκτικού υγρού, για το ίδιο υλικό τεμαχίου C45, ίδιο βάθος κοπής για τα δύο νανορευστά Al2O3 και MHS3.Οι συγκρίσεις έγιναν για ταχύτητες εισόδου 3 και 5 m/s ,και πάχος ψυκτικού υγρού 1 mm και 0.5 mm.Στις εικόνες 5.3.1 έως 5.3.4 φαίνεται η σύγκριση των θερμοκρασιών για τα δύο νανορευστά για πάχος ψυκτικού υγρού 1 mm και ταχύτητα 3 και 5 m/s και αντίστοιχα για πάχος ψυκτικού υγρού 0.5 mm και ταχύτητα 3 και 5 m/s.



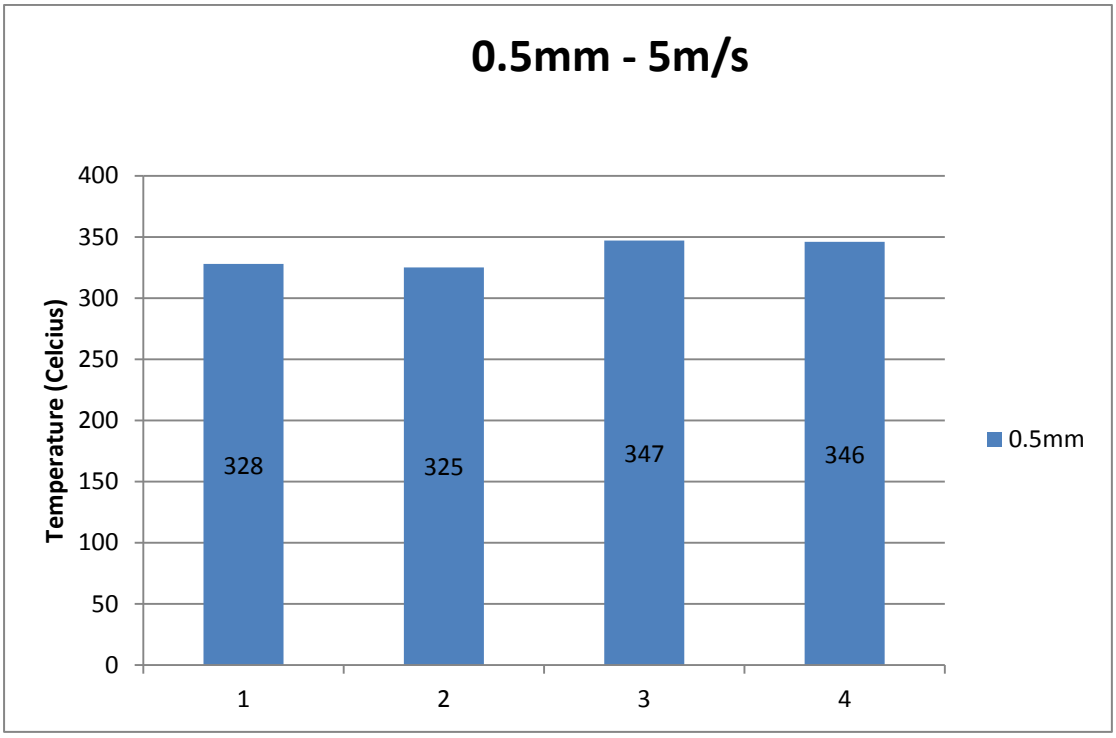
Εικόνα 6.3.1 Σύγκριση θερμοκρασιών για 1)μοντέλο δύο περιοχών Al2O3, 2) μοντέλο δύο περιοχών MHS3, 3)διφασικό μοντέλο Al2O3, 4) διφασικό μοντέλο MHS3



Εικόνα 6.3.2 Σύγκριση θερμοκρασιών για 1)μοντέλο δύο περιοχών Al2O3, 2) μοντέλο δύο περιοχών MHS3, 3)διφασικό μοντέλο Al2O3, 4) διφασικό μοντέλο MHS3



Εικόνα 6.3.3 Σύγκριση θερμοκρασιών για 1)μοντέλο δύο περιοχών Al2O3, 2) μοντέλο δύο περιοχών MHS3, 3)διφασικό μοντέλο Al2O3, 4) διφασικό μοντέλο MHS3



Εικόνα 6.3.4 Σύγκριση θερμοκρασιών για 1)μοντέλο δύο περιοχών Al2O3, 2) μοντέλο δύο περιοχών MHS3, 3)διφασικό μοντέλο Al2O3, 4) διφασικό μοντέλο MHS3

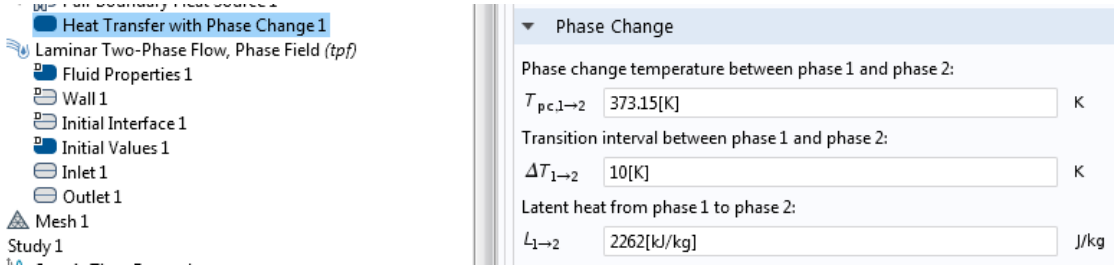
Coolant(1mm)	Velocity(m/s)	Temperature(Celcius) - Μοντέλο δύο περιοχών	Temperature(Celcius) - Διφασικό μοντέλο
Al2O3(3%)	3 5	361 341	341 333
MHS3	3 5	360 340	335 335
Coolant(0.5mm)	**Velocity(m/s)**	**Temperature(Celcius) - Μοντέλο δύο περιοχών**	**Temperature(Celcius) - Διφασικό μοντέλο**
Al2O3(3%)	3 5	355 328	338 347
MHS3	3 5	339 325	315 346

Πίνακας μέγιστων θερμοκρασίων μοντέλου δύο περιοχών – διφασικού μοντέλου

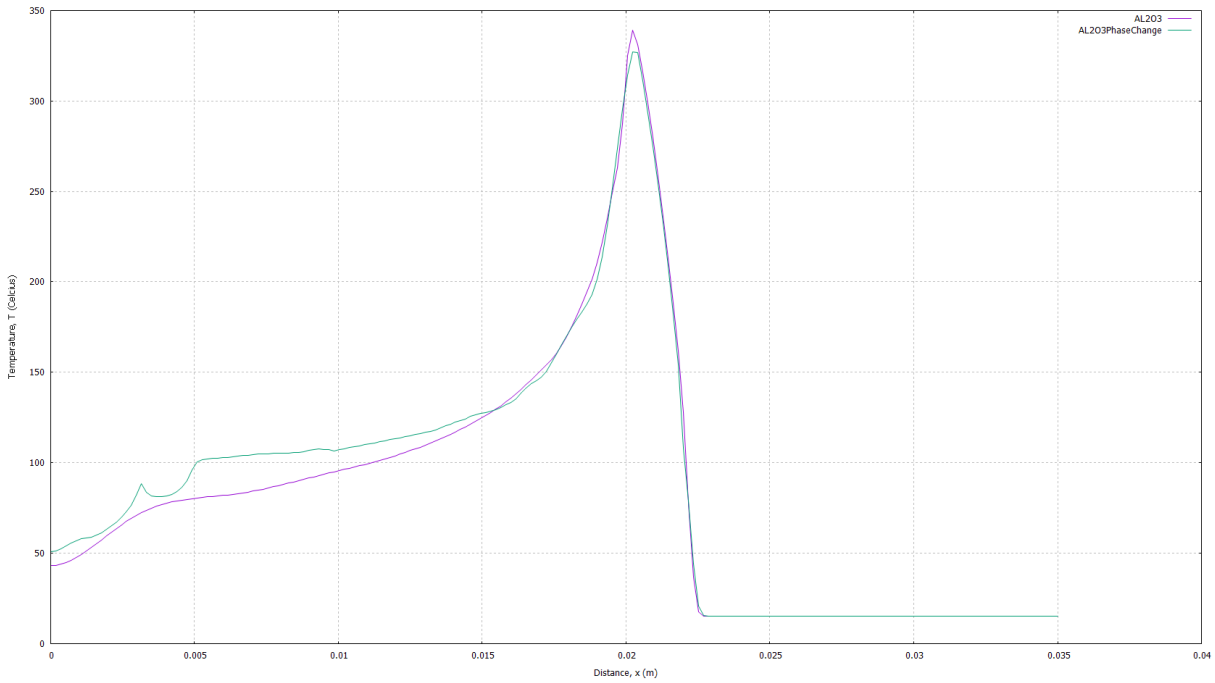
Παρατηρούμε ότι τα δύο μοντέλα στην περίπτωση των 3 m/s Και ύψος 1 mm, έχουν διαφορά 5.5 – 7 %, ενώ για 5 m/s είναι στο 2 %.Το αντίστοιχο συμβαίνει και για πάχος 0.5 mm, μόνο που στο διφασικό μοντέλο η θερμοκρασία αυξάνεται με την αλλαγή της ταχύτητας από 3 → 5 m/s σημαντικά, που προκαλεί ενδιαφέρον.

Διφασικό μοντέλο με αλλαγή φάσης (Phase Change) [6.3.1]

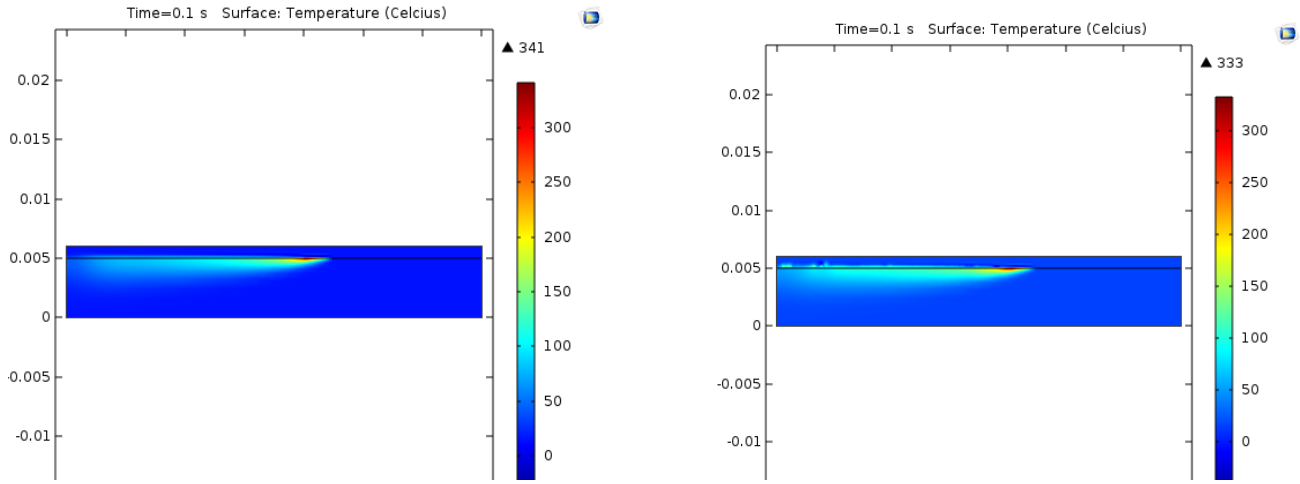
Για να δούμε την επίδραση που έχει η αλλαγή της φάσης του νερού από υγρό σε αέριο λόγω εξάτμισης(θερμοκρασίες άνω των 100 βαθμών Κελσίου), προσθέσαμε στη φυσική του μοντέλου τη μεταφορά θερμότητας με αλλαγή φάσης, την οποία έχει έτοιμη στη βιβλιοθήκη του το Cosmol.



Εικόνα 6.3.5 Ρυθμίσεις αλλαγής φάσης στο Comsol



Εικόνα 6.3.6 Σύγριση κατανομής θερμοκρασίων με και χωρίς αλλαγή φάσης



Εικόνα 6.3.7 Κατανομή θερμοκρασιών για α)Χωρίς αλλαγή φάσης β)Με αλλαγή φάσης

Η μέγιστη θερμοκρασία μειώνεται με τη χρήση αλλαγής φάσης στο διφασικό μοντέλο, που είναι αναμενόμενο καθώς οι φυσαλίδες που δημιουργούνται στην επιφάνεια του τεμαχίου απορροφούν και μεταφέρουν τη θερμότητα από το τεμάχιο, κάτι που επιβεβαιώνεται και στο paper [13].

Σύνοψη και μελλοντικές κατευθύνσεις [Κεφάλαιο 7]

Στην παρούσα εργασία μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η κατεργασία της επιφανειακής λείανσης. Σκοπός ήταν η ανάλυση της επίδρασης που έχουν τα νανορευστά ως ψυκτικά υγρά στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην κατεργασία της λείανσης. Έμπνευση αποτέλεσε η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια για την χρήση και εμπορική εκμετάλλευση των νανορευστών ως ψυκτικά υγρά στις κατεργασίες.
Αρχικά, μετά από μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί η διάταξη τεμαχίου – ψυκτικού υγρού βασισμένο στο μοντέλο του Jaeger, με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου Comsol Multiphysics. Το βασικό πρόβλημα που εξετάστηκε ήταν η ανάλυση των θερμοκρασιών στο τεμάχιο, λόγω κινούμενης πηγής θερμότητας και την επίδραση των νανορευστών ως ψυκτικά υγρά.
Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με σκοπό τη διερεύνηση και σύγκριση της επίδρασης του νερού ως ψυκτικού υγρού σε σχέση με τα νανορευστά, σε τρία διαφορετικά μοντέλα. Αρχικά εξετάσθηκε το πιο απλό μοντέλο κινούμενης πηγής για τρία διαφορετικά βάθη κοπής, τόσο σε δισδιάστατο όσο και σε τρισδιάστατο μοντέλο.Επίσης, έγινε σύγκριση μεταξύ ομοιόμορφης και τριγωνικής πηγής θερμότητας, όπου στην περίπτωσή μας οι διαφορές ήταν αμελητέες, οπότε και προτιμήθηκε η ομοιόμορφη πηγή. Στη συνέχεια, έγιναν διάφορες προσομοιώσεις στο μοντέλο με τις δύο περιοχές τεμαχίου – ψυκτικού υγρού για βάθος κοπής 0.02 mm και ομοιόμορφη πηγή θερμότητας, τρία διαφορετικά πάχη του υγρού (h1= 1 mm, h2= 0.5 mm, h3= 0.1mm) και τέσσερις ταχύτητες (1, 3 ,5 και 10 m/s).Γενικά, όσο μεγαλώνει η ταχύτητα και μειώνεται το πάχος του ψυκτικού υγρού οι θερμοκρασίες μειώνονται, περισσότερο από τα 5→ 10 m/s.Ακόμα, τα νανορευστά που χρησιμοποιήθηκαν σε σχέση με το νερό μειώνουν τη θερμοκρασία σημαντικά.
Τέλος, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ του διφασικού μοντέλου και του μοντέλου των δύο περιοχών για δύο ταχύτητες και δύο πάχη ψυκτικού υγρού. Το διφασικό μοντέλο φαίνεται να είναι πιο ρεαλιστικό από το μοντέλο των δύο περιοχών και ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε αρκετές αλλαγές παραμέτρων, αλλά χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση και βελτίωση.

Οι έρευνες και τα πειράματα που έχουν γίνει στις ιδιότητες των νανορευστών έχουν δείξει ότι η αυξημένη θερμική αγωγιμότητά τους και όχι μόνο, είναι πολλά υποσχόμενες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο σε κατεργασίες και συστήματα μεταφοράς θερμότητας αλλά και στον τομέα της ιατρικής.Για να βρουν εμπορική εφαρμογή όμως πρέπει να γίνουν πολλά περισσότερα πειράματα και να μελετηθεί το κόστος σύνθεσής τους,κατά πόσο συμφέρει οικονομικά η χρησιμοποίησή τους έναντι των συμβατικών ψυκτικών υγρών από τις βιομηχανίες και να δημιουργηθούν παγκόσμια πρότυπα καθώς έχουν παρατηρηθεί μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα δημοσιεύσεων από διαφορετικούς ερευνητές για παρόμοια πειράματα.

Βιβλιογραφία

[1] Δημήτριος Ε. Μανωλάκος, *Κατεργασίες ΙΙ*, Αθήνα, Ε.Μ.Π; 2011

[2] Society of Manufacturing Engineers: Basics of grinding

[3]Γεώργιος Χρυσολούρης, Κωνσταντίνος Σαλωνίτης, Βασικές αρχές λείανσης, Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών; 2003

[4] Δημήτριος Ε. Μανωλάκος, Τριβή-Θερμότητα-Υγρά κοπής, *Κατεργασίες ΙΙ*, Αθήνα, Ε.Μ.Π; 2011

[5] H.K Tung, Characterisic and applications of nanofluid, Malaysia, University Malaysia Pekan; 2016

[6] S. U.-S. Choi, NANOFLUID TECHNOLOGY: CURRENT STATUS AND FUTURE RESEARCH', Energy Technology Division Argonne ,National Laboratory; 1999

[7] Jagannadha R. Satti, Debendra K. Das , Dustin Ray, Investigation of the thermal conductivity of propylene glycol nanofluids and comparison with correlations, International Journal of Heat and Mass Transfer; 2017

[8] Βαλσαμιδης Ιωαννης, Σχεδιασμός Κοπτικών Εργαλείων Μεταβλητής Γεωμετρίας,Πολυτεχνείο Κρήτης; 2014

[9] Καφετζής Κωνσταντίνος Ε, Νανορευστά Ιδιότητες και εφαρμογές; 2010

[10] Changsheng Guo, Stephen Malkin, Energy Partition and Cooling During Grinding, Journal of Manufacturing Processes ; 2000

[11] A. G. Mamalis, J. Kundrak, D. E. Manolakos, K. Gyani, A. Markopoulos, M. Horvath, Effect of the workpiece material on the heat affected zones during grinding: A numerical simulation, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; 2003

[12] Jaeger, J.C., Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts, Proceedings of the royal Society of New South Wales

[13] BenkaiLi, ChangheLi, YanbinZhang, YaogangWang, DongzhouJia, MinYang, NaiqingZhang, QidongWu, ZhiguangHan, KaiSun, Heat transfer performance of MQL grinding with different nanofluids for Ni-based alloys using vegetable oil, Journal of Cleaner Production; 2017

[14] Devdatta P. Kulkarni, Ravikanth S. Vajjha, Debendra K. Das , Daniel Oliva,'Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant', Applied Thermal Engineering ; 2008

[15] Outwater, J. O.,Shaw, M. C. Surface temperature in grinding Trans. ASME

[16] Takazawa, K., Effects of grinding variables on surface structure of hardened steel, Bulletin of the Japan Society of Grinding Engineers; 1966

[17] DesRuisseaux, N. R., Zerkle, R. D., Thermal analysis of the grinding process, Jour. of Engineering for Industry; 1970

[18] Snoeys, R., Maris, M., Peters, J., Thermally induced damage in grinding, Annals of the CIRP; 1978

[19] Lavine, A. S., Malkin, S., Jen, T. C., Thermal aspects of grinding with CBN abrasives, Annals of the CIRP; 1989

[20] Rowe, W.B., Jin, T. Temperatures in High Efficiency Deep Grinding (HEDG), CIRP Annals 50(1), 2001, 205-208

[21] Guo, C., Malkin, S., Analysis of Transient Temperatures in Grinding, Journal of Engineering for Industry; 1995

[22] Kopalinsky, E. M., A new approach to calculating the workpiece temperature distributions in grinding, Wear; 1984

[23] Fricker, D. C., Pearce, T. R. A., Harrison, A. J. L., Predicting the occurrence of grind hardening in cubic boron nitride grinding of crankshaft steel, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers/B, Journal of Engineering Manufacture;2004

[24] Y. Liu, A. Warkentin, R. Bauer, Y. Gong, “Investigation of different grain shapes and dressing to predict surface roughness in grinding using kinematic simulations, Precision Engineering 37; 2013

[25] Guo, C., Malkin, S., Analysis of fluid flow through the grinding zone, Journal of Engineering for Industry; 1992

[26] Chen, X., Rowe, W.-B., Mills, B., Allanson, D.- R., Analysis and simulation of the grinding process Part IV: Effects of wheel wear, International Journal of Machine Tools and Manufacture; 1998

[27] Nguyen, T., Zhang, L. C., Modelling of the mist formation in a segmented grinding wheel system, Int. J. of Machine Tools & Manufacture; 2005

[28] DesRuisseaux, N. R., Thermal aspects of grinding processes, Dissertation, University of Cincinnati; 1968

[29] Inasaki, I., Grinding process simulation based on the Wheel topography Measurement, Annals of the CIRP; 1996

[30] Chen, X., Rowe, W.-B., Analysis and Simulation of the Grinding Process: Generation of the Grinding Wheel Surface, International Journal of Machine Tools and Manufacture; 1996

[31] Koshy, P., Ives, L.-K., Jahanmir, S., Simulation of diamond-ground surface, International Journal of Machine Tools and Manufacture; 1999

[32] Lowin, R., Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück. Dissertation, University of Aachen; 1980

[33] Hoffmeister, H.-W., Weber Th., Temperaturfeldentwicklung beim Flachprofilschleifen, Kolloquium Umweltverträgliches Schleifen - Ökologie als Ökonomie der Zukunft, Ergebnisbericht des Verbundprojektes "Umweltverträgliches Schleifen" WZL Aachen, Mai ; 2000

[34] Hesselbach, J., Hoffmeister, H.-W., Maiz K., Machanova I., Surface grinding with cryogenics, Production Engineering; 2004

[35] Hoffmeister, H.-W., Maiz, K., Machanova, I., Einfluss der Kühlschmierbedingungen beim Flachschleifen, In: Hoffmeister, H.-W., Tönshoff, H.-K. (eds.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 62nd ed., Vulkan Verlag; 2005

[36] Jin, T., Stephenson, D. J., Three dimensional finite element simulation of transient heat transfer in high efficiency deep grinding, Annals of the CIRP; 2004

[37] Moulik, P. N., Yang, H. T. Y., Simulation of thermal stresses due to grinding,

International Journal of Mechanical Sciences; 2001

[38] Christoph Baumgarta , Julian J. Radziwilla, Friedrich Kustera, Konrad Wegenera, A study of the interaction between coolant jet nozzle flow and the airflow around a grinding wheel in cylindrical grinding, 16thCIRP Conference on Modelling of Machining Operations,

[39] Zheng, LiZheng, LiWenfeng, DingWenfeng, DingC.-Y. MaJ. H. XuJ. H. Xu,Grinding temperature and wheel wear of porous metal-bonded cubic boron nitride superabrasive wheels in high-efficiency deep grinding, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Manufacture; 2015

[40] Minea, Alina Adriana, Hybrid nanofluids based on Al_2O_3, TiO_2 and SiO_2: Numerical

evaluation of different approaches, International Journal of Heat and Mass Transfer; 2017