



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

## Διπλωματική Εργασία

***“Μοντελοποίηση και Προσομοίωση του  
Φαινομένου Keyhole σε κατεργασία  
τρισδιάστατης εκτύπωσης”***

**Αλέξιος Ν. Οικονομίδης**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Μαρκόπουλος Άγγελος**

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2020**





National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Section of Manufacturing Technology

## **Diploma Thesis**

***“Investigation and Modeling of the Keyhole Effect  
in non-conventional manufacturing processes”***

**Oikonomidis N. Alexios**

**Supervisor: Markopoulos Angelos**

**Athens, February 2020**



### *Ευχαριστίες*

Θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κύριο Άγγελο Μαρκόπουλο τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το παρόν θέμα, όσο και για την βοήθειά του κατά την διάρκεια της μελέτης μου.

Επίσης θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο και διδακτορικό ερευνητή Μάνο Παπάζογλου ο οποίος με τις συμβουλές και την βοήθεια του, συνέβαλε καταλυτικά στην διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Η παρούσα διπλωματική αφιερώνεται στην οικογένεια μου Νίκο, Ζωή, Μηνά, Μαρία που η χαρά τους να με δούν να εκπληρώνω τους στόχους μου, ήταν και θα είναι το μεγαλύτερο κίνητρο για να προχωρώ.





## Περιεχόμενα

i.	Περίληψη .....	2
ii.	Abstract .....	3
iii.	Επεξήγηση Συμβόλων .....	4
1.	Εισαγωγή.....	5
1.1.	3D Printing.....	5
1.2.	Μοντελοποίηση Κατεργασιών .....	6
1.3.	Φαινόμενο Keyhole στις κατεργασίες.....	7
2.	3D Printing.....	8
2.1.	Τί είναι το 3D printing .....	8
2.2.	Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	9
2.3.	Τεχνολογίες και Διαδικασίες 3D Printing .....	11
2.4.	Μέθοδος Selective Laser Melting.....	16
2.5.	Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Μεθόδου SLM .....	19
3.	Φαινόμενο Keyhole.....	20
3.1.	Τι είναι το φαινόμενο Keyhole (Keyhole effect) .....	20
3.2.	Φαινόμενο Keyhole στις συγκολλήσεις .....	20
3.3.	Παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο .....	22
3.4.	Εξοπλισμός συγκόλλησης με τη μέθοδο ακτίνας laser (LBW) .....	24
3.5.	Φαινόμενο Keyhole στο 3D printing .....	24
4.	Παλαιότερα πειράματα.....	26
5.	Μέθοδος Μοντελοποίησης.....	37
6.	Αποτελέσματα.....	51
6.1.	2D Μοντέλο.....	52
6.2.	3D Μοντέλο (χωρίς εμφάνιση Keyhole).....	62
6.4.	3D Μοντέλο (με εμφάνιση Keyhole).....	66
6.5.	Σύγκριση με παλαιότερες μελέτες .....	85
7.	Συμπεράσματα.....	86



## i. Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου Keyhole όπως αυτό εμφανίζεται σε μη συμβατικές κατεργασίες και όπως το 3D printing και η συγκόλληση με ακτίνα laser. Η μελέτη και η προσομοίωση των κατεργασιών πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα αναπτύχθηκε ένα αρχικό μοντέλο και έπειτα έγιναν προσθήκες μέχρι τη δημιουργία του τελικού μοντέλου. Στο τελικό μοντέλο μελετήθηκε ο σχηματισμός του φαινομένου Keyhole για διάφορες συνθήκες ισχύος και ταχύτητας σάρωσης στη διαδικασία SLM (Selective Laser Melting).

Στο πρώτο κεφάλαιο, το οποίο είναι εισαγωγικό, περιγράφεται ο σκοπός της εργασίας. Γίνεται μία σύντομη αναφορά στο 3D printing, δηλαδή στο πώς επιτυγχάνεται η διαδικασία εκτύπωσης και τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει. Αναφέρονται επίσης λίγα λόγια για τη χρησιμότητα της μοντελοποίησης των κατεργασιών και για τον σχηματισμό του φαινομένου keyhole.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος του 3D printing και η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης από τον σχεδιασμό του τεμαχίου στον Η/Υ μέχρι την εκτύπωσή του. Αναφέρονται διάφορες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν καθώς και η μέθοδος SLM.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται αρχικά το φαινόμενο Keyhole γενικά στις κατεργασίες, τα αίτια εμφάνισής του και ο τρόπος σχηματισμού του. Έπειτα περιγράφεται το φαινόμενο όπως αυτό εμφανίζεται στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο ακτίνας laser, οι παράμετροι που το επηρεάζουν και συμπληρώνεται το υποκεφάλαιο με μία αναφορά στον εξοπλισμό της συγκεκριμένης μεθόδου συγκόλλησης. Τέλος μελετάται το φαινόμενο Keyhole στο 3D printing.

Το τέταρτο κεφάλαιο αφιερώθηκε στη μελέτη παλαιότερων πειραμάτων και αναφορών σχετικά με το φαινόμενο Keyhole. Πιο συγκεκριμένα περιγράφεται η κάθε μελέτη ξεχωριστά και τα αποτελέσματά της.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος μοντελοποίησης της διαδικασίας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, με έμφαση να δίνεται στο πλέγμα, στο υλικό, στη γεωμετρία, στις αρχικές και συνοριακές συνθήκες, καθώς και στο χρονικό βήμα.

Το έκτο κεφάλαιο αποτελεί μία παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναγράφονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.





## ii. Abstract

The objective of this study is the investigation of the Keyhole effect formation as it appears in non-conventional production technologies like 3D printing and LBW (Laser Beam Welding). The whole research and the simulation was executed by a program that solves finite elements. In the beginning a draught model was designed and gradually the final model was reached through the addition of new characteristics and the constant pursuit of better results. By using the final model we investigated the Keyhole effect formation under variable conditions for both 3D printing and LBW, for different laser beam power and laser beam velocity values.

In the first chapter, which is introductory, we describe the objective of this study. We briefly discuss the basic principles of 3D printing, especially about the process of printing and its advantages. We also mention some things about the Keyhole formation in production technologies and the need of modeling the process.

In the second chapter emphasis is placed on the 3D printing method and on the process of designing the model in a computer to finally building the desired object in reality. Several 3D printing technologies are described by mentioning their advantages and disadvantages. We further emphasize on the SLM (Selective Laser Melting) method.

In the third chapter we investigate the Keyhole effect generally in technologies production and we examine the parameters that cause the effect and the formation process. Moreover, emphasis is placed on Keyhole formation especially in LBW. We mention the parameters that affect the problem. Finally, we devote a paragraph to describe the LBW's equipment and we conclude by discussing about the Keyhole effect in 3D printing.

The fourth chapter is devoted to other experiments and papers written about topics similar regarding the Keyhole effect. Each research is described separately, as we evaluate the results and conduct conclusions.

In the fifth chapter we describe the modelling process at our finite element program by giving emphasis at the mesh, the material, the geometry, the initial and boundary conditions and the time step.

In the sixth chapter we present the results of our study.

Finally, in the last chapter we mention the conclusion of this study.



### iii. Επεξήγηση Συμβόλων

Σύμβολο	Ιδιότητα	Μονάδες
$T$	Θερμοκρασία	K ή °C
$\rho$	Πυκνότητα	Kg/m <sup>3</sup>
$P$	Ισχύς Δέσμης Laser	Watt
$r$	Ακτίνα Δέσμης Laser	$\mu\text{m}$
$p$	Πίεση	Pa
$C_p$	Θερμοχωρητικότητα	J/Kg·K
$S_s$	Ταχύτητα Σάρωσης	mm/s
$\sigma$	Συντελεστής Επιφανειακής Τάσης	mN/m
$\lambda$	Θερμική Αγωγιμότητα	W/m·K
$h$	Συντελεστής Συναγωγής	Kg/s <sup>3</sup> ·K
$Int1$	Δείκτης Απορρόφησης	-
$q_r$	Απώλειες ακτινοβολίας	Watt
$\epsilon$	Συντελεστής Εκπομπής	-
$\rho w1$	Δυναμικό Ιξώδες Χάλυβα	Pa·s
$\rho_{or}$	Δείκτης Θερμικής Αγωγιμότητας Πούδρας	W/m·K
$K_{por}$	Δείκτης Θερμικής Αγωγιμότητας Χάλυβα	W/m·K

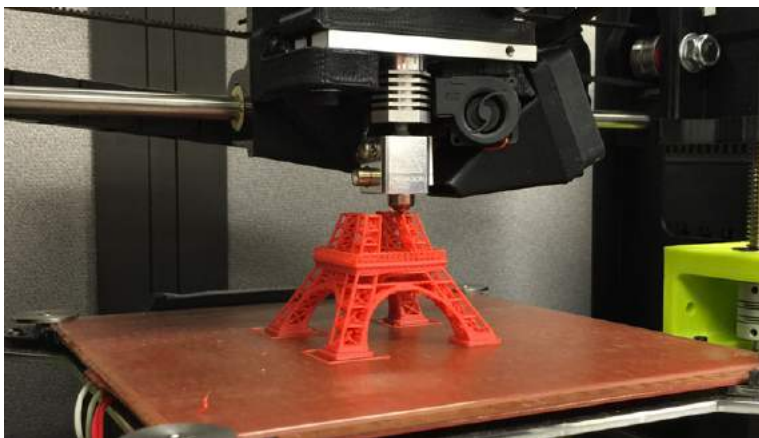


## 1. Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη και η κατανόηση του φαινομένου Keyhole, το οποίο εμφανίζεται στην κατεργασία *slm* και στο 3D printing. Είναι πολύ χρήσιμο να γνωρίζουμε τα αίτια, τις συνθήκες εμφάνισης και τη μορφή του φαινομένου, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος να προκαλέσει ρωγμές στο υλικό, αυξημένο πορώδες και άλλου είδους προβλήματα τα οποία μπορεί ενδεχομένως να το οδηγήσουν στην αστοχία του. Για να επιτευχθεί το παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο προσομοιώθηκε η εκάστοτε κατεργασία και μελετήθηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν την εμφάνιση του φαινομένου. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η εμφάνιση του Keyhole σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι επιθυμητή, ενώ σε άλλες μπορεί να αποδειχθεί καταστροφική.

### 1.1. 3D Printing

Το 3D printing αποτελεί μία μη συμβατική κατεργασία κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων από ένα ηλεκτρονικό αρχείο. Το προς κατασκευή αντικείμενο αρχικά σχεδιάζεται με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και εκτυπώνεται κατά στρώσεις με τη βοήθεια του 3D printer. Το μεγάλο πλεονέκτημα του 3D printing είναι η απόδοση πολύπλοκων μορφών με μεγαλύτερη ευκολία και με χρήση λιγότερου υλικού σε σχέση με άλλες κατεργασίες που χρησιμοποιούνται ευρέως. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά κατάλληλους τους 3D printers για την κατασκευή πολύπλοκων “custom-made” αντικειμένων και δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής πρωτοτύπου μέσα σε λίγες μέρες ή ώρες σε αντίθεση με άλλες κατεργασίες που μπορεί να χρειαστούν και εβδομάδες. Στον αντίποδα, υπάρχουν περιορισμοί στο υλικό που χρησιμοποιείται (μέταλλο και πλαστικό) και αδυναμία μαζικής παραγωγής με ρυθμούς αντίστοιχους της χύτευσης.[1]



Εικόνα 1-1: Κατασκευή αντικειμένου με 3D εκτυπωτή [1]

Για να φτάσει κανείς στο σημείο να εκτυπώσει το δικό του τρισδιάστατο αντικείμενο χρειάζονται 2 βασικά βήματα. Χρειάζεται για αρχή να σχεδιασθεί το αντικείμενο σε κατάλληλο λογισμικό, το κόστος του οποίου μπορεί να είναι από δωρεάν έως μερικές χιλιάδες ευρώ ετησίως (λογισμικά βιομηχανιών) και έπειτα να χωρισθεί το αντικείμενο σε μερικές χιλιάδες ή εκατομμύρια οριζόντια στρώματα, ώστε να είναι εφικτή η κατασκευή του από τον 3D printer.



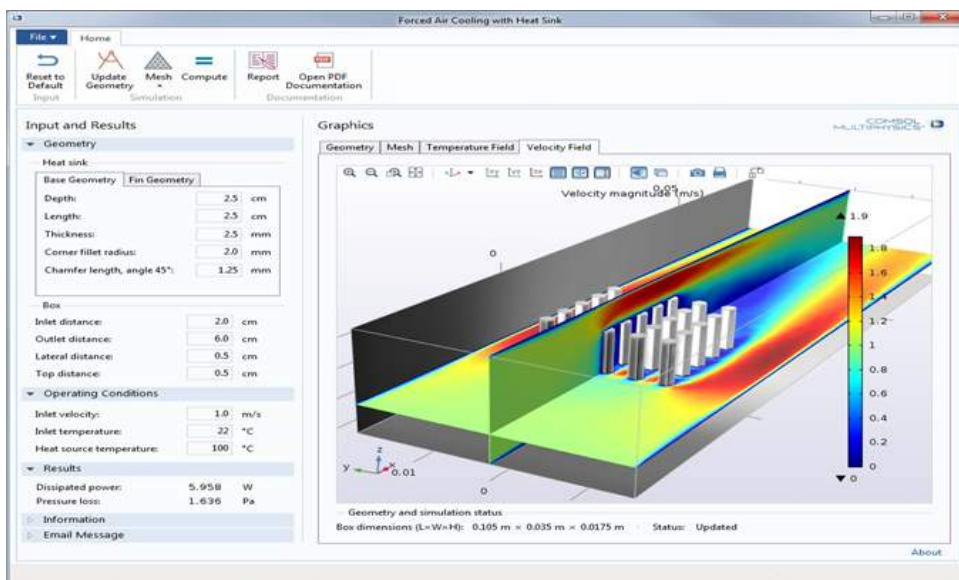
## 1.2. Μοντελοποίηση Κατεργασιών

Η μοντελοποίηση των κατεργασιών είναι μία πολύ χρήσιμη διαδικασία προκειμένου να σχηματιστεί μία ρεαλιστική εικόνα για το αποτέλεσμα αυτής πριν ξεκινήσει η πραγματική διαδικασία. Με τη μοντελοποίηση και τη προσομοίωση μπορούμε να εξετάσουμε ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα σε μικρό χρόνο και κόστος και να αποφευχθεί ένα σύνολο προβλημάτων, τα οποία θα ήταν δύσκολο να προβλεφθούν χωρίς αυτήν.

Σήμερα η μοντελοποίηση και η προσομοίωση κατεργασιών όπως οι συγκολλήσεις και το 3D printing πραγματοποιείται με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων. Τέτοιου είδους προγράμματα επιτρέπουν στον χρήστη να προσομοιώσει και να μελετήσει μία πληθώρα κατεργασιών και φυσικών προβλημάτων και να λαμβάνει αριθμητικά αποτελέσματα, διαγράμματα, αλλά και video τα οποία προσομοιώνουν αρκετά ρεαλιστικά το φυσικό πρόβλημα.

Πιο συγκεκριμένα λογισμικά με δυνατότητα επίλυσης μοντέλων multiphysics μας δίνουν τη δυνατότητα μελέτης ενός μεγάλου συνόλου φυσικών προβλημάτων όπως προβλήματα:[2]

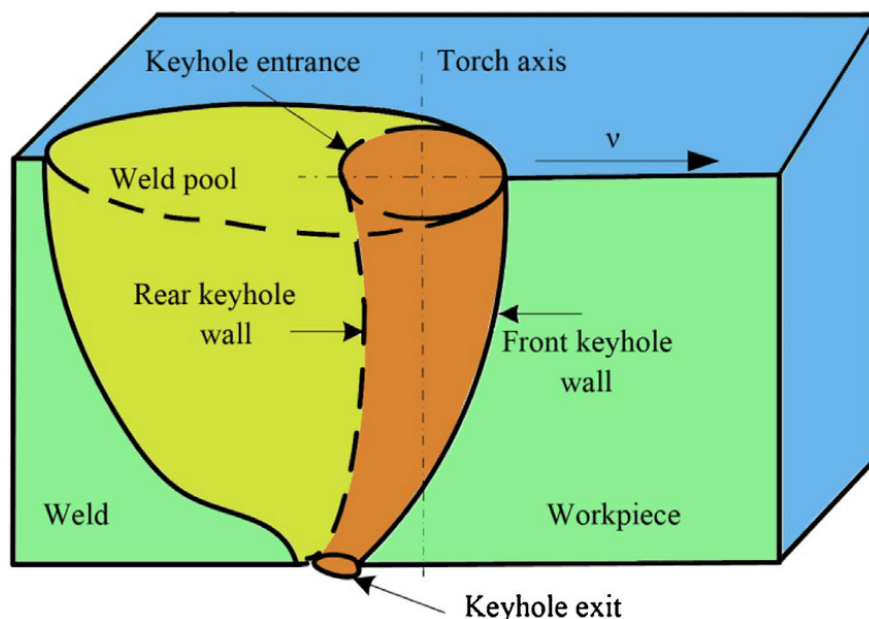
- Μεταφοράς θερμότητας
- Ρευστομηχανικής (στρωτής και τυρβώδους ροής)
- Ηλεκτρολογικά
- Ηλεκτρομαγνητικά
- Ηλεκτροχημικά
- Οπτικής
- Ακουστικής
- Ραδιοσυχνοτήτων
- Δομικής μηχανικής



Εικόνα 1-2: Πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων [2]

### 1.3. Φαινόμενο Keyhole στις κατεργασίες

Το φαινόμενο Keyhole εμφανίζεται συνήθως σε κατεργασίες τήξης μετάλλου ή πολυμερούς υλικού, όπως είναι η συγκόλληση ακτίνας laser και το 3D printing. Με την πρόσπτωση της ακτίνας laser στο υλικό δημιουργείται μια περιοχή τηγμένου υλικού, η οποία υπό κάποιες συνθήκες μπορεί να πάρει μορφή που θυμίζει σχήμα κλειδαρότρυπας, δηλαδή με μεγάλο άνοιγμα στην επιφάνεια του υλικού και πιο στενή σε μεγαλύτερο βάθος. Ο σχηματισμός αυτής της ιδιαίτερου μορφής οπής ονομάζεται φαινόμενο Keyhole και είναι το κύριο θέμα μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Όπως έχει αναφερθεί ήδη, ο σχηματισμός του φαινομένου Keyhole χρήζει ιδιαίτερης προσοχής διότι μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες στο υλικό (ρωγμές και πορώδες), με αποτέλεσμα ακόμα και την αστοχία. [3]



Εικόνα 1-3 Σχηματισμός φαινομένου Keyhole σε δοκίμιο [3]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε δοκίμιο ορθογωνικής διατομής κατασκευασμένο από χάλυβα 316 steel. Στο δοκίμιο προσκρούει ακτίνα laser γκαουσιανής μορφής και κατάλληλης ισχύος, ώστε έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα να εμφανίζεται φαινόμενο Keyhole. Το αρχικό μοντέλο που μελετήθηκε ήταν 2D και σχετικά απλό και στη συνέχεια έγιναν προσθήκες μέχρι την επίτευξη του τελικού μοντέλου. Το υπολογιστικό πλέγμα για την επίλυση επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πυκνό στην περιοχή ακραίων μεταβολών (περιοχή πρόσπτωσης της ακτίνας laser) και πιο αραιό στην τριγύρω περιοχή. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου και κόστους, χωρίς να υπάρχουν επιπτώσεις στην ακρίβεια των υπολογισμών.



## 2. 3D Printing

### 2.1. Τι είναι το 3D printing

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (ή 3D printing) είναι μια εξαιρετικά ευέλικτη μέθοδος παραγωγής αντικειμένων και γρήγορη κατασκευή πρωτοτύπων. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει καταλάβει σημαντική θέση σε πολλές βιομηχανίες σε όλο τον κόσμο. Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μέρος μιας οικογένειας τεχνολογιών κατασκευής που ονομάζεται κατασκευή με προσθήκη υλικού (Additive manufacturing). Αυτό περιγράφει τη δημιουργία ενός αντικειμένου με την προσθήκη υλικού σε στρώσεις μέχρι την ολοκλήρωση του τελικού αντικειμένου, σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνολογίες (π.χ. τόννευση, φρεζάρισμα, σφυρηλάτιση) στις οποίες λαμβάνει χώρα αφαίρεση ή παραμόρφωση υλικού. Καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας της, η προσθετική παραγωγή έχει περάσει από διάφορα ονόματα, συμπεριλαμβανομένης της στερεολιθογραφίας, της 3D στρωμάτωσης (3D layering) και της 3D εκτύπωσης, αλλά η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η πιο γνωστή.

Ο ορισμός “3D Printing” καλύπτει ένα ευρύ φάσμα διεργασιών στις οποίες ένα υλικό ενώνεται και στερεοποιείται, υπό τον έλεγχο υπολογιστικών προγραμμάτων, με σκοπό την δημιουργία ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Τη δεκαετία του 1990 οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης θεωρούνταν κατάλληλες μόνο για την δημιουργία λειτουργικών ή αισθητικών πρωτοτύπων. Στις μέρες μας, η ακρίβεια, η επαναληψιμότητα και η ποικιλία υλικών έχουν παρουσιάσει ραγδαία ανάπτυξη, καθιστώντας την τρισδιάστατη εκτύπωση μία βιώσιμη λύση ακόμα και για βιομηχανική παραγωγή. Αυτό οφείλεται επίσης στο γεγονός πως ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η δυνατότητα παραγωγής ιδιαίτερα περίπλοκων αντικειμένων (τα οποία δεν θα μπορούσαν να παραχθούν με συμβατικές μεθόδους), με προαπαιτούμενο μόνο ένα τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο.

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι σε θέση να εκτυπώνουν χρησιμοποιώντας πλαστικό, σκυρόδεμα, μέταλλα ή ακόμη και ζωικά κύτταρα. Οι περισσότεροι εκτυπωτές, όμως, είναι σχεδιασμένοι να χρησιμοποιούν μόνο ένα είδος υλικού. Η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκει εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς της παραγωγής με πολλές διαφορετικές μορφές. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα ώστε να γίνει αντιληπτό το εύρος του φάσματος στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνολογία:

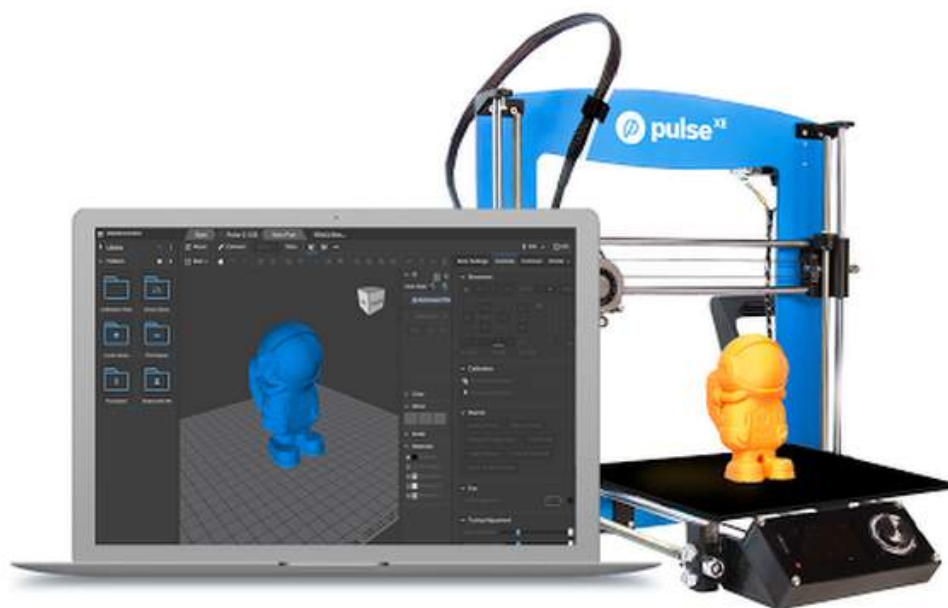
- Οδοντιατρικά προϊόντα
- Αρχιτεκτονικές Μακέτες
- Προσθετικά μέρη (π.χ. άκρα)
- Αντικείμενα υποστήριξης για ταινίες
- Διακοσμητικά (π.χ. λάμπες, έπιπλα)
- Ρούχα, Αξεσουάρ
- Μουσικά όργανα
- Αντιγραφή αρχαίων αντικειμένων
- Επαναφορά κατεστραμμένων αντικειμένων σε σκηνή εγκλήματος



## 2.2. Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η διαδικασία της εκτύπωσης 3D αρχίζει κάνοντας ένα γραφικό μοντέλο του αντικειμένου προς εκτύπωση. Αυτά τα μοντέλα συνήθως σχεδιάζονται μέσω σχεδιαστικών προγραμμάτων για υπολογιστές (CAD) και αυτό μπορεί να είναι το πιο δύσκολο μέρος της διαδικασίας. Προγράμματα που χρησιμοποιούνται για αυτό περιλαμβάνουν το TinkerCAD, το Fusion360 και το Sketchup. Για σύνθετα και περίπλοκα προϊόντα, αυτά τα μοντέλα συχνά δοκιμάζονται εκτενώς σε προσομοίωση για τυχόν ελαττώματα στο τελικό προϊόν. Φυσικά, εάν το προς εκτύπωση αντικείμενο είναι καθαρά διακοσμητικό, αυτός ο έλεγχος είναι λιγότερο σημαντικός.

Μετά το σχεδιασμό, στην επόμενη φάση το μοντέλο τεμαχίζεται ψηφιακά σε φέτες ή αλλιώς στρώματα για να τυπωθεί. Αυτό είναι ένα ζωτικής σημασίας βήμα δεδομένου ότι ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής δεν μπορεί να αντιληφθεί ένα 3D μοντέλο με τον ίδιο τρόπο όπως ένας άνθρωπος. Ο σχεδιασμός για κάθε στρώμα αποστέλλεται έπειτα στον εγκέφαλο του εκτυπωτή για να εκτυπωθεί και να καθοριστεί η σειρά των στρωμάτων. Η διαδικασία τεμαχισμού συνήθως επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κάποιο ειδικό πρόγραμμα όπως το CraftWare ή το Astroprint. Αυτό το λογισμικό τεμαχισμού θα χειριστεί επίσης την "πλήρωση" του μοντέλου δημιουργώντας μια δομή πλέγματος για επιπλέον σταθερότητα εάν αυτή απαιτείται.[4]



Εικόνα 2-1: Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης: Από τον προγραμματισμό του μοντέλου στην εκτύπωση του αντικειμένου [4]



## Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Αλέξιος Οικονομίδης

Από εδώ, ο ίδιος ο 3D εκτυπωτής αναλαμβάνει. Πρώτα από όλα θα επεξεργαστεί το μοντέλο για τυχόν λάθη που μπορεί να προκύψουν κατά την εκτύπωση. Εν συνεχεία, θα αρχίσει να εκτυπώνει το μοντέλο σύμφωνα με τις συγκεκριμένες οδηγίες του προγράμματος τεμαχισμού χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους, ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου εκτυπωτή. Για παράδειγμα, η άμεση τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιεί τεχνολογία παρόμοια με την τεχνολογία inkjet, στην οποία τα ακροφύσια μετακινούνται προς τα εμπρός, προς τα πίσω, προς τα πάνω και προς τα κάτω, διανέμοντας πλαστικά πολυμερή, τα οποία στερεοποιούνται για να σχηματίσουν κάθε νέα στρώση του 3D αντικειμένου. Η διαδικασία της εκτύπωσης μπορεί να διαρκέσει ώρες ή ακόμα και μέρες ανάλογα με την πολυπλοκότητα και το υλικό του προς εκτύπωση αντικειμένου.

Το τελευταίο βήμα είναι η επεξεργασία μετά την εκτύπωση. Πολλοί εκτυπωτές 3D απαιτούν κάποιο είδος μετα-επεξεργασίας, όπως η αφαίρεση οποιασδήποτε σκόνης που απομένει ή το πλύσιμο του τυπωμένου αντικειμένου για την απομάκρυνση υδατοδιαλυτών υποστηρικμάτων. Το νέο αντικείμενο μπορεί επίσης να χρειαστεί φινίρισμα.

Παραδοσιακά, η εκτύπωση 3D επικεντρώνεται στην χρήση πολυμερών για εκτύπωση, λόγω της ευκολίας κατασκευής και χειρισμού πολυμερικών υλικών. Ωστόσο, με την πρόοδο της τεχνολογίας επιτεύχθηκε η χρήση και νέων υλικών όπως είναι τα μέταλλα και τα κεραμικά, καθιστώντας την εκτύπωση 3D ευέλικτη επιλογή για τον κατασκευαστικό τομέα. Ένα μειονέκτημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η αδυναμία του εκτυπωτή να εκτυπώσει ένα αντικείμενο χρησιμοποιώντας παραπάνω από ένα υλικό. Αυτό αποτελεί έναν περιορισμό της τεχνολογίας στο να επεκταθεί σε ακόμα μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών οι οποίες απαιτούν συνδυασμό διαφορετικών υλικών. Αν και έχουν γίνει ορισμένες προσπάθειες τρισδιάστατης εκτύπωσης με περισσότερα από ένα υλικό η τεχνολογία αυτή δεν είναι ακόμα ώριμη και οικονομικά βιώσιμη.





### 2.3. Τεχνολογίες και Διαδικασίες 3D Printing

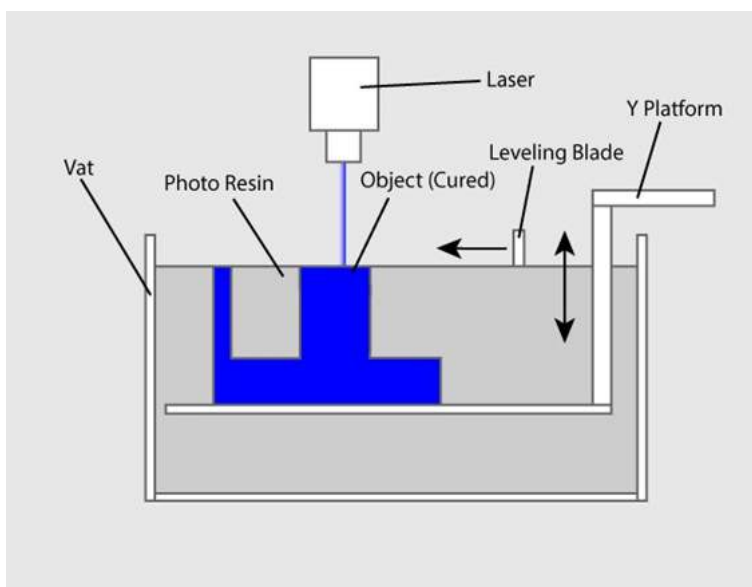
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι και τεχνολογίες για τρισδιάστατη εκτύπωση. Όλες αυτές οι τεχνολογίες είναι προσθετικής κατασκευής, και διαφέρουν κυρίως στον τρόπο που κατασκευάζονται τα στρώματα για να δημιουργήσουν ένα αντικείμενο. Ορισμένες μέθοδοι χρησιμοποιούν τήξη ή μαλάκωμα υλικών για την δημιουργία στρώσεων. Άλλες χρησιμοποιούν φωτοαντιδραστική ρητίνη η οποία προσβάλλεται από μία υπεριώδη ακτινοβολία laser (ή άλλη παρόμοια φωτεινή πηγή).

Πιο συγκεκριμένα: από το 2010, ο οργανισμός ASTM (American Society for Testing and Materials), ανέπτυξε ένα σύνολο προτύπων που ταξινομούν τις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής σε 7 κατηγορίες σύμφωνα με την Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Αυτές οι επτά διαδικασίες είναι (με την πρωτότυπη ονομασία τους):[5]

#### 1. Vat Photopolymerisation

- 1.1. Stereolithography (SLA)
- 1.2. Digital Light Processing (DLP)
- 1.3. Continuous Liquid Interface Production (CLIP)

Ένας εκτυπωτής που λειτουργεί με αυτή τη μέθοδο πολυμερισμού έχει ένα δοχείο (vat) το οποίο περιέχει φωτοαντιδραστική ρητίνη η οποία προσβάλλεται από υπεριώδη ακτινοβολία. Η βασική λειτουργία της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:[6]



Εικόνα 2-2: Μέθοδος Vat Photopolymerisation [6]

Η πιο συνηθισμένη διαδικασία είναι η στερεολιθογραφία (SLA). Ουσιαστικά, στη μέθοδο αυτή, στρώνεται ένα ολόκληρο στρώμα με ρητίνη και προσβάλλονται με ακτινοβολία οι περιοχές οι οποίες ανήκουν στις τομές του αντικειμένου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του τελικού αντικειμένου με διαδοχικές στρώσεις πάχους 0.05 mm έως 0.15 mm.

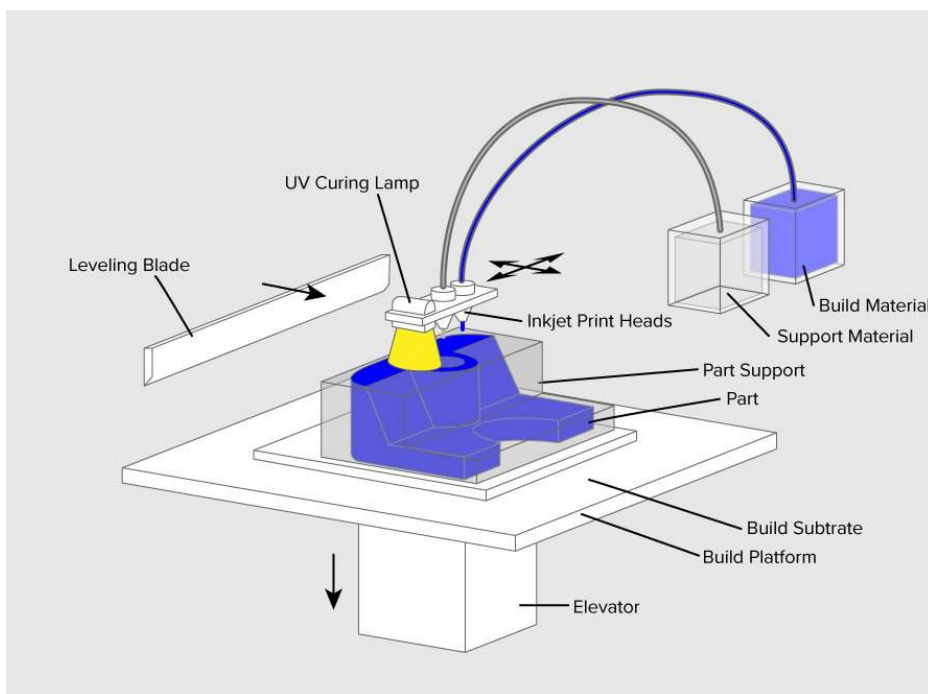


Η μέθοδος επεξεργασίας ψηφιακού φωτός (DLP) είναι παρόμοια με την προηγούμενη με την διαφορά ότι αντί υπεριώδους ακτινοβολίας, χρησιμοποιούνται συμβατικές πηγές φωτός, όπως για παράδειγμα τοξοτές λάμπες.

Η τρίτη μέθοδος παραγωγής συνεχούς υγρής διεπαφής (CLIP) αποτελεί την πιο περίπλοκη εφαρμογή. Χρησιμοποιεί υψηλής απόδοσης LED ώστε να προβάλλει την τομή του αντικειμένου πάνω στην ρητίνη δημιουργώντας περιμετρικά μία νεκρή ζώνη. Στην συνέχεια το οξυγόνο εμποδίζει την τήξη του υλικού έξω από την νεκρή ζώνη και έτσι δημιουργείται το δοκίμιο μόνο εντός αυτής.

## 2. Material Jetting

Σε αυτή τη διαδικασία ψεκασμού υλικού, το υλικό εφαρμόζεται σε σταγονίδια μέσω ακροφύσιου μικρής διαμέτρου, παρόμοιο με τον τρόπο που λειτουργεί ένας κοινός εκτυπωτής ψεκασμού μελανιού, αλλά εφαρμόζεται στρώμα με το στρώμα σε μια πλατφόρμα στη συνέχεια ενισχύεται από το υπεριώδες φως. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η παραπάνω διαδικασία:[7]



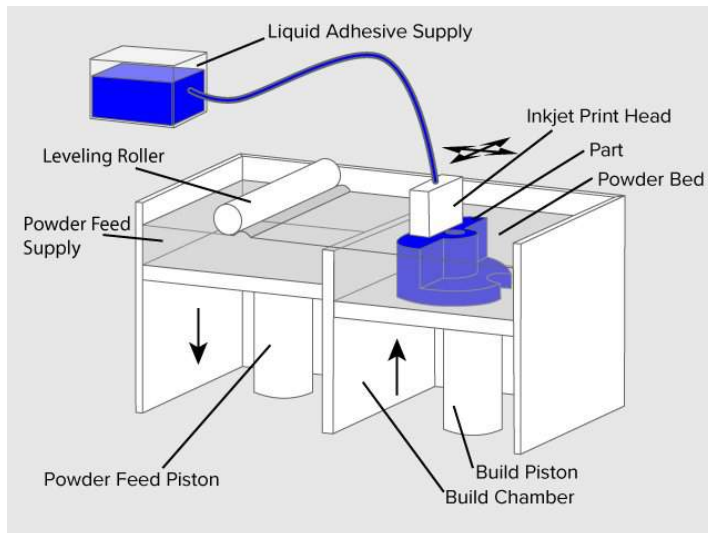
Εικόνα 2-3: Μέθοδος Material Jetting [7]

## 3. Binder Jetting

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται δύο υλικά: υλικό βάσης σε σκόνη και ένα υγρό συνδετικό υλικό. Κατά τη δημιουργία, η σκόνη απλώνεται σε ίσες στρώσεις και το συνδετικό υγρό εφαρμόζεται μέσω αεριωθούμενων ακροφύσιων που "κολλάνε" τα σωματίδια της σκόνης στο σχήμα του προγραμματισμένου αντικειμένου.



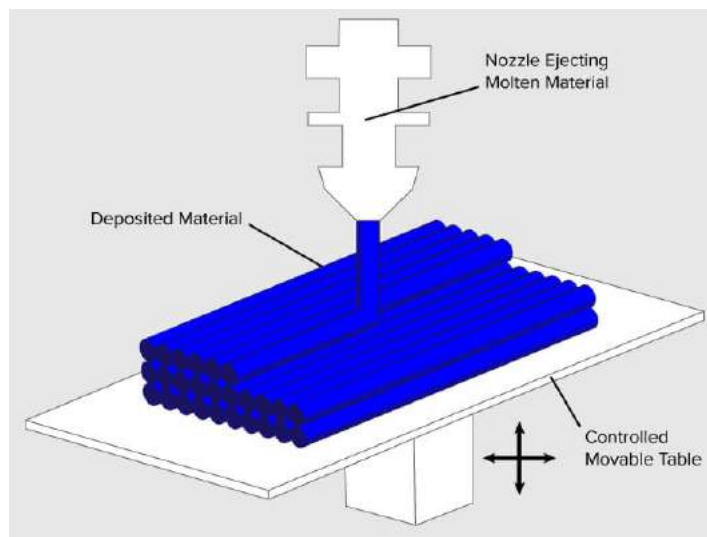
Στην παρακάτω εικόνα[8] φαίνεται η λειτουργία αυτής της διαδικασίας:[8]



Εικόνα 2-4: Μέθοδος Binder Jetting [8]

#### 4. Material Extrusion

Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη τεχνολογία σε αυτή τη διαδικασία είναι η Fused Deposition Modeling (FDM). Η τεχνολογία FDM λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα πλαστικό νήμα ή μεταλλικό σύρμα το οποίο ξετυλίγεται από ένα ακροφύσιο εξώθησης που μπορεί να ενεργοποιήσει και να σταματήσει τη ροή. Το ακροφύσιο θερμαίνεται για να λιώσει το υλικό, συνήθως κινείται σε κατακόρυφη κατεύθυνση όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το αντικείμενο παράγεται με εξώθηση τηγμένου υλικού για να σχηματιστούν στρώσεις και το υλικό σκληραίνει αμέσως μετά την εξώθηση από το ακροφύσιο. Στην ακόλουθη εικόνα περιγράφεται η διάταξη αυτής της μεθόδου:[9]



Εικόνα 2-5: Μέθοδος Material Extrusion [9]



## 5. Powder Bed Fusion

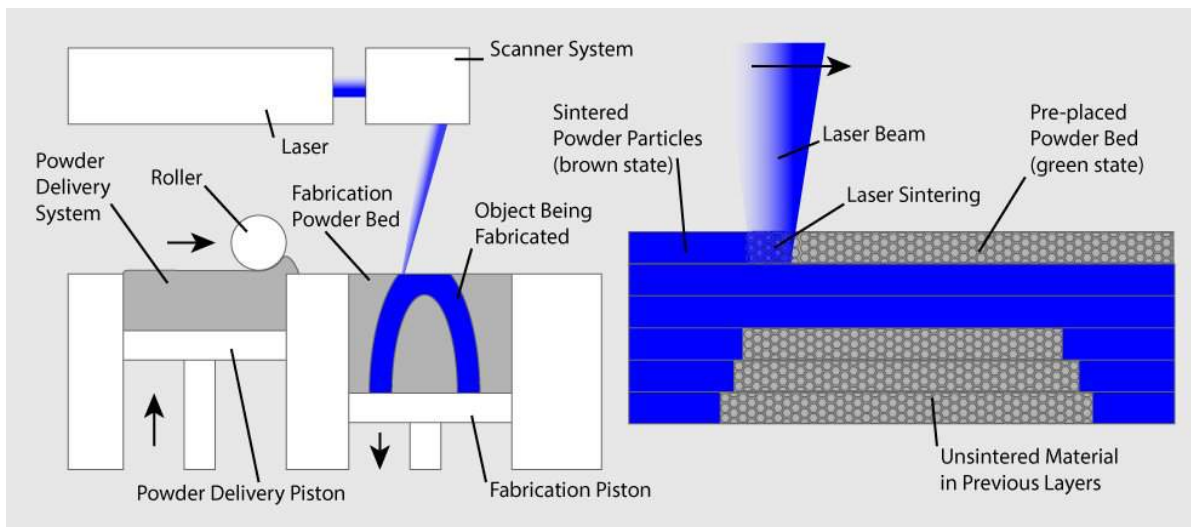
### 5.1. Multi Jet Fusion (MJF)

### 5.2. Selective Laser Sintering (SLS)

### 5.3. Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Η τεχνολογία Multi Jet Fusion αναπτύσσεται από τη Hewlett Packard. Η τεχνολογία λειτουργεί ως εξής: ένας σαρωτικός βραχίονας τοποθετεί ένα στρώμα κονιάματος και έπειτα ένας άλλος βραχίονας εξοπλισμένος με ψεκασθήρες επιλεκτικά εφαρμόζει έναν συνδεδετικό υγρό πάνω από το υλικό. Στην συνέχεια τοποθετείται ένα υλικό φινιρίσματος γύρω από το συνδεδετικό υγρό για να εξασφαλιστούν ακριβείς διαστάσεις και ομαλές επιφάνειες. Τέλος, το στρώμα εκτίθεται σε μια πηγή θερμικής ενέργειας που προκαλεί την αντίδραση των τοποθετημένων υλικών. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθούν όλα τα στρώματα. Οι εκτυπωτές μπορούν να ψεκάσουν μέχρι και 30 εκατομμύρια σταγόνες ανά δευτερόλεπτο για να επιτύχουν εξαιρετικά γρήγορη και ακριβή παραγωγή. Επίσης, πολλαπλά συνδεδετικά υγρά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα αντικείμενο, πράγμα που σημαίνει ότι τα αντικείμενα μπορούν να έχουν διαφορετικά χρώματα και μηχανικές ιδιότητες μέχρι το voxel (3D pixel).

Η μέθοδος SLS αποτελεί με διαφορά την πιο διαδεδομένη μέθοδο σε αυτή την κατηγορία. Χρησιμοποιεί laser υψηλής ισχύος για τη σύντηξη μικρών σωματιδίων από πλαστικά, κεραμικά ή γυάλινα κονιάματα σε μία ενιαία μάζα που έχει το επιθυμητό σχήμα τριών διαστάσεων. Το laser προσβάλλει επιλεκτικά το κονιορτοποιημένο υλικό με σάρωση των τομών (ή στρωμάτων) που παράγονται από το πρόγραμμα 3D μοντελοποίησης. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται μια νέα στρώση υλικού στο πάνω μέρος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το τελικό αντικείμενο.

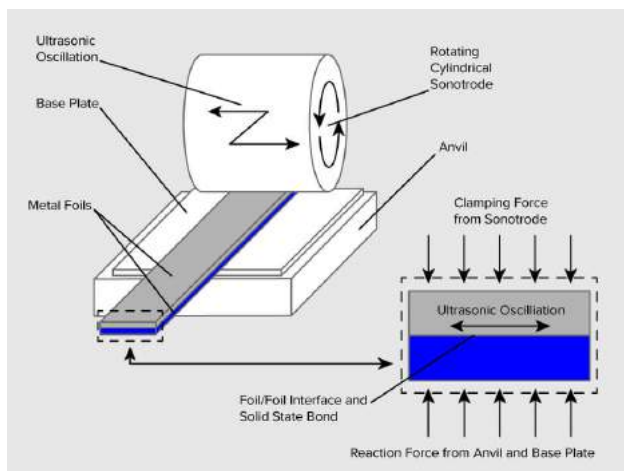


Εικόνα 2-6: Μέθοδος Selective Laser Sintering [9]

Η μέθοδος SLM θα μας απασχολήσει κυρίως στην παρούσα εργασία.

## 6. Sheet Lamination

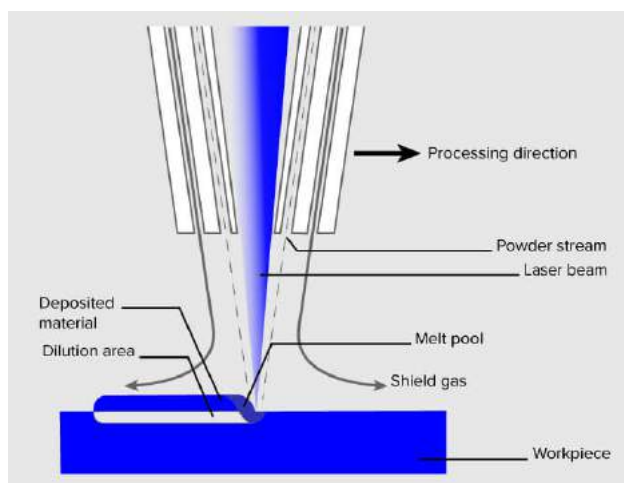
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί υλικό σε φύλλα που είναι συνδέονται μεταξύ τους με εξωτερική δύναμη. Τα φύλλα μπορούν να είναι μέταλλο, χαρτί ή ακόμα και πολυμερή. Τα μεταλλικά φύλλα συγκολλούνται μεταξύ τους σε στρώσεις και στη συνέχεια φρεζάζονται στο κατάλληλο σχήμα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και φύλλα χαρτιού, αλλά αυτά κολλούνται μεταξύ τους αντί να συγκολλούνται και στην συνέχεια κόβονται με κατάλληλες λεπίδες. Παρακάτω φαίνεται η περίπτωση μεταλλικών φύλλων σε αυτή τη μέθοδο:



Εικόνα 2-7: Μέθοδος Sheet Lamination [9]

## 7. Directed Energy Deposition

Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται κυρίως στη βαριά βιομηχανία μετάλλου και σε εφαρμογές ταχείας κατασκευής. Η τρισδιάστατη συσκευή εκτύπωσης προσαρτάται συνήθως σε ένα ρομποτικό βραχίονα πολλαπλών αξόνων και αποτελείται από ένα ακροφύσιο που εναποθέτει μεταλλική σκόνη ή σύρμα σε μια επιφάνεια και μια πηγή ενέργειας (laser, δέσμη ηλεκτρονίων ή τόξο πλάσματος) που το λιώνει σχηματίζοντας ένα στερεό αντικείμενο.



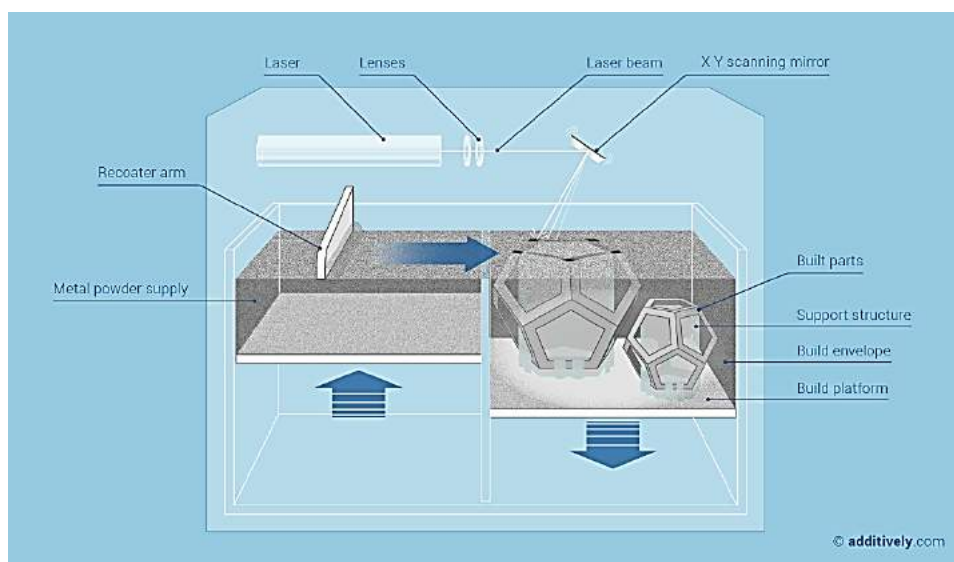
Εικόνα 2-8: Μέθοδος Directed Energy Deposition [9]

## 2.4. Μέθοδος Selective Laser Melting

Η μέθοδος επιλεκτικής τήξης με laser (SLM) αποτελεί μία υποκατηγορία της μεθόδου επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLM) που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η τεχνική αυτή είναι σχεδιασμένη ώστε να χρησιμοποιεί μία υψηλής ισχύος δέσμη laser προκειμένου να διενεργείται τήξη και σύντηξη μεταλλικών κονιαμάτων.

Η SLM χρησιμοποιεί μια ποικιλία κραμάτων, επιτρέποντας στα πρωτότυπα να είναι λειτουργικά αντικείμενα κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό με τα εξαρτήματα παραγωγής τους. Δεδομένου ότι τα αντικείμενα είναι κατασκευασμένα σε στρώσεις, είναι δυνατό να σχεδιαστούν οργανικές γεωμετρίες, εσωτερικά χαρακτηριστικά και δύσκολες δομές που δεν μπορούσαν να χυτευθούν ή να κατασκευαστούν με άλλο συμβατικό τρόπο. Η SLM παράγει ισχυρά, ανθεκτικά μεταλλικά μέρη που λειτουργούν καλά και ως λειτουργικά πρωτότυπα και ως αντικείμενα τελικής χρήσης.

Τα στάδια της μεθόδου SLM περιγράφονται στην συνέχεια και εμφανίζουν μεγάλη ομοιότητα με τα βήματα που περιγράφηκαν στην μέθοδο SLM. Κατα την επιλεκτική τήξη με laser (SLM), λεπτές στιβάδες κονιάματος μετάλλου κατανέμονται ομοιόμορφα χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό επίστρωσης σε μια πλάκα, συνήθως μεταλλική, η οποία είναι στερεωμένη σε έναν άξονα που κινείται στον κάθετο (Z) άξονα. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα θάλαμο υπο ελεγχόμενη ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (αργού, αζώτου ή οξυγόνου). Αφού τοποθετηθεί κάθε στρώση, μία μία οι δισδιάστατες δομές της γεωμετρίας του τμήματος δημιουργούνται επιλεκτικά με τη τήξη της σκόνης. Αυτό επιτυγχάνεται με μια δέσμη laser υψηλής ισχύος, συνήθως ένα laser ινών υπερβίου με εκατοντάδες Watt. Η δέσμη laser κινείται στις κατευθύνσεις X και Y μέσω δύο καθρεπτών με υψηλή συχνότητα σάρωσης. Η πυκνότητα ενέργειας του laser είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτρέπει την πλήρη τήξη (συγκόλληση) των σωματιδίων για να σχηματίσει στερεό αντικείμενο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στρώμα μετά το στρώμα μέχρι να ολοκληρωθεί το τελικό αντικείμενο. [10]

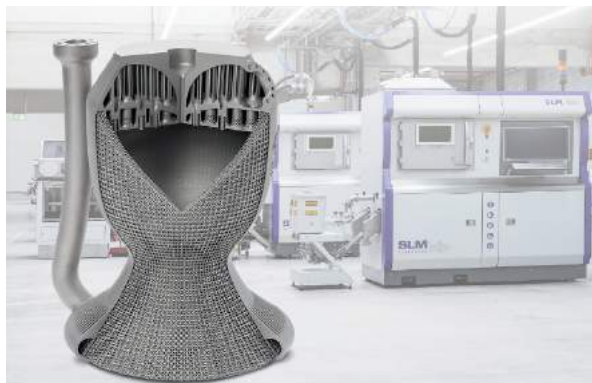


Εικόνα 2-9: Περιγραφή της μεθόδου SLM [10]



Η επιλεκτική τήξη με laser (SLM) αποτελεί τομέα του additive manufacturing όπου χρησιμοποιείται laser υψηλής πυκνότητας ισχύος για την τήξη και την σύντηξη μεταλλικών κονιαμάτων. Η επιλεκτική τήξη με laser είναι επίσης γνωστή ως άμεση τήξη μετάλλου με laser (Direct Metal Laser Melting – DMLM). Πρόκειται για μια ταχέως αναπτυσσόμενη διαδικασία που εφαρμόζεται τόσο στην έρευνα όσο και στη βιομηχανία. Αυτή η πρόοδος είναι πολύ σημαντική τόσο για την επιστήμη των υλικών, όσο και για τη βιομηχανία επειδή μπορεί και να δημιουργήσει προσαρμοσμένες δομές και να δώσει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας σε σχέδια που οι συμβατικές τεχνικές κατασκευής δεν μπορούν να επιτύχουν αλλά και να μειώσει τη σπατάλη υλικών. Οι τρέχουσες προκλήσεις που υπάρχουν με την SLM έχουν να κάνουν με το όριο στα επεξεργάσιμα υλικά, δηλαδή τα μεταλλουργικά ελαττώματα που δημιουργούνται όπως ρωγμές και πορώδες. Ως μελλοντική πρόκληση της SLM θεωρείται το γεγονός ότι δεν είναι σε θέση να δημιουργήσει πλήρως πυκνή δομή λόγω της επεξεργασίας των κραμάτων αλουμινίου τα οποία είναι ελαφριά, έχουν υψηλή ανακλαστικότητα, υψηλή θερμική αγωγιμότητα και χαμηλή απορροφητικότητα laser στην περιοχή των μικρών κύματος που χρησιμοποιούνται στη SLM. Αυτές οι προκλήσεις μπορούν να βελτιωθούν με την πραγματοποίηση περισσότερων ερευνών σχετικά με το πώς αλληλοεπιδρούν τα υλικά όταν συνενώνονται. Η κατανόηση της προσθετικής παραγωγής και ο τρόπος επιτυχούς εφαρμογής της SLM θα αποτελέσει ένα μεγάλο όφελος για την κοινωνία μας.

Οι τύποι εφαρμογών που ταιριάζει περισσότερο η επιλεκτική διαδικασία τήξης με laser είναι οι πολύπλοκες γεωμετρίες και οι δομές με λεπτά τοιχώματα και κρυμμένα κενά ή κανάλια. Παρουσιάζουν πλεονέκτημα όταν παράγονται υβριδικές μορφές όπου στερεές και μερικώς διαμορφωμένες γεωμετρίες (πλέγματα) μπορούν να παραχθούν ταυτόχρονα για να δημιουργήσουν ένα αντικείμενο, όπως στέλεχος ισχίου ή άλλο ορθοπεδικό εμφύτευμα όπου η οστεοενσωμάτωση ενισχύεται από τη γεωμετρία της επιφάνειας. Μεγάλο μέρος της πρωτοποριακής εργασίας με τεχνολογίες επιλεκτικής τήξης με laser είναι τα ελαφριά εξαρτήματα αεροδιαστημικής, όπου οι παραδοσιακοί κατασκευαστικοί περιορισμοί, όπως εργαλεία και πρόσβαση σε επιφάνειες για μηχανική κατεργασία, περιορίζουν τον σχεδιασμό εξαρτημάτων. [11]



Εικόνα 2-10: Στροβιλοαντιδραστήρας προώθησης πυραύλου τυπωμένος με την μέθοδο SLM [11]



## Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Αλέξιος Οικονομίδης

Η μέθοδος SLM παρουσιάζει διαφορές από την επιλεκτική σύντηξη με laser (SLS). Η χρήση του SLS αναφέρεται στη διαδικασία που εφαρμόζεται σε μια ποικιλία υλικών όπως τα πλαστικά, το γυαλί και τα κεραμικά, καθώς και τα μέταλλα. Αυτό που θέτει τη SLM ως μία ξεχωριστή διαδικασία εκτύπωσης 3D είναι η ικανότητα να τήξει πλήρως τη μεταλλική σκόνη, αντί να την θερμάνει μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο όπου οι κόκκοι σκόνης συνενώνονται, επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο του πορώδους του υλικού. Από την άλλη πλευρά, η SLM μπορεί να προχωρήσει ένα βήμα περισσότερο από την SLS, χρησιμοποιώντας το laser για να λιώσει το μέταλλο, πράγμα που σημαίνει ότι η σκόνη δεν συντήκεται μαζί, αλλά στην πραγματικότητα υγροποιείται αρκετά ώστε να δημιουργηθεί ένα ομογενές μείγμα. Ως εκ τούτου, η SLM μπορεί να παράγει ισχυρότερα εξαρτήματα εξαιτίας του μειωμένου πορώδους και του μεγαλύτερου ελέγχου της κρυσταλλικής δομής, γεγονός που συμβάλλει στην αποφυγή αστοχίας του αντικειμένου. Ωστόσο, η SLM είναι εφικτή μόνο όταν χρησιμοποιείται ένα μοναδικό μεταλλικό κονίαμα.

Η SLM έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής. Η ικανότητα να παράγει γρήγορα ένα μοναδικό κομμάτι είναι το πιο προφανές, διότι δεν απαιτούνται ειδικά εργαλεία και τα μέρη μπορούν να κατασκευαστούν σε λίγες ώρες. Επιπλέον, είναι η καλύτερη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης διότι δεν υπάρχει ανάγκη παρακολούθησης κατά την επεξεργασία και είναι εύκολη στη χρήση. Δεδομένου ότι τα στοιχεία είναι κατασκευασμένα στρώμα με το στρώμα, είναι δυνατό να σχεδιάσουμε εσωτερικά χαρακτηριστικά που δεν θα μπορούσαν να χυτευθούν ή να κατασκευαστούν με άλλο τρόπο. Οι σύνθετες γεωμετρίες και τα εξαρτήματα με πολλαπλές συνιστώσες μπορούν να απλουστευθούν σε λιγότερα εξαρτήματα με μια οικονομικά αποδοτικότερη συναρμολόγηση. Ακόμα, η SLS δεν απαιτεί ειδικά εργαλεία όπως για παράδειγμα η χύτευση.

Το μέγεθος και οι λεπτομέρειες των χαρακτηριστικών και του επιφανειακού φινιρίσματος είναι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν από τη χρήση της τεχνολογίας. Οι επιφάνειες συνήθως πρέπει να γυαλιστούν για να επιτύχουν εξαιρετικά ομαλή επιφάνεια. Για εργασίες παραγωγής, η πυκνότητα υλικού ενός τελικού αντικειμένου θα πρέπει να προσδιοριστεί πριν από τη χρήση. Ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο σύστημα υλικών, η διαδικασία SLM αφήνει ένα κοκκώδες φινίρισμα λόγω του μεγέθους σωματιδίων σκόνης. Η απομάκρυνση μεταλλικών υποστηριγμάτων και η μεταγενέστερη επεξεργασία του παραγόμενου μέρους μπορεί να είναι χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί τη χρήση μηχανικών κατεργασιών και μηχανημάτων λείανσης. Η λείανση των εξαρτημάτων με ακτίνα laser μπορεί να μειώσει την τραχύτητα της επιφάνειας με τη χρήση μιας ακτίνας laser ταχείας κίνησης που παρέχει “αρκετή θερμική ενέργεια για να προκαλέσει τήξη των ακμών της επιφάνειας και να οδηγηθούν στην πλήρωση των κοιλοτήτων λόγω επιφανειακών τάσεων, βαρύτητας και πίεσης του laser, μειώνοντας έτσι την τραχύτητα”.





## 2.5. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Μεθόδου SLM

Η μέθοδος επιλεκτικής τήξης με laser (SLM) αποτελεί μία πολύ ικανοποιητική εναλλακτική λύση, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αντικαταστήσει τις συμβατικές μεθόδους κατεργασιών και παραγωγής μηχανολογικών εξαρτημάτων. Είναι σημαντικό, πριν γίνει η επιλογή μιας συγκεκριμένης μεθόδου κατεργασιών, να είναι σαφή τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εκάστοτε μεθόδου τα οποία τελικά, θα οδηγήσουν και στην τελική επιλογή ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες του προς κατασκευή μηχανολογικού εξαρτήματος.

Για τη μέθοδο επιλεκτικής τήξης με laser (SLM) μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής πλεονεκτήματα:

- Δυνατότητα χρησιμοποίησης μεγάλης ποικιλίας μετάλλων
- Δυνατότητα κατασκευής εξαρτημάτων σύνθετης μορφής με πολύπλοκες εσωτερικές δομές, η κατασκευή των οποίων θα ήταν πολύ ακριβή και δύσκολη με συμβατικές μεθόδους
- Αποτελεί αυτοματοποιημένη διαδικασία η οποία πραγματοποιείται από μηχανήματα, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να καταπιαστεί με άλλες δραστηριότητες την ώρα παραγωγής των εξαρτημάτων

Είναι σαφές και αναπόφευκτο ότι η μέθοδος SLM, όπως και όλες οι άλλες μέθοδοι, παρουσιάζει και μερικά μειονεκτήματα τα οποία παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω:

- Αποτελεί μία σχετικά ακριβή μέθοδο κατασκευής μηχανολογικών εξαρτημάτων, ειδικά εάν τα εξαρτήματα δεν έχουν σχεδιασθεί και βελτιστοποιηθεί ώστε να παραχθούν με την εν λόγω μέθοδο
- Απαιτεί εξειδικευμένη γνώση και εμπειρία από τον χρήστη, πράγμα που είναι σχετικά δυσεύρετο αν αναλογιστεί κανείς τη νεανικότητα της μεθόδου
- Η χρήση της μεθόδου περιορίζεται προς το παρόν στην κατασκευή μικρών σχετικά εξαρτημάτων
- Σκληρή επιφάνεια τελικών προϊόντων
- Στη πλειοψηφία των περιπτώσεων απαιτείται περαιτέρω κατεργασία ή κατεργασίες των παραγόμενων εξαρτημάτων, με σημαντικό αντίκτυπο στο χρόνο και στο τελικό κόστος της μεθόδου

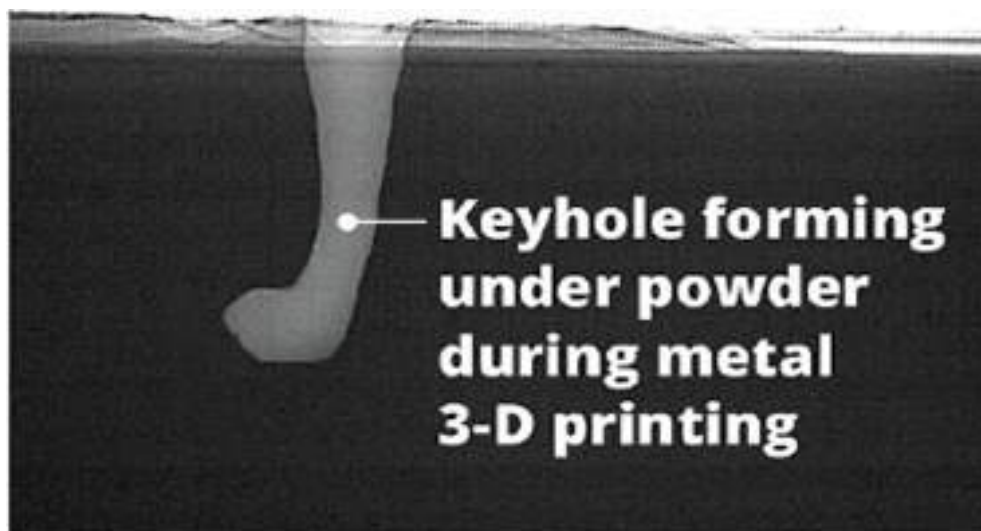


### 3. Φαινόμενο Keyhole

#### 3.1. Τι είναι το φαινόμενο Keyhole (Keyhole effect)

Το φαινόμενο Keyhole παρατηρείται συνήθως σε μη συμβατικές κατεργασίες, όπου ακτίνα laser χρησιμοποιείται για την τήξη μετάλλου ή πολυμερούς υλικού. Τέτοιες κατεργασίες για παράδειγμα είναι το 3D printing και η συγκόλληση με τη μέθοδο LBW (laser beam welding), οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Με την πρόσκρουση της ακτίνας laser στη μεταλλική επιφάνεια δημιουργείται μια περιοχή τηγμένου μετάλλου, η οποία μετακινείται μαζί με την ακτίνα laser. Με την αύξηση της ισχύος του laser αυξάνεται το βάθος της περιοχής τηγμένου μετάλλου δημιουργώντας οπή. Η οπή είναι σχετικά μεγάλης διατομής στην επιφάνεια του μετάλλου και στενεύει σε μεγαλύτερα βάθη, θυμίζοντας το σχήμα κλειδαρότρυπας.[12]



Εικόνα 3-1: Σχηματισμός φαινομένου Keyhole κατά το 3D printing [12]

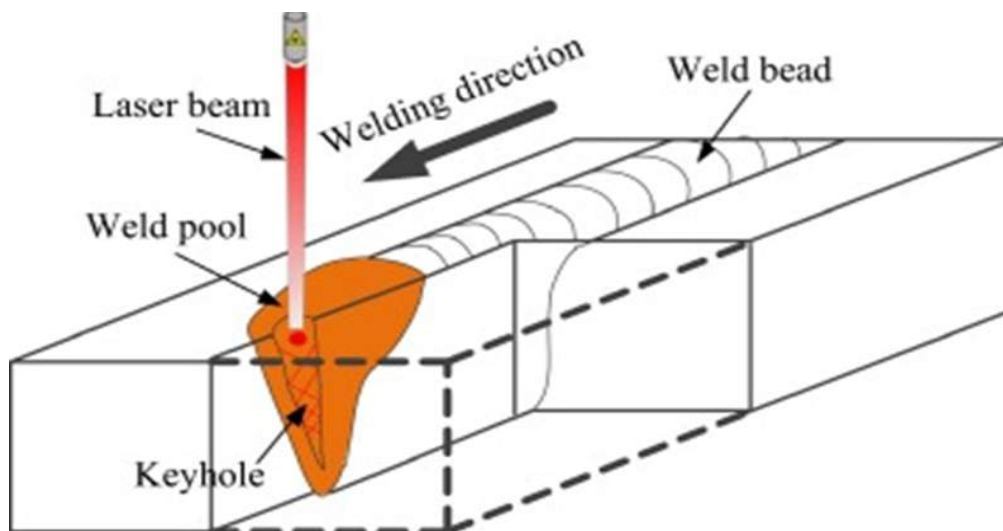
#### 3.2. Φαινόμενο Keyhole στις συγκολλήσεις

Μία από τις περιπτώσεις που παρατηρείται το φαινόμενο Keyhole (Keyhole effect) είναι κατά τη συγκόλληση μεταλλικών ή θερμοπλαστικών μερών με τη μέθοδο LBW (laser beam welding). Όταν η ακτίνα laser προσκρούει στην μεταλλική επιφάνεια, αρχικά χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα για να τη θερμάνει και να αρχίσει να την λιώνει. Η τήξη του μετάλλου από την ακτίνα laser οδηγεί στο σχηματισμό ενός κενού (οπής) στη μεταλλική επιφάνεια, το οποίο περιβάλλεται από τηγμένο μέταλλο που τήνει να αντικαταστήσει την οπή. Το προαναφερθέν κενό που σχηματίζεται κατά τη διαδικασία συγκόλλησης έχει σχήμα κλειδαρότρυπας και είναι ο λόγος που το φαινόμενο έχει πάρει τη συγκεκριμένη ονομασία. Καθώς η ακτίνα laser κινείται για να συγκολληθεί η επιθυμητή ακμή, το Keyhole effect μετακινείται μαζί με αυτήν, ενώ η περιοχή πίσω από την ακτίνα laser πληρώνεται με το τηγμένο μέταλλο το οποίο σιγά σιγά σταθεροποιείται και σχηματίζει ένα ομοιογενές σώμα.



Το φαινόμενο Keyhole έχει ορισμένες θετικές επιδράσεις στη συγκόλληση, οι οποίες είναι οι εξείς:

- Η περιοχή μπροστά από την ακτίνα laser προθερμαίνεται πριν η ακτίνα προσκρούσει σε αυτήν με αποτέλεσμα να παίρνει λιγότερο χρόνο να τηχθεί και έτσι ανεβαίνει ο βαθμός απόδοσης της διαδικασίας
- Επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διείσδυση με ίδια ένταση ηλεκτρικού ρεύματος και σε λιγότερο χρόνο (σε σχέση με συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης)
- Υψηλή αντοχή χωρίς ρωγμές και κενά στο υλικό



Εικόνα 3-2: Σχηματισμός φαινομένου Keyhole σε μεταλλικό δοκίμιο προς συγκόλληση [13]

Χαρακτηριστικό της συγκόλλησης με ακτίνα laser είναι η μεγάλη πυκνότητα ισχύος ( $W/cm^2$ ), με την οποία επιτυγχάνεται μεγάλο βάθος διείσδυσης και υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης και ψύξης του προς συγκόλληση υλικού, πράγμα που την καθιστά κατάλληλη για μεγάλες εφαρμογές όπως η αυτοκινητοβιομηχανία. Υπάρχουν δύο είδη συγκολλήσεων με ακτίνα laser, η συνεχόμενη και η παλλόμενη, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Η παλλόμενη ακτίνα χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση λεπτών μερών, ενώ η συνεχόμενη χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που χρήζουν μεγάλου βάθους διείσδυσης.

### 3.3. Παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο

Πειράματα έχουν δείξει ότι ένα πλήθος παραμέτρων είναι υπεύθυνο για την τελική μορφή της συγκόλλησης και τις τελικές ιδιότητες των προς συγκόλληση μερών. Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι η ταχύτητα συγκόλλησης, η ισχύς της ακτίνας laser, το προς συγκόλληση υλικό κτλ.

#### Ταχύτητα Συγκόλλησης

Η ταχύτητα συγκόλλησης είναι ένα καθοριστικό μέγεθος που από τη μία επηρεάζει την ταχύτητα και την αποδοτικότητα της διαδικασίας και από την άλλη χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή διότι είναι υπεύθυνη για ένα πλήθος προβλημάτων, τα οποία μπορεί να προκληθούν από τη λανθασμένη επιλογή της. Πρέπει να αναφερθεί ότι η συγκόλληση με ακτίνα laser επιτυγχάνει μεγαλύτερο βάθος συγκόλλησης σε μικρότερους χρόνους, χαρακτηριστικό που επιτρέπει τη συγκόλληση ελασμάτων μεγαλύτερου πάχους ή ελασμάτων ίδιου πάχους σε μικρότερο χρόνο σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους συγκόλλησης. [14]



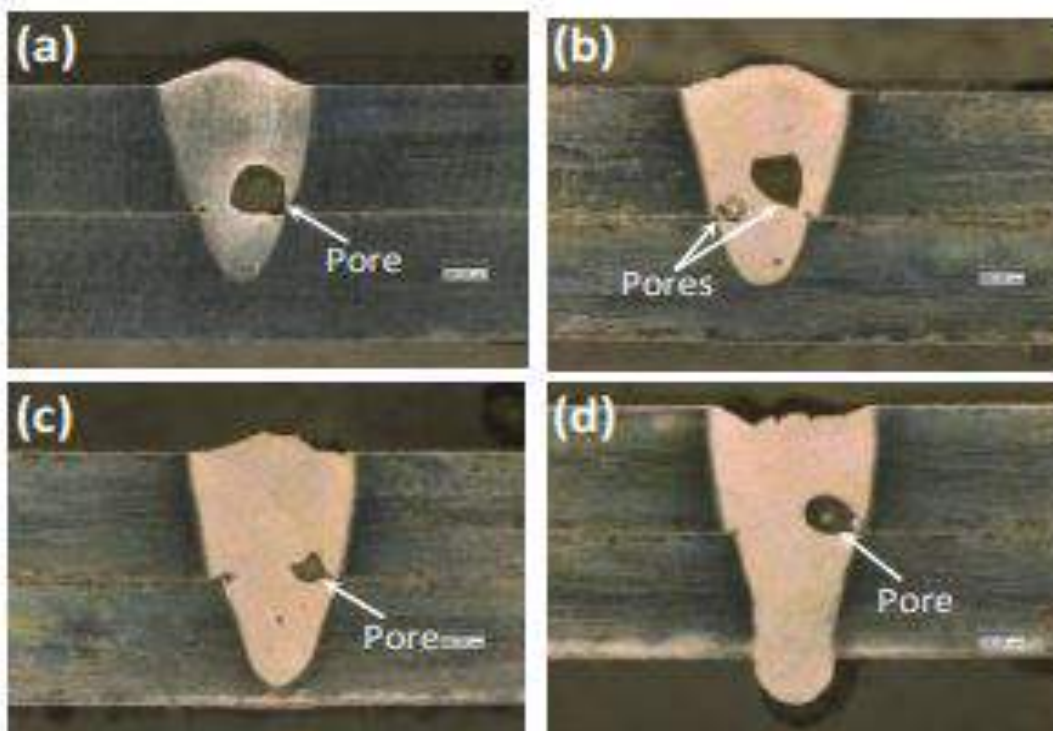
Εικόνα 3-3: Μορφή συγκόλλησης για διάφορες ταχύτητες συγκόλλησης [14]

Χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσουν σε ζώνες πολύ υψηλών θερμοκρασιών (ζώνες σύντηξης), απώλεια στοιχείων κραματοποίησης λόγω εξάτμισης, παραμένουσες τάσεις μετά τη σταθεροποίηση του υλικού και αλλαγές στη μικροδομή και στις ιδιότητες του προς συγκόλληση δοκιμίου. Αντίθετα, υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσουν σε μη επιτυχή συγκόλληση καθώς δεν επαρκεί ο χρόνος για να επιτευχθεί το κατάλληλο βάθος συγκόλλησης. Μικρές ταχύτητες συγκόλλησης είναι απαραίτητες για συγκόλληση μεγάλου πάχους ελασμάτων ενώ στην περίπτωση ελασμάτων μικρού πάχους αρκούν και μεγαλύτερες ταχύτητες συγκόλλησης. Εν ολίγοις μικρές ταχύτητες συγκόλλησης οδηγούν σε μεγαλύτερα πάχη και βάθη συγκόλλησης.

### Ισχύς Ακτίνας Laser

Η ισχύς της ακτίνας laser είναι ένα ακόμα μέγεθος το οποίο πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα και να ελέγχεται κατά τη συγκόλληση αφού επηρεάζει την αποτελεσματικότητά, την αποδοτικότητά της και τις ιδιότητες του προς συγκόλληση εξαρτήματος. Είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται η σταθερότητα της ισχύος της ακτίνας laser χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις. Οι σύγχρονες μέθοδοι συγκόλλησης με ακτίνα laser εξασφαλίζουν μία σχετικά χαμηλή διακύμανση στην ισχύ του laser της τάξεως του 1-3%.

Με την αύξηση της ισχύος της ακτίνας laser αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης της συγκόλλησης. Πειράματα έχουν δείξει ότι όσον αφορά στο μέγεθος και το πλήθος των σχηματιζόμενων πόρων στο υλικό κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης υπάρχει βέλτιστη ισχύς, η οποία ελαχιστοποιεί τον σχηματισμό τους και κάνει τη συγκόλληση πιο αξιόπιστη. [15]



Εικόνα 3-4: Σχηματιζόμενοι πόροι κατά τη συγκόλληση με ισχύ laser (a)1000 W, (b)1100 W, (c)1200 W, (d)1300 W [15]



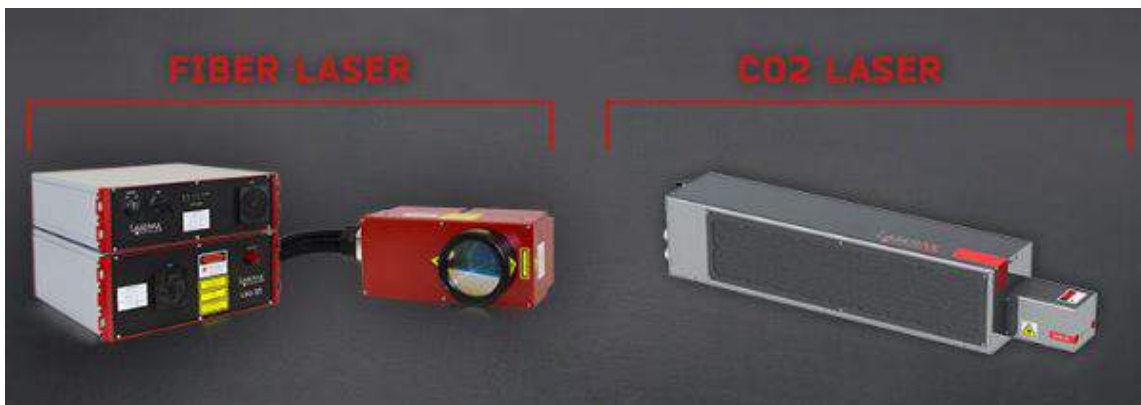
### 3.4. Εξοπλισμός συγκόλλησης με τη μέθοδο ακτίνας laser (LBW)

Η συγκόλληση με τη μέθοδο ακτίνας laser επιτυγχάνεται τις περισσότερες φορές με αυτοματοποιημένα συστήματα και με τη βοήθεια προγραμμάτων CAD. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εφαρμογές της είναι κυρίως σε βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου οι διαδικασίες είναι συνήθως αυτοματοποιημένες. Παρ' όλα αυτά η συγκόλληση με ακτίνα laser είναι εφικτή και με το χέρι, αλλά απαιτεί ειδικούς χειριστές.

#### Είδη laser

Υπάρχουν δύο τύποι laser που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία. [16]

- Laser στερεάς κατάστασης: λειτουργεί σε μήκη κύματος της τάξης του 1 μm και ως εκ τούτου ο χειριστής απαιτείται να είναι εξοπλισμένος με ειδικά γυαλιά για τη προστασία του αμφιβληστροειδούς του ματιού του.
- Laser αερίου: χρησιμοποιείται πηγή υψηλής τάσης και χαμηλής έντασης ρεύματος ώστε να αποδοθεί η ενέργεια που απαιτείται για να διεγερθεί το μείγμα αερίων που χρησιμοποιείται ως μέσον laser. Η ακτίνα laser μπορεί να είναι συνεχόμενη ή παλλόμενη και τα μήκη κύματος είναι της τάξης των 10 μm.
- Laser ινών: σε αυτόν τον τύπο το νέο της ακτίνας laser είναι η ίδια η οπτική ίνα και χρησιμοποιείται κυρίως σε ρομποτικές εφαρμογές



Εικόνα 3-5: Συσκευή laser ινών και laser αερίου (CO<sub>2</sub>) [16]

### 3.5. Φαινόμενο Keyhole στο 3D printing

Το φαινόμενο Keyhole στο 3D printing παρουσιάζεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που περιγράφηκε στις συγκολλήσεις με ακτίνα laser. Στο 3D printing χρησιμοποιείται υψηλής ισχύος laser για να λιώσει πολυμερές υλικό ή μεταλλική σκόνη κατά στρώσεις και να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο αντικείμενο, που πολλές φορές μπορεί να αποτελεί και το τελικό προϊόν. Το πρόβλημα και στο 3D printing όπως και στις συγκολλήσεις είναι ο σχηματισμός πόρων και ρωγμών, που οδηγούν σε μικρότερη αντοχή του υλικού και ενδεχομένως σε αστοχία.

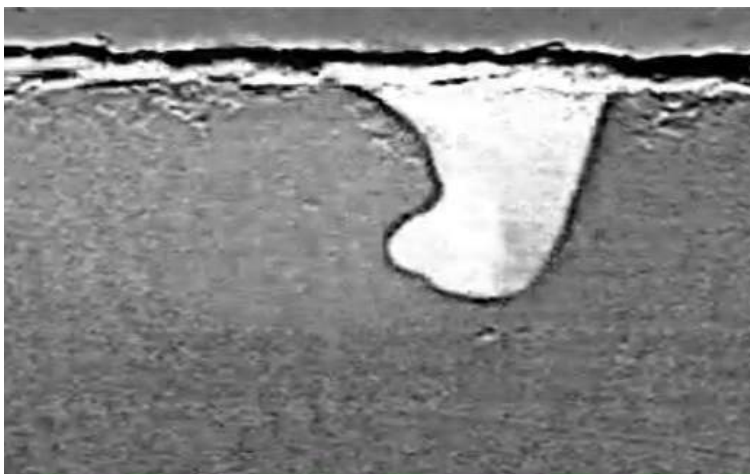


### Σχηματισμός φαινομένου Keyhole

Καθώς η ακτίνα laser προσκρούει στη μεταλλική σκόνη ή στο πολυμερές, δημιουργείται μια περιοχή τηγμένου υλικού, η οποία εξαπλώνεται λόγω της μετάδοσης θερμότητας και όταν ψυχθεί σχηματίζει μία συμπαγή στρώση.[17] Όταν η ισχύς του laser είναι πολύ υψηλή, τότε ο ρυθμός εξάχνωσης και τήξης του υλικού αυξάνεται, με αποτέλεσμα η περιοχή τηγμένου υλικού να περνάει και σε επόμενα στρώματα του αντικειμένου και να προκαλεί πόρο Keyhole.[18] Αυτό το φαινόμενο χρήζει μεγάλης προσοχής και μελέτης διότι οδηγεί σε ρωγμές και γενικά σε ελάττωση της αντοχής του παραγόμενου αντικειμένου. Οι πόροι Keyhole είναι ουσιαστικά οπές αερίων οι οποίες εμποδίζουν το τηγμένο υλικό να συμπληρώσει ορισμένες περιοχές, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό περιοχών αυξημένου πορώδους.

### Αίτια σχηματισμού φαινομένου

Μέχρι πρόσφατα οι ειδικοί δεν είχαν πλήρη κατανόηση των αιτιών εμφάνισης του φαινομένου και το απέδιδαν αποκλειστικά στον τύπο του υλικού και στην ισχύ του laser. Για την αποφυγή των έντονων φαινομένων Keyhole και τη δημιουργία ελαττωμάτων συνήθιζαν να κάνουν μια σειρά δοκιμών, με διάφορα είδη μετάλλων και laser, πρώτου ξεκινήσουν την τελική διαδικασία 3D printing. Σήμερα μετά από σύγχρονες μελέτες με εξελιγμένες μεθόδους μας δίνεται η δυνατότητα να παρακολουθήσουμε το εσωτερικό του υλικού κατά τη διαδικασία 3D printing και συνεπώς να παρατηρήσουμε το σχηματισμό του φαινομένου Keyhole από τα αρχικά του στάδια μέχρι το τέλος. Αυτή η δυνατότητα οδήγησε τους ερευνητές στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου και πιο συγκεκριμένα στο συμπέρασμα ότι το Keyhole φαινόμενο μπορεί να εμφανιστεί σχεδόν σε οποιοσδήποτε συνθήκες (ισχύς laser, τύπος υλικού κτλ). Έδωσε επίσης τη δυνατότητα στους ειδικούς να προβλέπουν με ποιον τρόπο θα δημιουργηθούν οι “οπές” και αν θα μεγαλώσουν με αποτέλεσμα να προκαλέσουν ελαττώματα στο υλικό. [19][20]



Εικόνα 3-6: Παρατήρηση σχηματισμού φαινομένου keyhole με ακτίνες X [20]



#### 4. Παλαιότερα πειράματα

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθούν ορισμένα παλαιότερα πειράματα και έρευνες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με το φαινόμενο Keyhole και τις περιπτώσεις στις οποίες αυτό παρατηρείται. Όπως ήδη έχει γίνει αντιληπτό το φαινόμενο Keyhole αποτελεί ένα πολυσύνθετο φαινόμενο το οποίο δεν είναι δυνατόν να αναλυθεί διεξοδικά μόνο από την παρούσα εργασία. Επομένως ως κινητήριος μοχλός χρησιμοποιήθηκαν οι μελέτες που θα παρουσιασθούν στην συνέχεια.

##### **A three-dimensional numerical simulation model for weld characteristics analysis in fiber laser keyhole welding**

Οι Yuewei Ai et al. [21] στην μελέτη αυτή ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης με σκοπό την διερεύνηση των χαρακτηριστικών των συγκολλήσεων που προκύπτουν με την μέθοδο Keyhole. Για την διεξαγωγή της μελέτης ως ανεξάρτητες παράμετροι εισόδου θεωρήθηκαν η ισχύς του laser (Laser Power – LP), η ταχύτητα με την οποία γίνεται η συγκόλληση (Welding Speed – WS), καθώς επίσης και η θέση εστίασης (Focal Point – FP). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν διαφοροποιούνται ως προς την γεωμετρία της μορφής του Keyhole effect εξετάζοντας τις παραμέτρους πλάτος μετώπου συγκόλλησης (Front Width – WF), ενίσχυση συγκόλλησης (Weld Reinforcement – WR), βάθος διείσδυσης συγκόλλησης (Weld Penetration – WP) και βάθος δημιουργιάς λαιμού (Waist Depth – WD).

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι SUS316L stainless steel με την ακόλουθη σύσταση:

C	P	S	Si	Mn	Cr	Ni	N	Mo	Cu	Fe
0.021	0.039	0.001	0.77	1.019	16.92	12.16	0.033	2.03	0.20	Bal.

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-1: Παράμετροι συγκόλλησης και γεωμετρικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κάθε συνδυασμό

P (kW)	V (m/min)	F (mm)	WF (μm)	WR (μm)	WD (μm)	WP (μm)
1.0	2.5	-1	1152	63	391	901
1.5	2.5	-1	1395	101	589	1437
2.0	2.5	-1	1481	172	742	1929
2.5	2.5	-1	1754	269	700	2543
2.5	2.7	-1	1626	236	631	2301
2.5	2.8	-1	1617	211	712	2256
2.5	2.9	-1	1579	198	653	2142
2.5	3.0	-1	1463	251	669	2028

Παρατηρούμε από τα παραπάνω αποτελέσματα πως όσο η ισχύς του λείζερ μεγαλώνει, αυξάνονται όλες οι γεωμετρικές παράμετροι με αποτέλεσμα την συνολική μεγέθυνση του φαινομένου Keyhole. Αντίθετα η ταχύτητα με την οποία λαμβάνει χώρα η συγκόλληση είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους της γεωμετρίας. Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν στην διεξαγωγή του πειράματος. Η μελέτη παραθέτει μία σύγκριση πειραματικών

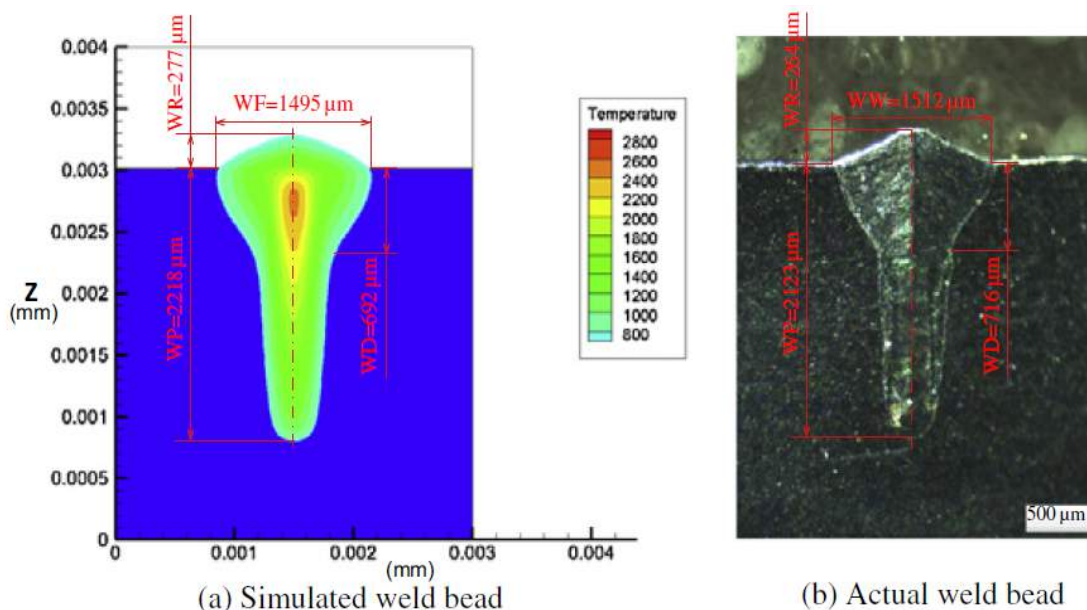


αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την μοντελοποίηση της διάταξης. Η σύγκριση αυτή παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4-2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου προσομοίωσης και πειραματικής διάταξης

WF(μm)			WR(μm)			WD(μm)			WP(μm)		
EV	SV	Err%	EV	SV	Err%	EV	SV	Err%	EV	SV	Err%
1152	1045	9.288	63	68	-7.937	391	398	-1.790	901	985	-9.323
1395	1293	7.312	101	107	-5.941	589	566	3.905	1437	1405	2.227
1481	1438	2.903	172	180	-4.651	742	729	1.752	1929	1979	-2.592
1754	1801	-2.680	269	281	-4.461	700	712	-1.714	2543	2427	4.562
1626	1679	-3.260	236	233	1.271	631	645	-2.219	2301	2413	-4.867
1617	1587	1.855	211	205	2.844	712	703	1.264	2256	2215	1.817
1579	1552	1.710	198	189	4.545	653	669	-2.450	2142	2167	-1.167
1463	1491	-1.914	251	256	-1.992	669	677	-1.196	2028	2093	-3.205

Παρατηρούμε πως οι αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης είναι της τάξεως 1-10 % το οποίο αποδεικνύει την ικανοποιητική ακρίβεια της προσέγγισης. Η παραπάνω σύγκριση μπορεί να γίνει και εποπτικά από την ακόλουθη εικόνα:



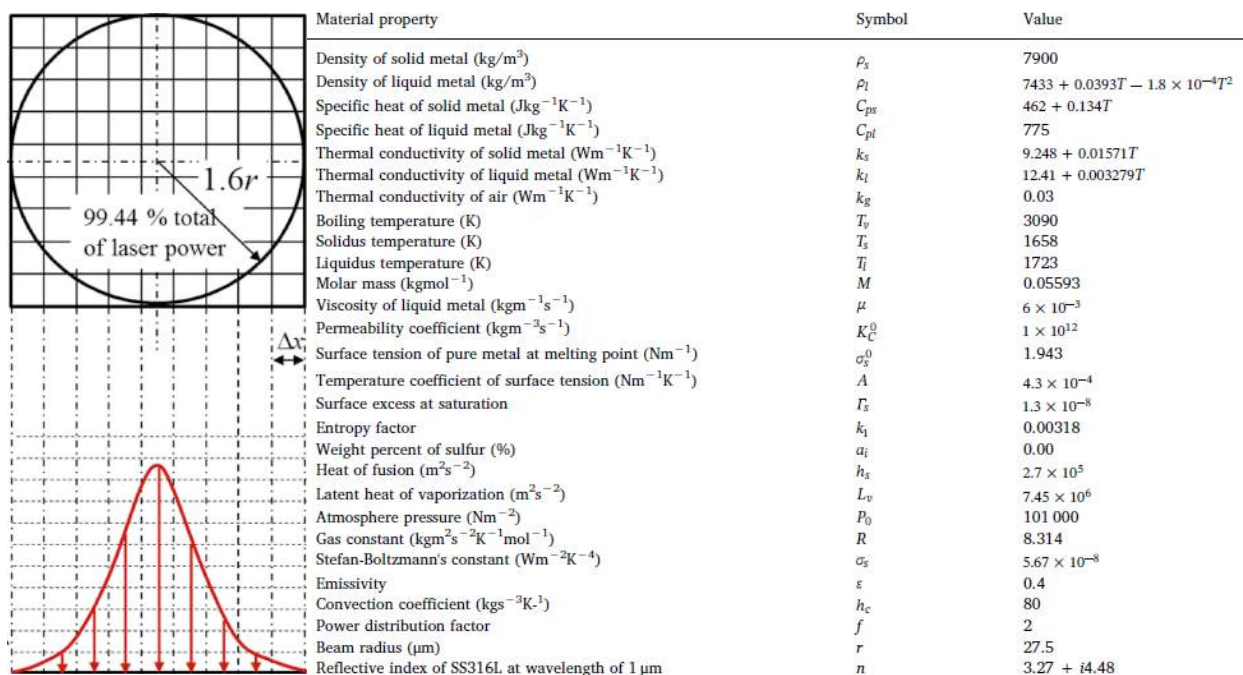
Εικόνα 4-1: Σύγκριση σχηματισμού φαινομένου Keyhole από την μοντελοποίηση (αριστερά) και την πειραματική διάταξη (δεξιά)

Βλέπουμε λοιπόν πως η μοντελοποίηση είναι παραπλήσια της πειραματικής εκτέλεσης με την δημιουργία του φαινομένου Keyhole να είναι έντονη. Επομένως επιβεβαιώνεται ακόμα μία φορά η ακρίβεια της προς μελέτη μεθόδου. Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν πως η προτεινόμενη μέθοδος συγκόλλησης με ίνες laser είναι εξαιρετικά αποτελεσματική. Για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στο μοντέλο προσομοίωσης προτείνεται να ληφθεί υπόψιν το φαινόμενο κατά το οποίο υπάρχει ένα στρώμα προστατευτικού αερίου (π.χ. Αργό) ώστε να μην υπάρχει έκθεση του σημείου που λαμβάνει χώρα η συγκόλληση στο οξυγόνο.[22][23]

### On the study of keyhole-mode melting in selective laser melting process

Οι Κ.Ο. Le, C. Tang et al. [24] στην παρούσα μελέτη ανέπτυξαν ένα μοντέλο υπολογιστικής προσομοίωσης μηχανικής ρευστών ώστε να μοντελοποιήσουν την διαδικασία επιλεκτικής τήξης μετάλλων (Selective Laser Melting). Το μοντέλο που δημιουργήθηκε μιμείται τις πολλαπλές αντανακλάσεις της ακτίνας laser χρησιμοποιώντας την συνάρτηση απορρόφησης Fresnel. Το μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει την ροή ρευστών και θερμότητας στην περίπτωση του Keyhole, γεγονός το οποίο επαληθεύεται και από πειραματικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων υποδεικνύουν πως η δυναμική του τηγμένου μετάλλου σε βαθιά εμφάνιση του φαινομένου Keyhole είναι πιο ασταθής σε σύγκριση με αυτή της μεσαίας εμφάνισης του. Στην περίπτωση του πρώτου, παρατηρούνται ροές ρευστών με διάφορες κατευθύνσεις όπως για παράδειγμα κατακόρυφη, αντίθετα με την πρόωση του λειζερ ή ακόμα και με ωρολογιακή φορά, εν αντιθέσει με την δεύτερη περίπτωση όπου η κατάσταση είναι πιο σταθερή και οι ροές τείνουν να είναι προς τα πίσω ή προς τα κάτω. Ένα επιπλέον πολύ σημαντικό προτέρημα της παρούσας μοντελοποίησης είναι η δυνατότητα του μοντέλου να προβλέπει την πορώδη κατάσταση που θα προκύψει στο στερεοποιημένο μέσο.[25]

Παρακάτω φαίνονται οι ιδιότητες που επιλέχθηκαν για την μοντελοποίηση όσων αφορά στο μέταλλο και στην ακτίνα laser. Όσο για την ακτίνα λειζερ, αριστερά φαίνεται η κατανομή της ισχύος του λειζερ η οποία κατα 99.44% βρίσκεται μέσα στην περιοχή 1.6 ακτινών.



Εικόνα 4-2: Κατανομή Ισχύος της Ακτίνας Λειζερ (αριστερά), Ιδιότητες που επιλέχθηκαν στην μοντελοποίηση (δεξιά)



## Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Αλέξιος Οικονομίδης

Επιπλέον παρατίθεται ο ακόλουθος πίνακας με τις διαφορετικές αρχικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στην ισχύ του laser, την ταχύτητα πρόωσης της δέσμης καθώς και την ενεργειακή πυκνότητα.

Πίνακας 4-3: 9 διαφορετικές περιπτώσεις προσομοίωσης για διάφορες τιμές ισχύος λειζερ, ταχύτητας πρόωσης και ενεργειακής πυκνότητας

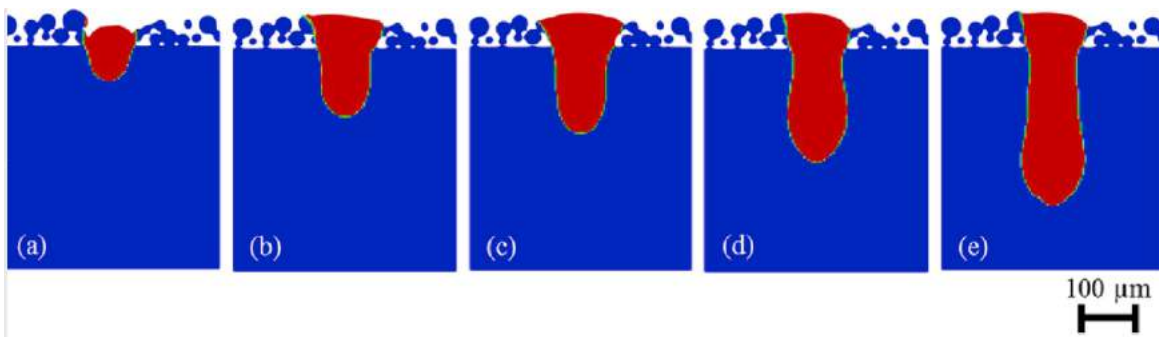
Sample	Laser power (W)	Scanning speed (mm/s)	Energy density (J/mm <sup>3</sup> )
A	300	1500	48
B	400	2000	48
C	300	900	81
D	500	1500	81
E	300	750	97
F	300	600	121
G	400	800	121
H	200	300	162
K	300	450	162

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα αριθμητικά και στην συνέχεια εποπτικά ορισμένα απο αυτά.

Πίνακας 4-4: Πειραματικά και προσομοιωμένα αποτελέσματα για τις διάφορες αρχικές συνθήκες.

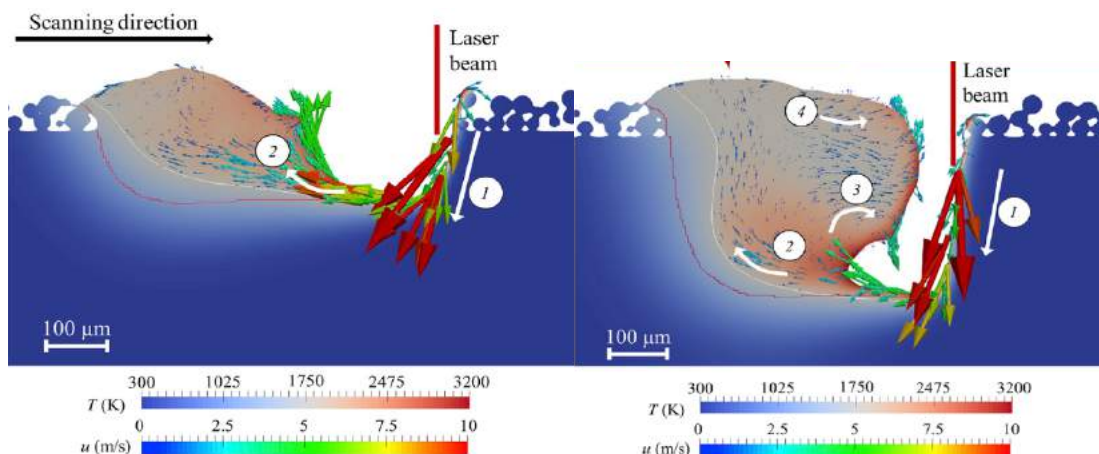
Sample	Depth			Width		
	Simulation (μm)	Experiment [5] (μm)	Deviation, $\epsilon$ (%)	Simulation (μm)	Experiment [5] (μm)	Deviation, $\epsilon$ (%)
A	60 ± 0	50	20.00	86 ± 2	85 ± 11	1.18
B	57.3 ± 2.7	64	10.47	92 ± 4	105 ± 18	12.38
C	120 ± 0	128	6.25	100 ± 8	109 ± 21	8.26
D	112 ± 0	123	8.94	100 ± 4	99 ± 33	1.01
E	152 ± 0	146	4.12	112 ± 4	115 ± 25	2.61
F	198 ± 0	198	0.00	114 ± 2	130 ± 29	12.31
G	194 ± 2	220	11.82	108 ± 4	120 ± 22	10.00
H	276 ± 4	266	3.76	110 ± 2	130 ± 10	15.38
K	278 ± 6	302	7.95	110 ± 2	140 ± 25	21.43

Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων κυμαίνονται από 0-20%, ποσοστό αρκετά ικανοποιητικό για την συγκεκριμένη προσομοίωση. Από τις παραπάνω περιπτώσεις επιλέγονται οι A(a), C(b), E(c), F(d), K(e) όπως φαίνεται παρακάτω.



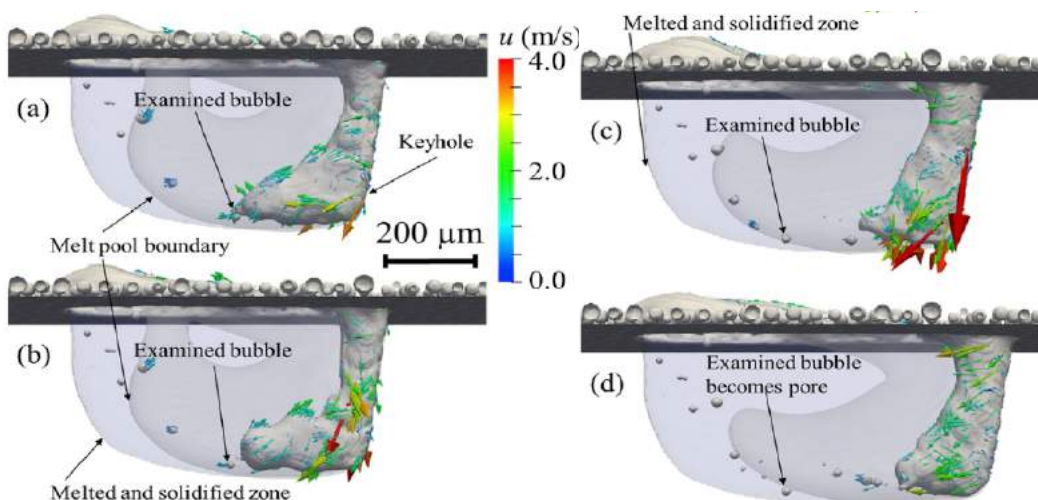
Εικόνα 4-3: Οπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για κάποιες από τις περιπτώσεις.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή θερμοκρασίας και ταχύτητας στο δοκίμιο κατά την μοντελοποίηση συγκριτικά για μεσαίου και μεγάλου βάθους εμφάνιση του φαινομένου Keyhole.



Εικόνα 4-4: Κατανομή θερμοκρασίας και ταχύτητας στην περιοχή τηγμένου μετάλλου 800  $\mu\text{s}$  μετά την έναρξη της επίδρασης της ακτίνας laser. Αριστερά παρουσιάζεται η περίπτωση μεσαίου βάθους εμφάνισης του φαινομένου Keyhole και δεξιά μεγάλο βάθος εμφάνισης.

Από την παραπάνω εικόνα μπορούμε να δούμε ότι τα διανύσματα των ταχυτήτων στις δύο περιπτώσεις είναι αρκετά διαφορετικά. Στην περίπτωση μεσαίου βάθους η ροή παρουσιάζει δύο μορφές την (1) προς τα κάτω και την (2) προς τα πίσω ενώ στα μεγάλα βάθη υπάρχουν επιπλέον η (3) προς τα εμπρός ωρολογιακά και η (4) προς τα εμπρός αντίθετα με την φορά του ρολογιού. Είναι εμφανές λοιπόν ότι σε μεγάλα βάθη η μελέτη γίνεται πιο περίπλοκη.



Εικόνα 4-5: Δυναμική εξεταζόμενη φυσαλίδα για τις χρονικές στιγμές (a)  $t=1770 \mu\text{s}$ , (b)  $t=1780 \mu\text{s}$ , (c)  $t=1950 \mu\text{s}$ , (d)  $t=2150 \mu\text{s}$

Κατα την επίδραση της ακτίνας laser, και λόγω της ανωμαλίας της ροής δημιουργούνται φυσαλίδες οι οποίες στην συνέχεια γίνονται πόροι όταν το τηγμένο μέταλλο στερεοποιηθεί.

Το συμπέρασμα της παρούσας μελέτης είναι πώς κατα την τήξη μετάλλου, το βάθος της τηγμένης περιοχής επιδρά σημαντικά στην ταχύτητα, την ροή και την θερμοκρασία των σωματιδίων. Όσο μεγαλύτερο βάθος, τόσο πιο ασταθής η κατάσταση και τόσο πιο περίπλοκα τα διανύσματα των ταχυτήτων. Η περιπλοκότητα αυτή οδηγεί στην δημιουργία περισσότερων φυσαλίδων και επομένως περισσότερων πόρων.[26]



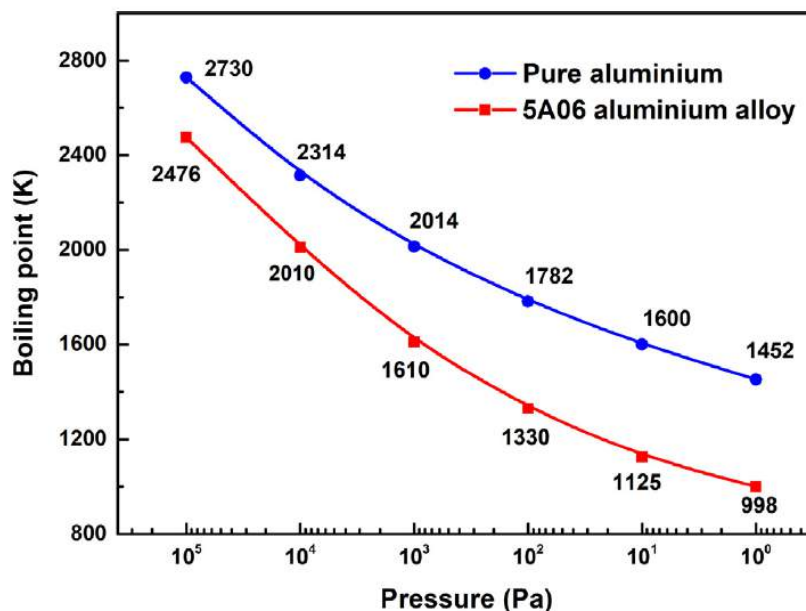
### Numerical and experimental study on keyhole and melt flow dynamics during laser welding of aluminium alloys under subatmospheric pressures

Οι Liqun Li et al [27] υποστηρίζουν πως η ρευστοδυναμική του τηγμένου αντικειμένου κατα την συγκόλληση με laser, επηρεάζει σημαντικά το πόσο πορώδες θα καταλήξει να είναι το δοκίμιο τελικά. Για τον λόγο αυτό ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης το οποίο βοηθά στην μελέτη της συμπεριφοράς κράματος αλουμινίου κατα την συγκόλληση με laser, σε πιέσεις χαμηλότερες της ατμοσφαιρικής. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της παρούσας μελέτης υποδεικνύουν πως το φαινόμενο Keyhole εμφανίζεται σε μεγαλύτερο βάθος και με μικρότερες ανωμαλίες όταν η συγκόλληση λαμβάνει χώρα σε υποπίεση, σε σύγκριση με την αντίστοιχη συγκόλληση σε ατμοσφαιρική πίεση.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι κράμα αλουμινίου 5A06 με την ακόλουθη σύσταση:

Cu	Zn	Mg	Si	Mn	Ti	Fe	Al
0.1	0.2	6.2	0.4	0.6	0.05	0.4	Bal.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται συγκριτικά το σημείο βρασμού, για διάφορες πιέσεις, τόσο του κράματος που θα χρησιμοποιηθεί, όσο και του απλού αλουμινίου. Όπως είναι αναμενόμενο όσο μικραίνει η πίεση, τόσο χαμηλώνει και το σημείο βρασμού.

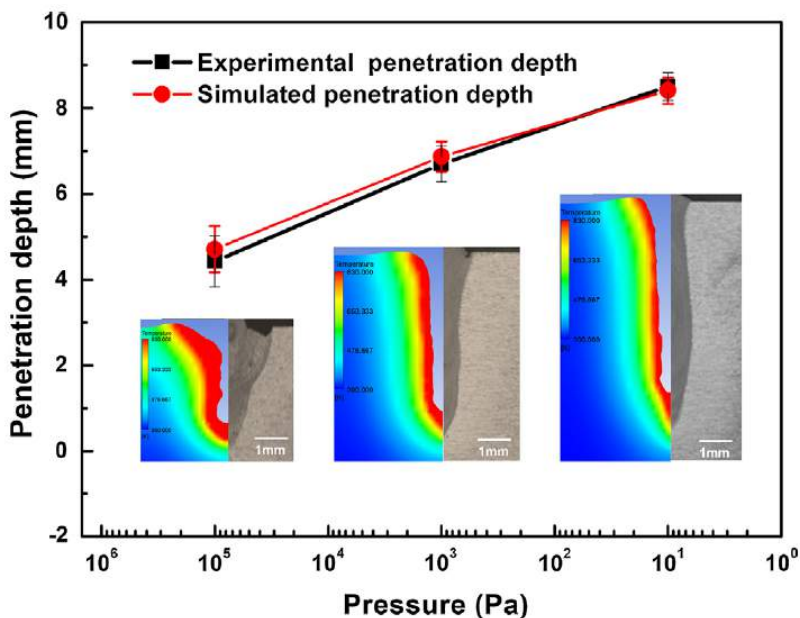


Διάγραμμα 4-1: Σύγκριση σημείου βρασμού για καθαρό αλουμίνιο και το προς μελέτη κράμα, για διάφορες πιέσεις

Κατα την προσομοίωση μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις:  $10^5$  Pa,  $10^3$  Pa και  $10^1$  Pa.



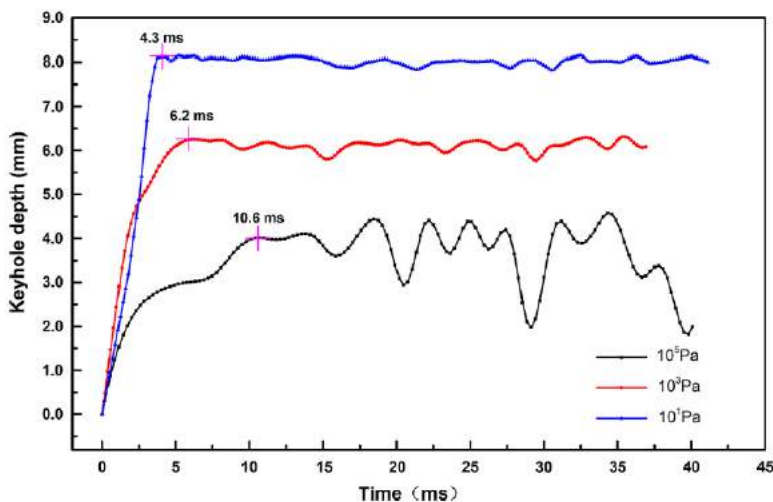
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται συγκριτικά η πειραματική και η κοιλότητα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις που μελετήθηκαν. Επίσης παρουσιάζεται η μεταβολή του βάθους εμφάνισης του Keyhole.



Εικόνα 4-6: Μεταβολή Βάθους κοιλότητας τόσο πειραματικά όσο και στην προσομοίωση, για τις διάφορες πιέσεις.

Παρατηρούμε πως όσο ελαττώνεται η πίεση η μορφή της κοιλότητας είναι όλο και πιο μακρόστενη και με λιγότερες ανωμαλίες. Επίσης παρατηρούμε πως τα πειραματικά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πάρα πολύ παραπλήσια, γεγονός που επιβεβαιώνει την ακρίβεια του μοντέλου.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα διάγραμμα με την μεταβολή του βάθους της κοιλότητας συναρτήσει του χρόνου, για τις τρεις πιέσεις:

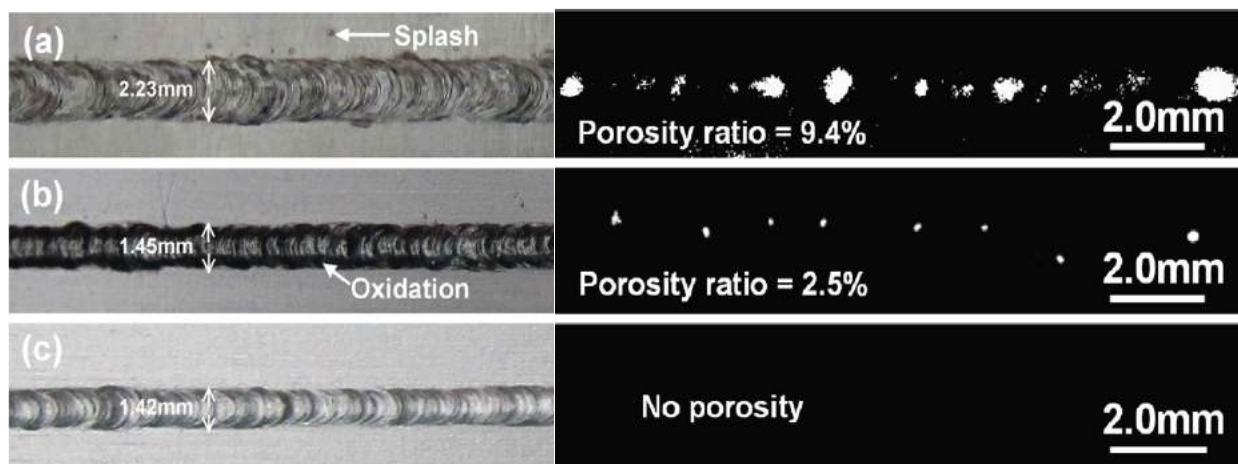


Διάγραμμα 4-2: μεταβολή του βάθους της κοιλότητας συναρτήσει του χρόνου, για τις τρεις πιέσεις



Το διάγραμμα αυτό υποδεικνύει πως όσο μικρότερη η πίεση τόσο πιο γρήγορα φτάνουμε στο μέγιστο βάθος και τόσο πιο σταθερό διατηρείται αυτό κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Αντίθετα με υψηλή πίεση αργούμε να επιτύχουμε την σταθεροποίηση η οποία όταν επιτυγχάνεται συνεχίζει να παρουσιάζει μεταβολές.

Κατά την εκτέλεση του πειράματος δημιουργήθηκαν οι τρεις μορφές που φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 4-7: Πειραματικές διαμορφώσεις για τις τρεις πιέσεις (a)  $10^5$  Pa, (b)  $10^3$  Pa, (c)  $10^1$  Pa.

Βλέπουμε πως όσο μικρότερη πίεση τόσο λιγότεροι πόροι σχηματίζονται κατά την συγκόλληση. Επίσης σε μεγαλύτερες πιέσεις παρατηρούνται ανεπιθύμητα φαινόμενα όπως για παράδειγμα ανώμαλη μορφή και οξείδωση, τα οποία σε χαμηλή πίεση εξαλείφονται.[28]

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως με την ελάττωση της πίεσης βελτιώνονται σημαντικά οι ιδιότητες του τελικού συγκολληθέντος αντικειμένου. Οι δίνες στο πίσω τοίχωμα της κοιλότητας έγιναν δυσδιάκριτες ή ακόμα και εξαφανίστηκαν με τη μείωση των πιέσεων. Η ταχύτητα ροής του τηγμένου μετάλλου στο τοίχωμα της κοιλότητας ήταν μεγαλύτερη σε χαμηλότερη πίεση. Μία μικρότερη διαφορά μεταξύ του σημείου βρασμού και του σημείου τήξης προέκυψε και αυτό οδήγησε στη βελτίωση της σταθερότητας της περιοχής τηγμένου μετάλλου. Μεγαλύτερο μέγεθος ανοίγματος της δημιουργούμενης κοιλότητας, μεγαλύτερη ταχύτητα ροής τήγματος, λεπτότερη κοιλότητα και εξασθένιση όλων των δινών είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση των ελαττωμάτων που προκαλούν πόρους κατά τη συγκόλληση με laser κραμάτων αλουμινίου. Τα συγκρινόμενα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα αποτελέσματα προσομοίωσης παρουσίαζαν μεγάλη ομοιότητα με τα πειραματικά.[29]



### **Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti6Al4V powder**

Οι Jun-Rong Zhuang et al [30] ανέπτυξαν ένα μεταβαλλόμενο μοντέλο με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method –FEM) για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς και εν συνεχεία την πρόβλεψη της εξέλιξης της θερμοκρασίας και των διαστάσεων της περιοχής τηγμένου υλικού, για κονίαμα Ti6Al4V κατα την μέθοδο SLM. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με ήδη δημοσιευμένες μελέτες για επαλήθευση της μεθόδου και επικύρωση της. Η μελέτη αυτή βασίστηκε στο σχεδιασμό του πειράματος (Desing Of Experiment – DOE) και σε συνδυασμό με την μέθοδο απόκρισης επιφάνειας (Response Surface Method – RSM) υπολόγισε το φαινόμενο ανάλογα με τέσσερις παραμέτρους. Οι παράμετροι οι οποίες μεταβαλλόντουσαν ήταν η ισχύς του laser, η ταχύτητα σάρωσης της ακτίνας, η θερμοκρασία προθέρμανσης και ο χώρος των ανοιγμάτων. Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν βάσει τριών κριτηρίων, του μήκους, του πλάτους και του βάθους της περιοχής τηγμένου υλικού για να κατηγοριοποιήσουν τις επιθυμητές τιμές που πρέπει να λαμβάνουν οι τέσσερις παράμετροι. Οι προσομοιώσεις της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων επιβεβαίωσαν την καλή ακρίβεια των υπολογισμών για τρία διαφορετικά σενάρια συνθηκών κατα την διαδικασία SLM.

Στην συνέχεια βλέπουμε τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν κατα την μελέτη για τις προαναφερθείσες παραμέτρους:

Πίνακας 4-5 : Τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη

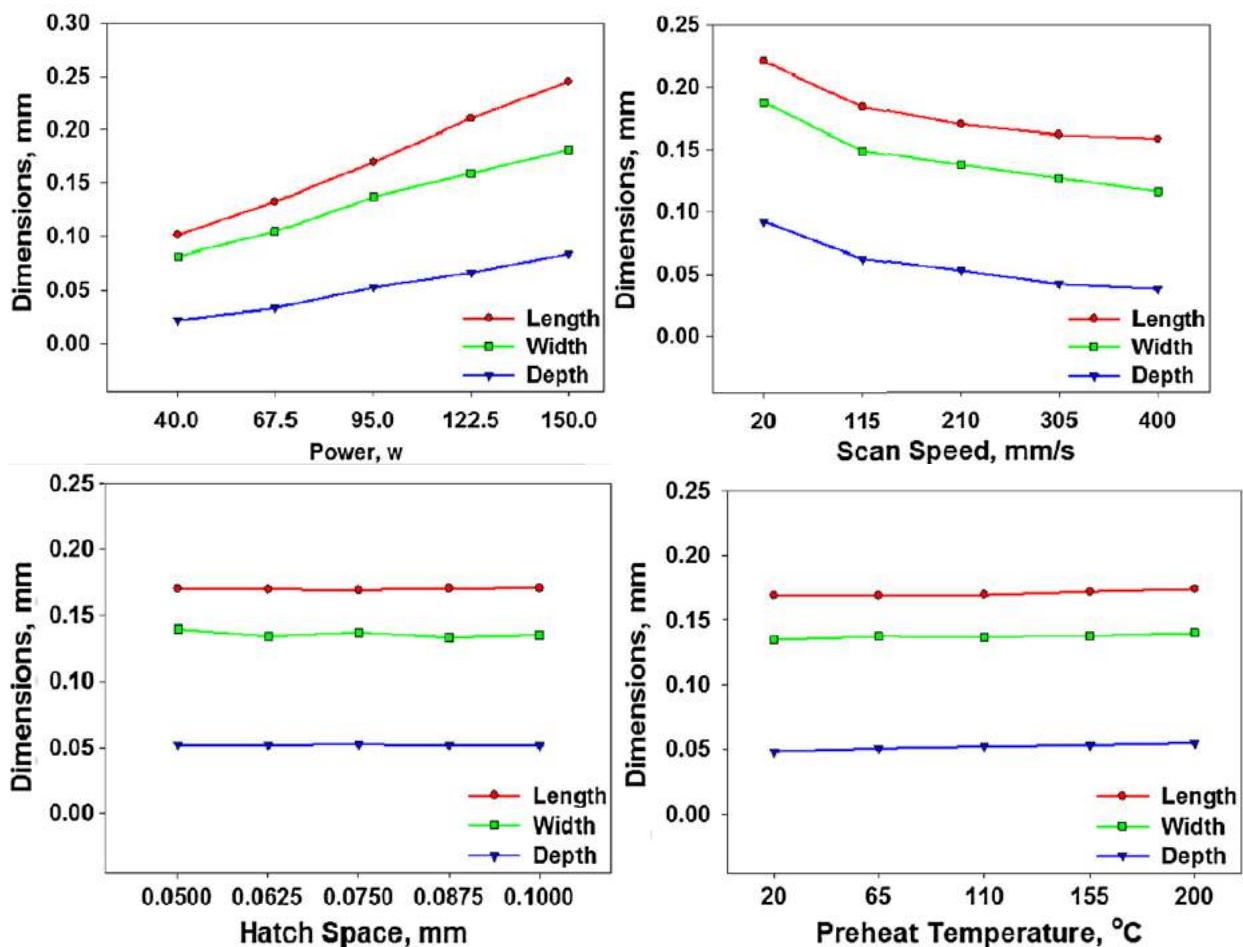
Ισχύς (W)	Ταχύτητα Σάρωσης (mm/s)	Θερμοκρασία Προθέρμανσης (°C)	Χώρος Ανοιγμάτων (mm)
40	20	20	0.05
67.5	115	65	0.0626
81.25	162.5	87.5	0.06875
95	210	110	0.075
108.75	257.5	132.5	0.08125
122.5	305	155	0.0875
150	400	200	0.1

Από τις παραπάνω τιμές προέκυψαν οι καμπύλες που παρουσιάζουν την μεταβολή των διαστάσεων της περιοχής τηγμένου υλικού για κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους. Για τον υπολογισμό της κάθε παραμέτρου οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές και ίσες με την μέση τιμή του πίνακα 4.5.





Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:



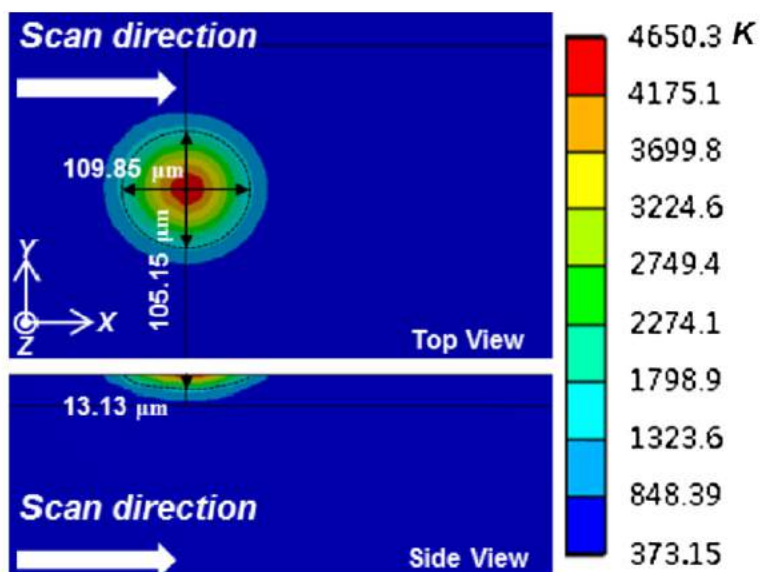
Εικόνα 4-8: Μεταβολή Μήκους, Πλάτους και Βάθους της περιοχής τηγμένου υλικού για τις διάφορες παραμέτρους

Παρατηρούμε πως με την αύξηση της ισχύος του laser οι τρεις διαστάσεις που μελετάμε παρουσιάζουν άνοδο, επομένως η συνολική περιοχή μεγαλώνει. Αντίθετα, όσο μεγαλύτερη γίνεται η ταχύτητα του laser, τόσο μικραίνουν οι διαστάσεις. Όσον αφορά στις άλλες δυο παραμέτρους (Θερμοκρασία Προθέρμανσης και Χώρος Ανοιγμάτων) η μεταβολή τους προκαλεί αμελητέα μεταβολή των διαστάσεων της τηγμένης περιοχής.

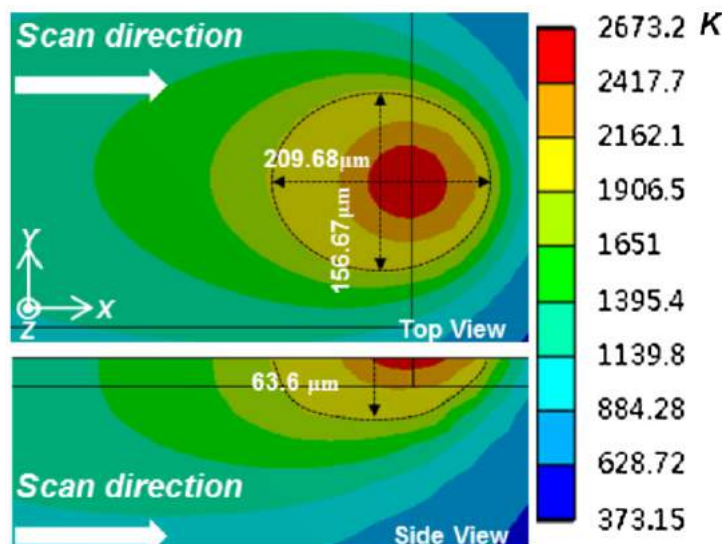
Επίσης παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην αρχή και στο τέλος της προσβολής του υλικού από την ακτίνα laser. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η θερμοκρασιακή κατανομή και οι διαστάσεις της περιοχής του τηγμένου υλικού για ισχύ laser 110 Watt και ταχύτητα σάρωσης 220 mm/s.[31]



Η διακεκομμένη γραμμή αντικατοπτρίζει την ισοθερμοκρασιακή καμπύλη των 1933 K η οποία είναι η θερμοκρασία τήξης του συγκεκριμένου υλικού. Επομένως η περιοχή τηγμένου υλικού είναι αυτή που εσωκλείεται στην διακεκομμένη.



Εικόνα 4-9: Θερμοκρασιακή κατανομή και διαστάσεις περιοχής τηγμένου υλικού κατά την εκκίνηση της διαδικασίας



Εικόνα 4-10: Θερμοκρασιακή κατανομή και διαστάσεις περιοχής τηγμένου υλικού κατά το πέρας της διαδικασίας

Παρατηρούμε πώς κατά την διεύθυνση κίνησης της ακτίνας έχουμε ασυμμετρία με το μέρος που ήδη έχει προσβληθεί να έχει διαφορετική θερμική αγωγιμότητα και επομένως να αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Επίσης η θερμοκρασία κατά την εκκίνηση ξεπερνάει τους 3808 K (θερμοκρασία ατμοποίησης του υλικού). Η απώλεια υλικού όμως είναι αμελητέα καθώς η θερμοκρασία αυτή επικρατεί για ελάχιστο χρόνο και σε μία πολύ μικρή περιοχή.



## 5. Μέθοδος Μοντελοποίησης

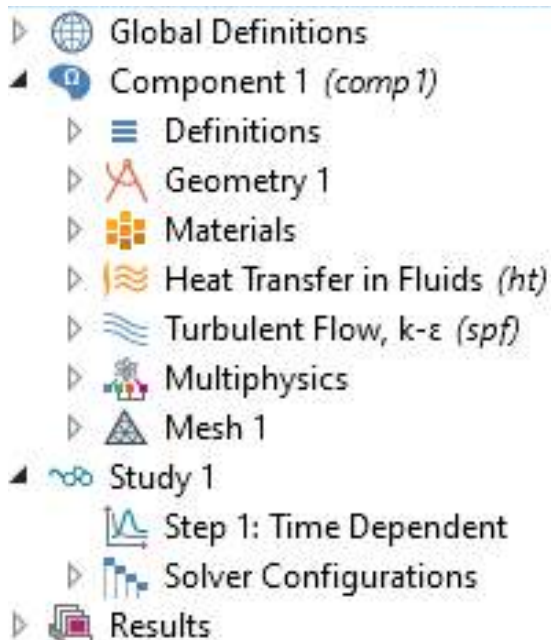
Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης του φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο προκειμένου να προσομοιωθεί η διαδικασία κατά την οποία μία ακτίνα laser προσκρούει σε ένα μεταλλικό δοκίμιο. Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει την μεταβολή της θερμοκρασίας του δοκιμίου από την στιγμή που η ακτίνα προσκρούει μέχρι να περάσει η επίδρασή της. Επίσης με την πρόσκρουση της ακτίνας το υλικό τήκεται και επομένως αναπτύσσονται ταχύτητες στην ρευστή περιοχή.

Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Το λογισμικό αυτό παρέχει την δυνατότητα προσομοίωσης πληθώρας φυσικών προβλημάτων όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της εργασίας. Το συγκεκριμένο πρόβλημα απαιτεί ορισμένες από τις δυνατότητες που προσφέρει το πρόγραμμα, οι οποίες είναι η μελέτη:

- Μεταφοράς Θερμότητας σε Στερεά και Ρευστά (Heat Transfer in Solids and Fluids)
- Τυρβώδης Ροή (Turbulent Flow)
- Φαινόμενο Marangoni (Marangoni Effect)

Η μοντελοποίηση έγινε με ανάλυση σε δύο διαστάσεις θεωρώντας ότι προσομοιώνεται η τομή του δοκιμίου κατά την διάρκεια της προσβολής του από την ακτίνα laser.

Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει τον ορισμό αρκετών παραμέτρων οι οποίες παρουσιάζονται στην συνέχεια:

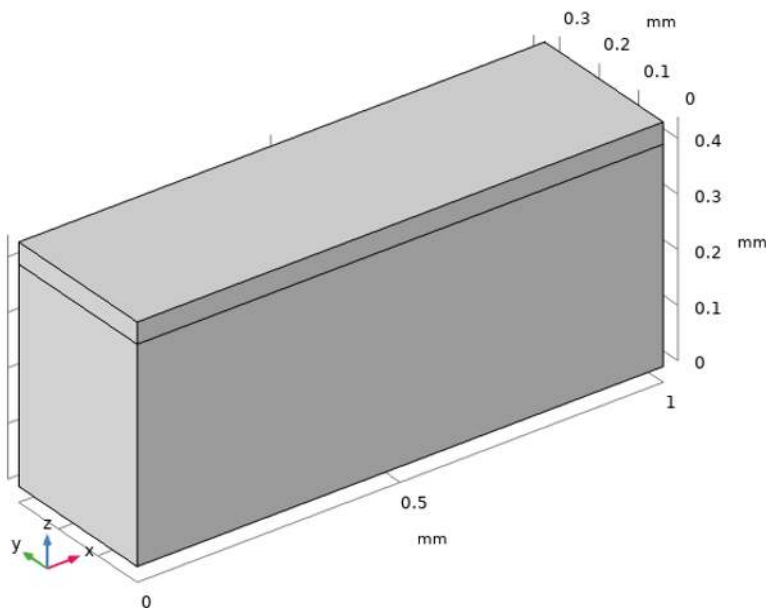


Εικόνα 5-1: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό



### Γεωμετρία (Geometry)

Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε είναι μία απλή διάταξη δύο παραλληλεπίπεδων δοκιμίων σε επαφή. Τα δοκίμια έχουν πλευρές 1 mm x 0.4 mm x 0.3 mm και τοποθετούνται σε καρτεσιανό σύστημα με την βάση της επαφής τους στην αρχή των αξόνων. Η διάταξη παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 5-2: Διάταξη των γεωμετρικών στοιχείων κατά την προσομοίωση του προβλήματος

### Υλικά (Materials)

Το υλικό που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη μελέτη είναι **Fe – 316 Stainless Steel**. Η χημική του σύσταση και τα χαρακτηριστικά του λήφθηκαν από την εργασία “Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys” του Kenneth C. Mills[32].

Η σύσταση του υλικού είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 5-1: Σύσταση του προς μελέτη υλικού Fe – 316 Stainless Steel [5.1]

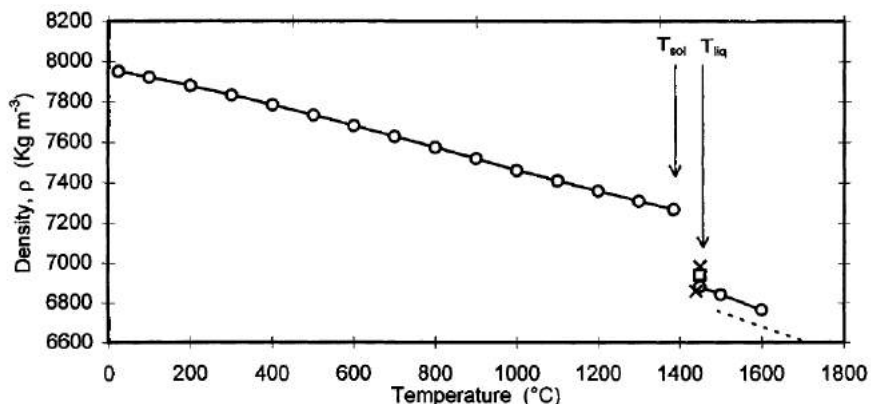
C	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Si
0.08	17	0.3	65	2.0	2.5	12	1

Το προς μελέτη υλικό τήκεται στους 1693 K και ατμοποιείται στους 3273 K.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα με την μεταβολή των διάφορων παραμέτρων συναρτήσει της θερμοκρασίας. Όλα τα διαγράμματα παρουσιάζουν μία ασυνέχεια στην περιοχή όπου συνυπάρχουν τα υγρό και το στερεό υλικό.

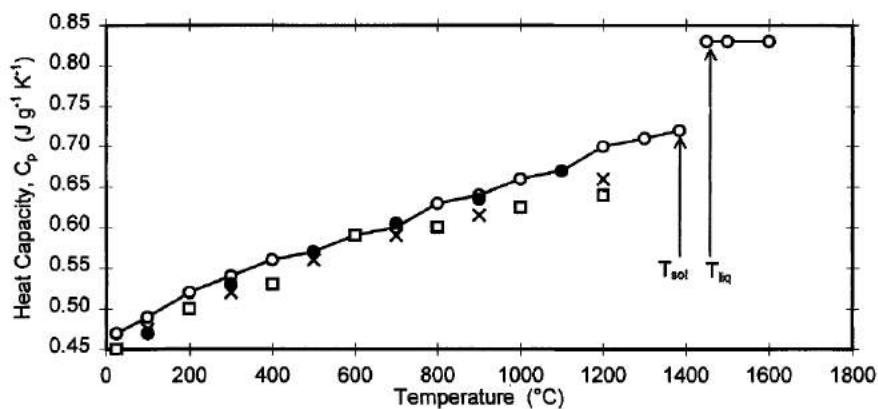


Πυκνότητα υλικού:



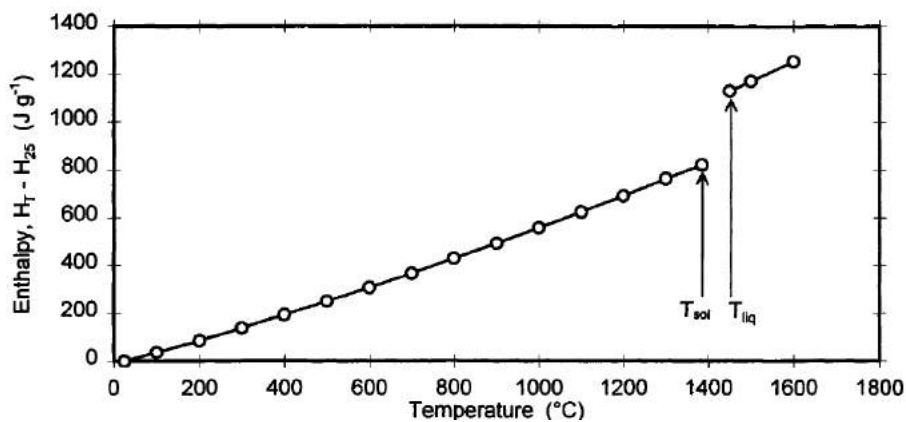
Διάγραμμα 5-1: Μεταβολή Πυκνότητας Υλικού με την θερμοκρασία [32]

Θερμοχωρητικότητα:



Διάγραμμα 5-2: Μεταβολή Θερμοχωρητικότητας Υλικού με την θερμοκρασία [32]

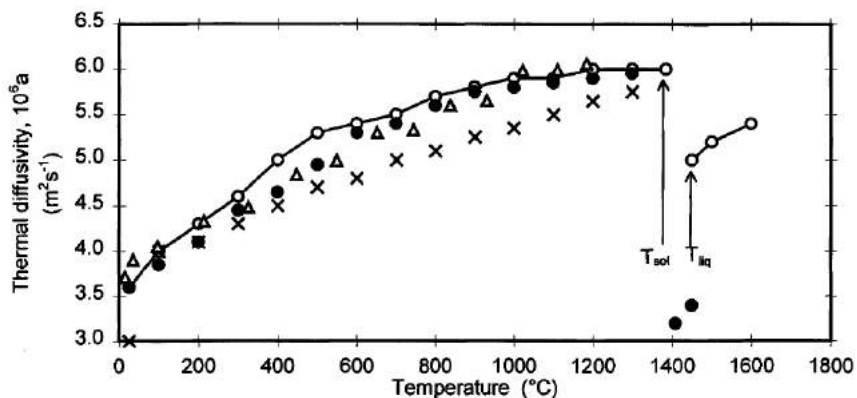
Ενθαλπία:



Διάγραμμα 5-3: Μεταβολή Ενθαλπίας Υλικού με την θερμοκρασία [32]

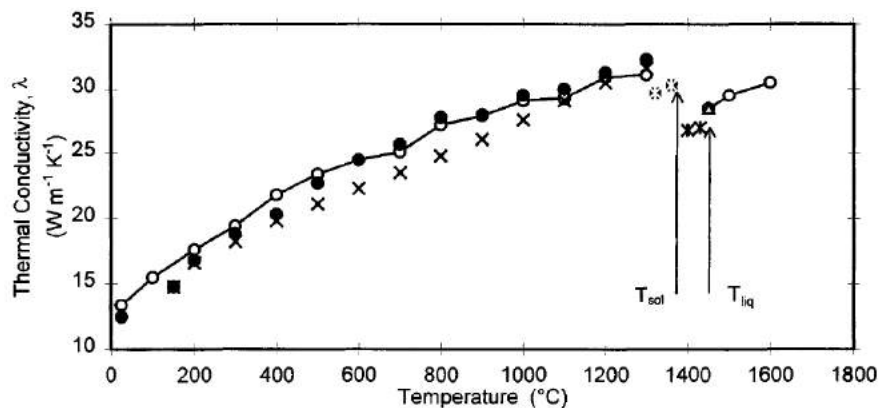


Θερμική διαχυτικότητα:



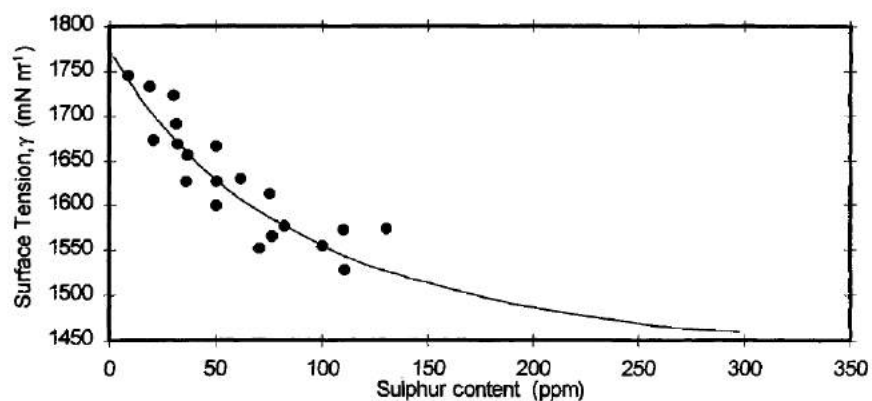
Διάγραμμα 5-4: Μεταβολή Θερμικής Διαχυτικότητας Υλικού με την θερμοκρασία [32]

Θερμική Αγωγιμότητα



Διάγραμμα 5-5: Μεταβολή Θερμικής Αγωγιμότητας Υλικού με την θερμοκρασία [32]

Επιφανειακή Τάση:



Διάγραμμα 5-6: Μεταβολή Επιφανειακής τάσης Συναρτήσεσι του περιεχομένου σε θείο [32]



## Μεταφορά Θερμότητας σε Στερεά και Ρευστά (Heat Transfer in Solids and Fluids)

Η επιλογή του συγκεκριμένου φυσικού αντικείμενου πρόκειται για την “καρδιά” του προβλήματος. Γίνεται επιλογή μεταφοράς θερμότητας και σε στερεά και σε ρευστά καθώς κατά την προσβολή από την ακτίνα laser το υλικό τήκεται.

Στο σημείο αυτό ορίζονται οι αρχικές συνθήκες που επικρατούν (θερμοκρασία προθέρμανσης αντικείμενου) καθώς επίσης οι απώλειες λόγω συναγωγής προς το περιβάλλον, και οι μονωμένες πλευρές του δοκιμίου. Επίσης τοποθετείται η ακτίνα laser ώστε να προσκρούει στο δοκίμιο στο επιθυμητό σημείο.

### Εξισώσεις Μεταφοράς Θερμότητας

$$-n_{dst} q_{dst} = n_{src} q_{src} \quad (1)$$

- $T_{dst} = T_{src} \quad (2)$

Με τον δείκτη dst συμβολίζεται ο προορισμός (destination) και με src η πηγή (source). Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν συνοριακές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας και θερμοκρασίας.

- $-n \cdot q = P_0 \cdot f(O, e) \frac{|e \cdot n|}{\|e\|} \quad (3)$

Η εξίσωση περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας στο δοκίμιο από τη δέσμη laser.

$$\rho = \rho_{solid} \quad (4)$$

$$C_p = \theta_1 \cdot C_{p,1} + \theta_2 \cdot C_{p,2} + L_{1 \rightarrow 2} \frac{\partial a_m}{\partial T} \quad (5)$$

- $a_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1 + \theta_2} \quad (6)$

$$k = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \quad (7)$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 1 \quad (8)$$

Το παραπάνω σύμπλεγμα εξισώσεων εξηγεί τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του υλικού στη διφασική περιοχή υγρού και στερεού. Οι μεταβλητές  $\theta_1$  και  $\theta_2$  είναι η αναλογία υγρής και στερεάς φάσης, οι οποίες αθροίζουν 1.

- $-n \cdot q = \varepsilon \cdot \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \quad (9)$

Η σχέση (17) αποτελεί τη γνωστή σχέση ακτινοβολίας και εκφράζει τις απώλειες ακτινοβολίας από τη θερμή επιφάνεια του δοκιμίου προς το ψυχρό περιβάλλον.

- $-n \cdot q = 0 \quad (10)$

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται με την παρουσία καλής θερμικής μόνωσης η οποία μηδενίζει τις θερμικές απώλειες.



## Τυρβώδης Ροή (Turbulent Flow)

Μέσω της επιλογής τυρβώδους ροής στο πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα να ορισθούν οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή τηγμένου μετάλλου η οποία όπως έχει αναφερθεί αναπτύσσεται κατα την προσβολή του δοκιμίου από την ακτίνα laser.

### Εξισώσεις Ροής

$$u_{src} = u_{dst} \quad (11), \quad p_{src} = p_{dst} \quad (12)$$

$$k_{src} = k_{dst} \quad (13), \quad \varepsilon_{src} = \varepsilon_{dst} \quad (14)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν τη ροϊκή συνέχεια. Όπως προαναφέραμε με τον δείκτη dst συμβολίζεται ο προορισμός (destination) και με src η πηγή (source).

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad (15)$$

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0 \quad (16)$$

$$K = (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (17)$$

$$\rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)K = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \right) \nabla K \right] + P_K - \rho \varepsilon \quad (18)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \right) \nabla \varepsilon \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} P_K - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{K}, \quad \varepsilon = \rho p \quad (19)$$

Το παραπάνω σύμπλεγμα εξισώσεων αποτελείται από εξισώσεις ροής και ενέργειας του ρευστού.

$$[-pI + K]n = -\hat{p}_0 n \quad (20)$$

$$\hat{p}_0 \leq p_0,$$

$$\nabla K \cdot n = 0 \quad (28), \quad \nabla \varepsilon \cdot n = 0 \quad (21)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις εξασφαλίζουν τη διατήρηση της ενέργειας στο σύστημα.

$$u \cdot n = 0 \quad (22)$$

$$K \cdot n = -\rho \frac{u_\tau}{u^+} u_{\text{tang}} \quad (23)$$

$$u_{\text{tang}} = u - (u \cdot n)n \quad (24)$$

$$\nabla K \cdot n = 0, \quad \varepsilon = \rho \frac{C_\mu K^2}{\kappa_v \delta_w^+ \mu} \quad (25)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αφορούν στα στερεά τοιχώματα στα οποία ισχύουν η συνθήκη μη εισχώρησης και η συνθήκη μη ολίσθησης.





### Συνδυαστικά Φαινόμενα (Multiphysics)

Στα συνδυαστικά φαινόμενα φυσικής γίνεται η μελέτη του φαινομένου Marangoni. Πρόκειται ουσιαστικά για την μεταφορά μάζας σε διεπιφάνεια μεταξύ δύο ρευστών, λόγω της κλίσης της επιφανειακής τάσης. Σε περιπτώσεις που υπάρχει θερμοκρασιακή εξάρτηση, το φαινόμενο μπορεί να ονομαστεί και θερμο-τριχοειδής αγωγή [33].

Κατα την μελέτη του φαινομένου Marangoni χρειάζεται ο υπολογισμός του συντελεστή επιφανειακής τάσης  $\sigma$  (surface tension coefficient). Αυτός ο συντελεστής λαμβάνεται από την μελέτη “Equation to estimate the surface tensions of stainless steels” των Y. SU, et al. [34] και δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = 1840 - 0.4(T - 1823) - 0.056T \ln\{1 + e^{28798/T - 8.5647}(0.68\%S)\} \quad [\text{mN/m}]$$

Οι τιμές του  $\sigma$  κυμαίνονται μεταξύ 1500 mN/m και 1800 mN/m σύμφωνα με το διάγραμμα (5.3) και για την εργασία επιλέχθηκε η τιμή 1750 λόγω της αμελητέας περιεκτικότητας σε θείο (S).

- $$\left[ -pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)I \right] n = \gamma \nabla_t T \quad (26)$$

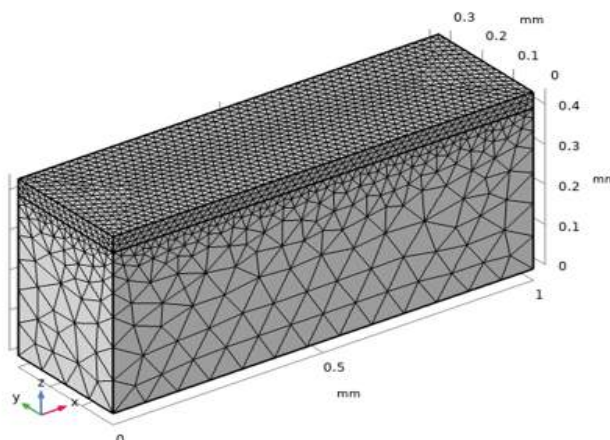
Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την εξίσωση εμφάνισης του φαινομένου Marangoni.



### Πλέγμα (Mesh)

Για την μορφή του πλέγματος έγινε η εξής διαδικασία. Τα δύο παραλληλεπίπεδα δοκίμια χωρίστηκαν σε τομείς και οι τομείς οι οποίοι βρίσκονταν πιο κοντά στο σημείο προσβολής της ακτίνας laser είχαν πιο πυκνό πλέγμα από τους υπόλοιπους. Αυτό συνέβη προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το υπολογιστικό κόστος, καθώς επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου με αμελητέα μείωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 5-3: Υπολογιστικό πλέγμα στο λογισμικό

Αυτός ο διαχωρισμός είναι επίσης σημαντικός καθώς το πάνω μέρος θεωρείται ως πούδρα (powder material) ενώ το κάτω είναι το υλικό υποστρώματος (substrate material). Τα υλικά αυτά έχουν διαφορετικές ιδιότητες (π.χ. διαφορετική θερμική αγωγιμότητα) επομένως με τον διαχωρισμό σε ξεχωριστούς τομείς επιτυγχάνεται ο έλεγχος των ιδιοτήτων του κάθε υλικού.

### Χρονική Εξάρτηση (Time Dependence)

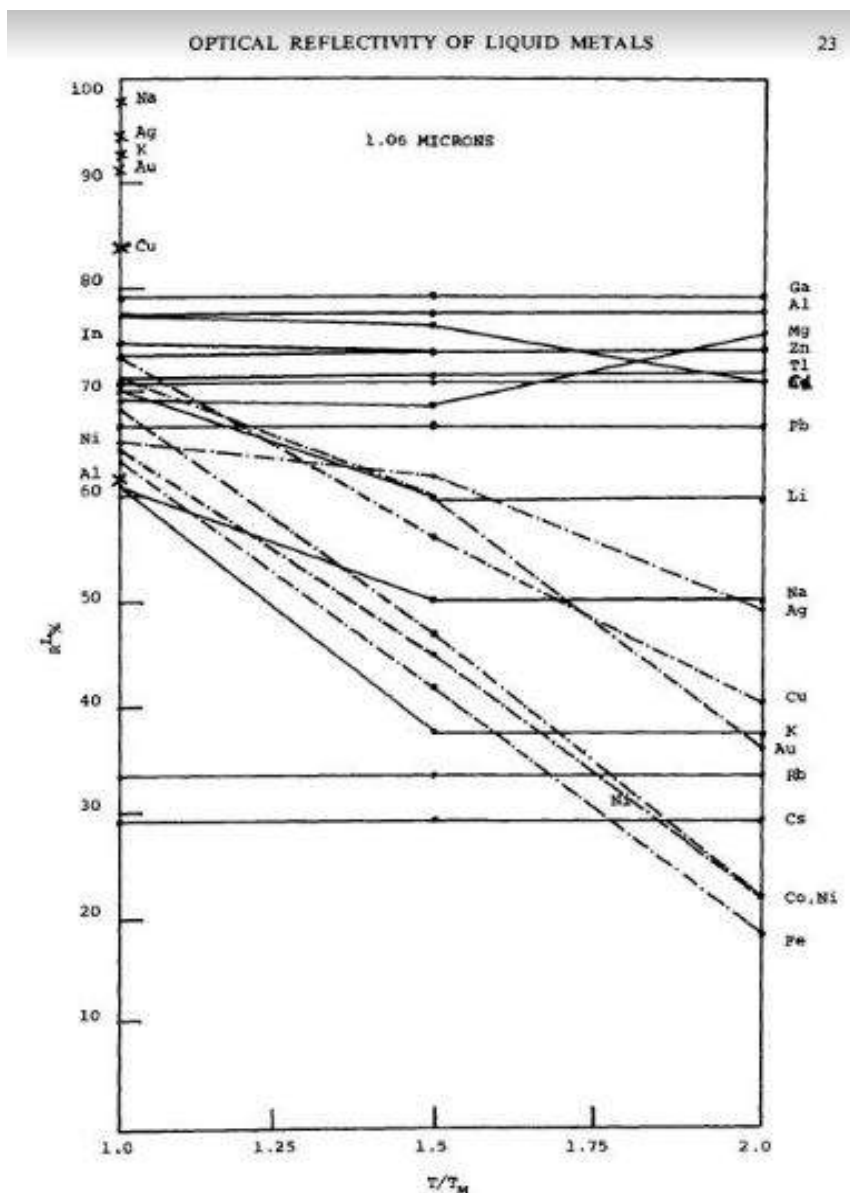
Το πρόβλημα μελετήθηκε κατά την χρονική εξέλιξη της προσβολής της ακτίνας laser. Η διάρκεια που έλαβε χώρα η μελέτη είναι μεταβαλλόμενη για κάθε περίπτωση με βήμα 0.01 ms

### Μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν

Οι εξισώσεις των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών αντλήθηκαν από δημοσιευμένες επιστημονικές μελέτες, οι οποίες αναφέρονται με παραπομπή στη βιβλιογραφία.

- **Δείκτης απορρόφησης**

Ο δείκτης απορρόφησης αντλήθηκε από το διάγραμμα της εικόνας 5-4. Όπως φαίνεται στη δημοσίευση της βιβλιογραφικής παραπομπής της εν λόγω εικόνας, η εξίσωση εύρεσης του δείκτη απορρόφησης είναι πολύπλοκη και χρησιμοποιείται το διάγραμμα προς διευκόλυνση των υπολογισμών.[35]



Εικόνα 5-4: Διάγραμμα δείκτη απορρόφησης σε συνάρτηση της θερμοκρασίας για 20 μέταλλα σε μήκος κύματος 1.06μm [35]

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τον δείκτη απορρόφησης για 20 μέταλλα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και για μήκος κύματος 1.06μm. Παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες του διαγράμματος είναι μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία τήξης, που σημαίνει ότι παρέχονται πληροφορίες για την υγρή φάση των μετάλλων. Το μήκος κύματος των 1.06μm ανήκει στο εύρος του υπέρυθρου φωτός (IR). Παρόμοια διαγράμματα υπάρχουν και για άλλες τιμές μήκους κύματος.



• **h (Συντελεστής συναγωγής)**

Ο συντελεστής συναγωγής υπολογίστηκε από τον τύπο  $h = \frac{N_u k_f}{L}$  (27) [30], ο οποίος βρέθηκε από δημοσιευμένη μελέτη για SLM κατεργασία, η οποία αναφέρεται στη βιβλιογραφία.

$N_u$  είναι ο συντελεστής Nusselt, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:  
 $N_u = 0.54 Ra_L^{1/4}$ ,  $10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$  (28).

$Ra_L$  είναι ο αριθμός Rayleigh και ισούται με το γινόμενο των αριθμών Prandtl (Pr) και Grashof (Gr):  $Ra_L = Pr \cdot Gr$  (29).

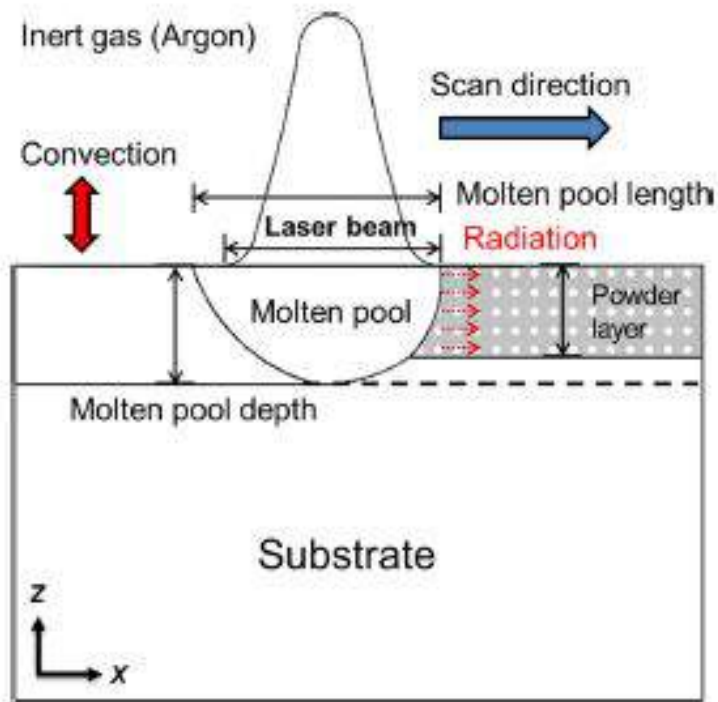
Οι αριθμοί Prandtl (Pr) και Grashof (Gr) υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Gr = \frac{g \rho_f \beta_f (T_s - T_\infty) L^3}{\mu_f^2} \quad (30), \quad Pr = \frac{c_f \mu_f}{k_f} \quad (31)$$

όπου  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\rho_f$  η πυκνότητα,  $\beta_f$  ο ογκομετρικός συντελεστής,  $\mu_f$  το ιξώδες και  $c_f$  ο συντελεστής ειδικής θερμότητας του ρευστού. Το ρευστό συναγωγής είναι ο αέρας.

$L$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος του τεμαχίου.

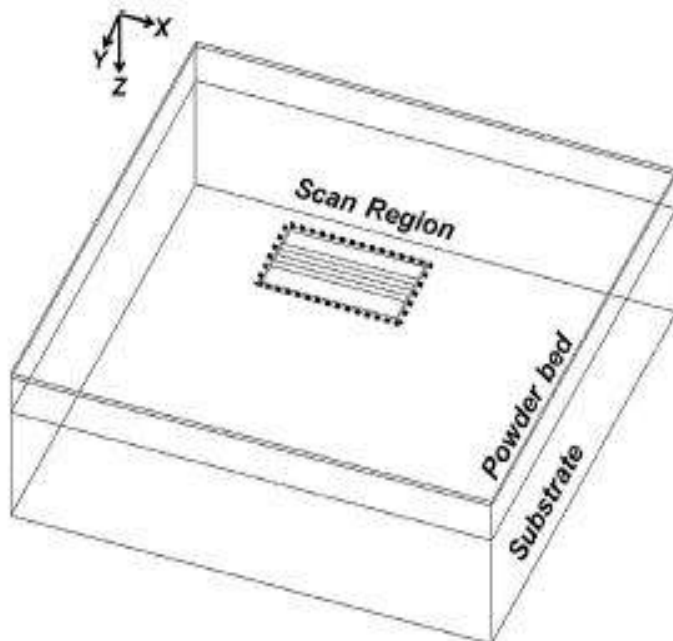
$k_f$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και για τον αέρα είναι  $0.016 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .



Εικόνα 5-5: Σχηματική αναπαράσταση θερμικών απωλειών σε SLM κατεργασία [30]



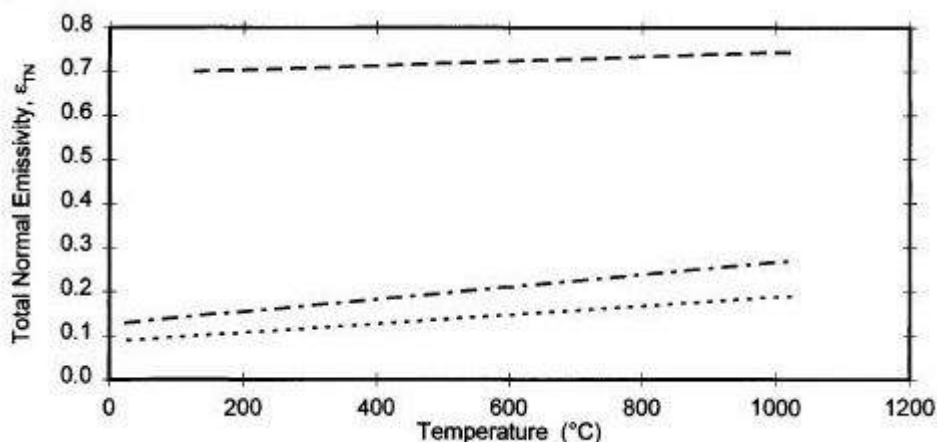
Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται οι θερμικές απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας από τη θερμή επιφάνεια του προς κατεργασία τεμαχίου προς το περιβάλλον. Το μέσω συναγωγής είναι ο αέρας του περιβάλλοντος χώρου και οι απώλειες ακτινοβολίας παρατηρούνται λόγω υψηλών θερμοκρασιών της περιοχής τηγμένου μετάλλου.



Εικόνα 5-6: Τρισδιάστατη απεικόνιση της διάταξης SLM κατεργασίας [30]

Οι απώλειες ακτινοβολίας περιγράφονται ως εξής:  $q_r = \sigma \epsilon (T^4 - T_\infty^4)$  (32)

όπου  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ , η σταθερά Stefan–Boltzmann και  $\epsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής. [36]



Εικόνα 5-7: Τιμές συντελεστή εκπομπής για χάλυθα (316 stainless steel) [36]



Η διακεκομμένη γραμμή είναι για οξειδωμένο χάλυβα, ενώ η αξονική και η διακεκομμένη με τελείες γραμμές αντιστοιχούν σε χάλυβα με κατεργασμένη επιφάνεια.

- **Δυναμικό ιξώδες χάλυβα**

Το δυναμικό ιξώδες του χάλυβα (stainless steel 316) φαίνεται στη στήλη “η” του πίνακα της παρακάτω εικόνας.[37]

**Recommended values for thermophysical properties of  
316 stainless steel**

Temp °C	Density kg m <sup>-3</sup>	Cp JK <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup>	(H <sub>T</sub> -H <sub>25</sub> ) Jg <sup>-1</sup>	λ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	10 <sup>6</sup> a m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	η mPa.s
25	7950	0.47	0	13.4	3.6	
100	7921	0.49	36	15.5	4.0	
200	7880	0.52	85	17.6	4.3	
300	7833	0.54	138	19.4	4.6	
400	7785	0.56	193	21.8	5.0	
500	7735	0.57	250	23.4	5.3	
600	7681	0.59	308	24.5	5.4	
700	7628	0.60	367	25.1	5.5	
800	7575	0.63	429	27.2	5.7	
900	7520	0.64	492	27.9	5.8	
1000	7462	0.66	557	29.1	5.9	
1100	7411	0.67	624	29.3	5.9	
1200	7361	0.70	692	30.9	6.0	
1300	7311	(0.71) <sup>(a)</sup>	763	31.1	6.0	
1385 <sup>(c)</sup>	7269	(0.72) <sup>(a)</sup>	821	-	6.0 <sup>(a)</sup>	
1450 <sup>(c)</sup>	7236 <sup>(a)</sup>	0.73 <sup>(a)</sup>	868 <sup>(a)</sup>	-	6.0 <sup>(a)</sup>	
1450	6881	0.83	1128	28.5	5.0 <sup>(a)</sup>	[8] <sup>(b)</sup>
1500	6842	0.83	1170	29.5	5.2 <sup>(a)</sup>	[7] <sup>(b)</sup>
1600	6765	0.83	1253	30.5 <sup>(a)</sup>	5.4	
Uncertainty	±3%	±5%	±5%	±10%	±10%	±30%

Εικόνα 5-8: Θερμοφυσικές ιδιότητες χάλυβα (316 stainless steel) [37]

Πρέπει να σημειώσουμε ότι ο εκθέτης <sup>(b)</sup> στις τιμές του ιξώδους υποδηλώνει ότι οι τιμές δεν είναι ακριβείς, αλλά είναι προσεγγιστικά υπολογισμένες από τις τιμές του ιξώδους του σιδήρου και του νικελίου.



- **Επιφανειακή τάση**

Η επιφανειακή τάση περιγράφεται από τη σχέση που περιγράφεται και προηγουμένως:

$$\gamma = 1840 - 0.4(T - 1823) - 0.056T \ln(1 + e^{\frac{28798}{T} - 8.5647} (0.68\%S)) [mNm^{-1}] \quad (33) \quad [36]$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της επιφανειακής τάσης όλων των χαλύβων σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και την κατά βάρος περιεκτικότητα σε θείο. Τα αποτελέσματα της παραπάνω υπολογιστικής σχέσης έχουν έως 3% απόκλιση με τα πραγματικά, πειραματικά δεδομένα.

- **Δείκτης θερμικής αγωγιμότητας για την πούδρα**

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της πούδρας βρέθηκε από τον πίνακα της παρακάτω εικόνας.[38]

Type of insulation	Effective $k$ , mW/m · °C
1. Foams, powders, and fibers, unevacuated	7–36
2. Powders, evacuated	0.9–6
3. Glass fibers, evacuated	0.6–3
4. Opacified powders, evacuated	0.3–1
5. Multilayer insulations, evacuated	0.015–0.06

Εικόνα 5-9: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για διάφορους τύπους μονώσεων[38]

Οι δείκτες θερμικής αγωγιμότητας της παραπάνω εικόνας εφαρμόζονται για ένα εύρος θερμοκρασιών από 0°C έως 200°C. Για υψηλότερες θερμοκρασίες η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται ελαφρώς.

- **Δείκτης θερμικής αγωγιμότητας χάλυβα**

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

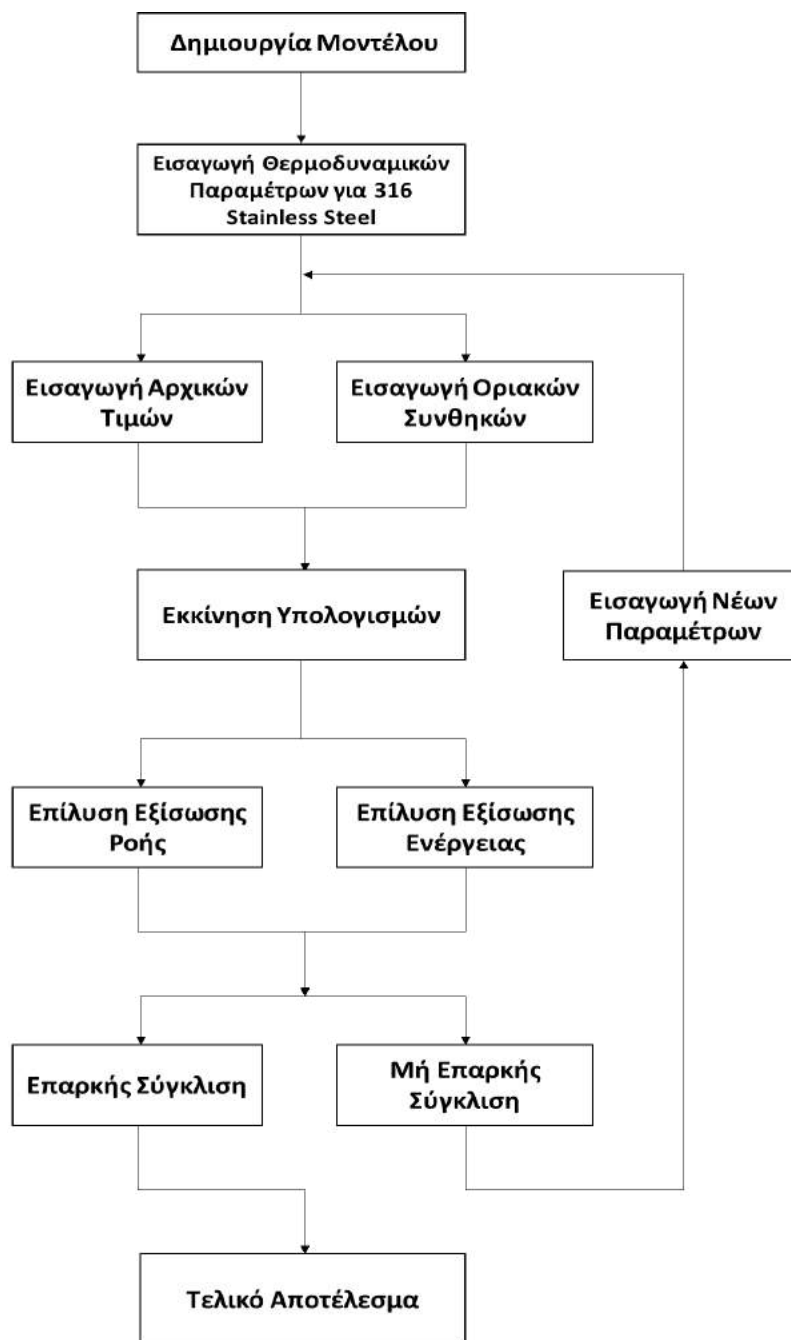
$$\left\{ \begin{array}{l} k = 9.248 \cdot 10^{-2} + 1.571 \cdot 10^{-4} T \text{ (στερεά φάση)} \\ k = 1.241 \cdot 10^{-1} + 3.279 \cdot 10^{-5} T \text{ (υγρή φάση)} \end{array} \right\} (34)[38]$$

Η θερμική αγωγιμότητα  $k$  είναι σε μονάδες W/mK και η θερμοκρασία  $T$  είναι σε μονάδες Κ. Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα έχει μικρότερη επιρροή από τη θερμοκρασία στην περιοχή της υγρής φάσης.

Η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια για χάλυβες για τους οποίους δεν έχουμε πειραματικά δεδομένα μέτρησης της θερμικής τους αγωγιμότητας.



Στο παρακάτω διάγραμμα ροής απεικονίζεται η λογική πορεία για την υλοποίηση των υπολογισμών στο υπολογιστικό κομμάτι της εργασίας:



Διάγραμμα 5-7: Διάγραμμα Ροής Υπολογιστικής Μεθόδου





## 6. Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η επισκόπηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εκτέλεση του υπολογιστικού μέρους της εργασίας. Το υπολογιστικό μέρος, το οποίο περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, εκτελέστηκε για διάφορες αρχικές συνθήκες και διαφορετικές παραμέτρους, δημιουργώντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αρχικά παρατίθενται αυτοτελή και εν συνεχεία γίνεται συγκριτική μελέτη με πειραματικά αποτελέσματα παρόμοιων ερευνών.

Η σύγκριση και η μελέτη των αποτελεσμάτων γίνεται βάσει της κατανομής της θερμοκρασίας τόσο στην επιφάνεια όσο και εσωτερικά του δοκιμίου. Παρουσιάζονται επίσης οι κατανομές διάφορων ακόμα παραμέτρων όπως είναι η κινητική ενέργεια, η πίεση που δημιουργείται από την απότομη θερμοκρασιακή αλλαγή, καθώς επίσης και η ταχύτητα της ροής στην περιοχή του τήγματος. Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για να διαπιστωθεί η όχι η δημιουργία του φαινομένου Keyhole είναι εάν η περιοχή τηγμένου μετάλλου έχει ξεπεράσει την θερμοκρασία ατμοποίησης του υλικού, δηλαδή τους 3273 K.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αφορούν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση αφορά σε δοκιμές σε διδιάστατο δοκίμιο το οποίο απαιτεί πολύ λιγότερο υπολογιστικό χρόνο. Η ανάλυση αυτή, αν και υστερεί σε ακρίβεια σε σχέση με το τρισδιάστατο δοκίμιο, πετυχαίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ελάχιστο χρόνο.

Το δεύτερο σκέλος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν αφορούν στην αποτυχία δημιουργίας του φαινομένου keyhole. Συγκεκριμένα στην τρισδιάστατη ανάλυση που έλαβε χώρα, για μικρή ισχύ της δέσμης laser παρατηρούμε ότι η τηγμένη περιοχή δεν εμφανίζεται σε μορφή κλειδαρότρυπας. Αυτό συμβαίνει διότι δεν αναπτύσσονται αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες ώστε να ατμοποιηθεί το μέταλλο για την εμφάνιση του φαινομένου.

Το τρίτο μέρος των αποτελεσμάτων αφορά στην επιτυχημένη τρισδιάστατη απεικόνιση του φαινομένου keyhole. Αυξάνοντας την ισχύ της δέσμης της παραπάνω περίπτωσης, παρατηρείται σταδιακά η δημιουργία της μορφής της κλειδαρότρυπας. Παρατηρούμε ότι με μεγάλη ισχύ δέσμης το φαινόμενο keyhole εμφανίζεται με διάφορες μορφές για τις διαφορετικές ταχύτητες που δοκιμάζονται.

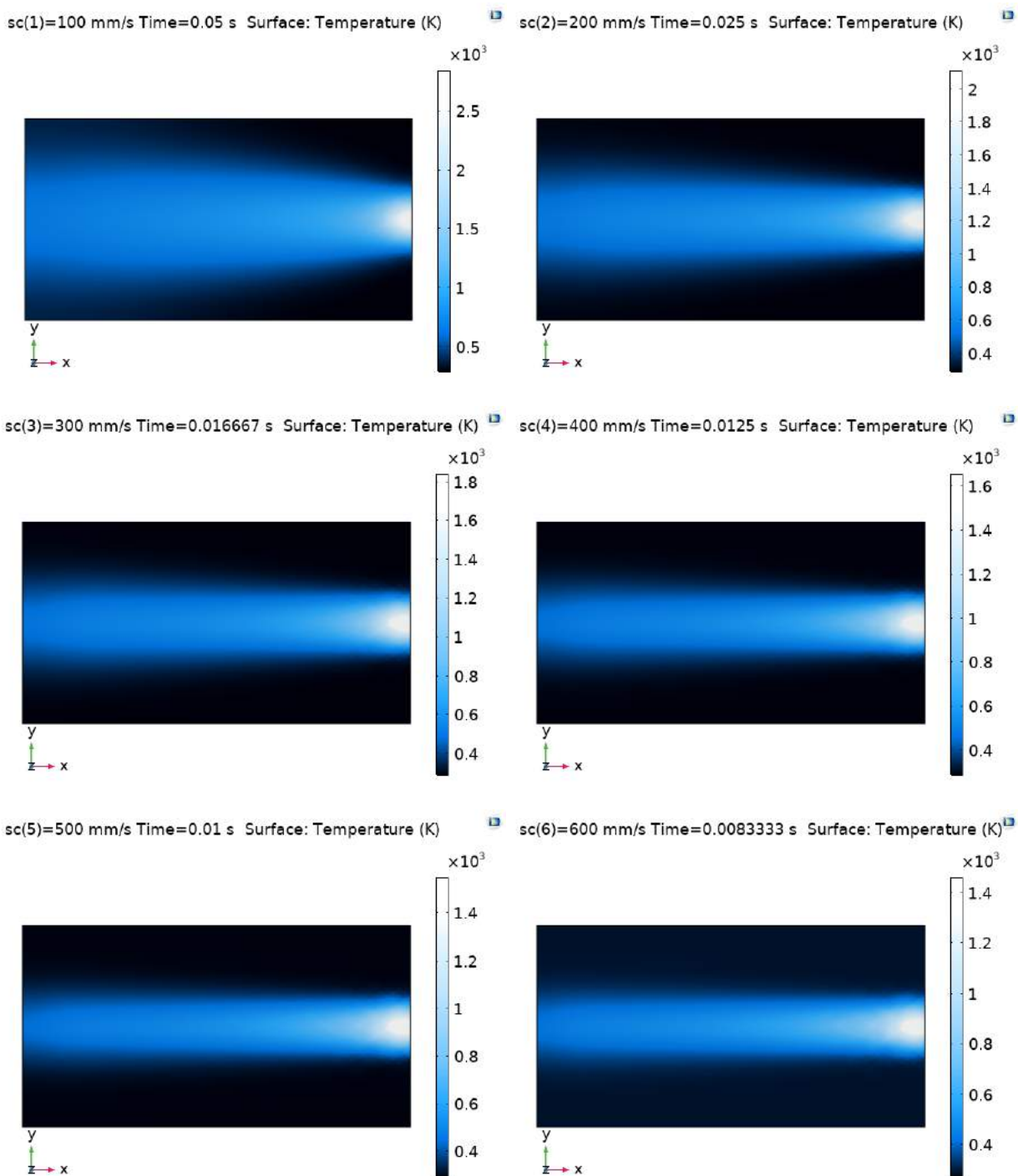
Τέλος γίνεται μία συγκριτική μελέτη με παλαιότερες αντίστοιχες έρευνες για την επικύρωση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει συγκρίνονται με αποτελέσματα πειραματικών διαδικασιών, ώστε να διαπιστωθεί εάν τελικά το πρόγραμμα απεικονίζει ρεαλιστικά την εκάστοτε περίπτωση.



### 6.1. 2D Μοντέλο

Παρακάτω απεικονίζεται η κατανομή θερμοκρασίας στην επιφάνεια του δοκιμίου για διάφορες περιπτώσεις ισχύος και ταχύτητας πρόωσης για δοκίμιο μήκους 5mm.

**Για ισχύ δέσμης laser 100 Watt:**

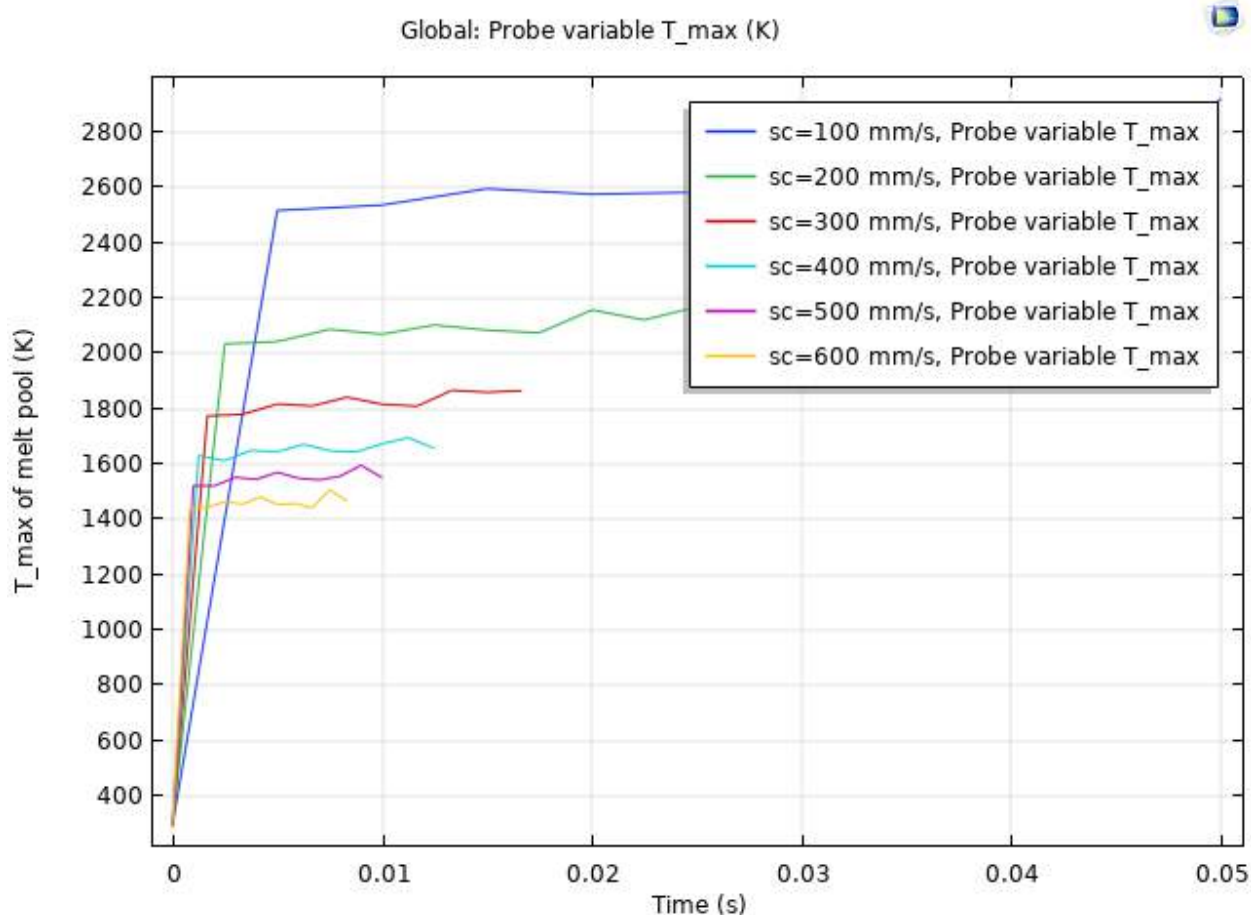


Εικόνα 6-1: Θερμοκρασιακή Κατανομή για διάφορες ταχύτητες σάρωσης για ισχύ 100 Watt



Παρατηρούμε απο τις παραπάνω απεικονίσεις ότι καθώς η ταχύτητα με την οποία η δέσμη laser σαρώνει το δοκίμιο, αυξάνεται η θερμοκρασία. Η πτώση της θερμοκρασίας είναι αναμενόμενη καθώς διατηρώντας σταθερή την ισχύ της δέσμης, με μεγαλύτερη ταχύτητα μειώνουμε και τον χρόνο που απαιτείται για την συνολική σάρωση. Επομένως σε μικρότερο χρόνο και με ίδια ισχύ το δοκίμιο φτάνει σε χαμηλότερες τελικές θερμοκρασίες.

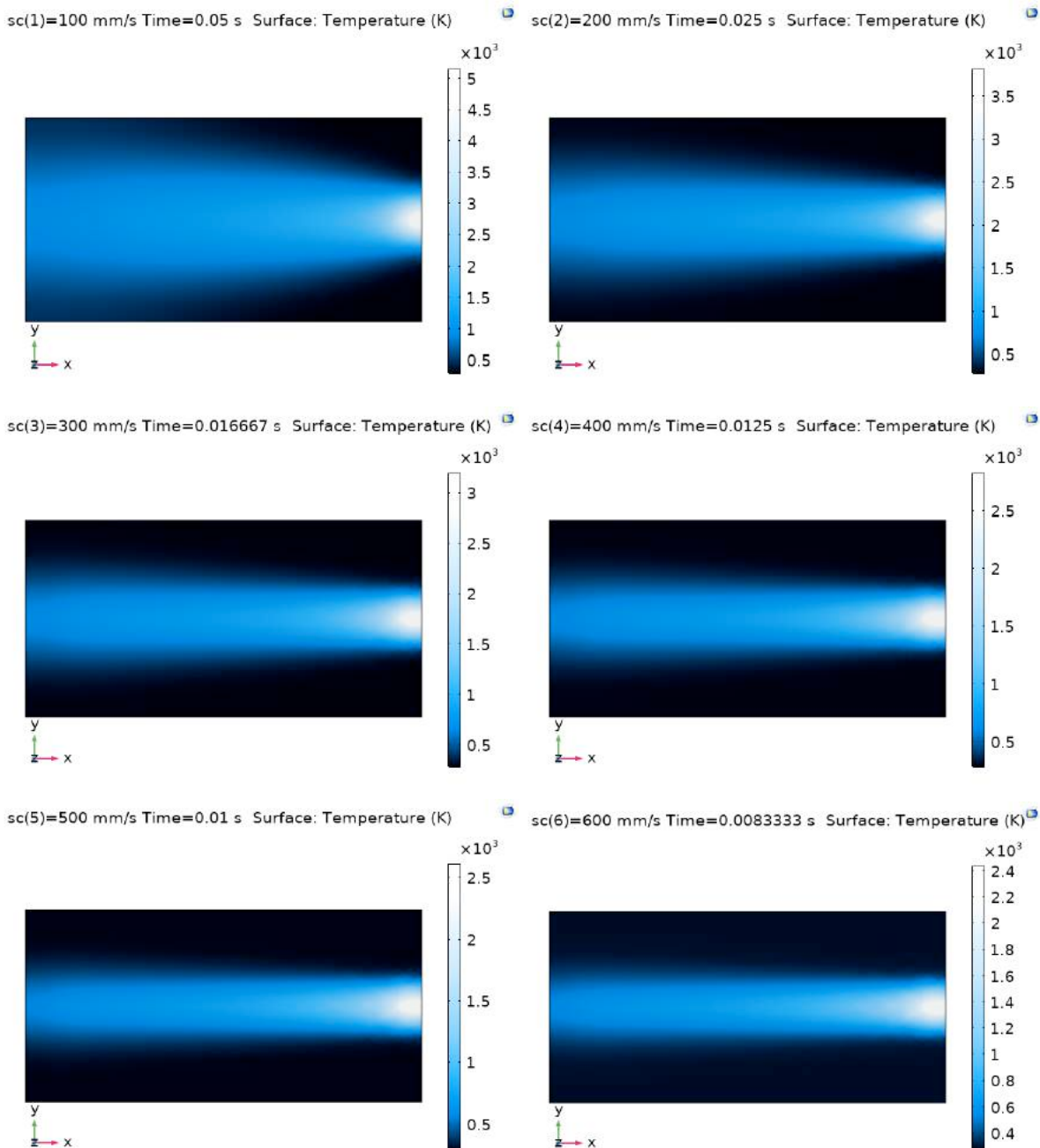
Επίσης στην συνέχεια φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του δοκιμίου για όλες τις ταχύτητες σάρωσης συγκριτικά, συναρτήσε του χρόνου. Το διάγραμμα αποτελεί μία γραφική απεικόνιση του παραπάνω εποπτικού αποτελέσματος. Παρατηρούμε ότι οι τελικές θερμοκρασίες λοιπόν είναι αντιστρόφως ανάλογες της ταχύτητας σάρωσης για την δεδομένη ισχύ της δέσμης.



Διάγραμμα 6-1: Μεταβολή Θερμοκρασίας συναρτήσε του χρόνου, για διάφορες ταχύτητες σάρωσης



**Για ισχύ δέσμης laser 200 Watt:**

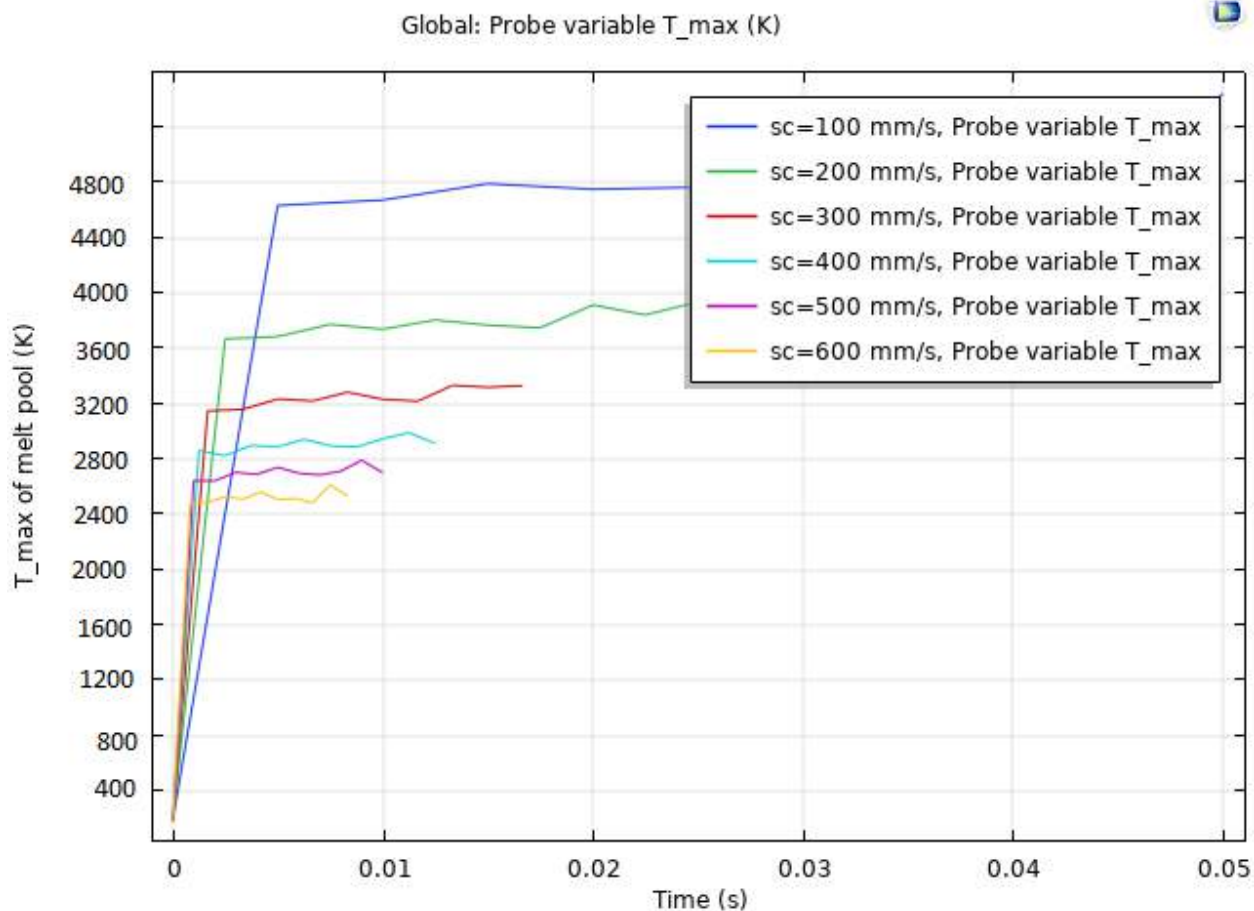


Εικόνα 6-2: Θερμοκρασιακή Κατανομή για διάφορες ταχύτητες σάρωσης για ισχύ 200 Watt



Με την αύξηση της ισχύος της δέσμης laser παρατηρούμε άνοδο των τελικών θερμοκρασιών στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η άνοδος αυτή δικαιολογείται και είναι αναμενόμενη διότι στον ίδιο χρόνο σάρωσης (αφού οι έξι περιπτώσεις που μελετάμε είναι για την ίδια ταχύτητα σάρωσης) παρέχουμε στο δοκίμιο μεγαλύτερα ποσά ενέργειας.

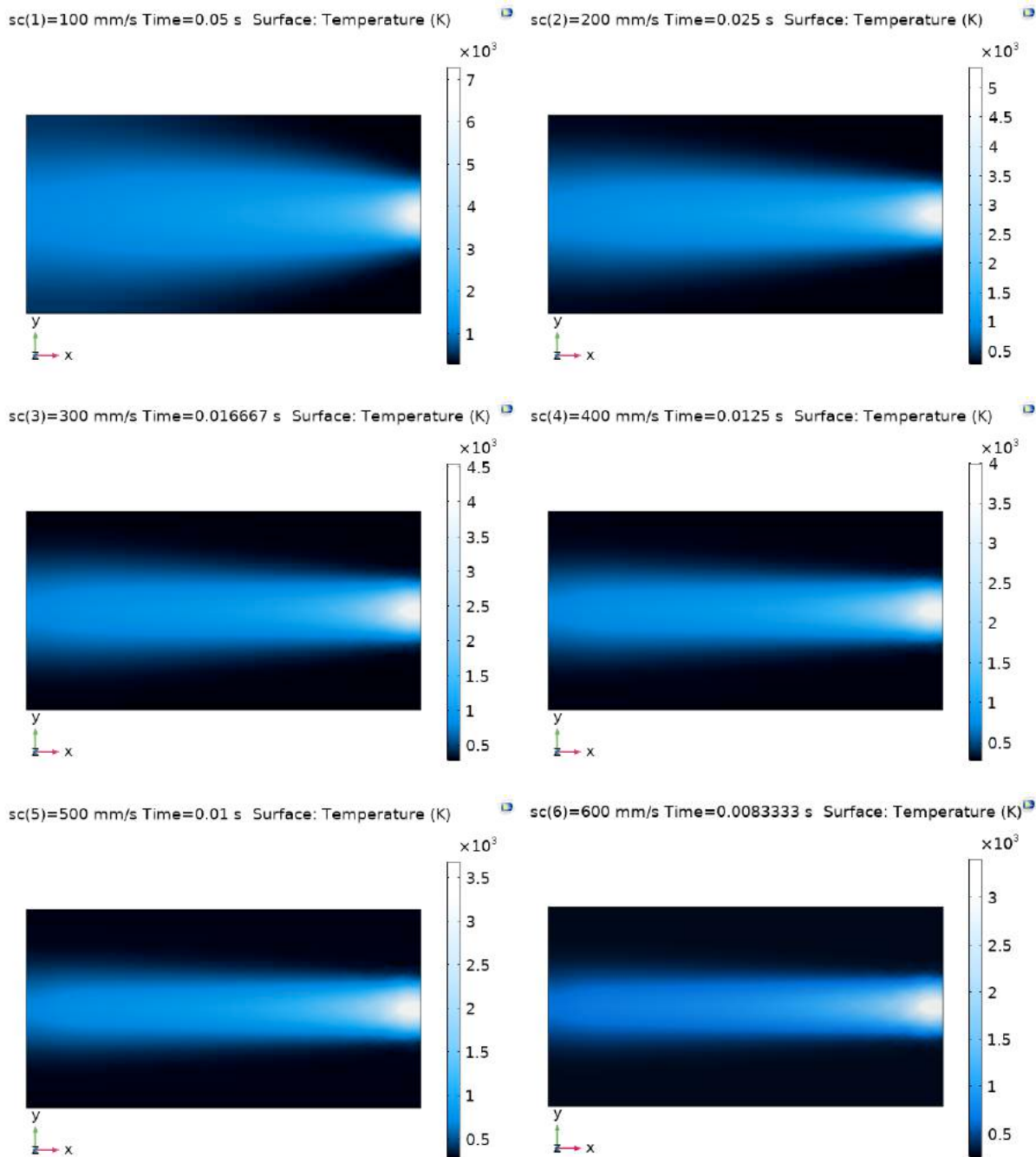
Στο παρακάτω διάγραμμα, αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση, παρουσιάζονται συνολικά οι κατανομές των θερμοκρασιών και για τις έξι περιπτώσεις. Παρατηρούμε πως και πάλι με την αύξηση της ταχύτητας η θερμοκρασία μειώνεται αναλογικά.



Διάγραμμα 6-2: Μεταβολή Θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες ταχύτητες σάρωσης



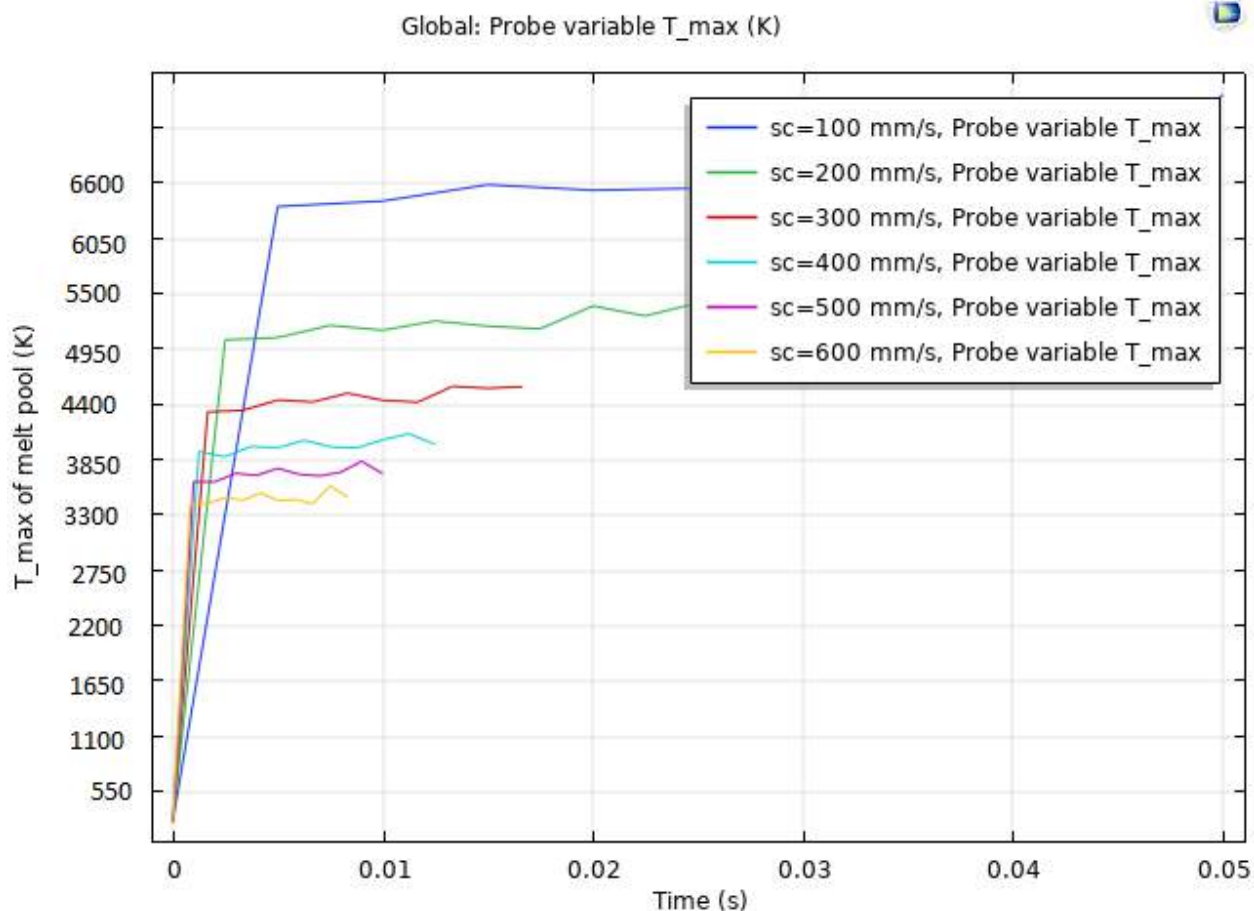
**Για ισχύ δέσμης laser 300 Watt:**



Εικόνα 6-3: Θερμοκρασιακή Κατανομή για διάφορες ταχύτητες σάρωσης για ισχύ 300 Watt



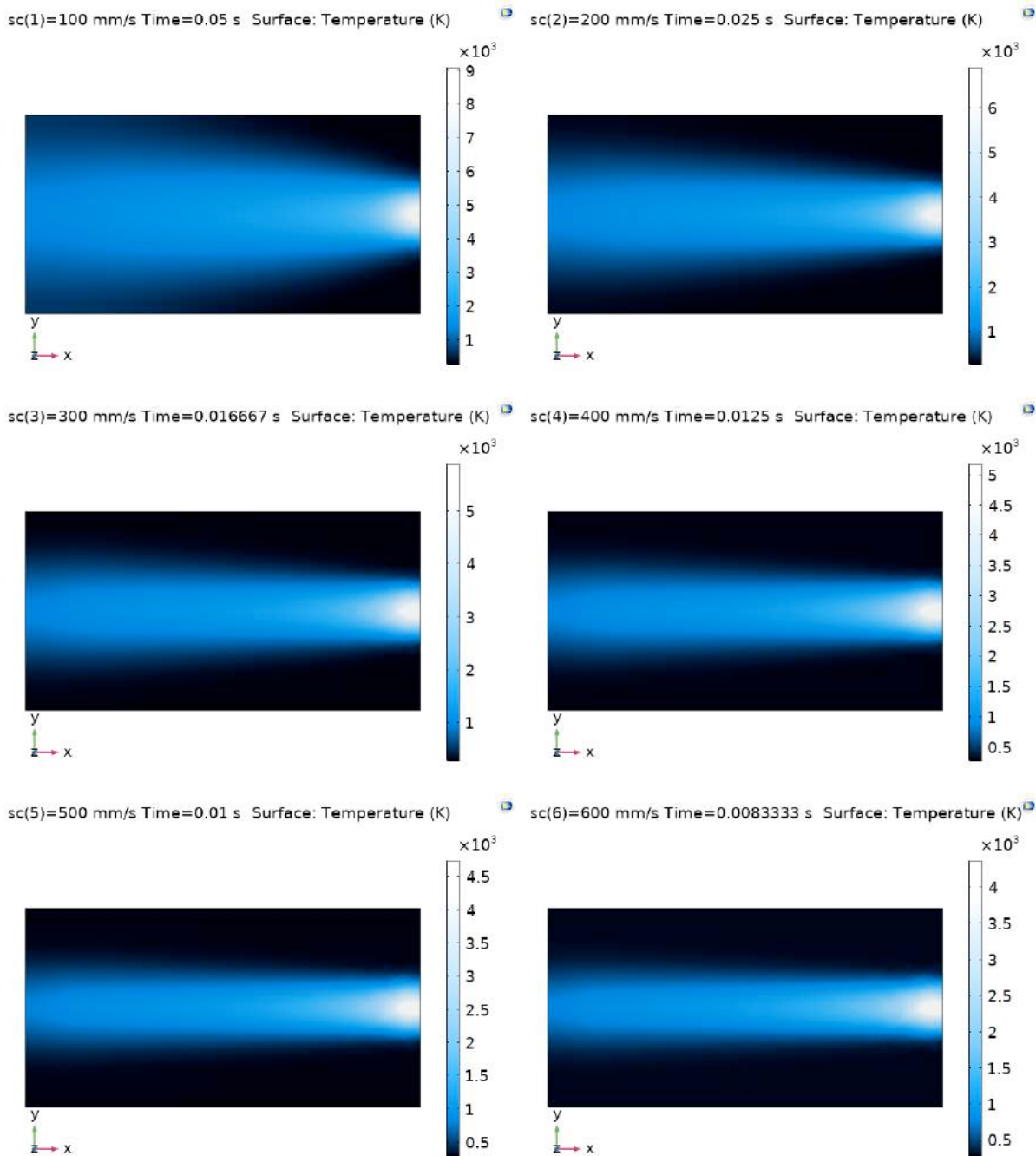
Στα παραπάνω διαγράμματα επαναλαμβάνεται η αντιστρόφως ανάλογη πορεία της θερμοκρασίας με την ταχύτητα σάρωσης. Αυτό που έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε είναι ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες ανεβαίνουν αναλογικά με την ισχύ της δέσμης. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι με διπλασιασμό της ισχύος στην δέσμη για την περίπτωση των 200 Watt έχουμε περίπου διπλασιασμό της μέγιστης θερμοκρασίας. Το παραπάνω επαληθεύεται και σε αυτή την περίπτωση των 300 Watt όπου οι τελικές θερμοκρασίες έχουν σχεδόν τριπλασιαστεί. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι την θερμοκρασία και την ισχύ τις συνδέει μια σχέση τάξεως πρώτου βαθμού.



Διάγραμμα 6-3: Μεταβολή θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες ταχύτητες σάρωσης



**Για ισχύ δέσμης laser 400 Watt:**

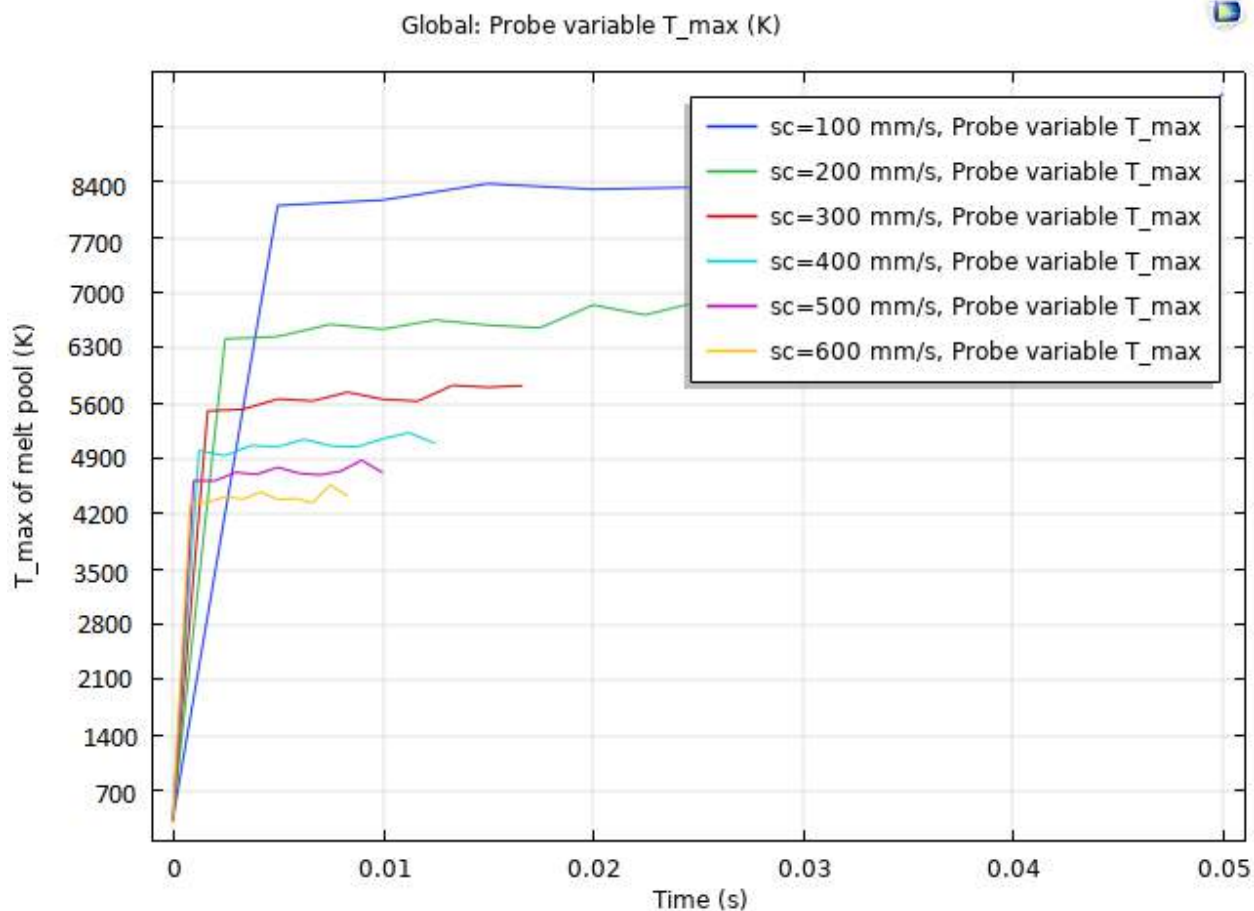


Εικόνα 6-4: Θερμοκρασιακή Κατανομή για διάφορες ταχύτητες σάρωσης για ισχύ 400 Watt





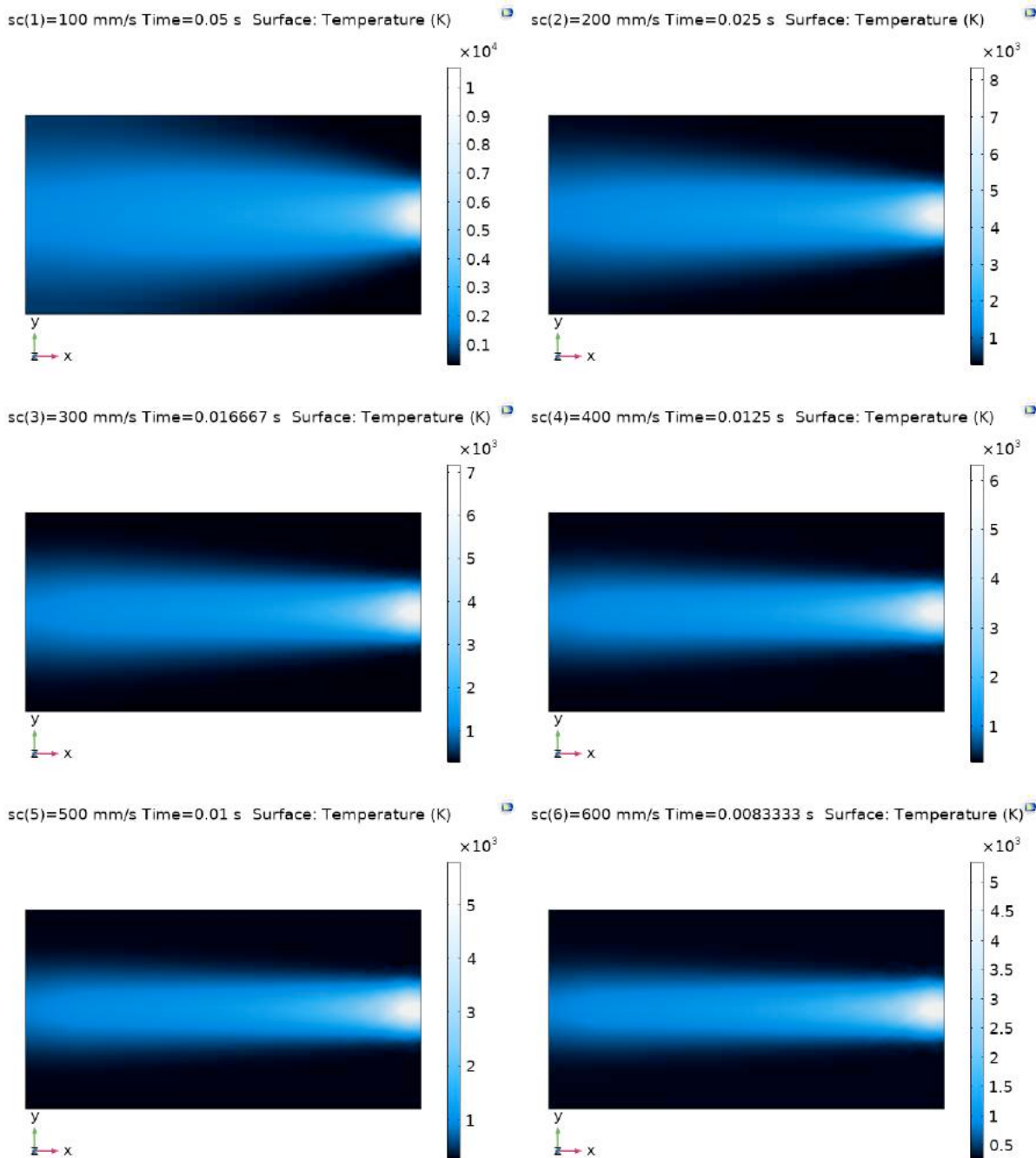
Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται και τα διαγράμματα για την ισχύ των 400 Watt τα οποία επιβεβαιώνουν για ακόμα μία φορά την υπόθεση πως η θερμοκρασία είναι ανάλογη της ισχύος και αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας σάρωσης της δέσμης laser.



Διάγραμμα 6-4 : Μεταβολή Θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες ταχύτητες σάρωσης



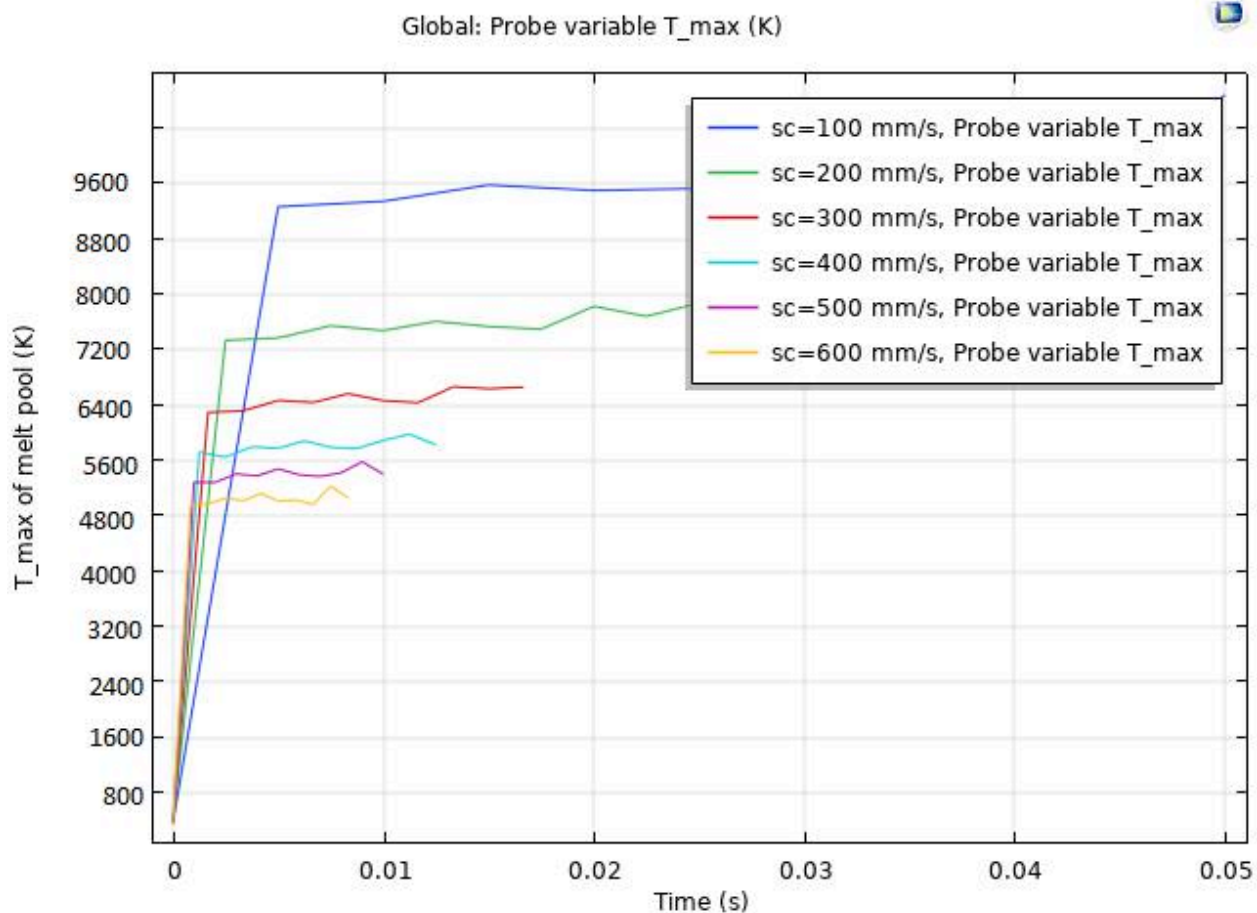
**Για ισχύ δέσμης laser 500 Watt:**



Εικόνα 6-5: Θερμοκρασιακή Κατανομή για διάφορες ταχύτητες σάρωσης για ισχύ 500 Watt



Τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την ισχύ των 500 Watt παραπάνω. Η αύξηση της ισχύος έχει προκαλέσει άνοδο της μέγιστης θερμοκρασίας έως τους 1000 K σχεδόν, για την περίπτωση της αργής σάρωσης. Τέτοιες θερμοκρασίες θεωρούνται πολύ υψηλές για την εν λόγω διαδικασία επομένως στην συνέχεια στο τρισδιάστατο μοντέλο δεν θα μελετηθούν περιπτώσεις όπου η χρησιμοποιούμενη ισχύς θα ξεπερνάει τα 400 Watt.

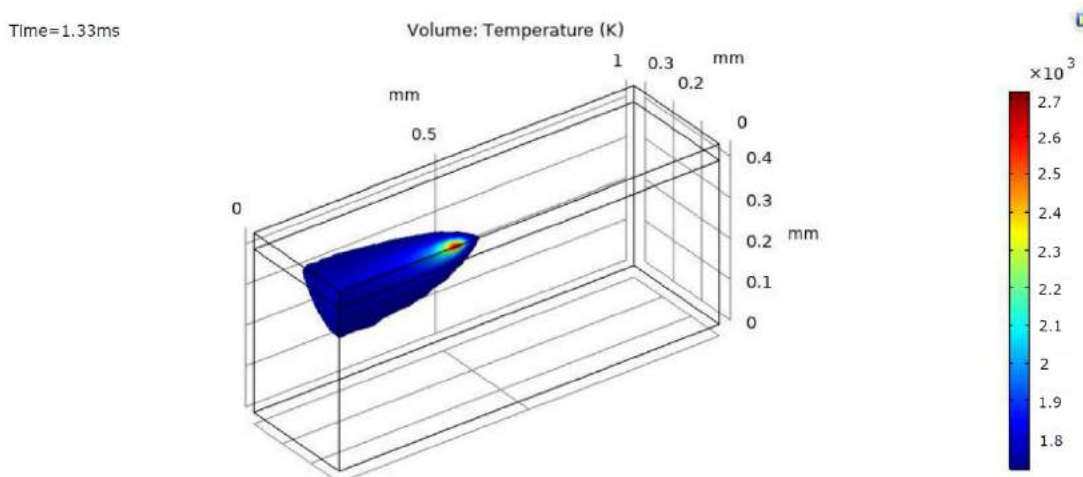


Διάγραμμα 6-5: Μεταβολή θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες ταχύτητες σάρωσης

## 6.2. 3D Μοντέλο (χωρίς εμφάνιση Keyhole)

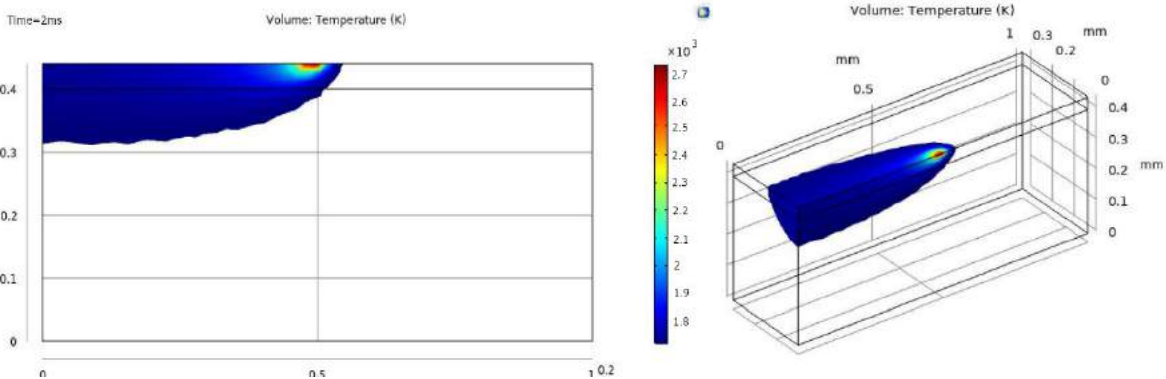
Στο παρόν κεφάλαιο έγινε η πρώτη απόπειρα τρισδιάστατης ανάλυσης. Έπειτα από την διδιάστατη μελέτη που έγινε στο προηγούμενο τμήμα της εργασίας, έγιναν κατανοητά τα όρια στα οποία έπρεπε να λάβει χώρα η μελέτη και ποιές αρχικές συνθήκες έπρεπε να χρησιμοποιηθούν. Η τρισδιάστατη προσομοίωση έγινε πρώτα για ισχύ δέσμης laser ίση με 100 Watt και ταχύτητα σάρωσης 250 mm/s. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις εξής μεταβλητές: την κατανομή της θερμοκρασίας στο δοκίμιο κατά την εξέλιξη της κατεργασίας, την κινητική ενέργεια τυρβώδους ροής και την απόσβεση κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής. Στην δοκιμή με τις συγκεκριμένες συνθήκες τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν υποδεικνύουν την δημιουργία της μορφής του keyhole. Αυτό συνέβη διότι η ισχύς του laser δε δημιουργεί θερμοκρασία μεγαλύτερη των 3286K ώστε να ατμοποιηθεί το μέταλλο.

### Κατανομή Θερμοκρασίας για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s



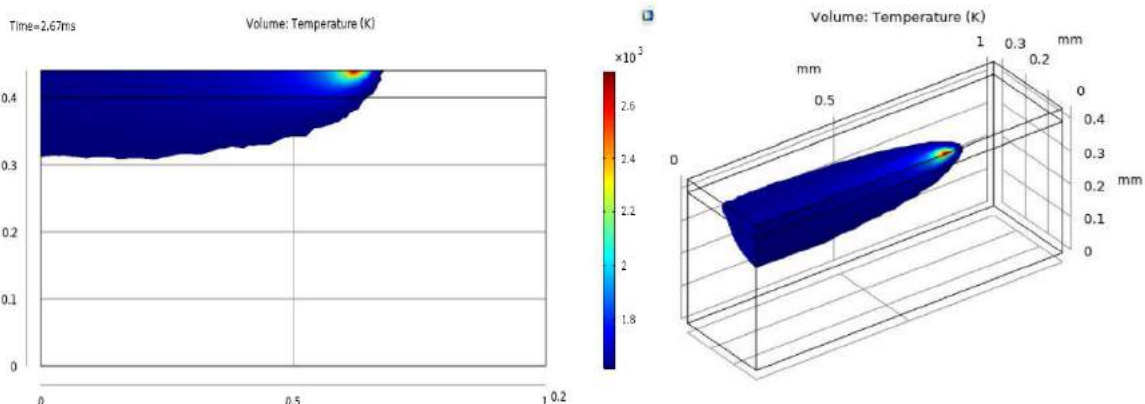
Εικόνα 6-6: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s τη χρονική στιγμή 1.33ms

Στις παραπάνω εικόνες βλέπουμε τη θερμοκρασιακή κατανομή του δοκιμίου σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Η δέσμη laser καθώς σαρώνει το δοκίμιο από αριστερά προς τα δεξιά, όπως αυτό απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα, οδηγεί σε άνοδο της θερμοκρασίας. Η περιοχή προσβολής της ακτίνας laser τη χρονική στιγμή της εικόνας έχει τις πιο αυξημένες θερμοκρασίες όπως υποδεικνύει το κίτρινο και το κόκκινο χρώμα στην περιοχή αυτή. Πρέπει ακόμα να αναφέρουμε ότι καθώς η δέσμη laser προσεγγίζει ένα σημείο, αυτό έχει ήδη προθερμανθεί δια αγωγής από τα γειτονικά του σημεία. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από την παραπάνω εικόνα που φαίνεται μια μικρή περιοχή, δεξιά του σημείου προσβολής της ακτίνας laser, να έχει αυξημένες θερμοκρασίες. Την χρονική στιγμή των παραπάνω εικόνων η διεργασία έχει λάβει χώρα κατά το 1/3 της συνολικής διάρκειας έχοντας διανύσει ήδη 0.33 mm του δοκιμίου. Η περιοχή που έχει θερμανθεί αντιστοιχεί στο μήκος του δοκιμίου που έχει προσβληθεί ενώ το υπόλοιπο δοκίμιο δεν φαίνεται να έχει υποστεί θερμοκρασιακή μεταβολή.



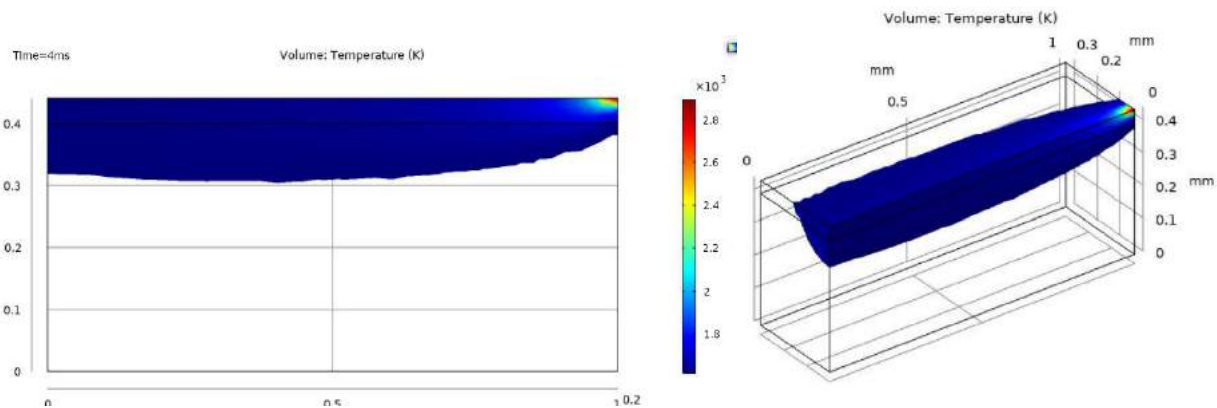
Εικόνα 6-7: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s τη χρονική στιγμή 2.00 ms

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και κατά την χρονική στιγμή 2 ms όπου η διεργασία βρίσκεται ακριβώς στο μισό. Στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο γίνεται ακόμα πιο σαφές το προηγούμενο συμπέρασμα ότι τα σημεία τα οποία δεν έχουν προσβληθεί ακόμα από την ακτίνα θερμαίνονται λόγω αγωγής. Επίσης παρατηρούμε ότι και σε αυτή την χρονική στιγμή δεν υπάρχει αύξηση του βάθους για την δημιουργία του φαινομένου keyhole.



Εικόνα 6-8: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s τη χρονική στιγμή 2.67 ms

Ακόμα ένα στιγμιότυπο από τα 2/3 της διάρκειας δηλαδή την χρονική στιγμή 2.67 ms.



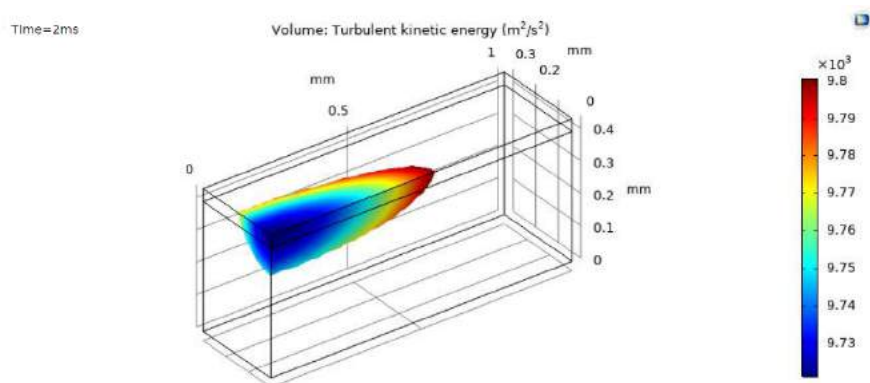
Εικόνα 6-9: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s τη χρονική στιγμή 4 ms



Τέλος στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το πέρας της διεργασίας όπου μόλις έχει σταματήσει η προσβολή από την ακτίνα laser. Η θερμη περιοχή είναι συγκεντρωμένη στο άκρο του δοκιμίου ενώ όλη η υπόλοιπη έχει αρχίσει να επανέρχεται στην αρχική θερμοκρασία. Ούτε στο τελευταίο στιγμιότυπο παρατηρείται δημιουργία της μορφής keyhole παρα το γεγονός ότι επιτυγχάνονται οι μεγαλύτερες τιμές της θερμοκρασίας καθώς η μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται ανέρχεται περίπου στους 3000K.

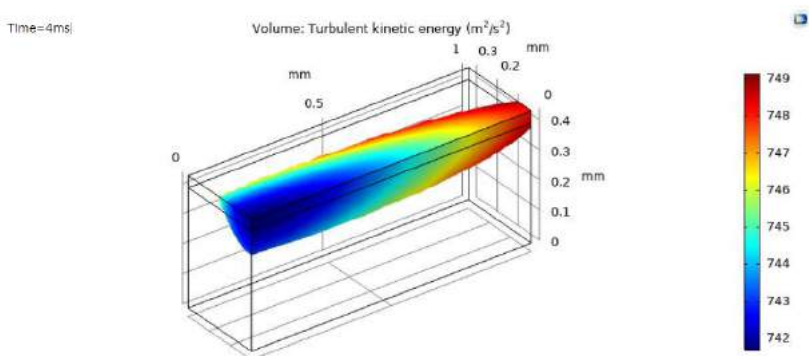
Ενδεικτικά παρουσιάζονται και τα διαγράμματα κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής και της απόσβεσης κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής.

### Κατανομή Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s



Εικόνα 6-10: Κατανομή κινητικής ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s τη χρονική στιγμή 2.00 ms

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το στιγμιότυπο στο μέσο της διεργασίας όπου η κινητική ενέργεια μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο προσβολής της δέσμης.



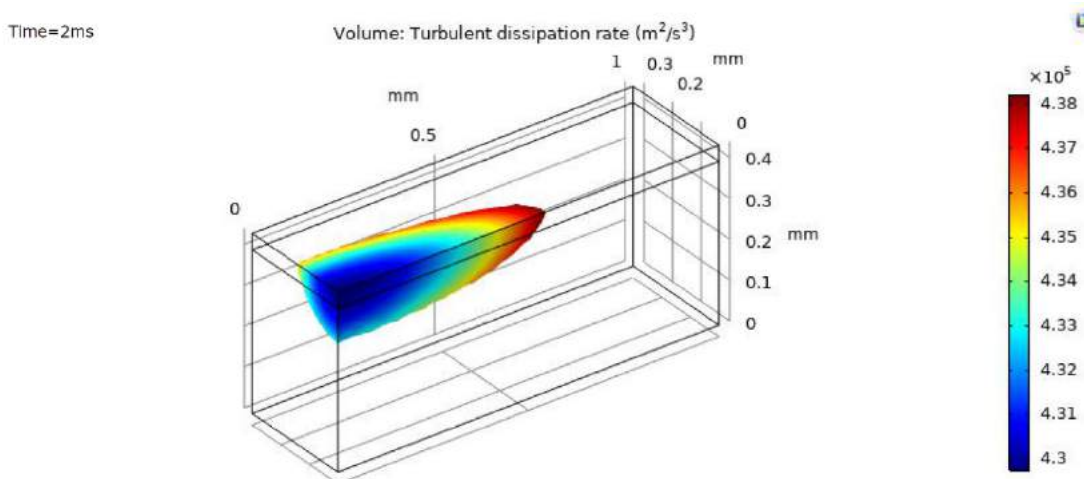
Εικόνα 6-11: Κατανομή κινητικής ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s τη χρονική στιγμή 4 ms

Με το πέρας της διεργασίας η κατανομή της κινητικής ενέργειας έχει μεγαλύτερη εξάπλωση όπως ήταν αναμενόμενο. Το σημείο που βρισκόταν τελευταία η ακτίνα έχει την μεγαλύτερη τιμή και όσο απομακρυνόμαστε αυτή μειώνεται. Συγκρίνοντας με το προηγούμενο στιγμιότυπο παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές που επιτυγχάνονται είναι μικρότερες στο τέλος. Αυτό μας



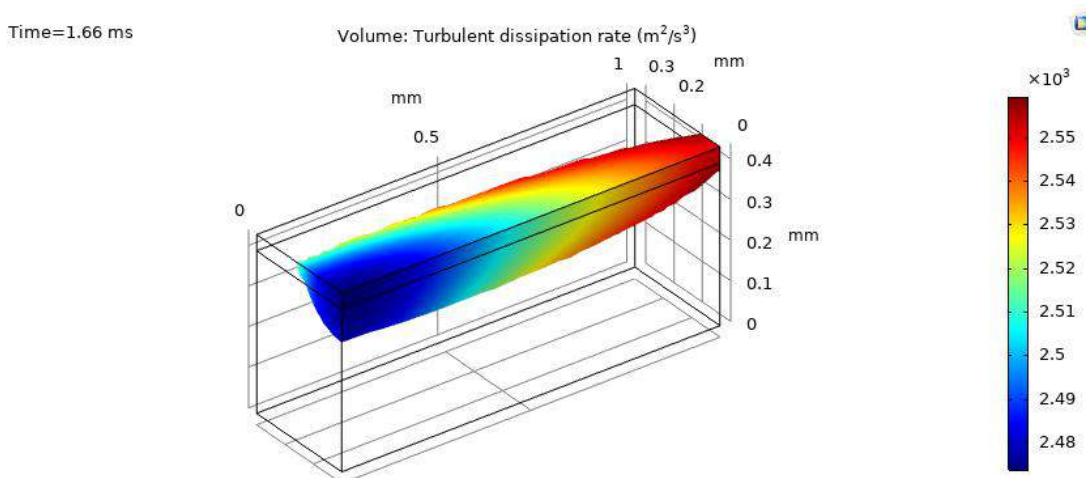
οδηγεί στο συμπέρασμα πως με μεγαλύτερη περιοχή τηγμένου μετάλλου το ρευστό κινείται πιο ομαλά όποτε και έχει μικρότερη κινητική ενέργεια.

### Κατανομή Απόσβεσης Κινητικής Ενέργειας Τυρβώδους Ροής για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s



Εικόνα 6-12: Απόσβεση Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s τη χρονική στιγμή 2.00 ms

Στο προηγούμενο στιγμιότυπο απεικονίζεται η απόσβεση κινητικής ενέργειας όταν η ακτίνα laser έχει διανύσει το μισό δοκίμιο. Εν συνεχεία απεικονίζεται και το στιγμιότυπο με το πέρας της διεργασίας. Παρατηρούμε ότι τα δύο στιγμιότυπα έχουν παρόμοια μορφή με το δεύτερο να καταλαμβάνει όλο το μήκος του δοκιμίου. Στο πρώτο επιτυγχάνονται μεγαλύτερες τιμές απόσβεσης της κινητικής ενέργειας, της τάξεως  $10^5$  συγκριτικά με το δεύτερο που είναι της τάξεως  $10^3$ .

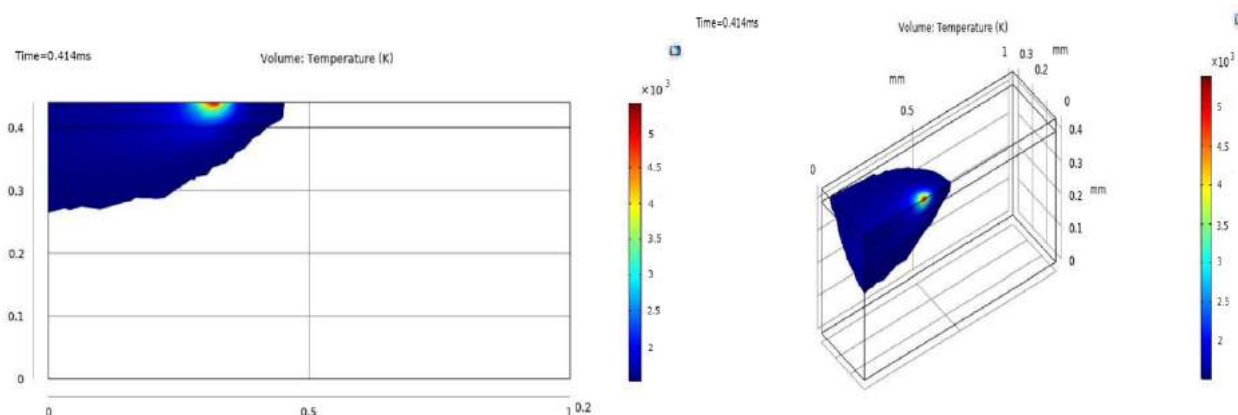


Εικόνα 6-13 :Απόσβεση Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 100W και Ταχύτητα Σάρωσης 250mm/s τη χρονική στιγμή 4.00 ms

### 6.3. 3D Μοντέλο (με εμφάνιση Keyhole)

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρατίθενται στιγμιότυπα από το τελικό μοντέλο του λογισμικού, στο οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο Keyhole. Δοκιμές έγιναν για ισχύ δέσμης laser 400W και για ταχύτητες σάρωσης 800mm/s, 1000mm/s και 1200mm/s. Τα στιγμιότυπα αφορούν στην κατανομή της θερμοκρασίας στο δοκίμιο κατά την εξέλιξη της κατεργασίας, στην ταχύτητα στην περιοχή τηγμένου μετάλλου, στην κινητική ενέργεια τυρβώδους ροής, στην απόσβεση κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής και στην κατανομή πιέσεων του δοκιμίου. Στιγμιότυπα τραβήχτηκαν για αρχικά στάδια της κατεργασίας, για μεσαία και τελικά, ώστε να παρέχεται ολοκληρωμένη εικόνα εξέλιξης του φαινομένου. Η συνολική διάρκεια της κατεργασίας είναι 1.250 ms, 1 ms και 0.833 ms και τα στιγμιότυπα είναι για το 1/3 συνολικού χρόνου κατεργασίας, το 1/2 συνολικού χρόνου, τα 2/3 συνολικού χρόνου και το πέρας της διεργασίας.

#### **Κατανομή Θερμοκρασίας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s**

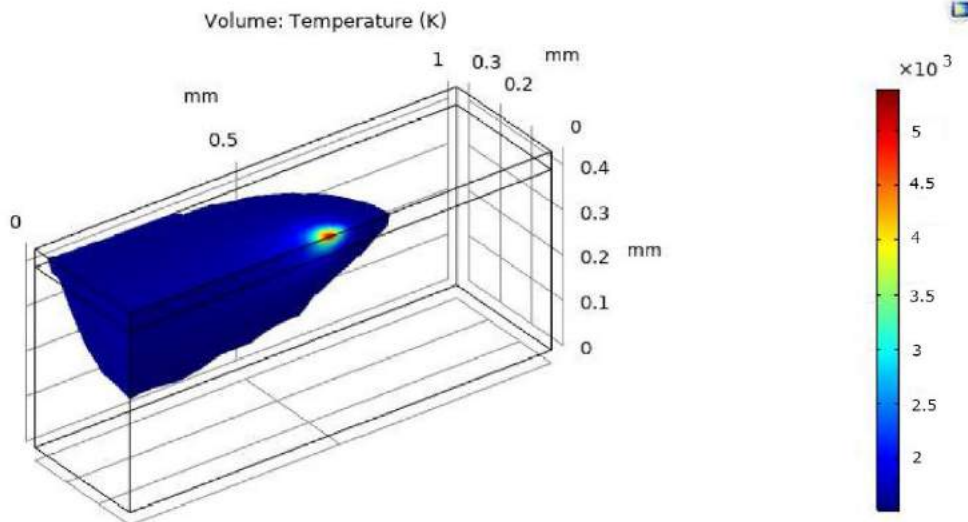


Εικόνα 6-14: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 0.414ms

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τη θερμοκρασιακή κατανομή του δοκιμίου σε τρισδιάστατη και δισδιάστατη απεικόνιση. Η δέσμη laser σαρώνει το δοκίμιο από αριστερά προς τα δεξιά όπως αυτό απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα. Παρατηρούμε ότι όλη η σαρωμένη περιοχή έχει αυξημένη θερμοκρασία της τάξεως του  $10^3$ K. Η περιοχή προσβολής της ακτίνας laser τη χρονική στιγμή της εικόνας έχει αυξημένες θερμοκρασίες όπως υποδεικνύει το κίτρινο και το κόκκινο χρώμα στην περιοχή αυτή. Στις θερμοκρασίες άνω των 3286K έχουμε ατμοποίηση του μετάλλου. Πρέπει ακόμα να αναφέρουμε ότι καθώς η δέσμη laser προσεγγίζει ένα σημείο, αυτό έχει ήδη προθερμανθεί δια αγωγής από τα γειτονικά του σημεία. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από την παραπάνω εικόνα που φαίνεται μια μικρή περιοχή, δεξιά του σημείου προσβολής της ακτίνας laser, να έχει αυξημένες θερμοκρασίες.

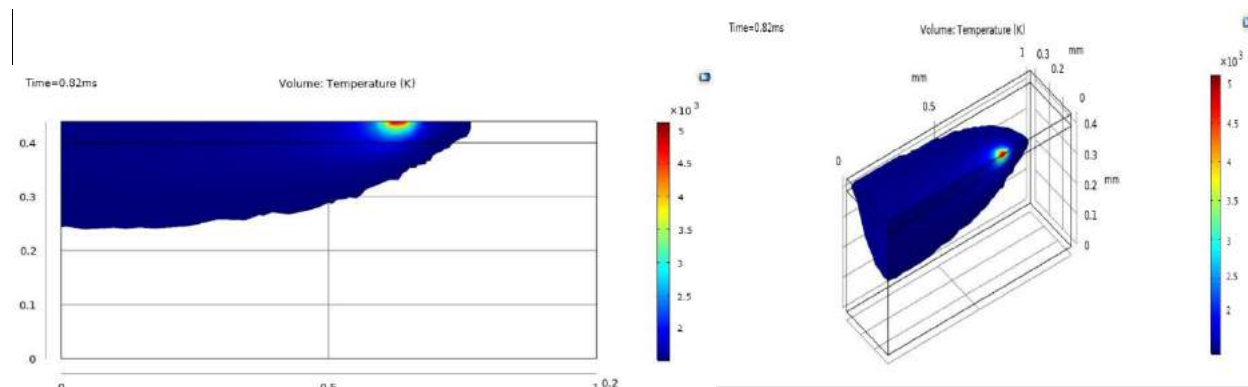


Time=0.625ms



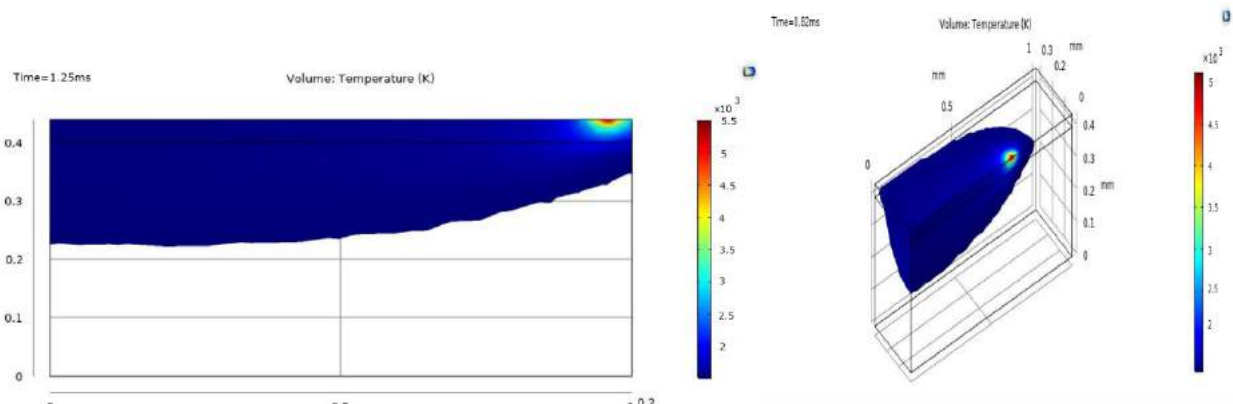
Εικόνα 6-15: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 0.625ms

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο κατά τη χρονική στιγμή 0.625ms, δηλαδή τη μέση (χρονικά) της σάρωσης. Παρατηρούμε ότι το σημείο προσβολής της ακτίνας laser βρίσκεται ακριβώς στη μέση (0.5mm) της διαδρομής, κάτι το οποίο είναι λογικού δεδομένης της σταθερής ταχύτητας σάρωσης. Βλέπουμε επίσης ότι το βάθος της περιοχής θερμοκρασιών τήγματος έχει αυξηθεί.



Εικόνα 6-16: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 0.82ms

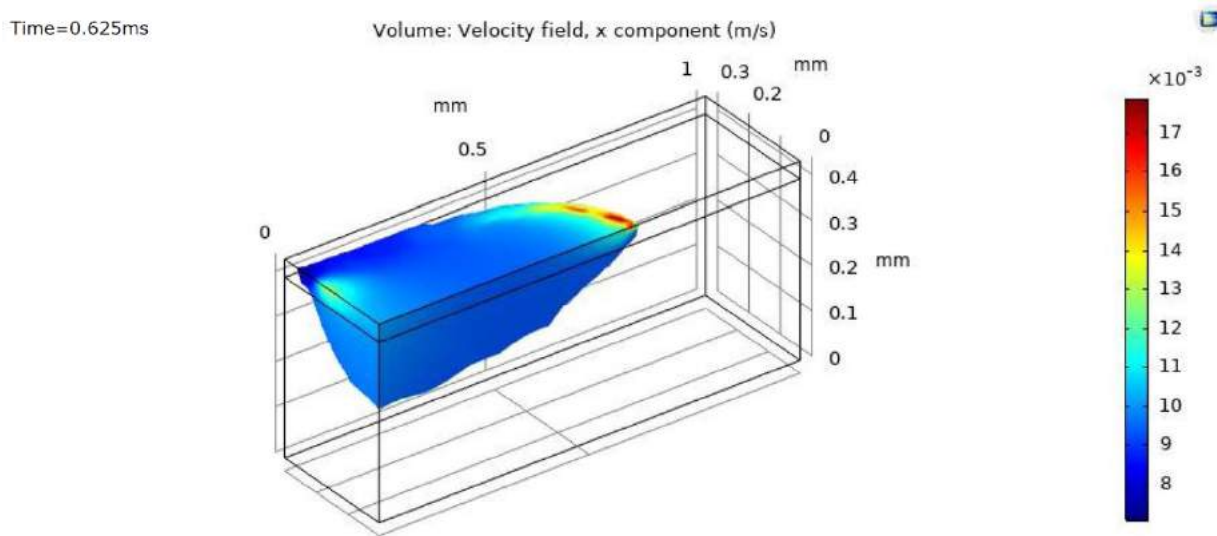
Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει τη θερμοκρασιακή κατανομή του δοκιμίου σε τρισδιάστατη και δισδιάστατη μορφή για τη χρονική στιγμή 0.82 ms. Παρατηρούμε ότι η περιοχή τήγματος έχει επεκταθεί προς τη φορά της ταχύτητας σάρωσης και το νέο σημείο προσβολής της δέσμης laser είναι μετατοπισμένο προς τα δεξιά. Βλέπουμε επίσης μικρή αύξηση στο βάθος της περιοχής θερμοκρασιών τήγματος.



Εικόνα 6-17: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 1.25ms

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο κατά τη χρονική στιγμή 1.25 ms, δηλαδή στο τέλος της σάρωσης. Παρατηρούμε ότι το σημείο προσβολής της ακτίνας laser βρίσκεται στο τέλος της διαδρομής. Βλέπουμε επίσης ότι το βάθος της περιοχής τήγματος έχει αυξηθεί ελαφρώς.

**Κατανομή Ταχύτητας στην Περιοχή Τηγμένου Μετάλλου για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s**

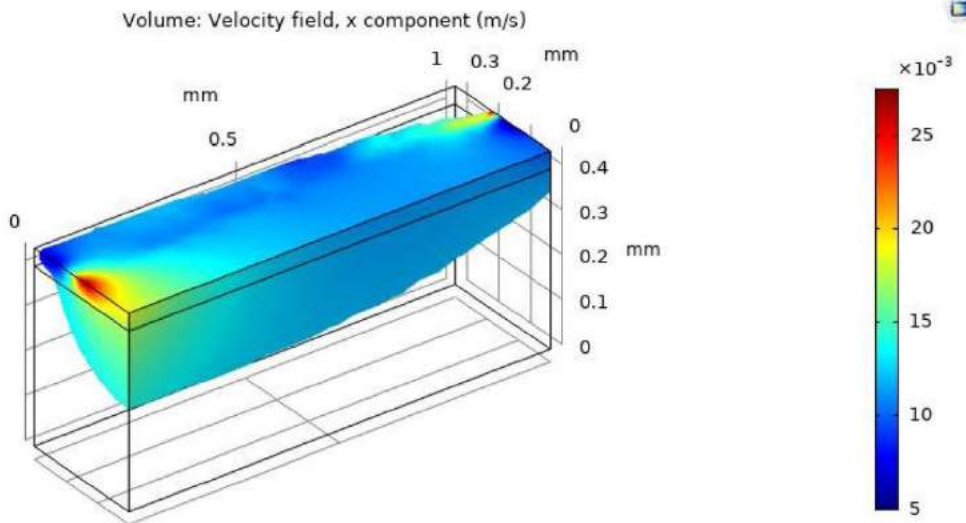


Εικόνα 6-18: Κατανομή Ταχύτητας στην Περιοχή Τηγμένου Μετάλλου για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 0.625ms

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε την κατανομή της ταχύτητας στην περιοχή τηγμένου μετάλλου τη χρονική στιγμή 0.625ms (μέση σάρωσης). Παρατηρούμε ταχύτητες της τάξεως των mm/s μόνο στην περιοχή που έχει σαρωθεί ήδη από τη δέσμη και ελαφρώς μετά από αυτήν. Υψηλές ταχύτητες παρατηρούνται στο σημείο προσβολής της ακτίνας laser και γύρω από αυτό, δηλαδή στην περιοχή των υψηλότερων θερμοκρασιών. Επίσης υψηλές ταχύτητες παρατηρούνται στο αριστερό άκρο του δοκιμίου όπου το μέταλλο αρχίζει να σταθεροποιείται.



Time=1.25ms

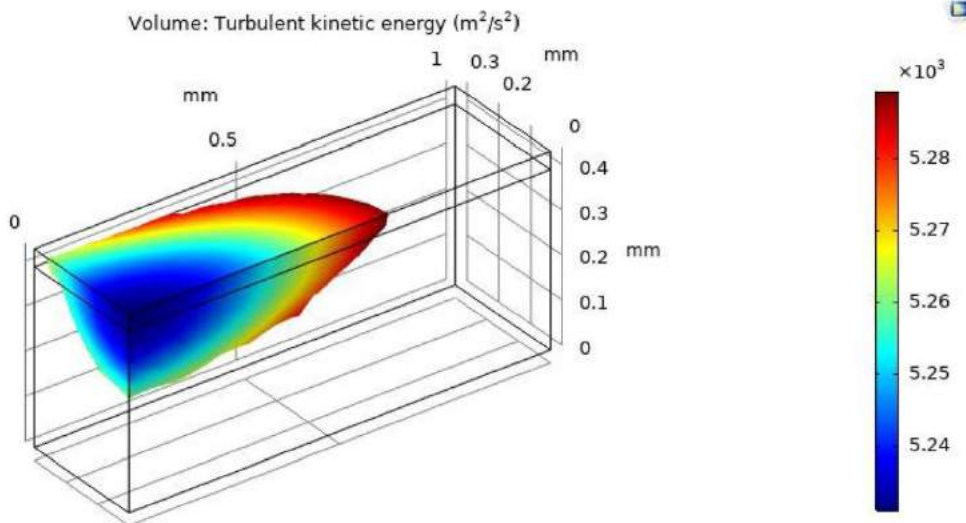


Εικόνα 6-19: Κατανομή Ταχύτητας στην Περιοχή Τηγμένου Μετάλλου για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 1.25ms

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε την κατανομή της ταχύτητας στην περιοχή τηγμένου μετάλλου τη χρονική στιγμή 1.25ms (τέλος σάρωσης). Υψηλές ταχύτητες παρατηρούνται στο αριστερό άκρο του δοκιμίου, αφού έχει περάσει κατάλληλο χρονικό διάστημα ώστε να αρχίσει να σταθεροποιείται το μέταλλο σε αυτή την περιοχή.

#### Κατανομή Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s

Time=0.625ms

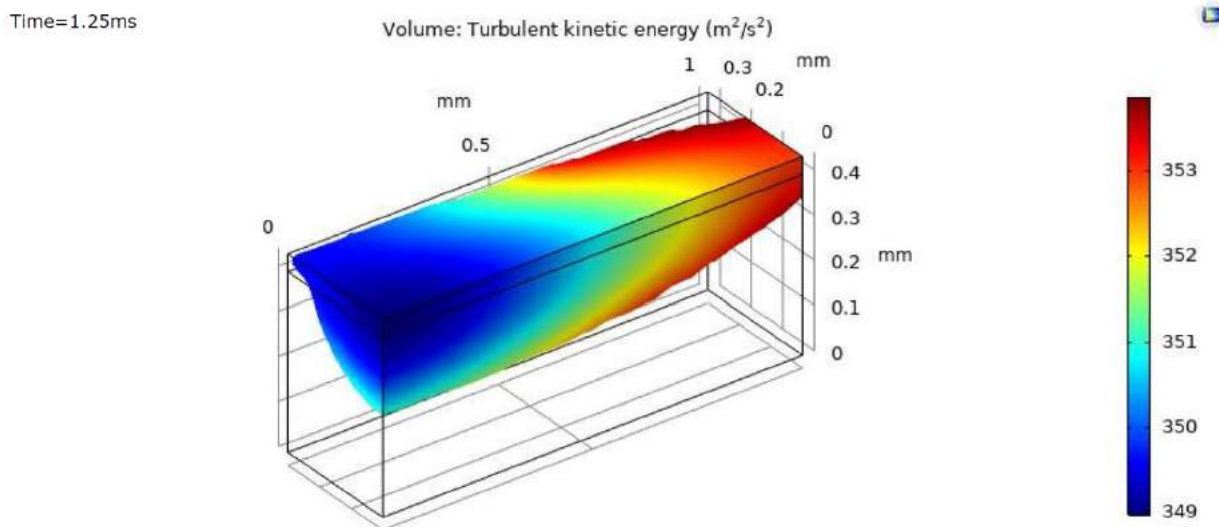


Εικόνα 6-20: Κατανομή Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 0.625ms

Παραπάνω απεικονίζεται η κατανομή της κινητικής ενέργειας τύρβης, που προκαλείται από τους στροβιλισμούς του τηγμένου υλικού, κατά τη χρονική στιγμή 0.625ms. Η κινητική ενέργεια



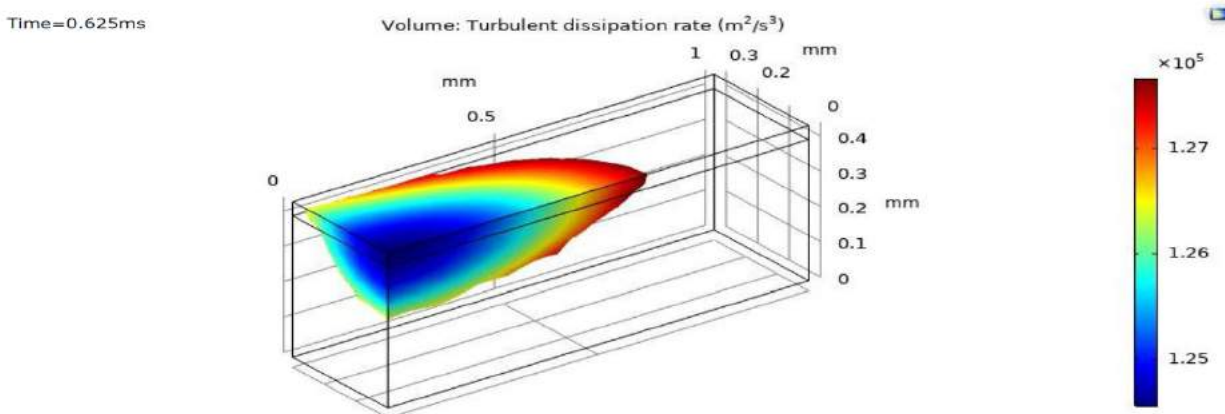
είναι της τάξης των  $10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Η περιοχή υψηλής κινητικής ενέργειας παρατηρείται γύρω από το σημείο προσβολής της δέσμης, όπου το μέταλλο τήκεται και προκαλείται ροή.



Εικόνα 6-21: Κινητική Ενέργεια για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 1.25ms

Παρατηρούμε και εδώ ότι η περιοχή υψηλής κινητικής ενέργειας παρατηρείται γύρω από το σημείο προσβολής της δέσμης laser και είναι μειωμένη κατά μία τάξη μεγέθους σε σχέση με το προηγούμενο στιγμιότυπο.

### Κατανομή Απόσβεσης Κινητικής Ενέργειας Τυρβώδους Ροής για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s

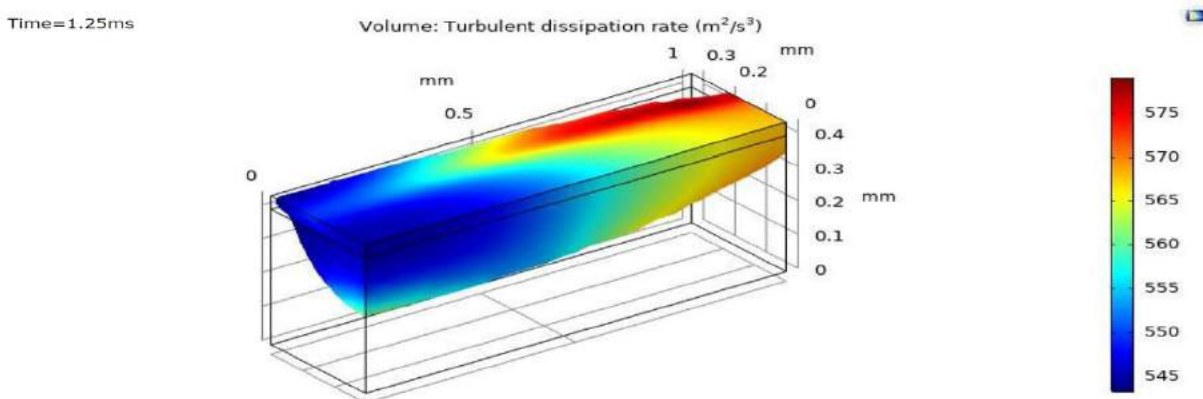


Εικόνα 6-22: Απόσβεση Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 0.625ms

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το προφίλ απόσβεσης της κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής. Όσο οι στρόβιλοι “σπάνε” σε μικρότερους στροβίλους μειώνεται η ισχύς τους και η κινητική ενέργεια του ρευστού μετατρέπεται σε θερμότητα. Η μετατροπή αυτή παρατηρείται



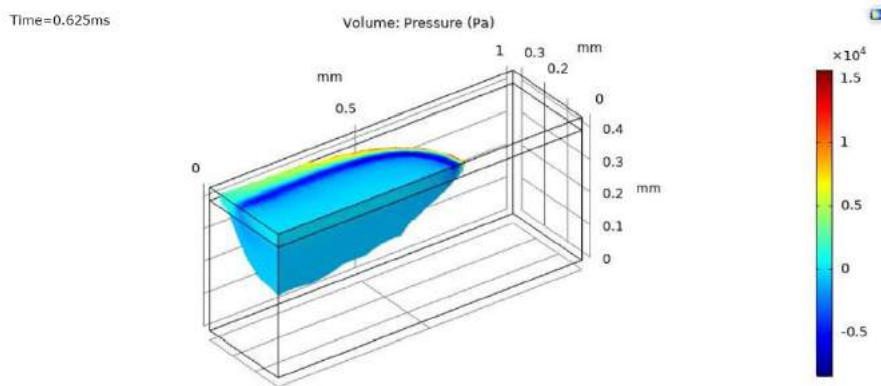
έντονα στην περιοχή γύρω από το σημείο προσβολής της ακτίνας laser, ενώ ελαττώνεται όσο παρέρχεται χρόνος από τη στιγμή προσβολής της δέσμης laser από το εκάστοτε σημείο.



Εικόνα 6-23: Απόσβεσης Κινητική Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 1.25ms

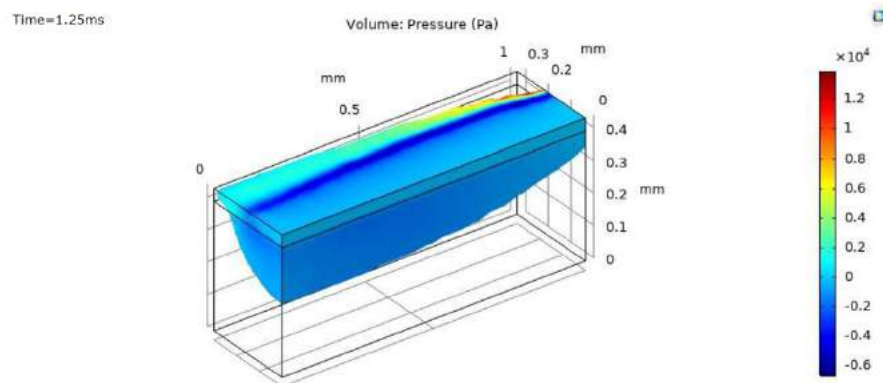
Κατά το πέρας της σάρωσης παρατηρούμε μικρότερες τιμές απόσβεσης κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής σε σχέση με τις τιμές κατά της εξέλιξη της σάρωσης. Αυξημένες τιμές παρατηρούμε στο δεξί άκρο του δοκιμίου όπου δεν έχει επέλθει μεγάλο χρονικό διάστημα από την επέλαση της δέσμης.

#### Κατανομή Πιέσεων για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s



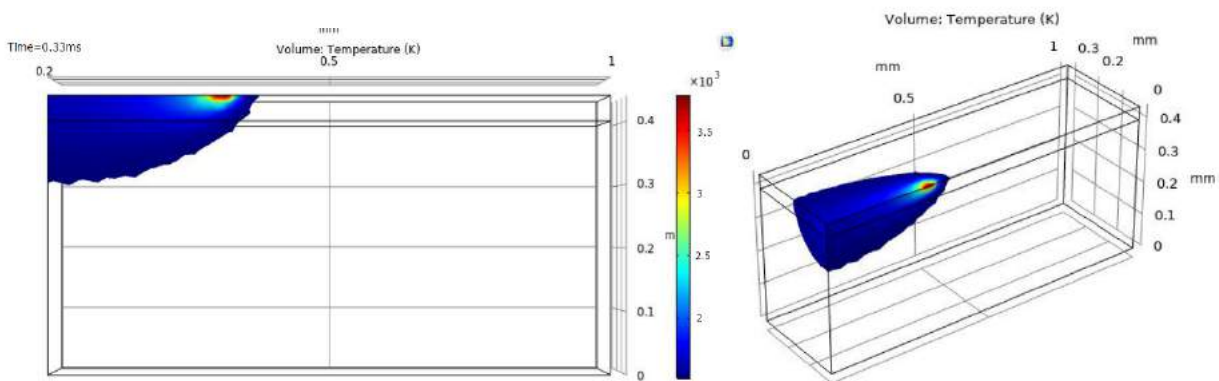
Εικόνα 6-24: Κατανομή Πιέσεων για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 0.625ms

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το προφίλ της σχετικής πίεσης στο δοκίμιο κατά τη χρονική στιγμή 0.625ms. Παρατηρούμε ότι οι πιέσεις είναι της τάξεως των δεκάδων χιλιάδων Pa και είναι αυξημένες στην περιοχή κοντά στο ψυχρό υλικό στερεάς μορφής, όπου οι ταχύτητες είναι μειωμένες λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης.



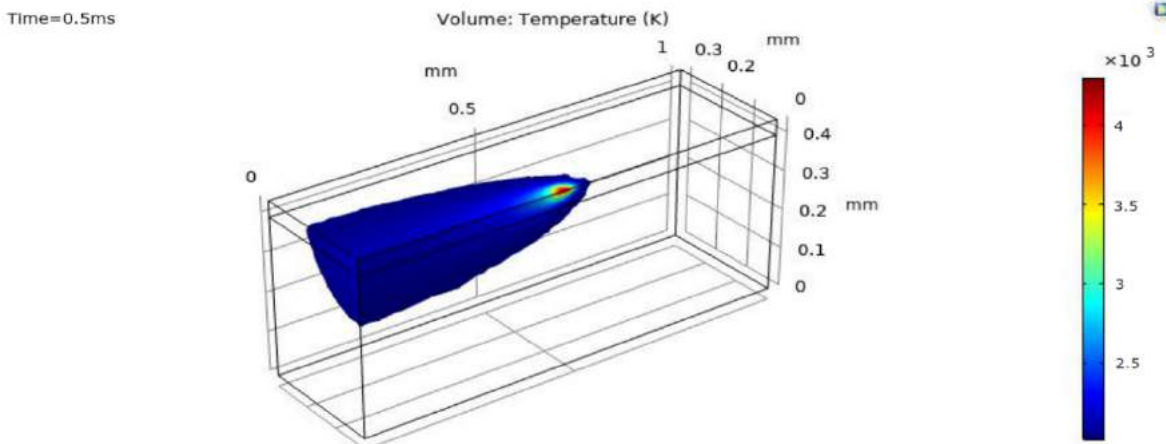
Εικόνα 6-25: Κατανομή Πιέσεων για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 1.25ms

### Κατανομή Θερμοκρασίας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s



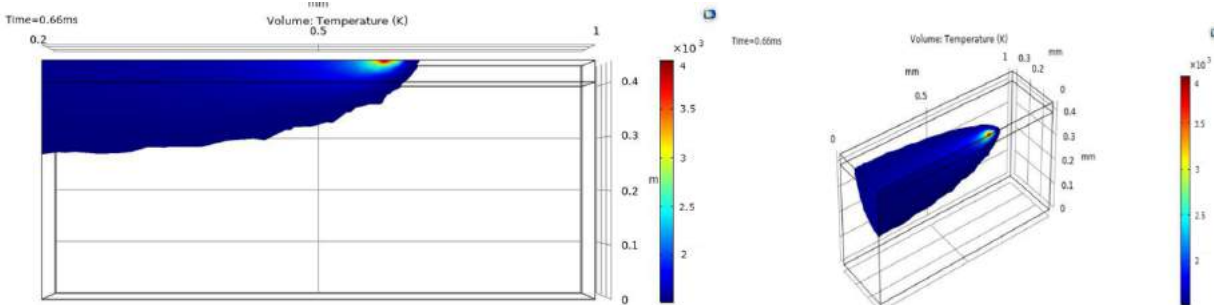
Εικόνα 6-26: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 0.33ms

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τη θερμοκρασιακή κατανομή του δοκιμίου σε τρισδιάστατη και δισδιάστατη απεικόνιση. Η μορφή της κατανομής είναι παρόμοια με αυτήν της χαμηλότερης ταχύτητας σάρωσης, με τη διαφορά ότι όλες οι θερμοκρασίες είναι μειωμένες. Η παραπάνω παρατήρηση αποδίδεται στο γεγονός ότι η υψηλότερη ταχύτητα σάρωσης δεν παρέχει το χρόνο στη δέσμη laser να θερμάνει αρκετά το δοκίμιο. Από ενεργειακής απόψεως, η δέσμη σταθερής ισχύος 400W αποδίδει μεγαλύτερα ποσά ενέργειας στον μεγαλύτερο χρόνο που χρειάζεται η δέσμη με τη μικρή ταχύτητα για να σαρώσει το δοκίμιο, το οποίο εν τέλει μεταφράζεται σε θερμότητα και επομένως σε αύξηση των θερμοκρασιών. Παρατηρούμε επίσης μικρότερο βάθος διείσδυσης της θερμής περιοχής.



Εικόνα 6-27: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 0.5ms

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τη θερμή περιοχή να έχει επιμηκυνθεί ακολουθώντας την πορεία της δέσμης laser. Το σημείο προσβολής της ακτίνας είναι ακριβώς στο μέσο της διαδρομής και το βάθος διείσδυσης είναι ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με το προηγούμενο στιγμιότυπο. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στο σημείο προσβολής της δέσμης και γύρω από αυτό, ενώ η θερμοκρασία της περιοχής που έχει ήδη σαρώσει το laser φθίνει με την επέλαση του χρόνου και σιγά σιγά προσεγγίζεται η θερμοκρασία πήξης του υλικού και αυτό σταθεροποιείται.

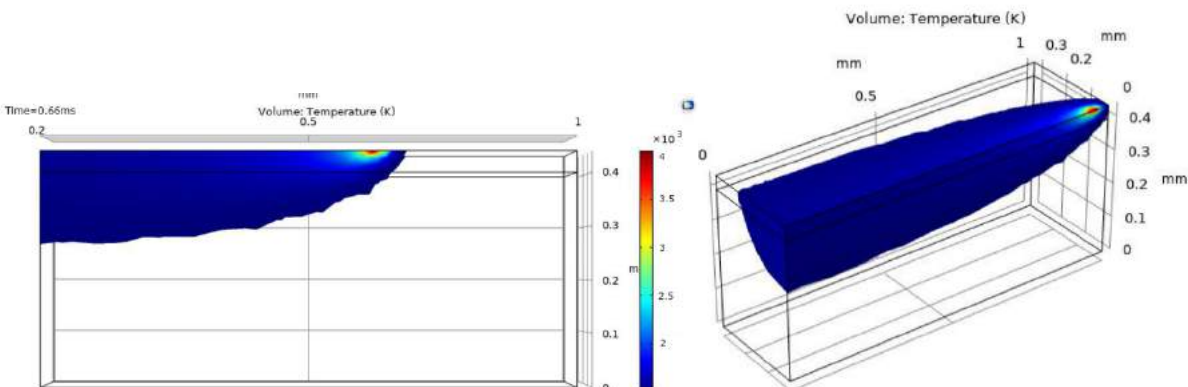


Εικόνα 6-28: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 0.66ms

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει τη θερμοκρασιακή κατανομή του δοκιμίου σε τρισδιάστατη και δισδιάστατη μορφή για τη χρονική στιγμή 0.66 ms. Παρατηρούμε ότι η περιοχή θερμοκρασιών τήγματος έχει επεκταθεί προς τη φορά της ταχύτητας σάρωσης και το νέο σημείο προσβολής της δέσμης laser είναι μετατοπισμένο προς τα δεξιά. Βλέπουμε επίσης μικρή αύξηση στο βάθος



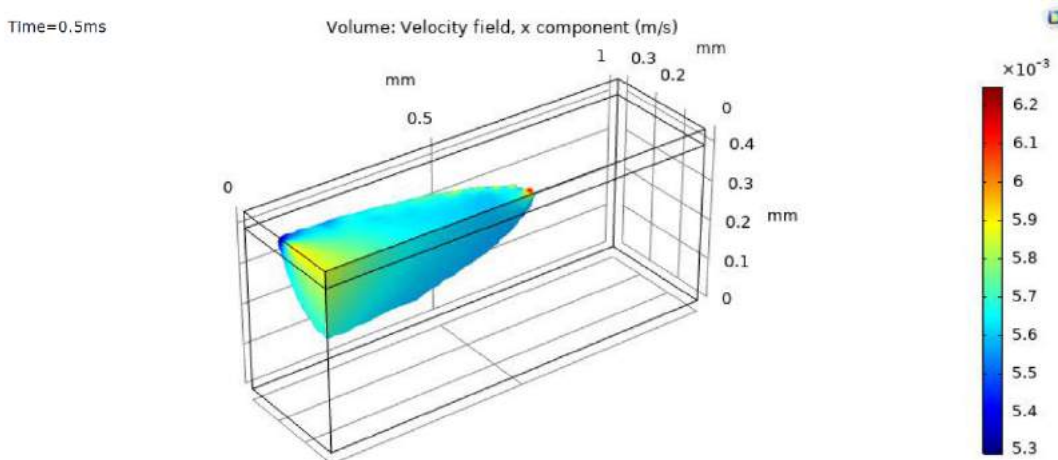
της περιοχής θερμοκρασιών τήγματος.



Εικόνα 6-29: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 1.00ms

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το προφίλ των θερμοκρασιών του δοκιμίου κατά το πέρας της σάρωσης. Η θερμή περιοχή έχει επεκταθεί σε όλο το μήκος του δοκιμίου με φθίνον βάθος διείδυσης κατά τη φορά της ταχύτητας σάρωσης.

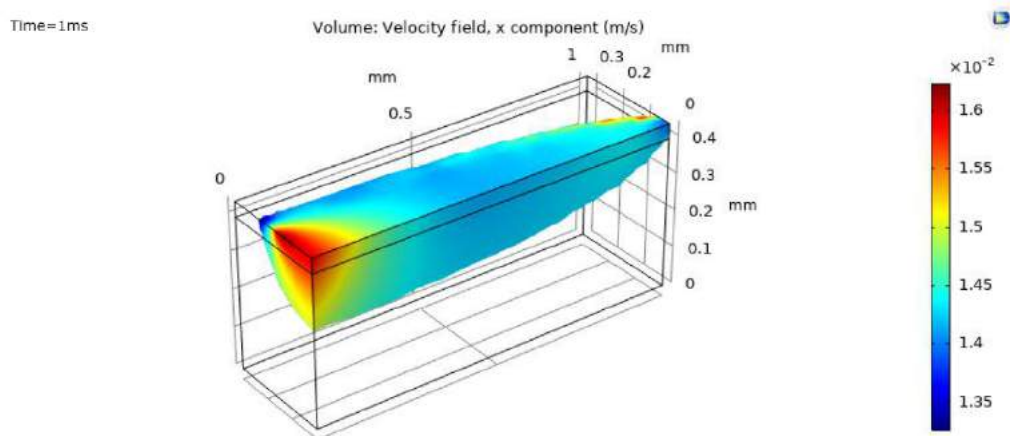
### **Κατανομή Ταχύτητας στην Περιοχή Τηγμένου Μετάλλου για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s**



Εικόνα 6-30: Κατανομή Ταχύτητας στην Περιοχή Τηγμένου Μετάλλου για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 0.5ms

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε την κατανομή της ταχύτητας στην περιοχή τηγμένου μετάλλου τη χρονική στιγμή 0.5ms. Παρατηρείται μείωση στο μέτρο των ταχυτήτων τηγμένου υλικού με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης. Υψηλές ταχύτητες παρατηρούνται στο σημείο προσβολής της ακτίνας laser και γύρω από αυτό, δηλαδή στην περιοχή των υψηλότερων θερμοκρασιών. Επίσης υψηλές ταχύτητες παρατηρούνται στο αριστερό άκρο του δοκιμίου όπου το μέταλλο αρχίζει να σταθεροποιείται.

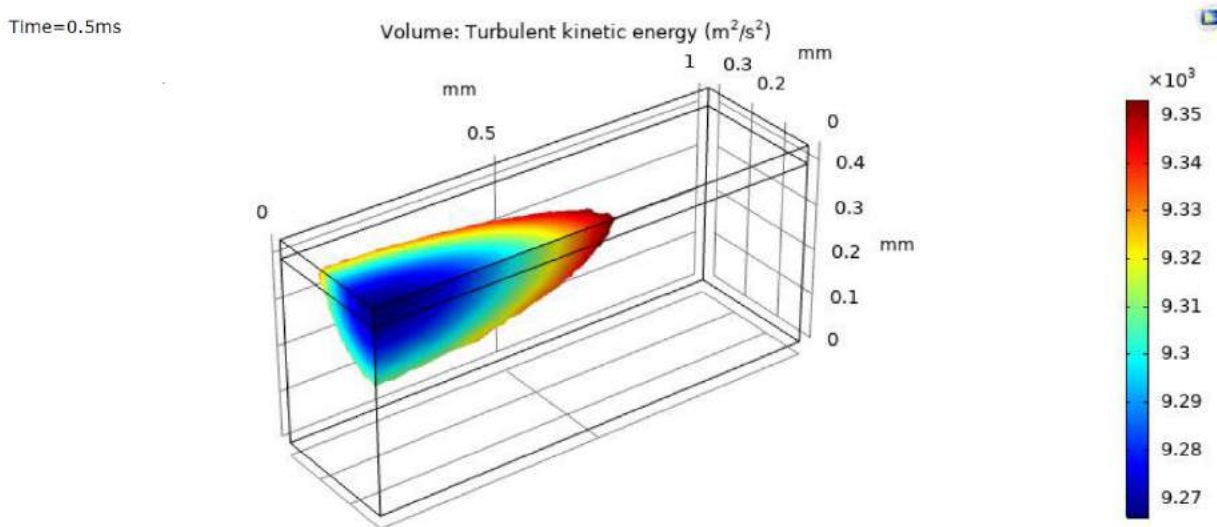




Εικόνα 6-31: Κατανομή Ταχύτητας στην Περιοχή Τηγμένου Μετάλλου για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 1.00ms

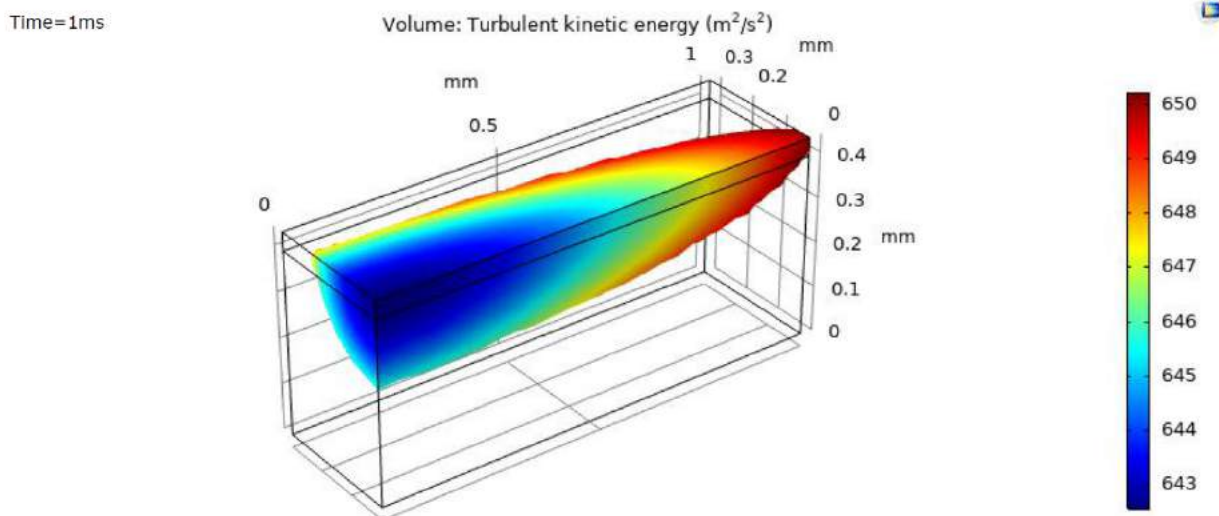
Το μέτρο των ταχυτήτων έχει αυξηθεί με την επέλαση του χρόνου διότι όπως προαναφέρθηκε το υλικό αρχίζει να σταθεροποιείται. Υψηλές τιμές ταχύτητας παρατηρούμε στο σημείο προσβολής της δέσμης και στο αριστερό άκρο του δοκιμίου.

#### Κατανομή Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s



Εικόνα 6-32: Κατανομή Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 0.5ms

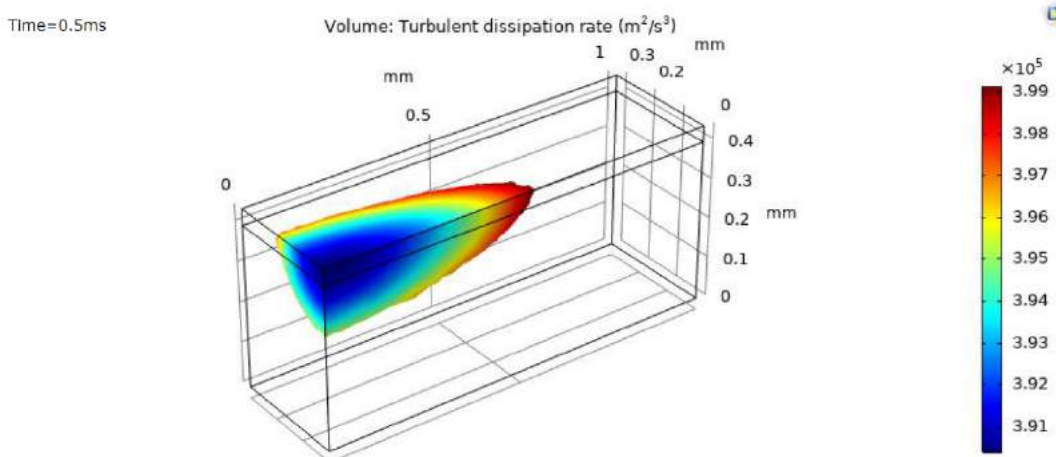
Παραπάνω απεικονίζεται η κατανομή της κινητικής ενέργειας τύρβης, που προκαλείται από τους στροβιλισμούς του τηγμένου υλικού, κατά τη χρονική στιγμή 0.5ms. Η κινητική ενέργεια είναι της τάξης των  $10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Η περιοχή υψηλής κινητικής ενέργειας παρατηρείται γύρω από το σημείο προσβολής της δέσμης, όπου το μέταλλο τήκεται και προκαλείται ροή.



Εικόνα 6-33: Κατανομή Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 1.0ms

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι το προφίλ της κινητικής ενέργειας έχει επεκταθεί κατά όλο το μήκος του δοκιμίου. Υψηλές τιμές κινητικές ενέργειας παρατηρούνται κοντά στο σημείο προσβολής της ακτίνας laser.

**Κατανομή Απόσβεσης Κινητικής Ενέργειας Τυρβώδους Ροής για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s**

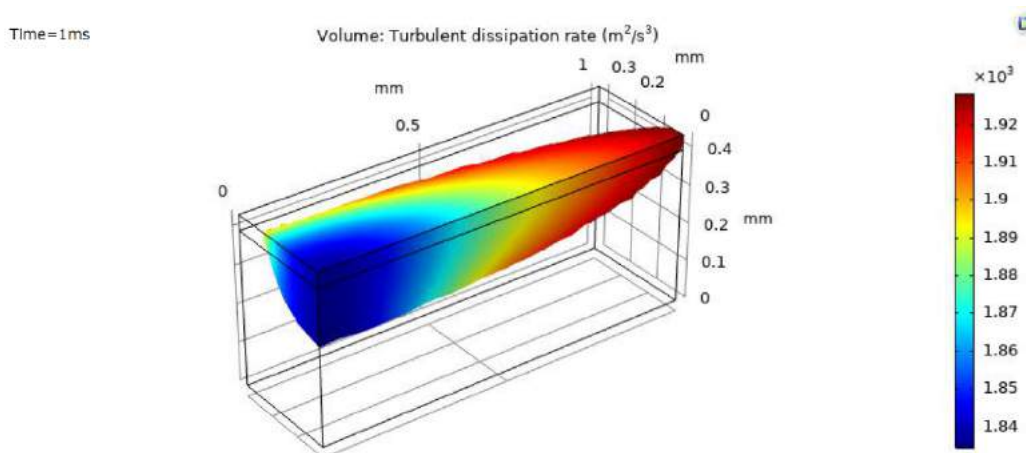


Εικόνα 6-34: Κατανομή Απόσβεσης Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 0.5ms

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η κατανομή απόσβεσης κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής. Υψηλή απόσβεση παρατηρείται στις ίδιες περιοχές που η κινητική ενέργεια λαμβάνει μεγάλες τιμές. Όπως έχει ήδη περιγραφεί η απόσβεση κινητικής ενέργειας συμβαίνει λόγω



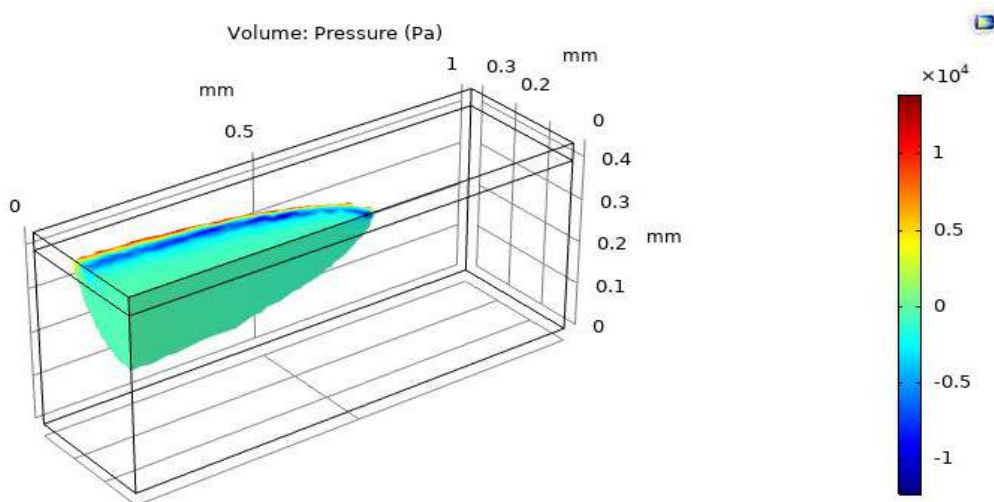
διασκορπισμού των στροβιλισμών σε μικρότερους στροβιλισμούς έως την εξαφάνισή τους κάτι το οποίο υποδηλώνει τη μετατροπή της κινητικής τους ενέργειας σε θερμότητα.



Εικόνα 6-35: Κατανομή Απόσβεσης Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 800mm/s τη χρονική στιγμή 1.00ms

Κατά το πέρας της σάρωσης παρατηρούμε μικρότερες τιμές απόσβεσης κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής σε σχέση με τις τιμές κατά την εξέλιξη της σάρωσης. Αυξημένες τιμές παρατηρούμε στο δεξί άκρο του δοκιμίου όπου δεν έχει επέλθει μεγάλο χρονικό διάστημα από την επέλαση της δέσμης.

#### Κατανομή Πιέσεων για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s

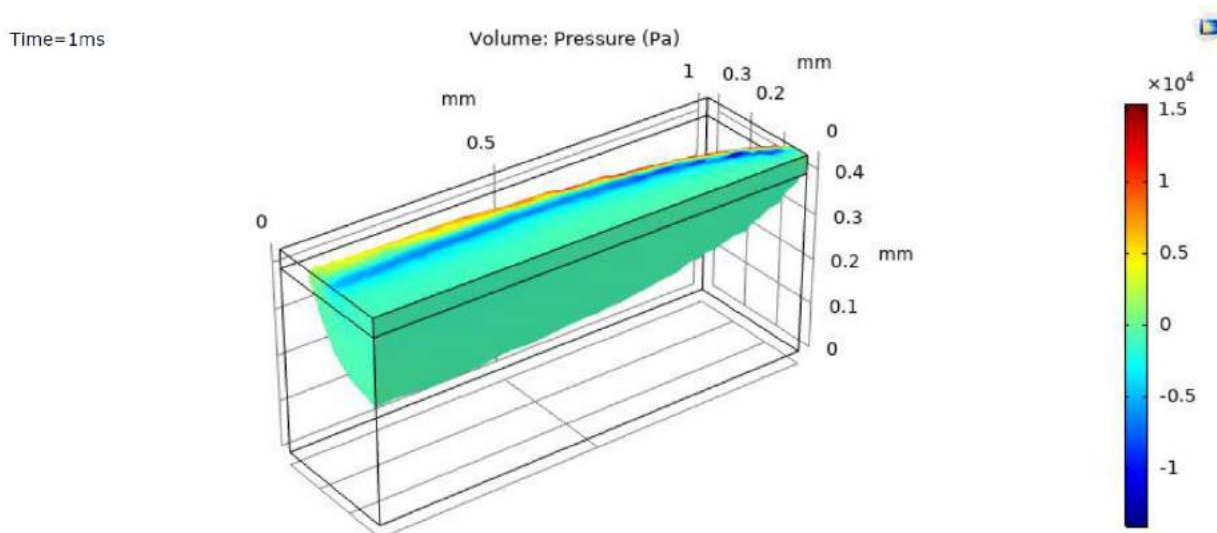


Εικόνα 6-36: Κατανομή Πιέσεων για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 0.5ms

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το προφίλ της σχετικής πίεσης στο δοκίμιο κατά τη χρονική στιγμή 0.5ms. Παρατηρούμε ότι οι πιέσεις είναι της τάξεως των δεκάδων χιλιάδων Pa και είναι αυξημένες στην περιοχή κοντά στο ψυχρό υλικό στερεάς μορφής, όπου οι ταχύτητες είναι



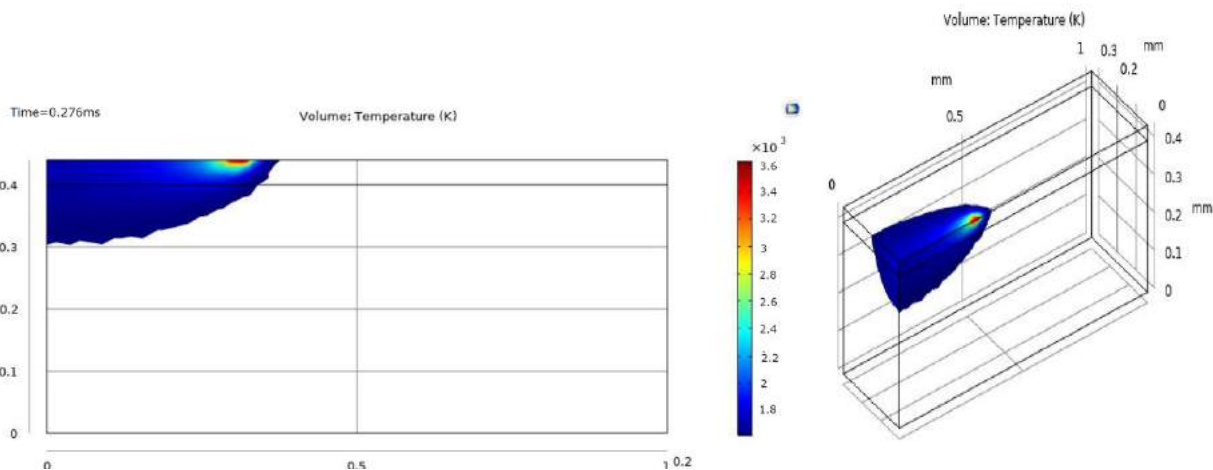
μειωμένες λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης. Οι πιέσεις είναι ελαφρώς μειωμένες με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης.



Εικόνα 6-37: Κατανομή Πιέσεων για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1000mm/s τη χρονική στιγμή 1.00ms

Το προφίλ πιέσεων έχει επεκταθεί σε όλο το μήκος του δοκιμίου και έχει παρόμοια μορφή με αυτή του προηγούμενου στιγμιότυπου.

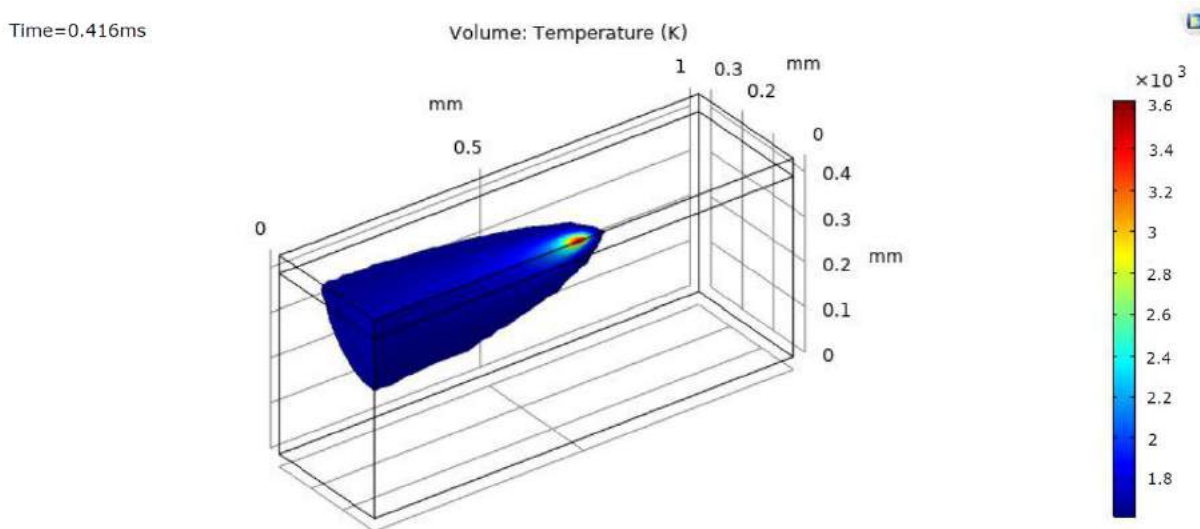
### Κατανομή Θερμοκρασίας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s



Εικόνα 6- : Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.276ms

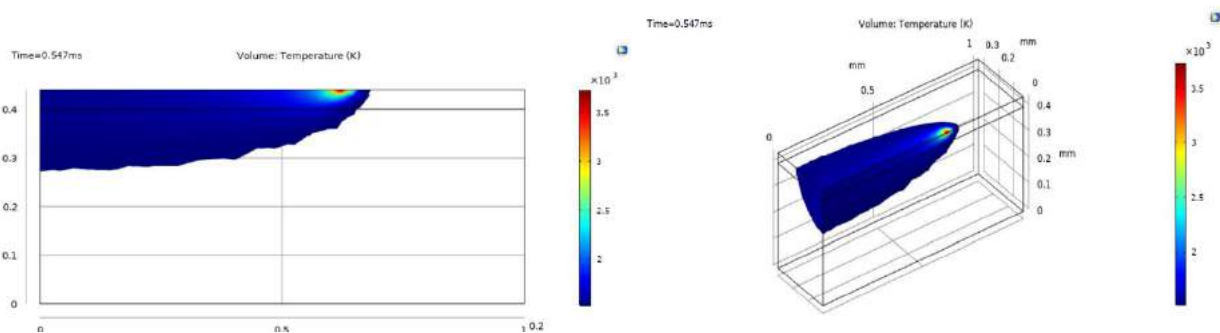
Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τη θερμοκρασιακή κατανομή του δοκιμίου σε τρισδιάστατη και δισδιάστατη απεικόνιση. Η μορφή της κατανομής είναι παρόμοια με αυτήν των προηγούμενων χαμηλότερων ταχυτήτων σάρωσης, με τη διαφορά ότι παρατηρούνται ομοιόμορφα μικρότερες θερμοκρασίες. Η παραπάνω παρατήρηση αποδίδεται στο γεγονός ότι

η υψηλότερη ταχύτητα σάρωσης δεν παρέχει το χρόνο στη δέσμη laser να θερμάνει αρκετά το δοκίμιο. Από ενεργειακής απόψεως, η ενέργεια που μεταδίδεται στο δοκίμιο είναι ίση με το γινόμενο της ισχύος του laser επί το χρόνο σάρωσης, άρα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας μεταδίδονται για μικρές ταχύτητες σάρωσης.



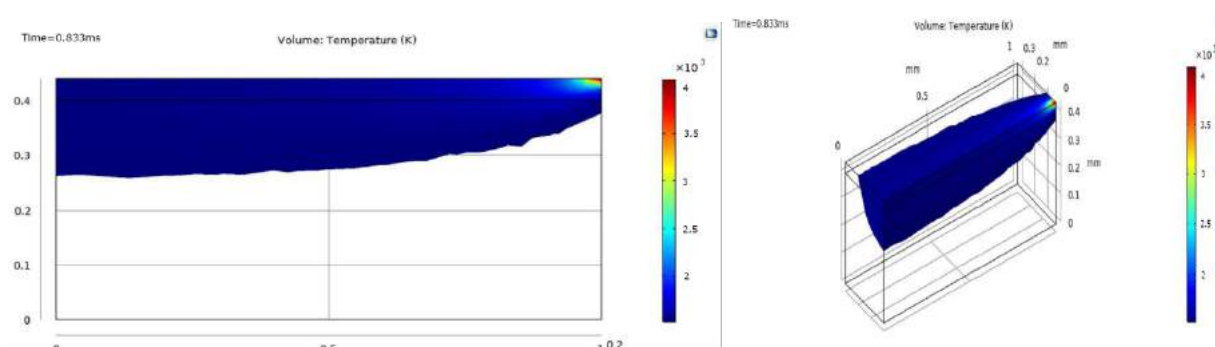
Εικόνα 6- : Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.416ms

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τη θερμή περιοχή να έχει επιμηκυνθεί ακολουθώντας την πορεία της δέσμης laser. Το σημείο προσβολής της ακτίνας είναι ακριβώς στο μέσο της διαδρομής και το βάθος διεύδυσης είναι ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με το προηγούμενο στιγμιότυπο. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στο σημείο προσβολής της δέσμης και γύρω από αυτό, ενώ η θερμοκρασία της περιοχής που έχει ήδη σαρώσει το laser φθίνει με την επέλαση του χρόνου και σιγά σιγά προσεγγίζεται η θερμοκρασία πήξης του υλικού και αυτό σταθεροποιείται.



Εικόνα 6- : Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.547ms

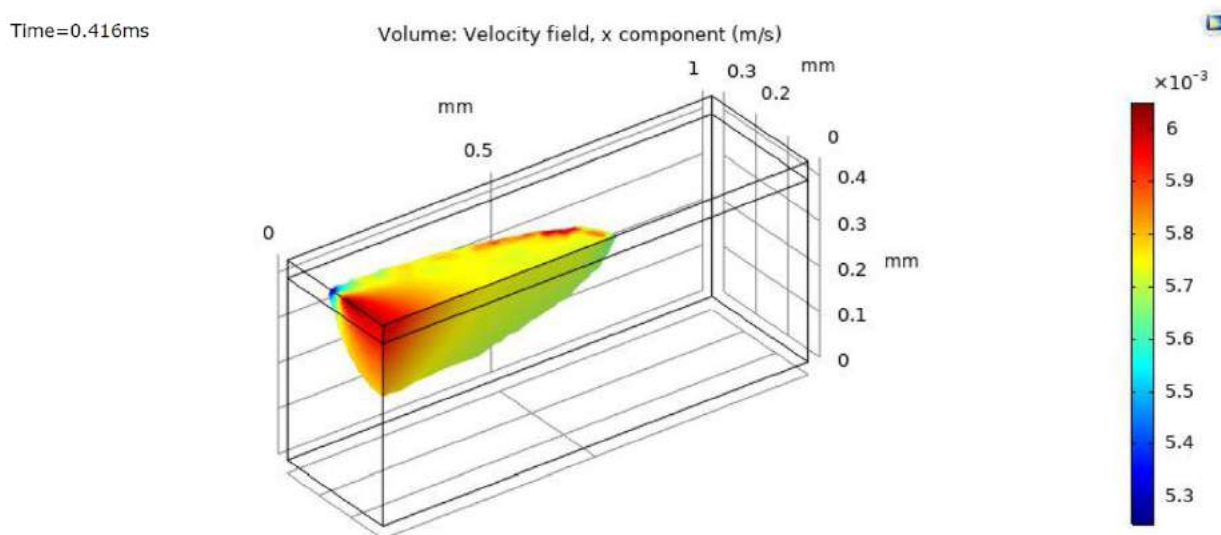
Το στιγμιότυπο της παραπάνω εικόνας έχει αναμενόμενη μορφή και τιμές, σύμφωνα με τα στιγμιότυπα των μικρότερων ταχυτήτων σάρωσης. Σημαντική παρατήρηση είναι το μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών σε πιο προχωρημένες φάσεις της σάρωσης, διότι τα αρχικά σημεία σάρωσης έχουν ψυχθεί για μεγαλύτερο χρόνο, ενώ κοντά στο σημείο προσβολής της δέσμης οι θερμοκρασίες είναι σταθερά υψηλές.



Εικόνα 6- : Θερμοκρασιακή Κατανομή για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.833ms

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το προφίλ των θερμοκρασιών του δοκιμίου κατά το πέρας της σάρωσης. Η θερμή περιοχή έχει επεκταθεί σε όλο το μήκος του δοκιμίου με φθίνον βάθος διείδυσης κατά τη φορά της ταχύτητας σάρωσης, αφού δεν έχει επέλθει αρκετός χρόνος ώστε να διαδοθεί η θερμότητα κατά βάθος.

**Κατανομή Ταχύτητας στην Περιοχή Τηγμένου Μετάλλου για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s**

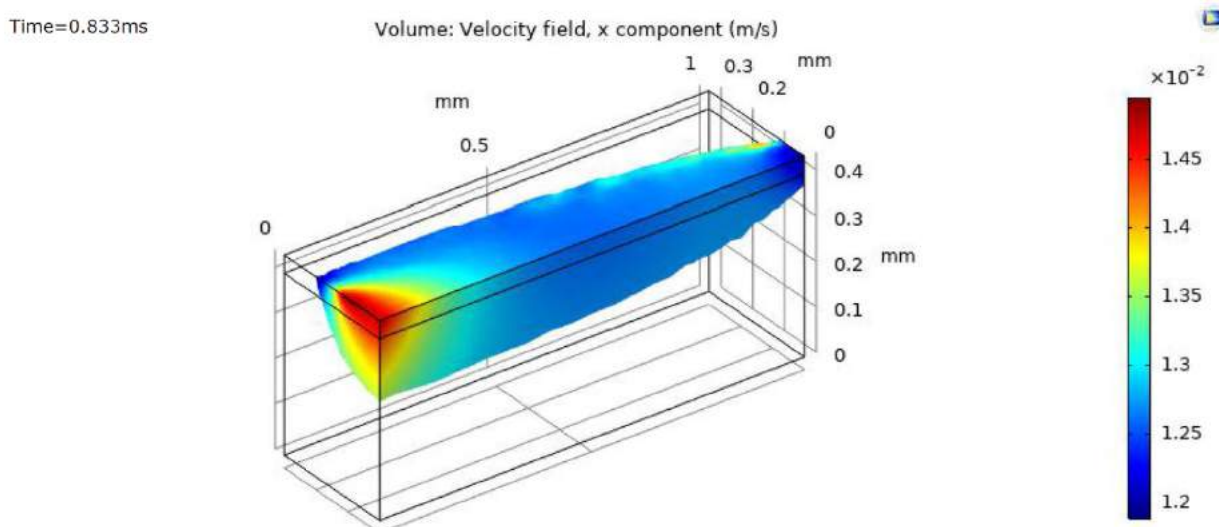


Εικόνα 6- : Κατανομή Ταχύτητας στην Περιοχή Τηγμένου Μετάλλου για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.416ms

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε την κατανομή της ταχύτητας στην περιοχή τηγμένου μετάλλου τη χρονική στιγμή 0.416ms. Παρατηρείται μείωση στο μέτρο των ταχυτήτων τηγμένου υλικού με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης. Υψηλές ταχύτητες παρατηρούνται στο σημείο προσβολής της ακτίνας laser και γύρω από αυτό, δηλαδή στην περιοχή των υψηλότερων



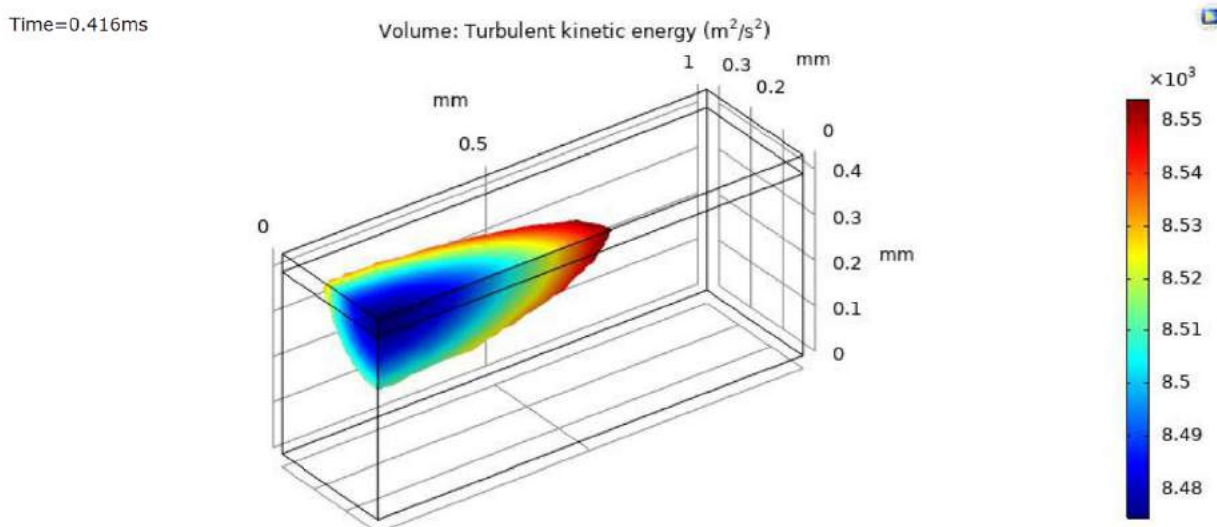
θερμοκρασιών. Επίσης υψηλές ταχύτητες παρατηρούνται στο αριστερό άκρο του δοκιμίου όπου το μέταλλο αρχίζει να σταθεροποιείται.



Εικόνα 6- : Κατανομή Ταχύτητας στην Περιοχή Τηγμένου Μετάλλου για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.833ms

Το μέτρο των ταχυτήτων έχει αυξηθεί με την επέλαση του χρόνου διότι όπως προαναφέρθηκε το υλικό αρχίζει να σταθεροποιείται. Υψηλές τιμές ταχύτητας παρατηρούμε στο σημείο προσβολής της δέσμης και στο αριστερό άκρο του δοκιμίου.

#### Κατανομή Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s

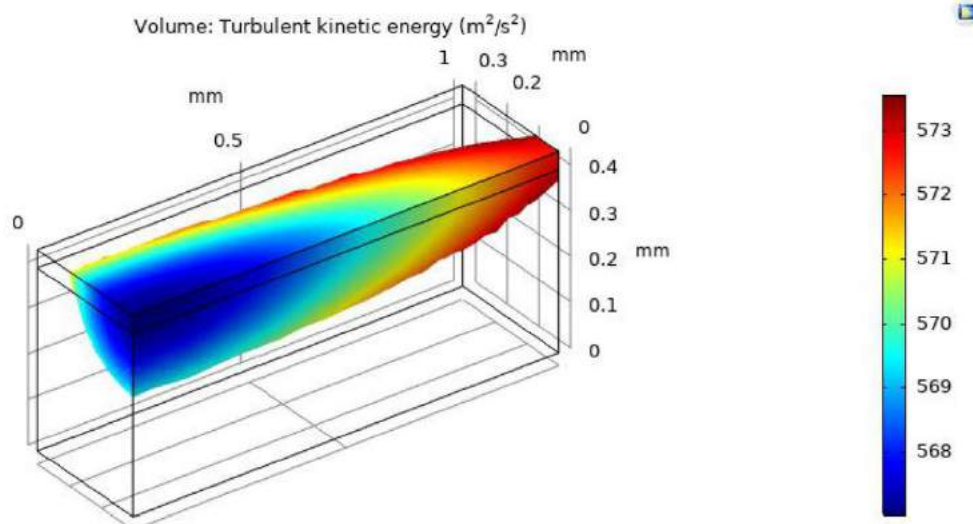


Εικόνα 6- : Κατανομή Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.416ms



Παραπάνω απεικονίζεται η κατανομή της κινητικής ενέργειας τύρβης, που προκαλείται από τους στροβιλισμούς του τηγμένου υλικού, κατά τη χρονική στιγμή 0.416ms. Η κινητική ενέργεια είναι της τάξης των  $10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Η περιοχή υψηλής κινητικής ενέργειας παρατηρείται γύρω από το σημείο προσβολής της δέσμης, όπου το μέταλλο τήκεται και προκαλείται ροή.

Time=0.833ms

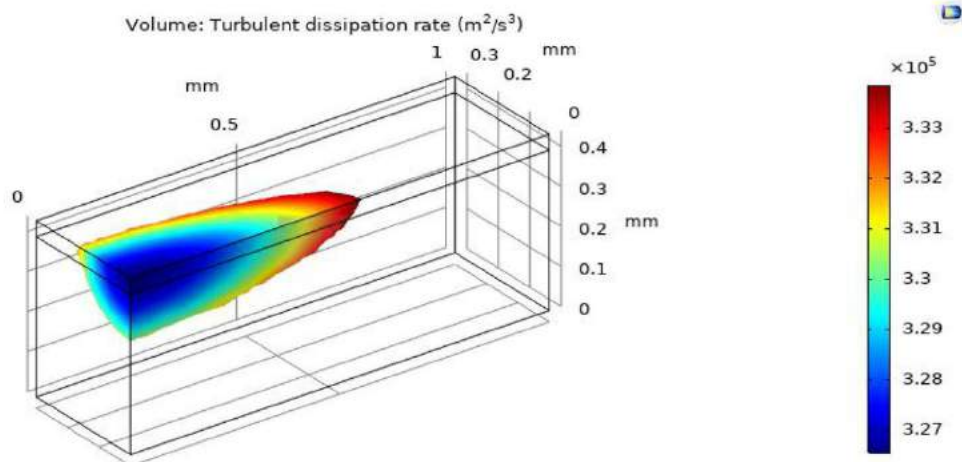


Εικόνα 6- : Κατανομή Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.833ms

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι το προφίλ της κινητικής ενέργειας έχει επεκταθεί κατά όλο το μήκος του δοκιμίου. Υψηλές τιμές κινητικές ενέργειας παρατηρούνται κοντά στο σημείο προσβολής της ακτίνας laser.

### Κατανομή Απόσβεσης Κινητικής Ενέργειας Τυρβώδους Ροής για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s

Time=0.416ms

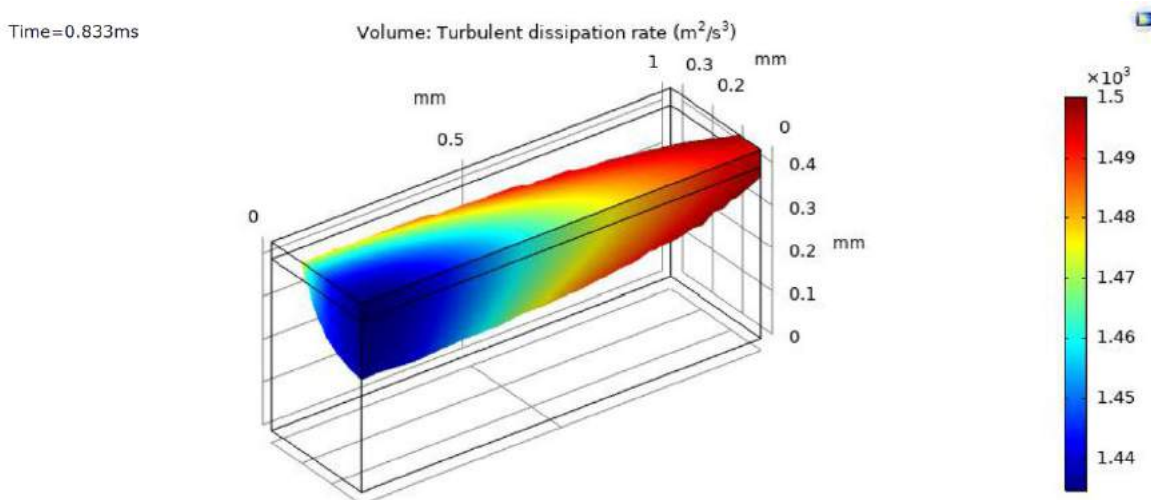


Εικόνα 6- : Κατανομή Απόσβεσης Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.416ms





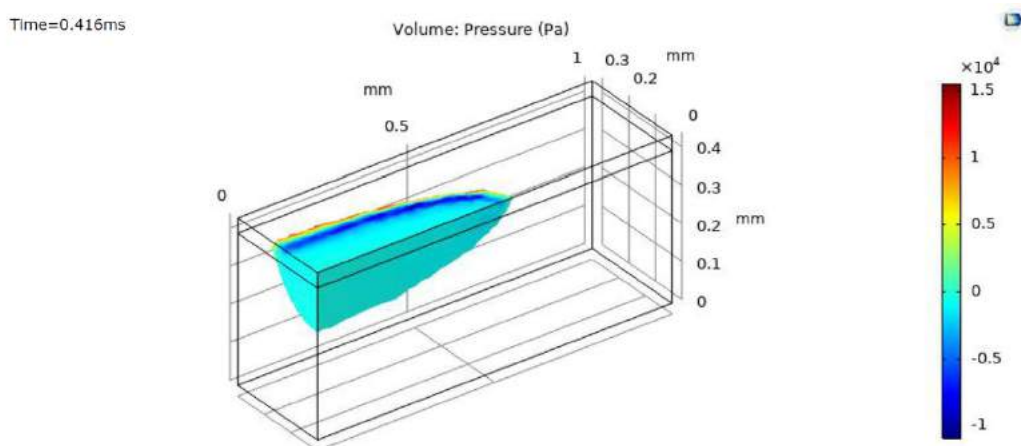
Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η κατανομή απόσβεσης κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής. Υψηλή απόσβεση παρατηρείται στις ίδιες περιοχές που η κινητική ενέργεια λαμβάνει μεγάλες τιμές. Όπως έχει ήδη περιγραφεί η απόσβεση κινητικής ενέργειας συμβαίνει λόγω διασκορπισμού των στροβιλισμών σε μικρότερους στροβιλισμούς έως την εξαφάνισή τους κάτι το οποίο υποδηλώνει τη μετατροπή της κινητικής τους ενέργειας σε θερμότητα.



Εικόνα 6- : Κατανομή Απόσβεσης Κινητικής Ενέργειας για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.833ms

Κατά το πέρας της σάρωσης παρατηρούμε μικρότερες τιμές απόσβεσης κινητικής ενέργειας τυρβώδους ροής σε σχέση με τις τιμές κατά την εξέλιξη της σάρωσης. Αυξημένες τιμές παρατηρούμε στο δεξί άκρο του δοκιμίου όπου δεν έχει επέλθει μεγάλο χρονικό διάστημα από την επέλαση της δέσμης.

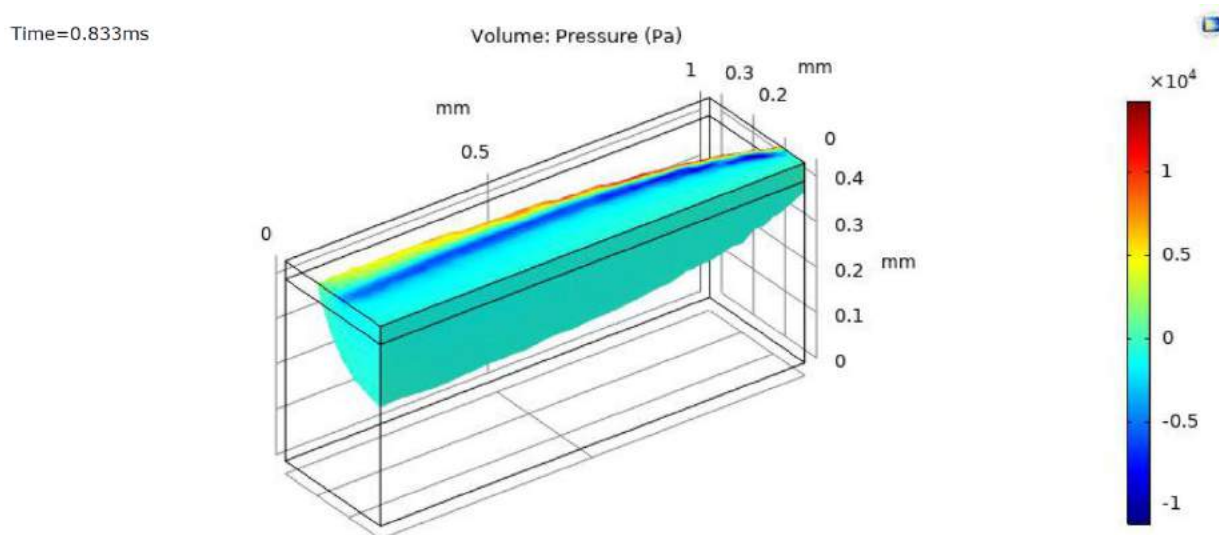
### Κατανομή Πιέσεων για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s



Εικόνα 6- : Κατανομή Πιέσεων για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.416ms



Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το προφίλ της πίεσης στο δοκίμιο κατά τη χρονική στιγμή 0.416ms. Παρατηρούμε ότι οι πιέσεις είναι της τάξεως των δεκάδων χιλιάδων Pa και είναι αυξημένες στην περιοχή κοντά στο ψυχρό υλικό στερεάς μορφής, όπου οι ταχύτητες είναι μειωμένες λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης. Οι πιέσεις είναι ελαφρώς μειωμένες με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης.



Εικόνα 6- : Κατανομή Πιέσεων για Ισχύ Δέσμης 400W και Ταχύτητα Σάρωσης 1200mm/s τη χρονική στιγμή 0.833ms

Το προφίλ πιέσεων έχει επεκταθεί σε όλο το μήκος του δοκιμίου και έχει παρόμοια μορφή με αυτή του προηγούμενου στιγμιότυπου.



#### 6.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα

Ολοκληρώνοντας της προσομοιώσεις αξίζει να γίνει μία συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων με μία μελέτη η οποία επικεντρώνεται στο ίδιο φαινόμενο πειραματικά. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί η μελέτη των Umberto Scipioni Bertoli et al. με τίτλο “*On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting*”[39].

Για την σύγκριση χρησιμοποιείται ο ακόλουθος πίνακας:

Πίνακας 6-1: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας “*On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting*”[39].

Ισχύς Δέσμης Laser (Watt)	Ταχύτητα Σάρωσης (mm/s)	Βάθος προσομοίωσης (mm)	Βάθος πειραματικά (mm)	Απόκλιση (%)
100	250	0.102	0.075	36.0
400	800	0.209	0.220	5.0
400	1000	0.184	0.197	6.6
400	1200	0.172	0.150	14.7

Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις είναι σχετικά μικρές, έως 15% για την περίπτωση όπου εμφανίζεται keyhole. Όσο μικραίνει το βάθος που φτάνει η δέσμη τόσο μεγαλώνει η απόκλιση. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το ίδιο σφάλμα σε απόλυτη τιμή, σε μικρότερα βάθη θα δημιουργεί μεγαλύτερο ποσοστό απόκλισης. Για το λόγο αυτό την μεγαλύτερη απόκλιση (36%) την έχουμε στην περίπτωση της μη δημιουργίας keyhole όπου έχουμε και το μικρότερο βάθος. Στην μελέτη με την οποία συγκρίνουμε μπορούμε να διασταυρώσουμε πως για ισχύ laser 100 Watt και ταχύτητα σάρωσης 250 mm/s δεν δημιουργείται το φαινόμενο keyhole κατά την κατεργασία.



## 7. Συμπεράσματα

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μπορούν να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα για τον τρόπο σχηματισμού του φαινομένου keyhole σε μη συμβατικές κατεργασίες, όπως το 3D printing και η συγκόλληση με τη μέθοδο ακτίνας laser. Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων μελετήθηκαν προσεκτικά τα διαγράμματα και τα στιγμιότυπα του κεφαλαίου των αποτελεσμάτων, με σκοπό να βρεθεί το αντίκτυπο διάφορων παραμέτρων στον σχηματισμό Keyhole. Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο φαίνεται να είναι η ισχύς του laser, η ταχύτητα σάρωσης και η θερμοκρασία προθέρμανσης. Όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια η επιρροή των παραπάνω παραμέτρων φαίνεται να είναι γραμμική, χωρίς σημεία καμπής, δηλαδή με την αύξησή τους παρουσιάζεται αναλογική αύξηση ή μείωση του σχηματισμού keyhole. Για το μέγεθος του σχηματιζόμενου Keyhole χρειάζεται να μετρηθούν και οι 3 διαστάσεις της οπής, δηλαδή το μήκος και το πλάτος στο άνοιγμά της και το βάθος.

### Ισχύς του laser

Η ισχύς της ακτίνας laser της κατεργασίας φαίνεται να επηρεάζει το σχηματισμό Keyhole με τρόπο γραμμικό και αυξάνων. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της ισχύος φαίνεται να αυξάνονται το μήκος, το πλάτος, αλλά και το βάθος της οπής. Ο τρόπος με τον οποίο παρατηρείται αυτή η αύξηση είναι σχεδόν γραμμικός, με μερικά σημεία να αποκλίνουν ελαφρώς, γεγονός που οφείλεται ενδεχομένως στην ακρίβεια των υπολογισμών μας. Για την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμών απαιτείται μικρότερο πλέγμα, πράγμα που έχει σημαντικό αντίκτυπο στον χρόνο υπολογισμών. Στην εργασία το πλέγμα που επιλέχθηκε απέδιδε ικανοποιητική ακρίβεια υπολογισμών, σε χρόνο επιτεύξιμο. Ένας άλλος παράγοντας που ίσως βοηθούσε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι η χρήση μεταβλητής γεωμετρίας στο πρόγραμμα επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Όμως δεδομένης της πολυπλοκότητας αυτής της μεθόδου χρειάζεται εξαιρετικά μεγάλη υπολογιστική ικανότητα ώστε να μπορέσει ολοκληρωθεί η προσομοίωση.

### Ταχύτητα σάρωσης

Η αυξημένη ταχύτητα σάρωσης φαίνεται να μειώνει τον σχηματισμό Keyhole. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης παρατηρείται μείωση του μήκους, του πλάτους, αλλά και του βάθους της σχηματιζόμενης οπής τηγμένου υλικού. Η μείωση φαίνεται και εδώ να είναι γραμμική, με μερικά σημεία να αποκλίνουν ελαφρώς για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η αυξημένη ταχύτητα σάρωσης δεν παρέχει τον απαιτούμενο χρόνο μετάδοσης της θερμότητας σε βαθύτερα στρώματα του υλικού, αλλά και στις τριγύρω περιοχές του σημείου προσβολής της ακτίνας, με αποτέλεσμα το μέγεθος του keyhole να μειώνεται.



### **Θερμοκρασία προθέρμανσης**

Η θερμοκρασία προθέρμανσης δεν φάνηκε να προκαλεί σημαντικές μεταβολές στο μέγεθος της σχηματιζόμενης οπής. Πιο αναλυτικά, καμία από τις 3 διαστάσεις της οπής δεν φάνηκε να μεταβάλλεται σημαντικά. Παρ' όλα αυτά με την αύξηση της θερμοκρασίας προθέρμανσης φαίνεται να μειώνεται ο χρόνος σχηματισμού του Keyhole.

### **Τρόπος σχηματισμού οπής Keyhole**

- Κατά τον σχηματισμό της οπής Keyhole παρατηρήθηκε ότι το πλάτος της οπής φτάνει σε σταθερή τιμή ταχύτερα απ' ότι το βάθος της οπής.
- Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας η σχηματιζόμενη οπή φαίνεται να είναι ασταθούς σχήματος εξαιτίας της τριχωειδούς αστάθειας, η οποία οφείλεται στον μεγάλο λόγο βάθους/πλάτους.
- Με την αύξηση της ισχύος ακτίνας laser παρατηρείται αύξηση του λόγου βάθος/πλάτος, δημιουργώντας την προαναφερθείσα τριχωειδή αστάθεια.

### **Εγκυρότητα αποτελεσμάτων**

Μελετώντας τα αποτελέσματα αντίστοιχων εργασιών από τη βιβλιογραφία και το διαδίκτυο, φαίνεται τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας να έρχονται σε συμφωνία με αυτά. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, αφού διασταυρώνονται και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα άλλων εργασιών, πολλές από τις οποίες είναι πειραματικές, πράγμα που προσδίδει μεγαλύτερη αξιοπιστία.

### **Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Ένα ενδιαφέρον ενδεχόμενο για μελλοντική έρευνα είναι η προσομοίωση της παραπάνω έρευνας χρησιμοποιώντας δύο 2D μοντέλα τα οποία θα εμφανίζουν την κάτοψη και την πρόοψη του φαινομένου. Μία τέτοια έρευνα θα μπορούσε ενδεχομένως να ελαχιστοποιήσει τον χρόνο ανάπτυξης ενός φυσικού μοντέλου και να μας δίνει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα.



## Βιβλιογραφία

- [1] 3DSpectra, Quick 5 Tips to Fix Most Common Failed 3D Printing, Kolkata, West Bengal, 19 Dec 2019
- [2] <https://uk.comsol.com/comsol-multiphysics> [online] accessed at 2020
- [3] X. F. Liu, Chuanbao Jia, C. S. Wu, Guokai Zhang, Measurement of the Keyhole Entrance and Topside Weld Pool Geometries in Keyhole Plasma Arc Welding with Dual CCD Cameras, Journal of Material Processing Technology, Shandong University, May 2017
- [4] <https://interestingengineering.com/how-exactly-does-3d-printing-work> [online] Christopher McFadden accessed 2020
- [5] James Murphy, Selective Laser Melting (SLM)-3D Printing Simply Explained, ALL3DP Content Academy, Mar 28 2019
- [6] <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/> [online] accessed at 2020
- [7] <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/#3D-Printing-Industry> [online] accessed at 2020
- [8] <https://www.matterhackers.com/store/l/mattercontrol/sk/MKZGTDW6> [online] accessed at 2020
- [9] <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-melting> [online] accessed 2020
- [10] Dr. Ing. Simon Merkt-Schippers, Monolithic Thrust Chamber, SLM Solutions Press, Luebeck, Germany, 2019
- [11] Lukas Pankiewicz, SLM Solutions North America, World's largest single-piece rocket engine 3d printed on the slm®800 selective laser melting machine, 21 Feb 2019
- [12] Zhao Hongbo, Qi Huan, Numerical Simulation of Transport Phenomena for Laser Full Penetration Welding, JWW Journal of Welding and Joining, Intelligent Laser Advanced Manufacturing Laboratory, University of Michigan, 2017
- [13] Raul Pena, Arc Welding Faults - Examples of Speed, Arc Length, and Current, UK, 2019
- [14] Masoud Harooni, Blair Carlson, Radovan Kovacevic, Effect of Process Parameters on the Weld Quality in Laser welding of AZ31B Magnesium Alloy in Lap Joint Configuration, Southern Methodist University SMU Scholar, 2013
- [15] Laserax, Comparing CO2 and Fiber Laser, Canada, 10 Apr 2019
- [16] <https://www.additivereportdigital.com/additivereport/2019spring/> [online] accessed at 2020
- [17] Y.S. Lee, W. Zhang, Modeling of heat transfer, fluid flow and solidification microstructure of Nickel-base superalloy fabricated by laser powder bed fusion, Addit. Manuf. vol. 12, (2016)
- [18] L. Han, F.W. Liou, S. Musti, Thermal behavior and geometry model of melt pool in laser material process 2005



- [19] Yadroitsev, I. Smurov, Surface morphology in selective laser melting of metal powders, Phys. Procedia 12 2011
- [20] Ross Cunningham, Cang Zhao<sup>2</sup>, Niranjan Parab, Christopher Kantzos, Joseph Pauza, Kamel Fezzaa, Tao Sun, Anthony D. Rollett, “Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed x-ray imaging, Department of Materials Science and Engineering”, Carnegie Mellon University, 22 Feb 2019
- [21] Yuewei Ai et al. ,A three-dimensional numerical simulation model for weld characteristics analysis in fiber laser keyhole welding
- [22] G. Casalino, S.L. Campanelli, N. Contuzzi, A.D. Ludovico, Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel 2015
- [23] J.Y. Lee, S.H. Ko, D.F. Farson, C.D. Yoo, Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 2002
- [24] K.Q. Le, C. Tang και C.H. Wong, “On the study of keyhole-mode melting in selective laser melting process” Singapore Centre for 3D Printing, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, International Journal Of Thermal Science 145 (2019)
- [25] T. Eagar, N. Tsai, Temperature fields produced by traveling distributed heat sources, Weld. J. 62 1983
- [26] J. Tan, C. Tang, C. Wong, A computational study on porosity evolution in parts produced by selective laser melting, Metall. Mater. Trans. 2018
- [27] Liqun Li, Genchen Peng, Jiming Wang, Jianfeng Gong, Shenghao Meng , “Numerical and experimental study on keyhole and melt flow dynamics during laser welding of aluminium alloys under subatmospheric pressures”
- [28] S.J. Katayama, Handbook of Laser Welding Technologies, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2013, pp. 510–512.
- [29] S.J. Katayama, Y. Naito, S. Uchiumi, M. Mizutani, Physical phenomena and Porosity prevention mechanism in Laser-Arc Hybrid welding, 2006
- [30] Jyun-Rong Zhuang, Yee-Ting Lee, Wen-Hsin Hsieh, An-Shik Yang, “Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti6Al4V powder”, Optics and Laser Technology, National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan, 2018.



- [31] D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, Int. Mater Rev.
- [32] Kenneth C. Mills, “Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys”, National Physical Laboratory, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England 2002
- [33] <https://www.comsol.com/multiphysics/marangoni-effect> [online] accessed at 2020
- [34] Y. Su, Z. Li, K. C. Mills, Equation to estimate the surface tensions of stainless steels, Proceedings of the iv international conference/high temperature capillarity, Department of Materials, Imperial College, London SW7 2AZ, UK, 2005
- [35] Edward Siegel, Optical reflectivity of liquid metals at their melting temperatures, General Motors Technical Center, Michigan 14 Mar 2007
- [36] Choong S. Kim, Thermophysical Properties of Stainless Steels, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, September 1975
- [37] Kenneth C. Mills, Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys, Woodhead Publishing Ltd and ASM International National Physical Laboratory, Cambridge, England, 2002
- [38] J. P. Holman, Heat Transfer, Tenth Edition, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Southern Methodist University, 2010
- [39] Umberto Scipioni Bertoli, Alexander J. Wolfer, Manyalibo J. Matthews, Jean-Pierre R. Deplanque, Julie M. Schoenung, “On The Limitations of Volumetric Energy Density as a Design Parameter for Selective Laser Melting”, Department of Chemical Engineering and Materials Science, University of California, Irvine, United States, 2016