



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΚΑ ΤΗΣ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ SLM ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΛΑΖΑΡΟΣ – ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ

ΔΙΠΛ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Δρ. Άγγελος Π. Μαρκόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ SLM ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΛΑΖΑΡΟΣ – ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ

ΔΙΠΛ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

Διδακτορική διατριβή που υποβλήθηκε στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος

Μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής

1. Α. Μαρκόπουλος, Αν. Καθηγητής ΣΜΜ Ε.Μ.Π, μέλος της Σ.Ε. (επιβλέπων)
2. Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής ΣΜΜ Ε.Μ.Π, μέλος της Σ.Ε.
3. Σ. Παπαευθυμίου, Αν. Καθηγητής ΣΜΜΜ Ε.Μ.Π, μέλος της Σ.Ε.
4. Α. Αντωνιάδης, Καθηγητής ΣΜΠΔ Π.Κ.
5. Γ. Βοσνιάκος, Καθηγητής ΣΜΜ Ε.Μ.Π
6. Β. Σπιτάς, Αν. Καθηγητής ΣΜΜ Ε.Μ.Π
7. Π. Μπενάρδος, Επ. Καθηγητής ΣΜΜ Ε.Μ.Π

Ημερομηνία προφορικής εξέτασης: 31/10/2022

***"With four parameters I can fit an elephant,
with five I can make him wiggle his trunk"***

Enrico Fermi

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Αναπλ. Καθηγητή κ. Άγγελου Μαρκόπουλου. Στα κεφάλαια που ακολουθούν έγινε προσπάθεια ο λόγος να είναι αυστηρά επιστημονικός, με τα λεχθέντα να στηρίζονται αποκλειστικά σε αντικειμενικά δεδομένα και κριτήρια. Να μου επιτραπεί όμως σε αυτές τις αρχικές παραγράφους να «ξεφύγω» από το συγκεκριμένο αυστηρό πλαίσιο και να αναφερθώ για λίγο στις «μη επιστημονικές» πτυχές.

Η επιλογή μου να συνεχίσω τις μεταπτυχιακές σπουδές σε επίπεδο εκπόνησης διδακτορικής διατριβής οφείλεται αφενός στην αυθόρμητη αγάπη που έχω για την επιστήμη και την έρευνα, αφετέρου στην εκτίμηση και τον σεβασμό που μου ενέπνευσαν το Ίδρυμα στο οποίο είχα την χαρά και τιμή να φοιτήσω, και οι καθηγητές που το υπηρετούν. Ξεκινώντας από τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μαρκόπουλο, μπορώ με βεβαιότητα να πω ότι αποτέλεσε και αποτελεί έναν πραγματικό δάσκαλο, πρότυπο επιστημονικής, επαγγελματικής και ηθικής ακεραιότητας, ο οποίος δεν περιορίστηκε ποτέ στα τυπικά καθήκοντα ενός επιβλέποντα, αλλά αντίθετα προσπαθεί ακούρατος να πράξει το βέλτιστο για τους φοιτητές του, ακόμα και με σημαντικό προσωπικό κόστος. Δίπλα στον κ. Μαρκόπουλο έμαθα πολλά, με σημαντικότερα την εμπιστοσύνη σε κάποιον, ακόμη κι αν οι συμβουλές του δε μου είναι απολύτως κατανοητές τη συγκεκριμένη στιγμή και το ότι δεν υπάρχουν μικρά και μεγάλα λάθη παρά μόνο λάθη, τα οποία καλό θα ήταν να αποφεύγουμε. Ο κ. Μανωλάκος αποτελεί αναμφισβήτητο σημείο αναφοράς για το εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών, αλλά και συνολικά για τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Ταυτόχρονα όμως παραμένει πάντα προσηνής, κοντά στους φοιτητές, και με τις συμβουλές και παραινήσεις του να αποτελούν πολύτιμη παρακαταθήκη. Τον κ. Παπαευθυμίου τον γνώρισα στα πλαίσια των μεταπτυχιακών μου σπουδών και μέσα από τις συζητήσεις μας διαπίστωσα και εκτίμησα αφενός το εξαιρετικά υψηλό επιστημονικό του υπόβαθρο, και αφετέρου την αφοσίωσή του στο να στηρίζει κάθε προσπάθεια για πρόοδο και αριστεία. Τέλος, οφείλω να αναφερθώ στους καθηγητές κ. Βοσνιάκο και κ. Μπενάρδο οι οποίοι, εκτός από την ακαδημαϊκή, ερευνητική και εκπαιδευτική προσφορά τους, συνεισφέρουν στην απρόσκοπτη λειτουργία του εργαστηρίου.

Εκτός των καθηγητών μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλα τα υπόλοιπα μέλη της «οικογένειας» του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα τον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο, ο οποίος με τις γνώσεις και την προθυμία που τον διακρίνει αποτελούσε πάντα και όποτε χρειάστηκε πολύτιμη βοήθεια, το τεχνικό προσωπικό, και πιο συγκεκριμένα τον κ. Νικόλαο Μελισσά και Κωσταντίνο Κερασιώτη, οι οποίοι με την εμπειρία τους δίνουν βέλτιστες λύσεις σε οτιδήποτε πρόβλημα προκύπτει και τέλος την κα Μαριάννα Βασιλείου, η οποία από την γραμματεία του εργαστηρίου διευθετεί με τον καλύτερο τρόπο οτιδήποτε γραφειοκρατικής φύσης πρόβλημα ανακύπτει.

Όμως εκτός από τις γνώσεις που αποκόμισα κατά την εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής, μου δόθηκε η ευκαιρία να γνωρίσω και να συνεργαστώ με ξεχωριστά άτομα, μερικά από τα οποία έχω την χαρά και την τιμή να θεωρώ πλέον φίλους μου. Θα ήθελα λοιπόν να τους πω ένα μεγάλο ευχαριστώ και να σημειώσω το πόσο σημαντικό είναι να περιτριγυρίζεται κανείς στην καθημερινότητά του από οικεία πρόσωπα. Ο Δρ. Νίκος Κάρκαλος και ο Παναγιώτης Καρμίρης είναι πλέον στενοί φίλοι και εξαιρετικοί συνεργάτες. Οι υποψήφιοι διδάκτορες Δημήτρης Σκόνδρας-Γιούσιος, Μαρία Μπαλάνου, Βασιλική Αλεξοπούλου και Γιάννης Χριστοδούλου αποτελούν τα μέλη μιας δεμένης ομάδας με υψηλούς στόχους και αξίες, ενώ ο Γιάννης Παπαντωνίου είναι ένα ιδιαίτερα προσφιλές πρόσωπο. Τέλος, η κα Χρυσή Γιακουμίδα συνάδελφος και φίλη η οποία χρόνια με ακούει με υπομονή και κατανόηση.

Κλείνοντας οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην μητέρα μου και την αδελφή μου, οι οποίες με στήριξαν αμέριστα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και πίστεψαν σε εμένα ακόμα και όταν εγώ δεν ήμουν τόσο σίγουρος για

τον εαυτό μου. Χωρίς την βοήθεια και την συμπαράστασή τους είναι βέβαιο πως δε θα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω επιτυχώς τους κύκλους σπουδών μου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεχνολογίες κατασκευής μέσω προσθήκης υλικού (Additive Manufacturing – AM) αποτελούν μια πραγματική επανάσταση στον τρόπο αντίληψης και προσέγγισης των διαδικασιών σχεδιασμού και κατασκευής, με τα τεμάχια πλέον να μην περιορίζονται σε πρωτότυπα ή εξαιρετικά υψηλού κόστους, αλλά και σε λειτουργικά ευρείας χρήσης εξαρτήματα. Στην πραγματικότητα, η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί ένα σύνολο διαφορετικών μεθόδων και τεχνολογιών, οι οποίες μοιράζονται το κοινό χαρακτηριστικό της κατασκευής τεμαχίων αρχικά σχεδιασμένων σε CAD μέσω επιλεκτικής προσθήκης και σύνδεσης στοιχειωδών όγκων υλικού. Οι μέθοδοι AM διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς τα υλικά που δύνανται να διαχειριστούν και να αξιοποιήσουν, τους φυσικούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούν για την επιλεκτική εναπόθεση και σύνδεση των στοιχειωδών όγκων υλικού, και εντέλει την προβλεπόμενη χρήση των τεμαχίων που κατασκευάζονται. Η Επιλεκτική Τήξη με Χρήση Laser (Selective Laser Melting – SLM) αποτελεί ίσως την πλέον διαδεδομένη μέθοδο για κατασκευή μεταλλικών τεμαχίων, με το αντικείμενο να κατασκευάζεται μέσω της επιλεκτικής τήξης με χρήση δέσμης laser του υλικού που βρίσκεται υπό την μορφή κλίνης πούδρας και σε επάλληλες στρώσεις πάχους μερικών μικρομέτρων. Οι διαφορετικές μέθοδοι μελέτης της συγκεκριμένης κατεργασίας μπορούν να διακριθούν σε πειραματικές και υπολογιστικές με ανάπτυξη αριθμητικών ή/και αναλυτικών μοντέλων προσομοίωσης, ενώ οι υπολογιστικές προσεγγίσεις μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν ανάλογα με τη χρονική και χωρική τους κλίμακα σε μοντέλα μικρο-, μεσο- και μακροκλίμακας (micro-, meso- and macroscale) και σε αυτά πολλαπλής κλίμακας (multiscale). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή γίνεται ανάπτυξη και παρουσίαση μεθοδολογίας μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM σε επίπεδο μικροκλίμακας με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM). Η διατριβή περιλαμβάνει έξι βασικά κεφάλαια, στα οποία γίνεται η απαραίτητη βιβλιογραφική ανασκόπηση, διατυπώνεται με σαφήνεια ο σκοπός / στόχος της εργασίας, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται οι προτεινόμενες μέθοδοι και λύσεις στα επιστημονικά ζητήματα που εξαρχής τέθηκαν. Κατόπιν συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν, ενώ τέλος προτείνονται βασικές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Το 1^ο κεφάλαιο αποτελεί την απαραίτητη εισαγωγή στις βασικές έννοιες των κατεργασιών και κατ' επέκταση του AM. Αρχικά γίνεται μια σύντομη γενική αναφορά στις κατεργασίες, καθώς επίσης και μια ιστορική αναδρομή στις κατεργασίες AM. Ακολουθεί σύγκριση μεταξύ των συμβατικών κατεργασιών και του AM, με έμφαση στις διαφορές που υφίστανται ανάμεσα στις CNC κατεργασίες και το AM. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στα βασικά πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και προκλήσεις των μεθόδων AM, ώστε να καταστεί σαφές ότι καμία μέθοδος δε μπορεί να χαρακτηριστεί και να θεωρηθεί ανώτερη (ή κατώτερη) από τις υπόλοιπες, αλλά υπάρχουν κατάλληλες και μη, για την κατασκευή του εκάστοτε τεμαχίου. Τέλος, ολοκληρώνοντας το 1^ο κεφάλαιο και χάριν πληρότητας, γίνεται μια ταξινόμηση και σύντομη περιγραφή των βασικών και πλέον διαδεδομένων μεθόδων AM, ώστε να είναι κατά το δυνατόν σαφέστερα τα χαρακτηριστικά και οι μηχανισμοί που διαφοροποιούν την κατεργασία SLM, η οποία και είναι το θέμα της παρούσας διατριβής, από τις λοιπές μεθόδους AM.

Το 2^ο κεφάλαιο επικεντρώνεται σε μια συγκεκριμένη κατηγορία μεθόδων AM, αυτή της επιλεκτικής σύντηξης κλίνης πούδρας με χρήση δέσμης laser (Laser Powder Bed Fusion – L-PBF), στην οποία ανήκει και η κατεργασία SLM. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των διατάξεων L-PBF, καθώς επίσης και τα βασικά δομικά συστήματα και υποσυστήματα που τυπικά αυτές διαθέτουν. Στην συνέχεια γίνεται η απαραίτητη διάκριση ανάμεσα στις μεθόδους επιλεκτικής συσσωμάτωσης με χρήση δέσμης laser (Selective Laser Sintering – SLS) και επιλεκτικής τήξης με χρήση δέσμης laser (Selective Laser Melting – SLM), ώστε να καταστούν σαφή τα κοινά χαρακτηριστικά αλλά και οι σημαντικές διαφορές που αυτές έχουν. Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση των διαφόρων υλικών και κραμάτων που χρησιμοποιούνται συνήθως σε κατεργασίες SLM και περιλαμβάνουν σιδηρούχα κράματα, κράματα τιτανίου και κράματα νικελίου. Κατόπιν παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι κατεργασίας σε ένα σύστημα SLM, καθώς επίσης και οι κυριότερες κατηγορίες ατελειών που προκύπτουν σε τεμάχια κατασκευασμένα με SLM. Η

συγκεκριμένη υπο-ενότητα θεωρείται εξαιρετικά σημαντική καθώς προκύπτει ότι οι παράμετροι κατεργασίας σχετίζονται άμεσα με τη δημιουργία και ανάπτυξη ατελειών, ενώ ταυτόχρονα οι βασικές αυτές παράμετροι καθορίζουν και επιβάλλουν τα φαινόμενα και τους μηχανισμούς που οφείλουν να ληφθούν υπ' όψιν κατά την μελέτη και μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM. Το 2^ο κεφάλαιο κλείνει με την ταξινόμηση των διαφόρων προσεγγίσεων μελέτης της κατεργασίας SLM, με έναν αρχικό διαχωρισμό σε πειραματικές μελέτες και σε μελέτες με χρήση αριθμητικών μεθόδων και μοντέλων. Τέλος γίνεται διάκριση των αριθμητικών και μοντελιστικών μεθόδων συναρτήσει της χωρικής και χρονικής τους κλίμακας, οριοθετώντας κατ' αυτόν τον τρόπο το βασικό ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Με το 3^ο κεφάλαιο, το οποίο αναφέρεται στη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM σε επίπεδο μικρο-κλίμακας με χρήση FEM ολοκληρώνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση. Γίνεται αρχικά μια διάκριση σε μοντελοποίηση φαινομένων μετάδοσης θερμότητας και μοντελοποίηση φαινομένων ρευστομηχανικής, ενώ δίνεται έμφαση στο ποια φυσικά φαινόμενα και μηχανισμοί απαιτείται να ληφθούν υπ' όψιν καθώς επηρεάζουν σημαντικά την κατεργασία, πώς αυτά θα περιγραφούν ρεαλιστικά, και τέλος πώς το μοντέλο θα έχει ρεαλιστικές απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ. Επίσης στα πλαίσια του 3^{ου} κεφαλαίου αναφέρονται οι διαφορετικές καταστάσεις στις οποίες συναντάται η περιοχή τήξης (conduction mode – CM, transition mode – TM και keyhole mode – KM) και ποια μέθοδος μοντελοποίησης θεωρείται κατάλληλη για προσομοίωση της κάθε μιας από αυτές. Βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση είναι η εκτενής χρήση πολύπλοκων σχέσεων, οι οποίες εξαρτώνται από αριθμό ημι-εμπειρικών συντελεστών και παραμέτρων, καθώς επίσης και η μη συστηματική αντιμετώπιση των φυσικών φαινομένων και μηχανισμών. Ως βασικός λοιπόν στόχος της διατριβής τίθεται η παρουσίαση μεθόδου μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM σε μικροκλίμακα με χρήση FEM, στην οποία ελαχιστοποιείται κατά το δυνατόν η χρήση ημι-εμπειρικών συντελεστών, ενώ οι απαραίτητες απλοποιήσεις γίνονται με γνώμονα την επιστημονική συνέπεια ως προς τους υποκείμενους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναπτύσσεται μέθοδος μοντελοποίησης της περιοχής τήξης για συνθήκες CM. Το μοντέλο είναι αμιγώς θερμικό, με την δέσμη laser να προσεγγίζεται ως ογκομετρική πηγή θερμότητας Gaussian κατανομής (ως προς το επίπεδο της κλίνης πούδρας και συναρτήσει του πάχους της κλίνης πούδρας). Έμφαση δίνεται στην αποφυγή κατά το δυνατόν της χρήσης ημι-εμπειρικών συντελεστών και στον ακριβή προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων και του συντελεστή απορρόφησης της κλίνης πούδρας, ενώ η επικύρωση του μοντέλου έγινε με βάση πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας. Βασικό συμπέρασμα είναι κατ' αρχήν η δυνατότητα να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια η περιοχή τήξης σε CM με χρήση αμιγώς θερμικού μοντέλου, το οποίο προβλέπει τα χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις (πλάτος και βάθος) που αυτή αποκτά για διαφορετικές ογκομετρικές πυκνότητες ενέργειας (Volumetric Energy Density – VED). Επίσης, αν και το μοντέλο δε συμπεριλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής και ως εκ τούτου περιορίζονται σημαντικά οι βαθμοί ελευθερίας και οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο, δύναται να προβλέψει τον σχηματισμό balling για συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας, ενώ τέλος από τον υπολογισμό των απωλειών προκύπτει ότι οι σημαντικότερες θερμικές απώλειες αφορούν στην απομάκρυνση ενέργειας λόγω εξάτμισης υλικού, οι αμέσως λιγότερες απώλειες είναι λόγω ακτινοβολίας, ενώ οι απώλειες λόγω συναγωγής είναι οι μικρότερες.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μεθοδολογία μοντελοποίησης της περιοχής τήξης για CM, TM και KM και πάλι μέσω αμιγώς θερμικού μοντέλου. Η δέσμη laser μοντελοποιείται με τη χρήση επιφανειακής 2D πηγής θερμότητας κατανομής Gauss, ενώ με τη χρήση διανυσμάτων θέσης συνυπολογίζεται η μεταβολή της πυκνότητας ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης. Η εξάτμιση του υλικού μοντελοποιείται με χρήση παραμορφώσιμης γεωμετρίας, με τον συντελεστή επανασύνδεσης του υλικού να αποτελεί τη μοναδική ημι-εμπειρική παράμετρο που χρήζει προσδιορισμού. Συμπεραίνεται ότι ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού έχει σχεδόν γραμμική εξάρτηση από την VED (Volumetric Energy Density), ενώ ο ρυθμός εξάτμισης υλικού μπορεί να

περιγραφεί μέσω εκθετικής σχέσης συναρτήσει της VED. Τέλος, προτείνεται η χρήση ενός 2D μοντέλου για τον ταχύτερο υπολογισμό του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού. Το φυσικό σύστημα ανάγεται σε 2D και προσομοιώνεται ένα κάθετο επίπεδο της περιοχής τήξης, ενώ η κινούμενη δέσμη laser προσεγγίζεται από πηγή θερμότητας κατανομής Gauss μεταβαλλόμενης ισχύος και διαμέτρου. Τα προαναφερθέντα μοντέλα επικυρώνονται και πάλι με βάση πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας.

Στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται σύζευξη των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας και των εξισώσεων ρευστομηχανικής ώστε να προκύψει ένα θερμοϋδραυλικό μοντέλο. Για λόγους απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο το μοντέλο επιλύεται και πάλι ως 2D. Λαμβάνονται υπ' όψιν ως οριακές συνθήκες η πίεση ανάκρουσης και η ανάπτυξη επιφανειακών τριχοειδών τάσεων λόγω καμπυλότητας και κλίσεως θερμοκρασίας, ενώ για την ρεαλιστικότερη μοντελοποίηση των διαφορετικών φάσεων του υλικού (στερεή, ημίρρευστη και ρευστή) ως προς την ρευστομηχανική τους συμπεριφορά προτείνεται και αποδεικνύεται κατάλληλη η χρήση σημειακού περιορισμού σε συνδυασμό με συνάρτηση «εξομάλυνσης» ταχύτητα. Τέλος, η ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας ορίζεται πλέον συναρτήσει του ρυθμού εξάτμισης υλικού και της προβλεπόμενης κίνησης του ρευστού. Προκύπτει ότι οι θερμοκρασίες που υπολογίζονται από το αμιγώς θερμικό μοντέλο είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες του θερμοϋδραυλικού λόγω συνυπολογισμού αγωγής και συναγωγής στην μετάδοση θερμότητας στο θερμοϋδραυλικό μοντέλο. Οι ταχύτητες που υπολογίζονται στον μεγαλύτερο όγκο του ρευστού και ημίρρευστου υλικού είναι μικρότερες από 10 m/s, ενώ σημειακά υπολογίζονται και υψηλότερες ταχύτητες της τάξης των 20 m/s, τιμές σύμφωνες με την αντίστοιχη βιβλιογραφία. Τέλος, επισημαίνεται η μη καταλληλότητα της χρήσης FEM για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής καθώς προκύπτουν σημαντικά προβλήματα σύγκλισης και διαχείρισης μεγάλων παραμορφώσεων της ελεύθερης επιφάνειας.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με τις ενότητες των Συμπερασμάτων και των Προτάσεων για Μελλοντική Έρευνα. Στις ενότητες αυτές αρχικά παρατίθενται εν συντομία τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διδακτορική διατριβή, ενώ στην συνέχεια, και με βάση πάντα τα προαναφερθέντα συμπεράσματα, προτείνονται βασικές κατευθυντήριες γραμμές και στόχοι για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο.

ABSTRACT

Additive Manufacturing technologies consist a real revolution in the perception of functional components' design and manufacturing. As a matter of fact, 3D printing is a class of different methods and technologies that share the characteristic of building a component by a CAD design through selective addition and adhesion of elemental volumes of material. AM differ from each other according to the utilized material, the physical principles that employ and the final usage of the produced component. Selective Laser Melting (SLM) is probably the most common method for manufacturing metallic components. A focused beam selectively melts the material, which has the form of a thin layer of powder. The study methods of SLM are categorized as experimental and numerical. The later are subdivided in micro-, meso-, macro- and multiscale, based on their temporal and space scale. The current Ph.D. Thesis develops and presents a modeling methodology in microscale of the SLM process by using the Finite Element Method (FEM). It is divided in to 6 chapters that include the necessary review of the literature, the aim and purpose of the essay and solutions to the scientific issues that were originally set. Finally, the main conclusions are summarized and directions for further investigation are suggested.

The 1st chapter introduces the basic concepts of manufacturing, including AM. A brief presentation of the manufacturing processes is followed by a history review regarding AM and a comparison between CNC machining and AM. The basic pros, cons and challenges of AM are listed. The first chapter is concluded with an overview of the most common and widely adopted AM methods. The aim is to clarify what distinguishes SLM from the rest AM technologies.

The 2nd chapter focuses on the Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), which includes SLM. The basic operation principles of a L-PBF set up are presented along with their main systems and subsystems. The Selective Laser Sintering (SLS) methods are distinguished from the SLM, by pointing out both their differences and their similarities and the various materials and alloys usually used, such as ferrous, titanium and nickel alloys, are described. Moreover, the main machining parameters and the most common defects that occur are covered. The second chapter is concluded with the classification of the SLM study approaches in experimental and numerical, with the latter being further divided in micro-, meso-, macro- and multiscale.

With chapter 3 that concerns the modeling of SLM process in microscale by using FEM the literature review is completed. At first, a distinction between the modeling methodologies for heat transfer and fluid dynamics is made. Special attention is paid to which specific phenomena and physical mechanisms have to be taken into consideration since they have a significant impact on the machining results, while, at the same time, the developed model will have realistic demands in computational time and power. Moreover, the different main modes of the melting pool in SLM (conduction mode-CM, transition mode-TM and keyhole mode-KM) are listed, and which modeling methodology can be considered as optimal for the simulation of each mode is suggested. The main deduced conclusion is the wide utilization of semiempirical relations and coefficients to describe the underlying physical mechanisms and the lack of a common modeling methodology frame. Thus, the main purpose of the current Ph.D. Thesis is specified in presenting a robust modeling methodology to simulate the SLM process in microscale, with the minimum use and need of semiempirical coefficients.

In the 4th chapter a heat transfer model to simulate the CM is developed and presented. The laser beam is modeled as a volumetric heat source with Gaussian distribution as to the powder bed level and the powder bed thickness. The use of semiempirical coefficients is avoided, if possible, while extra attention is paid to the exact determination of the thermophysical properties and the absorptivity of the powder bed. The validation of the model was made based on experimental results from the relevant literature. The main conclusion was that the current thermal model can accurately simulate the melting pool in CM, and predict its main dimensions and characteristics for different

Volumetric Energy Densities (VED). Moreover, although the model does not solve the fluid dynamics differential equations, it can predict the balling formation for certain machining parameters. Finally, it was deduced that the heat loss due to material ablation is the most significant, followed by the heat losses due to radiation and convection.

In the 5th chapter, again, a thermal model was developed and presented to simulate the CM, TM and KM of the melting pool. The laser beam was now approached by a 2D Gaussian surface heat source, while, the change in power density due to different incident angles during the process was estimated by utilizing position vectors. The material ablation was simulated by using deformable geometry, with the material recombination factor being the only coefficient that needs to be determined. It was concluded and proposed a linear correlation between the material recombination factor and the VED, while an exponential relation of the material ablation rate as function of VED was deduced. Finally, a 2D model was developed and proposed for the quicker determination of the material ablation rate coefficient. The physical system came down to a 2D where only a plane was modeled and simulated. The moving laser beam was approached as a Gaussian 2D surface heat source with time dependent power and radius. Again, the aforementioned models were validated through experimental results from the literature.

In the 6th chapter, coupling between the heat transfer and the fluid mechanics equations is made, to develop the thermohydraulic model. For keeping the computational power and time requirements in feasible level the model is again solved as 2D based on the methodology that was previously presented in chapter 5. The recoil pressure, along with the stresses due to the curvature of the free surface and the temperature gradients were considered, while the different phases of the material (solid, semifluid and liquid) was modeled by utilizing pointwise constraint and a proper smoothing function for the semifluid phase. Finally, the free surface velocity is calculated and captures not only the material ablation rate but also the fluid movement. From the simulation results it is deduced that the temperatures that are calculated by the pure thermal model are higher than the respective ones from the hydrothermal model, since in the hydrothermal model both the heat transfer due to conduction and convection are considered. The velocities are typically lower than 10 m/s, while there are some points that in certain times reach higher velocity near 20 m/s, velocity values that are in line with the respective literature. Finally, it was pointed out that FEM is not suggested as a numerical method for solving the fluid dynamics differential equations since convergence problems may occur, especially when large deformations of the free surface is taking place.

In the final two sections the main conclusions that were emerged by the current Ph.D. Thesis were listed and presented in brief, while, based on these conclusions, guidelines and topics for future research were suggested.

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Τεχνική και Επιστημονική Ορολογία		
Abbreviation	Term	Όρος στα Ελληνικά
3DP	3D Printing	Τρισδιάστατη Εκτύπωση
AM	Additive Manufacturing	Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής
BJP	Binder Jetting Printing	Εκτύπωση με Εναπόθεση Συγκολλητικού Μέσου
CAM-LEM	Computer Aided Laminated Engineering Materials	Διεργασίες Επεξεργασίας Φυλλοειδών Υλικών Μέσω Υπολογιστή
CJP	ColorJet Printing®	Εκτύπωση ColorJet®
CM	Conduction Mode	Κατάσταση Αγωγής
CNC	Computer Numerical Control	Αριθμητικού Ελέγχου μέσω Υπολογιστή
DED	Direct Energy Deposition	Εναπόθεση με Κατευθυνόμενη Δέσμη Ενέργειας
DLD	Direct Laser Deposition	Εναπόθεση με Κατευθυνόμενη Δέσμη Laser
DLP	Digital Light Processing	Χωρικός Διαμορφωτής Φωτός
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	Συσσωμάτωσης Μετάλλων με Laser
EBM	Electron Beam Melting	Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων
FDM	Fused Deposition Modeling	Εναπόθεση Τηγμένου Υλικού
IJP	Inkjet Printing	Εκτύπωση με Χρήση Κεφαλής Inkjet
KM	Keyhole Mode	Κατάσταση Keyhole
LED	Linear Energy Density	Γραμμική Πυκνότητα Ενέργειας
LENS	Laser Engineered Net Shaping	Μορφοποίηση σε Τελική Μορφή με χρήση Laser
LOM	Laminated Object Manufacturing	Κατασκευή Μέσω Επάλληλων Φύλλων
L-PBF	Laser – Powder Bed Fusion	Κατεργασίες Σύντηξης Πούδρας σε Κλίνη Με Χρήση Δέσμης
MJ	Material Jetting	Κατεργασίες Εναπόθεσης Υλικού
PBDED	Powder Based – Direct Energy Deposition	Εναπόθεση Υλικού Πούδρας με Χρήση Κατευθυνόμενης Δέσμης Ενέργειας
PBF	Powder Bed Fusion	Σύντηξης Πούδρας σε Κλίνη
PBIH	Powder Bed / Inkjet Head	Κλίνη Πούδρας / Κεφαλή Inkjet
PSL	Plastic Sheet Lamination	Κατασκευή Μέσω Στρωματοποίησης Φύλλων Πλαστικού
RP	Rapid Prototyping	Ταχεία Πρωτοτυποποίηση
SED	Surface Energy Density	Επιφανειακή Πυκνότητα Ενέργειας
SLM	Stereolithography	Στερεολιθογραφία
SLM	Selective Laser Melting	Επιλεκτική Τήξη με Χρήση Laser

SLS	Selective Laser Sintering	Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Laser
TM	Transition Mode	Κατάσταση Μετάβασης
UC	Ultrasonic Consolidation	Ενοποίηση Μέσω Υπερήχων
VED	Volumetric Energy Density	Ογκομετρική Πυκνότητα Ενέργειας
WB-DED	Wire Based – Direct Laser Deposition	Εναπόθεση Υλικού Νήματος με Χρήση Κατευθυνόμενης Δέσμης Ενέργειας

Ορολογία Συμβόλων		
Σύμβολο	Μονάδες	Ορισμός
α	--	Θερμοκρασιακά εξαρτώμενος συντελεστή απορρόφησης
a_{hem}	--	Αδιάστατος όρος
α_1 & α_2	m	Συντελεστές αναλογίας φάσεων υλικού (υγρή και αέρια)
C_K	--	Αριθμητική σταθερά
C_P	W/kgK	Θερμοχωρητικότητα
C_1, C_2, C_3	--	Σταθερές που χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση πλέγματος
D	--	Αδιάστατος όρος
d_{LB}	m	Διάμετρος δέσμης laser
\vec{E}	V/m	Ηλεκτρικό πεδίο
ES	m	Μέγεθος στοιχείου
\vec{e}_z	--	Το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα της βαρύτητας
\vec{F}	N/m ³	Διάνυσμα τη συνιστώσας των δυνάμεων που δρουν στον όγκο του ρευστού
\vec{F}_{buoy}	N/m ³	Δυνάμεις άνωσης λόγω διαφοράς πυκνότητας
\vec{F}_{Darcy}	N/m ³	Δυνάμεις λόγω του όρου Darcy στην διεπιφάνεια της περιοχής τήξης με την πούδρα
\vec{F}_{surf}	N/m ³	Δυνάμεις λόγω επιφανειακών τάσεων
f_f	--	Το ποσοστό ισχύος που αντιστοιχεί στο εμπρός τμήμα της διπλής ημι-ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής Goldak
f_l	--	Ποσοστό της υγρής φάσης του υλικού
f_r	--	Το ποσοστό ισχύος που αντιστοιχεί στο πίσω τμήμα της διπλής ημι-ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής Goldak
f_s	--	Ποσοστό της στερεής φάσης του υλικού
HS	m	Διάστημα ανάμεσα σε δυο παράλληλες γραμμές σάρωσης
h_{conv}	W/m ² K	Συντελεστής συναγωγής

K_C	Ns/m^4	Σταθερά διαπερατότητας του πορώδους μέσου
k	W/mK	Θερμική αγωγιμότητα
k_B	J/K	Σταθερά Boltzmann
k_g	W/mK	Θερμική αγωγιμότητα αερίου της ατμόσφαιρας στον θάλαμο κατασκευής
k_{PB}	W/mK	Θερμική αγωγιμότητα πορώδους υλικού
k_s	W/mK	Θερμική αγωγιμότητα συμπαγούς υλικού
k_{SB}	W/m^2K^4	Σταθερά Stefan – Boltzmann
k_o	m^{-1}	Κυματαριθμός (wavenumber) υπό κενό
LED	J/m	Γραμμική πυκνότητα ενέργειας
L_m	J/kg	Λανθάνουσα θερμότητα τήξης σε $[J/kg]$
L_v	J/kg	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε
MC	$1/m$	Μέση καμπυλότητα
M_s	kg/m^3s	Πηγή μάζας
m	kg	Μάζα ανά άτομο υλικού σε
\dot{m}_v	kg/m^2s	Ρυθμός εξάτμισης του υλικού ανά μονάδα επιφάνειας
\vec{n}	--	Κάθετο διάνυσμα
\vec{n}_x	--	Την οριζόντια συνιστώσα του κάθετου διανύσματος
\vec{n}_y	--	Την κατακόρυφη συνιστώσα του κάθετου διανύσματος
PC	m/s	Τεχνητός όρος σημειακού περιορισμού ταχύτητας
P	W	Ονομαστική ισχύ της δέσμης laser
p	N/m^2	Πίεση
p_{rec}	N/m^2	Πίεση ανάκρουσης λόγω εξάτμισης υλικού
p_o	N/m^2	Πίεση περιβάλλοντος
\dot{Q}	W/m^3	Ογκομετρικός ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας
Q_{LB}^S	W/m^2	Επιφανειακή πυκνότητα ισχύος
Q_{LB}^V	W/m^3	Ογκομετρική πυκνότητα ισχύος
Q_{LBf}^V	W/m^3	Ογκομετρική πυκνότητα ισχύος του εμπρός τμήματος της διπλής ημι-ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής Goldak
Q_{LBf}^V	W/m^3	Ογκομετρική πυκνότητα ισχύος του πίσω τμήματος της διπλής ημι-ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής Goldak
\vec{q}	W/m^2	Ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας
\vec{q}_{ABL}	W/m^2	Ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας λόγω εξάτμισης υλικού
\vec{q}_{CONV}	W/m^2	Ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας λόγω συναγωγής
q_r	--	Πυκνότητα της ροής ενέργειας λόγω ακτινοβολίας σε αδιάστατη μορφή

\vec{q}_{RAD}	W/m ²	Ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας λόγω ακτινοβολίας
r_{GRAIN}	m	Μέση ακτίνα κόκκου της πούδρας
SC	1/m	Την καμπυλότητα της επιφάνειας
S_{LB}	m ²	Επιφάνεια της δέσμης laser σ
S_P	m ⁻¹	Ανηγμένη επιφάνεια της πούδρας ως προς τον όγκο της πορώδους κλίνης υλικού
T_m	K	Θερμοκρασία τήξης
T_{ref}	K	Θερμοκρασία αναφοράς
T_V	K	Θερμοκρασία βρασμού
T_{∞}	K	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
\vec{u}	m/s	Διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού
u_{LB}	m/s	Μέτρο ταχύτητας σάρωσης δέσμης laser
u_{mesh}	m/s	Μέτρο του κάθετου διανύσματος ταχύτητας πλέγματος
u_{sm}	m/s	Μέτρο ταχύτητα εξομάλυνσης πλέγματος
v_x	m/s	Μέτρο οριζόντιας συνιστώσας του διανύσματος της ταχύτητας
v_y	m/s	Μέτρο κατακόρυφης συνιστώσας του διανύσματος της ταχύτητας
V	m/s	Διάνυσμα της ταχύτητας
VED	J/m ³	Ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας
\vec{x}	m	Το διάνυσμα θέσης του απαραμόρφωτου πλέγματος
\vec{x}	m	Το διάνυσμα θέσης του παραμορφωμένου πλέγματος
x_{el}	m	Ο x ημι-άξονες της έλλειψης στην πηγή Goldak
$x_{f.el}$	m	Ο x ημι-άξονας της έλλειψης του εμπρός τμήματος της διπλής ημι-ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής Goldak
x_o	m	Μήκος της δέσμης laser
$x_{r.el}$	m	Ο x ημι-άξονας της έλλειψης του πίσω τμήματος της διπλής ημι-ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής Goldak
y_{el}	m	Ο y ημι-άξονες της έλλειψης στην πηγή Goldak
y_o	m	Πλάτος της δέσμης laser
z_{el}	m	Ο z ημι-άξονες της έλλειψης στην πηγή Goldak
Z_{OPD}	m	Το οπτικό βάθος διείσδυσης της δέσμης (Optical Penetration Depth – OPD)
Z_{PB}	m	Ονομαστικό πάχος στρώσης πούδρας
β	K ⁻¹	Συντελεστής θερμικής διαστολής
β_R	--	Αδιάστατος εμπειρικός συντελεστής επανασύνδεσης του υλικού
ΔT_{sf}	K	Θερμοκρασιακό εύρος ημί-ρευστης φάσης

δ_{sm}	--	Αδιάστατος συντελεστής εξομάλυνσης πλέγματος
ε	--	Συντελεστής εκπομπής
ε_0	s^4A^2/m^3kg	Ηλεκτρική διαπεροτότητα κενού
η	--	Συντελεστής απορρόφησης της δέσμης laser από το σύστημα της κλίνης
η_{ext}	m^{-1}	Συντελεστής απόσβεσης
η_{OPD}	--	Συντελεστής διόρθωσης για το συγκεκριμένο OPD
η_r	--	Δείκτης διάθλασης
κ	m^{-1}	Καμπυλότητα
K_{hyp}	--	Σταθερά που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση πλέγματος
K_{yeoh}	--	Σταθερά που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση πλέγματος
μ	$kg/m \cdot s$	Ιξώδες
μ_{hyp}	--	Σταθερά που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση πλέγματος
ρ	kg/m^3	Πυκνότητα του υλικού
$\rho_1 \& \rho_2$	kg/m^3	Πυκνότητες διαφορετικών φάσεων υλικού (υγρή και αέρια)
ρ_e	m^3kg/s^3A^2	Ηλεκτρική αγωγιμότητα
ρ_{PB}	kg/m^2	Πυκνότητα πορώδους υλικού
ρ_s	kg/m^2	Πυκνότητα του συμπαγούς υλικού
σ	--	Τυπική απόκλιση της Gaussian κατανομής
σ_{surf}	N/m	Επιφανειακή τάση
Φ_1	--	Εμπειρικός συντελεστής
Φ_2	--	Εμπειρικός συντελεστής
φ	--	Πορώδες
ξ	--	Αδιάστατο σημειακό ύψος
ω	s^{-1}	Συχνότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

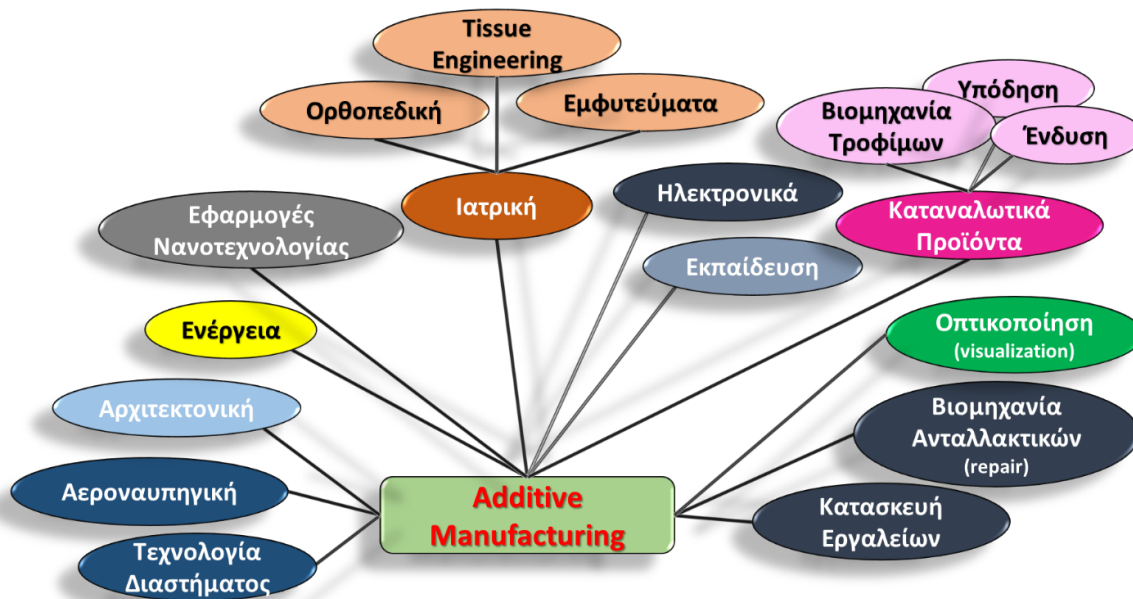
Ευχαριστίες.....	6
Εισαγωγή	8
Abstract	11
Ονοματολογία	13
1. Τρισδιάστατη Εκτύπωση – 3D Printing	
Μια Πραγματική Επανάσταση Στο Σχεδιασμό Και την Κατασκευή	20
1.1 ...μια σύντομη εισαγωγή.....	20
1.2 Συγκρίνοντας τις Μεθόδους AM με τις Κατεργασίες CNC.....	24
1.3 Πλεονεκτήματα και Αδυναμίες / Προκλήσεις του AM	27
1.4 Ταξινόμηση των Μεθόδων AM – Βασικές Μέθοδοι AM	31
1.4.1 Vat Polymerization Methods	32
1.4.2 Μέθοδοι Εναπόθεσης Τηγμένου Υλικού	35
1.4.3 Διεργασίες Σύντηξης Πούδρας σε Κλίνη.....	38
1.4.4 Μέθοδοι με Εναπόθεση Συγκολλητικού Μέσου	40
1.4.5 Τεχνολογίες Εναπόθεσης Υλικού	42
1.4.6 Διεργασίες AM με Χρήση Επάλληλων Φύλλων.....	43
1.4.7 Μέθοδοι Κατευθυνόμενης Δέσμης Ενέργειας	45
2. Κατεργασίες Σύντηξης Πούδρας σε Κλίνη Με Χρήση Δέσμης LASER (L-PBF)	
Κατεργασία Επιλεκτικής Τήξης (SLM).....	47
2.1 Κατεργασίες Σύντηξης Πούδρας σε Κλίνη (PFB) – Βασικές Αρχές και διαταξεις.....	47
2.1.1 Η Πλατφόρμα Κατασκευής.....	48
2.1.2 Πηγή Laser και Συστήματα Σάρωσης.....	48
2.1.3 Διατάξεις Τροφοδοσίας και Διάστρωσης της Πούδρας	51
2.1.4 Επικουρικά Συστήματα.....	52
2.2 Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Laser – SLS & Επιλεκτική Τήξη με Χρήση Laser – SLM	53
2.3 Συνήθη υλικά σε κατεργασίες SLM.....	55
2.3.1 Σιδηρούχα Κράματα	56
2.3.2 Κράματα Τιτανίου	57
2.3.3 Κράματα Νικελίου	59
2.4 Βασικές Παράμετροι Κατεργασίας SLM Και Πιθανές Ατέλειες.....	61
2.5 Μέθοδοι και Προσεγγίσεις στη Μελέτη της Κατεργασίας SLM	69
3. Μοντελοποίηση της Κατεργασίας SLM σε Επίπεδο Μίκρο-κλιμακας & Μέθοδος FEM	72
3.1 Μοντελοποίηση Φαινομένων Μετάδοσης Θερμότητας.....	72

3.2 Μοντελοποίηση Φαινομένων Ρευστομηχανικής	80
3.3 Διαφορετικές Καταστάσεις της Περιοχής Τήξης (Melting Pool Modes).....	83
3.4 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM).....	89
4. Μοντελοποίηση του Conduction Mode	93
4.1 Εξισώσεις Περιγραφής του Συστήματος	94
4.1.1 Προσδιορισμός του ποσοστού απορρόφησης	94
4.1.2 Θερμοφυσικές Ιδιότητες, Συντελεστής Συναγωγής και Απώλειες Λόγω Εξάτμισης	97
4.1.3 Όγκος Ελέγχου και Διακριτοποίηση	100
4.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	101
4.2.1 Χαρακτηριστικά της Περιοχής Τήξης	101
4.2.2 Θερμικές Απώλειες και Ρυθμός Ψύξης	106
4.3 Συμπεράσματα	109
5. Μοντελοποίηση του Transition Mode & Keyhole Mode.....	111
5.1 Εξισώσεις Περιγραφής του Συστήματος	111
5.1.1 Εξισώσεις Μεταφοράς Θερμότητας	112
5.1.2 Εξάτμιση Υλικού – Παραμορφώσιμη Γεωμετρία.....	115
5.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	118
5.2.1 Συντελεστής Επανασύνδεσης του Υλικού	118
5.2.2 Χαρακτηριστικά της Περιοχής Τήξης	120
5.3 Μοντέλο 2D	128
5.4 Συμπεράσματα	131
6. Θερμοϋδραυλικό Μοντέλο	133
6.1 Θερμικό Μοντέλο και Υπολογισμός Συντελεστή Επανασύνδεσης Υλικού	134
6.2 Θερμοϋδραυλικό Μοντέλο	139
6.2.1 Αποτελέσματα & Παρατηρήσεις	142
6.3 Συμπεράσματα	145
7. Συμπεράσματα	147
7.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	150
Βιβλιογραφία	151

1. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ – 3D PRINTING ΜΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

1.1 ...ΜΙΑ ΣΥΝΤΟΜΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι όροι Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής¹ (Additive Manufacturing – AM) ή Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing – 3DP) ή Ταχεία Πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping – RP) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στον σύγχρονο επιστημονικό και τεχνολογικό λόγο, ενώ η συγκεκριμένη τεχνολογία χαρακτηρίζεται ως μια πραγματική επανάσταση στον τρόπο σχεδιασμού, κατασκευής και δημιουργίας τεμαχίων. Ταυτόχρονα, οι εφαρμογές που βρίσκει το AM δεν περιορίζονται μόνο στα αυστηρά πλαίσια των κατεργασιών, αλλά απλώνονται σε ένα ευρύ φάσμα πρακτικών και μεθόδων στο σύνολο της σύγχρονης επιστημονικής, ακαδημαϊκής και παραγωγικής πραγματικότητας. Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζονται διαγραμματικά τα διαφορετικά πεδία εφαρμογής του AM (Srivastava and Sudarshan, 2016). Όμως για να καταστεί σαφές γιατί το AM αποτελεί μια πραγματική καινοτομία, και γιατί μπορεί να αναδιαμορφώσει ριζικά τον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής, πρέπει πρώτα να γίνει μια πολύ σύντομη αναφορά στο τι είναι οι κατεργασίες, ποιες είναι οι βασικές κατηγορίες των συμβατικών κατεργασιών, και εντέλει, ποια η θεμελιώδης διαφορά αυτών με το AM.



Εικόνα 1.1 Διαγραμματική απεικόνιση των διαφορετικών πεδίων εφαρμογής του 3DP

¹ Στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή γίνεται προσπάθεια ακριβούς και λειτουργικής απόδοσης της ορολογίας στην Ελληνική γλώσσα. Λαμβάνοντας όμως υπ' όψιν ότι, επί του πρακτέου, ορισμένοι Αγγλικοί όροι έχουν επικρατήσει των αντίστοιχων Ελληνικών, εκτιμάται πως είναι επιστημονικά σωστό, αλλά και με πρακτική αξία, να χρησιμοποιούνται, σε αυτές τις περιπτώσεις, οι Αγγλικοί ορισμοί ως πιο ακριβείς και σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία. Ως ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί ο όρος Additive Manufacturing – AM, ο οποίος στα Ελληνικά αποδίδεται ως «Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής» (Δεδούσης and Γιαννατσής, 2017). Αν και παρατίθεται η απόδοση στα Ελληνικά, στο κείμενο επιλέγεται η χρήση του όρου «Additive Manufacturing» με το ακρωνύμιο AM. Τονίζεται ότι παραμένει βασικός στόχος η ελάχιστη χρήση μη Ελληνικών ορισμών, και μόνο σε περιπτώσεις που δικαιολογείται, η υιοθέτηση ξενόγλωσσης ορολογίας.

Ο όρος «κατεργασία» (manufacturing) εμφανίστηκε στην Αγγλική γλώσσα περί το 1683 και προέρχεται από την Λατινική έκφραση «*manu factus*» που σημαίνει «φτιαγμένο με το χέρι». Η λέξη «παραγωγή» (production) είναι ακόμα παλαιότερη και χρονολογείται κατά τη διάρκεια του 15^{ου} αιώνα. Επί της ουσίας ο όρος «κατεργασία» αναφέρεται στην κατασκευή / δημιουργία κάποιου αντικειμένου / προϊόντος, το οποίο είτε προορίζεται για τελική χρήση, είτε για να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή άλλων προϊόντων. Ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό των κατεργασιών είναι η δυνατότητα να προσδίδουν προστιθέμενη αξία στις πρώτες ύλες, με τα τελικά προϊόντα να έχουν πολλαπλάσια αξία (οικονομική αλλά και πρακτική) σε σχέση με τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους. Ιστορικά, φαίνεται ότι οι κοινωνίες είναι συνυφασμένες, και εξελίσσονται παράλληλα με την δυνατότητα κατασκευής και δημιουργίας αντικειμένων, άρα και με την έννοια της κατεργασίας, καθώς τα πρώτα δείγματα από τεχνουργήματα χρονολογούνται από έως και το 16.000 π.Χ., κατά την προϊστορική περίοδο. Αρχικά τα τεχνουργήματα κατασκευάζονταν από ξύλο, πέτρα και μέταλλο, ενώ οι μέθοδοι κατασκευής ήταν κυρίως η χύτευση (casting) και η κατεργασία με χρήση σφύρας (hammering) ως οι πλέον απλές. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των κοινωνιών, οι μέθοδοι κατεργασίας έγιναν σταδιακά πιο πολύπλοκες, αυξήθηκε ο ρυθμός παραγωγής και η ποιότητα των αντικειμένων / προϊόντων που κατασκευάζονται, ενώ ταυτόχρονα νέες κατηγορίες υλικών άρχισαν να χρησιμοποιούνται (κεραμικά υλικά, μη-μεταλλικά υλικά και κράματα). Οι Βιομηχανικές Επαναστάσεις από τον 18^ο αιώνα έως και σήμερα αναδιαμόρφωσαν εξολοκλήρου τον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής / δημιουργίας προϊόντων, με την μηχανοποίηση και αυτοματοποίηση της παραγωγής να αντικαθιστούν σταδιακά τη χειρωνακτική εργασία. Στα πλαίσια του σύγχρονου εκβιομηχανισμένου περιβάλλοντος, εξελίχθηκαν και βελτιστοποιήθηκαν σειρά από διαφορετικές κατηγορίες και τύποι κατεργασιών οι οποίες θα μπορούσαν πλέον να χαρακτηριστούν ως «παραδοσιακές» κατεργασίες (Groover, 2007; Kalpakjian, 2009).

Μια αρκετά γενική, αλλά ταυτόχρονα αποτελεσματική και σαφής κατηγοριοποίηση είναι (Kalpakjian, 2009):

- Κατεργασίες χύτευσης (casting)
- Κατεργασίες διαμόρφωσης με μορφοποίηση (forming and shaping): έλαση, σφυρηλάτηση, διέλαση, ολκή, διαμόρφωση ελάσματος, κονιομεταλλουργία και μορφοποίηση με χρήση καλουπιού.
- Κατεργασίες αποβολής υλικού ή κοπές (machining): τόννευση, εσωτερική τόννευση (boring), διάτρηση, φρεζάρισμα, πλάνισμα, αυλάκωση, λείανση, κοπή με χρήση υπερήχων, κοπή με χημικά, ηλεκτρικά και ηλεκτροχημικά μέσα και κοπή με χρήση υψηλής ενέργειας δέσμη laser.
- Κατεργασίες σύνδεσης (joining)
- Κατεργασίες αποπεράτωσης (finishing): κατεργασίες λείανσης (honing, lapping), στίλβωση, επιφανειακή σκλήρυνση, επιστρώσεις και επιμετάλλωση.

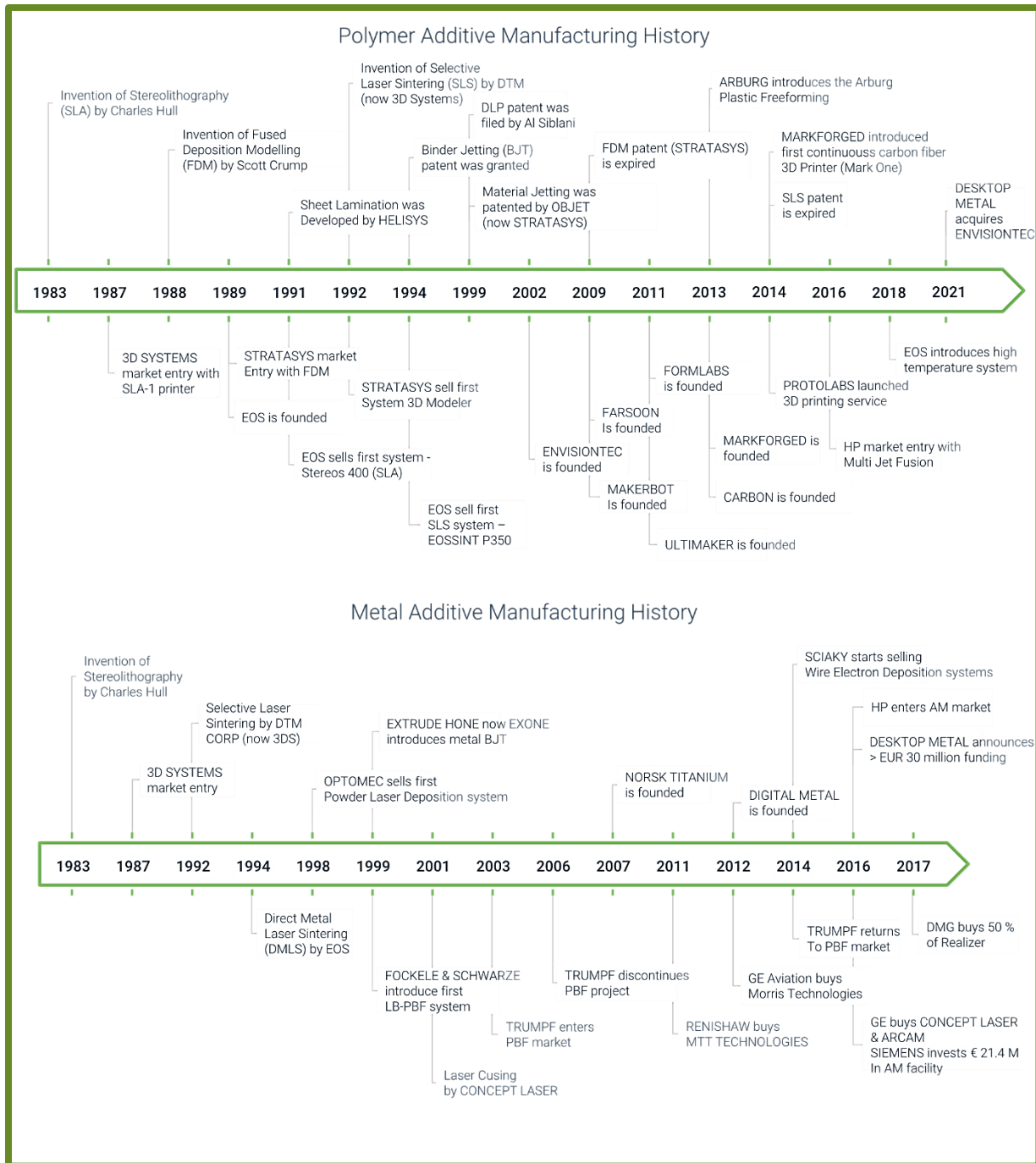
Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, στις προαναφερθείσες κατεργασίες προστέθηκε και το AM², το οποίο διαφέρει θεμελιωδώς από τις υπόλοιπες καθότι η κατασκευή και η δημιουργία των αντικειμένων δε γίνεται πλέον μέσω αφαίρεσης υλικού ή πλαστικής παραμόρφωσης υπάρχοντος υλικού, αλλά μέσω προσθήκης υλικού. Συγκεκριμένα, το 1983 ο Charles “Chuck” Hull εφηύρε την μέθοδο Στερεολιθογραφίας (Stereolithography – SLA), την πρώτη τεχνική AM. Ο Hull αξιοποίησε την πρόοδο που είχε συντελεστεί στις επιστήμες των laser και των υλικών για να σχεδιάσει και να κατασκευάσει διάταξη στην οποία υπεριώδεις ακτινοβολία (UV – light) εστιαζόταν σε λουτρό υγρής UV φωτοπολυμεριζόμενης ρητίνης, η οποία έπειτα από την έκθεσή της στην UV ακτινοβολία υφίστατο πολυμερισμό

² Ο όρος AM αναφέρεται γενικά σε όλες τις κατεργασίες και τεχνολογίες που έχουν την δυνατότητα να παράγουν αντικείμενα και τεμάχια αυτοματοποιημένα μέσω σύνδεσης στοιχειωδών όγκων (voxels) υλικού. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι στοιχειώδεις αυτοί όγκοι είναι ισοπαχείς στρώσεις υλικού. Παράλληλα όμως με το τον όρο AM, χρησιμοποιείται, με ευρεία μάλιστα αποδοχή, και η ονομασία 3DP. Η εκτεταμένη χρήση του όρου 3DP βασίζεται στο ότι είναι πιο κατανοητός, καθώς οι χρήστες είναι εξοικειωμένοι με την λειτουργία και χρήση των 2D εκτυπωτών. Έτσι, η δυνατότητα δημιουργίας / εκτύπωσης αντικειμένων με χρήση συγκεκριμένου λογισμικού (3D design program) και ενός κατάλληλου μηχανήματος (3D printing machine) μοιάζει οικεία και φιλική. (Gebhardt and Hotter, 2016)

και σκλήρυνση. Το 1986 ο Hull κατοχύρωσε την πατέντα της συγκεκριμένης τεχνολογίας και ίδρυσε την εταιρεία 3D Systems. Παράλληλα με την 3D Systems που κατοχύρωσε και εξέλιξε την συγκεκριμένη τεχνολογία, και άλλες ερευνητικές ομάδες εργάζονταν σε διαφορετικούς τύπους, μεθόδους και υλικά σχετικά με το AM. Στο Πανεπιστήμιο του Texas, ο επίκουρος καθηγητής Dr. Joe Beaman και ο φοιτητής Carl Deckard εργάζονταν πάνω σε μια νέα τεχνολογία που πλέον ονομάζεται Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Laser (Selective Laser Sintering – SLS), και στην οποία το υλικό υπό την μορφή πούδρας (powder) διαστρώνεται στην πλατφόρμα κατασκευής, ενώ μια δέσμη laser συσσωματώνει επιλεκτικά την πούδρα σε συγκεκριμένες περιοχές. Στην συνέχεια, μια νέα στρώση πούδρας απλώνεται επάνω από την προηγούμενη στρώση, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως τον σχηματισμό του τελικού τεμαχίου. Οι Beaman και Deckard ίδρυσαν την εταιρεία Nova Automation, με την πρώτη μηχανή SLS να κατασκευάζεται το 1986, και να γίνεται εμπορικά διαθέσιμη το 1989. Η εταιρεία αργότερα μετονομάστηκε σε DTM Corp. και το 2001 εξαγοράστηκε από την 3D Systems. Την ίδια χρονική περίοδο, δύο απόφοιτοι από το Washington State University, ο Scott Crump και η γυναίκα του Lisa Crump, εργάζονταν πάνω στην εξέλιξη μιας διαφορετικής τεχνολογίας AM, την Εναπόθεση Τηγμένου Υλικού (Fused Deposition Modeling – FDM). Στην συγκεκριμένη τεχνολογία θερμοπλαστικό υλικό θερμαίνεται σε ημίρρευστη κατάσταση (semi-liquid state) και στην συνέχεια μέσω ακροφυσίου εναποτίθεται στρώση – στρώση έως ότου κατασκευαστεί το τελικό τεμάχιο. Ο Scott και η Lisa Crump ίδρυσαν την εταιρεία Stratasys, Inc. το 1989, με την πατέντα να κατοχυρώνεται το 1992. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 ο Roy Sanders εργαζόταν πάνω σε μια εναλλακτική μέθοδο AM κατά την οποία θερμοπλαστικό κερί σε υγρή μορφή (liquid hot thermoplastic wax) εναποτίθεται σε στρώσεις για την κατασκευή του τεμαχίου. Σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου ήταν η δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων υψηλής ακρίβειας / ανάλυσης, με την μέθοδο τελικά να βρίσκει σημαντική αποδοχή και εφαρμογή στον χώρο της κοσμηματοποιίας. Ο Sanders ίδρυσε αρχικά την εταιρεία Sanders Prototype, Inc. που πλέον ονομάζεται Solidscape, και η οποία έπειτα από την εμπορική της επιτυχία εξαγοράστηκε από την Stratasys, Inc. το 2011. Παράλληλα υπάρχει έντονο εμπορικό ενδιαφέρον και επακόλουθη ερευνητική δραστηριότητα για την επέκταση των τεχνολογιών και μεθόδων AM σε μεταλλικά και κεραμικά υλικά, εκτός των πολυμερών, τα οποία και αρχικά είχαν χρησιμοποιηθεί στο AM. Η εταιρεία EOS των Dr. Hans J. Langer και Dr. Hans Steinbichler, που ήδη δραστηριοποιείται στις τεχνολογίες SLA και SLS, στις αρχές της δεκαετίας του 1990 ερευνά την δυνατότητα εκτύπωσης μεταλλικών τεμαχίων με χρήση της τεχνολογίας SLS. Το πρωτότυπο σύστημα Συσσωμάτωσης Μετάλλων με Laser (Direct Metal Laser Sintering – DMLS) παρουσιάζεται το 1994, και γίνεται εμπορικά διαθέσιμο το 1995. Τα συστήματα DMLS είναι παρόμοια με τα συστήματα SLS, αλλά επιπλέον μπορούν να διαχειριστούν μια ευρεία γκάμα υλικών, συμπεριλαμβανομένων κραμάτων αλουμινίου, κοβαλτίου, νικελίου, χάλυβα, ακόμα και τιτανίου. Την ίδια χρονική περίοδο, εξελίσσεται μια ακόμα τεχνολογία AM που μπορεί να διαχειριστεί μεταλλικά υλικά: η Μορφοποίηση σε Τελική Μορφή με χρήση Laser (Laser Engineered Net Shaping – LENS), με την ιδέα να ξεκινάει στο Albuquerque του New Mexico, στις εγκαταστάσεις των Sandia National Laboratories το 1997, και να γίνεται εμπορικά διαθέσιμη από την Optomec. Στην μέθοδο LENS, κινητή κεφαλή εναποθέτει στρώση – στρώση μεταλλική πούδρα, η οποία με χρήση ισχυρού laser αρχικά τήκεται, και στην συνέχεια επαναστεροποιείται. Τέλος, μια ιδιαίτερα δημοφιλής κατηγορία από μεθόδους AM είναι αυτές της επιλεκτικής τήξης υλικού, που ανάλογα με την πηγή θερμότητας που χρησιμοποιείται ονομάζονται Επιλεκτική Τήξη με Χρήση Laser (Selective Laser Melting – SLM) ή Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting – EBM). Οι μέθοδοι αυτές μοιάζουν εξαιρετικά με την SLS³ καθώς το υλικό βρίσκεται υπό την μορφή στρώσεων πούδρας, μόνο που, σε αντίθεση με την SLS, το υλικό δεν υφίσταται απλά συσσωμάτωση, αλλά τήκεται και στην συνέχεια επαναστεροποιείται δημιουργώντας έτσι την επιθυμητή γεωμετρία του τεμαχίου (Bandyopadhyay and Bose, 2016).

³ Οι μέθοδοι SLS, SLM, DMLS και EBM συχνά αναφέρονται και ως μέθοδοι Σύντηξης Πούδρας σε Κλίνη (Powder Bed Fusion – PBF). Στην πραγματικότητα όντως «μοιράζονται» πολλά κοινά χαρακτηριστικά, αλλά ταυτόχρονα έχουν σημαντικές ειδοποιείες διαφορές και ως εκ τούτου δε θα πρέπει να συγχέονται.

Η σύντομη αυτή ιστορική αναδρομή περιλαμβάνει ορισμένους μόνο «σταθμούς» στην εξέλιξη της τεχνολογίας AM οι οποίοι και θεωρούνται ως οι πλέον σημαντικοί. Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα με την εξέλιξη της τεχνολογίας AM από το 1983 έως και σήμερα, τόσο για μεταλλικά όσο και για πολυμερή υλικά.

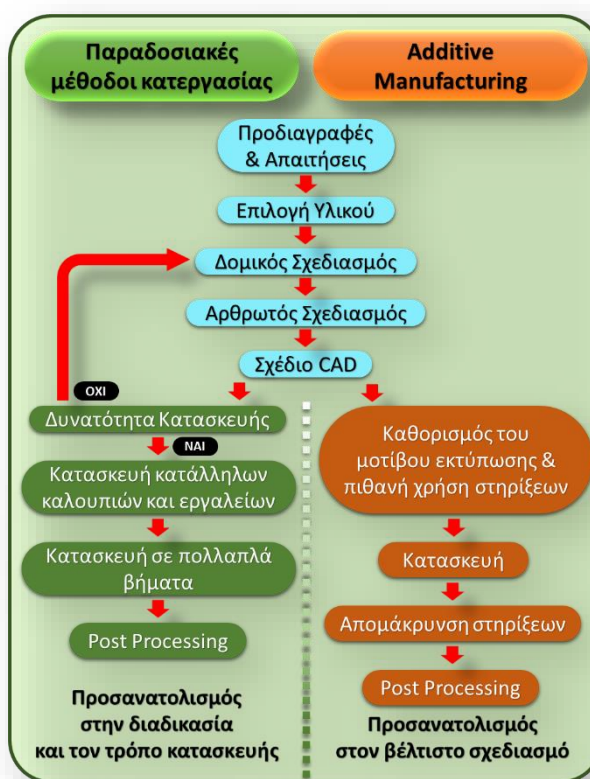


Εικόνα 1.2. Σημαντικοί σταθμοί στην εξέλιξη της τεχνολογίας AM από το 1983 έως και το 2021
(<https://additive-manufacturing-report.com/>, Accessed: 23-1-2022)

1.2 ΣΥΓΚΡΙΝΟΝΤΑΣ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ AM ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ CNC

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και αρχές της δεκαετίας του 1970, η αυτοματοποιημένη παραγωγή με χρήση υπολογιστών οδήγησε στην 3^η Βιομηχανική Επανάσταση, και την ενσωμάτωση στις κατεργασίες του Αριθμητικού Ελέγχου μέσω Υπολογιστή (Computer Numerical Control – CNC). Έτσι προέκυψαν οι Κατεργασίες CNC (CNC Manufacturing – CNCM), οι οποίες δικαίως μπορούν να θεωρηθούν ως «προπάτορες» των κατεργασιών AM, καθώς μοιράζονται αρκετά κοινά χαρακτηριστικά. Ταυτόχρονα όμως υπάρχουν και σημαντικές ειδοποιό διαφορές, οι οποίες πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό και προγραμματισμό της κατεργασίας. Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζονται διαγραμματικά οι βασικές διαφορές ανάμεσα στις συμβατικές κατεργασίες και το AM τόσο κατά τον προγραμματισμό όσο και κατά τη διάρκεια της κατεργασίας (Goh *et al.*, 2017). Οι διαφορές και ομοιότητες ανάμεσα στο AM και το CNCM είναι ένα πολυπαραμετρικό θέμα, και απαιτεί μια λεπτομερή παρουσίαση και ανάλυση.

Η τεχνολογία του AM βασίζεται στην φιλοσοφία του «σχεδιασμού εκ των στοιχειωδών» (bottom-up), με το τεμάχιο να κατασκευάζεται στρώση – στρώση (layer by layer). Έτσι, εδώ εντοπίζεται η πρώτη σημαντική διαφορά ανάμεσα στο AM και το CNCM, το οποίο, ως επί το πλείστον, βασίζεται στην αφαίρεση ή/και πλαστική παραμόρφωση υλικού. Τα υλικά που μπορούν να κατεργαστούν οι CNC εργαλειομηχανές περιλαμβάνουν τόσο «μαλακά» πολυμερή υλικά, όσο και σκληρά, και σχετικά ψαθυρά υλικά (όπως τα κράματα μετάλλων και τα σύνθετα υλικά). Το AM αντίθετα ξεκίνησε με χρήση κυρίως πολυμερών υλικών, και σταδιακά επεκτάθηκε σε μεταλλικά, κεραμικά και σύνθετα υλικά. Εκτός όμως από την γκάμα υλικών οι δυο μέθοδοι διαφέρουν και στις ιδιότητες των τελικών τεμαχίων / προϊόντων που κατασκευάζονται. Τα τεμάχια που κατασκευάζονται σε εργαλειομηχανές CNC διαθέτουν κατά κανόνα ομοιογένεια, καθορισμένες ιδιότητες, προβλέψιμη ποιότητα, και διαστασιολογική ακρίβεια. Αντίθετα, τεμάχια που κατασκευάζονται με AM εμφανίζουν συχνά ανισοτροπία, ελαττώματα (όπως για παράδειγμα εσωτερικά κενά ή/και επιφανειακά ελαττώματα), ενώ είναι επιρρεπή σε ατέλειες που οφείλονται σε μη βέλτιστες παραμέτρους κατασκευής. Αναφορικά με την διαστασιολογική ακρίβεια, αξίζει να σημειωθεί ότι σε κατεργασίες AM η γεωμετρική ανάλυση (resolution) αγγίζει τα μερικά δεκάδες μικρά, η οποία όμως διαφέρει κατά μήκος των διαφορετικών ορθογωνίων αξόνων. Ως γενικός κανόνας⁴ ισχύει ότι ο κατακόρυφος άξονας που αντιστοιχεί στο εκάστοτε πάχος στρώσης έχει συγκριτικά χαμηλότερη ανάλυση σε σχέση με τους δύο άλλους άξονες του επιπέδου κατασκευής. Σε απόλυτες τιμές η ακρίβεια



Εικόνα 1.3. Βασικές διαφορές ανάμεσα σε συμβατικές κατεργασίες και AM στα διαφορετικά στάδια κατασκευής

⁴ Διαφορετικά συστήματα και μέθοδοι AM επιτυγχάνουν διαφορετική διαστασιολογική ακρίβεια, η οποία συνδέεται με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε μεθόδου. Για παράδειγμα το ελάχιστο πάχος τοιχώματος σε κατεργασίες που περιλαμβάνουν την χρήση laser (π.χ. SLM) εξαρτάται από την διάμετρο της δέσμης laser, ενώ σε κατεργασίες FDM από τα χαρακτηριστικά του ακροφυσίου. Επίσης η διαστασιολογική ακρίβεια εξαρτάται και από το υλικό κατασκευής και την επιθυμητή γεωμετρία.

που μπορεί να επιτευχθεί σε κατεργασίες AM εξαρτάται εν πολλοίς από τα εγγενή και τεχνικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος AM. Αντίστοιχα, και η ακρίβεια των εργαλειομηχανών CNC καθορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κοπτικών εργαλείων (σε κατεργασίες αποβολής υλικού) που χρησιμοποιούνται σε κάθε κατεργασία (Gibson, Rosen and Stucker, 2015; Δεδούσης και Γιαννατσής, 2017).

Η διαστασιολογική ακρίβεια συνδέεται άμεσα με τη γεωμετρία των προς κατασκευή τεμαχίων, και εδώ εντοπίζεται μια ακόμα σημαντική διαφορά ανάμεσα στις κατεργασίες AM και το CNCM. Με το AM μπορούν να δημιουργηθούν σχετικά εύκολα και αποτελεσματικά πολύπλοκες γεωμετρικές των οποίων η κατασκευή με συμβατικές μεθόδους CNC θα ήταν εξαιρετικά δύσκολή, κοστοβόρος, ακόμα και αδύνατη. Η βασική αυτή διαφορά προκύπτει από το γεγονός ότι στο AM η 3D γεωμετρία «σπάει» και απλοποιείται σε 2D διατομές οι οποίες κατασκευάζονται διαδοχικά και στην συνέχεια ενώνονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας το τελικό 3D τεμάχιο, ενώ στις κατεργασίες CNC, η 3D γεωμετρία σχηματίζεται λόγω συνέχειας του υλικού και όχι ένωσης στοιχειωδών 2D διατομών. Έτσι, στο CNCM οι ελεύθερες επιφάνειες πρέπει να σχηματίζονται στο τρισδιάστατο επίπεδο, εγείροντας κατασκευαστικές δυσκολίες, ειδικά σε σημεία αλλαγής προσανατολισμού της επιφάνειας ή υψηλής εγγύτητας με γειτονικές ελεύθερες επιφάνειες (Gibson, Rosen and Stucker, 2015; Bandyopadhyay and Bose, 2016).

Στο σημείο αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό γιατί το AM υπερτερεί σημαντικά του CNCM όσο αυξάνεται η γεωμετρική πολυπλοκότητα των υπό κατασκευή τεμαχίων. Στο CNCM, συχνά, λόγω γεωμετρικών περιορισμών προσβασιμότητας, που εισάγουν η εργαλειομηχανή και τα κοπτικά εργαλεία, τα αντικείμενα δε μπορούν να κατασκευαστούν ως ένα ενιαίο τεμάχιο και σε ένα βήμα, αλλά υποχρεωτικά, η κατεργασία «σπάει» σε πολλά βήματα, με το τελικό τεμάχιο να κατασκευάζεται ως συναρμολόγημα / ένωση περισσότερων επιμέρους εξαρτημάτων. Κατά κανόνα, τέτοιου είδους περιορισμοί σχετικά με την γεωμετρική πολυπλοκότητα των υπό κατασκευή τεμαχίων δεν υπάρχουν στο AM, με τις εσωτερικές επιφάνειες (internal features), και τις επιφάνειες αρνητικής κλίσης (undercuts) να μην προβληματίζουν στην κατασκευή ή να χρειάζονται κάποιον ιδιαίτερο προγραμματισμό. Εδώ υπεισέρχεται και η έννοια του προγραμματισμού μιας εργαλειομηχανής CNC σε σχέση με τον απαιτούμενο προγραμματισμό ενός συστήματος AM. Ο προγραμματισμός μια εργαλειομηχανής CNC είναι αξιοσημείωτα πιο απαιτητικός καθώς, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλου εργαλείου, και τρόπου συγκράτησης του τεμαχίου, της ταχύτητας και των ρυθμίσεων κατεργασίας, της ενδεδειγμένης θέσης και γωνίας του εργαλείου κτλ.. Αντίθετα, ο προγραμματισμός ενός συστήματος AM είναι συγκριτικά πιο απλός και αυτοματοποιημένος, με τις περισσότερες επιλογές να εμποτεύονται εύκολα μέσω κατάλληλων λογισμικών. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή κατάλληλων παραμέτρων εκτύπωσης σε κατεργασίες AM είναι σημαντική καθώς συνδέεται άμεσα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Σε αντίθεση όμως με τις κατεργασίες AM στις οποίες λανθασμένες ρυθμίσεις και προγραμματισμός πιθανόν να οδηγήσουν σε κατασκευή ελαττωματικών τεμαχίων, ο εσφαλμένος προγραμματισμός μιας κατεργασίας σε εργαλειομηχανή CNC μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα για την εργαλειομηχανή και τα εργαλεία, ή ακόμα και να θέσει σε σοβαρό κίνδυνο τον χειριστή της εργαλειομηχανής. (Gibson, Rosen and Stucker, 2015; Δεδούσης και Γιαννατσής, 2017).

Κλείνοντας την σύντομη αυτή σύγκριση ανάμεσα στις κατεργασίες AM και CNCM, πρέπει να αναφερθούν κάποιες σημαντικές διαφορές που εντάσσονται σε ένα γενικότερο πλαίσιο. Το CNCM, όντας η φυσική εξέλιξη των «παραδοσιακών» κατεργασιών, στηρίζεται σε κεκτημένο και πολύ «στέρεο» επιστημονικό υπόβαθρο, σε αντίθεση με το AM που ως μια νέα τεχνολογία έχει να αντιμετωπίσει και να ξεπεράσει αρκετές επιστημονικές και πρακτικές προκλήσεις. Ταυτόχρονα, το CNCM, στη σημερινή του μορφή έχει καταστεί οικονομικά βιώσιμο, προσδίδοντας σημαντική προστιθέμενη αξία στα προϊόντα που κατασκευάζονται. Μέρος της επιτυχίας αυτής οφείλεται και στην παραγωγικότητα που μπορεί να επιτευχθεί σε κατεργασίες CNCM (ειδικά σε κατεργασίες CNC υψηλής ταχύτητας – high speed CNCM), με το AM να κινείται σε σαφώς χαμηλότερες «ταχύτητες», καθώς ο ρυθμός προσθήκης υλικού στις κατεργασίες AM είναι κατά κανόνα χαμηλότερος από τον ρυθμό αποβολής υλικού σε κατεργασίες CNC. Προτού

όμως εξαχθεί κάποιο λανθασμένο συμπέρασμα, πρέπει να τονιστεί ότι, στη συνολική αξιολόγηση οφείλουν να ληφθούν υπ' όψιν και άλλες παράμετροι όπως τα πολλαπλά βήματα που πιθανόν να απαιτούνται στο CNCM, η πολύπλοκη εφοδιαστική αλυσίδα που ακολουθεί τις κατεργασίες CNC, η διαχείριση των πρώτων υλών, και μια σειρά από δεδομένα τα οποία σταθμίζονται κατά περίπτωση, προκειμένου να εκτιμηθεί αν το AM ή το CNCM ενδείκνυται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (Srivastava *et al.*, 2020). Στον Πίνακα 1.1 παρατίθενται συνοπτικά οι βασικές διαφορές ανάμεσα στο AM και το CNCM.

Πίνακας 1.1 Βασικές διαφορές ανάμεσα σε μεθόδους AM και CNC Machining

Additive Manufacturing	Computer Numerical Control – CNC Machining
Βασίζεται στην κατά στρώσεις προσθήκη υλικού	Βασίζεται κυρίως στην σταδιακή αφαίρεση υλικού, καθώς οι «παραδοσιακές» κατεργασίες συνδυάζονται με αριθμητικό έλεγχο μέσω υπολογιστή
Δεν απαιτούνται ιδιαίτερα εργαλεία ή/και διατάξεις συγκράτησης των τεμαχίων	Απαιτούνται πολύπλοκα εργαλεία και διατάξεις συγκράτησης
Δυνατότητα παράλληλης κατασκευή τεμαχίων με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου (parallelly process)	Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν είναι εφικτές παράλληλες ή/και εμφωλευμένες κατεργασίες (nested processes)
Συνήθως υπάρχει μόνο μια προετοιμασία / ρύθμιση (set-up) για την κατασκευή, μειώνοντας έτσι τους «νεκρούς χρόνους» και τις καθυστερήσεις (lag times)	Συνήθως προηγούνται της κατεργασίας διαφορετικές και χρονοβόρες διαδικασίες προετοιμασίας και ρυθμίσεων
Συγκριτικά πιο αργή διαδικασία κατασκευής	Σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες κατεργασίας
Ο προγραμματισμός είναι σχετικά εύκολος, και δεν απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις ή μακροχρόνια εμπειρία.	Ο προγραμματισμός είναι αρκετά πολύπλοκος και απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις, εκπαίδευση και εμπειρία
Η εισαγωγή των σχεδίων CAD στην διάταξη του AM απαιτείται τυπικά μια μετατροπή σε .stl αρχείο, και κάποια επιπλέον ανά περίπτωση δεδομένα. Γενικά, ελάχιστα δεδομένα εισάγονται «χειροκίνητα».	Η εισαγωγή ενός σχεδίου CAD σε ένα πρόγραμμα CAM είναι πιο σύνθετη και πολύπλοκη διαδικασία, η οποία απαιτεί και την «χειροκίνητη» εισαγωγή παραμέτρων και δεδομένων
Η προετοιμασία των μοντέλων (modeller preparation) είναι μια απλή διαδικασία	Η προετοιμασία του κέντρου CNC είναι συνήθως μια χρονοβόρα διαδικασία
Κατά την κατασκευή του τεμαχίου απαιτείται σχεδόν μηδενική ανθρώπινη παρέμβαση	Κατά την διάρκεια της κατεργασίας απαιτείται συχνά σημαντική ανθρώπινη παρέμβαση ειδικά στις περιπτώσεις που είναι απαραίτητος ο επαναπροσανατολισμός (re-orientation) και η επανασυγκράτηση (re-fixturing) του τεμαχίου
Η πυκνότητα του υλικού και το μέγεθος του τεμαχίου επηρεάζουν σημαντικά το χρόνο κατασκευής	Τα χαρακτηριστικά και η πολυπλοκότητα του τεμαχίου επηρεάζουν σημαντικά τον χρόνο κατασκευής
Η κατασκευή τεμαχίων με AM συνοδεύεται από μια ή και περισσότερες κατεργασίες αποπεράτωσης (post processing)	Συχνά δεν είναι απαραίτητες κατεργασίες αποπεράτωσης
Πολύ χαμηλή «σπατάλη υλικού» (low material waste)	Σημαντικός όγκος και μάζα αποβλήτων

Περιορισμοί στο μέγεθος των τεμαχίων που μπορούν να κατασκευαστούν (volume limitations)	Δεν υπάρχουν περιορισμοί στο μέγεθος των τεμαχίων
Δεν υπάρχουν περιορισμοί στην πολυπλοκότητα των τεμαχίων	Περιορισμοί στην πολυπλοκότητα των τεμαχίων λόγω γεωμετρικών περιορισμών προσβασιμότητας που εισάγουν η εργαλειομηχανή και τα κοπτικά εργαλεία
Χαμηλότερη αντοχή στην εγκάρσια κατεύθυνση κατασκευής (ανιστροπία τεμαχίου)	Μπορούν να κατασκευαστούν τεμάχια εξαιρετικά υψηλής ποιότητας με ομοιόμορφες ιδιότητες
Συγκριτικά χαμηλή ποιότητα επιφανείας, με συχνή εμφάνιση στρέβλωσης (warping) και παραμόρφωσης (distortion)	Αντικείμενα με καλύτερο φινίρισμα τα οποία σπάνια εμφανίζουν παραμορφώσεις λόγω κατεργασίας
Περιορισμοί στα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν	Ευρεία γκάμα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να κατεργαστούν
Ιδανική επιλογή για εξατομικευμένη παραγωγή (customized production)	Ιδανική επιλογή για μαζική παραγωγή (mass production)

Στην σύγκριση που προηγήθηκε μεταξύ AM και CNCM έγινε μια πρώτη αναφορά στα εγγενή πλεονεκτήματα του AM, αλλά και τις αδυναμίες / προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει και να ξεπεράσει στο μέλλον. Στην ενότητα που ακολουθεί θα γίνει μια συστηματική παρουσίαση των βασικότερων πλεονεκτημάτων και αδυναμιών του AM.

1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ / ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΟΥ AM

Αυθόρμητα, οι τεχνολογίες AM συνδέονται με μια σειρά από πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά που τις καθιστούν στο συλλογικό ασυνείδητο πιο «φιλικές», υπέρτερες και καταλληλότερες εναλλακτικών μεθόδων κατεργασίας. Η πραγματικότητα είναι ότι όντως συνδυάζουν την απλοποίηση των βημάτων που απαιτούνται από τον σχεδιασμό ενός τεμαχίου μέχρι την τελική του κατασκευή (εξ ου και ο όρος «Ταχεία Πρωτοτυποποίηση»), με την ευελιξία στον σχεδιασμό και την εξοικονόμηση πόρων να υφίσταται σε πολλά επίπεδα (Gibson, Rosen and Stucker, 2015). Παραμένει όμως απαραίτητη η συστηματική αξιολόγηση των κατεργασιών AM ώστε να είναι σαφή τα πλεονεκτήματα αλλά και οι αδυναμίες τους (Kumar, 2022).

- **Ελευθερία στον Σχεδιασμό**

Η δυνατότητα κατασκευής ενιαίων τεμαχίων δίχως σημαντικούς⁵ περιορισμούς στον σχεδιασμό αποτελεί ίσως το σημαντικότερο πλεονέκτημα των μεθόδων AM. Δεδομένου ότι οι μέθοδοι AM προσφέρουν την δυνατότητα αποτελεσματικής κατασκευής αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας, η οποία κατασκευή τους με συμβατικές μεθόδους θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη (ίσως και αδύνατη) και με υψηλό κόστος, ο σχεδιαστής αποκτά πλέον μια πρωτόγνωρη ελευθερία. Καθώς αίρονται οι περιορισμοί που έθεταν οι μέχρι τώρα «παραδοσιακές» μέθοδοι κατεργασίας, γίνεται εφικτή η βελτιστοποίηση στο σχεδιασμό, με μοναδικό πλέον γνώμονα τη λειτουργικότητα των τεμαχίων. Η ελευθερία αυτή οφείλεται κυρίως (όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα) στην «φιλοσοφία» του AM (την κατασκευή του τεμαχίου layer by layer), που πρακτικά μια 3D γεωμετρία την μετατρέπει σε ένα «άθροισμα» στοιχειωδών 2D διατομών (Bandyopadhyay and Bose, 2016; Srivastava *et al.*, 2020).

⁵ Ο επιθετικός προσδιορισμός «σημαντικός» χρησιμοποιείται σκόπιμα και στοχευμένα στο συγκεκριμένο σημείο προκειμένου να τονίσει και να καταδείξει ότι ακόμα και στο AM υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί σχεδιασμού. Οι περιορισμοί αυτοί οφείλονται κυρίως στην μέθοδο του AM που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στην εκάστοτε περίπτωση, ενώ σχετίζονται άμεσα και με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος AM. Ένα παράδειγμα (έχει ήδη αναφερθεί) αποτελεί το γεγονός ότι το ελάχιστο πάχος τοιχώματος σε κατεργασίες που περιλαμβάνουν την χρήση laser (π.χ. SLM) εξαρτάται από την διάμετρο της δέσμης laser. Οι περιορισμοί αυτοί, αν και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και ως «λογικοί», σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να αναφέρονται, επισημαίνονται και να λαμβάνονται υπ' όψιν προς αποφυγή λανθασμένων συμπερασμάτων.

- **Ευελιξία στην Διαδικασία Κατασκευής**

Με δεδομένο ότι οι μέθοδοι κατασκευής στο AM είναι ανεξάρτητες από συγκεκριμένα εργαλεία ή/και διατάξεις (no tooling process), υπάρχει αξιοσημείωτη ευελιξία, και δυνατότητα για εύκολη, και άνευ σημαντικού πρόσθετου κόστους τροποποίησης του αρχικού σχεδίου. Η δυνατότητα αυτή «διευκολύνει» και απλοποιεί τις διαδικασίες βελτιστοποίησης, καθώς, εναλλακτικά σχέδια και ιδέες μπορούν να υλοποιηθούν εύκολα, γρήγορα και οικονομικά, επιτρέποντας την μελέτη τους όχι μόνο σε θεωρητικό επίπεδο και μέσω πιθανών προσομοιώσεων, αλλά και με φυσική αλληλεπίδραση με το εκάστοτε τεμάχιο / εξάρτημα / αντικείμενο. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι οι αλλαγές σε ένα αρχικό σχέδιο μπορεί να απαιτηθούν όχι μόνο για λόγους βελτιστοποίησης αλλά και για την αντιμετώπιση αστοχιών και προβλημάτων που πιθανόν να προκύψουν. Σε κατεργασίες AM οι διορθωτικές παρεμβάσεις μπορούν να γίνουν χωρίς κόστος και δίχως να επηρεαστεί στο σύνολό της η αλυσίδα κατασκευής και κατεργασίας (production chain) (Bandyopadhyay and Bose, 2016; Srivastava *et al.*, 2020).

- **Οικονομικά Βιώσιμη Επιλογή για Μικρότερους Όγκους Παραγωγής ή Custom-Made Παραγωγή**

Η δυνατότητα εύκολης και άνευ κόστους διαχείρισης διαφορετικών σχεδίων από τα συστήματα AM, καθιστά το AM οικονομικά βιώσιμο για μικρού και μεσαίου όγκου παραγωγές, καθώς και για την κατασκευή κατά παραγγελία (custom-made) τεμαχίων. Με δεδομένο ότι οι «παραδοσιακές» μέθοδοι και γραμμές κατεργασίας είναι, κατά κανόνα, εντάσεως κεφαλαίου, ενώ συχνά εμπλέκουν και απαιτούν την απασχόληση εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού, το κόστος ανά τεμάχιο σε περιπτώσεις μικρού όγκου παραγωγής ή κατά παραγγελία παραγωγής είναι εξαιρετικά υψηλό. Αντίθετα, με χρήση συστημάτων AM, το κόστος ανά τεμάχιο παραμένει σχεδόν σταθερό και ανεξάρτητο από τον όγκο παραγωγής, ενώ είναι πολύ χαμηλότερο σε σύγκριση με το αντίστοιχο κόστος με χρήση «παραδοσιακών» μεθόδων κατεργασίας. Η περιορισμένη εμπλοκή του ανθρώπινου παράγοντα κατά την διαδικασία κατασκευής, εκτός από τον προαναφερθέντα περιορισμό στο κόστος εργασίας, εξασφαλίζει μια ποιοτική ομοιομορφία, η οποία γίνεται πλέον ανεξάρτητη της εξειδίκευσης και των τεχνικών ικανοτήτων του προσωπικού που απασχολείται από την κάθε επιχείρηση. Η ευελιξία των μεθόδων AM, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι είναι οικονομικά βιώσιμες για μικρότερους όγκους παραγωγής, ευνοεί την λειτουργία μικρών κατασκευαστών, και την ανάπτυξη μιας πιο δυναμικής και αποκεντρωμένης εφοδιαστικής αλυσίδας (Srivastava and Sudarshan, 2016; Singh and Davim, 2018; Srivastava *et al.*, 2020).

- **Αποτελεσματική Διαχείριση Πρώτων Υλών και Πόρων**

Η μέθοδος και η «φιλοσοφία» κατασκευής μέσω προσθήκης υλικού στρώση – στρώση με βάση τις στοιχειώδεις 2D διατομές του προς κατασκευή τεμαχίου, έχει ως αποτέλεσμα την μέγιστη αξιοποίηση των πρώτων υλών, την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, και τον περιορισμό του αντίστοιχου οικονομικού και ενεργειακού κόστους. Στις «παραδοσιακές» κατεργασίες αποβολής υλικού, ο αρχικό όγκος της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται είναι τουλάχιστον ίσος με τις τελικές διαστάσεις του τεμαχίου, με σημαντικό ποσοστό του αρχικού υλικού να απομακρύνεται ως απόβλητο. Αν και φυσικά γίνεται ανακύκλωση σημαντικού μέρους του υλικού των αποβλήτων, η ανακύκλωση έχει σημαντικό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Η αποτελεσματικότερη διαχείριση των πρώτων υλών σε κατεργασίες AM και ο περιορισμός των υπολειμμάτων υλικού (scrap material) συνεισφέρει σημαντικά στον περιορισμό του κόστους αλλά και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της κατεργασίας⁶. Υπάρχουν δεδομένα που

⁶ Η αρχή κατασκευής υλικού στρώση – στρώση με βάση στοιχειώδεις 2D διατομές του προς κατασκευή τεμαχίου αναμφίβολα έχει ως αποτέλεσμα την μέγιστη αξιοποίηση των πρώτων υλών, υπάρχουν όμως αναπόφευκτες «απώλειες» και «σπατάλη» υλικού, η οποίες εξαρτώνται σημαντικά από το είδος και τη μέθοδο της κατεργασίας AM, την πολυπλοκότητα του τεμαχίου, αλλά και παραμέτρους όπως την εμπειρία και τις γνώσεις του χρήστη ενός συστήματος AM. Ως χαρακτηριστικά παραδείγματα θα αναφερθούν η ανάγκη για χρήση στηρίξεων σε κατεργασίες FDM, καθώς και η πούδρα που δεν έχει τηχθεί ή συσσωματωθεί σε κατεργασίες FFB, υλικά τα οποία αποτελούν υπολείμματα της κατεργασίας και τα οποία πρέπει είτε να ανακυκλωθούν είτε να απορριφθούν κατάλληλα. Άρα και οι κατεργασίες AM παράγουν scrap υλικά, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό.

υποδεικνύουν ότι μέσω των μεθόδων AM χρησιμοποιείται έως και 75% λιγότερο υλικό, εξοικονομώντας έως και 50% του χρόνου και του κόστους υλικού. Το όφελος σε πόρους που χρησιμοποιούνται δεν περιορίζεται μόνο στην εξοικονόμηση πρώτων υλών, αλλά και στην μη χρήση απαραίτητων σε συμβατικές κατεργασίες αναλώσιμων όπως ψυκτικά μέσα, κοπτικά εργαλεία και διατάξεις συγκράτησης. (Bandyopadhyay and Bose, 2016; Srivastava and Sudarshan, 2016; Srivastava *et al.*, 2020).

Αναγνωρίζοντας και λαμβάνοντας υπ' όψιν τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα των μεθόδων AM οι σύγχρονες βιομηχανίες έχουν ήδη ενσωματώσει το AM στις γραμμές παραγωγής τους. Παρ' όλη όμως την αποδοχή και την απήχηση που έχει ως μέθοδος, υπάρχουν και σημαντικές αδυναμίες οι οποίες πρέπει να αναφέρονται και να αποτελούν επίκεντρο της επιστημονικής έρευνας ώστε σταδιακά να αντιμετωπιστούν, και να ξεπεραστούν έτσι οι προκλήσεις που ακολουθούν κάθε νέα τεχνολογία (Praveena *et al.*, 2022).

- **Δημιουργία Εσωτερικών Κενών – Πορώδους**

Ένα βασικό μειονέκτημα των μεθόδων AM είναι η πιθανότητα δημιουργίας κενών (voids) ανάμεσα σε διαδοχικές στρώσεις υλικού (layers) ή διαδοχικών γραμμικών ιχνών εναπόθεσης υλικού (tracks). Αποτέλεσμα των κενών είναι η δημιουργία πορώδους, το οποίο υπό συνθήκες μπορεί να είναι υψηλό, υποβαθμίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες του τεμαχίου. Το ποσοστό πορώδους συνδέεται και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο AM και το υλικό που χρησιμοποιείται (Ngo *et al.*, 2018). Πρέπει να σημειωθεί ότι η αναφορά στο πορώδες ως μειονέκτημα γίνεται μόνο ως προς το «μη ελεγχόμενο» πορώδες, καθότι το ελεγχόμενο πορώδες είναι επιθυμητό και αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα σε συγκεκριμένες εφαρμογές (π.χ. βιοϊατρικές εφαρμογές για κατασκευή ικτριωμάτων) (Minas *et al.*, 2016).

- **Ανισοτροπία**

Η ανισοτροπία του υλικού, και κατά συνέπεια η ανισοτροπία μηχανικών ιδιοτήτων του τεμαχίου, προέρχεται κυρίως από την διαφορετική μικροδομή του υλικού στο εσωτερικό και στα όρια των στρώσεων (ή του ίχνους εναπόθεσης υλικού). Πρακτικά, η ανισοτροπία μηχανικών ιδιοτήτων σημαίνει διαφορετική συμπεριφορά του υλικού συναρτήσει της διεύθυνσης φόρτισης του, και πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπ' όψιν σε μελέτες αντοχής και αστοχίας. Η ανισοτροπία, όπως και το πορώδες, εξαρτάται από τη μέθοδο AM, το υλικό, και ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες μπορούν να την επηρεάσουν και είτε να την περιορίσουν είτε να την κάνουν πιο έντονη (Ngo *et al.*, 2018). Η ανισοτροπία δεν περιορίζεται μόνο στις μηχανικές ιδιότητες αλλά αφορά το σύνολο των θερμοφυσικών ιδιοτήτων, και άλλων χαρακτηριστικών όπως είναι για παράδειγμα η υδροφοβικότητα (hydrophobicity) και η ικανότητα διαβροχής (wettability), ενώ για ορισμένες εφαρμογές η ανισοτροπικότητα είναι ζητούμενη (He *et al.*, 2017).

- **Απόκλιση Από το Κατασκευαστικό Σχέδιο ή/και Ύπαρξη Παραμορφώσεων**

Η «μεταφορά» ενός αρχείου CAD σε σύστημα AM απαιτεί την ψηφιοποίηση της γεωμετρίας (tessellation), και ως εκ τούτου, στην πραγματικότητα, η τελική προς εκτύπωση γεωμετρία αποτελεί μια προσέγγιση της αρχικής γεωμετρίας από επίπεδα τριγωνικά στοιχεία (planar triangles). Η πιστότητα της απόδοσης του αρχικού σχεδίου εξαρτάται από την ποιότητα της διακριτοποίησης, η οποία όμως περιορίζεται από πρακτικούς παράγοντες όπως ο χρόνος που τελικά θα χρειαστεί για να κατασκευαστεί το τεμάχιο (υψηλή διακριτοποίηση συνεπάγεται και μεγαλύτερο χρόνο κατασκευής συνήθως), ή/και τις δυνατότητες που έχει το εκάστοτε σύστημα AM. Το τελικό τεμάχιο αποτελεί λοιπόν εξορισμού μια προσέγγιση του αρχικού σχεδίου, με τις όποιες αποκλίσεις να είναι πιο εμφανείς σε μικρής ακτίνας καμπύλες επιφάνειες, και σε περιοχές υψηλής λεπτομέρειας, όπου τα τριγωνικά στοιχεία της ψηφιοποίησης είναι ανάλογου μεγέθους με τα στοιχεία της γεωμετρίας (Oropallo and Piegel, 2016). Διαστασιολογική απόκλιση από το αρχικό σχέδιο μπορεί επίσης να προκληθεί λόγω ύπαρξης θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων. Η τοπική και κατά στρώσεις εναπόθεση υλικού προκαλεί έντονες κλίσεις θερμοκρασίας (temperature gradients) στον όγκο του υλικού, και αλληπάλληλους κύκλους θέρμανσης -

ψύξης (heating and cooling cycles), οι οποίοι οδηγούν σε ανάπτυξη θερμικών τάσεων (thermal stresses) και τελικά σε πλαστική παραμόρφωση (stress distortion) του τεμαχίου όταν οι τάσεις αυτές ξεπεράσουν το όριο διαρροής του υλικού. Μέθοδοι για τον περιορισμό των θερμικών παραμενουσών τάσεων και της παραμόρφωσης λόγω αυτών μελετώνται και προτείνονται από την ερευνητική κοινότητα καθώς αποτελεί ένα πολύ ενδιαφέρον και ανοιχτό επιστημονικό θέμα. Παρ' όλα αυτά, η πιθανότητα ύπαρξης διαστασιολογικής απόκλισης ανάμεσα στο αρχικό σχέδιο και το τελικό τεμάχιο αποτελεί ένα εν δυνάμει μειονέκτημα και αδυναμία των μεθόδων AM (Mukherjee, Zhang and Debroy, 2017).

- **Ποιότητα Επιφανείας και Πιθανή Ανάγκη για Κατεργασία Φινιρίσματος**

Η φύση των μεθόδων AM με την προσθήκη υλικού στρώση – στρώση έχουν ως αποτέλεσμα την «διαστρωματική εμφάνιση» (layer by layer appearance) των τεμαχίων. Ταυτόχρονα, η τραχύτητα των επιφανειών που κατασκευάζονται με AM εξαρτάται από τα μοναδικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε μεθόδου AM, και επηρεάζεται σημαντικά από τις παραμέτρους κατεργασίας που επιλέγονται (Wahab Hashmi, Singh Mali and Meena, 2021). Ως εκ τούτου, μια απλουστευτική γενίκευση σχετικά με την ποιότητα επιφανείας θα οδηγούσε σε λανθασμένα συμπεράσματα. Αναμφισβήτητα όμως, κατά κανόνα, τεμάχια που κατασκευάζονται με AM έχουν χαμηλότερη ποιότητα επιφανείας σε σύγκριση με αντίστοιχα που κατασκευάζονται με χρήση «παραδοσιακών» μεθόδων κατεργασίας όπως το CNCM. Και πάλι όμως, η χαμηλότερη ποιότητα επιφανείας δεν αρκεί από μόνη της για να χαρακτηριστεί ως μειονέκτημα ή αδυναμία των μεθόδων AM καθώς, σε πολλές περιπτώσεις, η υψηλή ποιότητα επιφανείας δεν είναι ζητούμενο και κατασκευαστική απαίτηση. Σε περιπτώσεις όμως που απαιτείται τα τεμάχια να έχουν υψηλή ποιότητα επιφανείας, τεμάχια που κατασκευάζονται μέσω AM θα πρέπει πιθανόν να υποστούν κάποια περαιτέρω μηχανική ή χημική κατεργασία φινιρίσματος (post process physical or chemical polishing) (Ngo *et al.*, 2018). Με την συνεχή εξέλιξη και βελτίωση των συστημάτων AM, αντιμετωπίζονται εγγενή «προβλήματα» και φαινόμενα που επηρεάζουν και υποβαθμίζουν την ποιότητα επιφανείας με στόχο να περιοριστεί στο ελάχιστο η ανάγκη για περαιτέρω κατεργασίες φινιρίσματος, και να καταστεί το AM μια μέθοδος κατασκευής τεμαχίων πραγματικά έτοιμων για τελική χρήση (ready for use) (Pérez *et al.*, 2021).

- **Εγγενείς Κατασκευαστικοί Περιορισμοί και Αρχικό Κόστος Επένδυσης**

Ως τελευταίες αδυναμίες των μεθόδων AM επιλέχθηκαν να αναφερθούν ορισμένοι περιορισμοί οι οποίοι, υφίστανται μεν στο παρόν, αλλά με την εξέλιξη των συστημάτων AM και την σταδιακή μαζικότερη χρήση τους αναμένεται να αντιμετωπιστούν σε μεγάλο βαθμό ή ακόμα και να ξεπεραστούν. Αρχικά, υπάρχουν περιορισμοί στο μέγεθος των αντικειμένων που μπορούν να κατασκευαστούν με μεθόδους AM, οι οποίοι προέρχονται κυρίως από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων AM (διαθέσιμος κατασκευαστικός χώρος – build volume). Έτσι, κατά κανόνα, τα τεμάχια που μπορούν να κατασκευαστούν μέσω AM είναι σχετικά μικρού ή μεσαίου μεγέθους (Huang *et al.*, 2022). Ταυτόχρονα, όπως ήδη έχει αναφερθεί, οι ταχύτητες κατασκευής των συστημάτων AM είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με αυτές των «παραδοσιακών» μεθόδων κατεργασίας. Ακριβής σύγκριση δε μπορεί να γίνει εύκολα λόγω της διαφορετικής φύσης των κατεργασιών, είναι όμως γεγονός ότι ο ρυθμός προσθήκης υλικού είναι σημαντικά χαμηλότερος από τους τυπικούς ρυθμούς αποβολής υλικού σε κατεργασία CNCM. Οι χαμηλότερες ταχύτητες παραγωγής σε συνδυασμό με το ότι οι αλυσίδες παραγωγής που περιλαμβάνουν μεθόδους AM δεν ανήκουν στις κλασικές οικονομίες κλίμακας, καθιστούν το AM λιγότερο αποδοτικό και οικονομικά βιώσιμο για μεγάλου όγκου μαζική παραγωγή. Τέλος, ένα στοιχείο που σχετίζεται με την ευκολία ενσωμάτωσης μεθόδων AM στην παραγωγική αλυσίδα είναι το αρχικό κόστος απόκτησης συστημάτων AM, το οποίο αποτελεί μια σημαντικά υψηλή επένδυση. Αν και, όπως αναφέρθηκε στα πλεονεκτήματα των μεθόδων AM, η φιλοσοφία και η φύση του AM ευνοεί την λειτουργία μικρών κατασκευαστών, και την ανάπτυξη αποκεντρωμένης εφοδιαστικής αλυσίδας, το αρχικό κόστος επένδυσης

μπορεί να αποτελέσει έναν αποτρεπτικό παράγοντα, ειδικά για επιχειρήσεις μεσαίας ή μικρής οικονομικής επιφάνειας (Srivastava *et al.*, 2020).

Η επισκόπηση των βασικών πλεονεκτημάτων και αδυναμιών που έχουν οι μέθοδοι AM στόχο είχε να καταστήσει σαφές στον αναγνώστη ότι δεν υφίσταται η έννοια «καλύτερη» ή «χειρότερη» μέθοδος κατεργασίας, αλλά μόνο η ανά περίπτωση επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου. Επίσης, τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά είναι πλεονεκτήματα και αδυναμίες που μοιράζονται (σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό) όλες οι μέθοδοι AM, με την κάθε μια όμως να έχει τις δικές της μοναδικές ιδιότητες και ιδιαιτερότητες. Ως εκ τούτου, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου AM πρέπει να γίνεται πάντα κατά περίπτωση, ενώ τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό, τόσο του προς κατασκευή τεμαχίου, όσο και συνολικά της αλυσίδας παραγωγής. Η αναφορά και η έμφαση στις διαφορικές μεθόδους AM οδηγεί στην ανάγκη και χρησιμότητα για μια κατηγοριοποίηση και ταξινόμηση των μεθόδων AM.

1.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ AM – ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ AM

Όπως έχει καταστεί σαφές ήδη από την σύντομη αναδρομή στην ιστορία του AM, ο όρος αυτός περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα από διαφορετικές μεθόδους οι οποίες βασίζονται στην κατασκευή μέσω προσθήκης υλικού στρώση – στρώση. Από τη δεκαετία του 1990 όταν οι μέθοδοι AM άρχισαν να γίνονται σταδιακά εμπορικά διαθέσιμες καταβάλλονται προσπάθειες να ταξινομηθούν και να κατηγοριοποιηθούν κατάλληλα ώστε να δημιουργηθεί ένας κοινώς αποδεκτός κώδικας επικοινωνίας και αντίστοιχη ονοματολογία. Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί διαφορετικοί τρόποι ταξινόμησης με τους κυριότερους να είναι (Srivastava *et al.*, 2020):

- με βάση τον τύπο των υλικών: μεταλλικά – πολυμερή – κεραμικά
- με βάση την φυσική κατάσταση και μορφολογία των πρώτων υλών: στερεή – υγρή – πούδρα – αέρια
- σύμφωνα με τον τρόπο και την μέθοδο προσθήκης υλικού και σύνδεσης των διαδοχικών στρώσεων: φωτοπολυμερισμός – εξώθηση υλικού – χρήση συγκολλητικού μέσου – συσσωμάτωση / σύντηξη πούδρας
- ανάλογα με τον τύπο της πηγής θερμότητας ή του συνδετικού μέσου που χρησιμοποιείται: laser – plasma – δέσμη ηλεκτρονίων – θερμότητα μέσω τριβής ή αντίστασης - χρήση συγκολλητικού μέσου / χημική αντίδραση
- με βάση το αν η εναπόθεση υλικού σε κάθε στρώση γίνεται σημειακά (π.χ. SLM) ή σε στοιχειώδεις 2D επιφάνειες (π.χ. με Χωρικούς Διαμορφωτές Φωτός (Digital Light Processing – DLP))

Βασική δυσκολία που αντιμετωπίζουν όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι ταξινόμησης είναι ότι καμία δεν επαρκεί από μόνη της για να περιγράψει αποτελεσματικά ένα σύστημα AM, καθώς διαφορετικοί τύποι AM μοιάζουν ή διαφέρουν σημαντικά (ήτοι ανήκουν στην ίδια κατηγορία ή όχι) ανάλογα με το σύστημα ταξινόμησης που επιλέγεται κάθε φορά. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι χρειάζεται μια πολυεπίπεδη μέθοδος ταξινόμησης ώστε να κατηγοριοποιηθούν απλά, αλλά και ταυτόχρονα με ακρίβεια, οι κατεργασίες AM (Gibson, Rosen and Stucker, 2015). Απλοποιώντας την ταξινόμηση που γίνεται στις εργασίες των Gebhardt και Hotter (Gebhardt and Hotter, 2016) και Pham και Dimov (Pham and Dimov, 2001) προτείνεται η κατηγοριοποίηση των βασικότερων κατεργασιών AM σε τρία επίπεδα:

- με βάση την κατάσταση της πρώτης ύλης: στερεή – υγρή – αέρια
- μορφή που έχει η πρώτη ύλη: νήμα – πούδρα – υγρό – αερόλυμα κτλ..
- μέθοδος σύνδεσης των στοιχειωδών όγκων υλικού και των διαδοχικών στρώσεων: τήξη / συσσωμάτωση – πολυμερισμός – χρήση συγκολλητικού μέσου – λοιποί τρόποι

Η ταξινόμηση με βάση τα υλικά (μεταλλικά – πολυμερή – κεραμικά) κρίθηκε ότι δεν ανταποκρίνεται στις σύγχρονες ανάγκες και τις τεχνολογικές εξελίξεις, καθώς, η έρευνα οδηγεί στην χρήση νέων υλικών σε μεθόδους που παραδοσιακά δε μπορούσαν να τα διαχειριστούν. Για παράδειγμα, ενώ με την μέθοδο FDM κατασκευάζονταν σχεδόν αποκλειστικά τεμάχια από πολυμερή υλικά, πλέον με χρήση κατάλληλων νημάτων (filaments) μπορούν να κατασκευαστούν μεταλλικά και κεραμικά αντικείμενα (τα τεμάχια από σύνθετα υλικά δεν αναφέρονται ως ξεχωριστή κατηγορία γιατί αποτελούν το ενδιάμεσο βήμα ανάμεσα στα πολυμερή και τα μεταλλικά ή κεραμικά). Στον Πίνακα 1.2 έχουν ταξινομηθεί οι βασικές (με την ευρύτερη εφαρμογή) μέθοδοι AM, και οι οποίες, προς χάρην πληρότητας, θα παρουσιαστούν συνοπτικά στην συνέχεια.

Πίνακας 1.2 Ταξινόμηση των κυριότερων και πιο διαδεδομένων μεθόδων AM

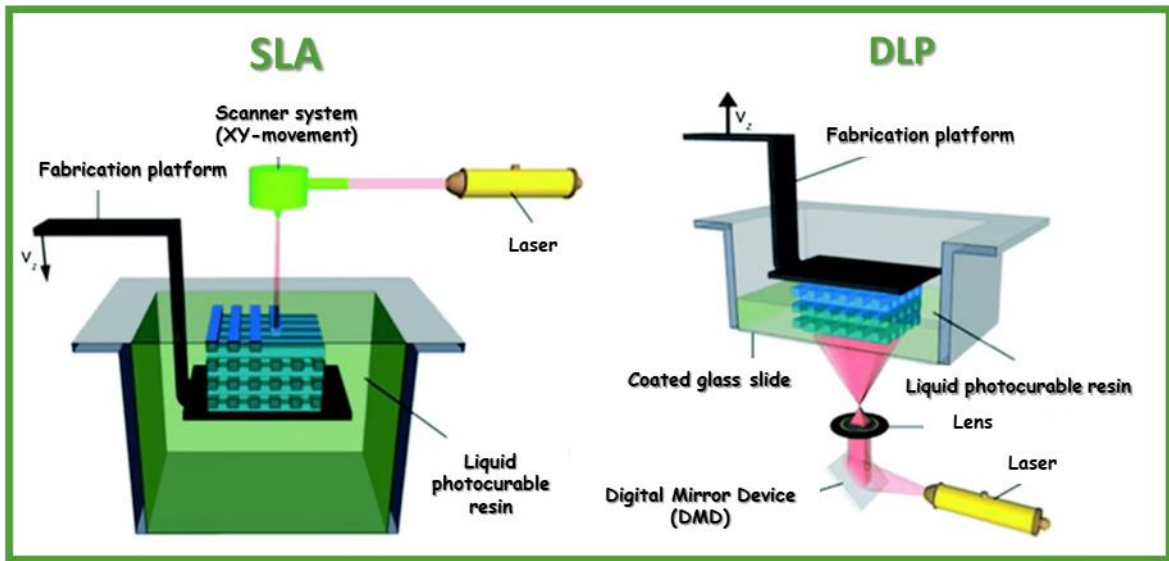
Φάση Υλικού Τρόπος Σύνδεσης	Στερεή			Υγρή		Αέρια	
	Λεπτά Φύλλα (foils)	Νήμα (wire)	Πούδρα (powder)	Ημίρρευστη	Υγρή	Αερόλυμα	Αέρια
Τήξη & Συσσωμάτωση	UC	FDM FFF WBDED WBDDL	SLS SLM DMLS EBM LPF PBDED				MJ Aerosol Jet®
Πολυμερισμός				SLA DLP IR SLA TPP SLA MJ			MJ
Χρήση Συγκολλητικού Μέσου	LOM PSL CAM-LEM		BJP IJP CJP PBIH MultiJet Fusion™				

1.4.1 VAT POLYMERIZATION METHODS

Η μέθοδος SLA είναι ιστορικά η παλαιότερη τεχνική AM, και συνεχίζει να είναι μια από τις σημαντικότερες και πλέον διαδεδομένες μεθόδους AM. Η συγκεκριμένη τεχνολογία ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των μεθόδων Πολυμερισμού σε Κάδο (Vat Polymerization – VP), και βασίζεται στην διασύνδεση (curing) / στερεοποίηση (solidification) υγρού φωτοευαίσθητου πολυμερούς με χρήση φωτεινής πηγής, η οποία παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την αντίδραση πολυμερισμού (curing reaction). Κατά το curing μεγάλος αριθμός μικρών μορίων ενώνονται σχηματίζοντας έντονα διασταυρούμενες πολυμερικές αλυσίδες (highly cross-linked polymer). Ο όρος VP πολυμερές δεν αναφέρεται σε μια μόνο χημική ένωση, αλλά είναι ουσιαστικά ένα σύνολο διαφορετικών συστατικών που περιλαμβάνει φωτοεκκινητές (photoinitiators), δραστικά αραιωτικά (reactive diluents), παράγοντες ευκαμψίας (flexibilizers), σταθεροποιητές (stabilizers), και υγρά μονομερή (liquid monomers). Αναφέροντας εν συντομία και γενικά τον μηχανισμό πολυμερισμού που λαμβάνει χώρα: όταν η ακτινοβολία προσπέσει στη VP ρητίνη, έπειτα από χημικό μετασχηματισμό ενεργοποιούνται οι φωτοεκκινητές οι οποίοι πλέον μπορούν να αντιδράσουν με τα μονομερή. Η αντίδραση ενός ενεργοποιημένου φωτοεκκινητή με μονομερή μόρια έχει ως αποτέλεσμα την έναρξη σχηματισμού πολυμερικών μακρομοριακών αλυσίδων, και στη συνέχεια τη διασταυρούμενη σύνδεση των πολυμερικών αυτών αλυσίδων μέσω ισχυρών ομοιοπολικών δεσμών (Gibson, Rosen and Stucker, 2015; Δεδούσης και Γιαννατοής, 2017). Οι αντιδράσεις πολυμερισμού είναι εξώθερμες χημικές αντιδράσεις και μπορούν να περιγραφούν από δύο βασικά «βήματα»: την πηκτωμάτωση (gelation) και την υαλοποίηση (vitrification). Η πηκτωμάτωση είναι μια μη αναστρέψιμη (nonreversible) έντονη χημική διεργασία (chemical explosion) η οποία έχει ως αποτέλεσμα τον αρχικό σχηματισμό ενός «άπειρου» δικτύου μορίων (Gillham,

1979). Μακροσκοπικά, η φάση αυτή προκαλεί την ραγδαία αύξηση του ιξώδους, ενώ στο σύστημα συνυπάρχουν οι φάσεις κολλοειδούς διαλύματος (sol phase) και γέλης (gel phase). Η απότομη αύξηση στο ιξώδες και η μετατροπή από ένα παχύρευστο ρευστό σε ελαστικό υλικό (elastic gel / rubber) προσδιορίζει το «σημείο πηκτωμάτωσης» (gel point). Καθώς εξελίσσεται η αντίδραση, το ποσοστό της φάσης κολλοειδούς διαλύματος ελαττώνεται, ενώ, λόγω της διασταύρωσης των πολυμερικών αλυσίδων, η μοριακή κινητικότητα μειώνεται σταδιακά. Η υαλοποίηση είναι μια αναστρέψιμη μέσω θερμότητας (thermo-reversible), προοδευτική, και σταδιακή διαδικασία, η οποία έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός υαλώδους στερεού υλικού. Κατά την υαλοποίηση αυξάνεται ο βαθμός διασταύρωσης των πολυμερικών αλυσίδων, καθώς και το μοριακό τους βάρος. Ο ρυθμός αντίδρασης είναι σημαντικά χαμηλότερος, με τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα πλέον να είναι πολύ αργές και να ελέγχονται κυρίως από φαινόμενα διάχυσης. Η επίδραση των φαινομένων διάχυσης μπορεί να οδηγήσουν σε ανομοιογένεια υλικού και διαφορετικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου. Το ποσοστό υαλοποίησης εξαρτάται από τον χρόνο curing, καθώς, αύξηση του χρόνου οδηγεί σε αύξηση του μοριακού βάρους των πολυμερικών αλυσίδων, και της διασταύρωση αυτών (Bartolo, 2011).

Οι συμβατικές μέθοδοι VP είναι «ενός μόνο φωτονίου» (single photon) διεργασίες, οι οποίες χρησιμοποιούν εστιασμένη υπεριώδη ακτινοβολία για την επιλεκτική στερεοποίηση πολυμερικής ρητίνης. Οι δύο διαφορετικές τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί είναι με χρήση δέσμης laser (direct or laser writing), και με χρήση μάσκας (mask based writing). Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζονται σχηματικά οι διατάξεις SLA και DLP, οι οποίες είναι οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι VP.



Εικόνα 1.4 Σχηματική παρουσίαση τυπικών διατάξεων SLA (αριστερά) και DLP (δεξιά)
(<https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout/>)

Ένα σύστημα VP με χρήση δέσμης laser (SLA) αποτελείται από την πλατφόρμα κατασκευής, έναν κάδο που περιέχει την φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη, κατάλληλη διάταξη laser, και σύστημα κατόπτρων για εστίαση και κατεύθυνση της δέσμης laser. Η εστιασμένη δέσμη laser ακολουθεί συγκεκριμένη διαδρομή με βάση τις στοιχειώδεις διατομές του τεμαχίου (και τα μοτίβα κατασκευής που έχουν επιλεγεί), πολυμερίζοντας επιλεκτικά στοιχειωδούς όγκους υλικού (voxels) ανά στρώση. Αφού σχηματιστεί το προβλεπόμενο σχέδιο σε μια στρώση, η πλατφόρμα στην οποία κατασκευάζεται και είναι στερεωμένο το τεμάχιο εμβαπτίζεται στον κάδο ρητίνης, δημιουργώντας το επόμενο φιλμ ρητίνης προκειμένου να συνεχιστεί η διαδικασία επιλεκτικού πολυμερισμού από την δέσμη laser. Έτσι «χτίζεται» το τεμάχιο στρώση – στρώση. Παράμετροι όπως η ένταση της δέσμης laser, η ταχύτητα σάρωσης, ο χρόνος που

μεσολαβεί ανάμεσα σε διαδοχικές εμβαπτίσεις στον κάδο ρητίνης κτλ. επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα και τη διαστασιολογική ακρίβεια που επιτυγχάνεται. Το τεμάχιο μετά την κατασκευή του πρέπει να περάσει από μια σειρά διεργασιών προκειμένου να είναι ασφαλές στη χρήση. Καθαρίζεται αρχικά με νερό και στην συνέχεια με αιθυλική αλκοόλη για την απομάκρυνση της μη πολυμερισμένης ρητίνης που έχει παραμείνει στο τεμάχιο. Στη συνέχεια απομακρύνονται πιθανά στηρίγματα που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την κατασκευή του τεμαχίου, ενώ λόγω της μερικής διασύνδεσης (insufficient curing) που έχει λάβει χώρα κατά την κατασκευή του τεμαχίου, απαιτείται η ολοκλήρωση του curing σε θάλαμο υπεριώδους ακτινοβολίας. Το μη κατάλληλο και πλήρες curing, εκτός από αρνητικά αποτελέσματα στην ποιότητα του τεμαχίου, τις μηχανικές ιδιότητες, και τη χημική σταθερότητα, εμπεριέχει και κινδύνους για την υγεία, καθώς μονομερή ή/και ολιγομερή, που μπορούν να παραμείνουν και να απελευθερώνονται σταδιακά από το τεμάχιο, είναι τοξικά και εγκυμονούν κινδύνους για την υγεία (Bartolo, 2011).

Η διαφορά ανάμεσα στα συστήματα VP με χρήση δέσμης laser και αυτών με χρήση μάσκας (DLP) είναι ότι τα δεύτερα χρησιμοποιούν πηγή φωτός κατάλληλη να πολυμερίσει ταυτόχρονα το σύνολο των σημείων της κάθε στρώσης. Αρχικά, ξεκίνησε με την χρήση πηγών υπεριώδους ακτινοβολίας και κατάλληλων μασκών, από τις οποίες διερχόταν επιλεκτικά η υπεριώδης ακτινοβολία, δημιουργώντας την κάθε στρώση του τεμαχίου (σαν φωτογραφία της κάθε διατομής). Η ανάγκη για χρήση μεγάλου αριθμού από διαφορετικές μάσκες, και της απόλυτης ευθυγράμμισής τους οδήγησε στην εξέλιξη πιο ευέλικτων μεθόδων και διατάξεων όπως με χρήση οθονών υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Display – LCD) , ψηφιακών μικρο-κατόπτρων (Digital Micromirror Devices – DMD) ή ψηφιακών συστημάτων προβολής. Σε πρακτικό επίπεδο, η κύρια διαφορά συστημάτων SLA και DLP είναι η «πηγή» της ακρίβειας. Στα συστήματα SLA καθορίζεται από παράγοντες όπως τη διάμετρο εστίασης της δέσμης laser και την ακρίβεια ελέγχου της κίνησής της, ενώ σε συστήματα DLP η ακρίβεια εμφανίζεται ως το μέγεθος των εικονοστοιχείων (pixel size) που χρησιμοποιούνται (Bartolo, 2011).

Παραλλαγές των κλασικών μεθόδων VP AM είναι η υπέρυθρη στερεολιθογραφία (Infrared – IR Stereolithography) και η στερεολιθογραφία δύο φωτονίων (Two Photons Polymerization – TPP Stereolithography). Στην υπέρυθρη στερεολιθογραφία χρησιμοποιείται θερμοευαίσθητη ρητίνη και ακτινοβολία στο υπέρυθρο φάσμα για τον πολυμερισμό της, σε αντίθεση με την UV στερεολιθογραφία όπου χρησιμοποιούνται φωτοευαίσθητες ρητίνες και πηγές υπεριώδους ακτινοβολίας. Συνήθως, στην IR στερεολιθογραφία, η πηγή θερμότητας είναι CO₂ laser με ονομαστικό μήκος κύματος περίπου στα 10.6μm, ενώ συνήθως χρησιμοποιούνται εποξικές ρητίνες, χωρίς όμως να αποκλείεται και η δυνατότητα χρήσης ακόρεστων πολυεστερικών ρητινών αναμειγμένων με εκκινητές υπεροξειδίου (Bartolo, 2011). Τέλος, η μέθοδος στερεολιθογραφίας δύο φωτονίων χρησιμοποιείται για κατασκευή δομών σε micro και nano κλίμακα εστιάζοντας ένα femtosecond παλμικό laser σε όγκο υγρής ρητίνης, διαπερατής από την υπέρυθρη ακτινοβολία. Η αλυσιδωτή αντίδραση πολυμερισμού εκκινείται μόνο με την απορρόφηση δύο φωτονίων, και λαμβάνει χώρα σε εξαιρετικά περιορισμένο όγκο γύρω από το σημείο εστίασης της δέσμης laser, καθώς μόνο στον συγκεκριμένο όγκο απορροφάται η απαραίτητη ενέργεια ώστε να ξεπεραστεί το ενεργειακό κατώφλι εκκίνησης της αντίδρασης πολυμερισμού (threshold energy for polymerization) (Lee *et al.*, 2008).

Κλείνοντας την αναφορά στις μεθόδους VP παρατίθενται τα βασικά πλεονεκτήματα αλλά και οι αδυναμίες των συγκεκριμένων τεχνολογιών AM:

Πλεονεκτήματα

- ✓ Υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια.
- ✓ Υψηλή ποιότητα επιφανείας.
- ✓ Η χρήση συστημάτων επανεπίστωσης της ρητίνης (recoating blades) δημιουργεί στρώσεις και τεμάχια απαλλαγμένα από ελαττώματα (π.χ. τον εγκλωβισμό αέρα στην ρητίνη και την δημιουργία πορώδους).

- ✓ Σχετικά γρήγορη ταχύτητα κατασκευής των τεμαχίων.
- ✓ Δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης της ρητίνης η οποία δεν έχει υποστεί πολυμερισμό κατά της κατασκευή του τεμαχίου.
- ✓ Με χρήση της ίδιας φωτοπολυμεριζόμενης ρητίνης είναι εφικτή η ένωση και συγκόλληση δομών που δεν μπορούν να κατασκευαστούν ως ένα ενιαίο τεμάχιο, δίχως να προκύπτουν εμφανή και ανεπιθύμητα σημεία συνένωσης.

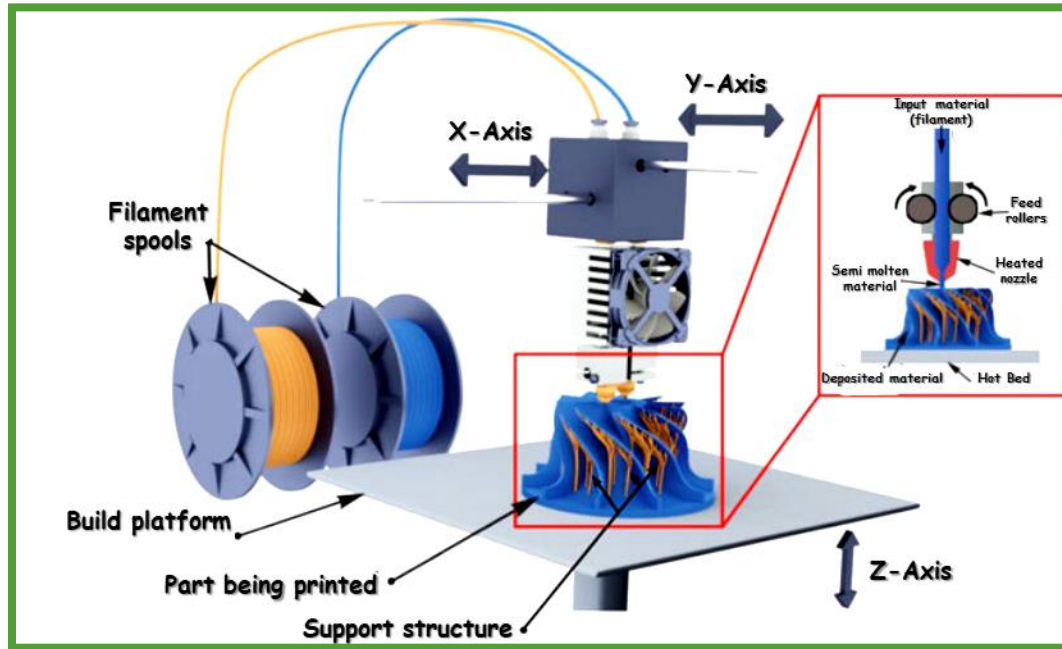
Μειονεκτήματα – Περιορισμοί

- ✓ Απαιτείται post process (συνήθως σε θάλαμο υπεριώδους ακτινοβολίας) για πλήρη πολυμερισμό της ρητίνης, αλλά και προσεχτικός χειρισμός και καθαρισμός του τεμαχίου αμέσως μετά την κατασκευή για απομάκρυνση της μη πολυμερισμένης ρητίνης που έχει απομείνει προσκολλημένη στο τεμάχιο.
- ✓ Συχνά είναι απαραίτητη η χρήση στηρίξεων με αρνητική επίπτωση στον χρόνο κατασκευής αλλά και την κατανάλωση υλικού.
- ✓ Η χρήση συστημάτων επανεπίστωσης της ρητίνης αυξάνουν το κόστος εξοπλισμού.
- ✓ Σχετικά περιορισμένη γκάμα από υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με αυξημένο κόστος.
- ✓ Οι ρητίνες ως μονομερή ή ολιγομερή είναι τοξικές, απαιτώντας εξαιρετική προσοχή στην αποθήκευσή τους ή την απόρριψή τους.

1.4.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΗΓΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO/ASTM 52900:2015, υπάρχει ένας γενικός ορισμός για κατεργασίες εξώθησης και επιλεκτικής εναπόθεσης υλικού για την κατασκευή αντικειμένων που συμπεριλαμβάνει και τη μέθοδο FDM, η οποία όμως στην πραγματικότητα, ως ονομασία, είναι ένα κατοχυρωμένο εμπορικό σήμα. Ένα αντίστοιχο εμπορικό σήμα είναι και η τεχνική Κατασκευής μέσω Τηγμένου Νήματος (Fused Filament Fabrication – FFF). Προς χάριν όμως απλότητας, και επειδή δεν αιτιολογείται επιστημονικά η διάκριση και διαφοροποίηση, συνολικά οι κατεργασίες αυτές θα αναφερθούν ως FDM. Ως FDM ορίζουμε, λοιπόν, κατεργασίες AM που βασίζονται στη θέρμανση και τήξη υλικού που βρίσκεται αρχικά υπό την μορφή νήματος, την εξώθησή του μέσω ακροφυσίου, και την επιλεκτική του εναπόθεση για την κατασκευή ενός τεμαχίου στρώση – στρώση. Συχνά χαρακτηρίζονται ως FDM και παραπλήσιες τεχνικές και μέθοδοι AM, μια ειδοποιός όμως διαφορά του FDM από τις υπόλοιπες είναι το ότι στο FDM το νήμα στην στερεή του μορφή λειτουργεί και ως στοιχείο της διάταξης FDM, καθώς έχει τον ρόλο του εμβόλου για την εξώθηση του τηγμένου υλικού μέσω του ακροφυσίου. Το νήμα, που συνήθως αποθηκεύεται στο σύστημα AM με την μορφή καρουλιών, προωθείται στο θερμαινόμενο ακροφύσιο, θερμαίνεται έως ότου φτάσει σε ρευστή ή ημίρρευστη κατάσταση (θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υλικού – glass transition temperature), και τέλος εξωθείται και εναποτίθεται επιλεκτικά μέσω του ακροφυσίου. Όπως προαναφέρθηκε, η αναγκαία πίεση για την εξώθηση του τηγμένου υλικού μέσω του ακροφυσίου ασκείται από το στερεό ακόμα νήμα, το οποίο ωθείται προς το ακροφύσιο μέσω κυλίνδρων τροφοδοσίας (feed rollers), και ως εκ τούτου θα πρέπει να διαθέτει συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες, και μίαν ελάχιστη απαιτούμενη αντοχή σε λυγισμό. Τυπικά, το ακροφύσιο εναποθέτει υλικό στο επίπεδο XY, και όταν ολοκληρωθεί η κάθε στρώση, η πλατφόρμα κατασκευής κινείται στο Z άξονα κατά το επιλεγμένο πάχος στρώσης με τη διαδικασία κατασκευής να συνεχίζεται. Το υλικό εναποτίθεται κάθε φορά επάνω στην προηγούμενη στρώση (εκτός από την 1^η στρώση που εναποτίθεται στην πλατφόρμα κατασκευής ή σε ειδικό υπόστρωμα), και καθώς βρίσκεται σε ημίρρευστη κατάσταση συγκολλάται στις υποκείμενες στρώσεις και τους γειτονικούς στοιχειώδεις όγκους υλικού (beads). Η θερμότητα και η πίεση από το ακροφύσιο έχει ως αποτέλεσμα την εκ νέου τήξη των προηγούμενων στρώσεων (remelting), και την καλύτερη και αποτελεσματικότερη ένωση της νέας στρώσης με τις προηγούμενες. Συχνά είναι

απαραίτητη η χρήση στηρίξεων οι οποίες και απομακρύνονται μετά το πέρας της κατεργασίας. Ως κατεργασίες post process συνηθίζονται η λείανση και στίλβωση των τεμαχίων για καλύτερη ποιότητα επιφανείας, η βαφή, η επιμετάλλωση, και η επικάλυψη με ρητίνη (Dave and Davim, 2021). Στην Εικόνα 1.5 παρουσιάζεται σχηματικά μια τυπική διάταξη FDM.

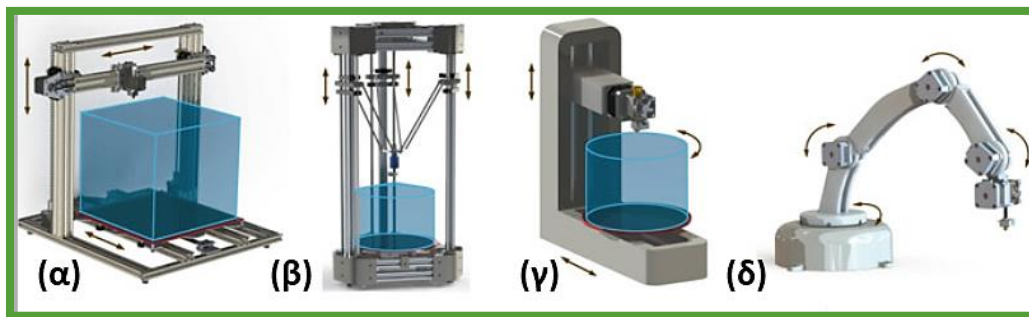


Εικόνα 1.5 Σχηματική παρουσίαση τυπικής διάταξης FDM
(Dave and Davim, 2021)

Εμπορικά διαθέσιμοι υπάρχουν διαφορετικοί τύποι συστημάτων FDM, οι οποίοι έχουν κοινές κύριες αρχές λειτουργίας αλλά διαφοροποιούνται στη γεωμετρία και στον τρόπο διάταξης και κίνησης των επιμέρους συστημάτων (ακροφυσίου και πλατφόρμας κατασκευής). Στην Εικόνα 1.6 παρουσιάζονται σχηματικά οι τέσσερις βασικές διατάξεις: καρτεσιανή, δέλτα, πολική, και με χρήση ρομποτικού βραχίονα. Το σύστημα με Καρτεσιανή διάταξη είναι το πλέον διαδεδομένο, με το ακροφύσιο και την πλατφόρμα κατασκευής να κινούνται γραμμικά στους καρτεσιανούς άξονες XYZ. Παραλλαγές της συγκεκριμένης διάταξης υπάρχουν και περιλαμβάνουν: το συνδυασμό κινούμενου ακροφυσίου στο XY επίπεδο και κίνηση της πλατφόρμας στον Z άξονα, κίνηση του ακροφυσίου και στους τρεις άξονες X,Y,Z και ακίνητη πλατφόρμα, ή κίνηση του ακροφυσίου στον Z άξονα και σε έναν από τους X και Y, με την πλατφόρμα να κινείται στον εναπομείναντα ελεύθερο άξονα του επιπέδου XY. Η διάταξη Δέλτα τυπικά έχει τρεις βραχίονες προσαρτημένους σε τρεις κάθετους άξονες (τροχιές – rails). Το ακροφύσιο αιωρείται πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής συγκρατούμενο από τους τρεις βραχίονες, με τον κάθε ένα εκ των οποίων συνδέεται μέσω σφαιροειδούς άρθρωσης. Η ακριβής κίνηση του ακροφυσίου σε σχέση με την ακίνητη πλατφόρμα επιτυγχάνεται μέσω συντονισμένης κάθετης κίνησης των βραχιόνων. Για πρακτικούς λόγους, ο χώρος κατασκευής είναι σχεδόν κυλινδρικός, ενώ οι συγκεκριμένοι τύπου εκτυπωτές είναι κατά κανόνα λιγότερο ακριβείς. Οι FDM διατάξεις που χρησιμοποιούν πολικές συντεταγμένες είναι οι λιγότερο διαδεδομένες. Για προφανείς λόγους ο κατασκευαστικός χώρος είναι κυλινδρικής γεωμετρίας, ενώ το ακροφύσιο κινείται κάθετα στον Z άξονα. Η κατασκευαστική πλατφόρμα (κυκλικής γεωμετρίας) μπορεί να κινηθεί γραμμικά σε μια διεύθυνση και να περιστρέφεται, με το κάθε σημείο να ορίζεται ως μια συγκεκριμένη απόσταση από το κέντρο της πλατφόρμας κατασκευής και μια συγκεκριμένη γωνία σε σχέση με το διάνυσμα αναφοράς. Τέλος, οι διατάξεις FDM με χρήση Ρομποτικού βραχίονα είναι ουσιαστικά ένας βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας στο άκρο του οποίου έχει

συνδεθεί ένα ακροφύσιο εκτύπωσης. Το κόστος τέτοιων συστημάτων είναι σημαντικά υψηλότερο από τα υπόλοιπα συστήματα FDM, κερδίζουν όμως σταδιακά έδαφος λόγω των υψηλότερων ταχυτήτων εκτύπωσης και της ευελιξίας τους (Dave and Davim, 2021).

Τα συστήματα FDM μπορούν να διαχειριστούν πληθώρα υλικών. Θεωρητικά, κάθε υλικό που με πρόσδοση θερμότητας τήκεται χωρίς να αποδομείται και «περνάει» σε ημίρρευστη φάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί, στην πλειοψηφία όμως των εφαρμογών και των συστημάτων FDM χρησιμοποιούνται πολυμερικά υλικά. Το πλέον διαδομένο υλικό για εφαρμογές FDM είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), πολυμερές φιλικό προς το περιβάλλον, μη τοξικό και επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία και το οικοσύστημα, και το οποίο μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές όπως το καλαμπόκι, το ζαχαροκάλαμο κτλ.. Ταυτόχρονα έχει χαμηλή θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (50 – 70 C°) και θερμοκρασία τήξης ανάμεσα σε 180 και 220 C°, θερμοκρασίες δηλαδή που εύκολα μπορούν να φτάσουν και να διαχειριστούν χαμηλού κόστους συστήματα FDM. Άλλα πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις FDM είναι: η πολυκαπρολακτόνη (PCL), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυαιθυλένιο (PE), το τερεφθαλικό πολυβουτυλένιο (PBT), το συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS), η πολυ-εθερ-εθερ-κετόνη (PEEK), αλλά και ένα σύνολο από λοιπά πολυμερή (Vgavahare *et al.*, 2020). Μια σημαντική επίσης κατηγορία υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις FDM είναι τα σύνθετα υλικά, νήματα δηλαδή που αποτελούνται από ένα πολυμερές και μια ενισχυτική μεταλλική, κεραμική, ή άλλου είδους (π.χ. ξύλο ή ίνες γραφενίου) πρόσμιξη. Τεμάχια από σύνθετα υλικά έχουν σημαντικά ανώτερες μηχανικές και θερμοφυσικές ιδιότητες από τα αντίστοιχα πολυμερή (Mwema and Akinlabi, 2020). Πλέον, με κατάλληλα νήματα υψηλής περιεκτικότητας σε μεταλλικές προσμίξεις, και την κατάλληλη post process (απομάκρυνση πολυμερικού υλικού και ακολούθως πυροσυσσωμάτωση) μπορούν να κατασκευαστούν με FDM αμιγώς μεταλλικά τεμάχια (Roshchurkin *et al.*, 2021). Τέλος, ερευνητικές ομάδες έχουν προτείνει την «εκτύπωση» τεμαχίων από μεταλλικά γυαλιά (metallic glasses) με χρήση κατάλληλων διατάξεων FDM (Gibson *et al.*, 2018).



Εικόνα 1.6 Σχηματική αναπαράσταση διαφορικών διατάξεων και συστημάτων FDM
α) Καρτεσιανό, β) Δέλτα, γ) Πολικό, και δ) Με ρομποτικό βραχίονα (Dave and Davim, 2021)

Κλείνοντας την αναφορά στις μεθόδους FDM παρατίθενται τα βασικά πλεονεκτήματα αλλά και οι αδυναμίες τους:

Πλεονεκτήματα

- ✓ Χαμηλό κόστος εξοπλισμού και λειτουργικό κόστος συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους AM.
- ✓ Απλός και αυτοματοποιημένος χειρισμός των διατάξεων FDM.
- ✓ Η εκτύπωση με μεθόδους FDM δεν δημιουργεί κατά κανόνα απόβλητα, ενώ μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής καθώς στην πλειοψηφία τους τα νήματα που χρησιμοποιούνται είναι χημικώς σταθερά και μη τοξικά (σε αντίθεση με τις ρητίνες σε εφαρμογές SLA πριν το curing).
- ✓ Ποικιλία από υλικά νημάτων.

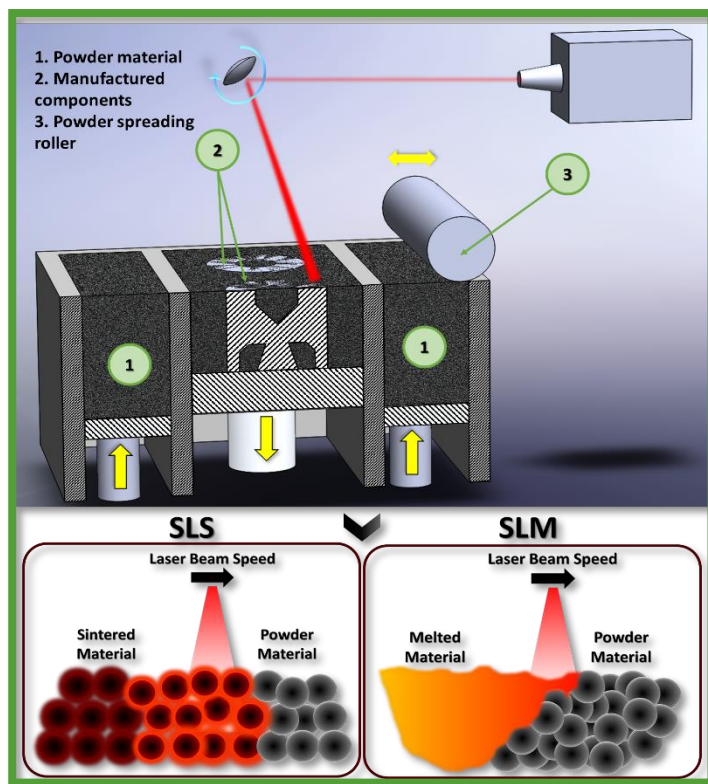
- ✓ Δραστηριοποιείται εμπορικά μεγάλος αριθμός από κατασκευαστές διατάξεων FDM, και ως εκ τούτου υπάρχει σημαντική ποικιλία επιλογών που καλύπτουν τις εκάστοτε ανάγκες.

Μειονεκτήματα

- ✓ Τα τεμάχια που κατασκευάζονται με FDM έχουν σημαντική ανισοτροπία και χαμηλές μηχανικές ιδιότητες, που προκύπτει κυρίως από την λιγότερο ισχυρή συνένωση των στρώσεων μεταξύ τους.
- ✓ Η επιφανειακή ποιότητα και η διαστασιακή ακρίβεια δεν είναι υψηλές με έντονο το φαινόμενο της διαστρωματικής εμφάνισης.
- ✓ Η κατασκευαστική ακρίβεια περιορίζεται από τεχνικά χαρακτηριστικά όπως η διάμετρος του ακροφυσίου ή/και η εξ'ορισμού κυλινδρική γεωμετρία του εξωθούμενου τηγμένου νήματος.
- ✓ Συχνή ανάγκη για χρήση στηρίξεων.
- ✓ Σχετικά αργές ταχύτητες κατασκευής.

1.4.3 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΠΟΥΔΡΑΣ ΣΕ ΚΛΙΝΗ

Οι Διεργασίες Σύντηξης Πούδρας σε Κλίνη⁷ (Powder Bed Fusion – PBF), περιλαμβάνουν ένα σύνολο τεχνολογιών AM που έχουν κοινή την βασική αρχή λειτουργίας, και διαφοροποιούνται ως προς τα επιμέρους συστήματα που χρησιμοποιούν, είτε για να αυξήσουν την αποδοτικότητα της κατεργασίας, είτε για να μπορέσουν να διαχειριστούν διαφορετικά υλικά. Στις μεθόδους PBF μια ή περισσότερες πηγές θερμότητας προκαλούν την επιλεκτική και στοχευμένη σύντηξη των σωματιδίων πούδρας της κάθε στρώσης, ενώ χρησιμοποιούνται κατάλληλα συστήματα και διατάξεις για την ομαλή και βέλτιστη διάστρωση της πούδρας. Μια βασική διαφορά ανάμεσα στα διάφορα συστήματα είναι το είδος υλικού που μπορούν να διαχειριστούν, με τα συστήματα που χρησιμοποιούν πολυμερικές πούδρες να ονομάζονται συνήθως pLS ή SLS (polymer Laser Sintering ή Selective Laser Sintering), ενώ αυτά που χρησιμοποιούν μεταλλικές mLS ή SLM (metal Laser Sintering ή Selective Laser Melting). Επίσης, μια ξεχωριστή κατηγορία συστημάτων PBF είναι αυτά που ως πηγή ενέργειας χρησιμοποιούν δέσμη ηλεκτρονίων και ονομάζονται EBM (Electron Beam Melting). Η απολύτως μονοσήμαντη κατηγοριοποίηση δεν είναι εφικτή, ειδικά καθώς η τεχνολογία κινείται ταχύτατα προς την χρήση κεραμικών και σύνθετων υλικών σε κατεργασίες PBF (Gibson, Rosen and Stucker, 2015; Δεδούσης και Γιαννατσής, 2017). Στην



Εικόνα 1.7 Σχηματική παρουσίαση των βασικών στοιχείων σε μεθόδους PBF με χρήση εστιασμένης δέσμης laser

⁷ Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια γενική αναφορά στις μεθόδους PBF, καθώς στο Κεφάλαιο 2 θα παρουσιαστεί λεπτομερέστερα η μέθοδος SLM, μια τυπική και ευρέως διαδεδομένη μέθοδος PBF.

Εικόνα 1.7 γίνεται μια σχηματική παρουσίαση των βασικών στοιχείων σε διατάξεις PBF, καθώς και μια σχηματοποιημένη αναφορά στην διαφορά ανάμεσα σε κατεργασίες SLS και SLM.

Αρχικά, σε κατεργασίες SLS και SLM, μέσω κατάλληλων διατάξεων από έμβολα και από έναν κύλινδρο διάστρωσης της πούδρας, μια στρώση πούδρας υλικού απλώνεται ομοιόμορφα και συμπιέζεται ελαφρώς στην πλατφόρμα κατασκευής. Στην συνέχεια, δέσμη laser εστιάζεται μέσω συστημάτων σάρωσης στην επιφάνεια της πλατφόρμας κατασκευής προκειμένου να γίνει επιλεκτική τήξη και συσσωμάτωση της πούδρας. Με την ολοκλήρωση της σάρωσης και της επιλεκτικής συσσωμάτωσης της κάθε στρώσης, μια νέα στρώση πούδρας απλώνεται, ξεκινώντας έναν νέο κύκλο κατεργασίας, ο οποίος επαναλαμβάνεται έως και την πλήρη κατασκευή του τεμαχίου. Μετά την ολοκλήρωση κατασκευής, το κατασκευασμένο τεμάχιο απομακρύνεται από τον θάλαμο, ενώ η μη τηγμένη και συσσωματωμένη πούδρα ανακυκλώνεται. Ένα χαρακτηριστικό που ίσως έγινε αντιληπτό από την περιγραφή της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η μη ανάγκη χρήσης στηρίξεων κατά την κατασκευή, καθώς η πούδρα πέριξ του τεμαχίου λειτουργεί ως στήριξη. Παρ' όλα αυτά, αν και δεν απαιτείται η στήριξη των τεμαχίων, συχνά χρησιμοποιούνται κατάλληλα στοιχεία για την αποτελεσματικότερη αγωγή της θερμότητας και ομοιόμορφη ψύξη των τεμαχίων (Srivastava and Sudarshan, 2016). Η ανάγκη συσσωμάτωσης του υλικού και όχι τήξης, δίνει την δυνατότητα κατεργασίας του συνόλου σχεδόν των υλικών (μέταλλα, πολυμερή, και κεραμικά). Οι πούδρες που χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες SLS δύναται να αποτελούνται από μια συγκολλητική φάση και ένα διηθητικό υλικό συμπλήρωσης (infiltrant), το οποίο μπορεί να είναι κάποιο μεταλλικό ή κεραμικό υλικό. Συνήθως, σε τέτοιες περιπτώσεις κατεργασίας, μετά την αρχική συσσωμάτωση και συγκόλληση, το κατασκευασμένο τεμάχιο υφίσταται ακόλουθη πυροσυσσωμάτωση προκειμένου να αποκτήσει την τελική του μικροδομή και ιδιότητες. Η βασική διαφορά ανάμεσα σε κατεργασίες SLS και SLM είναι ότι στις δεύτερες το υλικό υφίσταται πλήρη τήξη, σχηματίζοντας τοπικά μια περιοχή τηγμένου υλικού (melting pool), με το τελικό τεμάχιο να αποκτά πυκνότητα έως και μεγαλύτερη του 99%, με το πορώδες αντίστοιχα να περιορίζεται σημαντικά. Σε κατεργασίες SLM χρησιμοποιούνται κατά κανόνα πούδρες μεταλλικών υλικών, με τυπικά και χαρακτηριστικά παραδείγματα πούδρες από κράματα χάλυβα, τιτανίου, και νικελίου (Gebhardt, 2012).

Η ειδοποιός διαφορά ανάμεσα σε συστήματα SLS / SLM και EBM είναι η χρήση στα δεύτερα δέσμης ηλεκτρονίων ως πηγή θερμότητας για την επιλεκτική τήξη της πούδρας. Σε πρακτικό επίπεδο, οι διαφορές προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις της πούδρας με τις δέσμες laser ή ηλεκτρονίων αντίστοιχα, και από τις διαφορετικές κατασκευαστικές απαιτήσεις των δύο συστημάτων. Βασική κατασκευαστική διαφορά είναι το ότι η κατεργασία EBM αναγκαστικά λαμβάνει χώρα υπό κενό, και ως εκ τούτου, ο θάλαμος κατασκευής πρέπει να είναι απόλυτα μονωμένος. Επίσης, μια ακόμα σημαντική διαφορά είναι το γεγονός ότι η δέσμη ηλεκτρονίων διαπερνά το υλικό, και απορροφάται σε μεγάλο ποσοστό και βάθος, δίνοντας την δυνατότητα για ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες σάρωσης και κατασκευής. Διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις κατεργασίες PBF που χρησιμοποιούν δέσμη laser και την κατεργασία EBM προκύπτουν επίσης από τους διαφορετικούς φυσικούς μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας, με την πλέον αξιοσημείωτη διαφορά να είναι η ανάγκη χρήσης αγωγίμης πούδρας σε κατεργασίες EBM, σε αντίθεση με κατεργασίες SLS και SLM που (θεωρητικά τουλάχιστον) μπορούν να διαχειριστούν κάθε υλικό που υφίσταται μη καταστροφική τήξη και σύντηξη (Gebhardt, 2012; Gibson, Rosen and Stucker, 2015).

Κλείνοντας την σύντομη αναφορά στις μεθόδους PBF παρατίθενται τα βασικά πλεονεκτήματα αλλά και οι αδυναμίες τους:

Πλεονεκτήματα

- ✓ Το γεγονός ότι η κλίση πούδρας λειτουργεί ως στήριξη του τεμαχίου, και η μη ανάγκη για επιπλέον διατάξεις στήριξης που προκαλούν αύξηση στο χρόνο και στο κόστος κατασκευής.
- ✓ Δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετριών με χρήση πούδρας μικρής κοκκομετρίας .

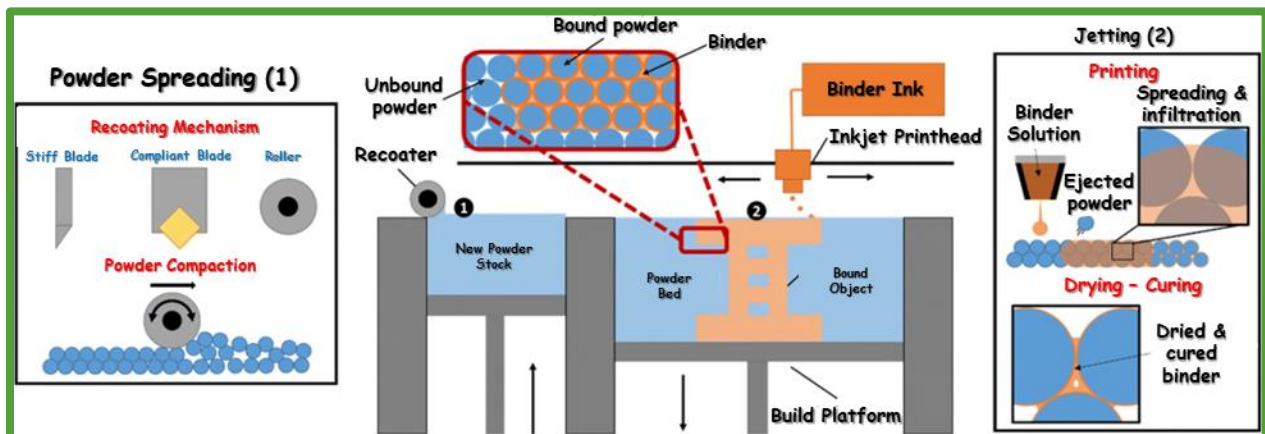
- ✓ Δυνατότητα εύκολης και αποτελεσματικής ενσωμάτωσης πολύπλοκων εσωτερικών γεωμετριών και χαρακτηριστικών όπως για παράδειγμα κανάλια ψύξης.
- ✓ Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα PBF έχουν δυνατότητα για ξεχωριστή εφαρμογή κύκλων προθέρμανσης και ψύξης, και ως εκ τούτου μειώνονται οι χρόνοι κατασκευής, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές και αφαιρούμενες πλατφόρμες κατασκευής.
- ✓ Υψηλή παραγωγικότητα / ρυθμοί παραγωγής.
- ✓ Δυνατότητα για εμφωλευμένες κατασκευές.

Μειονεκτήματα

- ✓ Η χρήση στηρίξεων μπορεί να απαιτηθεί σε περιπτώσεις που εμφανίζονται σημαντικά φαινόμενα στρέβλωσης λόγω θερμικών τάσεων.
- ✓ Το πορώδες σε περιπτώσεις απλής συσσωμάτωσης μπορεί να αποτελεί μειονέκτημα, και ως εκ τούτου να απαιτείται post process (όπως π.χ. πυροσυσσωμάτωση). Τέτοιες κατεργασίες, ειδικά για μεταλλικά τεμάχια, είναι κοστοβόρες και χρονοβόρες.
- ✓ Η παραγωγικότητα συνδέεται άμεσα με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου υλικού, με τη χαμηλή για παράδειγμα θερμική αγωγιμότητα να επηρεάζει αρνητικά τις ταχύτητες κατεργασίας.
- ✓ Οι κύκλοι προθέρμανσης και ψύξης του θαλάμου κατασκευής επηρεάζουν τον χρόνο κατεργασίας αυξάνοντάς τον.
- ✓ Υψηλό κόστος εξοπλισμού και αναλώσιμων.

1.4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

Οι μέθοδοι κατασκευής με Εναπόθεση Συγκολλητικού Μέσου (Binder Jetting Printing – BJP), επιλέγεται να παρουσιαστούν στη συνέχεια των PBF μεθόδων καθώς έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό την χρήση κλίνης πούδρας. Στην **Εικόνα 1.8** παρουσιάζεται σχηματικά μια διάταξη BJP (Oropeza and Hart, 2021). Ως μια ενδιαφέρουσα ιστορικής φύσης πληροφορία αναφέρεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος ήταν η πρώτη που χρησιμοποίησε τον όρο 3DP όταν παρουσιάστηκε από τους ερευνητές του MIT το 1989. Κατόπιν, ο ορισμός 3DP υιοθετήθηκε από το ευρύ κοινό ως γενική περιγραφή και αναφορά στην τεχνική κατασκευής με προσθήκη υλικού, και πλέον χρησιμοποιείται συχνά ανεξάρτητα με την μέθοδο AM.



Εικόνα 1.8 Σχηματική παρουσίαση διάταξης BJP (Oropeza and Hart, 2021)

Οι κατεργασίες BJP θα μπορούσαν εύστοχα να παρομοιαστούν και να συσχετιστούν ως βασική αρχή λειτουργίας με την κλασική 2D εκτύπωση. Αρχικά, απλώνεται στην πλατφόρμα κατασκευής μια λεπτή στρώση υλικού υπό τη μορφή μη συμπιεσμένης πούδρας (loose powder), και στη συνέχεια, μια κεφαλή εκτύπωσης (Inkjet Printhead) εναποθέτει επιλεκτικά το συγκολλητικό μέσο στις περιοχές που πρέπει να στερεοποιηθούν για της κατασκευή του τεμαχίου στρώση – στρώση. Τα σταγονίδια του συγκολλητικού μέσου (με διάμετρο περίπου 80μm) σχηματίζουν στοιχειώδη συσσωματώματα του ρευστού συγκολλητικού μέσου με τα σωματίδια της πούδρας, αλλά ταυτόχρονα παρέχουν και την απαραίτητη σύνδεση με τις προηγούμενες ήδη κατασκευασμένες στρώσεις του τεμαχίου. Ο συγκολλητικός παράγοντας δύναται να είναι διαφανής ή να έχει κάποιο χρώμα, ενώ για πρακτικούς λόγους, το χαμηλό ιξώδες είναι επιθυμητό (της τάξης των δεκάδων centipoise). Η συγκόλληση των σωματιδίων της πούδρας συνήθως περιλαμβάνει κάποια χημική αντίδραση, η οποία εξαρτάται από το τύπο των υλικών και την μέθοδο που χρησιμοποιείται. Η χημική αντίδραση μπορεί να λάβει χώρα με τέσσερις διαφορετικούς μηχανισμούς:

- όταν έρθει σε επαφή ο συγκολλητικός παράγοντας με το υλικό της πούδρας
- όταν συμβεί εξάτμιση του συγκολλητικού παράγοντα κατά την επαφή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα,
- όταν ο συγκολλητικός παράγοντας έρθει σε επαφή με κάποια άλλη χημική ουσία η οποία βρίσκεται αναμεμιγμένη στην κλίνη πούδρας
- έπειτα από ενεργοποίηση μέσω πρόσδοσης θερμότητας

Η κάθε στρώση συγκολλημένου υλικού θα πρέπει να υφίσταται κάποιου βαθμού ενίσχυση (strengthening) μέσω εξάτμισης της περιεχόμενης υγρασίας προτού απλωθεί η νέα στρώση πούδρας και ξεκινήσει ο κατασκευαστικός κύκλος για την επόμενη στρώση. Αυτό θα εξασφαλίσει τόσο την δομική σταθερότητα του τεμαχίου όσο και τη διαστασιολογική του ακρίβεια. Μετά το πέρας της κατασκευής του τεμαχίου, το μη συσσωματωμένο τεμάχιο (green part) έχει χαμηλή αντοχή και μηχανικές ιδιότητες, ενώ είναι απαραίτητη η συσσωμάτωση του υλικού με κατάλληλη post process κατεργασία και χρήση διηθητικού παράγοντα (infiltrating). Υλικά που μπορούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά διατάξεις BJP περιλαμβάνουν πολυμερή όπως τα ABS, PA, PC, μεταλλικές πούδρες αλουμινίου, χάλυβα, μπρούτζου, αλλά και μια σειρά από κεραμικά, κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο (Gebhardt, 2012; Gebhardt and Hotter, 2016; Srivastava *et al.*, 2020).

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της συγκεκριμένης μεθόδου AM μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

Πλεονεκτήματα

- ✓ Δυνατότητα αποτελεσματικής διαχείρισης ευρείας γκάμας υλικών καθώς η συγκόλληση, θεωρητικά τουλάχιστον, εξαρτάται κυρίως από το συνδεδετικό μέσο και λιγότερο από το υλικό της πούδρας.
- ✓ Δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης και εφαρμογής διαφορετικών συγκολλητικών μέσων, ακόμα και μέσω της ίδιας κεφαλής εκτύπωσης.
- ✓ Δυνατότητα για σχεδιασμό και κατασκευή τεμαχίων με μεταβλητές χωρικά ιδιότητες, σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες.
- ✓ Σχετικά υψηλές ταχύτητες κατασκευής.
- ✓ Λιγότερες ατέλειες σχετιζόμενες με θερμικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα στρεβλώσεις λόγω θερμικών τάσεων.
- ✓ Δυνατότητα για κατασκευή μεγαλύτερων τεμαχίων σε σχέση με άλλες μεθόδους AM.
- ✓ Κατά κανόνα, δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης στηρίξεων καθώς η κλίνη πούδρας λειτουργεί ως στήριξη του τεμαχίου.
- ✓ Χαμηλό λειτουργικό κόστος.

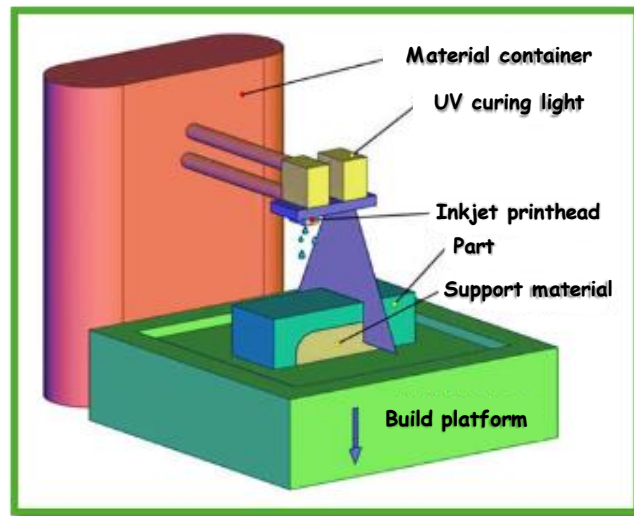
- ✓ Δυνατότητα απευθείας κατασκευής αντικειμένων συγκεκριμένου χρώματος, δίχως την ανάγκη για βαφή σε δεύτερη φάση.

Μειονεκτήματα

- ✓ Κατά κανόνα τα τεμάχια που κατασκευάζονται με BJP είναι χαμηλότερων μηχανικών ιδιοτήτων, ειδικά προτού υποστούν κατάλληλη συσσωμάτωση σε κατεργασία post process.
- ✓ Ως απόρροια των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων, τεμάχια κατασκευασμένα με BJP δεν ενδείκνυνται για χρήση ως δομικά στοιχεία.
- ✓ Το BJP είναι μέθοδος AM η οποία απαιτεί μια σειρά από βήματα, και δεν ολοκληρώνεται σε ένα μοναδικό, με το τεμάχιο που κατασκευάζεται να είναι έτοιμο προς χρήση.
- ✓ Σχηματισμός πορώδους και παραπλήσιων ελαττωμάτων.

1.4.5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

Οι τεχνολογίες AM Εναπόθεσης Υλικού (Material Jetting – MJ), περιλαμβάνουν ένα σύνολο από παραλλαγές και παραπλήσιες μεθόδους, ενώ είναι εμπορικά διαθέσιμες με διαφορετικά ονόματα ανάλογα με την κατασκευάστρια εταιρεία της AM διάταξης. Η τεχνολογία MJ ομοιάζει με την BJP καθώς χρησιμοποιεί κεφαλή εκτύπωσης για την επιλεκτική εναπόθεση υλικού. Αντίθετα όμως με τη μέθοδο BJP όπου συγκολλητικό μέσο εναποτίθεται σε κλίνη πούδρας για την κατασκευή του τεμαχίου, στο MJ γίνεται άμεση εναπόθεση του υλικού κατασκευής. Συγκεκριμένα, μέσω της κεφαλής εκτύπωσης εναποτίθενται απευθείας σταγονίδια του υλικού κατασκευάζοντας (όπως άλλωστε σε όλες τις μεθόδους AM) στρώση – στρώση το τεμάχιο με βάση στοιχειώδεις 2D διατομές. Τα σταγονίδια, όταν εξέρχονται της κεφαλής εκτύπωσης, είναι σε υγρή φάση ή υπό την μορφή αερολύματος (aerosol), και στερεοποιούνται κατά την εναπόθεσή τους. Σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται πολυμερικά υλικά μπορεί να απαιτείται και post process curing με UV ακτινοβολία προκειμένου το τεμάχιο να αποκτήσει τις τελικές βέλτιστες ιδιότητες και χημική σταθερότητα. Στην Εικόνα 1.9 παρουσιάζεται σχηματικά διάταξη MJ πολυμερικών υλικών με ταυτόχρονο UV curing.



Εικόνα 1.9 Σχηματική παρουσίαση διάταξης MJ με ταυτόχρονο UV curing
(<https://www.tanerxun.com/principle-of-3d-printing-mj/.html>)

Για την δημιουργία και την επιλεκτική εναπόθεση των σταγονιδίων του υλικού υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι: της συνεχούς εναπόθεσης (Continuous Stream Inkjet – CIJ), και της επιλεκτικής εναπόθεσης (Drop on Demand – DOD). Στην μέθοδο της CIJ, τα σταγονίδια υλικού παράγονται συνεχόμενα, με την επιλεκτική εναπόθεση να επιτυγχάνεται μέσω της ηλεκτροστατικής τους φόρτισης. Τα ηλεκτροστατικά φορτισμένα σταγονίδια είτε εξωθούνται μέσω της κεφαλής εκτύπωσης, είτε οδηγούνται σε σύστημα ανακυκλοφορίας του μη χρησιμοποιημένου υλικού. Αντίθετα, στην μέθοδο DOD τα σταγονίδια δημιουργούνται διακοπτόμενα, και όταν χρειάζεται, με βάση το προς κατασκευή σχέδιο. Το γεγονός ότι δεν απαιτείται σύστημα ηλεκτροστατικής φόρτισης των σωματιδίων, την καθιστά φθηνότερη, ενώ ταυτόχρονα τα συστήματα DOD επιτυγχάνουν υψηλότερη διαστασιακή ακρίβεια. Τα υλικά που μπορούν να διαχειριστούν τα συστήματα MJ περιλαμβάνουν πολυμερή όπως τα ABS, PLA, και πολυαμίδιο,

μεταλλικά υλικά, κεραμικά, και σύνθετα υλικά. Σημαντικό τέλος χαρακτηριστικό των συστημάτων MJ είναι η δυνατότητα της ταυτόχρονης χρήσης διαφορετικών υλικών, είτε για κατασκευή τεμαχίων αποτελούμενων από συνδυασμό υλικών, είτε για την κατασκευή των στηρίξεων (όπου αυτές είναι απαραίτητες) από διαφορετικό, και πιθανόν πιο οικονομικό υλικό (Srivastava *et al.*, 2020).

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της μεθόδου MJ μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

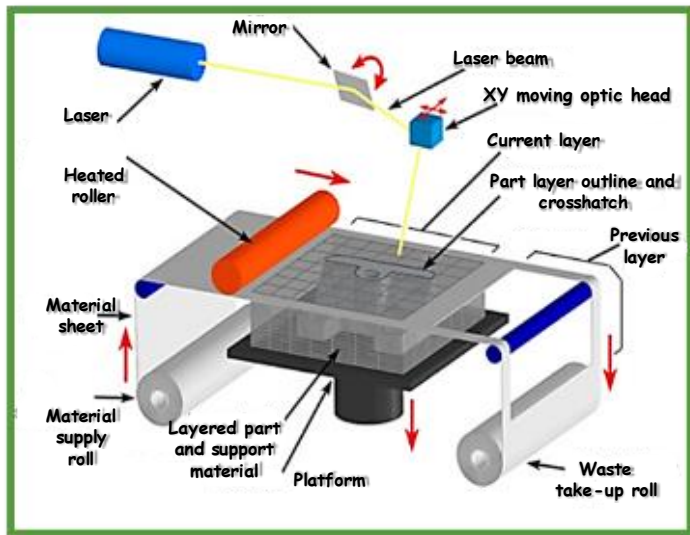
Πλεονεκτήματα

- ✓ Η δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης περισσότερων από μια κεφαλών εκτύπωσης, δυνατότητα η οποία έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της παραγωγικότητας μέσω μείωσης του χρόνου κατασκευής, αλλά και την δυνατότητα κατασκευής τεμαχίων από συνδυασμό υλικών για βέλτιστες και σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες ιδιότητες.
- ✓ Ευκολία στην χρήση και την συντήρηση.
- ✓ Κατασκευή τεμαχίων με υψηλή ποιότητα επιφανείας.
- ✓ Τα τεμάχια που κατασκευάζονται με MJ (όταν χρησιμοποιείται μόνο ένα υλικό) έχουν κατά κανόνα ισότροπες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες.

Μειονεκτήματα

- ✓ Ως μέθοδος είναι πιο αργή σε σύγκριση με άλλες τεχνικές AM, βελτιώνεται όμως η παραγωγικότητα με πιθανή χρήση πολλαπλών κεφαλών.
- ✓ Οι χαμηλές μηχανικές ιδιότητες που συνήθως έχουν τα τεμάχια που κατασκευάζονται μέσω MJ δεν επιτρέπουν την χρήση τους ως δομικά στοιχεία.
- ✓ Μικρός χώρος κατασκευής.
- ✓ Πιθανή η ανάγκη για χρήση στηρίξεων.
- ✓ Υψηλό κόστος σε πρώτες ύλες.

1.4.6 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ AM ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΑΛΛΗΛΩΝ ΦΥΛΛΩΝ



Εικόνα 1.10 Σχηματική παρουσίαση τυπικής διάταξης LOM (Moritz and Maleksaeedi, 2018)

Οι μέθοδοι AM με χρήση επάλληλων φύλλων υλικού έχουν δύο βασικές παραλλαγές: την Κατασκευή Μέσω Επάλληλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturing – LOM), και την Ενοποίηση Μέσω Υπερήχων (Ultrasonic Consolidation – UC), ενώ λοιπές ονομασίες, όπως για παράδειγμα Κατασκευή Μέσω Στρωματοποίησης Φύλλων Πλαστικού (Plastic Sheet Lamination – PSL), αφορούν πιο εξειδικευμένες τεχνικές, εστιάζοντας κυρίως στα υλικά που χρησιμοποιούνται.

Η κατασκευαστική αρχή της μεθόδου LOM είναι αρκετά απλή, με τα τεμάχια να κατασκευάζονται από επάλληλα ελάσματα / φύλλα υλικού των οποίων η μια επιφάνεια διαθέτει επίστρωση συγκολλητικού μέσου

(adhesive coating). Μέσω κατάλληλου μηχανισμού κυλίνδρων τροφοδοσίας τοποθετείται μια στρώση του φυλλοειδούς υλικού, ενώ στην συνέχεια, μέσω ενός θερμαινόμενου κυλίνδρου ασκείται η απαραίτητη πίεση και διοχετεύεται η απαραίτητη θερμότητα για την τήξη του συγκολλητικού μέσου, και την σύνδεση της νέας στρώσης με τις προηγούμενες. Στην συνέχεια, μια εστιασμένη δέσμη laser (συνήθως CO₂) κόβει το περίγραμμα της στοιχειώδους διατομής του προς κατασκευή τεμαχίου, ενώ το πλεονάζον υλικό τεμαχίζεται σε ορθογωνικές γεωμετρίες (crosshatched) και στη συνέχεια απομακρύνεται. Ακολουθεί το χαμήλωμα της κατασκευαστικής πλατφόρμας κατά το πάχος του φυλλοειδούς υλικού ώστε να τοποθετηθεί η επόμενη στρώση και να συνεχιστεί η κατασκευή του τεμαχίου. Παραλλαγές της μεθόδου LOM περιλαμβάνουν την χρήση διατάξεων μηχανικής κοπής του υλικού (knife blades) αντί για δέσμη laser, ή την κοπή του περιγράμματος πριν την συγκόλληση (form – then – bond) σε αντίθεση με την κοινή πρακτική να προηγείται η συγκόλληση της κοπής (bond – then – form). Στην Εικόνα 1.10 παρουσιάζεται σχηματικά μια τυπική διάταξη LOM (Moritz and Maleksaeedi, 2018). Θεωρητικά, κάθε τύπος φυλλοειδούς ή σε μορφή ελάσματος υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεθόδους LOM, όπως για παράδειγμα πολυμερή, μεταλλικά, κεραμικά, σύνθετα, ακόμα και κυτταρικά (cellulose) υλικά (Gebhardt, 2012; Gibson, Rosen and Stucker, 2015; Srivastava *et al.*, 2020).

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της μεθόδου LOM μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

Πλεονεκτήματα

- ✓ Δεν υπάρχει η ανάγκη για χρήση στηρίξεων.
- ✓ Υψηλές ταχύτητες κατασκευής.
- ✓ Κατά κανόνα χαμηλό κόστος πρώτων υλών και λειτουργικά κόστη.
- ✓ Δεν υπάρχουν έντονα φαινόμενα θερμικών τάσεων.
- ✓ Δεν υπάρχουν έντονα φαινόμενα παραμόρφωσης ή/και στρέβλωσης των τεμαχίων κατά την κατασκευή τους.
- ✓ Δεν λαμβάνουν χώρα χημικές διεργασίες / αντιδράσεις.
- ✓ Δυνατότητα κατασκευής μεγάλων τεμαχίων.

Μειονεκτήματα

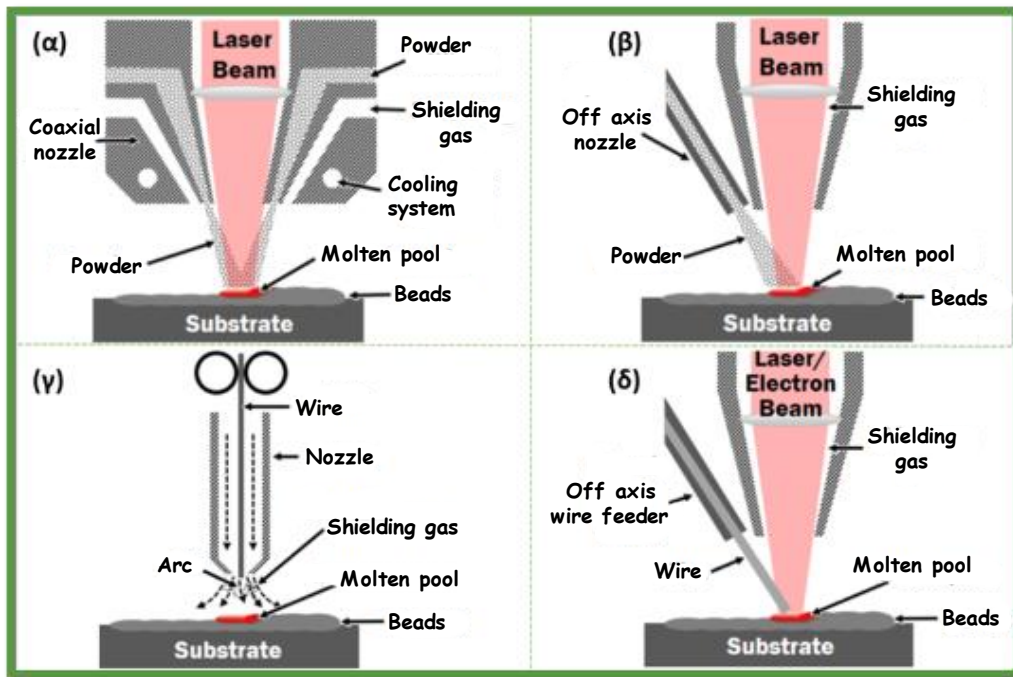
- ✓ Ενδείκνυται ως μέθοδος αποκλειστικά για φυλλοειδή υλικά.
- ✓ Πιθανότητα ανεπαρκούς σύνδεσης μεταξύ των στρώσεων.
- ✓ Χαμηλή διαστασιακή ακρίβεια και ποιότητα επιφανείας με ανάγκη για post process κατεργασίες.
- ✓ Δυσκολία κατασκευής τεμαχίων με εσωτερικές κοιλότητες.
- ✓ Το πλεονάζον υλικό δε μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί αν και είναι ανακυκλώσιμο κατά κανόνα.
- ✓ Οι πολύπλοκες γεωμετρίες απαιτούν υψηλότερους χρόνους κατασκευής.
- ✓ Ανισοτροπική συμπεριφορά των κατασκευασμένων τεμαχίων.
- ✓ Το πάχος της κάθε στρώσης εξαρτάται από το πάχος του φυλλοειδούς υλικού και δε μπορεί να ελεγχθεί με άλλον τρόπο.
- ✓ Η αφαίρεση υλικού, για να φτιαχτούν σε δεύτερο στάδιο κατεργασίας εσωτερικές γεωμετρίες, είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία.

Η μέθοδος UC είναι παρόμοια με την LOM καθώς το τεμάχιο κατασκευάζεται από επαλληλία συγκολλημένων φύλλων υλικού, διαφέρει όμως στο τρόπο διασύνδεσης των διαδοχικών στρώσεων. Αντί της χρήσης συγκολλητικού μέσου, μεταλλικά ελάσματα ενώνονται μέσω συγκόλλησης με υπερήχους (Ultra-Sonic Welding – USW). Το UC AM είναι επί τοις ουσίαις μια υβριδική κατεργασία, που παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με την LOM ή άλλες κατεργασίες AM μεταλλικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, τα τεμάχια εμφανίζουν λιγότερη στρέβλωση, ψαθυροποίηση (embrittlement), και διαστασιολογική απόκλιση λόγω του ότι η κατεργασία UC λαμβάνει χώρα σε

χαμηλές θερμοκρασίες και δεν υφίστανται υψηλά θερμικά φορτία. Επίσης είναι δυνατός ο σχεδιασμός και η κατασκευή τεμαχίων που συνδυάζουν διαφορετικά υλικά ή/και τύπους νημάτων (fiber materials), ενώ τέλος δεν είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ατμόσφαιρας για την αποφυγή οξειδωσης (Srivastava *et al.*, 2020).

1.4.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κλείνοντας την ενότητα, η τελευταία μέθοδος που θα παρουσιαστεί εν συντομία είναι της Εναπόθεσης με Κατευθυνόμενη Δέση Ενέργειας (Directed Energy Deposition – DED). Στην πραγματικότητα, ο όρος DED περιλαμβάνει ένα σύνολο από παρεμφερείς μεθόδους AM, οι οποίες έχουν κοινή βασική κατασκευαστική αρχή, διαφοροποιούνται όμως στον τρόπο υλοποίησής της. Στις κατεργασίες DED, θερμική ενέργεια αποδίδεται εστιασμένα προκειμένου να τήξει υλικό παράλληλα με την επιλεκτική εναπόθεσή του, με τις τεχνικές DED δικαίως να θεωρούνται συγγενικές με τις κατεργασίες επίστρωσης / επιστρωμάτωσης (cladding) και συγκόλλησης (welding). Ένας βασικός διαχωρισμός στις μεθόδους DED είναι ανάλογα με την μορφή του υλικού που χρησιμοποιείται, το οποίο μπορεί να παροχετεύεται είτε υπό μορφή πούδρας (Powder Based Directed Energy Deposition - PBDED), είτε σε μορφή νήματος (Wire Based Direct Energy Deposition – WBDED). Στα συστήματα PBDED χρησιμοποιείται κατά κανόνα μια εστιασμένη δέση laser ως πηγή θερμότητας (αναφέρονται συχνά και ως συστήματα Powder Based Direct Laser Deposition – PBDLD), ενώ στα συστήματα WBDED υπάρχει η δυνατότητα για χρήση δέσης laser, δέσης ηλεκτρονίων, ηλεκτρικού τόξου (electric arc), ή τόξου πλάσματος (plasma arc). Επίσης τα συστήματα DED διαφοροποιούνται και ως προς τον τρόπο τροφοδοσίας του υλικού, με την πούδρα ή το νήμα να τροφοδοτείται είτε ομοαξονικά (axial feedstock), είτε πλευρικώς (off-axial feedstock) (Gibson, Rosen and Stucker, 2015; Srivastava *et al.*, 2020; Ahn, 2021). Στην Εικόνα 1.11 παρουσιάζονται σχηματικά τέσσερις διαφορετικές διατάξεις DED (Ahn, 2021).



Εικόνα 1.11 Σχηματική παρουσίαση διατάξεων DED με α) αξονική παροχή υλικού σε πούδρα και χρήση δέσης laser, β) πλευρική παροχή υλικού σε πούδρα και χρήση δέσης laser, γ) αξονική παροχή υλικού υπό την μορφή νήματος και χρήση τόξου, δ) πλευρική παροχή υλικού υπό την μορφή νήματος και χρήση δέσης ηλεκτρονίων (Ahn, 2021)

Στις τυπικές διατάξεις PBDLD η τροφοδοσία υλικού γίνεται με την εναπόθεση των κόκκων της πούδρας στην περιοχή τήξης, και την τήξη τους εντός της περιοχής αυτής. Αντίθετα, σε συστήματα εναπόθεσης με χρήση υπερ-υψηλής ταχύτητας δέσμης laser (extreme high speed laser deposition), η τήξη των σωματιδίων της πούδρας γίνεται πάνω από την περιοχή τήξης και όχι εντός. Τα συστήματα WBDED αποτελούν επί της ουσίας την φυσική συνέχεια και προέκταση διατάξεων συγκόλλησης, με βασικό χαρακτηριστικό και πλεονέκτημα τον εξαιρετικά υψηλό βαθμό αξιοποίησης του υλικού (έως και 10%). Ταυτόχρονα, οι πρώτες ύλες υπό την μορφή νήματος έχουν χαμηλότερο κόστος από τις αντίστοιχες υπό μορφή πούδρας, ενώ μπορούν να επιτευχθούν με WBDED υψηλότερες ταχύτητες εναπόθεσης υλικού σε σχέση με τις PBDED. Μειονέκτημα των WBDED είναι το γεγονός ότι ενδείκνυνται για κατασκευή σχετικά απλών γεωμετριών, ή απλώς την επιφανειακή επίστρωση τεμαχίων. Όπως προαναφέρθηκε, η πηγή θερμότητας για την τήξη του νήματος μπορεί να είναι δέσμη laser, δέσμη ηλεκτρονίων, ηλεκτρικό τόξο, ή τόξο πλάσματος. Οι διατάξεις WBDED με χρήση δέσμης laser έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τις αντίστοιχες PBDED, χαμηλότερο λειτουργικό κόστος, ενώ ταυτόχρονα παράγουν επιφάνειες χαμηλότερης τραχύτητας, και επιτυγχάνουν υψηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης υλικού. Οι διατάξεις WBDED με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων χρησιμοποιούνται για μέταλλα υψηλής ανακλαστικότητας και αγωγιμότητας, όπως για παράδειγμα ο χαλκός ή το αλουμίνιο, ενώ σε σύγκριση με τις αντίστοιχες διατάξεις που χρησιμοποιούν δέσμη laser έχουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας, αποδοτικότητα, ταχύτητα σάρωσης, και ταχύτητα εναπόθεσης υλικού. Μειονέκτημα είναι η ανάγκη να λαμβάνουν χώρα υπό κενό, σε αντίθεση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούν δέσμη laser, και οι οποίες εφαρμόζονται υπό αδρανή ατμόσφαιρα (συνήθως με παροχέτευση αδρανούς αερίου τοπικά μέσω ακροφυσίου). Τέλος, όταν ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται τεχνολογία τόξου, κατά αντιστοιχία με τις μεθόδους συγκόλλησης, μπορεί να είναι είτε μεταλλικού ηλεκτροδίου, είτε βολφραμίου, ή τόξο πλάσματος (Ahn, 2021).

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά συνολικά των μεθόδων DED μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

Πλεονεκτήματα

- ✓ Τα συστήματα DED βρίσκουν ευρεία χρήση σε εφαρμογές επιδιόρθωσης, αποκατάστασης και ανακατασκευής.
- ✓ Υψηλές ταχύτητες εναπόθεσης υλικού σε σχέση με μεθόδους PBF.
- ✓ Δυνατότητα για κατεργασία και κατασκευή τεμαχίων μεγάλου όγκου.
- ✓ Δυνατότητα χρήσης διαφορετικών υλικών, και κατασκευή τεμαχίων με επάλληλες στρώσεις διαφορετικών υλικών (graded materials).

Μειονεκτήματα

- ✓ Πιθανή Ανάγκη για χρήση στηρίξεων.
- ✓ Χαμηλότερη ακρίβεια σε σχέση με άλλες μεθόδους AM.
- ✓ Χαμηλότερη ποιότητα επιφανείας σε σχέση με άλλες μεθόδους AM και τυπικά υπάρχει ανάγκη για post process.
- ✓ Ενδείκνυνται για κατασκευή τεμαχίων σχετικά απλής γεωμετρίας.

Η επιστημονική έρευνα προτείνει διαρκώς νέες καινοτόμες και υβριδικές μεθόδους AM, όπως για παράδειγμα το Cold Spraying ή κατεργασίες AM με χρήση τριβής (Friction Based AM), οι οποίες όμως βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και στάδιο εξέλιξης, ή έχουν εξαιρετικά περιορισμένο εύρος εφαρμογών. Στο κεφάλαιο αυτό έγινε προσπάθεια μιας γενικής και σύντομης επισκόπησης των βασικότερων μεθόδων AM, αυτών κυρίως που έχουν ευρεία πρακτική και εμπορική εφαρμογή. Στόχος δεν ήταν η εντρυφήση στην κάθε μέθοδο, καθώς κάτι τέτοιο θα ήταν πρακτικά αδύνατον, και επιστημονικά ουτοπικό στα πλαίσια μιας διατριβής. Στο Κεφάλαιο 2 ακολουθεί εκτενέστερη και εις βάθος παρουσίαση της μεθόδου SLM, η οποία και αποτελεί το θέμα της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής.

2. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΠΟΥΔΡΑΣ ΣΕ ΚΛΙΝΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΣΜΗΣ LASER (L-PBF) ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗΣ ΤΗΞΗΣ (SLM)

Στο 2^ο κεφάλαιο θα γίνει μια συστηματική και πιο λεπτομερής παρουσίαση των μεθόδων PBF, με ιδιαίτερη έμφαση στην μέθοδο SLM. Βασικός στόχος είναι η σφαιρικότερη και πληρέστερη κατανόηση των συγκεκριμένων κατεργασιών AM, καθώς και η απαραίτητη εμβάθυνση σε καίρια επιστημονικά θέματα που αφορούν την συγκεκριμένη διατριβή. Δεδομένου ότι η μελέτη των κατεργασιών, συμβατικών και μη, είναι εκ φύσεως πολυεπίπεδη, και επί της ουσίας αποτελεί το εποικοδομητικό «άθροισμα» και «κοινό τόπο» διαφορετικών επιστημονικών και ερευνητικών αντικειμένων, η ανάλυση και παρουσίαση θα γίνει με απόλυτο σεβασμό στα διακριτά επιστημονικά πλαίσια, με έμφαση στην εξειδίκευση που απαιτείται σε μια διατριβή.

2.1 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΠΟΥΔΡΑΣ ΣΕ ΚΛΙΝΗ (PFB) – ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Οι μέθοδοι PBF εξελίχθηκαν ταχύτατα, καταφέροντας σε περίπου μια δεκαετία, (από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 έως τα μέσα της δεκαετίας του 1990) να μετατραπούν από πρωτοποριακές ιδέες και πρωτότυπες εργαστηριακές διατάξεις, σε λειτουργικά, ολοκληρωμένα και εμπορικά διαθέσιμα συστήματα κατασκευής τεμαχίων. Τα τεμάχια μάλιστα που κατασκευάζονται με τις συγκεκριμένες μεθόδους διαθέτουν την απαραίτητη διαστασιολογική ακρίβεια, και μηχανικές αντοχές ώστε να καθίστανται λειτουργικά, και έτοιμα (ή σχεδόν έτοιμα) προς χρήση. Η γενική κατασκευαστική αρχή είναι αρκετά απλή, στην πραγματικότητα όμως, η υλοποίησή της είναι σύνθετη, απαιτητική, και προϋποθέτει να αντιμετωπιστούν και να ξεπεραστούν σημαντικές πρακτικές δυσκολίες. Η κατασκευή του τεμαχίου (μετά δηλαδή τον σχεδιασμό με λογισμικό CAD και την μετατροπή του σε αρχείο .stl) μπορεί να περιγραφεί με τρία βασικά βήματα:

- **Διάστρωση της πούδρας:** το υλικό υπό την μορφή πούδρας διαστρώνεται στην πλατφόρμα κατασκευής, ενώ με χρήση κατάλληλης διάταξης (π.χ. κύλινδρος διάστρωσης) κατανέμεται ομοιόμορφα και συμπιέζεται ελαφρώς. Το πάχος της κάθε στρώσης κυμαίνεται από μερικές δεκάδες, έως μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα.
- **Επιλεκτική σύντηξη της στρώσης πούδρας:** εστιασμένη πηγή θερμότητας (laser ή δέσμη ηλεκτρονίων) σαρώνει την κλίνη της πούδρας (σύμφωνα με τα δεδομένα του G-code που περιέχονται στο αντίστοιχο αρχείο .stl) με αποτέλεσμα την σύντηξη τοπικά της πούδρας. Το υλικό, το οποίο βρίσκεται πλέον σε πλήρη ή μερική τήξη, κατά την ψύξη και στερεοποίησή του συσσωματώνεται και συνδέεται με τις υποκείμενες στρώσεις του ήδη συσσωματωμένου υλικού. Ταυτόχρονα, κατάλληλα επικουρικά συστήματα εξασφαλίζουν αδρανή ή υπό κενό ατμόσφαιρα ώστε να λάβει χώρα η κατεργασία υπό βέλτιστες συνθήκες.
- **Δημιουργία νέας στρώσης πούδρας:** μετά την ολοκλήρωση της σάρωσης και συσσωμάτωσης της συγκεκριμένης στρώσης, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει κατά το ονομαστικό πάχος στρώσης, και γίνεται εκ νέου διάστρωση πούδρας ώστε να ξεκινήσει ο νέος κατασκευαστικός κύκλος.

Ο παραπάνω «κύκλος» επαναλαμβάνεται έως την πλήρη κατασκευή του τεμαχίου (Wischeropp, 2021). Η αλυσίδα κατασκευής ολοκληρώνεται με την απομάκρυνση του τεμαχίου από την κατασκευαστική πλατφόρμα, τον καθαρισμό του από την μη συσσωματωμένη πούδρα που έχει πιθανόν παραμείνει προσκολλημένη σε αυτό, και την αφαίρεση των στηρίξεων που μπορεί να έχουν χρησιμοποιηθεί (σε κατεργασίες PBF η χρήση στηρίξεων είναι σχετικά περιορισμένη σε σχέση με άλλες μεθόδους AM καθώς η πούδρα πέριξ του τεμαχίου λειτουργεί κατά κανόνα ως στήριξη). Κατεργασίες post process δύναται να περιλαμβάνουν θερμικές κατεργασίες για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων (κυρίως σε μεταλλικά τεμάχια), ή/και κατεργασίες φινιρίσματος (Gebhardt and Hotter, 2016). Τα υλικά που μπορούν να διαχειριστούν συστήματα PBF περιλαμβάνουν μεταλλικά, πολυμερή, κεραμικά, και σύνθετα υλικά (Avrampos and Vosniakos, 2022).

Ο «απλός» όμως αυτός κατασκευαστικός κύκλος που περιγράφηκε εν συντομία, στην πραγματικότητα είναι πολύ πιο σύνθετος, η υλοποίησή του οποίου «κρύβει» σημαντικές πρακτικές και κατασκευαστικές δυσκολίες και προκλήσεις, ενώ ταυτόχρονα πολύπλοκοι και διαφορετικοί φυσικοί μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα. Στο σημείο αυτό θα γίνει μια, κατά το δυνατόν σύντομη, αναφορά στα διαφορετικά βασικά συστήματα και παραμέτρους μιας τυπικής διάταξης PBF, ενώ οι φυσικοί μηχανισμοί θα περιγραφούν και μελετηθούν διεξοδικά κατά την παρουσίαση της μεθόδου μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM, το οποίο αποτελεί και το θέμα της παρούσας διατριβής. Τα βασικά υποσυστήματα μιας τυπικής διάταξης PBF είναι: η κατασκευαστική πλατφόρμα, η πηγή laser και τα συστήματα σάρωσης, οι διατάξεις τροφοδοσίας και διάσθρωσης της πούδρας, και τα επικουρικά συστήματα (απομάκρυνσης της πούδρας, παροχής και φιλτράρισμα αέρα).

2.1.1 Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η πλατφόρμα κατασκευής αποτελεί μέρος της διάταξης των συστημάτων PBF, στην οποία εδράζεται και στερεώνεται η πλάκα κατασκευής (base plate) του/των τεμαχίων, και η οποία αποτελεί το υπόστρωμα κατασκευής (substrate). Το υλικό του υποστρώματος, ιδανικά, πρέπει είναι ίδιο με το υλικό του τεμαχίου (ήτοι της πούδρας), ή τουλάχιστον, όπου δεν είναι αυτό εφικτό, να έχει παρόμοια χημική σύσταση και θερμοφυσικές ιδιότητες. Επίσης πρέπει να αποφεύγεται η χρήση υλικών υποστρώματος τα οποία κατά την τήξη και επαναστερεοποίησή τους σχηματίζουν ψαθυρές ενδομεταλλικές ενώσεις καθώς, έπειτα από την θραύση τους λόγω θερμικών τάσεων, μπορεί να οδηγήσουν στην αποκόλληση του τεμαχίου από το υπόστρωμα. Προκειμένου να περιοριστούν οι θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται στο τεμάχιο κατά την κατασκευή, χρησιμοποιούνται θερμαινόμενες πλατφόρμες κατασκευής, οι οποίες τυπικά έχουν την δυνατότητα προθέρμανσης και θέρμανσης του υλικού έως και τους 200°C (Yadroitsev *et al.*, 2021). Στην πλειοψηφία τους οι πλατφόρμες κατασκευής έχουν ωφέλιμο όγκο της τάξης των 500 x 400 x 400 mm, με τις μεγαλύτερες εξ αυτών να φτάνουν έως και τα 800 x 400 x 500 mm (Gebhardt and Hotter, 2016; Yadroitsev *et al.*, 2021).

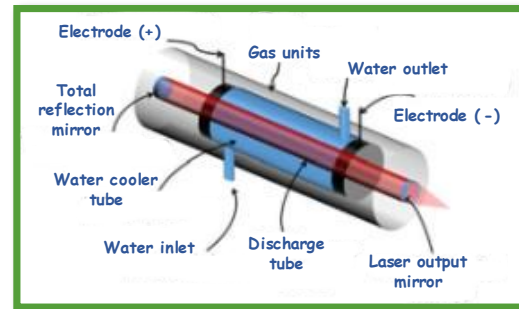
2.1.2 ΠΗΓΗ LASER ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΑΡΩΣΗΣ⁸

Αναμφίβολα, σημαντική ώθηση στο AM, και κυρίως στις μεθόδους L-PBF, έδωσε η πρόοδος που συντελέστηκε τις τελευταίες δεκαετίες στις τεχνολογίες των laser. Η λέξη laser αποτελεί ένα ακρωνύμιο (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation) και στα Ελληνικά αποδίδεται ως: «ενίσχυση του φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας». Πρακτικά, το laser μπορεί να περιγραφεί και να θεωρηθεί ως μια πηγή εστιασμένης μονοχρωματικής, συμφασικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο υπεριώδες, ορατό, ή υπέρυθρο φάσμα. Η ονομαστική μέση ισχύς ενός laser δύναται να κυμαίνεται από μερικά milliwatt έως και δεκάδες kilowatt, ενώ η λειτουργία μπορεί να είναι είτε συνεχής, είτε παλμική. Τα βασικά δομικά στοιχεία μιας διάταξης laser είναι το ενεργό μέσο, το οποίο διεγείρεται και παράγει τα φωτόνια (ήτοι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία), η παροχή ισχύος η οποία εξασφαλίζει την απαραίτητη ενέργεια για την διέγερση του προαναφερθέντος μέσου, και η διάταξη οπτικής κοιλότητας (οπτικό αντηχείο – resonator) η οποία επί της ουσίας συγκεντρώνει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για τον σχηματισμό της δέσμης laser. Τα ενεργά μέσα που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα laser μπορεί να βρίσκονται σε αέρια, υγρή, ή στερεή μορφή, ενώ διαφοροποιήσεις επίσης υπάρχουν σε όλα τα δομικά στοιχεία μιας διάταξης laser. Κατ' αυτόν τον τρόπο, διατίθεται μια ευρεία γκάμα από διατάξεις laser οι οποίες, αν

⁸ Η τεχνολογία των laser αποτελεί ένα τεράστιο επιστημονικό κεφάλαιο, και φυσικά δε δύναται να εξαντληθεί στα πλαίσια της παρουσίασης των διατάξεων laser που χρησιμοποιούνται σε συστήματα PBF. Σεβόμενοι τα διακριτά επιστημονικά πλαίσια που ήδη έχουν αναφερθεί, η αναφορά στα συστήματα laser γίνεται αποκλειστικά υπό το πρίσμα της παρούσας διατριβής, και παρατίθενται μόνο στοιχεία τα οποία κρίνονται απαραίτητα για την κατανόηση και την πληρότητα των κεφαλαίων που ακολουθούν. Παρουσιάζονται δηλαδή βασικές πληροφορίες, έτσι ώστε η πηγή laser στην οποία θα γίνεται συχνή αναφορά κατά την μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM να μην αντιμετωπίζεται ως black box, αλλά με δεδομένο ότι οι βασικοί φυσικοί μηχανισμοί είναι κατανοητοί και λαμβάνονται υπ' όψιν.

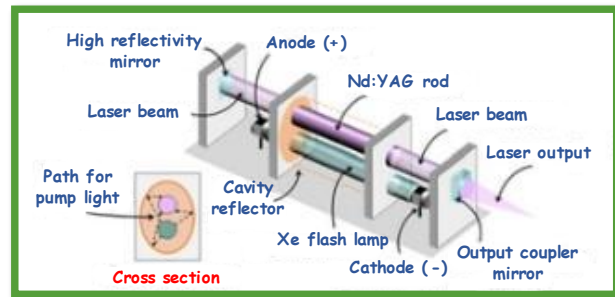
και μοιράζονται κάποια κοινά στοιχεία, διαφέρουν σημαντικά στις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους (Hecht, 1999). Στην συνέχεια της συγκεκριμένης ενότητας θα γίνει μια στοχευμένη περιγραφή των διατάξεων laser που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές L-PBF, και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που αυτές έχουν.

Τα laser CO₂ έχουν αέριο ενεργό μέσο, και ιστορικά είναι από τα πρώτα που αναπτύχθηκαν. Αποτελούνται από έναν σωλήνα εκκένωσης (discharge tube), μια ηλεκτρική πηγή άντλησης (electric pump source), και κατοπτρικές διατάξεις (optics). Η ηλεκτρική πηγή άντλησης μπορεί να λειτουργεί είτε με συνεχές είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται βρίσκεται στο υπέρυθρο φάσμα, με μήκος κύματος μεταξύ 9.0 και 11.0μm. Σε εφαρμογές AM που χρησιμοποιούν διατάξεις laser CO₂, τυπικό μήκος κύματος είναι τα 10.6μm, ενώ κατά κανόνα τα laser είναι συνεχή. Ο βαθμός απόδοσης των laser CO₂ θεωρείται υψηλός (5 – 20%), ενώ η ισχύς κυμαίνεται από 0.1 – 20kW. Οι διατάξεις laser CO₂, λόγω του ότι είναι σχετικά απλές, με υψηλή αξιοπιστία, και χαμηλό κόστος, καθίστανται οι πλέον συχνά χρησιμοποιούμενες σε κατεργασίες ακριβείας. Παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν είναι πιθανή αστάθεια ισχύος που μπορεί να παρατηρηθεί λόγω θερμικών φαινομένων (Lee *et al.*, 2017). Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται σχηματικά μια τυπική διάταξη laser CO₂.



Εικόνα 2.1 Σχηματική παρουσίαση τυπικής διάταξης laser CO₂ (Lee *et al.*, 2017)

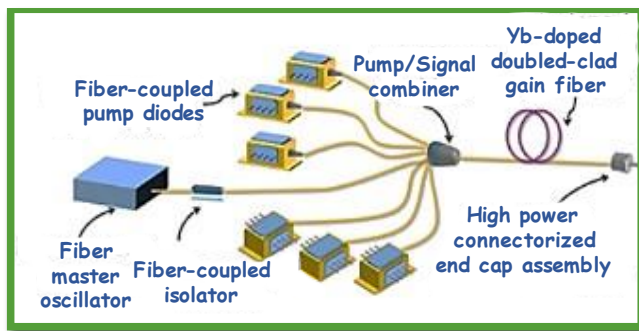
Τα Nd:YAG laser (Γρανάτης Αλουμινίου Υτρίου με πρόσμιξη Νεοδυμίου – Neodymium doped Yttrium Aluminium Garnet) χρησιμοποιούν στερεό ενεργό μέσο, και συγκεκριμένα κρύσταλλο υτρίου – αλουμινίου (YAG) εμπλουτισμένο με νεοδύμιο (Nd), ο οποίος διεγείρεται οπτικά είτε μέσω λαμπτήρα στην ακτινική διεύθυνση, είτε αξονικά μέσω δευτερεύοντος laser με μήκος κύματος στα 808nm. Το μήκος κύματος των Nd:YAG laser είναι 1064nm, ενώ η δέσμη του laser μπορεί να κατευθύνεται μέσω οπτικών ινών, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των Nd:YAG laser σε σχέση με τα CO₂ laser. Τα Nd:YAG laser λειτουργούν τόσο ως συνεχή, όσο και ως παλμικά laser με ονομαστική μέση ισχύ που φτάνει τα 20kW. Η χρήση λαμπτήρα για την διέγερση του κρυστάλλου Nd:YAG δεν έχει υψηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ συνοδεύεται από προβλήματα σταθερότητας και ποιότητας της δέσμης που προκύπτουν από την συσσώρευση θερμότητας. Ως εκ τούτου, η χρήση δευτερεύοντος laser για την οπτική διέγερση του κρυστάλλου Nd:YAG προτιμάται κατά κανόνα σε εφαρμογές AM (Berger *et al.*, 1988; Lee *et al.*, 2017). Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται σχηματικά μια τυπική διάταξη laser Nd:YAG.



Εικόνα 2.2 Σχηματική παρουσίαση τυπικής διάταξης laser Nd:YAG (Lee *et al.*, 2017)

Η τρίτη και τελευταία κατηγορία από laser που χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατεργασίες AM είναι τα laser ινών (Fiber Laser), στα οποία το ενεργό μέσο είναι ίνες εμπλουτισμένες με σπάνιες γαίες. Αρχικά είχαν περιορισμένη εφαρμογή λόγω χαμηλής απόδοσης σε σχέση με τα υπόλοιπα laser στερεάς κατάστασης, όμως με την τεχνολογική βελτίωση και εξέλιξη τους εδραιώνονται σταδιακά ως εναλλακτική των λοιπών laser στερεάς κατάστασης. Ανάμεσα στις προσμίξεις σπάνιων γαίων, το υτέρβιο (Yb-Fiber Laser) χρησιμοποιείται κατά κόρον σε εφαρμογές υψηλής

ισχύος λόγω του υψηλού βαθμού κβαντικής απόδοσης (quantum efficiency $\approx 94\%$). Στα Yb-fiber laser, η διέγερση των ντοπαρισμένων ινών γίνεται με χρήση διοδικών laser (diode laser) στο μήκος κύματος 950 – 980nm, με το μήκος κύματος της δέσμης laser που προκύπτει να βρίσκεται κοντά στο υπέρυθρο φάσμα, ανάμεσα στα 1030 – 1070nm. Τα Yb-Fiber laser βρίσκουν σειρά πρακτικών εφαρμογών στις μη συμβατικές κατεργασίες, συμπεριλαμβανομένου και του AM λόγω της υψηλής απόδοσής τους (οπτική προς ηλεκτρική ισχύς) η οποία μπορεί να φτάσει έως και 25%, και της υψηλής ποιότητας δέσμης laser που προκύπτει, και της συμπαγούς τους κατασκευής (Lee *et al.*, 2017). Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται σχηματικά μια τυπική διάταξη Yb-Fiber Laser.



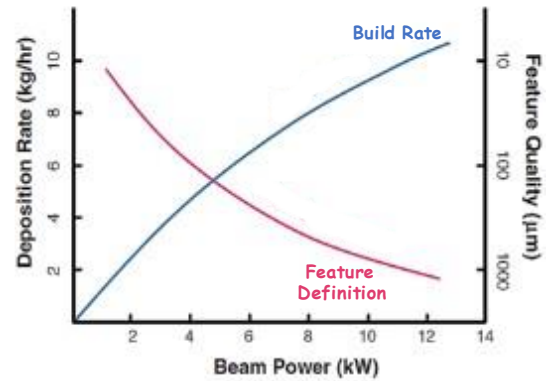
Εικόνα 2.3 Σχηματική παρουσίαση τυπικής διάταξης Yb-Fiber Laser (Lee *et al.*, 2017)

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των πηγών laser αποτελούν σημαντική παράμετρο των κατεργασιών L-PBF, και αφορούν είτε εγγενείς ιδιότητες, όπως για παράδειγμα το μήκος κύματος της δέσμης laser, είτε ρυθμιζόμενα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ισχύ της δέσμης, τη χωρική και χρονική κατανομή της ισχύος της δέσμης⁹, τη διάμετρό και την ποιότητά της κτλ.. Οι παράμετροι αυτές πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπ' όψιν κατά τον προγραμματισμό της κατεργασίας καθώς επηρεάζουν καθοριστικά την απόδοση και της ποιότητά της (Brandt, 2017). Το μήκος κύματος της δέσμης laser είναι ίσως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό καθώς σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό απορρόφησης της ενέργειας από την πούδρα της κλίνης. Καθ' ότι το ποσοστό απορρόφησης κάθε υλικού εξαρτάται από το μήκος κύματος του laser, και με δεδομένο τον στόχο για μέγιστη απορρόφηση ώστε να αυξηθεί η απόδοση και η παραγωγικότητα της κατεργασίας, ανάλογα με το υλικό της πούδρας πρέπει να χρησιμοποιείται και η ενδεδειγμένη πηγή laser. Για εκτύπωση μεταλλικών υλικών χρησιμοποιούνται Nd:YAG και Yb-Fiber laser καθώς η απορρόφηση στα μέταλλα κατά κανόνα αυξάνεται σε μικρά μήκη κύματος (ήτοι $\approx 1064\text{nm}$ που εκπέμπουν οι προαναφερθέντες τύποι laser). Σε εφαρμογές σύντηξης πολυμερών προτιμώνται laser CO₂ καθώς η απορρόφηση των πολυμερών αυξάνεται για μήκη κύματος $\approx 10.6\mu\text{m}$ (Lee *et al.*, 2017). Ταυτόχρονα, η ελάχιστη διάμετρος σύγκλησης της δέσμης, ένα σημαντικό λειτουργικό χαρακτηριστικό μιας διάταξης L-PBF, εξαρτάται και αυτή από το μήκος κύματος του laser (Self, 1983).

Η ισχύς της δέσμης laser αποτελεί ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό, το οποίο όμως πρέπει να κρίνεται συνολικά και λαμβάνοντας υπ' όψιν έναν αριθμό από λοιπές παραμέτρους. Η δέσμη laser χρησιμοποιείται για την πρόσδοση ικανής ποσότητας θερμικής ενέργειας στο υλικό της πούδρας ώστε να επιτευχθεί σύντηξη, ενώ υπάρχει ένα κατώτατο όριο πυκνότητας ισχύος που απαιτείται προκειμένου να αναπτυχθούν οι αναγκαίες θερμοκρασίες για αποτελεσματική σύντηξη του υλικού. Άρα, η ονομαστική ισχύς του laser είναι η μία μόνο από τις παραμέτρους καθώς, το ποσοστό απορρόφησης, η διάμετρος της δέσμης, και η χωρική της κατανομή επηρεάζουν συνολικά, και καθορίζουν την πραγματική πυκνότητα ισχύος (Lee *et al.*, 2017). Επίσης, στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί και η έννοια της ογκομετρικής πυκνότητας ενέργειας (Volumetric Energy Density – VED) η οποία αποτελεί θεμελιώδες μέγεθος και παράμετρο σε κατεργασίες SLM, και η οποία θα αναλυθεί λεπτομερέστερα σε επόμενο σημείο της διατριβής. Η VED, εξαρτάται από την πυκνότητα ισχύος της δέσμης laser, αλλά και παραμέτρους όπως η ταχύτητα σάρωσης και το πάχος της κάθε στρώσης πούδρας (Leary, 2020). Η βέλτιστη επιλογή της ισχύος του

⁹ Σε κατεργασίες και συστήματα L-PBF χρησιμοποιούνται κατά κανόνα συνεχή laser. Ως εκ τούτου η χρονική κατανομή ισχύος μπορεί δικαιολογημένα να θεωρείται σταθερή. Στην βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί και μελετηθεί διατάξεις L-PBF με χρήση παλμικών laser (Ke *et al.*, 2014), ή παλμών laser (Wang, Wang and Hong, 2018; Ozsoy *et al.*, 2021) αλλά στον παρόντα χρόνο δεν είναι διαδεδομένη η χρήση τους (Demir, Colombo and Previtali, 2017).

laser καθίσταται ακόμα πιο πολύπλοκη καθώς, ανάλογα με το αν στόχος είναι η συσσωμάτωση ή η πλήρης τήξη της πούδρας, η επιθυμητή θερμοκρασία αλλάζει, όπως επίσης διαφοροποιείται και ανάλογα με το υλικό. Υψηλότερη πυκνότητα ισχύος, κατά κανόνα, επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες σάρωσης και άρα υψηλότερη παραγωγικότητα, οδηγεί όμως ταυτόχρονα σε χαμηλότερη ποιότητα κατασκευής (Frazier, 2014). Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται διαγραμματικά η συσχέτιση της ισχύος της δέσμης laser με τους ρυθμούς εναπόθεσης υλικού και την ποιότητα κατασκευής. Η ποιότητα και οι κατασκευαστικές δυνατότητες μιας διάταξης L-PBF, συναρτήσει της πηγής laser που χρησιμοποιείται, επηρεάζονται και από λοιπούς παράγοντες όπως ο συντελεστής ποιότητας της δέσμης laser (M^2 – beam quality factor), η χωρική κατανομή της ισχύος, και το κατά πόσο αυτή ακολουθεί ή όχι Gaussian κατανομή. Οι παράγοντες αυτοί εξαρτώνται και καθορίζονται τόσο από νόμους και κανόνες της φυσικής (οπτικής) στους οποίους υπόκεινται, όσο και από κατασκευαστικές παραμέτρους.



Εικόνα 2.4 Συσχέτιση της ισχύος της δέσμης laser με τους ρυθμούς εναπόθεσης υλικού και την ποιότητα κατασκευής (Frazier, 2014)

Η δέσμη laser, αφού δημιουργηθεί, πρέπει να εστιαστεί και να κατευθυνθεί αποτελεσματικά στην πλατφόρμα κατασκευής. Αρχικά, η δέσμη laser διέρχεται από διάταξη αποσυμπίεσης (expander), ενώ στην συνέχεια η κατεύθυνσή της γίνεται μέσω συστήματος σάρωσης με χρήση ενεργών ή παθητικών οπτικών μέσων (active or passive optics). Στις διατάξεις παθητικών οπτικών μέσων, μετά από το γαλβανόμετρο σάρωσης, η δέσμη διέρχεται από φακό τύπου F-Theta. Οι τυπικοί σφαιρικοί φακοί έχουν κυκλικό επίπεδο εστίασης με αποτέλεσμα την σημαντική παραμόρφωση της δέσμης στα ακραία σημεία της περιοχής κατεργασίας (edge of the process field), λόγω αφεστίασης (defocusing). Αντίθετα, στους φακούς τύπου F-Theta, οι οποίοι διαθέτουν ενσωματωμένα συστήματα βαρελοειδούς παραμόρφωσης (barrel distortion), η θέση του σημείου εστίασης εξαρτάται γραμμικά από το γινόμενο της γωνίας εκτροπής (deflection angle) και του εστιακού μήκους (focal length), επιτυγχάνοντας έτσι, και με την χρήση απλών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, σταθερή διάμετρο και ποιότητα δέσμης σε όλη την επιφάνεια σάρωσης (Dickey, 2018; Yadroitsev *et al.*, 2021). Καθώς τα συστήματα L-PBF αποκτούν όλο και μεγαλύτερους χώρους κατασκευής, οι διατάξεις με χρήση φακών F-Theta καθίστανται μη πρακτικές και ιδιαίτερα ακριβές, με αποτέλεσμα να αντικαθίστανται από ενεργά συστήματα σάρωσης τριών αξόνων με χρήση μονάδας δυναμικής εστίασης (Dynamic Focusing Module – DFM). Η μονάδα δυναμικής εστίασης τοποθετείται πριν το γαλβανόμετρο σάρωσης, ενώ για την επίτευξη επίπεδου εστιακού πεδίου χρησιμοποιείται κατάλληλος φακός και γραμμικός μετατροπέας κίνησης στον Z άξονα. Έτσι, με την χρήση των συστημάτων DFM η εστίαση πραγματοποιείται και στον κάθετο άξονα, ενώ η διάμετρος της δέσμης παραμένει σταθερή σε όλο το επίπεδο πεδίο εστίασης (Yadroitsev *et al.*, 2021).

2.1.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΥΔΡΑΣ

Οι διατάξεις διαχείρισης της πούδρας αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι των συστημάτων L-PBF καθώς πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες λειτουργικές προδιαγραφές, ενώ ταυτόχρονα καλούνται να αντιμετωπίσουν σειρά από προβλήματα που προκύπτουν από την φύση της πρώτης ύλης, ήτοι υλικό σε μορφή πούδρας. Αρχικά, η δεξαμενή αποθήκευσης της πούδρας πρέπει να είναι ικανού όγκου προκειμένου να εξυπηρετεί τις απαιτήσεις του εκάστοτε χώρου κατασκευής, και να ολοκληρώνεται η κατασκευαστική διαδικασία αδιάκοπα. Ταυτόχρονα, πρέπει να απλώνεται στην πλατφόρμα κατασκευής ο ενδεδειγμένος όγκος πούδρας ώστε να καλύπτονται πλήρως τα υποκείμενα στρώματα αλλά χωρίς να γίνεται σπατάλη υλικού. Η διάστρωση της πούδρας πρέπει επίσης να είναι

ομοιόμορφη, συγκεκριμένου και μικρού πάχους, με υψηλή επαναληψιμότητα, αλλά χωρίς να αναπτύσσονται υψηλά διατμητικά φορτία τα οποία μπορούν δυνητικά να προκαλέσουν την παραμόρφωση των υποκείμενων ήδη κατασκευασμένων στρώσεων (Gibson, Rosen and Stucker, 2015).

Στα σύγχρονα συστήματα L-PBF χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο δύο είδη διατάξεων τροφοδοσίας. Στο πρώτο, το υλικό της πούδρας βρίσκεται αποθηκευμένο σε δύο δοχεία τροφοδοσίας, με την κατάλληλη ποσότητα πούδρας να διοχετεύεται μέσω της ακριβούς ανύψωσης των δοχείων και το ταυτόχρονο χαμήλωμα / υποχώρηση της πλατφόρμας κατασκευής κατά το ονομαστικό πάχος στρώσης. Η πούδρα που έχει ανυψωθεί διαστρώνεται ομοιόμορφα είτε με χρήση περιστρεφόμενου κυλίνδρου διάστρωσης, είτε με χρήση λεπίδας (doctor blade). Η δεύτερη εναλλακτική διάταξη τροφοδοσίας της πούδρας περιλαμβάνει την χρήση χοάνης που κινείται επάνω από την πλατφόρμα κατασκευής. Μέσω συστήματος τροφοδοσίας παροχετεύεται στη χοάνη η απαραίτητη ποσότητα πούδρας (η συνολική ποσότητα πούδρας μπορεί να είναι αποθηκευμένη σε δοχείο ανεξάρτητο από την κλίση πούδρας και τον χώρο κατασκευής), και στην συνέχεια εναποτίθεται μέσω της χοάνης μπροστά από κινούμενο κύλινδρο τροφοδοσίας ή/και λεπίδα. Η ποιότητας διάστρωσης εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων, με σημαντικό ρόλο να παίζουν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των συστημάτων διάστρωσης. Εμπορικά διαθέσιμα υπάρχουν συστήματα λεπίδων από μαλακά υλικά με επικάλυψη από καουτσούκ ή ίνες άνθρακα (soft blade re-coaters with rubber or carbon fiber brush), λεπίδες από σκληρά υλικά (hard blade re-coater), κύλινδροι από σκληρό εργαλειοχάλυβα, με κάθε ένα από αυτά να έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τέλος, συστήματα δονήσεων υπερήχων είθισται να χρησιμοποιούνται για επίτευξη υψηλότερης ποιότητας διάστρωσης της πούδρας (Yadroitsev *et al.*, 2021; Avrampos and Vosniakos, 2022). Θα πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι οι διατάξεις διάστρωσης της πούδρας αποτελούν ένα πολύ σημαντικό υποσύστημα καθώς σχετίζονται άμεσα με παραμέτρους όπως η πυκνότητα της πούδρας, η κατανομή των κόκκων, η ομοιομορφία διάστρωσης κτλ., παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την όλη κατεργασία, και φυσικά την ποιότητα της κατασκευής του τελικού τεμαχίου.

2.1.4 ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα βασικά επικουρικά, αλλά εξίσου σημαντικά, συστήματα σε διατάξεις L-PBF είναι της δημιουργίας και διατήρησης ενδεδειγμένης και βέλτιστης ατμόσφαιρας, καθώς και αυτά για την απομάκρυνση και ορθή διαχείριση της πούδρας που δεν συσσωματώθηκε.

Αρχικά, και όπως έχει ήδη αναφερθεί, λόγω του αυξημένου κινδύνου οξειδωσης του υλικού της πούδρας¹⁰ η κατεργασία πρέπει να λαμβάνει χώρα σε αδρανή ατμόσφαιρα, συνήθως αζώτου για κράματα νικελίου, κοβαλτίου και σιδήρου, και αργού για κράματα αλουμινίου και τιτανίου. Ταυτόχρονα, από την αλληλεπίδραση της δέσμης laser με την πούδρα, λαμβάνουν χώρα φαινόμενα έντονης εξάτμισης και εκτίναξης υλικού τα οποία εξαρτώνται από τις παραμέτρους κατεργασίας, και μπορούν δυνητικά να επηρεάσουν την ποιότητα κατασκευής αλλά και τη σωστή λειτουργία των συστημάτων L-PBF. Με ελεγχόμενη, ομοιόμορφη, και μη τυρβώδη ροή του προστατευτικού αερίου (shielding gas) επάνω από την κλίση πούδρας απομακρύνονται τα υποπροϊόντα της κατεργασίας, ενώ στη συνέχεια το αέριο διέρχεται από κατάλληλα φίλτρα για την συγκράτηση των σωματιδίων ώστε να μην επιμολύνουν την περιοχή κατασκευής. Η επιλογή σωστών φίλτρων ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητες του αερίου προστασίας που χρησιμοποιείται, και η ενδεδειγμένη αλλαγή και συντήρησή τους αποτελούν καίριες παραμέτρους για την απρόσκοπτη λειτουργία των διατάξεων L-PBF, αλλά και την ποιότητα κατασκευής. Σε διατάξεις EBM δεν υφίσταται

¹⁰ Είναι γνωστό πως τα υλικά υπό μορφή πούδρας αντιμετωπίζουν αυξημένο κίνδυνο οξειδωσης σε σχέση με τα αντίστοιχα χύδην υλικά, λόγω της υψηλής ειδικής επιφάνειάς τους.

η έννοια της αδρανούς ατμόσφαιρας καθώς η όλη κατεργασία τελείται υπό κενό, και άρα τα αντίστοιχα συστήματα στόχο έχουν τη δημιουργία και διατήρηση κενού. (Dai and Gu, 2015; Yadroitsev *et al.*, 2021).

Η ορθή τέλος διαχείριση της πούδρας περιλαμβάνει τη συλλογή, απομάκρυνση και αποθήκευση της πούδρας που δεν έχει υποστεί σύντηξη, διαδικασίες που δε μπορούν να αποφευχθούν λόγω της εξ ορισμού αρχής λειτουργίας των μεθόδων L-PBF. Η απομάκρυνση της πούδρας μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα από τον χειριστή (κυρίως σε διατάξεις με μικρούς χώρους κατασκευής), είτε με χρήση ημιαυτόματων συστημάτων ή/και πλήρως αυτόματων συστημάτων κενού / υποπίεσης, ενώ τη συλλογή της πούδρας ακολουθεί κοσκίνισμα για το διαχωρισμό συσσωματωμάτων και υποπροϊόντων της κατεργασίας. Οι διαδικασίες συλλογής και αποθήκευσης της πούδρας ιδανικά θα πρέπει να λαμβάνουν χώρα υπό αδρανή ατμόσφαιρα και σε κλειστά συστήματα ώστε αφενός να μην υπάρχει οξειδωση του υλικού και επακόλουθη υποβάθμιση των ιδιοτήτων αφετέρου, για λόγους ασφαλείας, να αποφεύγεται η άμεση επαφή της πούδρας με τους χειριστές των διατάξεων L-PBF (Yadroitsev *et al.*, 2021).

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η σύντομη αναφορά και επισκόπηση των βασικών και κοινών υποσυστημάτων μιας τυπικής διάταξης L-PBF. Στόχος δεν ήταν η εμβάθυνση σε κάθε ένα από αυτά, αλλά η περιγραφή για λόγους πληρότητας, και προκειμένου ο αναγνώστης να σχηματίσει μια πιο σφαιρική εικόνα της κατεργασίας. Σκοπίμως η αναφορά γίνεται σε διατάξεις L-PBF και όχι συγκεκριμένα σε SLS ή SLM. Συχνά οι κατεργασίες SLS και SLM συγχέονται, ενώ οι αντίστοιχοι όροι δε χρησιμοποιούνται με την απαραίτητη επιστημονική αυστηρότητα, και με βάση τις ειδοποιούς διαφορές των δύο τεχνολογιών. Στο σημείο αυτό, και καθώς το θέμα της συγκεκριμένης διατριβής είναι η μεθοδολογία μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM, θεωρείται απαραίτητο και σκόπιμο να γίνει μια λεπτομερέστερη αναφορά και διάκριση των δύο κατεργασιών AM.

2.2 ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕ LASER – SLS & ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΤΗΞΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER – SLM

Η βασική και ειδοποιός διαφορά ανάμεσα στις μεθόδους SLS και SLM είναι ο τρόπος σύντηξης των σωματιδίων της πούδρας, και πιο συγκεκριμένα η φάση στην οποία το/τα υλικό/ά μεταβαίνει κατά την θέρμανση του και υπό την επίδραση της δέσμης laser. Αναμφίβολα οι δύο κατεργασίες μοιράζονται μια σειρά από κοινά χαρακτηριστικά και λειτουργικές αρχές, είναι όμως σημαντικό να αποσαφηνιστεί το γεγονός ότι σε διαδικασίες SLS η σύντηξη της πούδρας σε ένα ενιαίο στέρεο υλικό γίνεται μέσω συσσωμάτωσης ενώ σε διαδικασίες SLM λαμβάνει χώρα πλήρης τήξη του/των υλικού/ών. Η θεμελιώδης αυτή διαφορά επηρεάζει και καθορίζει τόσο τις παραμέτρους κατεργασίας (π.χ. τύπος laser, ισχύ laser, VED... κτλ.), όσο και τον τύπο και το είδος των υλικών που δύναται να χρησιμοποιηθούν (Gebhardt, 2012).

Ο μηχανισμός της συσσωμάτωσης είναι σημαντικά πιο πολύπλοκος, σε σχέση με αυτόν της πλήρους τήξης και της μετέπειτα επαναστερεοποίησης, καθώς στην πραγματικότητα δεν είναι μοναδικός και μονοσήμαντος, αλλά περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές εναλλακτικές, οι οποίες μάλιστα μπορούν και να συνδυαστούν μεταξύ τους (Merzelis, Froyen and Rombouts, 2005). Αρχικά, υπάρχει η συσσωμάτωση στερεής φάσης (Solid State Sintering – SSS), η οποία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες $0.5T_m < T < T_m$, με T_m την θερμοκρασία τήξης του υλικού, και κύριο μηχανισμό σύνδεσης, τη διάχυση και την ελαχιστοποίηση της ελεύθερης ενέργειας μέσω σχηματισμού λαϊμού (μείωση των διακένων) μεταξύ των κόκκων. Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η δυνατότητα εφαρμογής της σε ευρεία γκάμα υλικών, καθώς, θεωρητικά τουλάχιστον, δεν υφίσταται κάποιος περιορισμός πλην της επαρκούς πρόσδοσης ενέργειας (κατά κανόνα θερμικής) για την έναρξη και συνέχιση της διαδικασίας συσσωμάτωσης (Merzelis, Froyen and Rombouts, 2005; Kumar, 2014).

Μια δεύτερη κατηγορία μηχανισμών συσσωμάτωσης είναι η συσσωμάτωση μέσω υγρής φάσης ή συσσωμάτωση μερικής τήξης (Liquid Phase Sintering – LPS or Partial Melting Sintering – PMS), η οποία βασίζεται και περιλαμβάνει την ύπαρξη ενός δομικού υλικού που παραμένει σε στερεή κατάσταση, και ενός συνδετικού μέσου που

ρευστοποιείται και επιφέρει ουσιαστικά τη συσσωμάτωση. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις το συνδεδετικό ρευστό μέσο είναι απλά μέρος του στερεού υλικού που έχει τηχθεί (μερική τήξη υλικού).

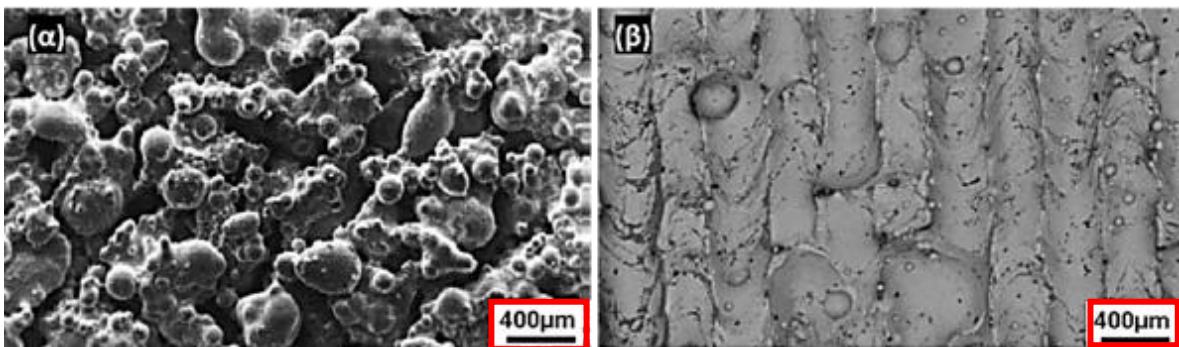
Ανάλογα με το είδος του υλικού της πούδρας οι μέθοδοι συσσωμάτωσης διακρίνονται στις τεχνικές:

- με χρήση διαφορετικού συνδεδετικού μέσου και διαφορετικού δομικού υλικού
- με χρήση σύνθετων κόκκων πούδρας οι οποίοι περιέχουν και το συνδεδετικό μέσο και το δομικό υλικό,
- με χρήση κόκκων δομικού υλικού επικαλυμμένων με το συνδεδετικό παράγοντα

Στην πρώτη περίπτωση, το δομικό υλικό είναι συνήθως μέταλλο ή κεραμικό, και το συνδεδετικό μέσο μέταλλο χαμηλού σημείου τήξης και υπό μορφή εξαιρετικά μικρών κόκκων (σε σχέση με το δομικό υλικό). Ο συνδυασμός χαμηλού σημείου τήξης και υψηλού λόγου επιφάνειας προς όγκο (λεπτόκοκκη μορφή) ευνοεί την επιλεκτική τήξη του συνδεδετικού μέσου και συσσωμάτωση των στερεών κόκκων, με απαραίτητη όμως την πυροσυσσωμάτωση του τεμαχίου μετά την κατασκευή του. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται κόκκοι σύνθετου υλικού οι οποίοι περιέχουν ταυτόχρονα και το συνδεδετικό μέσο και το δομικό υλικό, τα τεμάχια που κατασκευάζονται είναι περισσότερο ομοιογενή σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από μείξη διαφορετικών κόκκων (προαναφερθείσα περίπτωση) και με καλύτερες ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως το συνδεδετικό μέσο στους σύνθετους κόκκους μπορεί να είναι κάποιο πολυμερές, ενώ το δομικό υλικό, μέταλλο ή κεραμικό. Με χρήση επικαλυμμένων κόκκων εξασφαλίζεται ότι η ενέργεια της δέσμης laser θα απορροφηθεί επιλεκτικά από το συνδεδετικό μέσο, το οποίο και θα ρευστοποιηθεί, εν αντιθέσει με την χρήση σύνθετων κόκκων στους οποίους η ενέργεια απορροφάται συνολικά από τα υλικά του κάθε κόκκου, με κίνδυνο μη επαρκούς τήξης του συνδεδετικού μέσου ή ακόμα και τήξης του δομικού αντί του συνδεδετικού υλικού, λόγω διαφορετικών και μη συμβατών οπτικών ιδιοτήτων των υλικών. Ταυτόχρονα, η χρήση επικαλυμμένων κόκκων εξασφαλίζει την εκ των προτέρων (a priori) διαβροχή και περιβολή του δομικού υλικού με συνδεδετικό ρευστό. Η επικάλυψη μπορεί να είναι κάποιο μέταλλο ή πολυμερές, με την δυνατότητα σε περιπτώσεις χρήσης πολυμερικής επικάλυψης, είτε την κατασκευή σύνθετων τεμαχίων πολυμερικής μήτρας, είτε την απομάκρυνση του συνδεδετικού μέσου (πολυμερούς) μέσω κατάλληλου post process (debinding) και ακόλουθη πυροσυσσωμάτωση του δομικού υλικού με πιθανή περαιτέρω ενίσχυση μέσω έγχυσης ενισχυτικού παράγοντα (π.χ. μετά την απομάκρυνση του πολυμερικού συνδεδετικού παράγοντα και πριν την πυροσυσσωμάτωση, δύναται να γίνει πλήρωση του κενού χώρου που έχει σχηματιστεί από κάποιο μεταλλικό υλικό) (Merckel, Froyen and Rombouts, 2005; Kumar, 2014). Τέλος, και όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι δυνατή η συσσωμάτωση δίχως τη χρήση κάποιου ξεχωριστού συνδεδετικού παράγοντα, αλλά μέσω της μερικής τήξης του υλικού, το οποίο στη ρευστή του μορφή, λειτουργεί ως συνδεδετικό μέσο. Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται είτε στην πρόσδοση χαμηλότερου ποσού θερμότητας που απαιτείται για την πλήρη τήξη του υλικού της πούδρας, είτε στη χρήση πολυφασικών υλικών πούδρας με διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες ανά φάση, π.χ. με στοχευμένη προσθήκη χαμηλού ποσοστού προσμείξεων. Η συσσωμάτωση μέσω μερικής τήξης μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε πολυμερή, όσο και σε μεταλλικά υλικά, με τα πολυμερή όμως να εμφανίζουν πιο σύνθετη συμπεριφορά, καθώς παράλληλα λαμβάνουν χώρα και φαινόμενα όπως η ανακρυστάλλωση σε θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, και η αναδιάταξη των πολυμερικών αλυσίδων (Wang *et al.*, 2002; Fischer *et al.*, 2003; Merckel, Froyen and Rombouts, 2005; Dizon *et al.*, 2018).

Η ανάγκη για κατασκευή τεμαχίων χαμηλού πορώδους, υψηλής πυκνότητας και δίχως την αναγκαιότητα για post process διεργασίες οδήγησε στην εξέλιξη της τεχνολογίας πλήρους τήξης του υλικού της πούδρας. Η μέθοδος SLM δυνητικά μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε πολυμερή όσο και σε μεταλλικά υλικά, έχει όμως καθιερωθεί για την σύντηξη κυρίως μεταλλικών υλικών. Αν και αποτελεί τη φυσική και τεχνολογική εξέλιξη του SLS, υφίστανται σημαντικές διαφορές, οι οποίες πρέπει να είναι πλήρως κατανοητές, σαφείς και ξεκάθαρες, όχι μόνο προς χάριν επιστημονικής ορθότητας και πληρότητας, αλλά και γιατί αυτό απαιτείται προκειμένου να μελετηθεί και να μοντελοποιηθεί αποτελεσματικά η κατεργασία SLM. Στην μέθοδο SLM χρησιμοποιούνται κατεχορήγ

υψηλότερης VED, καθώς στόχος είναι η πλήρης τήξη του υλικού, με τους μηχανισμούς πλέον να διέπονται κυρίως από τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα λόγω της υγρής φύσης του. Η αναλυτική περιγραφή των μηχανισμών και φαινομένων αυτών θα γίνει σε επόμενο σημείο της διατριβής, αξίζει όμως στο σημείο αυτό να αναφερθεί ενδεικτικά ότι οι οπτικές ιδιότητες, οι θερμοκρασίες τήξης και εξάτμισης, οι αντίστοιχες λανθάνουσες θερμότητες, το ιξώδες, και η επιφανειακή τάση είναι μερικές μόνο από τις ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν σημαντικά την κατεργασία SLM. Αποτέλεσμα της πολυπλοκότητας των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στις κατεργασίες SLM, και των απαιτήσεων που αυτά δημιουργούν και συνεπάγονται ως προς τις οπτικές και θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, είναι ο σημαντικός περιορισμός της γκάμας υλικών που πρακτικά χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες SLM. Τα συνήθη υλικά περιλαμβάνουν είτε καθαρά μέταλλα, π.χ. τιτάνιο, νικέλιο, είτε κράματα, π.χ. Ti-6Al-4V, 316L steel, κράματα αλουμινίου, ή κράματα νικελίου, με τα τεμάχια που κατασκευάζονται με SLM, αν και είναι κατά κανόνα χαμηλού πορώδους και υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων, να παραμένουν επιρρεπή σε ανάπτυξη θερμικών παραμενουσών τάσεων, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν ακόμα και την εμφάνιση ρωγμών (Merckel, Froeyen and Rombouts, 2005; Gu, 2015). Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται η διαφορά ανάμεσα στη μορφολογία του υλικού όταν αυτό υπόκειται σε επιλεκτική συσσωμάτωση (SLS) ή σε επιλεκτική πλήρη τήξη (SLM). Στην 1^η περίπτωση (Εικόνα 2.5α) το υλικό μοιάζει με ένα άθροισμα και δίκτυο στοιχειωδών συσσωματωμάτων, ενώ στην 2^η περίπτωση (Εικόνα 2.5β) εμφανίζεται ως γραμμικά ίχνη ενιαίου επαναστεροποιημένου υλικού.



Εικόνα 2.5 Μορφολογία επιφανείας από χάλυβα M2 που έχει κατασκευαστεί α) με SLS και β) με SLM (Gu 2015)

Στο σημείο αυτό θεωρείται ότι έχουν καταστεί πλέον σαφείς οι βασικές διαφορές ανάμεσα σε SLS και SLM, καθώς επίσης και η αναγκαία διαφοροποίηση στα υλικά που μπορούν και είθισται να διαχειρίζονται οι αντίστοιχες διατάξεις. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές SLM, καθώς, με τον τρόπο αυτό, θα αιτιολογηθεί και η επιλογή να παρουσιαστεί η μεθοδολογία μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM (που αποτελεί το θέμα της διατριβής) μέσα από την προσομοίωση μοναδιαίων γραμμικών ιχνών εναπόθεσης υλικού για τρία διαφορετικά κράματα (χάλυβα, νικελίου και τιτανίου).

2.3 ΣΥΝΗΘΗ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ SLM

Η ύπαρξη εκατοντάδων διαφορετικών κραμάτων αποτελεί απόδειξη της εξαιρετικά σημαντικής προόδου που έχει συντελεστεί στην επιστήμη των υλικών, και της μεταλλουργίας πιο συγκεκριμένα. Τα διαφορετικά κράματα έχουν σχεδιαστεί με βάση τις ανάγκες και απαιτήσεις των σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών, ταυτόχρονα όμως με την πρακτική τους αυτή αξία είναι εξίσου σημαντική η δυνατότητα και η ευκολία κατεργασίας τους, ώστε να είναι εφικτή η ευρεία και απρόσκοπτη χρήση τους. Προκειμένου οι μέθοδοι AM να καταστούν πραγματικά ανταγωνιστικές των συμβατικών και παραδοσιακών κατεργασιών, καλούνται να επεκταθούν και να ενσωματώσουν την χρήση ικανού αριθμού διαφορετικών υλικών και κραμάτων, έκαστο εκ των οποίων είναι κατάλληλο για διαφορετική εφαρμογή. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η μέθοδος SLM εφαρμόζεται κατά κανόνα σε μεταλλικά υλικά,

με την έρευνα να είναι συνεχής ώστε μέσω βελτίωσης των παραμέτρων κατεργασίας και των υλικών να επιτυγχάνεται η κατασκευή τεμαχίων με βέλτιστες δυνατές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Ανάμεσα στα δεκάδες διαφορετικά κράματα που χρησιμοποιούνται ή έχουν προταθεί προς χρήση σε διατάξεις SLM, διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες, οι οποίες έχουν πλέον μεταβεί σε μια επιστημονικά και εμπορικά «ώριμη» φάση. Συγκεκριμένα, τέτοια υλικά είναι τα σιδηρούχα κράματα (ferrous alloys), τα κράματα με βάση το τιτάνιο (Ti-based alloys), και κράματα με βάση το νικέλιο (Ni-based alloys). Φυσικά, και παράλληλα με τα προαναφερθέντα, χρησιμοποιούνται, μελετώνται και σχεδιάζονται μια σειρά από εναλλακτικά υλικά, όπως για παράδειγμα κράματα με βάση το αλουμίνιο (Al-based alloys), κράματα με βάση το βολφράμιο (W-based alloys) (Guo *et al.*, 2019; Iveković *et al.*, 2019) ή κεραμικά (Z. Chen *et al.*, 2019), τα οποία όμως δεν έχουν βρει ακόμα ευρεία εμπορική εφαρμογή (Gu, 2015). Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια σύντομη αναφορά στις κύριες και βασικές κατηγορίες κραμάτων που χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εφαρμογές SLM, χωρίς όμως να είναι στόχος η εμβάθυνση σε θέματα που άπτονται διαφορετικών επιστημονικών και ερευνητικών πεδίων, όπως για παράδειγμα οι μικροδομές που αναπτύσσονται ανάλογα με τις διαφορετικές παραμέτρους κατεργασίας, οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες που αποκτούν τα υλικά και τα αντικείμενα, ή τα ελαττώματα και οι ατέλειες που αναπτύσσονται.

2.3.1 ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

Τα σιδηρούχα κράματα, και κυρίως τα κράματα χάλυβα, χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε διατάξεις και εφαρμογές SLM, με βασική ερευνητική κατεύθυνση τον περιορισμό του πορώδους και την κατασκευή τεμαχίων πλήρους πυκνότητας (full density). Βασική δυσκολία στη χρήση σιδηρούχων κραμάτων είναι ότι τόσο το κύριο κραματικό στοιχείο (δηλαδή ο σίδηρος), όσο και λοιπά κραματικά στοιχεία (όπως για παράδειγμα το χρώμιο), αντιδρούν εξαιρετικά εύκολα σε περιβάλλον οξυγόνου (active in oxygen atmosphere), και ως εκ τούτου ένας βαθμός οξειδωσης της πούδρας είναι αναπόφευκτος. Ο σχηματισμός οξειδίων στην επιφάνεια των κόκκων της πούδρας ευνοεί την δημιουργία σφαιροειδών σχηματισμών στην περιοχή τηγμένου υλικού (balling), ενώ ταυτόχρονα η παρουσία άνθρακα σε κράματα χάλυβα επηρεάζει αρνητικά την πυκνότητα του υλικού κατά την επαναστερεοποίηση (Wright *et al.*, 2006; Gu, 2015). Ο σχηματισμός επίσης καρβιδίων στα όρια των κόκκων αυξάνει την ευθραυστότητα (brittleness) του υλικού, με την VED να επιδρά καταλυτικά στη διαλυτότητα των καρβιδίων και την ομοιογενοποίηση του υλικού (αυξημένη VED ευνοεί την διάσπαση των καρβιδίων) (Childs, Hauser and Badrossamay, 2005; Gu, 2015). Μερικά από τα πλέον διαδεδομένα σε εφαρμογές AM σιδηρούχα κράματα είναι οι χάλυβες 316L, 304L, και 17-4PH, ο χάλυβας Maraging 1.2709, ο εργαλειοχάλυβας H13, και το κράμα Invar®36 (Herzog *et al.*, 2016; Cooke *et al.*, 2020). Η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες που αποκτούν τα τεμάχια, συναρτήσε των συνθηκών και παραμέτρων κατεργασίας, αποτελούν ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον και ενεργό επιστημονικό πεδίο (Fayazfar *et al.*, 2018; Saeidi and Akhtar, 2019).

Οι βασικές και πλέον σημαντικές ιδιότητες με βάση τις οποίες γίνεται αξιολόγηση της κατεργασίας SLM είναι η σχετική πυκνότητα του υλικού (relative density), η αντοχή του (strength), η τραχύτητα επιφανείας (surface roughness), και η μικροσκληρότητα (micro-hardness). Η σχετική πυκνότητα είναι ο λόγος της πυκνότητας του υλικού μετά από την κατεργασία SLM προς τη θεωρητική πυκνότητα του υλικού (ή πιο απλά την πυκνότητα του χύδην υλικού), και αποτελεί έναν συχνά χρησιμοποιούμενο και χαρακτηριστικό δείκτη ποιότητας της κατεργασίας. Για τα περισσότερα σιδηρούχα κράματα έχει επιτευχθεί σχετική πυκνότητα άνω του 90%. Δεδομένου ότι η αυξημένη αντοχή αποτελεί εγγενή και σημαντική ιδιότητα των κραμάτων χάλυβα, καθώς και κύριο παράγοντα επιλογής τους ως δομικά υλικά, απαιτείται η διατήρησης της αντοχής αυτής και σε τεμάχια τα οποία είναι κατασκευασμένα με SLM. Μέσω της κατεργασίας SLM μπορεί να επιτευχθεί η κατασκευή τεμαχίων υψηλής αντοχής, με αναφορές να έχουν γίνει ακόμα και για τεμάχια υψηλότερης αντοχής σε σχέση με τα αντίστοιχα χυτά, εις βάρος όμως της ελασσιμότητας. Η υψηλή αντοχή αποδίδεται στη φύση και τους μηχανισμούς του SLM, καθώς η εστιασμένη τήξη και η ταχεία ψύξη έχει ως αποτέλεσμα μια πιο ομοιόμορφη μικροδομή σε σχέση με εναλλακτικές μεθόδους

κατασκευής. Η βέλτιστη επιφανειακή τραχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί είναι περίπου 20 μ m με απαραίτητο post process όπου απαιτείται υψηλής ποιότητας επιφάνεια, ενώ, τέλος, η μικρο-σκληρότητα για συγκεκριμένους χάλυβες μπορεί να φτάσει έως και τα 800HV. Στον Πίνακα 2.1 συνοψίζονται ιδιότητες σιδηρούχων κραμάτων μετά την κατεργασία τους με SLM (Yap *et al.*, 2015; Mooney *et al.*, 2019; Ren *et al.*, 2019; Nong *et al.*, 2020).

Πίνακας 2.1 Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες σιδηρούχων κραμάτων έπειτα από κατεργασία SLM

Υλικό	Μέγιστη Αντοχή Εφελκυσμού του Χύδην Υλικού [MPa]	Μέγιστη σχετική πυκνότητα [%]	Μέγιστη Αντοχή σε Εφελκυσμό Υλικού [MPa]	Μέτρο Ελαστικότητας [MPa]
Fe	225	99	411.5	305.3
Fe-Ni	--	98	600	--
Fe-Ni-Cr	--	99.5	1100	--
Fe-Ni-Cr-P	--	97.5	505	425
304L SS	579	92	717	570
316L SS	558	99.9	760	650
H13 TS	1200 – 1590	90	1909	--
15-5 PH steel	1272	--	1317	1470
AISI Marage 300 steel	1930	99.99	<2000	1214

Τα σιδηρούχα κράματα αξιοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως την κατασκευή δομών και διατάξεων χαμηλού βάρους, σε εναλλάκτες θερμότητας, αλλά και σε ιατρικές και οδοντιατρικές εφαρμογές (Haghdadi *et al.*, 2021). Στην πρωτοποριακή εργασία των Shen *et al.* (2010) μελετάται για παράδειγμα η συμπεριφορά σε θλίψη και οι μηχανισμοί αστοχίας σύνθετων δομών τύπου sandwich με εσωτερικό πλέγμα κατασκευασμένο από 316L με χρήση SLM, ενώ σε συναφή εργασία των Mines *et al.* (2013), εξετάζεται η συμπεριφορά ανάλογων δομών κατά την φόρτιση τους λόγω πύπτουσας μάζας (drop weight impact). Η μέθοδος SLM έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πιο πολύπλοκων δομών, όπως για παράδειγμα δομών με αρνητικό λόγο Poisson (Rehme and Emmelmann, 2009). Οι Wong *et al.* (2007) στην εργασία τους κατασκεύασαν με χρήση SLM εναλλάκτες θερμότητας από 316L SS, οι οποίοι ενσωματώνουν πολύπλοκες εσωτερικές δομές για βέλτιστη μετάδοση θερμότητας, ενώ οι Unger *et al.* (2019) μελέτησαν τη δυνατότητα κατασκευής με SLM σωληνοειδούς εναλλάκτη με πτερύγια καινοτόμου γεωμετρίας από 316L SS. Τέλος, οι εργασίες των Wehmoller *et al.* (2005), Lodhi *et al.* (2019) και Bibb *et al.* (2009) επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα χρήσης σιδηρούχων κραμάτων και της μεθόδου SLM για ιατρικές και οδοντιατρικές εφαρμογές.

2.3.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Τα κράματα τιτανίου λόγω των μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων τους χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, όπως αυτές της αεροδιαστημικής, αλλά και σε βιοϊατρικές εφαρμογές λόγω της βιοσυμβατότητάς τους (Gu, 2015; Milewski, 2017). Το τιτάνιο σε υγρή φάση αντιδρά έντονα με το οξυγόνο, το άζωτο, το υδρογόνο και τον άνθρακα, και ως εκ τούτου καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη και δαπανηρή η κατεργασία του με συμβατικές μεθόδους. Τα προβλήματα που προκύπτουν, λόγω της δραστικότητας του τιτανίου, δεν είναι έντονα στην κατεργασία SLM, καθώς αυτή λαμβάνει χώρα υπό αδρανή ατμόσφαιρα αργού, ενώ ταυτόχρονα η επιλεκτική – τοπική τήξη και ταχεία ψύξη του υλικού περιορίζει τη συγκέντρωση στοιχείων παρεμβολής (interstitial elements) όπως υδρογόνο, οξυγόνο και άνθρακα. Σε κατεργασίες SLM, εκτός του καθαρού τιτανίου (commercial

pure titanium – cpTi) χρησιμοποιείται ευρέως το κράμα Ti-6Al-4V, ενώ σε εφαρμογές βιοϊατρικής έχουν προταθεί για χρήση τα κράματα Ti-24Nb-4Zr-8Sn (Zhang *et al.*, 2011) και Ti-6Al-7Nb (Chlebus *et al.*, 2011).

Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες που μπορούν να επιτευχθούν μέσω SLM είναι εξαιρετικές, και σε ορισμένες περιπτώσεις και υπό συγκεκριμένες συνθήκες ανώτερες ακόμα και του χύδην υλικού. Η σχετική πυκνότητα κυμαίνεται τυπικά άνω του 99.5%, με αναφορά ακόμα και για πυκνότητα 99.98% για κράμα Ti-6Al-4V (Marcu *et al.*, 2012). Ο προαναφερθείς μηχανισμός τοπικής τήξης και ταχείας ψύξης ευνοεί την ανάπτυξη hcp μαρτενσιτικών μικροδομών και τη δημιουργία πιο ομοιόμορφης μικροδομής, με χαμηλότερη συγκέντρωση στοιχείων παρεμβολής σε σχέση με το χύδην υλικό. Αποτέλεσμα είναι να επιτυγχάνεται η κατασκευή τεμαχίων με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, εφάμιλλες ή και ανώτερες των αντίστοιχων χυτών (Facchini *et al.*, 2010; Yap *et al.*, 2015). Η τραχύτητα επιφανείας για κράματα τιτανίου κυμαίνεται από 5 – 40 μ m (Aufa, Hassan and Ismail, 2022), με αναφορές όμως και για χαμηλότερη επιτευχθείσα τραχύτητα, της τάξης των 3.96 μ m (Zhang *et al.*, 2011). Τέλος, η μικρο-σκληρότητα κυμαίνεται από 225HV για κράμα Ti-24Nb-4Zr-8Sn έως και 613HV για κράμα Ti-6Al-4V (Yap *et al.*, 2015), με αξιοσημείωτη τη μη συσχέτιση της μικρο-σκληρότητας με τη σχετική πυκνότητα. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία των Zhang *et al.* (2011), η μέγιστη μικρο-σκληρότητα 613HV καταγράφεται για σχετική πυκνότητα 95.2% και 95.8%, ενώ για σχετική πυκνότητα 97.6% η μικρο-σκληρότητα μειώνεται στο 515HV. Στον Πίνακα 2.2 συνοψίζονται ιδιότητες κραμάτων τιτανίου μετά την κατεργασία τους με SLM (Kafkas and Ebel, 2014; Yap *et al.*, 2015).

Πίνακας 2.2 Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες κραμάτων τιτανίου έπειτα από κατεργασία SLM

Υλικό	Μέγιστη Αντοχή Εφελκυσμού του Χύδην Υλικού [MPa]	Μέγιστη σχετική πυκνότητα [%]	Μέγιστη Αντοχή σε Εφελκυσμό Υλικού [MPa]	Μέτρο Ελαστικότητας [MPa]
cpTi	655	99.5 99.9 (υπό κενό)	654	522
Ti-6Al-4V	1055	99.98	1250	1125
Ti-6Al-7Nb	1000	99.95	1515	1440
Ti-24Nb-4Zr-8Sn	<720	99.5	665	563

Τα κράματα τιτανίου χρησιμοποιούνται παραδοσιακά σε εφαρμογές βιοϊατρικής, λόγω της βιοσυμβατότητας που παρουσιάζουν, με τη μέθοδο SLM να καθίσταται πολύτιμο και αναντικατάστατο εργαλείο στην έρευνα και πρόοδο που συντελείται (Singh *et al.*, 2020). Αναμφίβολα, το πλέον χρησιμοποιούμενο κράμα σε κατεργασίες SLM που σχετίζονται με ιατρικές και οδοντιατρικές εφαρμογές είναι το Ti-6Al-4V (Aufa, Hassan and Ismail, 2022), υπάρχουν όμως βιβλιογραφικές αναφορές για χρήση καθαρού τιτανίου ή άλλων κραμάτων τιτανίου. Για παράδειγμα, στην εργασία των Laoui *et al.* (2006) κατασκευάστηκαν οδοντικά εμφυτεύματα από cpTi (Laoui *et al.*, 2006), ενώ οι Mullen *et al.* (2009) μελέτησαν τον σχεδιασμό και κατασκευή δομών μοναδιαίας κυψελίδας από cpTi με χρήση SLM για ορθοπεδικές εφαρμογές (Mullen *et al.*, 2009). Στην εργασία των Stamp *et al.* (2009) όπου μελετώνται οι στρατηγικές σάρωσης για κατασκευή πορωδών βιοσυμβατών δομών επίσης χρησιμοποιήθηκε καθαρό τιτάνιο cpTi (Stamp *et al.*, 2009). Επίσης, έχει προταθεί η πιθανότητα και δυνατότητα χρήσης διαφορετικών κραμάτων τιτανίου σε ανάλογες εφαρμογές βιοϊατρικής. Στην εργασία των Chlebus *et al.* (2011) προτείνεται η χρήση του κράματος Ti-6Al-7Nb για κατασκευή εμφυτευμάτων, καθώς με την αντικατάσταση του βαναδίου από νεοδύμιο, το κράμα αποκτά υψηλότερη αντοχή σε διάβρωση και υψηλότερη βιο-ανεκτικότητα (bio-tolerance) σε σχέση με το Ti-6Al-4V (Chlebus *et al.*, 2011; Yap *et al.*, 2015). Το ίδιο κράμα χρησιμοποιήθηκε και από τους Marcu *et al.* (2012) για την κατασκευή εμφυτευμάτων, ενώ στην εργασία των Liu *et al.* (2015) μελετάται η χρήση του κράματος Ti-24Nb-4Zr-8Sn για την κατασκευή ικριωμάτων με SLM για βιοϊατρικές εφαρμογές. Ικρίωματα χαμηλού βάρους και υψηλής αντοχής από κράματα τιτανίου αποτελούν αντικείμενο γενικότερης μελέτης, καθώς τέτοιες δομές χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εφαρμογές αεροναυτικής και αεροδιαστημικής. Τέλος, στη βιβλιογραφία έχουν

παρουσιαστεί εργασίες και μελέτες για κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων με SLM, όπως κάλυμμα συστήματος οδήγησης πυραύλου ή πτερύγιο στροβίλου από κράματα τιτανίου (Yar *et al.*, 2015).

2.3.3 ΚΡΑΜΑΤΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

Τα κράματα νικελίου επίσης χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατεργασίες SLM, και ειδικά σε εφαρμογές που απαιτούν ιδιαίτερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (Herzog *et al.*, 2016). Τα πιο διαδεδομένα υπερκράματα νικελίου για χρήση σε διατάξεις SLM είναι τα Inconel 625, Inconel 718, Chromel, Hastelloy X, και Nimonic 263, τα οποία διαθέτουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και αντοχή σε ερπυσμό, διάβρωση και οξειδωση (Gu, 2015). Σημαντικό ποσοστό των εργασιών αφορά το κράμα Inconel 718 (Hosseini and Popovich, 2019), ενώ αντικείμενο μελέτης αποτελεί κυρίως η βελτιστοποίηση των συνθηκών κατεργασίας, προκειμένου να επιτευχθεί σταθερή και ομοιόμορφη περιοχή τήξης, επιθυμητή μικροδομή και τεμάχια πλήρους πυκνότητας (Wang *et al.*, 2012, 2020; Kumar and Farah, 2019). Μια ξεχωριστή κατηγορία κραμάτων με βάση το νικέλιο είναι τα κράματα με μνήμη σχήματος NiTi (shape memory alloys), τα οποία έχουν επιτυχώς χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (Microelectromechanical Systems MEMS) ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 και μάλιστα με χρήση SLM (Clare *et al.*, 2008). Τα κατασκευασμένα με SLM τεμάχια από NiTi εμφανίζουν μαρτενσιτικό μετασχηματισμό μεταξύ 32 – 59 °C και ωστενιτικό μεταξύ 59 – 90 °C (Yar *et al.*, 2015).

Οι μηχανικές ιδιότητες των τεμαχίων από κράματα νικελίου κατασκευασμένα με SLM είναι κατά κανόνα υψηλές, με περιθώριο όμως βελτίωσης για συγκεκριμένα κράματα και ως προς εγγενή ελαττώματα. Πιο συγκεκριμένα για κράματα Inconel 718, Hastelloy X, και Nimonic 263 έχουν αναφερθεί σχετικές πυκνότητες σχεδόν 100%, με τα κράματα όμως Inconel 625 και Chromel να εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερες σχετικές πυκνότητες (Song *et al.*, 2021). Η αντοχή σε εφελκυσμό των τεμαχίων που κατασκευάζονται με SLM είναι εφάμιλλη ή και ανώτερη των αντίστοιχων χυτών (Yar *et al.*, 2015), ενώ οι τραχύτητες που επιτυγχάνονται είναι κατά κανόνα ικανοποιητικές (<10μm), με μελέτες να αναφέρουν τραχύτητα έως και 4μm (Mumtaz and Hopkinson, 2009). Τυπικό ελάττωμα που εμφανίζεται σε τεμάχια κατασκευασμένα με SLM από κράματα νικελίου, είναι η ανάπτυξη ρωγμών, κυρίως λόγω του υψηλού ποσοστού κραματικών στοιχείων και διαφορετικών φάσεων. Συνήθως οι ρωγμές σχηματίζονται και διαδίδονται στις ζώνες επικάλυψης ανάμεσα σε διαδοχικές εναποθέσεις υλικού, με το ποσοστό επικάλυψης να επηρεάζει σημαντικά το μέγεθος και τον αριθμό των ρωγμών. Η ολική εξάλειψη των ρωγμών είναι εξαιρετικά δύσκολη, ενώ κατεργασίες post process μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των τεμαχίων (Gu, 2015; Korkmaz *et al.*, 2022). Η μικρο-σκληρότητα, τέλος, κυμαίνεται από 163HV για το Inconel 625 έως και 740HV για το Chromel. Στον Πίνακα 2.3 Πίνακας 2.2 συνοψίζονται ιδιότητες κραμάτων νικελίου μετά την κατεργασία τους με SLM (Yar *et al.*, 2015).

Πίνακας 2.3 Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες κραμάτων νικελίου έπειτα από κατεργασία SLM

Υλικό	Μέγιστη Αντοχή Εφελκυσμού του Χύδην Υλικού [MPa]	Μέγιστη σχετική πυκνότητα [%]	Μέγιστη Αντοχή σε Εφελκυσμό Υλικού [MPa]	Μέτρο Ελαστικότητας [MPa]
Inconel 625	1000	95	1030	800
Inconel 718	1000	99.98	1148	907
Hastelloy X	785	99.75	930.5	814
Nimonic 263	940	99.7	1085	818

Οι βασικές εφαρμογές των κραμάτων νικελίου σχετίζονται κυρίως με τη χρήση τους σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, και συνδέονται άμεσα με τα εγγενή χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους. Η εξαιρετική για παράδειγμα αντοχή του κράματος Inconel 718 σε υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με την ανθεκτικότητά του

σε διάβρωση, κόπωση και φθορά, το καθιστά ιδανικό για εξαρτήματα αεροπορικών κινητήρων όπως στροβίλους εντός του θαλάμου καύσης (swirlers in combustion chambers), πτερύγια στροβίλων (turbine blades) και στροφέα υπερπληρωτών (turbocharger rotor) (Yap *et al.*, 2015). Στην εργασία μάλιστα των Lu *et al.* (2013) αναφέρεται συγκεκριμένα η χρήση SLM για την κατασκευή πτερυγίων στροβίλων από ειδικά κράματα νικελίου. Οι ιδιότητες του κράματος Hastelloy X είναι ανάλογες με του Inconel 718, και καθίσταται έτσι εναλλακτική επιλογή για παρεμφερείς εφαρμογές, εν αντιθέσει με το κράμα Nimonic 263, το οποίο, αν και έχει υψηλή αντοχή σε κόπωση και διάβρωση, ενδείκνυται για χρήση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Yap *et al.*, 2015). Τέλος, το κράμα NiTi, εκτός της χρήσης του για κατασκευή εξαρτημάτων μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων, έχει μελετηθεί προκειμένου να αξιοποιηθεί και σε εφαρμογές βιοϊατρικής (Guo, Xu, Liu, *et al.*, 2022; Guo, Xu, Wang, *et al.*, 2022).

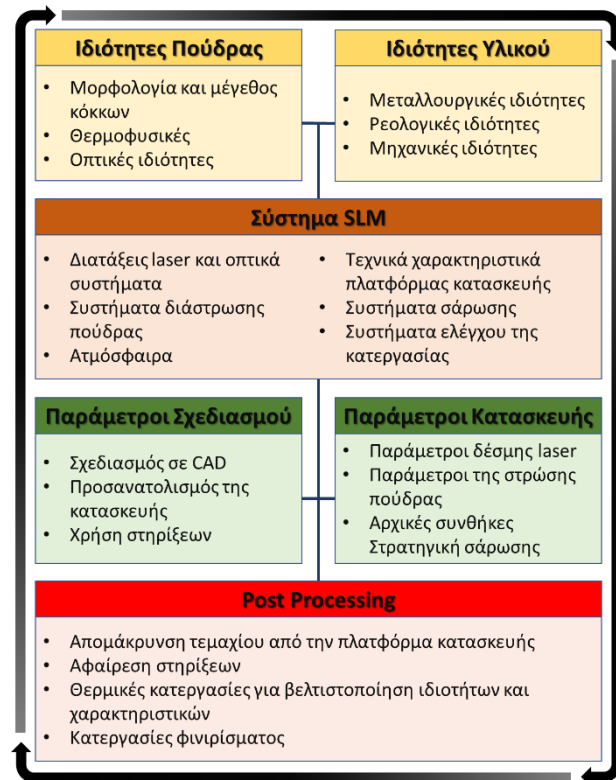
Οι τρεις αυτές κατηγορίες κραμάτων αποτελούν τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες σε κατεργασίες SLM, και με την ευρύτερη πρακτική αλλά και εμπορική εφαρμογή. Ταυτόχρονα, όπως ήδη έχει αναφερθεί, διεξάγεται προσπάθεια και έρευνα για δυνατότητα χρήσης και άλλων κραμάτων σε διατάξεις SLM. Παράδειγμα αποτελούν τα κράματα αλουμινίου, τα οποία όμως παρουσιάζουν εγγενείς δυσκολίες στην κατεργασία τους με SLM. Αρχικά, ανασταλτικό παράγοντα αποτελεί η υψηλή ανακλαστικότητα (>91%), η οποία σε συνδυασμό με την υψηλή θερμική αγωγιμότητα, αυξάνει τις απαιτήσεις ονομαστικής ισχύος των πηγών laser της διάταξης προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης τήξη του υλικού. Ταυτόχρονα, η επιρρέπεια σε οξειδωση των κραμάτων αλουμινίου επιδρά αρνητικά στην κατεργασιμότητά τους καθώς, αφενός το λεπτό φιλμ οξειδίων που σχηματίζεται στην περιοχή τήξης μειώνει την ικανότητα διαβροχής του υλικού, αφετέρου το οξυγόνο που περιέχεται στα οξείδια που τελικά αναμιγνύονται με το τηγμένο υλικό, οδηγεί σε ανάπτυξη ελαττωμάτων, και σε περιοχές με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Η μη ιδανική ρεολογική συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου και η έντονη δραστικότητα ορισμένων κραματικών στοιχείων (π.χ. Zn) αποτελούν δύο ακόμα ανασταλτικούς παράγοντες για την ευρεία χρήση τους σε κατεργασίες SLM (Gu, 2015; Herzog *et al.*, 2016). Παρά τις εγγενείς δυσκολίες, η έρευνα συνεχίζεται προκειμένου και τα κράματα αλουμινίου να καταστούν χρηστική και βιώσιμη επιλογή για κατεργασίες SLM (Aboukhair *et al.*, 2019; J. Zhang *et al.*, 2019). Τέλος, τα κράματα βολφραμίου έχουν προταθεί για χρήση σε κατεργασίες SLM, με το υψηλό όμως σημείο τήξης (3422 °C για το καθαρό βολφράμιο) και την χαμηλή ικανότητα διαβροχής να αποτελούν βασικές δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν (Yap *et al.*, 2015).

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η σύντομη αναφορά στα πλέον συνήθη και ευρέως χρησιμοποιούμενα κράματα σε διατάξεις SLM. Στόχος της συγκεκριμένης ενότητας ήταν, εκτός της ζητούμενης πληρότητας, η αιτιολόγηση της επιλογής των συγκεκριμένων κραμάτων για τη μοντελοποίηση της κατεργασίας, η οποία έγινε με βάση τόσο την ευρύτερη χρήση τους, όσο και την ύπαρξη εκτενέστερης σχετικής βιβλιογραφίας. Στην συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα αναφερθούν οι βασικές παράμετροι κατεργασίας, ενώ θα γίνει μια πρώτη αναφορά στις πιο σημαντικές εξ αυτών, οι οποίες και θα εξεταστούν και θα μελετηθούν εκτενέστερα κατά την ανάπτυξη των μοντέλων και των προσομοιώσεων.

2.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ SLM ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

Όπως έχει καταστεί ήδη σαφές, η κατεργασία του SLM, αν και βασίζεται σε μια ιδιοφυώς απλή ιδέα, εν τοις πράγμασι είναι πολυπαραμετρική και ιδιαίτερα πολύπλοκη. Χαρακτηριστικά ο Yadroitsev αναφέρει ότι υπάρχουν περισσότερες από 130 διαφορετικές παράμετροι που επηρεάζουν την κατεργασία (Yadroitsev, 2009). Φυσικά, η διαπίστωση αυτή αφορά την κατεργασία SLM στο σύνολό της, ήτοι από τον σχεδιασμό μέχρι και τις κατεργασίες αποπεράτωσης, ενώ εξυπακούεται πως όλες οι παράμετροι δεν επηρεάζουν στον ίδιο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα. Οι παράμετροι μπορεί να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα με την φύση τους, σε σταθερές και μεταβλητές, με τις πρώτες να περιλαμβάνουν τις θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες του υλικού, ενώ οι μεταβλητές να αναφέρονται σε παραμέτρους που μπορούν να ελεγχθούν σχετικά απλά, όπως η ονομαστική ισχύς και τα χαρακτηριστικά της δέσμης laser, η ταχύτητα σάρωσης, το ονομαστικό πάχος της στρώσης κτλ.. Μια πρακτική και λειτουργική ταξινόμηση των βασικών παραμέτρων της κατεργασίας είναι σε:

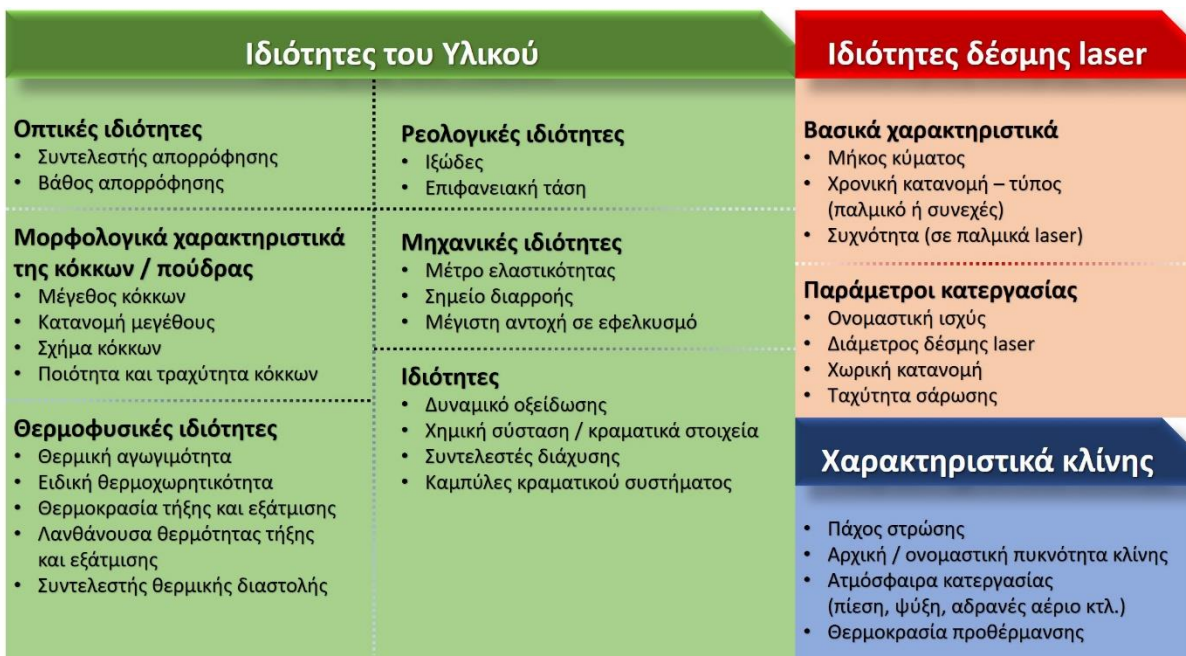
- αυτές που σχετίζονται με τα υλικά
- αυτές που σχετίζονται με την διάταξη του SLM
- παράμετροι κατεργασίας
- παράμετροι αποπεράτωσης



Εικόνα 2.6 Ταξινόμηση των βασικότερων παραμέτρων της κατεργασίας SLM

Στο διάγραμμα της Εικόνα 2.6 παρουσιάζονται οι βασικότερες από τις παραμέτρους κατεργασίας με βάση την προαναφερθείσα ταξινόμηση. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να επισημανθεί είναι η μη γραμμική αλληλεπίδραση των παραμέτρων, η οποία οδηγεί τελικά σε ένα εξαιρετικά πολύπλοκο σύστημα. Οι παράμετροι κατεργασίας δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, αντιθέτως μάλιστα οποιαδήποτε αλλαγή σε μια από αυτές μπορεί δυνητικά να προκαλέσει μια «ανεξήγητη» διαφοροποίηση στο τελικό αποτέλεσμα μέσω σειράς από μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις με τις λοιπές παραμέτρους. Παρά την σημαντική πρόοδο που έχει συντελεστεί στην κατανόηση των φαινομένων και της κατεργασίας τόσο συνολικά, όσο και σε θεμελιώδες επίπεδο, μέχρι στιγμής δεν υπάρχει μια πλήρης και ενοποιημένη θεωρία για την περιγραφή της κατεργασίας SLM (Yadroitsev *et al.*, 2021). Ένα σημαντικό βήμα στην μελέτη της SLM είναι η κατανόηση και διάκριση των παραμέτρων ανάλογα με την κλίμακα στην οποία επιδρούν. Για παράδειγμα οι παράμετροι σχεδιασμού του τεμαχίου, αν και εξαιρετικά σημαντικές και καίριες, δεν επιδρούν στους μηχανισμούς και τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της κατασκευής, και αξιολογούνται εκ του αποτελέσματος και μακροσκοπικά, κρίνοντας συνολικά αν ο σχεδιασμός ήταν τελικά ενδεδειγμένος και βέλτιστος. Υπό αυτό το πρίσμα δύναται να προσδιοριστούν οι παράμετροι οι οποίες έχουν την πλέον σημαντική επίδραση στους φυσικούς μηχανισμούς κατά την δημιουργία των μοναδιαίων στοιχειωδών ιχνών, έτσι ώστε η μελέτη και μοντελοποίηση τους να καταστεί εφικτή και ρεαλιστική. Και πάλι μπορεί να γίνει μια βασική ταξινόμηση σε: ιδιότητες του υλικού, της δέσμης laser, και των χαρακτηριστικών της κλίνης, με κάθε μια κατηγορία να περιλαμβάνει υποσύνολα, τα οποία ανάγονται συνήθως σε ακόμα πιο θεμελιώδη μεγέθη

και παραμέτρους. Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζονται οι βασικότερες ιδιότητες και παράμετροι, πολλές εκ των οποίων πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM σε μικροκλίμακα¹¹.



Εικόνα 2.7 Βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τα φυσικά φαινόμενα και τους μηχανισμούς κατά τη δημιουργία μοναδιαίων στοιχειωδών ιχνών

Ανάμεσα στις προαναφερθείσες παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά την κατεργασία σε μικροκλίμακα, και κυρίως κατά την δημιουργία των μοναδιαίων στοιχειωδών ιχνών, υπάρχουν κάποιες συγκεκριμένες μεγίστης σημασίας, οι οποίες και έχουν μελετηθεί εκτενέστερα στη σχετική βιβλιογραφία. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής κρίνονται ως οι πλέον καίριες παράμετροι:

- η ονομαστική ισχύς της δέσμης laser
- η διάμετρος της δέσμης laser
- η χωρική κατανομή ισχύος της δέσμης laser
- η ταχύτητα σάρωσης της δέσμης laser
- το πάχος της στρώσης πούδρας

Η ονομαστική ισχύς της δέσμης laser προφανώς σχετίζεται με την ενέργεια που προσδίδεται στο υλικό, και η οποία θα προκαλέσει την αύξηση της θερμοκρασίας και την επακόλουθη τήξη. Πρέπει όμως να καταστεί σαφές ότι η ονομαστική ισχύς της δέσμης laser δεν αποτελεί από μόνη της και μονοσήμαντα κάποια απόλυτη ένδειξη για την κατεργασία καθώς οφείλουν να ληφθούν υπ' όψιν λοιποί παράγοντες όπως η πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, το ποσοστό απορρόφησης κάθε υλικού, ο χρόνος αλληλεπίδρασης της δέσμης με την πούδρα, η μάζα του υλικού που εκτίθεται στη δέσμη laser κτλ.. Πρακτικά, η πυκνότητα ισχύος είναι ο καθοριστικός παράγοντας για τον ρυθμό και το επίπεδο αύξησης της θερμοκρασίας, τα χαρακτηριστικά που αποκτά η περιοχή τήξης και ακολούθως τις ιδιότητες του τεμαχίου που κατασκευάζεται.

¹¹ Οι μέθοδοι και ο τρόπος περιγραφής και ενσωμάτωσης των παραμέτρων στα προτεινόμενα μοντέλα θα περιγραφεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Η πυκνότητα ισχύος συνδέεται άμεσα με τη διάμετρο της δέσμης laser, με μελέτες να έχουν εκπονηθεί αναφορικά με την κατανόηση της επίδρασης που έχει στην κατεργασία, αλλά και τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαμέτρου. Αποδεικνύεται ότι και πάλι δε μπορεί να καθοριστεί μονοσήμαντα ένας γενικός κανόνας. Για παράδειγμα, στην εργασία των Yang et al. (2021), για κατεργασία χάλυβα (AISI 420 SS) με SLM αναφέρεται ότι μεγαλύτερη διάμετρος laser η οποία οδηγεί σε χαμηλότερη VED έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο πορώδες και χαμηλότερη σχετική πυκνότητα. Πιο συγκεκριμένα για VED 80 J/mm³ με διάμετρο δέσμης 100μm η σχετική πυκνότητα είναι 97% ενώ με χρήση δέσμης laser διαμέτρου 400μm και VED 20 J/mm³ η σχετική πυκνότητα μειώνεται στο 91% (Yang et al., 2021). Στην εργασία όμως των Larimian et al. (2021), πάλι σε κράμα χάλυβα (316L SS) αναφέρεται ότι η χρήση μεγαλύτερης διαμέτρου δέσμης laser (200μm) οδηγεί σε ανώτερες μηχανικές ιδιότητες, και υψηλότερη σχετική πυκνότητα λόγω του ότι αποφεύγονται συνθήκες και φαινόμενα υπερθέρμανσης του υλικού, με βέλτιστη VED τα 70 J/mm³ (Larimian et al., 2021). Τα φαινομενικά αυτά αντίθετα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της διαμέτρου της δέσμης laser στην κατεργασία επί της ουσίας δεν βρίσκονται σε αντιδιαστολή, αλλά υποδηλώνουν αφενός την αδυναμία μονοσήμαντου ορισμού της επίδρασης, αφετέρου την σημασία τόσο των επιμέρους παραμέτρων (π.χ. ισχύς, διάμετρος δέσμης κτλ.) όσο όμως και της αλληλεπίδρασης αυτών, καθώς εν τέλει η πυκνότητα ενέργειας εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων.

Η χωρική κατανομή ισχύος της δέσμης συνδέεται και αυτή με την πυκνότητα ενέργειας, όχι όμως σε επίπεδο στρώσης, ίχνους, ή κατεργασίας, αλλά σε μικροκλίμακα και εσωτερικά της περιοχής εστίασης. Κατά κανόνα οι διατάξεις SLM χρησιμοποιούν κατανομές Gauss, με μελέτες όμως να έχουν εκπονηθεί για την δυνατότητα χρήσης και διαφορετικών χωρικών κατανομών (Okunkova et al., 2014; Wang and Shi, 2020).

Μια ακόμα παράμετρος που σχετίζεται άμεσα με την ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας είναι η ταχύτητα σάρωσης της δέσμης laser. Η παράμετρος αυτή είναι από τις πλέον σημαντικές και θεμελιώδεις δεδομένου ότι ουσιαστικά καθορίζει τον χρόνο αλληλεπίδρασης του υλικού με τη δέσμη laser, ενώ ταυτόχρονα συνδέεται με την παραγωγικότητα και την ταχύτητα της κατεργασίας. Καθώς το ποσό της ενέργειας που απορροφάται και προκαλεί τελικά αύξηση της θερμοκρασίας και τήξη του υλικού εξαρτάται εν πολλοίς από την ισχύ της δέσμης laser και τον χρόνο αλληλεπίδρασης κάθε σημείου με αυτήν (ήτοι την ταχύτητά της), είθισται να αποτυπώνονται τα διάφορα προς μελέτη αποτελέσματα / δείκτες / χαρακτηριστικά συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος και της ταχύτητας σάρωσης (Vaglio et al., 2020; Ahmed et al., 2022).

Η κατ' όγκο πυκνότητα ενέργειας εξαρτάται επίσης από το πάχος της στρώσης πούδρας. Η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη έχει ως αποτέλεσμα είτε την απορρόφησή της από το υλικό, είτε την ανάκλασή της, είτε να διαπεράσει το υλικό. Τα μεταλλικά υλικά έχουν πρακτικά μηδενική διαπερατότητα, και ως εκ τούτου η δέσμη laser ή απορροφάται ή ανακλάται από τις μεταλλικές επιφάνειες. Στην κλίση πούδρας παρατηρείται το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων της δέσμης laser στην επιφάνεια των κόκκων της πούδρας, και ως εκ τούτου λαμβάνει χώρα κλιμακωτή, κατά το πάχος της στρώσης, απορρόφηση ενέργειας (Boley, Khairallah and Rubenchik, 2015). Το συνολικό ποσοστό απορρόφησης εξαρτάται, εκτός από τις οπτικές ιδιότητες του υλικού, και από τα χαρακτηριστικά της κλίσης πούδρας, δηλαδή το πάχος της στρώσης, τη μορφολογία των κόκκων, τη σχετική πυκνότητα της πούδρας, την κατανομή μεγέθους των κόκκων κτλ.. Ταυτόχρονα, η στρώση πούδρας έχει σημαντικά διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες από το χύδην υλικό (θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα) και ως εκ τούτου, ανάλογα με το πάχος της στρώσης (δηλαδή τον όγκο της πούδρας που «συναντά» και με τον οποίο αλληλεπιδρά η δέσμη laser) διαφοροποιούνται ποσοτικά οι φυσικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα και το αποτέλεσμα αυτών. Επίσης διεξάγεται έρευνα σχετικά με την κατανόηση της ακριβούς επίδρασης που έχει το πάχος της στρώσης στην κατεργασία, και τον προσδιορισμό του βέλτιστου πάχους (Kamath et al., 2014), αποδεικνύεται όμως ότι το ονομαστικό πάχος στρώσης δε μπορεί να αξιολογηθεί ανεξάρτητα από τις λοιπές παραμέτρους (Souza et al., 2019; Shi et al., 2020).

Έχει πολλάκις αναφερθεί ο όρος VED (ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας), όμως δεν έχει δοθεί ο ακριβής ορισμός και η μαθηματική του έκφραση. Αυτό έγινε σκοπίμως, καθώς κρίθηκε ότι θα ήταν νοηματικά σωστό να αναφερθούν πρώτα οι θεμελιώδεις παράμετροι της κατεργασίας και στη συνέχεια να παρατεθούν οι δευτερογενείς παράμετροι, οι οποίες προκύπτουν ως συνδυασμός των πρώτων, μεταξύ των οποίων και η VED.

Οι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες παράμετροι είναι (Scipioni Bertoli *et al.*, 2017):

$$VED = \frac{P}{v_{LB} \cdot d_{LB} \cdot z_{PB}} \quad (2.1)$$

με VED την ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας σε $[J/m^3]$, P την ονομαστική ισχύ της δέσμης laser σε [W], v_{LB} την ταχύτητα σάρωσης της δέσμης laser σε [m/s], d_{LB} τη διάμετρο της δέσμης laser σε [m] και z_{PB} το ονομαστικό πάχος της στρώσης πούδρας σε [m]. Μια εναλλακτική έκφραση της ογκομετρικής πυκνότητας ισχύος λαμβάνει υπ' όψιν αντί της διαμέτρου της δέσμης laser το διάστημα ανάμεσα σε δυο παράλληλες γραμμές σάρωσης (hatch spacing) (Wischeropp, 2021):

$$VED' = \frac{P}{v_{LB} \cdot HS \cdot z_{PB}} \quad (2.2)$$

με HS το διάστημα ανάμεσα σε δυο παράλληλες γραμμές σάρωσης σε [m]. Η έκφραση αυτή δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου μελετώνται μοναδιαία στοιχειώδη ίχνη καθώς δε μπορεί να οριστεί διάστημα ανάμεσα σε δυο παράλληλες γραμμές σάρωσης, αλλά χρησιμοποιείται ως δείκτης μόνο σε μακροσκοπική θεώρηση της κατεργασίας. Δυο ακόμα δευτερογενείς δείκτες είναι η επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας και η γραμμική πυκνότητα ενέργειας, που ουσιαστικά αποτελούν απλοποιημένη έκφραση της VED (Brandt, 2017):

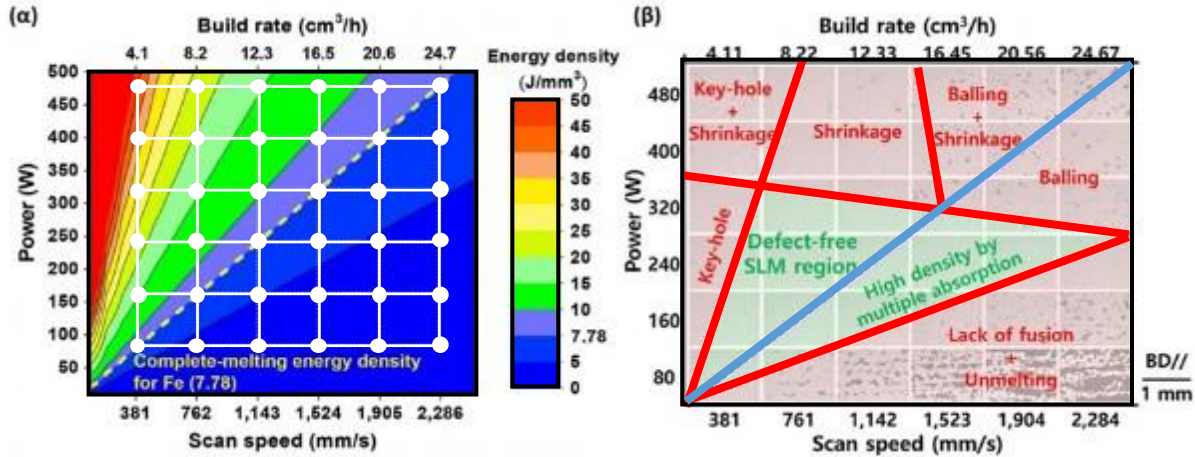
$$SED = \frac{P}{v_{LB} \cdot d_{LB}} \quad (2.3)$$

$$LED = \frac{P}{v_{LB}} \quad (2.4)$$

με SED την επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας σε $[J/m^2]$, και LED την γραμμική πυκνότητα ενέργειας σε $[J/m]$.

Χαμηλές τιμές LED έχουν ως αποτέλεσμα την μερική και ατελή τήξη του υλικού, και τον σχηματισμό ασυνεχών περιοχών τήξης και υψηλού πορώδους. Το πάχος και το βάθος της περιοχής τήξης αυξάνονται συναρτήσεως της LED, με τις υψηλές τιμές LED να οδηγούν και πάλι σε αυξημένο πορώδες, αυτή τη φορά όμως λόγω φαινομένων έντονης εξάτμισης και εκτίναξης υλικού. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η LED ως δείκτης δεν επαρκεί για την περιγραφή της κατεργασίας καθώς αποδεικνύεται ότι για ίδιες LED, σε υψηλές τιμές ονομαστικής ισχύος ή/και ταχύτητας σάρωσης, η κατεργασία γίνεται ασταθής λόγω φαινομένων υπερθέρμανσης του υλικού και αυξημένης εξάτμισης του (Vaglio *et al.*, 2020; Wischeropp, 2021). Η SED αποτελεί και αυτή έναν εύχρηστο αλλά όχι τόσο αξιόπιστο δείκτη της κατεργασίας, με την VED να αποτελεί τον πλέον κατάλληλο και αντιπροσωπευτικό. Στη σχετική βιβλιογραφία, σειρά από χαρακτηριστικά και ιδιότητες των τεμαχίων που κατασκευάζονται με SLM (π.χ. σχετική πυκνότητα, μικροσκληρότητα, μηχανικές αντοχές, κτλ.) περιγράφονται και μελετώνται συναρτήσεως της VED (Ghayoor *et al.*, 2020; Javidrad, Ghanbari and Javidrad, 2021; Wu *et al.*, 2021). Καθώς η VED προκύπτει από ένα σύνολο παραμέτρων, δύναται συνδυασμοί αυτών, αν και καταλήγουν στην ίδια VED, να έχουν διαφορετικά αποτελέσματα (Pal *et al.*, 2020), και ως εκ τούτου θα πρέπει οι παράμετροι να εξετάζονται τόσο ξεχωριστά, όσο και συνδυαστικά, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις αλληλεπιδράσεις. Τέλος, προκειμένου να γίνει ακόμα πιο ακριβής και αντιπροσωπευτικός δείκτης κατεργασίας η VED, έχουν προταθεί πολυπλοκότερες σχέσεις υπολογισμού στις οποίες λαμβάνεται υπ' όψιν ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού (Kim *et al.*, 2020), ή και λοιπές θερμοφυσικές του ιδιότητες (Ferro *et al.*, 2020; Wischeropp, 2021). Στην Εικόνα 2.8 παρουσιάζεται παράδειγμα από χάρτες λειτουργίας της κατεργασίας SLM για κράμα Fe-10Cu όπου α) διακρίνονται ζώνες VED συναρτήσεως της ισχύος που

απορροφάται από το υλικό και της ταχύτητας σάρωσης με το διάστημα ανάμεσα σε δυο παράλληλες γραμμές σάρωσης και το πάχος στρώσης να είναι σταθερό, και β) συσχέτιση της VED με την ποιότητα της κατεργασίας και την ύπαρξη συγκεκριμένων φαινομένων και ελαττωμάτων λόγω χαμηλής ή υψηλής πυκνότητας ενέργειας (Kim *et al.*, 2020).



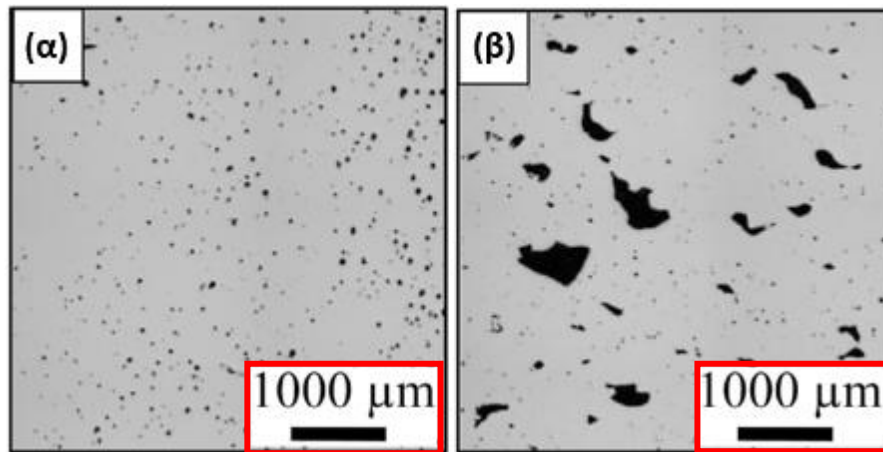
Εικόνα 2.8 Χάρτες λειτουργίας της κατεργασίας SLM για κράμα Fe-10Cu α) η VED για σταθερό διάστημα ανάμεσα σε δυο παράλληλες γραμμές σάρωσης και σταθερό πάχος στρώσης συναρτήσει της ισχύος που απορροφάται από την πούδρα και την ταχύτητα σάρωσης, β) διακριτές και διαφορετικές περιοχές λειτουργίας συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος της δέσμης laser και της ταχύτητας σάρωσης (Kim *et al.*, 2020)

Η θερμοκρασία προθέρμανσης της πούδρας ή/και της πλατφόρμας κατασκευής (Waqar, Guo and Sun, 2022), και η στρατηγική σάρωσης (Zhang, Zhang and Zhu, 2021) αποτελούν παραμέτρους μελέτης, και στόχους βελτιστοποίησης, καθώς συνδέονται άμεσα με την ποιότητα κατασκευής, την παραγωγικότητα και την αποδοτικότητα της κατεργασίας. Δεν αναλύονται, όμως, περαιτέρω στα πλαίσια της συγκριμένης διατριβής καθώς η επίδραση και επιρροή τους είναι σημαντικότερη και εμφανέστερη σε μακροσκοπικό επίπεδο, ενώ, στα πλαίσια της μελέτης και μοντελοποίησης του μοναδιαίου στοιχειώδους ίχνους, είτε λαμβάνονται ως αρχικές συνθήκες στην ανάπτυξη των μοντέλων (θερμοκρασία προθέρμανσης), είτε δεν ορίζονται (στρατηγική σάρωσης).

Οι παράμετροι κατεργασίας, και οι δευτερογενείς δείκτες συσχέτιστηκαν με την ανάπτυξη ατελειών, και κατ'επέκταση με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά που εντέλει έχουν τα κατασκευασμένα τεμάχια. Κρίνεται λοιπόν σκόπιμο να γίνει μια συστηματική ταξινόμηση και αναφορά στους βασικότερους τύπους ατελειών, και κυρίως σε αυτούς που εμφανίζονται και εξελίσσονται σε επίπεδο μικροκλίμακας, ενώ εξαρτώνται άμεσα από τις παραμέτρους κατεργασίας. Οι τέσσερις βασικοί τύποι είναι η εμφάνιση πόρων (porosities), η δημιουργία κενών λόγω ελλιπούς τήξης (incomplete fusion holes), η δημιουργία ρωγμών (cracks), και φαινόμενα σφαιροποίησης (balling).

Οι πόροι ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες: πόροι προερχόμενοι από παγιδευμένα αέρια και πόροι λόγω του φαινομένου keyhole. Οι πόροι λόγω ύπαρξης παγιδευμένων αερίων είναι κατά κανόνα σφαιρικοί και μικροί σε μέγεθος (τυπικά μικρότεροι των 100μm). Ο μηχανισμός σχηματισμού τους διαφέρει ανάλογα με την προέλευση της αέριας φάσης. Σε πούδρες με χαμηλή σχετική πυκνότητα (<50%) τα αέρια που βρίσκονται ανάμεσα στους κόκκους της πούδρας δύναται να διαλυθούν στο τηγμένο υλικό, ενώ λόγω της ταχείας ψύξης που ακολουθεί πιθανότατα δεν προλαβαίνουν να απομακρυνθούν προτού το υλικό επαναστερεοποιηθεί. Μια δεύτερη «πηγή» εγκλωβισμένων αερίων είναι οι ίδιοι οι κόκκοι της πούδρας, καθώς κατά την παραγωγή τους είναι αναπόφευκτη η παγίδευση αερίων εντός των κόκκων, ειδικά σε περιπτώσεις που κονιορτοποίηση του υλικού πραγματοποιείται με μεθόδους ψεκασμού (gas atomized powder). Τέλος, πορώδες μπορεί να δημιουργηθεί και λόγω της εξάτμισης του

υλικού ή συγκεκριμένων κραματικών στοιχείων σε περιοχές υπερθέρμανσής του, με τέτοιου τύπου πόρους να παρατηρούνται ακόμα και σε σημεία κοντά στο κάτω όριο της περιοχής τήξης (Zhang, Li and Bai, 2017). Η δεύτερη κατηγορία πόρων είναι όσοι προέρχονται από την κατάρρευση των τοιχωμάτων σε περιοχές τήξης που σχηματίζουν keyhole¹². Το keyhole μπορεί να περιγραφεί εν συντομία ως μια περιοχή τηγμένου υλικού από την οποία, λόγω υπερθέρμανσης και υψηλής πυκνότητας ισχύος, εμφανίζεται έντονη εξάτμιση και εκτίναξη υλικού (spattering), κυρίως από το κέντρο της περιοχής τήξης. Η γεωμετρία που τελικά προκύπτει και που χρειάζεται να γίνει κατανοητή προκυμμένου να περιγραφεί ο σχηματισμός πορώδους είναι μια περιοχή τήγματος, μικρής αναλογίας πλάτους προς βάθος, στο κέντρο της οποίας υπάρχει υλικό σε αέρια φάση, ενώ στα τοιχώματα το υλικό παραμένει σε υγρή μορφή. Κατά την κατάρρευση των τοιχωμάτων της περιοχής τήξης δύναται να εγκλωβιστούν αέρια, κυρίως στο κάτω μέρος του keyhole, τα οποία λόγω της ταχείας ψύξης και στερεοποίησης του τήγματος δε μπορούν να απομακρυνθούν σχηματίζοντας πόρους. Το πορώδες λόγω keyhole εμφανίζεται συχνά υπό μορφή αλυσιδωτών πόρων (pore-chains), και είναι πιο συχνό σε περιοχές αλλαγής κατεύθυνσης της δέσμης laser (π.χ. στα άκρα των περιοχών σάρωσης), λόγω στιγμιαίας επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης της δέσμης laser και κατά συνέπεια την μεταβολή τοπικά της πυκνότητας ενέργειας (Wischeropp, 2021). Πορώδες, τέλος, μπορεί να δημιουργηθεί γενικά σε περιπτώσεις ύπαρξης υδροδυναμικής αστάθειας στην περιοχή τήξης, λόγω μη βέλτιστων παραμέτρων κατεργασίας, όπως για παράδειγμα υψηλή πυκνότητα ενέργειας ή/και ταχύτητα σάρωσης (Brandt, 2017). Στην Εικόνα 2.9 παρουσιάζεται σε αντιδιαστολή το πορώδες που σχηματίζεται σε κράμα AlSi10Mg κατεργασμένο με SLM α) λόγω παγίδευσης αερίων και β) λόγω κατάρρευσης των τοιχωμάτων του keyhole (Aboulkhair *et al.*, 2014).

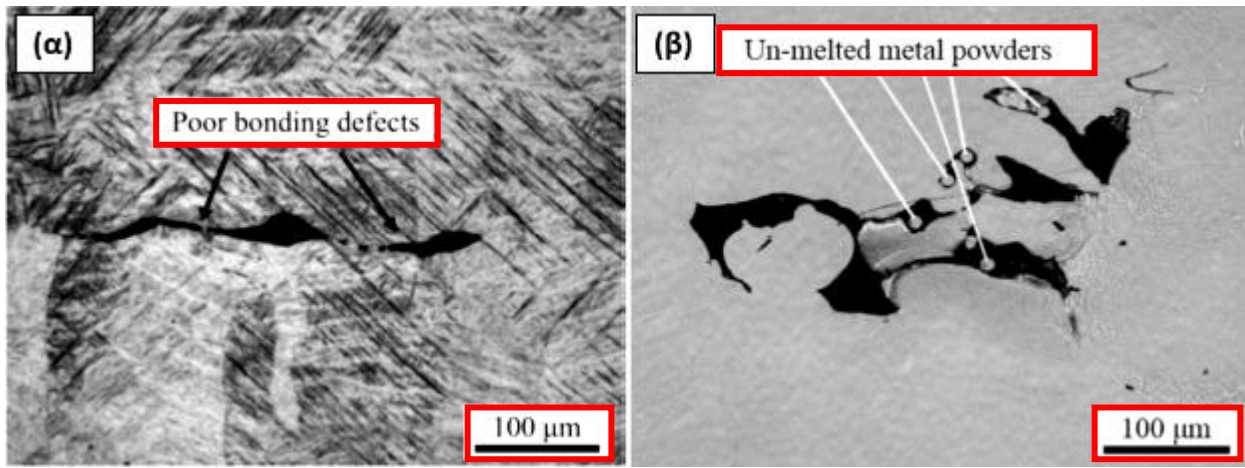


Εικόνα 2.9 Πορώδες που σχηματίστηκε α) λόγω παγίδευσης αερίων και β) λόγω κατάρρευσης των τοιχωμάτων του keyhole (Aboulkhair *et al.*, 2014)

Ο δεύτερος βασικός τύπος ατελειών που δημιουργούνται σε κατεργασίες SLM είναι η δημιουργία κενών λόγω ατελούς τήξης του υλικού, και είναι γνωστές στην σχετική βιβλιογραφία ως LOF (Lack Of Fusion defects). Αιτία σχηματισμού τους είναι η ελλιπής ενέργεια για την πλήρη τήξη του υλικού, ενώ διακρίνονται δύο υποείδη: ελαττώματα LOF λόγω της ατελούς σύνδεσης του υλικού και ελαττώματα LOF όπου μη τηγμένοι κόκκοι πούδρας έχουν εγκλωβιστεί ή/και σχηματίζουν εσωτερικά κενά. Το πλάτος και το βάθος της περιοχής τήξης σχετίζονται άμεσα με την ενέργεια που προσδίδεται στην κλίνη πούδρας. Σε περίπτωση χαμηλής και ανεπαρκούς ενέργειας το πλάτος της περιοχής τήξης είναι μικρό, με αποτέλεσμα την μερική και ανεπαρκή επικάλυψη ανάμεσα σε διαδοχικές γραμμές σάρωσης, και την συσσώρευση μη τηγμένων κόκκων πούδρας ανάμεσα τους. Η εναπόθεση της επόμενης

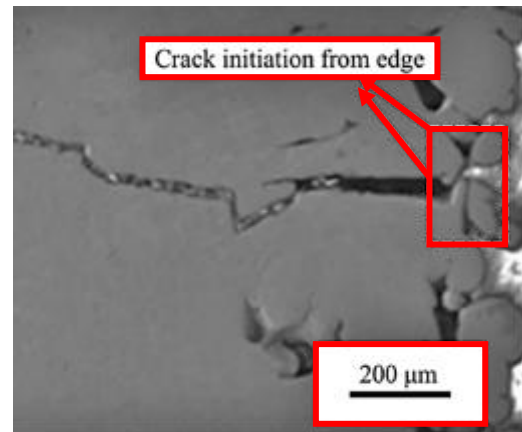
¹² Οι μηχανισμοί σχηματισμού του keyhole και τα χαρακτηριστικά του, θα αναφερθούν λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο της διατριβής. Στο σημείο αυτό γίνεται μια πρώτη και απλή αναφορά, ενώ παρατίθενται τα απολύτως απαραίτητα στοιχεία για την απρόσκοπτη κατανόηση του τρόπου δημιουργίας πορώδους λόγω keyhole.

στρώσης πούδρας κάνει ακόμα πιο δύσκολη την τήξη τους, και οδηγεί στην παγίδευσή τους εντός κενών που έχουν σχηματιστεί λόγω χαμηλής πυκνότητας ενέργειας και ελλιπούς τήξης του υλικού. Παρόμοιος είναι και ο μηχανισμός σχηματισμού LOF, λόγω ατελούς σύνδεσης μεταξύ των στρώσεων, καθώς ανεπαρκής πυκνότητα ενέργειας οδηγεί σε περιοχές τήξης χαμηλού βάθους, και κατά συνέπεια τη μερική μόνο σύνδεση των διαδοχικών στρώσεων υλικού. Οι LOF ατέλειες λόγω της φύσης και των μηχανισμών σχηματισμού τους εντοπίζονται κυρίως ανάμεσα σε διαδοχικές γραμμές σάρωσης και στρώσης υλικού, ενώ, δημιουργώντας επιφάνειες αυξημένης τραχύτητας, ευνοούν τον σχηματισμό και άλλων ατελειών, λόγω της μη ομαλής ροής του τηγμένου υλικού (Zhang, Li and Bai, 2017). Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζονται οι δύο διαφορετικοί τύποι LOF: α) λόγω ατελούς σύνδεσης μεταξύ διαδοχικών στρώσεων υλικού και β) σχηματισμένα κενά με εγκλωβισμένους κόκκους μη τηγμένου υλικού στο εσωτερικό.



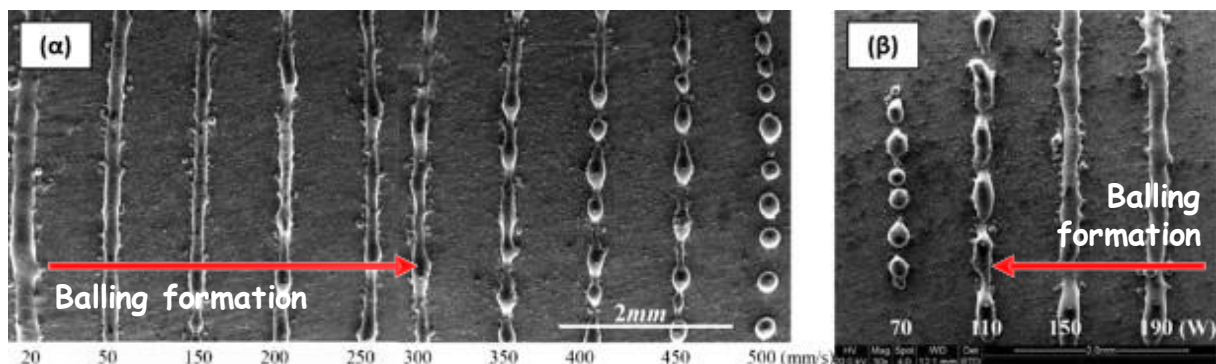
Εικόνα 2.10 Ατέλειες τύπου LOF α) λόγω ατελούς σύνδεσης μεταξύ διαδοχικών στρώσεων υλικού και β) κενά με εγκλωβισμένους κόκκους μη τηγμένου υλικού (Zhang, Li and Bai, 2017)

Η δημιουργία και διάδοση ρωγμών αποτελεί τον τρίτο τύπο ατελειών σε κατεργασίες SLM. Οι εξαιρετικά υψηλοί ρυθμοί ψύξης του τηγμένου υλικού δημιουργούν σημαντικές κλίσεις θερμοκρασίας, οι οποίες οδηγούν στην ανάπτυξη παραμενουσών θερμικών τάσεων στο υλικό, και οι οποίες υπό ορισμένες συνθήκες δύναται να προκαλέσουν το σχηματισμό και τη διάδοση ρωγμών. Υλικά με χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα και υψηλό συντελεστή θερμικής διαστολής (όπως για παράδειγμα τα κράματα ανοξειδωτού χάλυβα και τα υπερκράματα νικελίου) είναι πιο ευαίσθητα και επιρρεπή στη δημιουργία ρωγμών όταν κατεργάζονται με SLM, με την προθέρμανση της πλατφόρμας κατασκευής, και ρύθμιση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος να αποτελούν μεθόδους βελτίωσης και αποφυγής του φαινομένου. Είναι, τέλος, σύνηθες οι ρωγμές να ξεκινούν από τις ελεύθερες επιφάνειες των κατασκευασμένων τεμαχίων (Zhang, Li and Bai, 2017). Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζεται η ανάπτυξη ρωγμών σε κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V έπειτα από κατεργασία SLM.



Εικόνα 2.11 Ανάπτυξη ρωγμών σε κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V έπειτα από κατεργασία SLM (Zhang, Li and Bai, 2017)

Τα φαινόμενα balling αποτελούν τον τελευταίο τύπο ατελειών σε κατεργασίες SLM. Επί της ουσίας είναι σφαιρικοί επιφανειακοί σχηματισμοί, μέρος των οποίων είναι ενωμένο με τα κατώτερα στρώματα υλικού, ειδοποιός διαφορά ανάμεσα σε μορφολογίες balling και τυχαίες επικαθίσεις υλικού (ακόμα και αν αυτές έχουν σφαιρικό σχήμα) (Aboulkhair *et al.*, 2016). Στην πραγματικότητα οι σχηματισμοί αυτοί δεν είναι πάντα απόλυτα σφαιρικοί, αλλά μπορούν να αποκτήσουν διαφορετικές σφαιροειδείς γεωμετρίες, με τον σχηματισμό τους να λαμβάνει χώρα είτε σε ένα μόνο στάδιο, είτε σε διαδοχικά βήματα (Yadroitsev, 2009). Οι φυσικοί μηχανισμοί για την δημιουργία balling είναι αρκετά πολύπλοκοι, και έχουν προταθεί διαφορετικές ερμηνείες με κοινά αποδεκτές αιτίες να θεωρούνται η χαμηλή VED, οι υψηλές τιμές ισχύος της δέσμης laser και ταχύτητας σάρωσης (ακόμα και αν η VED είναι σε τυπικές τιμές για την κατεργασία συγκεκριμένου κράματος), η πιθανή ρευστομηχανική αστάθεια της περιοχής τήγματος (αστάθεια Plateau – Rayleigh), η παρουσία και συγκέντρωση οξυγόνου, η ικανότητα διαβροχής του υλικού, και παράμετροι θερμοδυναμικής όπως η μείωση της ελεύθερης ενθαλπίας Gibbs (Li *et al.*, 2012; Liu and Guo, 2020). Οι παράμετροι που προκαλούν balling δε μπορούν να καθοριστούν μονοσήμαντα και απόλυτα, παρά μόνο σε σχέση με το σύνολο των παραμέτρων κατεργασίας, ορίζοντας ουσιαστικά περιοχές λειτουργίας της κατεργασίας επιρρεπείς και μη σε balling. Στην Εικόνα 2.12 παρουσιάζεται το φαινόμενο balling σε κράμα χάλυβα 316L για διαφορετικές παραμέτρους κατεργασίας με: α) σταθερή ισχύ δέσμης laser (190 W) και διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης (από 20 – 500 mm/s), και β) για ίδια ταχύτητα σάρωσης (1200 mm/s) και διαφορετική ονομαστική ισχύ της δέσμης laser (από 70 – 190 W).



Εικόνα 2.12 Φαινόμενο balling για διαφορετικές παραμέτρους κατεργασίας κράμα χάλυβα με SLM για:
 α) σταθερή ισχύ δέσμης laser (190 W) και διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης,
 β) ίδια ταχύτητα σάρωσης (200 mm/s) και διαφορετική ισχύ της δέσμης laser (Li *et al.*, 2012)

Συνάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι η κατεργασία SLM καθορίζεται από σειρά παραμέτρων, οι οποίες επίσης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους δημιουργώντας ένα πολύπλοκο, πολυπαραμετρικό και άκρως μη γραμμικό σύστημα. Με στόχο την κατανόηση των μηχανισμών και φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, τον προσδιορισμό της επίδρασης κάθε παραμέτρου ξεχωριστά αλλά και σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες, και τέλος τον καθαρισμό βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας, διεξάγεται εκτεταμένη έρευνα σε ακαδημαϊκό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο. Οι προσεγγίσεις και οι μέθοδοι μελέτης που χρησιμοποιούνται και συναντώνται στη σχετική βιβλιογραφία είναι πολλές και διαφορετικές, με κάθε μια να εστιάζει σε συγκεκριμένο επιστημονικό θέμα και πεδίο. Στην τελευταία ενότητα του Κεφαλαίου αυτού θα γίνει μια σύντομη αναφορά στις διαφορετικές αυτές προσεγγίσεις, προκειμένου να καταστεί απόλυτα σαφές και κατανοητό το πρίσμα και η χρησιμότητα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που ακολουθεί στο 3^ο Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

2.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ SLM

Οι μέθοδοι AM γενικά, αλλά και η κατεργασία SLM πιο συγκεκριμένα, ως σχετικά νέες τεχνολογίες συγκεντρώνουν το έντονο ενδιαφέρον της επιστημονικής, ακαδημαϊκής και βιομηχανικής κοινότητας, με σημαντικό όγκο εργασιών να εκπονούνται στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Κρίνεται, λοιπόν, χρήσιμη και απαραίτητη μια σύντομη αναφορά στις διαφορετικές προσεγγίσεις και μεθόδους που χρησιμοποιούνται στη μελέτη της κατεργασίας SLM, ώστε να συγκεκριμενοποιηθεί απόλυτα το πλαίσιο και οι στόχοι της διατριβής.

Μια αρχική, απλή αλλά ταυτόχρονα εξαιρετικά βασική ταξινόμηση είναι σε πειραματικές εργασίες και σε μελέτες με χρήση αριθμητικών μεθόδων και μοντέλων. Αξιοποιώντας ένα από τα βασικά «όπλα» της επιστημονικής σκέψης, το πείραμα, μπορούν να εξαχθούν άμεσα, αξιόπιστα και μετρήσιμα αποτελέσματα και συμπεράσματα σχετικά με την κατεργασία SLM. Οι ερευνητές διαθέτουν σειρά από εξαιρετικά χρήσιμα εργαλεία και μέσα, τόσο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της κατεργασίας, όσο και για την καταγραφή και συλλογή δεδομένων κατά την διάρκεια αυτής. Με τον τρόπο αυτό, όχι μόνο μπορούν να συσχετίσουν τις παραμέτρους κατεργασίας με συγκεκριμένα αποτελέσματα, ιδιότητες, και χαρακτηριστικά των τεμαχίων που κατασκευάζονται, αλλά αποκτούν ταυτόχρονα μια σαφέστερη εικόνα των φαινομένων και μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκειά της κατεργασίας. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα και ευκαιρία για *in situ* και σε πραγματικό χρόνο έλεγχο των παραμέτρων και βελτιστοποίηση της κατεργασίας. Ενδεικτικά, στην πειραματική εργασία των Miyauchi et al. (2022) (Miyauchi, Matsumoto and Yokota, 2022), επιτυγχάνεται η τοπική φυλλοειδής σκλήρυνση του υλικού (partially hardened laminate structure) μέσω περιοδικής μεταβολής της ογκομετρικής πυκνότητας ενέργειας, ενώ στην εργασία των Pan et al. (2022) μελετάται η επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες χάλυβα 304L, έπειτα από κατεργασία SLM. Οι Zhao et al. (2017) στην εργασία τους, χρησιμοποιώντας σύστημα ακτίνων X και διάθλασης υψηλής ταχύτητας, κατέγραψαν σε πραγματικό χρόνο την κατεργασία κράματος τιτανίου (Ti-6Al-4V) σε διάταξη L-PBF, ενώ οι Zhang et al. (2022), με χρήση οπτικού ομοαξονικού συστήματος εικόνων, κατέγραψαν την εκτίναξη υλικού και τα χαρακτηριστικά της κατά την κατεργασία χάλυβα 316L με SLM, συσχετίζοντάς την επιτυχώς με τον υπολογισμό του πάχους που έχει η πούδρα τοπικά.

Αν και η πειραματική μελέτη της κατεργασίας SLM αναμφίβολα έχει σημαντικά πλεονεκτήματα και παρέχει πολύτιμα και χρήσιμα δεδομένα, προϋποθέτει εξοπλισμό υψηλού κόστους (κτήσης και λειτουργικού), ενώ η συστηματική μελέτη απαιτεί και περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό πειραμάτων. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον αριθμό παραμέτρων της κατεργασίας SLM, η μελέτη της επίδρασης κάθε παραμέτρου ξεχωριστά, αλλά και συναρτήσεων των υπολοίπων, «εκτοξεύει» τον όγκο των απαραίτητων πειραμάτων, ο οποίος αυξάνεται ακόμα περισσότερο αν συνυπολογιστούν τα διαφορετικά υλικά και κράματα που πρέπει να μελετηθούν. Φυσικά χρησιμοποιούνται στατιστικά εργαλεία για τη μείωση του αριθμού των πειραμάτων και την αξιολόγηση και βέλτιστη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων (Sheshadri et al., 2021), συνεχίζει όμως ο αριθμός των απαραίτητων πειραμάτων να παραμένει εξαιρετικά υψηλός. Ταυτόχρονα, παρά τον σύγχρονο και προηγμένο εξοπλισμό που μπορεί να διαθέτει μια ερευνητική ομάδα ή ένα εργαστήριο, μηχανισμοί που εξελίσσονται σε μικροκλίμακα χώρου και χρόνου, αν και είναι κείριας σημασίας για την πλήρη και σφαιρική κατανόηση της κατεργασίας, παραμένει ιδιαίτερα δύσκολο να καταγραφούν. Η μοντελοποίηση της κατεργασίας αποτελεί ως εκ τούτου μια εξαιρετική λύση στις προαναφερθείσες δυσκολίες και προκλήσεις. Αν έπρεπε να διατυπωθεί εν συντομία ο ορισμός της μοντελοποίησης, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι: μοντελοποίηση είναι η ακριβής μαθηματική περιγραφή ενός συστήματος, η οποία επιτρέπει την κατανόηση του συστήματος αλλά και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του. Η επίλυση των μαθηματικών σχέσεων γίνεται είτε αναλυτικά είτε με χρήση αριθμητικών μεθόδων, οι οποίες εξασφαλίζουν την απαραίτητη ακρίβεια αλλά και αποτελεσματική διαχείριση χρόνου και υπολογιστικής ισχύος. Η μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM γίνεται στη βάση της περιγραφής των φυσικών φαινομένων και μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα, και οι οποίοι θα περιγραφούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο ταυτόχρονα με την απαραίτητη ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η μοντελοποίηση

δε βρίσκεται σε κάποια αντιδιαστολή με την πειραματική μελέτη, αντιθέτως οφείλει να λειτουργεί αθροιστικά ή/και συμπληρωματικά καθώς, άνευ της πειραματικής επιβεβαίωσης, κανένα μοντέλο δε μπορεί να θεωρηθεί σωστό, ακριβές και αξιόπιστο. Υιοθετείται, λοιπόν, συχνά η ταυτόχρονη μελέτη της κατεργασίας SLM μέσω πειραμάτων και μοντέλων (Kazemi *et al.*, 2022) με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων και δυνατοτήτων της κάθε προσέγγισης.

Προκειμένου να καταστούν απόλυτα σαφείς και συγκεκριμένοι οι στόχοι και η προσέγγιση της συγκεκριμένης διατριβής, οφείλει να γίνει μια ακόμα ταξινόμηση των μεθόδων μελέτης της κατεργασίας SLM ανάλογα με την κλίμακα στην οποία αναφέρονται και υλοποιούνται. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με τους στόχους κάθε ερευνητικής εργασίας εκπονούνται μελέτες και αναπτύσσονται μοντέλα σε μικρο-κλίμακα (ήτοι χαρακτηριστικά και φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε τάξεις μεγέθους 10^{-6} m), σε μεσο-κλίμακα, και σε μακρο-κλίμακα (πρακτικά η μελέτη της κατεργασίας ολόκληρων αντικειμένων), με το διαχωρισμό αυτό να είναι απαραίτητος και χρήσιμος προκειμένου, αφού τεθούν οι βασικοί στόχοι κάθε εργασίας, να επιλεγούν οι κατάλληλες και ενδεδειγμένες μέθοδοι και προσεγγίσεις. Ειδοποιός διαφορά ανάμεσα στις προαναφερθείσες προσεγγίσεις είναι οι απλοποιήσεις και παραδοχές που αναλόγως υιοθετούνται, καθώς και οι πληροφορίες, τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που αναμένονται από την εκάστοτε προσέγγιση. Ξεκινώντας από την μακρο-κλίμακα, οι αντίστοιχες μελέτες αφορούν χαρακτηριστικά και ιδιότητες των κατασκευασμένων τεμαχίων (όπως π.χ. μηχανικές ιδιότητες, ποιότητα επιφανείας, διαστασιολογική ακρίβεια κτλ.) ή της κατεργασίας συνολικά (π.χ. η ενεργειακή απόδοση της κατεργασίας), ενώ σε επίπεδο μοντέλων συνήθως αναφέρονται και εστιάζουν στην προσομοίωση των θερμομηχανικών φαινομένων, π.χ. ανάπτυξη παραμενουσών θερμικών τάσεων ή/και παραμορφώσεων. Αντίθετα, φαινόμενα όπως η αλληλεπίδραση της δέσμης laser με την ύλη/πούδρα ή/και φαινόμενα ρευστομηχανικής είτε αγνοούνται, είτε λαμβάνονται υπ' όψιν σε μια απλοποιημένη μορφή (Wischeropp, 2021). Ως ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται η εργασία των Waqar *et al.* (2021) στην οποία μέσω πειραματικών δεδομένων και με τη χρήση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Model – FEM) μελετάται η ανάπτυξη παραμενουσών θερμικών τάσεων σε χάλυβα 316L μετά από κατεργασία με SLM, συναρτήσει των παραμέτρων κατεργασίας. Όπως προαναφέρθηκε, σειρά φαινομένων που εξελίσσονται σε επίπεδο μικρο-κλίμακας στα μακροσκοπικά μοντέλα, είτε δε λαμβάνονται καθόλου υπ' όψιν, είτε προσεγγίζονται μέσω κάποιας απλοποιημένης μορφής, το οποίο αποτελεί αναπόφευκτη επιλογή καθώς η μοντελοποίηση του συνόλου των φαινομένων θα είχε μη ρεαλιστικές απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος και χρόνου. Υπό αυτό το πρίσμα, αναπτύσσονται μοντέλα τα οποία περιγράφουν λεπτομερώς και μελετούν τους μηχανισμούς και τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο αποκλειστικά μικρο-κλίμακας, προσομοιώνοντας έναν αρκετά περιορισμένο όγκο υλικού, αλλά με εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια (Wischeropp, 2021). Βασική αρχή της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι η περιοδικότητα και επαναληψιμότητα των φαινομένων, θεωρώντας ότι ο όγκος που κάθε φορά προσομοιώνεται και μελετάται μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστικός του συνόλου της κατεργασίας. Υπενθυμίζεται πως εξ ορισμού η κατεργασία SLM βασίζεται στην κατασκευή ενός τεμαχίου μέσω της επιλεκτικής τήξης και συσσωμάτωσης στοιχειωδών όγκων υλικού, και άρα η μελέτη σε επίπεδο μικροκλίμακας (ήτοι στοιχειωδών όγκων υλικού) κρίνεται λογική και επιστημονικά δόκιμη. Και πάλι μπορεί να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας, μόνο που η αξιολόγηση γίνεται πλέον σε επίπεδο περιοχής τήξης, με τα αποτελέσματα να αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης, τη μορφή που αυτή έχει, τους ρυθμούς θέρμανσης και ψύξης, ή δευτερογενώς τη μικροδομή που τελικά αποκτά το υλικό, λόγω των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών. Τέτοια μοντέλα συνήθως αναφέρονται στην προσομοίωση μοναδιαίου στοιχειώδους ίχνους ή αριθμού διαδοχικών ιχνών ή/και στρώσεων. Ως χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται η εργασία των Siao και Wen (2021) στην οποία μελετάται η ρευστομηχανική της περιοχής τήξης, λαμβάνοντας υπ' όψιν την εξάτμιση υλικού και την ροή λόγω φαινομένου Marangoni, όπως επίσης και η εργασία των Ao *et al.* (2020) στην οποία προσομοιώνεται η μικροδομή κράματος AlSi10Mg με χρήση της μεθόδου Cellular Automaton – CA έπειτα από κατεργασία του με SLM. Ανάμεσα στα μοντέλα μικρο-κλίμακας και μακρο-κλίμακας υπάρχουν τα μέσο-κλίμακας μοντέλα στα οποία γίνεται προσπάθεια για «σύνδεση» των δύο προαναφερθεισών προσεγγίσεων

(Panwisawas *et al.*, 2017), όπως και μοντέλα πολλαπλής κλίμακας (multiscale models) στα οποία ουσιαστικά τα συμπεράσματα μοντέλων μικρότερης κλίμακας αξιοποιούνται και χρησιμοποιούνται ως «inputs» στα μοντέλα μεγαλύτερης κλίμακας (Chen *et al.*, 2022).

Στο σημείο αυτό μπορεί πλέον να συγκεκριμενοποιηθεί και να διατυπωθεί με σαφήνεια το γενικότερο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Στόχος είναι η παρουσίαση κατάλληλης μεθοδολογίας μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM σε μικρο-κλίμακα και σε επίπεδο μοναδιαίου στοιχειώδους ίχνους, λαμβάνοντας υπ' όψιν και βελτιώνοντας τα μοντέλα και τις μεθόδους που ήδη έχουν προταθεί και εφαρμοστεί. Η επιλογή μοντελοποίησης σε επίπεδο μικρο-κλίμακας και μοναδιαίου στοιχειώδους ίχνους έγινε έπειτα από την συστηματική μελέτη της αντίστοιχης βιβλιογραφίας, όπου και διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι ευρέως διαδεδομένη και αποδεκτή από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα, ενώ μάλιστα θεωρείται και ως μια από τις πλέον ενδεδειγμένες (Patalas-Maliszewska *et al.*, 2020).

Η μοντελοποίηση που θα παρουσιαστεί, δεδομένου ότι θα εστιάζει σε επίπεδο μικρο-κλίμακας, θα πρέπει να περιγράφει με την απαραίτητη ακρίβεια τα φυσικά φαινόμενα και μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα αυτών, ενώ ταυτόχρονα οφείλει να είναι αποδοτική αναφορικά με τις απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ. Θα πρέπει να γίνουν δηλαδή οι κατάλληλες επιλογές από απαραίτητες απλοποιήσεις και προσεγγίσεις ώστε αφενός τα μοντέλα που προτείνονται να έχουν ρεαλιστικές απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ, χωρίς όμως να υπάρχει αρνητική επίπτωση στην ακρίβεια, πληρότητα και ορθότητα των αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM σε μικρο-κλίμακα ώστε να παρουσιαστεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα στηριχθούν τα μοντέλα που προτείνονται στη συνέχεια της παρούσας διατριβής.

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ SLM ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΙΚΡΟ-ΚΛΙΜΑΚΑΣ & ΜΕΘΟΔΟΣ FEM

Η μοντελοποίηση ενός συστήματος SLM, όπως έχει άλλωστε προειπωθεί, πρέπει να περιγράψει με ικανοποιητική ακρίβεια το σύνολο των πολύπλοκων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία, ενώ ταυτόχρονα να έχει ρεαλιστικές απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ. Στην προσπάθεια αυτή, για αποτελεσματική προσομοίωση των συστημάτων SLM, έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί διαφορετικές αριθμητικές και αναλυτικές μέθοδοι μοντελοποίησης, κάθε μια εκ των οποίων έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, επί της ουσίας όμως αποτελούν διαφορετικές προσεγγίσεις στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, τα φυσικά φαινόμενα που εξελίσσονται περιγράφονται από σύνολο εξισώσεων, και πρακτικά, η εκάστοτε μοντελιστική προσέγγιση «απαντά» στα ερωτήματα:

- **ποια φυσικά φαινόμενα και μηχανισμοί απαιτείται να ληφθούν υπ' όψιν καθώς επηρεάζουν σημαντικά την κατεργασία**
- **πώς θα περιγραφούν τα προαναφερθέντα φαινόμενα και μηχανισμοί**
- **πώς το μοντέλο θα έχει ρεαλιστικές απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ**

Αρχικά, λοιπόν, πρέπει να προσδιοριστούν τα φαινόμενα και οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα SLM. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα συστήματα SLM είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και πολύ-παραμετρικά, ενώ λαμβάνουν ταυτόχρονα χώρα διαφορετικά και αλληλεξαρτώμενα φυσικά φαινόμενα. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η μεθοδική ταξινόμηση και παρουσίασή τους, καθώς επίσης και των αντίστοιχων μοντέλων που έχουν παρουσιαστεί και κατά κανόνα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωσή τους (Parazoglou *et al.*, 2021).

3.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο «πυρήνας» όλων των προσομοιώσεων της κατεργασίας SLM είναι η μοντελοποίηση των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας. Το ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος πρέπει να συμπεριλαμβάνει τις πηγές ενέργειας (στην συντριπτική πλειοψηφία είναι μόνον μια και συγκεκριμένα η δέσμη laser), και τις θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής με το περιβάλλον¹³, ακτινοβολίας και εξάτμισης υλικού. Ταυτόχρονα στη μοντελοποίηση πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν οι διαφορετικές καταστάσεις της ύλης (στερεή υπό μορφή πούδρας αλλά και συμπαγές υλικό υποστρώματος, υγρής και αέριας), η αλλαγή των οπτικών και θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας, οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης και εξάτμισης, καθώς και η χωρική κατανομή της ισχύος της δέσμης laser. Η μετάδοση θερμότητας στον όγκο ελέγχου μέσω αγωγής περιγράφεται από τον νόμο του Fourier (Parazoglou *et al.*, 2021):

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \vec{q} &= \dot{Q} \\ \vec{q} &= -k \nabla T \end{aligned} \quad (3.1)$$

με ρ την πυκνότητα του υλικού σε [kg/m³], C_p την θερμοχωρητικότητα σε [W/kgK], k τη θερμική αγωγιμότητα σε [W/mK], \vec{q} τη ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας σε [W/m²], και \dot{Q} τον ογκομετρικό ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας σε [W/m³]. Η συγκεκριμένη γενική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας αποτελεί την βάση για σχεδόν κάθε θερμικό μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας SLM, με τους όρους, όμως, και τις οριακές συνθήκες να διαφοροποιούνται ανάλογα με τις εκάστοτε απλοποιήσεις και υποθέσεις που υιοθετούνται (Heigel, Michaleris and Reutzel, 2015; Loh *et al.*, 2015; Q. Yang *et al.*, 2016).

¹³ Οι απώλειες λόγω συναγωγής υφίστανται μόνο στην κατεργασία SLM με χρήση δέσμης laser ως πηγή ενέργειας, καθώς οι κατεργασίες EBM λαμβάνουν χώρα υπό κενό και άρα δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής.

Αρχικά, προκειμένου να εφαρμοστεί η σχέση (3.1) στη μελέτη της κατεργασίας SLM, θα πρέπει να προσδιορισθεί επακριβώς η μορφή και η χωρική κατανομή της πηγής ισχύος (ήτοι της δέσμης laser), με τα αντίστοιχα μοντέλα να την προσομοιώνουν είτε ως επιφανειακή, είτε ως ογκομετρική πηγή θερμότητας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι στη συντριπτική πλειοψηφία των διατάξεων SLM η δέσμη laser έχει Gaussian χωρική κατανομή ισχύος (ή σχεδόν Gaussian), η επιφανειακή πυκνότητα ισχύος μπορεί να περιγραφεί ως (Panda and Sahoo, 2019):

$$Q_{LB}^S(x, y) = \frac{P\eta}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}\right)} \quad (3.2)$$

με Q_{LB}^S την πυκνότητα ισχύος σε $[W/m^2]$, P την ονομαστική ισχύ της δέσμης laser σε $[W]$, η το συντελεστή απορρόφησης της δέσμης laser από το σύστημα της κλίνης, και σ την τυπική απόκλιση της Gaussian κατανομής. Η τυπική απόκλιση σ ορίζεται κατά κανόνα συναρτήσει της ονομαστικής ακτίνας της δέσμης ως $\sigma = r_{LB}/2$, με r_{LB} την ονομαστική ακτίνα της δέσμης σε $[m]$ (Lee and Zhang, 2016). Ως ονομαστική ακτίνα της δέσμης θεωρείται συνήθως η απόσταση από το κέντρο της δέσμης στην οποία η έντασή της έχει μειωθεί κατά παράγοντα e^2 , και αποτελεί μια πολύ ρεαλιστική προσέγγιση για δέσμες laser, Gaussian κατανομής υψηλής ποιότητας¹⁴, όπως αυτές που προκύπτουν από την χρήση Yb-fiber laser (Lee *et al.*, 2017). Η προαναφερθείσα εξίσωση περιγράφει μια ομοιόμορφη κυκλική κατανομή Gauss της πυκνότητας ισχύος, έχει προταθεί όμως στην αντίστοιχη βιβλιογραφία και η χρήση ελλειψοειδών κατανομών Gauss, με την επιφανειακή πυκνότητα ισχύος να περιγράφεται ως (Gouge and Michaleris, 2017):

$$Q_{LB}^S(x, y) = \frac{3P\eta}{\pi x_0 y_0} \cdot e^{-\left(\frac{3x^2}{x_0^2} + \frac{3y^2}{y_0^2}\right)} \quad (3.3)$$

με x_0 και y_0 το μήκος και πλάτος της δέσμης laser σε $[m]$.

Στην πραγματικότητα, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν απορροφάται από την επιφάνεια του υλικού, αλλά από ένα λεπτό στρώμα, τυπικού πάχους μερικών nm (το ακριβές πάχος εξαρτάται από το υλικό και το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) (Marla, Bhandarkar and Joshi, 2011). Με δεδομένη όμως την τάξη μεγέθους διαφορά ανάμεσα στο στρώμα αυτό απορρόφησης (nm) και το ονομαστικό πάχος της στρώσης πούδρας (μm), η μοντελοποίηση της δέσμης laser ως μια επιφανειακή πηγή θερμότητας κρίνεται επιστημονικά δικαιολογημένη. Ενώ όμως η συγκεκριμένη προσέγγιση θα ήταν απόλυτα ρεαλιστική για την αλληλεπίδραση δέσμης laser με επίπεδη συμπαγή επιφάνεια, στην κατεργασία SLM η δέσμη laser προσπίπτει σε κλίνη πούδρας, με πολλαπλές ανακλάσεις της δέσμης να λαμβάνουν χώρα στους κόκκους της πούδρας, δημιουργώντας έτσι μια επιπλέον κατανομή πυκνότητας ισχύος κατά το πάχος της στρώσης, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται και το συνολικό ποσοστό απορρόφησης της ενέργειας της δέσμης από το υλικό της κλίνης. Με στόχο την κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστική και ακριβή μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της δέσμης laser και της κλίνης πούδρας, έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί 3D ογκομετρικές κατανομές πυκνότητας ισχύος ως πηγές θερμότητας (Z. Zhang *et al.*, 2019). Στην πιο απλή έκφραση, η ισχύς θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη και η πυκνότητα ισχύος περιγράφεται από την σχέση (Foroozmehr *et al.*, 2016; Z. Zhang *et al.*, 2019):

$$Q_{LB}^V(x, y, z) = \frac{\eta P}{\eta_{OPD} S_{LB} z_{OPD}} \quad (3.4)$$

με S_{LB} την επιφάνεια της δέσμης laser σε $[m^2]$, z_{OPD} το οπτικό βάθος διείσδυσης της δέσμης (Optical Penetration Depth – OPD) σε $[m]$, και η_{OPD} συντελεστής διόρθωσης για το συγκεκριμένο OPD που θεωρήθηκε. Το OPD μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το πάχος της στρώσης πούδρας σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν διαθέσιμα επιπλέον

¹⁴ Υπάρχουν διαφορετικοί ορισμοί της ονομαστικής ακτίνας μιας δέσμης laser, με τον ορισμό του e^2 να αποτελεί τον πλέον συχνά χρησιμοποιούμενο.

πειραματικά δεδομένα. Σε μια προσπάθεια για πιο ρεαλιστική προσέγγιση, έχει προταθεί ημισφαιρική κατανομή Gauss, με την πυκνότητα ισχύος να περιγράφεται ως (Z. Zhang *et al.*, 2019):

$$Q_{LB}^V(x, y, z) = \frac{5}{\pi^2 r_{LB}^3} \cdot e^{-2\left(\frac{x^2+y^2+z^2}{r_{LB}^2}\right)} \quad (3.5)$$

Στην παραπάνω προσέγγιση γίνεται ένας αυθαίρετος θεωρητικός συσχετισμός της κατά το πάχος κατανομής της πυκνότητας ισχύος με την ονομαστική ακτίνα της δέσμης laser, ο οποίος όμως αποδεικνύεται επί του πρακτέου λειτουργικός καθώς οι τάξεις μεγέθους της ακτίνας της δέσμης laser και του OPD είναι συναφείς. Στην εργασία των Ladani *et al.* (2017) προτείνεται η χρήση ογκομετρικής πηγής ισχύος η οποία φθίνει γραμμικά κατά το πάχος της στρώσης, με την πυκνότητα ισχύος να περιγράφεται από την σχέση (Ladani *et al.*, 2017; Z. Zhang *et al.*, 2019):

$$Q_{LB}^V(x, y, z) = \frac{2P\eta}{\pi r_{LB}^2} \cdot e^{-2\left(\frac{x^2+y^2}{r_{LB}^2}\right)} \frac{2}{z_{OPD}} \left(1 - \frac{z}{z_{OPD}}\right) \quad (3.6)$$

Σε μια παραλλαγή της προηγούμενης προσέγγισης, οι Liu *et al.* (2018) θεωρούν ότι η πυκνότητα ισχύος μειώνεται εκθετικά συναρτήσει του OPD, με την ογκομετρική θερμική πηγή να περιγράφεται ως (Liu *et al.*, 2018; Z. Zhang *et al.*, 2019):

$$Q_{LB}^V(x, y, z) = \frac{2P\eta}{\pi r_{LB}^2} \cdot e^{-2\left(\frac{x^2+y^2}{r_{LB}^2}\right)} \frac{1}{z_{OPD}} e^{-\frac{|z|}{z_{OPD}}} \quad (3.7)$$

Στην προσπάθεια ακριβέστερης περιγραφής της δέσμης laser έχει προταθεί επίσης η χρήση ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής θερμότητας (γνωστής και ως πηγή «Goldak»), η οποία αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της κατεργασίας συγκόλλησης με δέσμης laser. Το μοντέλο Goldak συναντάται στη βιβλιογραφία σε δύο διαφορετικές εκδοχές, αυτή της απλής ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής (single ellipsoidal model), και της διπλής ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής (double ellipsoidal model), οι οποίες εκφράζονται μαθηματικά από τις εξισώσεις (3.8) και (3.9) αντίστοιχα (Goldak, Chakravarti and Bibby, 1984):

$$Q_{LB}^V(x, y, z) = \frac{5}{\pi^2 x_{el} y_{el} z_{el}} \cdot e^{-2\left(\frac{x^2}{x_{el}^2} + \frac{y^2}{y_{el}^2} + \frac{z^2}{z_{el}^2}\right)} \quad (3.8)$$

με x_{el} , y_{el} , z_{el} οι ημι-άξονες της έλλειψης σε [m].

$$Q_{LBf}^V(x, y, z) = \frac{5}{\pi^2 x_{f,el} y_{el} z_{el}} \cdot e^{-2\left(\frac{x^2}{x_{f,el}^2} + \frac{y^2}{y_{el}^2} + \frac{z^2}{z_{el}^2}\right)} \quad Q_{LB_r}^V(x, y, z) = \frac{5}{\pi^2 x_{r,el} y_{el} z_{el}} \cdot e^{-2\left(\frac{x^2}{x_{r,el}^2} + \frac{y^2}{y_{el}^2} + \frac{z^2}{z_{el}^2}\right)} \quad (3.9)$$

με Q_{LBf}^V and $Q_{LB_r}^V$ η κατανομή της πυκνότητας ισχύος στο εμπρός και το πίσω τμήμα της διπλής ημι-ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής σε $[W/m^3]$, f_f , f_r το ποσοστό ισχύος που αντιστοιχεί στο εμπρός και πίσω τμήμα της πηγής, $x_{f,el}$, ο ημι-άξονας της έλλειψης του εμπρός τμήματος, και $x_{r,el}$ ο ημι-άξονας της έλλειψης του πίσω τμήματος. Τέλος, από το ισοζύγιο ενέργειας προκύπτει ότι $f_f + f_r = 2$ (Goldak, Chakravarti and Bibby, 1984) καθώς:

$$\eta P = \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty Q_{LBf}^V(x, y, z) dx dy dz + \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty Q_{LB_r}^V(x, y, z) dx dy dz = f_f \frac{\eta P}{2} + f_r \frac{\eta P}{2} \Rightarrow f_f + f_r = 2 \quad (3.10)$$

Η πηγή Goldak χρησιμοποιείται συχνά για τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM καθώς, ειδικά στην μορφή της διπλής ελλειψοειδούς ογκομετρικής πηγής, είναι εξαιρετικά ευέλικτη, εξασφαλίζοντας τη σύγκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των προσομοιώσεων (Soylemez, 2018). Ταυτόχρονα, όμως, απαιτείται ο

ακριβής προσδιορισμός σημαντικού αριθμού συντελεστών και όρων (ειδικά στην περίπτωση της διπλής ελλειψοειδούς μορφής: $f_f, f_r, x_{f.el}, x_{r.el}, y_{el}$ και z_{el}), ο οποίος κατά κανόνα γίνεται με την μέθοδο «δοκιμής και σφάλματος» ώστε να επιτευχθεί η προαναφερθείσα σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Προκειμένου να περιοριστούν οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος της πηγής, έχει προταθεί η συσχέτιση του ποσοστού ισχύος που αντιστοιχεί σε κάθε τμήμα της πηγής με τον ημι-άξονα του συγκεκριμένου τμήματος (Zinovieva, Zinoviev and Ploshikhin, 2018; Mirkoohi *et al.*, 2019):

$$\frac{f_f}{x_{f.el}} = \frac{f_r}{x_{r.el}} \quad (3.11)$$

Η εγγενής ανάγκη για προσαρμογή και βαθμονόμηση της πηγής Goldak αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα της χρήσης της, καθώς παράλληλα με τις προσομοιώσεις και την μοντελοποίηση απαιτείται και σημαντικός αριθμός από πειραματικά δεδομένα, τα οποία συχνά δεν είναι διαθέσιμα. Στον αντίποδα της χρήσης πολύπλοκων μοντέλων για την προσομοίωση της δέσμης laser έχει προταθεί η χρήση σημειακής πηγής και η αναλυτική λύση του συστήματος μεταφοράς θερμότητας (Carslaw, H.; Jaeger, 1959). Αν και τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι λιγότερο ρεαλιστικά και ακριβή, με δεδομένο την εξαιρετικά απλούστερη επίλυση των εξισώσεων και τις σημαντικά λιγότερες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ, καθίσταται, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, χρήσιμη και βέλτιστη επιλογή (Mirkoohi *et al.*, 2019; Ning *et al.*, 2019, 2020).

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την χωρική κατανομή ισχύος της δέσμης laser περιλαμβάνουν τον όρο η , ήτοι το ποσοστό απορρόφησης της ενέργειας από το υλικό της κλίνης πούδρας. Όπως έχει προαναφερθεί, ο ακριβής προσδιορισμός του συνολικού συντελεστή απορρόφησης είναι εξαιρετικά δύσκολος καθώς, εκτός του ότι η δέσμη laser υφίσταται πολλαπλές ανακλάσεις στους κόκκους του υλικού, η γεωμετρία της επιφάνειας πρόσπτωσης της δέσμης δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται δυναμικά, ως αποτέλεσμα των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή τήξης (π.χ. δημιουργία keyhole), ενώ παράλληλα το υλικό με το οποίο αλληλεπιδρά η δέσμη δύναται να βρίσκεται είτε σε στερεή είτε σε υγρή φάση. Λαμβάνοντας λοιπόν υπ' όψιν την μεταβολή του ποσοστού απορρόφησης από το υλικό συναρτήσει παραμέτρων όπως η ένταση της δέσμης laser, η ταχύτητά της, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δέσμης, και τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες της κλίνης πούδρας (Trapp *et al.*, 2017; Simonds *et al.*, 2018) καθίσταται σαφής η δυσκολία για τον ακριβή προσδιορισμό του, αλλά και της ταυτόχρονης σημασίας του, καθώς αποτελεί καίρια παράμετρο για ένα ρεαλιστικό ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος. Στην αντίστοιχη βιβλιογραφία υιοθετούνται τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό του ποσοστού απορρόφησης κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM: ο πειραματικός προσδιορισμός, ο προσδιορισμός μέσω θεωρητικών μοντέλων και η χρήση ημι-εμπειρικών συντελεστών, ώστε να υπάρχει σύγκλιση των πειραματικών δεδομένων με αυτά της μοντελοποίησης. Αν και η πλέον ακριβής και αποτελεσματική μέθοδος είναι αναμφίβολα ο πειραματικός υπολογισμός, έχει περιορισμένη πρακτική εφαρμογή, καθώς απαιτείται σημαντικός και εξειδικευμένος εργαστηριακός εξοπλισμός, ενώ τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες. Ως αποτέλεσμα των διαφορετικών αυτών προσεγγίσεων, δημιουργούνται στην βιβλιογραφία αποκλίσεις ανάμεσα στους συντελεστές απορρόφησης χρησιμοποιούνται, ακόμα και για ίδια ή παρόμοια υλικά και κράματα.

Στην εργασία των Loh *et al.* (2015) ο συντελεστής απορρόφησης Yb:YAG fiber laser από κράμα αλουμινίου Al6061 προσδιορίζεται στο 48%, ενώ οι Qi *et al.* (2017) για κράμα Al7050 χρησιμοποιούν στις μελέτες τους ποσοστό απορρόφησης 47%. Οι Doubenskaia *et al.* (2015) και Arrizubieta *et al.* (2017) θεωρούν συντελεστή απορρόφησης 30% για συνεχές laser με μήκος κύματος 1.07nm από κράμα χάλυβα 304L, σε αντίθεση με τους Wu *et al.* (2018) οι οποίοι προσδιορίζουν την απορρόφηση Nd-YAG laser από χάλυβα H13 μόλις στο 10%. Οι Gunenthiram *et al.* (2018), λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η απορρόφηση της δέσμης laser γίνεται σε σημαντικό βαθμό από υλικό που βρίσκεται σε υγρή φάση, και ως εκ τούτου είναι σημαντικά αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη της στερεής φάσης,

προτείνουν ποσοστό απορρόφησης μεταξύ 58% και 62% για laser μήκους κύματος 1.075 μm από χάλυβα 316L. Αντίθετα όμως από τους Gunenthiram et al. (2018), για το ίδιο κράμα χάλυβα, οι Conti et al. (2018) θεωρούν απορρόφηση μόλις 30%, οι Metelkova et al. (2018) αναφέρουν ποσοστό απορρόφησης 35%, ενώ στην εργασία των Chen et al. (2019) αναφέρεται ποσοστό απορρόφησης για κράμα 316L 40%. Στα κράματα νικελίου οι αποκλίσεις στους συντελεστές απορρόφησης είναι επίσης σημαντικές. Για παράδειγμα, στην εργασία των Lee et al. (2016) χρησιμοποιείται συντελεστής απορρόφησης 38% για Yb-fiber laser από κράμα IN718, οι Queva et al. (2020) για το ίδιο κράμα θεωρούν συντελεστή απορρόφησης 30%, ενώ οι Zhang et al. (2018) προτείνουν για IN718 συντελεστή απορρόφησης 80%. Στην εργασία τους οι Kundakc et al. (2018) για κράμα νικελίου IN625 χρησιμοποιούν συντελεστή απορρόφησης 38%. Σημαντικές αποκλίσεις καταγράφονται επίσης στους συντελεστές απορρόφησης για κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V. Συγκεκριμένα, οι Mirkoohi et al. (2019) θεωρούν συντελεστή απορρόφησης 77%, οι Yang et al. (2016) 45%, οι Zhuang et al. (2018) ελαφρώς χαμηλότερο, στο 40%, οι Yang et al. (2016), Zhuang et al. (2018), και Ansari et al. (2019) στις εργασίες τους τον θεωρούν 30%, οι Panwisawas et al. (2017) χρησιμοποιούν συντελεστή απορρόφησης 24%, ενώ οι Ye et al. (2017) προτείνουν έναν εξαιρετικά χαμηλό συντελεστή απορρόφησης 20%. Ανάλογη διακύμανση υπάρχει και στους συντελεστές απορρόφησης για το κράμα αλουμινίου AlSi10Mg με τους Liu et al. (2018) να τον προσδιορίζουν πειραματικά για μήκος κύματος 1.07 μm στο 60%, ενώ οι Panda et al. (2019), για το ίδιο υλικό, να προτείνουν συντελεστή 90%. Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί συνοψίζονται οι προαναφερθείσες τιμές.

Πίνακας 3.1 Συντελεστές απορρόφησης για διαφορετικά κράματα σύμφωνα με την αντίστοιχη βιβλιογραφία

Al6001	Al7050	H13 SS	304L SS	IN625	AlSi10Mg	316L SS		IN718	Ti-6Al-4V	
0.48	0.47	0.1	0.3	0.37	0.60	0.58 – 0.62	0.35	0.30	0.77	0.3
					0.9	0.3	0.4	0.38	0.45	0.24
								0.8	0.4	0.2

Από την προηγηθείσα ανασκόπηση, στην αντίστοιχη βιβλιογραφία των διαφορετικών συντελεστών απορρόφησης και της διακύμανσης που υπάρχει, τεκμαίρεται η σημασία του σαφούς προσδιορισμού της εκάστοτε μοντελιστικής μεθοδολογίας, των απλοποιήσεων, υποθέσεων και οριακών συνθηκών, δηλαδή, που υιοθετούνται. Πρέπει να τονιστεί ότι δεν υπάρχει η έννοια του μονοσήμαντα «σωστού» ή «λάθους», αλλά της διαφορετικής προσέγγισης. Για παράδειγμα, το ποσοστό απορρόφησης για το Ti-6Al-4V κυμαίνεται από 20% έως 77%, με τις χαμηλότερες τιμές να προέρχονται από την βιβλιογραφία αναφορικά με την συγκόλληση τιτανίου με χρήση laser, τις ενδιάμεσες τιμές να προκύπτουν από τις οπτικές ιδιότητες του τιτανίου και τους δείκτες διάθλασης του υλικού (refractive indexes), ενώ, τέλος, οι υψηλότερες τιμές μπορούν να δικαιολογηθούν σε περιπτώσεις όπου λαμβάνονται υπ' όψιν οι πολλαπλές σκεδάσεις της δέσμης laser στους κόκκους της κλίνης πούδρας. Ως, λοιπόν, γενικό συμπέρασμα, θα μπορούσε να διατυπωθεί η σημασία και η ανάγκη για μια πιο συστηματική, συνεπή αλλά ταυτόχρονα και αρκούντως απλή και αποτελεσματική μέθοδο προσδιορισμού του συντελεστή απορρόφησης σε κατεργασίες SLM (Parazoglou et al., 2021).

Στην προσπάθεια για πιο ρεαλιστικό και ακριβή θεωρητικό προσδιορισμό της απορρόφησης ενέργειας από την κλίνη πούδρας, έχουν χρησιμοποιηθεί λιγότερο ή και περισσότερο σύνθετα μοντέλα. Στην εργασία τους οι Chen et al. (2016) και οι Lee et al. (2014) προτείνουν τον προσδιορισμό του ποσοστού απορρόφησης και κατ' επέκταση της ογκομετρικής πυκνότητας ισχύος με βάση τον νόμο των Beer-Lambert, και με χρήση ενός «τοπικού» συντελεστή απορρόφησης. Οι Thompson et al. (2015) αναφέρουν ότι ο συντελεστής απορρόφησης μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη σχέση των Hagens-Rubens, η οποία τον συνδέει με την θερμοκρασιακά εξαρτώμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού, με:

$$a(T) = \sqrt{8\varepsilon_0\omega\rho_e(T)} \quad (3.12)$$

με $a(T)$ τον θερμοκρασιακά εξαρτώμενο συντελεστή απορρόφησης, ε_0 η ηλεκτρική διαπερατότητα κενού (electrical permittivity of free space) σε $[s^4A^2/m^3kg]$, ω η συχνότητα σε $[s^{-1}]$, και $\rho_e(T)$ η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε $[m^3kg/s^3A^2]$. Στην εργασία τους οι Gusarov et al. (2009) προτείνουν την χρήση θερμικής πηγής στην οποία λαμβάνεται υπ' όψιν και μοντελοποιείται η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στην κλίνη πούδρας, με την πυκνότητα ισχύος να περιγράφεται μαθηματικά ως (Gusarov et al., 2009; Z. Zhang et al., 2019):

$$Q_{LB}(x, y, z) = \frac{2P}{\pi r_{LB}^2} \cdot e^{-2\left(\frac{x^2+y^2}{r_{LB}^2}\right)} \left(-\eta_{ext} \frac{dq_R}{d\xi}\right) \quad (3.13)$$

με, η_{ext} ο συντελεστής απόσβεσης (extinction coefficient) σε $[m^{-1}]$, $\xi = \eta_{ext} \cdot z$ is το αδιάστατο σημειακό ύψος, και q_R η πυκνότητα της ροής ενέργειας λόγω ακτινοβολίας σε αδιάστατη μορφή, με:

$$q_R = \frac{\gamma a_s}{(4\gamma-3)D} \left\{ \begin{aligned} & (1-\gamma^2)e^{-\lambda}[(1-a_{hem})e^{-2\alpha_s\xi} + (1+a_{hem})e^{2\alpha_{hem}\xi}] - \\ & -(3+\gamma e^{-2\lambda}) \left[(1+\alpha_{hem}-\gamma(1-\alpha_{hem})e^{2\alpha_{hem}(\lambda-\xi)}) + \right. \\ & \left. +(1-\alpha_{hem}-\gamma(1+\alpha_{hem})e^{2\alpha_{hem}(\xi-\lambda)}) \right] \end{aligned} \right\} - \frac{3(1-\gamma)(e^{-\xi}-\gamma e^{\xi-2\lambda})}{4\gamma-3} \quad (3.14)$$

με $\lambda = \eta_{ext} \cdot z_{PB}$ ως αδιάστατος όρος ο οποίος αναφέρεται στο OPD της κλίνης πούδρας, $a_{hem} = \sqrt{1-\gamma}$ και $\gamma=0.7$ την ημισφαιρική ανακλαστικότητα εκφρασμένη μαθηματικά σε πυκνή μορφή (dense form), ενώ οι συντελεστές D και η_{ext} να ορίζονται ως:

$$D = (1-a_s)[1-a_{hem}-\gamma(1+\alpha_{hem})e^{-2\alpha_{hem}\lambda}] - (1+a_{hem})[1+a_{hem}-\gamma(1-\alpha_{hem})e^{2\alpha_{hem}\lambda}] \quad (3.15)$$

$$\eta_{ext} = \frac{S_p}{4} \quad (3.16)$$

με $S_p = \pi/r_{GRAIN}$ την ανηγμένη επιφάνεια της πούδρας ως προς τον όγκο της πορώδους κλίνης υλικού, και r_{GRAIN} την μέση ακτίνα κόκκου της πούδρας. Το μοντέλο που παρέχει μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπ' όψιν παραμέτρους όπως η διάμετρος των κόκκων της πούδρας, το ονομαστικό πάχος της στρώσης της πούδρας και το OPD, είναι αρκετά πολύπλοκο και δύσχρηστο.

Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM, είναι καίριας σημασίας ο ρεαλιστικός και ακριβής προσδιορισμός του συνολικού ποσοστού απορρόφησης της δέσμης laser από την κλίνη πούδρας, και κατ' επέκταση της χωρικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος, λαμβάνοντας υπ' όψιν παραμέτρους όπως τις πολλαπλές σκεδάσεις της δέσμης στους κόκκους της πούδρας, τις διαφορετικές φάσεις του υλικού και τα χαρακτηριστικά της πούδρας. Ταυτόχρονα όμως είναι σκόπιμο και θεμιτό το προτεινόμενο μοντέλο να παραμένει σχετικά απλό και εύχρηστο, ενώ να μπορεί να εφαρμοστεί για διαφορετικά υλικά και παραμέτρους κατεργασίας.

Συνεχίζοντας στην μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM, και πιο συγκεκριμένα στο ισοζύγιο ενέργειας, πρέπει να προσδιοριστούν οι ενεργειακές απώλειες οι οποίες όπως έχει προαναφερθεί περιλαμβάνουν τις απώλειες λόγω συναγωγής, ακτινοβολίας και εξάτμισης υλικού.

Η μετάδοση θερμότητας λόγω συναγωγής περιγράφεται μαθηματικά (Holman, 2010):

$$-\vec{n} \cdot \vec{q}_{CONV} = h_{CONV}(T_\infty - T) \quad (3.17)$$

με \vec{q}_{conv} την ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας λόγω συναγωγής σε $[W/m^2]$, \vec{n} το κάθετο διάνυσμα της επιφάνειας, h_{conv} τον συντελεστή συναγωγής σε $[W/m^2K]$, και T_∞ την θερμοκρασία περιβάλλοντος σε $[K]$. Η συναγωγή μπορεί να είναι είτε φυσική είτε εξαναγκασμένη ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας, δηλαδή την ροή ή όχι αδρανούς αερίου επάνω από την κλίνη πούδρας. Δεδομένου ότι κατά κανόνα αντιστοιχούν σε χαμηλές απώλειες και αντίστοιχη ροή θερμότητας, προς εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου και ισχύος, σε μερικές εργασίες παραλείπονται (Yang *et al.*, 2018), με τις περισσότερες όμως μελέτες να τις λαμβάνουν υπ' όψιν και να θεωρούν έναν σταθερό συντελεστή συναγωγής. Για τα διάφορα υλικά έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί διαφορετικοί συντελεστές συναγωγής, μερικοί εκ των οποίων συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Συντελεστές συναγωγής για διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιούνται κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM

AISI 304	AISi10Mg	316L SS	IN718
20 $[W/m^2K]$ (Conti, Cianetti and Pileri, 2018)	80 $[W/m^2K]$ (Gu and Yuan, 2016)	50 $[W/m^2K]$ (Bidare <i>et al.</i> , 2018)	80 $[W/m^2K]$ (Lee and Zhang, 2016)
Ti-6Al-4V			
5 $[W/m^2K]$ (Q. Yang <i>et al.</i> , 2016)	≈ 10 $[W/m^2K]$ (Heigel, Michaleris and Reutzel, 2015)	12.7 $[W/m^2K]$ (Soylemez, 2018)	100 $[W/m^2K]$ (Li, Tsai and Tseng, 2016)

Παρατηρείται, όμως, και στις τιμές του συντελεστή συναγωγής σημαντική διακύμανση, παρόμοια με αυτή που καταγράφεται για το ποσοστό απορρόφησης, η οποία μάλιστα μπορεί να είναι και μια τάξη μεγέθους ανάμεσα σε διαφορετικές μελέτες, ακόμα και για το ίδιο υλικό. Η προσέγγιση με ορισμό ενός ημι-εμπειρικού συντελεστή είναι εξαιρετικά πρακτική, δε λαμβάνει, όμως, υπ' όψιν την εξάρτησή του συντελεστή από την θερμοκρασία, τις διαφορετικές εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας (π.χ. ατμόσφαιρα του θαλάμου κατασκευής), και τις παραμέτρους της κατεργασίας, όπως για παράδειγμα την ροή αερίου στην επιφάνεια της κλίνης, η οποία δημιουργεί συνθήκες εξαναγκασμένης συναγωγής. Είναι λοιπόν θεμιτό να χρησιμοποιηθεί, κατά τη μοντελοποίηση, μια γενική και συστηματική μέθοδος προσδιορισμού ενός θερμοκρασιακά εξαρτώμενου συντελεστή συναγωγής, που θα λαμβάνει επίσης υπ' όψιν και λοιπές παραμέτρους της κατεργασίας.

Στο ισοζύγιο ενέργειας πρέπει να συμπεριληφθούν και οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας, οι οποίες περιγράφονται μαθηματικά ως (Holman, 2010):

$$-\vec{n} \cdot \vec{q}_{RAD} = k_{SB} \varepsilon (T_\infty^4 - T^4) \quad (3.18)$$

με \vec{q}_{RAD} την ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας λόγω ακτινοβολίας σε $[W/m^2]$, ε ο συντελεστής εκπομπής, και k_{SB} η σταθερά Stefan – Boltzmann, $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ακριβής προσδιορισμός των θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας είναι εξαιρετικά δύσκολος, καθώς αναφέρονται στην ακτινοβολία υλικού υπό μορφή πούδρας, και ως εκ τούτου η ανηγμένη επιφάνεια που τελικά ακτινοβολεί (ανά μονάδα όγκου υλικού) είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη υλικού υπό συμπαγή μορφή. Ταυτόχρονα ο συντελεστής εκπομπής των υλικών μεταβάλλεται συναρτησί της θερμοκρασίας, και μεταβάλλεται σημαντικά για θερμοκρασίες υψηλότερες του σημείου τήξης του υλικού (Goett *et al.*, 2013; Ishikawa *et al.*, 2017). Στόχος, λοιπόν, και στον υπολογισμό των απωλειών λόγω ακτινοβολίας, και του συντελεστή εκπομπής είναι η χρήση μεθόδων μοντελοποίησης και δεδομένων τα οποία θα περιγράφουν κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστικά το σύστημα, ενώ η ακρίβεια μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με χρήση θερμοκρασιακά εξαρτώμενων συντελεστών, και διαφορετικών ανάλογα με την φάση του υλικού (στερεό υπό μορφή πούδρας ή τηγμένο).

Τέλος, ίσως οι μεγαλύτερες θερμικές απώλειες αφορούν την εξάτμιση υλικού, το οποίο μάλιστα είναι και εξαιρετικά υψηλής ενθαλπίας, και ως εκ τούτου απομακρύνονται από το σύστημα σημαντικά ποσά θερμότητας. Οι απώλειες αυτές μπορούν να προσδιοριστούν συναρτήσει του ρυθμού εξάτμισης του υλικού, και να περιγραφούν μαθηματικά ως (Hirano, Fabbro and Muller, 2012):

$$-\vec{n} \cdot \vec{q}_{ABL} = \underbrace{\left[(1 - \beta_R) \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot T} \right)^{\frac{1}{2}} p_{rec}(T) \right]}_{\text{ρυθμός εξάτμισης υλικού ανά μονάδα επιφάνειας}} (\int Cp(T)dT + L_m + L_v) \quad (3.19)$$

με \vec{q}_{ABL} η ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας λόγω εξάτμισης υλικού σε $[W/m^2]$, β_R εμπειρικός συντελεστής επανασύνδεσης του υλικού, m η μάζα ανά άτομο υλικού σε $[kg]$, L_v η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε $[J/kg]$, L_m η λανθάνουσα θερμότητα τήξης σε $[J/kg]$ and k_B η σταθερά Boltzmann σε $[J/K]$. Η πίεση $p_{rec}(T)$ στην επιφάνεια της περιοχής τήγματος μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$p_{rec}(T) = p_o \cdot \exp \left[\frac{m \cdot L_v}{k_B \cdot T_v} \left(1 - \frac{T_v}{T} \right) \right] \quad (3.20)$$

με p_o την πίεση περιβάλλοντος, τυπικά για ατμοσφαιρικές συνθήκες ίση με 1.01×10^5 $[Pa]$, και T_v η θερμοκρασία βρασμού του υλικού σε $[K]$.

Το τελευταίο βήμα στην μοντελοποίηση των φαινομένων μετάδοσης θερμότητας είναι ο ακριβής προσδιορισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του όγκου ελέγχου, ήτοι της πυκνότητας, της ειδικής θερμοχωρητικότητας, και της θερμικής αγωγιμότητας. Αν και κατά κανόνα οι ιδιότητες αυτές είναι γνωστές και διαθέσιμες στη βιβλιογραφία για τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις SLM, αντιστοιχούν συνήθως σε ιδιότητες συμπαγούς υλικού, και όχι υλικού υπό μορφή πούδρας. Ο ακριβής προσδιορισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του όγκου ελέγχου πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν την θερμοκρασιακή εξάρτηση των ιδιοτήτων και τη σημαντική μεταβολή τους κατά την αλλαγή φάσης του υλικού, την ύπαρξη μιας στρώσης πούδρας που έχει εντελώς διαφορετικές ιδιότητες από το συμπαγές αντίστοιχο υλικό, και τέλος την πιθανότητα το υλικό του υποστρώματος να δύναται να διαφέρει από αυτό της πούδρας. Αναφορικά με τη θερμοκρασιακή εξάρτηση των ιδιοτήτων, σε μερικές μελέτες χρησιμοποιούνται σταθερές τιμές προς χάριν απλοποίησης και περιορισμού της μη γραμμικότητας του συστήματος (King *et al.*, 2014), η πρακτική όμως αυτή, ειδικά με δεδομένο ότι αυξάνεται συνεχώς η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς, κρίνεται ότι πρέπει να αποφεύγεται. Ο προσδιορισμός της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας της κλίνης πούδρας μπορεί να γίνει σχετικά απλά και ρεαλιστικά, ακολουθώντας το νόμο των μειγμάτων για το υλικό της πούδρας και την ατμόσφαιρα που επικρατεί στον θάλαμο κατασκευής, και συναρτήσει του πορώδους της κλίνης πούδρας (Nield and Bejan, 2012; Foroozmehr *et al.*, 2016). Ο υπολογισμός όμως της θερμικής αγωγιμότητας είναι εξαιρετικά πιο δύσκολος και πολύπλοκος καθώς στην πραγματικότητα δεν ακολουθεί κάποια γραμμική μεταβολή/νόμο, ενώ εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά κοκκομετρίας της πούδρας. Στη βιβλιογραφία προτείνονται διαφορετικές προσεγγίσεις, με άλλες απλούστερες και άλλες πιο σύνθετες. Για παράδειγμα, στην εργασία τους οι Foroozmehr *et al.*, (2016) θεωρούν θερμική αγωγιμότητα ίση με το 1% αυτής του συμπαγούς υλικού, το οποίο, αν και ποιοτικά είναι σωστό και αποτελεί μια εύχρηστη επιλογή, δε λαμβάνει υπ' όψιν παραμέτρους όπως τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά της πούδρας, την πυκνότητα της κλίνης πούδρας, ή τις ιδιότητες του αερίου μέσου. Στην εργασία τους οι Hussein *et al.* (2013) χρησιμοποίησαν τον νόμο των μειγμάτων και για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει του πορώδους με:

$$k_{PB} = k_s(1 - \varphi) \quad \mu\epsilon \quad \varphi = \frac{\rho_s - \rho_{PB}}{\rho_s} \quad \kappa\alpha\iota \quad \rho_{PB} = (1 - \varphi)\rho_s \quad (3.21)$$

με φ το πορώδες, ρ_s and ρ_{PB} την πυκνότητα του συμπαγούς και πορώδους υλικού αντίστοιχα σε $[\text{kg}/\text{m}^3]$, k_s την θερμική αγωγιμότητα του συμπαγούς υλικού σε $[\text{W}/\text{mK}]$, και k_{PB} τη θερμική αγωγιμότητα του πορώδους υλικού σε $[\text{W}/\text{mK}]$. Η συγκεκριμένη προσέγγιση οδηγεί σε σημαντική υπερδιαστασιολόγηση της θερμικής αγωγιμότητας καθώς, με δεδομένο ότι το πορώδες της κλίνης πούδρας είναι ποιοτικά μεταξύ 30% και 60%, η αντίστοιχη θερμική αγωγιμότητα που προκύπτει είναι μια τάξη μεγέθους υψηλότερη σε σχέση με λοιπές αναφορές της βιβλιογραφίας. Για παράδειγμα, οι Antony et al. (2014), υποθέτοντας ότι η κλίνη πούδρας αποτελείται από ομοιόμορφους σφαιρικούς κόκκους σε πυκνή διάταξη (densely arranged), προτείνουν τον υπολογισμό της πυκνότητας και της θερμικής αγωγιμότητας της κλίνης πούδρας σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\rho_{PB} = \frac{\pi \rho_s}{6} \quad (3.22)$$

$$k_{PB} = \frac{\pi k_s}{6 \left(1 + \Phi_1 \frac{k_s}{k_g}\right)} \quad (3.23)$$

με $\Phi_1 = 0.02 \cdot 10^{2 \left(0.7 - \frac{\pi}{6}\right)}$ εμπειρικό συντελεστή, και k_g την θερμική αγωγιμότητα του αερίου της ατμόσφαιρας στο θάλαμο κατασκευής σε $[\text{W}/\text{mK}]$. Η θερμική αγωγιμότητα που τελικά προκύπτει για την κλίνη πούδρας είναι μόλις $0.07467 [\text{W}/\text{mK}]$ σε σχέση με τα $16.2 [\text{W}/\text{mK}]$ του συμπαγούς υλικού. Τη μη-γραμμική σχέση ανάμεσα στο πορώδες και τη θερμική αγωγιμότητα της κλίνης πούδρας υποστηρίζουν επίσης και οι Loh et al. (2015) στην εργασία τους. Συγκεκριμένα προτείνουν τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας με βάση τη σχέση:

$$k_{PB} = k_s (1 - \varphi)^{\Phi_2} \quad \text{με} \quad \Phi_2 = 4 \quad (\text{εμπειρικός συντελεστής}) \quad (3.24)$$

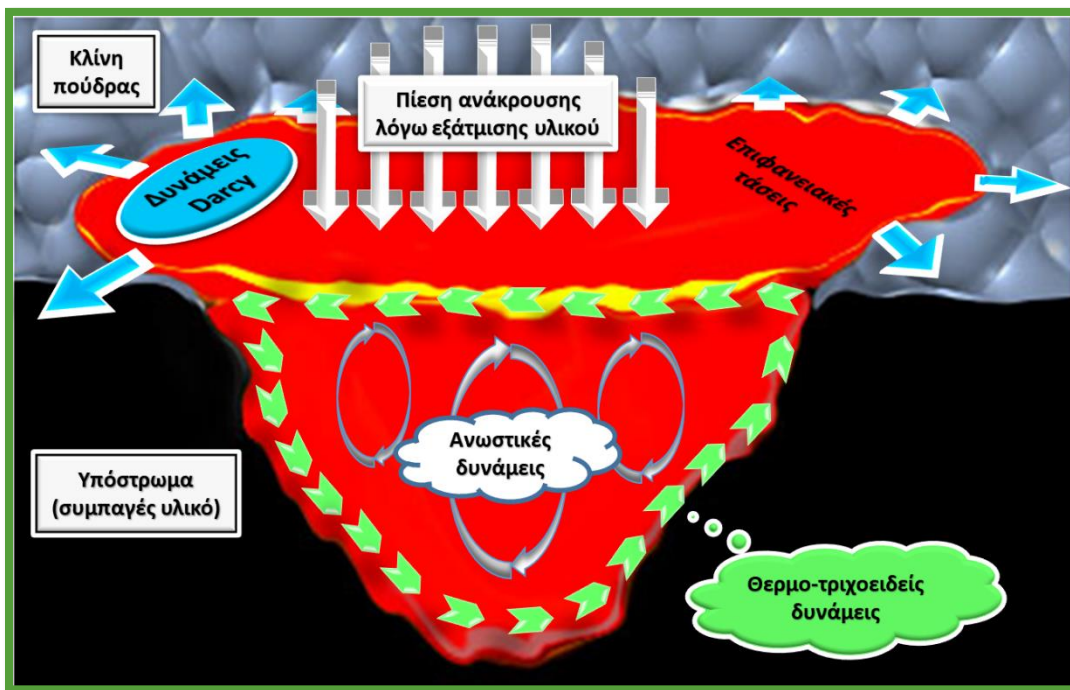
Συνάγεται, λοιπόν, το γενικό συμπέρασμα ότι με στόχο την ακριβή περιγραφή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του όγκου ελέγχου, πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν η θερμοκρασιακή μεταβολή των ιδιοτήτων, η αλλαγή φάσης του υλικού και οι σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες της κλίνης πούδρας, καθώς και τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά που αυτή έχει και σχετίζονται άμεσα με τις θερμοφυσικές ιδιότητες.

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η ανασκόπηση των βασικών μεθόδων μοντελοποίησης και προσομοίωσης της μετάδοσης θερμότητας σε διατάξεις SLM. Ακολουθεί μια αντίστοιχη παρουσίαση και ταξινόμηση των φαινομένων ρευστομηχανικής που λαμβάνουν χώρα και μελετώνται κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM με χρήση FEM.

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Η ρευστομηχανική μελέτη της περιοχής τήξης είναι εξαιρετικά δύσκολη καθώς πολύπλοκα φαινόμενα και φυσικοί μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα, και μάλιστα σε όγκο μερικών μόνο κυβικών χιλιοστών και σε χρονική κλίμακα της τάξης δευτερολέπτου. Αρχικά, όπως άλλωστε έχει προαναφερθεί, στην περιοχή τήξης «συνυπάρχουν» και οι τρεις φάσεις της ύλης (στερεή, υγρή και αέρια), με την στερεά, μάλιστα, φάση να συναντάται υπό μορφή τόσο συμπαγούς υλικού στο υπόστρωμα, όσο και ως κλίνη πούδρας πέριξ της περιοχής κλίνης. Η εξαιρετικά υψηλή συγκέντρωση ισχύος της δέσμης laser προκαλεί την ραγδαία τοπική αύξηση της θερμοκρασίας προκαλώντας τήξη του υλικού αλλά και, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, την έντονη εξάτμισή του. Οι κλίσεις θερμοκρασίας και πίεσης που αναπτύσσονται στην περιοχή τήξης καθορίζουν τη ρευστομηχανική συμπεριφορά της, την κίνηση και ταχύτητα του τηγμένου υλικού, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που τελικά αποκτά. Οι κύριες δυνάμεις που δρουν στον όγκο του υλικού και τη διεπιφάνειά είναι η βαρύτητα, οι δυνάμεις άνωσης (buoyancy), η επιφανειακή τάση (surface tension), οι δυνάμεις λόγω τριχοειδών (capillary forces) και θερμο-τριχοειδών φαινομένων (thermo-capillary forces – Marangoni effect), η πτώση πίεσης που προκαλείται στα όρια της περιοχής τήξης καθώς το τηγμένο υλικό τείνει να διέλθει μέσω των κόκκων της κλίνης πούδρας (Darcy's term forces), και οι

δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω της πίεσης ανάδρασης που προκαλείται από την εξάτμιση του υλικού (recoil pressure). Κάθε μια από τις προαναφερθείσες δυνάμεις και φαινόμενα επιδρούν με διαφορετικό τρόπο και ένταση, η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες και παραμέτρους της κατεργασίας (Markl and Körner, 2016). Στην Εικόνα 3.1 γίνεται γραφική απεικόνιση των κύριων δυνάμεων που δρουν στον όγκο του υλικού της περιοχής τήξης. Η εκάστοτε μοντελιστική προσέγγιση υιοθετεί απαραίτητες απλουστεύσεις και απλοποιήσεις, ανάλογες με τους συγκεκριμένους στόχους της μελέτης, αλλά και τη μεθοδολογία μοντελοποίησης και επίλυσης του συστήματος. Οι διαφορετικές μέθοδοι και τεχνικές μοντελοποίησης, όπως για παράδειγμα η χρήση FEM, η χρήση μεθόδων ελεύθερης επιφάνειας (Free Surface Modeling – FSM), ή χρήση μη πλεγματικών μεθόδων (meshless methods) παρέχουν ξεχωριστές δυνατότητες, ενώ ταυτόχρονα εισάγουν και περιορισμούς, και ενδείκνυνται για διαφορετικές μοντελιστικές προσεγγίσεις (Markoroulos, Karkalos and Parazoglou, 2020; Parazoglou *et al.*, 2021). Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της μαθηματικής περιγραφής και μοντελοποίησης των ρευστομηχανικών φαινομένων, με έμφαση στη εφαρμογή και ενσωμάτωσή τους σε μοντέλα FEM.



Εικόνα 3.1 Γραφική απεικόνιση των κύριων δυνάμεων που ασκούνται στον όγκο του τηγμένου υλικού

Αρχικά, η αρχή διατήρησης της μάζας εκφράζεται από τη σχέση (Gu and Yuan, 2016):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = M_s \quad (3.25)$$

με M_s την πηγή μάζας σε $[\text{kg}/\text{m}^3\text{s}]$ και V το διάνυσμα της ταχύτητας σε $[\text{m}/\text{s}]$. Με δεδομένο ότι στον όγκο ελέγχου ενός συστήματος SLM δεν υπάρχει προσθήκη ή αφαίρεση μάζας $M_s=0$ (Ye and Chen, 2017). Υποθέτοντας ότι το τηγμένο υλικό συμπεριφέρεται ως Νευτώνειο και μη συμπιεστό, η εξίσωση (3.25) μπορεί να απλοποιηθεί στην (Lee and Zhang, 2016):

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.26)$$

Στην περίπτωση που η μοντελοποίηση περιλαμβάνει τον υπολογισμό και προσομοίωση της εξάτμισης του υλικού χρησιμοποιούνται δύο συντελεστές α_1 και α_2 , οι οποίοι αναφέρονται στην αναλογία έκαστης φάσης, και για τους οποίους λόγω αρχής διατήρησης της μάζας ισχύει: $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής α_1 αντιστοιχεί στο ποσοστό της υγρής φάσης, η διεπιφάνεια υγρής και αέριας φάσης αλλά και η διατήρηση μάζας της υγρής φάσης μπορούν να περιγραφούν από την σχέση (Qiu *et al.*, 2015):

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \vec{V}) = -\frac{\dot{m}_v}{\rho_v} \quad (3.27)$$

με \dot{m}_v τον ρυθμό εξάτμισης του υλικού ανά μονάδα επιφανείας σε $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ και ρ_2 την πυκνότητα της αέριας φάσης σε $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Η διατήρηση της ορμής περιγράφεται από τις εξισώσεις Navier – Stokes, και πιο συγκεκριμένα ως (Heeling, Cloots and Wegener, 2017):

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \times \vec{V}) = \nabla \cdot \mu \nabla \vec{V} - \nabla p + M_s \vec{V} + \vec{F} \quad \mu \epsilon \quad \vec{F} = \vec{F}_{buoy} + \vec{F}_{Darcy} + \vec{F}_{surf} \quad (3.28)$$

με μ το ιξώδες σε $[\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}]$, p την πίεση σε $[\text{Pa}]$, και \vec{F} το διάνυσμα τη συνιστώσας των δυνάμεων που δρουν στον όγκο του ρευστού σε $[\text{N}/\text{m}^3]$, και το οποίο περιλαμβάνει τις δυνάμεις άνωσης λόγω διαφοράς πυκνότητας που προκαλείται από τις κλίσεις θερμοκρασίας (\vec{F}_{buoy}), τις δυνάμεις λόγω επιφανειακών τάσεων (\vec{F}_{surf}), και τις δυνάμεις λόγω του όρου Darcy στη διεπιφάνεια της περιοχής τήξης με την πούδρα (\vec{F}_{Darcy}). Μια συνήθη και ευρέως χρησιμοποιούμενη απλοποίηση είναι η προσέγγιση Boussinesq (Boussinesq approximation), κατά την οποία η μεταβολή των ιδιοτήτων του ρευστού πλην της πυκνότητας δε λαμβάνεται υπ' όψιν, με τις ανωστικές δυνάμεις να περιγράφονται ως (Panwisawas *et al.*, 2017):

$$\vec{F}_{buoy} = \rho g \vec{e}_z \beta (T - T_{ref}) \quad (3.29)$$

με \vec{e}_z το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα της βαρύτητας, β ο συντελεστής θερμικής διαστολής σε $[\text{K}^{-1}]$, και T_{ref} η θερμοκρασία αναφοράς σε $[\text{K}]$. Η συνιστώσα της δύναμης που εξαρτάται από τον όρο Darcy μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση Carman – Kozeny (Bru and Ro, 2011; Qiu *et al.*, 2015):

$$\vec{F}_{Darcy} = -K_C \left[\frac{(1-f_l)^2}{f_l^3 + C_K} \right] \vec{V} \quad (3.30)$$

με K_C τη σταθερά διαπερατότητας του πορώδους μέσου (ήτοι της κλίνης πούδρας) σε $[\text{Ns}/\text{m}^4]$, f_l το ποσοστό της υγρής φάσης του μέσου (για πλήρως υγρή φάση $f_l = 1$), και C_K μια πολύ μικρή αριθμητική σταθερά προκειμένου να αποφευχθεί η δια του μηδενός διαίρεση σε περίπτωση που $f_l = 0$. Τέλος, ο όρος των επιφανειακών δυνάμεων περιλαμβάνει τις τριχοειδείς και θερμο-τριχοειδείς τάσεις, και τις τάσεις λόγω της πίεσης ανάκρουσης που προκαλείται από την εξάτμιση του υλικού ως (Brackbill, Kothe and Zemach, 1992; Qiu *et al.*, 2015; Panwisawas *et al.*, 2017):

$$\vec{F}_{surf} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_{surf} \kappa \vec{n}}{\text{τριχοειδείς δυνάμεις}} + \frac{d\sigma_{surf}}{dT} (\vec{V}T - \vec{n}(\vec{n} \cdot \vec{V}T))}{\text{θερμο-τριχοειδείς δυνάμεις}} + \frac{p_o \cdot \exp \left[\frac{m \cdot L_v}{k_B \cdot T_v} \left(1 - \frac{T_v}{T} \right) \right]}{\text{πίεση ανάκρουσης βλ. εξίσωση (3.20)}} \end{array} \right\} \cdot |\vec{V}a_1| \cdot \frac{2\rho}{\rho_1 + \rho_2} \quad (3.31)$$

με σ_{surf} την επιφανειακή τάση σε $[\text{N}/\text{m}]$ που ασκείται σε καμπύλη επιφάνεια, κ η καμπυλότητα σε $[\text{m}^{-1}]$, και \vec{n} το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα στην καμπύλη επιφάνεια. Ο όρος $\frac{2\rho}{\rho_1 + \rho_2}$ χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό και

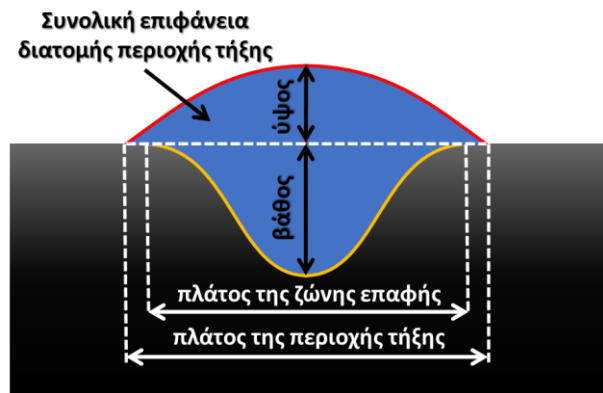
«εξομάλυνση» της πυκνότητας μεταξύ φάσεων με σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες λαμβάνοντας υπ' όψιν μια μέση πυκνότητα ρ , και τις πυκνότητες ρ_1 και ρ_2 των διαφορετικών φάσεων.

Στο σημείο αυτό ολοκληρώθηκε η επισκόπηση και παρουσίαση της μαθηματικής περιγραφής και μοντελοποίησης των βασικών ρευστομηχανικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία SLM στην περιοχή τήξης. Όμως, όπως έχει προαναφερθεί, η σημασία και ο βαθμός που κάθε φαινόμενο και φυσικός μηχανισμός επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα διαφοροποιούνται συναρτήσει των παραμέτρων και συνθηκών κατεργασίας. Ως εκ τούτου κατά την μοντελοποίηση, επιδιώκοντας όχι μόνο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά και τη μέγιστη αποδοτικότητα σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο, προτείνεται μια κριτική προσέγγιση, με επιλογή των κατάλληλων απλοποιήσεων και οριακών συνθηκών. Συγκεκριμένα, ανάλογα με το ποια και σε ποιο βαθμό φυσικά φαινόμενα και μηχανισμοί επικρατούν και υπερισχύουν, πρέπει να γίνεται η ανάλογη επιλογή της καταλληλότερης και πιο αποτελεσματικής μεθόδου μοντελοποίησης, καθώς, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, απλούστερα μοντέλα δύναται να έχουν το ίδιο ακριβή (αν όχι και πιο ακριβή) αποτελέσματα, από αυτά πιο σύνθετων και πολύπλοκων μοντέλων, με υποπολλαπλάσιες, όμως, υπολογιστικές απαιτήσεις (Parazoglou *et al.*, 2021). Προκειμένου, όμως, να γίνεται η σωστή επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μοντελοποίησης θα πρέπει να είναι σαφείς οι διαφορετικές καταστάσεις (modes) της περιοχής τήξης, συναρτήσει των παραμέτρων κατεργασίας. Στην επόμενη, λοιπόν, ενότητα θα γίνει μια παρουσίαση των διαφορετικών αυτών καταστάσεων, καθώς και το πώς αυτές συνδέονται με τους φυσικούς μηχανισμούς που έχουν ήδη παρουσιαστεί.

3.3 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΞΗΣ (MELTING POOL MODES)

Τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης είναι το μήκος (length), το ύψος (height), το πλάτος (width) και το βάθος (depth), ενώ μεγέθη όπως η συνολική επιφάνεια διατομής περιοχής τήξης (total remelted area), η γωνία επαφής (contact angle), και το πλάτος της ζώνης επαφής (width of contact zone) χρησιμοποιούνται επίσης για την περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που η περιοχή τήξης έχει. Τα κύρια αυτά χαρακτηριστικά της σχετίζονται και εξαρτώνται άμεσα από την πυκνότητα ισχύος που δέχεται το υλικό, δηλαδή την ισχύ της δέσμης laser, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αυτή έχει, και τον χρόνο αλληλεπίδρασης με την κλίνη πούδρας (Yadroitsev *et al.*, 2021). Στην Εικόνα 3.1 παρατίθεται γραφική απεικόνιση των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών της περιοχής τήξης. Σύμφωνα με την αντίστοιχη βιβλιογραφία, με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που η περιοχή τήξης αποκτά, λόγω των παραμέτρων και συνθηκών της κατεργασίας, διακρίνονται τρεις διαφορετικές καταστάσεις (modes):

- κατάσταση αγωγής (Conduction Mode – CM)
- κατάσταση μετάβασης (Transition Mode – TM)
- κατάσταση keyhole (Keyhole Mode – KM)



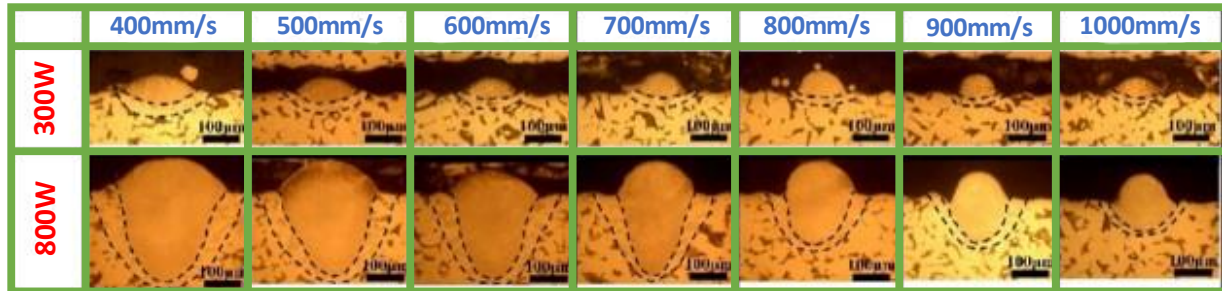
Εικόνα 3.2 Γραφική απεικόνιση των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών της περιοχής τήξης

Επί της ουσίας, η διαφοροποίηση αυτή προέρχεται ως αποτέλεσμα του ποιος ή ποιοι και σε ποιόν βαθμό, φυσικοί μηχανισμοί, επικρατούν στην περιοχή τήξης για δεδομένες συνθήκες και παραμέτρους κατεργασίας. Το CM παρατηρείται για πυκνότητες ισχύος χαμηλές (για την ακρίβεια χαμηλότερες από συγκεκριμένο κατώφλι πυκνότητας ισχύος), ενώ, όπως δηλώνει και η ονομασία του, η αγωγή θερμότητας αποτελεί τον βασικό και κύριο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Η συναγωγή και η μεταφορά μάζας λόγω ανωστικών, τριχοειδών και θερμο-τριχοειδών δυνάμεων λαμβάνουν μεν χώρα ως φυσικοί μηχανισμοί, έχουν όμως εξαιρετικά περιορισμένη επίδραση στη μεταφορά θερμότητας και κατ' επέκταση στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αποκτά η περιοχή

τήξης. Όπως έχει προβλεφθεί θεωρητικά από την πρωτοποριακή εργασία των Eagar and Tsai (Eagar and Tsai, 1983), αλλά έχει αποδειχθεί και από πειραματικές παρατηρήσεις, η διατομή της περιοχής τήξης στο CM είναι (έως και) ημικυκλική, με το βάθος να είναι μικρότερο ή ίσο του ημίσεος του πλάτους (Patel and Vlasea, 2020).

Καθώς αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος, λαμβάνει χώρα υπερθέρμανση του υλικού και έντονη τοπική εξάτμισή του, ενώ, πλέον, ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας εντός της περιοχής τήξης δεν είναι η αγωγή αλλά η συναγωγή λόγω θερμο-τριχοειδών δυνάμεων (Bénard–Marangoni convection) (Patel and Vlasea, 2020). Επίσης, η έντονη εξάτμιση και εκτίναξη υλικού δημιουργεί δυνάμεις αντίδρασης/ανάκρουσης στην επιφάνεια του τηγμένου υλικού (πίεση ανάκρουσης – recoil pressure), ωθώντας το προς τον πυθμένα και τα πλευρικά τοιχώματα της περιοχής τήξης. Ο συνδυασμός της εξάτμισης υλικού και ώθησης του εναπομείναντος τηγμένου υλικού προς τον πυθμένα και τις πλευρές της περιοχής τήξης, οδηγεί στον σχηματισμό της κοιλότητας του keyhole, στο κέντρο της οποίας υπάρχει υλικό σε αέρια μορφή και υπό εξαιρετικά υψηλή πίεση, ενώ τα τοιχώματά σχηματίζονται από υλικό σε υγρή φάση, τα οποία λόγω της υψηλής πίεσης του αερίου στο κέντρο δεν καταρρέουν (Pal *et al.*, 2020). Όσο η πίεση ανάκρουσης, οι επιφανειακές τάσεις, οι θερμο-τριχοειδείς δυνάμεις και οι δυνάμεις άνωσης βρίσκονται σε ισορροπία, η κοιλότητα του keyhole διατηρεί το σχήμα της, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, όταν π.χ. η δέσμη laser προχωρήσει με αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού εξάτμισης υλικού και άρα και της πίεσης ανάκρουσης, τα τοιχώματα καταρρέουν (Guraya, Singamneni and Chen, 2019). Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει μια παρατήρηση σχετικά με τον σχηματισμό πλάσματος εντός και άνωθεν της κοιλότητας του keyhole (keyhole plasma and keyhole plume). Λόγω της χρήσης τυπικά σχετικά χαμηλής ισχύος laser σε κατεργασίες SLM (σε σχέση με τα αντίστοιχα που χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες συγκόλλησης με χρήση laser), το πλάσμα που δημιουργείται μπορεί να χαρακτηριστεί ως χαμηλής πυκνότητας (underdense) (Qi *et al.*, 2017), και ως εκ τούτου, η απορρόφηση ενέργειας από αυτό (φαινόμενο γνωστό και ως plasma shielding) κατά κανόνα δε συμπεριλαμβάνεται στη μοντελοποίηση και στο ισοζύγιο ενέργειας καθώς είναι ήσσονος σημασίας η επίδρασή της. Τα ρευστομηχανικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή του keyhole είναι εξαιρετικά πολύπλοκα, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αξονικές διακυμάνσεις βάθους και ακτινικές διαταραχές στα τοιχώματα, που μπορούν να οδηγήσουν σε αστάθεια ή/και κατάρρευση του keyhole. Η κατάρρευση των τοιχωμάτων σε συνδυασμό με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του τηγμένου υλικού (επιφανειακή τάση, ιξώδες, πυκνότητα) και τους υψηλούς τοπικούς ρυθμούς ψύξης δύναται να οδηγήσουν στον εγκλωβισμό αερίων εντός της περιοχής τήξης και τον σχηματισμό ανεπιθύμητου πορώδους. Ο σχηματισμός (formation), ανάπτυξη (growth), συρρίκνωση (shrinkage) και μετακίνηση (migration) των πόρων, προτού επέλθει η πλήρης στερεοποίηση του υλικού, αποτελούν αντικείμενο συστηματικής μελέτης με έντονο επιστημονικό και πρακτικό ενδιαφέρον (Huang *et al.*, 2022). Η μεταβολή στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης καθώς δημιουργείται η κοιλότητα του keyhole επηρεάζει, επίσης, σημαντικά και το συνολικό ποσοστό απορρόφησης της ισχύος της δέσμης laser από την κλίση πούδρας. Η δέσμη laser, μέσω διαδοχικών ανακλάσεων, «εγκλωβίζεται» εντός της κοιλότητας του keyhole, ενώ ταυτόχρονα δεν αλληλεπιδρά με ύλη σε στερεά μορφή αλλά σε υγρή φάση (τα τοιχώματα του keyhole σχηματίζονται από τηγμένο υλικό), η οποία έχει σημαντικά υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης. Έτσι, το συνολικό ποσοστό απορρόφησης αυξάνεται, δημιουργώντας έναν ανατροφοδοτούμενο μηχανισμό κατά τον οποίο, η απορρόφηση περισσότερης ισχύος από το υλικό, οδηγεί σε σχηματισμό keyhole μεγαλύτερου βάθους, το οποίο με τη σειρά του ενισχύει περαιτέρω τον «εγκλωβισμό» της δέσμης laser στο εσωτερικό του και την περαιτέρω αύξηση της απορροφούμενης ισχύος (Kouraytem *et al.*, 2019; Gan *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2022). Το μακροσκοπικό αποτέλεσμα των προαναφερθέντων μηχανισμών είναι η σταδιακή αύξηση του βάθους της περιοχής τήξης, το οποίο πλέον είναι πολλαπλάσιο του πλάτους της, ενώ η διατομή της από ημικυκλικό σχήμα στο CM αποκτά το χαρακτηριστικό σχήμα του KM. Αν και ορίζεται κάποιο «κατώφλι» για την μετάβαση από CM σε KM, στην πραγματικότητα αυτή δε γίνεται ακαριαία, αλλά μεσολαβεί μια μεταβατική κατάσταση (TM) κατά την οποία συνυπάρχουν και εναλλάσσονται περιοχές σε CM και σε KM (Qi *et al.*, 2017). Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί κριτήρια για τον προσδιορισμό του «κατωφλίου» πέραν του οποίου η κατεργασία μεταβαίνει από CM σε KM, χρησιμοποιώντας κυρίως αδιάστατα μεγέθη (Hann, Iammi

and Folkes, 2011; King *et al.*, 2014; Martin *et al.*, 2019), ο ακριβής όμως και μονοσήμαντος προσδιορισμός παραμένει δύσκολος και αντικείμενο περαιτέρω μελέτης και έρευνας (Scirioni Bertoli *et al.*, 2017). Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζονται οι διατομές της περιοχής τήξης για διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης και διαφορετική ονομαστική ισχύ της δέσμης laser σε κατεργασία χάλυβα 300M με SLM. Παρατηρείται η μετάβαση από CM σε KM για ονομαστική ισχύ της δέσμης laser 800W, ενώ για 300W, η περιοχή τήξης παραμένει σε CM για όλες τις ταχύτητες σάρωσης (Jing and Wang, 2021).



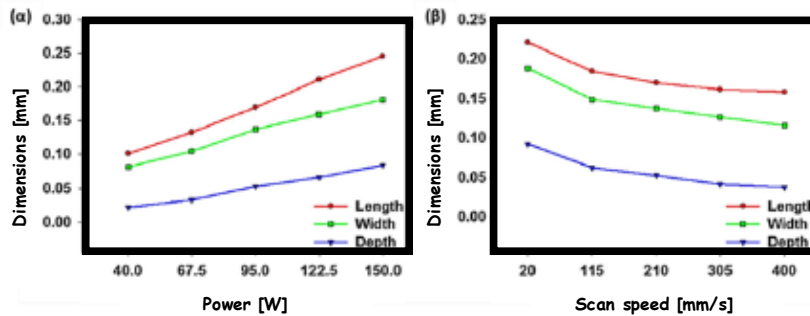
Εικόνα 3.3 Διατομές της περιοχής τήξης για διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης και διαφορετική ονομαστική ισχύ της δέσμης laser σε κατεργασία χάλυβα 300M με SLM. Παρατηρείται η μετάβαση από CM σε KM. (Jing and Wang, 2021)

Με στόχο την πλέον αποτελεσματική μέθοδο προσομοίωσης, περιορίζοντας δηλαδή τις απαιτήσεις επίλυσης του μοντέλου σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας και την κατάσταση της περιοχής τήξης (CM ή KM), ο διαφορετικός βαθμός επίδρασης κάθε φυσικού μηχανισμού, και να επιλέγονται κατάλληλες απλοποιήσεις και προσεγγίσεις. Σε θεωρητικό επίπεδο, το σύνολο των φαινομένων λαμβάνει χώρα ανεξάρτητα με το αν η περιοχή τήξης βρίσκεται σε CM ή σε KM, πρακτικά όμως η ένταση και επίδραση κάθε μηχανισμού είναι αυτές που καθορίζουν ποια φαινόμενα και με ποιον τρόπο είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθούν με στόχο ένα ακριβές και ρεαλιστικό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, η εξατμίσση υλικού κατά το CM περιορίζεται στο 1% της μάζας του υλικού που τήκεται (Wischeropp, 2021), με αποτέλεσμα τόσο η απώλεια μάζας όσο και η πίεση ανάκρουσης να είναι εξαιρετικά χαμηλές. Αντίθετα, η απώλεια ενέργειας, λόγω της υψηλής ενθαλπίας του υλικού που εξατμίζεται, δεν είναι αμελητέα, και ως εκ τούτου δε θα πρέπει να παραλείπεται από το ισοζύγιο ενέργειας. Η σημασία και η αξία του περιορισμού της πολυπλοκότητας των μοντέλων γίνεται εύκολα αντιληπτή από τον υπολογισμό των βαθμών ελευθερίας, οι οποίοι προκύπτουν ως το γινόμενο των κόμβων επί τις εξαρτημένες μεταβλητές (degrees of freedom = nodes · dependent variables)¹⁵. Επί παραδείγματι, ένα 3D θερμικό μοντέλο με εξαρτημένη μεταβλητή μόνο τη θερμοκρασία, έχει πέντε φορές λιγότερους βαθμούς ελευθερίας από το αντίστοιχο θερμο-υδραυλικό μοντέλο, το οποίο, εκτός της θερμοκρασίας, περιλαμβάνει επίσης ως ανεξάρτητες μεταβλητές τους τρεις όρους του πεδίου ταχύτητας και την πίεση. Τούτων λεχθέντων, αιτιολογούνται οι διαφορετικές μοντελιστικές μέθοδοι και προσεγγίσεις που προτείνονται στην βιβλιογραφία, με τη βασική κατηγοριοποίηση να γίνεται ανάλογα με το αν το προτεινόμενο μοντέλο είναι θερμικό ή θερμο-υδραυλικό.

Με δεδομένο ότι σε CM ο κύριος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας είναι η αγωγή, αιτιολογείται η χρήση αμιγώς θερμικών μοντέλων για τον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της περιοχής τήξης. Με στόχο την απλότητα και ευκολία επίλυσης, έχει προταθεί η χρήση αναλυτικών σχέσεων για επίλυση της μεταφοράς θερμότητας, με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να βρίσκονται σε συμφωνία με τα πειραματικά (Mirkoohi *et al.*, 2019; Ning *et al.*, 2019). Στις περισσότερες των περιπτώσεων όμως χρησιμοποιείται η μέθοδος FEM για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας (Zhuang *et al.*, 2018). Όπως είναι αναμενόμενο και έχει

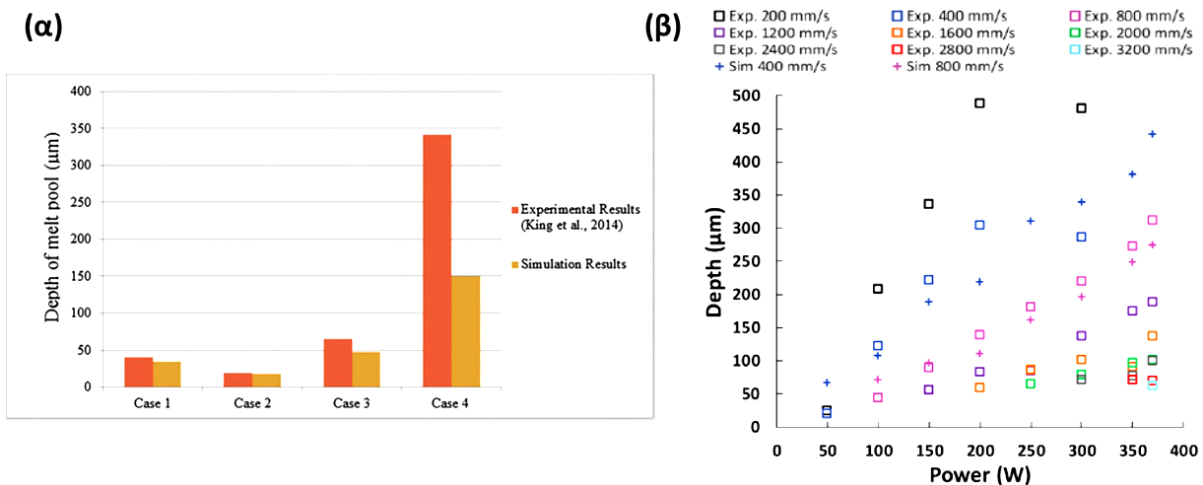
¹⁵ Στην επόμενη ενότητα θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στην μέθοδο FEM και στη διαχείριση και διακριτοποίηση του όγκου ελέγχου.

προαναφερθεί, στα θερμικά μοντέλα δίνεται έμφαση στην ακριβή και ρεαλιστική περιγραφή της δέσμης laser ως πηγή θερμότητας, με την χρήση διαφορετικών προσεγγίσεων στην μοντελοποίησή της (Soylemez, 2018; Z. Zhang *et al.*, 2019), και στον υπολογισμό της απορρόφησης από την κλίνη πούδρας (Foroozmehr *et al.*, 2016; Tran and Lo, 2018). Η συγκεκριμένη προσέγγιση και «φύση» των μοντέλων έχει ως αποτέλεσμα, κατά κανόνα, τον υπολογισμό περιοχών τήξης ημισφαιρικής γεωμετρίας, αντίστοιχη με αυτή του CM, στην οποία το βάθος της περιοχής τήξης είναι ανάλογο του αντίστοιχου ημι-πλάτους. Στην Εικόνα 3.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εργασία των Zhuang *et al.* (2018), όπου παρουσιάζονται διαγραμματικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης, για κατεργασία Ti-6Al-4V με SLM, όπως προβλέπονται από τις προσομοιώσεις. Παρατηρείται ότι για (α) διαφορετική ονομαστική ισχύ της δέσμης laser και (β) διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης, το βάθος και το ημι-πλάτος της περιοχής τήξης είναι ανάλογα, επιβεβαιώνοντας την ημισφαιρική της μορφή.



Εικόνα 3.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης για κατεργασία Ti-6Al-4V με SLM για α) ταχύτητα σάρωσης 210 mm/s και διαφορετική ονομαστική ισχύ της δέσμης laser, και β) για ονομαστική ισχύ της δέσμης laser 95 W και διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης (Zhuang *et al.*, 2018)

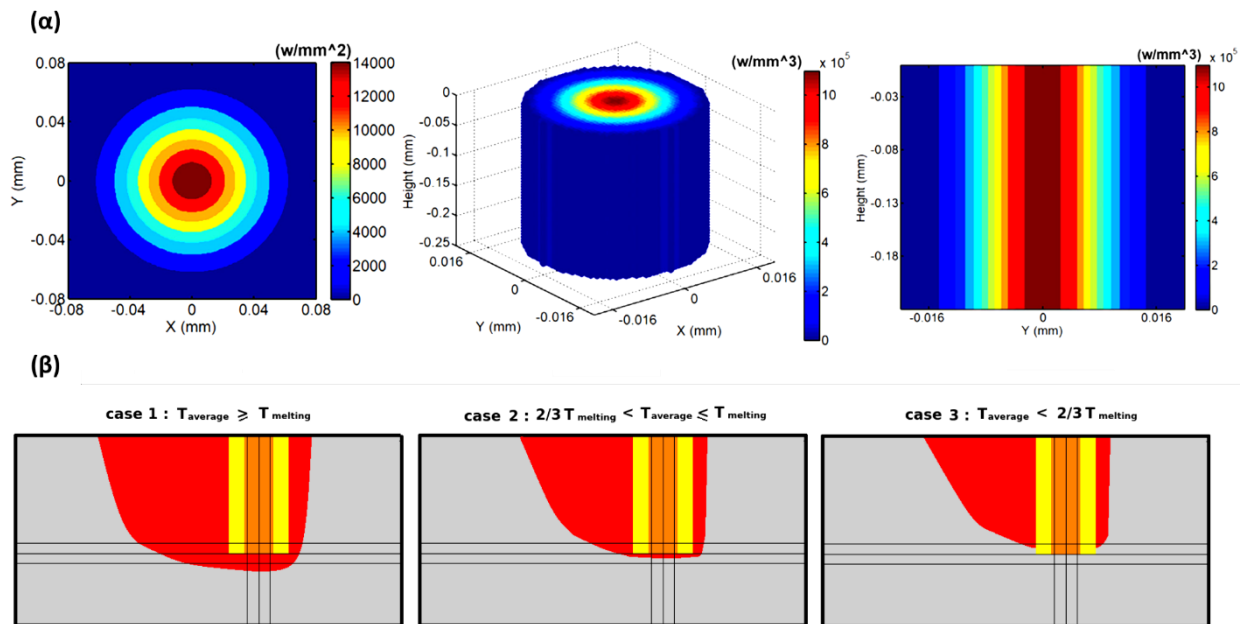
Η χρήση, όμως, αμιγώς θερμικών μοντέλων, ενώ επιτυγχάνει να προβλέψει με ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης σε κατάσταση CM, κατά κανόνα αποτυγχάνει καθώς αυτή μεταβαίνει σε KM. Για παράδειγμα, από τα διαγράμματα της Εικόνα 3.5 τα οποία προέρχονται από τις εργασίες των α) Tran *et al.* (2018) και β) Soylemez *et al.* (2018), καθίσταται σαφές ότι το βάθος της περιοχή τήξης προβλέπεται με ακρίβεια από απλά θερμικά μοντέλα, ενώ το σφάλμα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η VED και μεταβαίνει η περιοχή τήξης σε KM.



Εικόνα 3.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για το βάθος της περιοχής τήξης με χρήση αμιγώς θερμικών μοντέλων α) (Tran and Lo, 2018) και β) (Soylemez, 2018)

Η αδυναμία προσομοίωσης του ΚΜ από τα θερμικά μοντέλα δε θα πρέπει να παρερμηνευθεί ως μια γενική απόρριψη των αμιγώς θερμικών μοντέλων, αλλά απλά ως ανάγκη για χρήση τους υπό συγκεκριμένες συνθήκες και προϋποθέσεις. Αντιθέτως σε μια a priori απόρριψή τους, υπάρχουν δεδομένα που υποδεικνύουν ότι η χρήση τους είναι ενδεδειγμένη για συγκεκριμένες περιπτώσεις (η περιοχή τήξης βρίσκεται σε CM), και μάλιστα με εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα (Bruna-Rosso, Demir and Previtali, 2018; Metelkova *et al.*, 2018). Τέλος, στην εργασία των Gusarov *et al.* (2009) αναφέρεται ότι ακόμα και ο σχηματισμός balling μπορεί να προβλεφθεί από ένα θερμικό μοντέλο.

Για την μελέτη της περιοχής τήξης έχουν παρουσιαστεί και προταθεί θερμο-υδραυλικά μοντέλα, τα οποία περιλαμβάνουν την σύζευξη και επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας και ρευστομηχανικής. Τα συγκεκριμένα μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των φαινομένων της περιοχής τήξης τόσο για γενικές περιπτώσεις χωρίς σαφή διαχωρισμό ανάμεσα σε CM και KM (Lee and Zhang, 2016; Zhang *et al.*, 2018; Shrestha, Rauniyar and Chou, 2019; He *et al.*, 2020), όσο και για στοχευμένη μελέτη του φαινομένου keyhole (Ge, Fuh and Na, 2021; Li *et al.*, 2022). Και στις δύο περιπτώσεις, επιπροσθέτως με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης και το προφίλ θερμοκρασιών που αναπτύσσεται, δύναται να υπολογιστούν και τα πεδία ταχυτήτων και πίεσης εντός της περιοχής τήξης, παρέχοντας έτσι εξαιρετικά χρήσιμες πληροφορίες οι οποίες είναι σχεδόν αδύνατον να προκύψουν πειραματικά. Στην προσπάθεια να γίνει μοντελοποίηση του ΚΜ με χρήση αμιγώς θερμικών μοντέλων, παρακάμπτοντας τη χρήση εξισώσεων ρευστομηχανικής και την πολυπλοκότητα που αυτές εισάγουν, έχει προταθεί η χρήση «προσαρμοσμένων» πηγών θερμότητας (Wang and Zou, 2019; Jia, Saadlaoui and Bergheau, 2021), ή/και «προσαρμοσμένων» θερμοφυσικών ιδιοτήτων (Lee and Yun, 2020). Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζονται γραφικά οι πηγές θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν από τους α) Wang and Zou (2019) και β) Jia, Saadlaoui and Bergheau (2021) στις εργασίες τους.



Εικόνα 3.6 Γραφική απεικόνιση των πηγών θερμότητας από τις εργασίες των α) Wang and Zou (Wang and Zou, 2019) και β) Jia, Saadlaoui and Bergheau (Jia, Saadlaoui and Bergheau, 2021)

Στο σημείο αυτό, και ολοκληρώνοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τις μεθόδους και στρατηγικές μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM με χρήση FEM, κρίνεται χρήσιμος ένας σύντομος σχολιασμός σχετικά με τις

διαπιστωθείσες «αδυναμίες». Ως γενικό πλαίσιο, τα βασικά σημεία τα οποία κρίνεται ότι χρήζουν προσοχής και βελτιστοποίησης είναι:

- η χρήση πολύπλοκων σχέσεων οι οποίες περιλαμβάνουν και εξαρτώνται από αριθμό ημι-εμπειρικών συντελεστών και παραμέτρων
- η μη συστηματική αντιμετώπιση των φυσικών φαινομένων και μηχανισμών υπό την έννοια της επιθυμητής επιστημονικής αυστηρότητας
- η παρουσίαση μη ρεαλιστικών και εξιδανικευμένων αποτελεσμάτων τα οποία, αν και συχνά επιβεβαιώνονται από πειραματικές μετρήσεις, εγείρουν δικαιολογημένες επιστημονικές ερωτήσεις

Αρχικά, η χρήση πολύπλοκων σχέσεων, οι οποίες κατά κανόνα περιλαμβάνουν και σειρά από ημι-εμπειρικούς συντελεστές, αν και αναμφίβολα είναι εξαιρετικά πρακτική, καθώς το εκάστοτε μοντέλο αποκτά την επιθυμητή ακρίβεια μέσω της προσαρμογής των συντελεστών αυτών (fine tuning), η χρησιμότητά της είναι περιορισμένη, καθώς καθίσταται εκ φύσεως πλέον περιπτώσιολογική (case driven). Η οποιαδήποτε εκ νέου προσαρμογή των συντελεστών απαιτεί σειρά νέων πειραμάτων, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει κίνδυνος να παραβλέπονται ή/και να προσεγγίζονται λανθασμένα σημαντικοί φυσικοί μηχανισμοί, χωρίς όμως αυτό να αποτυπώνεται επαρκώς στα αποτελέσματα εξ αιτίας των δυνατοτήτων ευελιξίας και προσαρμοστικότητας του μοντέλου. Η 2^η και η 3^η παρατήρηση αναφέρονται στην έλλειψη συστηματοποίησης των αναγκαίων και απαραίτητων απλοποιήσεων και παραδοχών, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια ανεπιθύμητη επιστημονική ασυνέπεια ανάμεσα στις διαφορετικές μεθοδολογίες, και στον τρόπο παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μοντελοποίηση της εξάτμισης του υλικού και των φυσικών μηχανισμών που την προκαλούν αλλά και την συνοδεύουν. Παρατηρώντας τις εξισώσεις (3.19) και (3.20), οι οποίες περιγράφουν το φαινόμενο, συμπεραίνεται ότι τα φυσικά μεγέθη (η πίεση ανάκρουσης, ο ρυθμός εξάτμισης, και η απώλεια ενέργειας) εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και από το συντελεστή επανασύνδεσης του υλικού. Αρχικά, σε αρκετές προσεγγίσεις, το θερμικό προφίλ που παρουσιάζεται στα αποτελέσματα περιορίζεται σε θερμοκρασίες μικρότερες του σημείου τήξης του υλικού (Ge *et al.*, 2021), δημιουργώντας την εύλογη απορία σχετικά με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, καθώς λόγω της εκθετικής εξάρτησης του φαινομένου της εξάτμισης από τη θερμοκρασία, υψηλότερες θερμοκρασίες θα οδηγούσαν πιθανόν σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα. Ταυτόχρονα, αν και είναι αποδεκτό ότι ο συντελεστής επανασύνδεσης του υλικού εξαρτάται από τις συνθήκες κατεργασίας και δεν είναι σταθερός (Cook and Murphy, 2020), σε αρκετά μοντέλα θεωρείται σταθερός και ≈ 0.18 (Lee and Zhang, 2016; Khairallah *et al.*, 2020; Tian *et al.*, 2020). Και πάλι, όμως, μια τέτοια απλοποίηση, ενώ συμβάλλει στον περιορισμό των βαθμών ελευθερίας του συστήματος, κρίνεται ότι δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, ενώ δύναται να εισάγει και σημαντικά σφάλματα. Μια τελευταία, καίρια, όμως, παρατήρηση, αφορά την απομάκρυνση υλικού λόγω εξάτμισης και τον τρόπο που αυτή μοντελοποιείται (ή όχι). Ενώ, βάσει θεωρίας και θεμελιωδών φυσικών μηχανισμών, η πίεση ανάκρουσης και η γεωμετρία του keyhole δημιουργούνται λόγω αυτής της εξάτμισης, εντούτοις σε αρκετές περιπτώσεις δε λαμβάνεται υπ' όψιν και δε μοντελοποιείται η απώλεια μάζας από το σύστημα, αλλά μόνον η απώλεια ενθαλπίας και η δημιουργία πίεσης ανάκρουσης (Khairallah *et al.*, 2016). Αυτό γίνεται ακόμα πιο αξιοπρόσεκτο και άξιο αναφοράς σε περιπτώσεις που στόχος είναι η μοντελοποίηση του KM και όχι απλά του CM, (Tian *et al.*, 2020) καθώς στο KM, η εξάτμιση (και οι μηχανισμοί και τα φαινόμενα που το ακολουθούν) είναι εξαιρετικά πιο έντονη και σημαντική.

Κλείνοντας την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας καθίσταται σαφής και αιτιολογημένος ο στόχος της παρούσας διατριβής, ο οποίος είναι η παρουσίαση μεθόδου μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM σε μικροκλίμακα με χρήση FEM, στην οποία ελαχιστοποιείται κατά το δυνατόν η χρήση ημι-εμπειρικών συντελεστών, ενώ οι απαραίτητες απλοποιήσεις γίνονται με γνώμονα την επιστημονική συνέπεια ως προς τους υποκείμενους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα.

3.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FINITE ELEMENT METHOD – FEM)

Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου, προς χάριν πληρότητας, θα γίνει μια σύντομη αναφορά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, παρουσιάζοντας τα πλέον βασικά της στοιχεία και βήματα. Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM) είναι μια αριθμητική μέθοδος η οποία καταλήγει σε προσεγγιστική λύση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν ένα φυσικό σύστημα. Η επίλυση του συστήματος / προβλήματος «περιορίζεται» στον προσδιορισμό της λύσης σε πεπερασμένο αριθμό κόμβων / σημείων (nodes) καθώς ο όγκος ελέγχου (domain) έχει διακριτοποιηθεί σε μικρότερα πεπερασμένα στοιχεία (finite elements) μέσω ενός πλέγματος (mesh). Ο υπολογισμός των μεγεθών (θερμοκρασία, πίεση, ταχύτητα) προσεγγίζεται σε κάθε στοιχείο μέσω γνωστών πολυωνυμικών (κατά κανόνα) συναρτήσεων, ο βαθμός των οποίων εξαρτάται από τη θέση και τη γεωμετρία των κόμβων οι οποίοι οριοθετούν το κάθε στοιχείο (Pepper and Heinrich, 2017). Ο βασικός λόγος που επιλέγεται η αναζήτηση μιας προσεγγιστικής λύσης ως ένα σύνολο λύσεων μικρότερων στοιχείων είναι ότι αποδεικνύεται ευκολότερη η αποτύπωση μιας εξαιρετικά πολύπλοκης συνάρτησης (λύσης) ως άθροισμα απλούστερων πολυωνύμων (Reddy, 2006).

Τα βασικά σημεία / αρχές της μεθόδου FE μπορούν να συνοψιστούν ως εξής (Seshu, 2012):

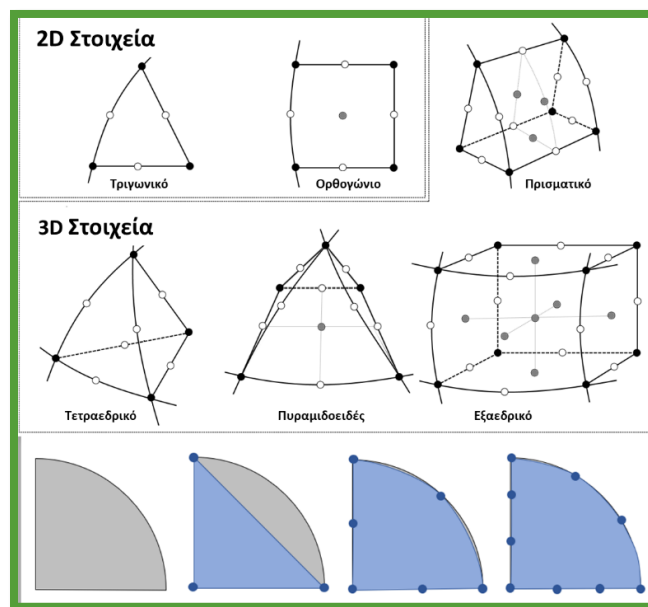
- Δεδομένου ότι είναι άγνωστη η λύση του πεδίου ώστε να ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες και οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα, χρησιμοποιείται μια αρχική υποθετική δοκιμαστική λύση η οποία ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες.
- Η υποθετική δοκιμαστική λύση, κατά κανόνα, δεν ικανοποιεί απόλυτα τις διαφορικές εξισώσεις με αποτέλεσμα να προκύπτουν «κατάλοιπα» (domain residuals) και κατά συνέπεια και σφάλμα (error).
- Τα κατάλοιπα, κατά κανόνα και πάλι, διαφέρουν από κόμβο σε κόμβο εντός του όγκου ελέγχου και δε δύναται να μηδενιστούν παντού ταυτόχρονα. Προτιμάται να μειωθούν και να ελαχιστοποιηθούν (πέραν ενός προκαθορισμένου ορίου) σε όλο τον όγκο ελέγχου, παρά να μηδενιστούν σε συγκεκριμένους κόμβους. Έτσι στόχος είναι το σταθμισμένο άθροισμα των «κατάλοιπων» (weighted sum of the domain residuals) να τείνει στο μηδέν.
- Η ακρίβεια της υποθετικής δοκιμαστικής λύσης μπορεί να αυξηθεί με επιπλέον χρήση υψηλότερων βαθμών όρων, αλλά όσο αυξάνεται ο βαθμός των πολυωνύμων, η επίλυση γίνεται πολυπλοκότερη και πιο δύσκολη. Βέλτιστη επιλογή αποτελεί η χρήση «τμηματικών» (piece-wise) δοκιμαστικών συναρτήσεων, κάθε μια εκ των οποίων είναι κατάλληλη εντός του εκάστοτε πεπερασμένου στοιχείου.
- Η δοκιμαστική συνάρτηση που χρησιμοποιείται σε κάθε τμήμα – πεπερασμένο στοιχείο ονομάζεται συνάρτηση μορφής (element level shape function) και ουσιαστικά καθορίζει τη μορφή και το είδος παρεμβολής που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ζητούμενων μεγεθών μεταξύ των κόμβων.
- Με βάση τις προαναφερθείσες συναρτήσεις μορφής υπολογίζεται το άθροισμα των σταθμισμένων «καταλοίπων» κάθε στοιχείου, τα οποία στη συνέχεια προστίθενται για τον προσδιορισμό των σταθμισμένων «καταλοίπων» ολόκληρου του όγκου ελέγχου. Όπως προαναφέρθηκε στόχος είναι το σταθμισμένο αυτό άθροισμα των «κατάλοιπων» να τείνει στο μηδέν.

Τα παραπάνω βήματα πλέον δύναται να γίνονται μέσω εμπορικά διαθέσιμων λογισμικών FEM, στα οποία ο χρήστης επιλέγει τις σωστές και κατάλληλες παραμέτρους εντός ενός παρεχόμενου περιβάλλοντος εργασίας (interface). Δεν πρέπει να θεωρούνται τα λογισμικά FEM ως μια αυτοματοποιημένη μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, καθώς το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η διευκόλυνση και βελτιστοποίηση τετριμμένων διαδικασιών (κυρίως της αριθμητικής επίλυσης συστημάτων εξισώσεων), ενώ η ορθή και ρεαλιστική μοντελοποίηση των φαινομένων που μελετώνται, άπτεται αποκλειστικά του χρήστη. Δεδομένου λοιπόν ότι θεωρούνται και αντιμετωπίζονται ως εργαλεία, στη συγκεκριμένη διατριβή δε δίνεται έμφαση στο συγκεκριμένο

λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ¹⁶ αλλά στη μελέτη, κατανόηση και μοντελοποίηση των φαινομένων και μηχανισμών.

Ολοκληρώνοντας τη συγκεκριμένη ενότητα και κεφάλαιο, θα αναφερθούν κάποια βασικά γενικά στοιχεία της μοντελοποίησης, τα οποία είναι ανεξάρτητα του λογισμικού που χρησιμοποιείται και είναι κοινά στο σύνολο των προσομοιώσεων που ακολουθούν. Πιο εξειδικευμένες λεπτομέρειες θα αναφέρονται, όπου κρίνεται απαραίτητο και χρήσιμο, κατά την παρουσίαση των συγκεκριμένων μοντέλων που αναπτύχθηκαν.

1^ο βήμα αποτελεί η περιγραφή των φυσικών φαινομένων και μηχανισμών του συστήματος μέσω των κατάλληλων διαφορικών εξισώσεων και οριακών συνθηκών. Στο σημείο αυτό γίνεται η επιλογή της μοντελιστικής προσέγγισης που κρίνεται ότι πρέπει να ακολουθηθεί, και ορίζονται με σαφήνεια οι απαραίτητες απλοποιητικές υποθέσεις που υιοθετούνται. Στόχος είναι η κατά το δυνατόν ρεαλιστικότερη περιγραφή του συστήματος, με τις ελάχιστες δυνατές, όμως, απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, περιορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος στους ελάχιστους δυνατούς μέσω αξιολόγησης της επίδρασης κάθε φυσικού μηχανισμού ώστε πιθανόν να παραληφθούν οι ήσσονος σημασίας, ενώ ταυτόχρονα, όπου είναι δυνατόν, αποφεύγεται η εισαγωγή μη γραμμικότητας, π.χ. η χρήση σταθερών όρων αντί θερμοκρασιακά μεταβαλλόμενων. Πρέπει να τονιστεί ότι οποιαδήποτε προσπάθεια για απλοποίηση δε θα πρέπει να γίνεται εις βάρος της ακρίβειας, επιστημονικής αυστηρότητας και συνέπειας της μοντελοποίησης.



Εικόνα 3.7 Τύποι 2D και 3D στοιχείων καθώς και η προσέγγιση μιας γεωμετρίας από πολυώνυμα μορφής 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού

2^ο βήμα αποτελεί η διακριτοποίηση του όγκου ελέγχου και η δημιουργία πλέγματος. Συνήθως, η διαδικασία αυτή, είναι έως έναν βαθμό αυτοματοποιημένη, πρέπει όμως να επιλεγούν προσεχτικά οι κατάλληλες παράμετροι. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι στοιχείων, που περιλαμβάνουν τριγωνικά και ορθογωνικά στοιχεία για 2D μοντέλα, και πρισματικά, τετραεδρικά, πυραμιδοειδή και εξαεδρικά για 3D μοντέλα. Επίσης, επιλέγεται και ο βαθμός του πολυωνύμου μορφής. Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τύποι στοιχείων που αναφέρθηκαν, καθώς και το πώς προσεγγίζεται μια 2D γεωμετρία από πολυώνυμα μορφής 1ου, 2ου και 3ου βαθμού. Με στόχο την μείωση των απαιτήσεων σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ, υπάρχει η δυνατότητα, και επιλέγεται συχνά, η χρήση

¹⁶ Στη συγκεκριμένη διατριβή έγινε χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων COMSOL®.

πλέγματος διαφορετικής πυκνότητας. Σε περιοχές, δηλαδή, όπου υπάρχει ανάγκη και απαίτηση υψηλότερης ακρίβειας, με τα μεγέθη να παρουσιάζουν υψηλές κλίσεις, χρησιμοποιούνται μικρότερα στοιχεία (fine elements), ενώ ο υπόλοιπος όγκος ελέγχου διακριτοποιείται σε μεγαλύτερα στοιχεία (coarse elements). Και εδώ τονίζεται η ανάγκη για ορθή διαχείριση των δυνατοτήτων που παρέχει το εκάστοτε λογισμικό, καθώς πρέπει να αποφεύγεται τόσο η χρήση υπερβολικά μικρών ή μεγάλων στοιχείων, ενώ, σε περίπτωση που επιλέγεται πλέγμα διαφορετικής πυκνότητας, θα πρέπει να προβλέπονται και περιοχές ομαλής μετάβασης. Τέλος, σε κάθε μοντέλο, πρέπει να επιλέγεται η κατάλληλη διακριτοποίηση, ώστε να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία πλέγματος, δηλαδή τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι ανεξάρτητα του πλέγματος που επιλέχθηκε.

3^ο βήμα αποτελεί η επίλυση του συστήματος. Οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης χρονικά εξαρτώμενων διαφορικών εξισώσεων διακρίνονται σε άμεσες (explicit) και έμμεσες (implicit). Οι άμεσες μέθοδοι υπολογίζουν τη μελλοντική κατάσταση ενός συστήματος με βάση την κατάστασή του στην παρούσα χρονική στιγμή. Αντίθετα, στις έμμεσες μεθόδους, η επίλυση γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο την παρούσα όσο και τη μελλοντική κατάσταση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, έστω $Y(t)$ η παρούσα κατάσταση του συστήματος και $Y(t+\Delta t)$ η μελλοντική κατάσταση, με Δt ένα μικρό χρονικό βήμα, μαθηματικά, οι άμεσες και έμμεσες μέθοδοι επίλυσης, περιγράφονται από τις εξισώσεις (3.32) και (3.33) αντίστοιχα:

$$Y(t + \Delta t) = F(Y(\Delta t)) \quad (3.32)$$

$$G(Y(\Delta t), Y(t + \Delta t)) = 0 \quad (3.33)$$

Σε πρακτικό επίπεδο, οι άμεσες μέθοδοι επίλυσης είναι απλούστερες και πιο γρήγορες, απαιτούν όμως εξαιρετικά μικρότερο χρονικό βήμα, αλλιώς προκύπτει σημαντικό σφάλμα, το οποίο μάλιστα δύναται να συσσωρεύεται κατά την εξέλιξη της επίλυσης. Αντίθετα οι έμμεσες μέθοδοι, αν και πιο απαιτητικές ως προς την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ και χρόνο, τείνουν να έχουν μικρότερο σφάλμα, ήτοι μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ δεν υπάρχει τόσο αυστηρός περιορισμός ως προς το μέγεθος του χρονικού βήματος. Η επιλογή της μεθόδου επίλυσης πρέπει να γίνεται με βάση τις ανάγκες και ιδιαιτερότητες του εκάστοτε μοντέλου. Η επίλυση των μοντέλων στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έγινε με χρήση έμμεσων μεθόδων.

Το λογισμικό FEM που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει ενσωματωμένες δύο έμμεσες μεθόδους επίλυσης, την BDF (Backward Differentiation Formulas) και την Generalized- α (alpha). Η μέθοδος BDF χρησιμοποιεί σχέσεις backward differentiation, ακρίβειας από 1^η έως 5^η τάξη. Βασικό της πλεονέκτημα είναι η σταθερότητα που παρουσιάζει, δύναται όμως να προκύψουν σημαντικά φαινόμενα απόσβεσης (damping effect), ειδικά όταν χρησιμοποιούνται εξισώσεις χαμηλής τάξης, με την πιθανότητα η απόσβεση των υψηλών συχνοτήτων να οδηγήσει σε μη αναμενόμενες λύσεις. Η μέθοδος Generalized- α έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τον επιλύτη BDF 2^{ης} τάξης, περιέχει όμως μια παράμετρο, η οποία στη βιβλιογραφία ονομάζεται α , για τον έλεγχο του βαθμού απόσβεσης των υψηλών συχνοτήτων. Σε σύγκριση με το BDF (με μέγιστη τάξη δύο), η μέθοδος Generalized- α χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλότερη απόσβεση και επομένως είναι πιο ακριβής, ταυτόχρονα όμως είναι και λιγότερο σταθερή.

Για την επίλυση του συστήματος των (συνήθως μη γραμμικών) εξισώσεων, υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις: της πλήρους σύζευξης (fully coupled) και της διαχωρισμένης επίλυσης (segregated). Στη μέθοδο πλήρους σύζευξης σχηματίζεται και επιλύεται ένα μοναδικό και ενιαίο σύστημα εξισώσεων, που περιλαμβάνει το σύνολο των προς υπολογισμό πεδίων/μεταβλητών, καθώς και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις (κυρίως σε περιπτώσεις πολλαπλών φυσικών μοντέλων – multiphysics simulation). Αντίθετα, κατά την διαχωρισμένη επίλυση, το πρόβλημα υποδιαιρείται και επιλύεται σε δύο ή και περισσότερα βήματα (segregated steps). Είθισται κάθε βήμα να περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο φυσικό μηχανισμό (π.χ. διάδοση θερμότητας), σε ορισμένες όμως περιπτώσεις ένα βήμα μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερους του ενός φυσικούς μηχανισμούς ή ένας φυσικός μηχανισμός να

υποδιαιρείται σε περισσότερα βήματα. Κάθε ένα από τα βήματα αυτά είναι μικρότερο από το πλήρες σύστημα, η επίλυσή τους γίνεται διαδοχικά, ενώ απαιτείται κατά κανόνα λιγότερη υπολογιστική μνήμη. Ανεξάρτητα από την προσέγγιση της πλήρους σύζευξης ή διαχωρισμένης επίλυσης που επιλέγεται, στη συνέχεια χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι επίλυσης του συστήματος εξισώσεων. Οι αλγόριθμοι αυτοί διακρίνονται σε άμεσης επίλυσης (direct solvers) και επαναληπτικής επίλυσης (iterative solvers). Οι άμεσης επίλυσης αλγόριθμοι έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι πιο γενικοί, απαιτούν όμως περισσότερη υπολογιστική μνήμη και χρόνο, με τις απαιτήσεις τους να αυξάνονται ραγδαία καθώς αυξάνεται το μέγεθος του μοντέλου/προβλήματος. Οι επαναληπτικοί αλγόριθμοι επίλυσης απαιτούν λιγότερη υπολογιστική μνήμη και χρόνο, παρουσιάζουν πιο αργή/σταδιακή κλιμάκωση στις απαιτήσεις τους, συναρτήσει του μεγέθους του μοντέλου/προβλήματος, δύναται όμως να εμφανίσουν προβλήματα σύγκλισης, η οποία σύγκλιση είναι κατά κανόνα και πιο αργή. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει ενσωματωμένη μια σειρά από άμεσους (MUMPS, PARADISO, SPOOLES, Dense Matrix) και επαναληπτικούς (GMRES, FGMRES, BiCGstab, Conjugate gradients, TFQMR, Use preconditioner) αλγορίθμους επίλυσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά το δοκούν, ανάλογα με την φύση και τις ανάγκες της εκάστοτε περίπτωσης¹⁷.

Τέλος, με δεδομένο ότι εξ ορισμού υπολογίζεται μια προσεγγιστική λύση μέσω αριθμητικών μεθόδων πρέπει να προσδιοριστεί και το επίπεδο του αποδεκτού σφάλματος. Το επίπεδο αποδεκτού σφάλματος ορίζεται ως συνάρτηση του απόλυτου σφάλματος (absolute tolerance) ή του σχετικού σφάλματος (relative tolerance), όταν χρησιμοποιείται κάποιου είδους στάθμιση (scaled absolute tolerance). Υποθέτοντας ότι U είναι το μητρώο της λύσης για ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα, και E το εκτιμώμενο τοπικό απόλυτο σφάλμα για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η προτεινόμενη λύση γίνεται αποδεκτή εάν:

$$\left(\frac{1}{M} \sum_j \frac{1}{N_j} \sum_i \left(\frac{|E_i|}{A_{us,i} + R|U_i|} \right)^2 \right)^{1/2} < 1 \quad (3.34)$$

με $A_{us,i}$ το επίπεδο αποδεκτού απόλυτου σφάλματος επίλυσης της μερικής διαφορικής συνάρτησης i , R το επίπεδο αποδεκτού σχετικού σφάλματος, M ο αριθμός των πεδίων (fields) και N_j συνολικός βαθμός ελευθερίας στο πεδίο j . Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται επίπεδο αποδεκτού σταθμισμένου σφάλματος η εξίσωση (3.34) διαφοροποιείται σε:

$$\left(\frac{1}{M} \sum_j \frac{1}{N_j} \sum_i \left(\frac{|E_{Y_i}|}{A_{s,i} + R|Y_i|} \right)^2 \right)^{1/2} < 1 \quad (3.35)$$

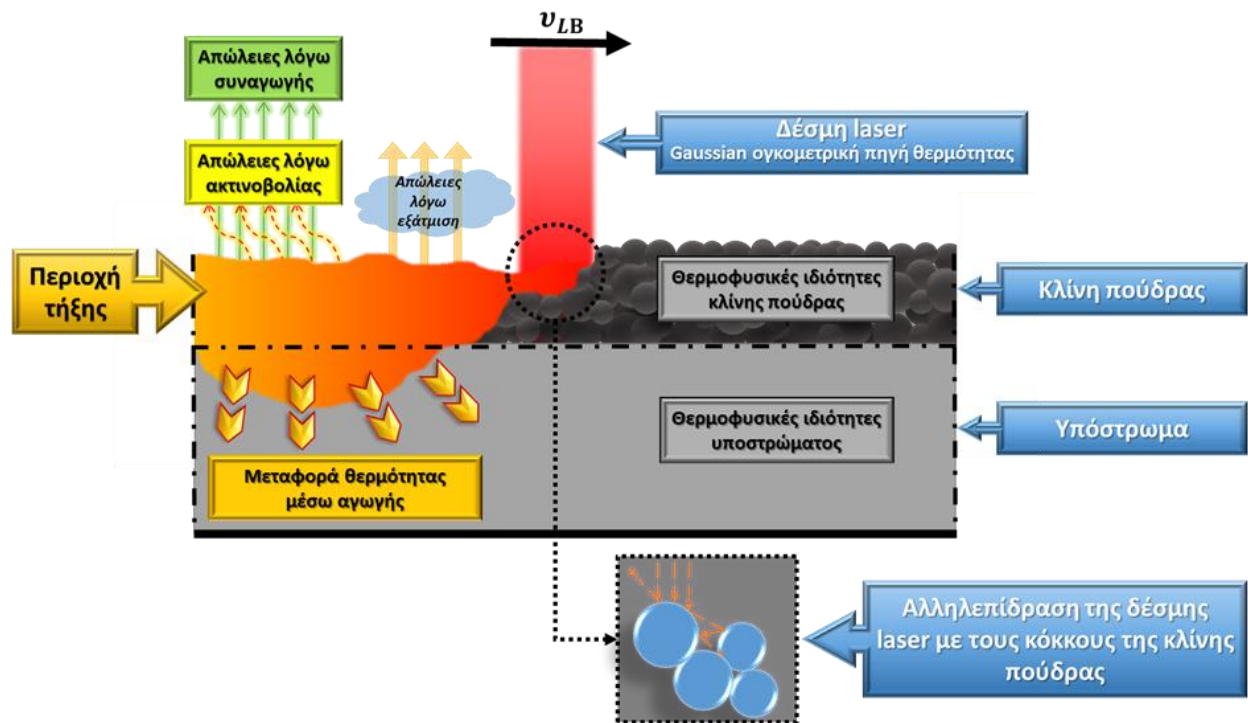
με E_Y το εκτιμώμενο τοπικό απόλυτο σφάλμα για το σταθμισμένο μητρώο λύσης Y_i . Τυπικές τιμές που χρησιμοποιούνται για το επίπεδο αποδεκτού σχετικού σφάλματος είναι ≤ 0.01 , με το αποδεκτό επίπεδο απόλυτου σφάλματος να υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ποσοστό του αποδεκτού σχετικού σφάλματος με ένα συντελεστή, συνήθως ≤ 0.1 .

Στο σημείο αυτό ολοκληρώθηκε η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις μεθόδους μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM με χρήση FEM, και κρίνεται ότι έχει καταστεί συγκεκριμένος και σαφής ο στόχος και η συνεισφορά της συγκεκριμένης διατριβής. Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι προτεινόμενες μεθοδολογίες μοντελοποίησης, οι οποίες αποδεικνύεται ότι αντιμετωπίζουν σε σημαντικό βαθμό τις προαναφερθείσες αδυναμίες των επικρατούντων μοντέλων και μεθόδων.

¹⁷ Αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του εκάστοτε αλγορίθμου μπορούν να αναζητηθούν στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού.

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ CONDUCTION MODE

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μέθοδος μοντελοποίησης του CM. Για την προσομοίωση του CM αναπτύσσεται αμιγώς θερμικό μοντέλο, καθώς από την προηγηθείσα βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει η δυνατότητα αποτελεσματικής και ακριβούς μοντελοποίησης του CM δίχως να απαιτείται η επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής. Έτσι περιορίζονται σημαντικά οι βαθμοί ελευθερίας και κατά συνέπεια και οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο. Ταυτόχρονα, δίνεται η δυνατότητα για λεπτομερέστερη και αναλυτικότερη προσέγγιση συγκεκριμένων, μείζονος σημασίας, μηχανισμών, ενώ παραμένει βασικός στόχος ο περιορισμός στο ελάχιστο δυνατό των ημι-εμπειρικών συντελεστών που είθισται να χρησιμοποιούνται για τη σύγκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.1 Διαγραμματική παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του μοντέλου προσομοίωσης του CM

Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο που προτείνεται έχει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- είναι αμιγώς θερμικό
- χρησιμοποιείται ογκομετρική πηγή θερμότητας για την προσομοίωση της δέσμης laser
- θεωρείται κατανομή Gauss της πυκνότητας ισχύος κατά το ύψος της κλίνης πούδρας
- ο συντελεστής απορρόφησης υπολογίζεται με βάση τους δείκτες διάθλασης (refractive index) του υλικού της πούδρας, ενώ λαμβάνονται υπ' όψιν και οι πολλαπλές σκεδάσεις της δέσμης στους κόκκους της πούδρας.
- ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται με βάση τον αριθμό Nusselt
- οι θερμοφυσικές ιδιότητες (πυκνότητα και θερμοχωρητικότητα) της κλίνης πούδρας υπολογίζονται σύμφωνα με το νόμο των μειγμάτων, ενώ η θερμική αγωγιμότητα με βάση το μοντέλο των Zehner και Schlunder. Επίσης, λαμβάνονται υπ' όψιν οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης και εξάτμισης του υλικού.
- λαμβάνεται υπ' όψιν η απώλεια θερμότητας λόγω της εξάτμισης του υλικού

- χρησιμοποιείται πλέγμα μεταβλητής πυκνότητας για περιορισμό των απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο
- η επικύρωση του μοντέλου γίνεται μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, για τρεις διαφορετικές VED, ο συνδυασμός συνθηκών των οποίων οδηγεί σε CM περιοχή τήξης, διαφορετικών όμως διαστάσεων και χαρακτηριστικών (Sciripioni Bertoli *et al.*, 2017).

Τα προαναφερθέντα βασικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται και διαγραμματικά στην Εικόνα 4.1.

4.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής εκφράζεται μαθηματικά από τις εξισώσεις:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \dot{Q}_{LB} \quad (4.1\alpha)$$

$$-k \nabla T = \vec{n} \cdot \vec{q}_{CONV} + \vec{n} \cdot \vec{q}_{RAD} + \vec{n} \cdot \vec{q}_{ABL} \quad (4.1\beta)$$

με ρ την πυκνότητα του υλικού σε $[\text{kg}/\text{m}^3]$, C_p τη θερμοχωρητικότητα σε $[\text{W}/\text{kgK}]$, k τη θερμική αγωγιμότητα σε $[\text{W}/\text{mK}]$, \dot{Q}_{LB} τον ογκομετρικό ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας σε $[\text{W}/\text{m}^3]$, και \vec{q}_{CONV} , \vec{q}_{RAD} , \vec{q}_{ABL} την ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας λόγω συναγωγής, ακτινοβολίας και εξάτμισης σε $[\text{W}/\text{m}^2]$ και υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις (3.17), (3.18) και (3.19) αντίστοιχα.

Ο ογκομετρικός ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q}_{LB}(x, y, z, t) = \frac{P\eta}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-u_{LB}t)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)} \cdot e^{-\frac{1}{2}\frac{(z_s+z_{PB}-z)^2}{\sigma_z^2}} \quad (4.2)$$

$$\text{με } \sigma_x = \sigma_y = \frac{r_{LB}}{2} \text{ και } \sigma_z = z_{PB}$$

Η συγκεκριμένη μαθηματική έκφραση της κατανομής ισχύος προσδιορίζει τη θέση της ογκομετρικής πηγής θερμότητας με βάση την ταχύτητα της δέσμης laser (u_{LB}), θεωρεί κατανομή Gauss κατά το πάχος της κλίνης πούδρας, ενώ ως τυπική απόκλιση της κατανομής στο οριζόντιο επίπεδο (επίπεδο πρόσπτωσης της δέσμης laser) ορίζεται το ήμισυ της ονομαστικής ακτίνας της δέσμης, η οποία με βάση την πειραματική εργασία που θα χρησιμοποιηθεί για επικύρωση του μοντέλου, ισούται με $27.5\mu\text{m}$ (Sciripioni Bertoli *et al.*, 2017). Λόγω του ότι το μηδενικό επίπεδο έχει οριστεί το κάτω μέρος του υποστρώματος, υπάρχει και ο όρος z_s που αντιστοιχεί στο πάχος του υποστρώματος σε $[\text{m}]$, προκειμένου να είναι μαθηματικά συνεπής η σχέση (4.2). Το ονομαστικό πάχος της κάθε στρώσης ισούται με $75\mu\text{m}$ (Sciripioni Bertoli *et al.*, 2017).

4.1.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

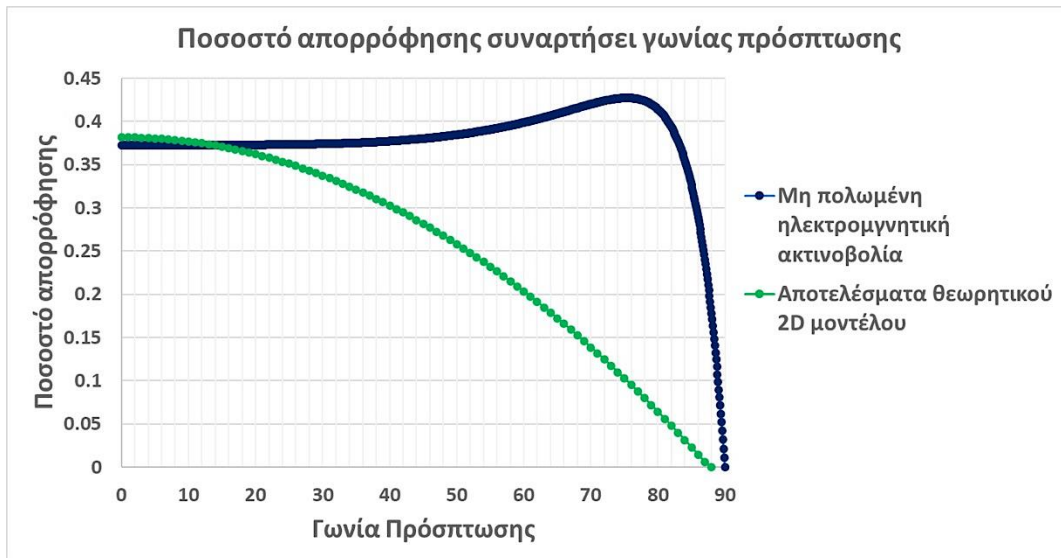
Για τον προσδιορισμό του συντελεστή απορρόφησης, επιλέχθηκε αρχικά να γίνει θεωρητικός υπολογισμός της καμπύλης απορρόφησης, συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, με βάση τους δείκτες διάθλασης του υλικού, και στη συνέχεια να εισαχθούν τα δεδομένα που προκύπτουν σε μοντέλο εντοπισμού ακτίνων (ray tracing), προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική απορρόφηση, λαμβάνοντας υπ' όψιν και τις σκεδάσεις της δέσμης στους κόκκους της πούδρας. Για τον υπολογισμό της απορρόφησης με βάση τους δείκτες διάθλασης θεωρείται στοιχειώδες 2D κελί/όγκος ελέγχου, σημαντικά μικρότερου μήκους του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, και

επιλύεται η αρμονική ως προς τον χρόνο κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου (time harmonics electric field distributions):

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 n_r^2 \vec{E} = 0 \quad \mu\epsilon \quad \vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (4.3)$$

και \vec{E} το ηλεκτρικό πεδίο σε [V/m], k_0 ο κυματαριθμός (wavenumber) υπό κενό σε [m^{-1}], και n_r ο δείκτης διάθλασης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο ο δείκτης διάθλασης για τον σίδηρο και για μήκος κύματος ακτινοβολίας 1070nm (πραγματικό και μιγαδικό μέρος) είναι: $n_r=2.9613-4.0133i$ (Johnson and Christy, 1974).

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνουν δυο παρατηρήσεις. Αρχικά, το μέγεθος των στοιχείων στα οποία διακριτοποιείται ο όγκος ελέγχου πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερο από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που μελετάται. Ως εκ τούτου, για τους συγκεκριμένους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν ορθογωνικά στοιχεία μέγιστου μεγέθους 1nm. Η δεύτερη παρατήρηση σχετίζεται με αυτόν τον περιορισμό, καθώς, η ανάγκη για εξαιρετικά λεπτομερή διακριτοποίηση, οδήγησε στην ανάπτυξη 2D μοντέλου. Έτσι, τα αποτελέσματα που προκύπτουν, συμπίπτουν με τα βιβλιογραφικά για την απορρόφηση από επιφάνεια σιδήρου s-πολωμένης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μήκους κύματος 1070nm, η οποία απορρόφηση είναι, για γωνίες πρόσπτωσης άνω των 40°, μικρότερη, σε σχέση με την απορρόφηση της αντίστοιχης μη πολωμένης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στην Εικόνα 4.2 αποτυπώνονται διαγραμματικά τα ποσοστά απορρόφησης που προέκυψαν από το θεωρητικό 2D μοντέλο και τα ποσοστά απορρόφησης μη πολωμένης ακτινοβολίας, με βάση τη βιβλιογραφία (Johnson and Christy, 1974) και όπως αυτά προκύπτουν απευθείας από τις εξισώσεις Fresnel.



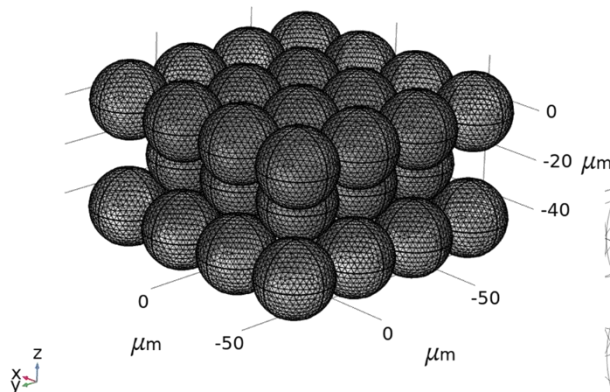
Εικόνα 4.2 Ποσοστό απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, όπως προκύπτουν από τη βιβλιογραφία για μη πολωμένη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και σύμφωνα με το 2D υπολογιστικό μοντέλο

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα του 2D θεωρητικού μοντέλου για δυο βασικούς λόγους. Αρχικά, έπειτα από έλεγχο που έγινε με χρήση μοντέλου εντοπισμού ακτίνων (το μοντέλο περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους), η διαφορά που προκύπτει στη συνολική απορρόφηση ενέργειας, από τους κόκκους της κλίνης πούδρας, είναι μικρότερη του 10% (63.33% με χρήση των δεδομένων για μη πολωμένη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και 58.66% με χρήση των αποτελεσμάτων του μοντέλου). Η μικρή διαφορά οφείλεται αφενός στο ότι για τις μικρές γωνίες πρόσπτωσης, οι οποίες είναι και οι αρχικές γωνίες πρόσπτωσης της δέσμης, δεν υπάρχει ούτως ή άλλως σημαντική διαφορά, και αφετέρου γιατί οι γωνίες στις οποίες εμφανίζεται η σημαντική διαφορά (>40°)

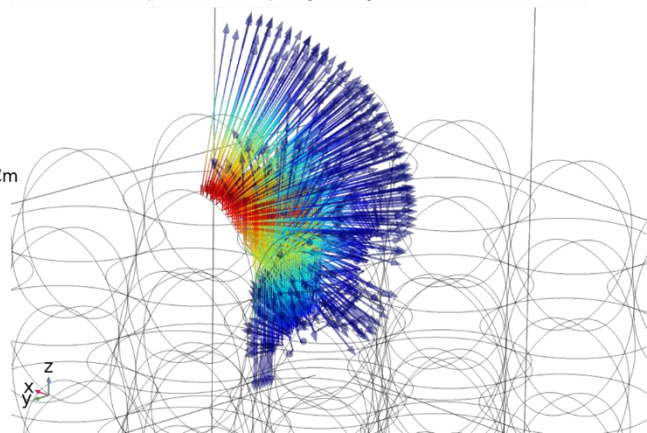
δημιουργούνται έπειτα από πολλαπλές σκεδάσεις της δέσμης, όταν πλέον ήδη έχει απορροφηθεί σημαντικό μέρος της ενέργειάς της. Ο δεύτερος λόγος που επιλέγεται η χρήση του θεωρητικού συντελεστή, είναι η δυνατότητα και ευελιξία που δυνητικά παρέχει μια τέτοια προσέγγιση. Με δεδομένο ότι στόχος είναι η παρουσίαση μια γενικής και άρτιας μεθοδολογίας μοντελοποίησης, η χρήση ενός τέτοιου μοντέλου δύναται να προσδιορίσει την απορρόφηση όχι μόνον από «απλούς» κόκκους αλλά και από πιο σύνθετους (π.χ. με κάποια επικάλυψη), όταν είναι γνωστοί μόνον οι δείκτες διάθλασης των υλικών και φάσεων που τους αποτελούν. Ταυτόχρονα με την πιθανή χρήση 3D μοντέλου (δεδομένου ότι η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς αυξάνεται συν τω χρόνω), η όποια διαφορά προκύπτει, θα περιορίζεται και θα ελαχιστοποιείται. Με βάση τα προαναφερθέντα, κρίνεται δικαιολογημένη η χρήση των υπολογισθέντων αποτελεσμάτων.

Για το προαναφερθέν μοντέλο εντοπισμού ακτίνων, αρχικά δημιουργήθηκε διάταξη από ισομεγέθεις κόκκους εξαγωνικής μέγιστης πυκνότητας (close-packed hexagonal – HCP) και στη συνέχεια εφαρμόζεται αλγόριθμος προσδιορισμού του διανύσματος της δέσμης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Θεωρείται ότι η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια ισούται με τη γωνία ανάκλασης, ενώ για τον προσδιορισμό της γωνίας πρόσπτωσης, χρησιμοποιείται το κάθετο διάνυσμα των στοιχείων στα οποία έχει διακριτοποιηθεί ο όγκος ελέγχου. Με δεδομένο ότι είναι γνωστό το ποσοστό απορρόφησης, συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, υπολογίζεται το θεωρητικό συνολικό ποσοστό απορρόφησης δέσμης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τη διάταξη των κόκκων, συνυπολογίζοντας τις πολλαπλές σκεδάσεις της δέσμης. Αξιοποιώντας την γεωμετρική περιοδικότητα της διάταξης, προσομοιώθηκε το ένα τεταρτημόριο θεωρητικής κυκλικής δέσμης, προς οικονομία υπολογιστικής ισχύος και χρόνου, ενώ η δέσμη laser, προσεγγίστηκε ως άθροισμα στοιχειωδών ακτίνων. Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται α) η διάταξη των κόκκων και η διακριτοποίησή της και β) τα διανύσματα των στοιχειωδών ακτίνων, έπειτα από πολλαπλές σκεδάσεις στην επιφάνεια των κόκκων. Το συνολικό ποσοστό απορρόφησης, με χρήση των δεδομένων του προαναφερθέντος 2D μοντέλου, υπολογίστηκε σε 58.66%, το οποίο ποσοστό είναι σε συμφωνία με την εργασία των Yan et al. (2019), οι οποίοι υπολόγισαν ποσοστό απορρόφησης 55% για το ίδιο κράμα χάλυβα. Το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι και πάλι η απλότητά της και η ευελιξία που προσφέρει, καθώς μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί και να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε υλικό/ά, αν είναι γνωστός ο συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, αλλά και για οποιαδήποτε κοκκομετρική κατανομή και διάταξη των κόκκων της κλίνης πούδρας, ακόμα και σε συνδυασμό με χρήση στοχαστικών μοντέλων ή μοντέλων DEM (Discrete Element Model – DEM).

α) Διάταξη εξαγωνικής μέγιστης πυκνότητας ισομεγέθων κόκκων και η διακριτοποίησή της



β) Διανύσματα στοιχειωδών ακτίνων έπειτα από πολλαπλές ανακλάσεις στην επιφάνεια των κόκκων



Εικόνα 4.3 α) η διάταξη των κόκκων και η διακριτοποίησή της β) τα διανύσματα των στοιχειωδών ακτίνων έπειτα από πολλαπλές σκεδάσεις στην επιφάνεια των κόκκων.

Όπως έχει προαναφερθεί, στην πραγματικότητα η δέσμη laser δεν προσπίπτει και απορροφάται αποκλειστικά από υλικό σε στερεή φάση, αλλά και από τηγμένο υλικό, που βρίσκεται σε υγρή φάση. Η απορρόφηση, στην περίπτωση αυτή, είναι κατά κανόνα σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη της στερεάς φάσης, και ως εκ τούτου κρίνεται επιστημονικά σωστό και απαραίτητο να προσδιοριστεί και να χρησιμοποιηθεί ένας άλλος καταλληλότερος συντελεστής απορρόφησης. Με βάση την εργασία του Siegel (1976), στην οποία υπολογίζεται η απορρόφηση κατά την υγρή φάση, σύμφωνα με την θεωρία του Drude και λαμβάνοντας υπ' όψιν την κύρια επίδραση της ηλεκτρονιακής – φωνονιακής οπτικής αγωγιμότητας (electron-phonon dominated optical conductivity) για τον σίδηρο και για μήκος κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας 1060nm, προκύπτει η σχέση για το ποσοστό απορρόφησης συναρτήσει της θερμοκρασίας:

$$\eta = 0.0002485T - 0.07833 \quad (4.4)$$

Τελικά, το ποσοστό απορρόφησης που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο μοντέλο, για όλο το εύρος θερμοκρασιών, μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως:

$$\eta = \begin{cases} T \leq T_m \rightarrow 0.5866 \\ T_m < T < 3622 \rightarrow 0.0002485T - 0.07833 \\ T \geq 3622 \rightarrow 0.82 \end{cases} \quad (4.5)$$

4.1.2 ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

Όπως έχει προαναφερθεί, κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν, εκτός από τις θερμοκρασιακά εξαρτώμενες θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, και οι σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες της κλίνης πούδρας, καθώς επί τοις ουσίαις αυτή αποτελεί μείγμα στερεών κόκκων και αέριου μέσου. Η πυκνότητα, η θερμοχωρητικότητα και η ενθαλπία τήξης μπορούν να υπολογιστούν για θερμοκρασίες μικρότερες του σημείου τήξης ως συνάρτηση του πορώδους της κλίνης πούδρας, σύμφωνα με τον νόμο των μειγμάτων. Πιο συγκεκριμένα για το θερμοφυσικό μέγεθος \mathcal{F} η τιμή του στην κλίνη πούδρας υπολογίζεται ως:

$$\mathcal{F}_{PB} = (1 - \varphi) \mathcal{F}_s + \varphi \mathcal{F}_g \quad (4.6)$$

με \mathcal{F}_{PB} , \mathcal{F}_s , \mathcal{F}_g την τιμή του θερμοφυσικού μεγέθους στην κλίνη πούδρας, στη στερεά φάση της κλίνης πούδρας και στην αέρια φάση της κλίνης πούδρας, αντίστοιχα. Ο νόμος των μειγμάτων δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας της κλίνης πούδρας, η οποία προσδιορίζεται με χρήση πιο πολύπλοκων μοντέλων, τα οποία λαμβάνουν υπ' όψιν τη μεταφορά θερμότητας στον όγκο της κλίνης πούδρας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία μοντελοποίησης, προτείνεται η χρήση του μοντέλου των Zehner και Schlunder (Sih and Barlow, 2004). Πιο συγκεκριμένα η θερμική αγωγιμότητα της κλίνης πούδρας μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$k_{PB} = k_{ff} + k_{core} + k_{contact} \quad (4.7\alpha)$$

$$k_{ff} = k_g(1 - \sqrt{1 - \varphi}) \left(1 + \frac{\varphi k_R}{k_g}\right) \quad (4.7\beta)$$

$$k_{core} = k_g \sqrt{1 - \varphi} \left[(1 - \varphi) \left[\frac{2}{1 - \frac{B \cdot k_g}{k_s}} \left(\frac{B}{\left(1 - \frac{B \cdot k_g}{k_s}\right)^2} \left(1 - \frac{k_g}{k_s}\right) \ln \frac{k_g}{B \cdot k_s} - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{1 - \frac{B \cdot k_g}{k_s}} \right) + \frac{k_R}{k_g} \right] \right] \quad (4.7\gamma)$$

$$k_{contact} = \phi \frac{k_{sol.con}}{k_g} \quad (4.7\delta)$$

με k_{ff} τη συνεισφορά της ρευστής φάσης της πούδρας στη θερμική αγωγιμότητα, k_{core} τη συνεισφορά της στέρεης φάσης, $k_{contact}$ τη συνεισφορά της μετάδοσης θερμότητας μέσω επαφής, $k_{sol.con}$ τη μετάδοση θερμότητας μέσω επαφής, k_R τη θερμική αγωγιμότητα της κλίνης πούδρας λόγω ακτινοβολίας, και B τον συντελεστή παραμόρφωσης του σχήματος των κόκκων της πούδρας. Ο συντελεστής παραμόρφωσης B υπολογίζεται από την σχέση:

$$B \approx 1.25 \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right)^{\frac{10}{9}} \quad (4.8)$$

ενώ η θερμική αγωγιμότητα λόγω ακτινοβολίας από τη σχέση:

$$k_R = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot k_{SB} \cdot T^3 \cdot d_R}{1 - 0.132 \cdot \varepsilon_{T < T_m}} \quad (4.9)$$

με d_R το ενεργό μήκος ακτινοβολίας ανάμεσα στους κόκκους τις πούδρας, το οποίο θεωρείται ίσο με την μέση διάμετρο των κόκκων. Ο συντελεστής εκπομπής της κλίνης πούδρας για θερμοκρασίες μικρότερες του σημείου τήξης, ο οποίος χρησιμοποιείται επίσης και για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω ακτινοβολίας προσδιορίζεται ως:

$$\varepsilon_{T < T_m} = A_H \varepsilon_H + (1 - A_H) \varepsilon_S \quad (4.10)$$

με ε_H τον συντελεστή εκπομπής των «κενών» της κλίνης πούδρας (holes), ε_S τον συντελεστή εκπομπής της στερεάς φάσης της κλίνης πούδρας, και A_H το ποσοστό της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα «κενά». Ο συντελεστής εκπομπής των κενών και το ποσοστό τους υπολογίζονται ως:

$$\varepsilon_H = \frac{\varepsilon_S \left[2 + 3.082 \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right)^2 \right]}{\varepsilon_S \left[1 + 3.082 \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right)^2 \right] + 1} \quad (4.11)$$

$$A_H = \frac{0.908 \cdot \varphi^2}{1.908 \cdot \varphi^2 - 2 \cdot \varphi + 1} \quad (4.12)$$

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες της κλίνης πούδρας διαφέρουν από αυτές του συμπαγούς υλικού μόνο για θερμοκρασίες χαμηλότερες του σημείου τήξης, όπου υφίσταται άλλωστε και το πορώδες. Για θερμοκρασίες υψηλότερες του σημείου τήξης, το πορώδες ισούται πλέον με μηδέν, και θεωρούνται οι ιδιότητες του υλικού της στερεάς φάσης. Τέλος, και ο συντελεστής εκπομπής για θερμοκρασίες υψηλότερες του σημείου τήξης, ορίζεται διαφορετικός και ίσος με (Goett *et al.*, 2013):

$$\varepsilon_{T > T_m} = 0.28 \exp \left(\frac{-(T - T_m)}{55} \right) + 0.087 \quad (4.13)$$

Ο συντελεστής συναγωγής ανάμεσα στην κλίνη πούδρας και το περιβάλλον του θαλάμου κατασκευής υπολογίζεται με βάση τον αριθμό Nusselt, και πιο συγκεκριμένα ως:

$$h_{CONV}(T) = \frac{Nu(T) \cdot k(T)}{L} \quad (4.14^a)$$

$$\text{με } Nu(T) = 0.54 (Gr(T') \cdot Pr(T'))^{\frac{1}{4}} \quad (4.14^b)$$

$$\text{και } T' = \frac{T_{\infty} + T}{2} \quad (4.14^c)$$

με $Nu(T)$ και $Pr(T)$ τους αριθμούς Nusselt και Prandtl, αντίστοιχα.

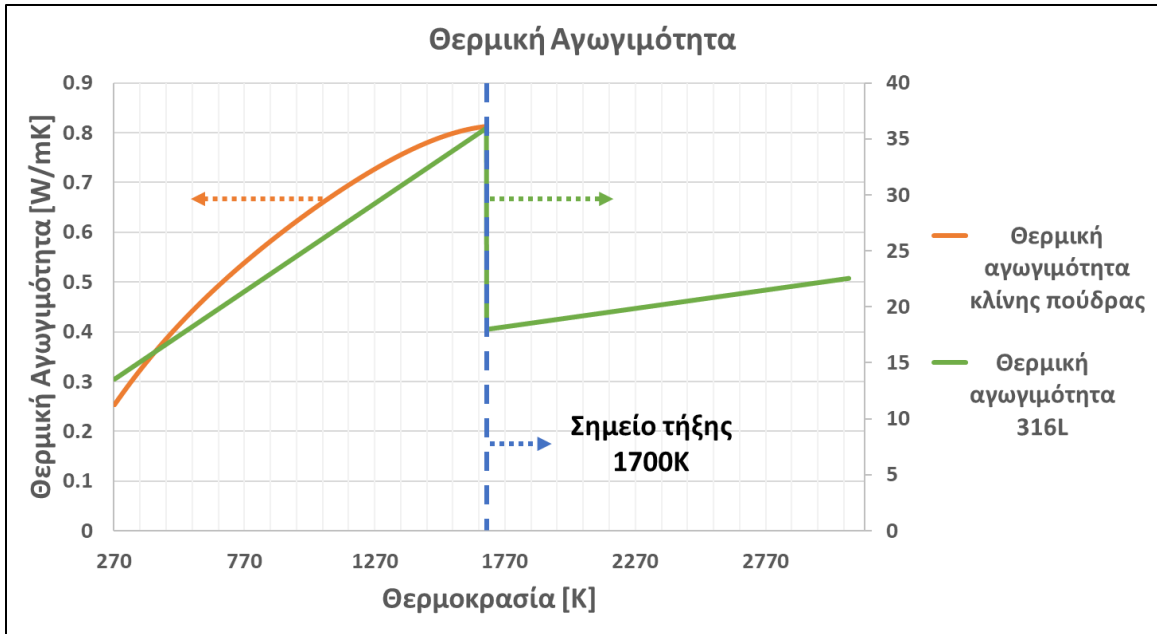
Τέλος, το ισοζύγιο ενέργειας ολοκληρώνεται συνυπολογίζοντας τις απώλειες ενθαλπίας, με χρήση των σχέσεων (3.19) και (3.20). Δεδομένου ότι μοντελοποιείται η κατεργασία για CM κατά την οποία δε σημειώνεται έντονη εξάτμιση υλικού, προς χάρην απλότητας και ελλείψει πιο συγκεκριμένων δεδομένων, ορίζεται ένας γενικός σταθερός συντελεστής επανασύνδεσης υλικού ίσος με 0.95.

Όπως έχει προαναφερθεί, η επικύρωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων θα γίνει με πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας, και πιο συγκεκριμένα με δεδομένα από τη μελέτη των Bertoli et al. (2017). Στη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιείται πούδρα ανοξειδωτού χάλυβα 316L, με μέση διάμετρο κόκκου 30.5μm, ενώ με δεδομένη την αναφορά σε εργαστηριακή διάταξη και μη ύπαρξη επιπλέον δεδομένων, το περιβάλλον του θαλάμου κατασκευής θεωρείται αέρας. Στον Πίνακα 4.1 Βασικές θερμοφυσικές ιδιότητες συνοψίζονται οι βασικές θερμοφυσικές ιδιότητες του ανοξειδωτού χάλυβα 316L και του αέρα, που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, σύμφωνα με δεδομένα της βιβλιογραφίας (Kim, 1975) και τις βιβλιοθήκες δεδομένων του λογισμικού FEM.

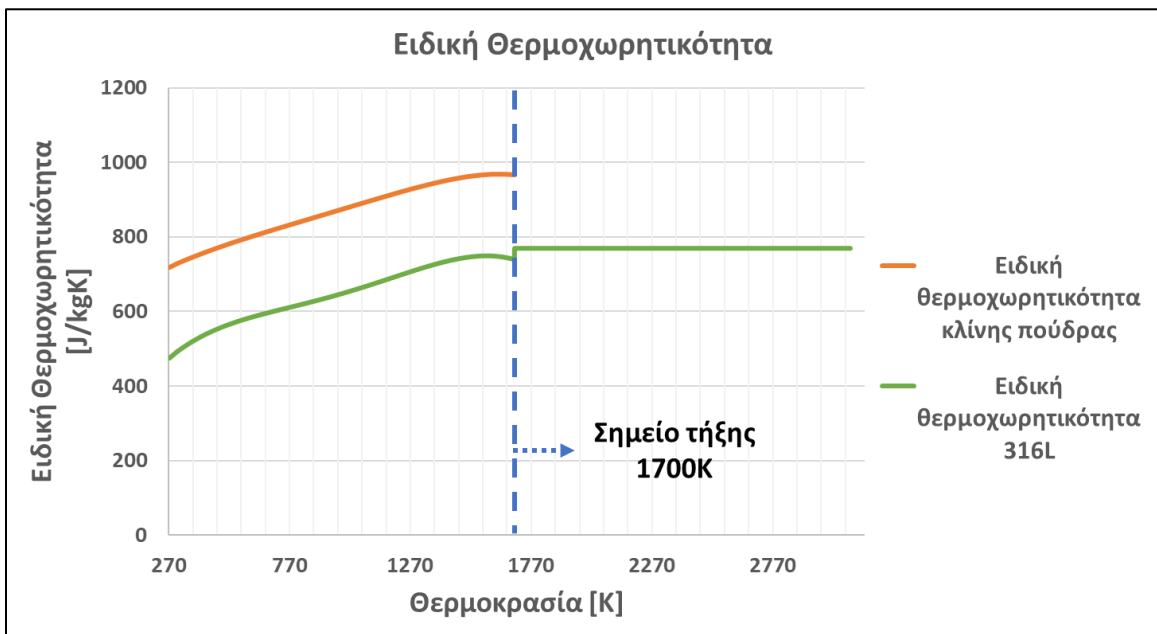
Πίνακας 4.1 Βασικές θερμοφυσικές ιδιότητες

Υλικό	Θερμοφυσικό Μέγεθος	Θερμοκρασιακό εύρος [K]	Έκφραση
316L SS	Πυκνότητα [kg/m ³]	4 – 114	$8042.496-0.01245121T+3.834401E-5T^2-7.363868E-6T^3$
		114 – 1700	$8058.746-0.1963973T-4.830884E-4T^2+4.114383E-7T^3-1.337946E-10T^4$
		1700 – 3090	$7432.27+3.938E-2T-1.8007E-4T^2$
	Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kgK]	140 – 300	$-75.583+5.006926T-0.01649475T^2+2.027486E-5T^3$
		300 – 1500	$235.6508+1.300842T-0.001890526T^2+1.348414E-6T^3-3.433794E-10T^4$
		1500 – 3090	770.37
	Θερμική αγωγιμότητα [W/mK]	273 – 1700	$9.248+1.571E-2T$
		1700 – 3090	$12.41+0.003279T$
	Θερμοκρασία τήξης [K]	1700	----
	Λανθάνουσα θερμότητα τήξης [kJ/kg]	1700	260
Θερμοκρασία βρασμού [K]	3090	----	
Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης [kJ/kg]	3090	6090	
Αέρας	Πυκνότητα [kg/m ³]	273 – 1700	$352.716T$
	Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kgK]	100 – 375	$1010.97+0.0439479T-2.922398E-4T^2+6.503467E-7T^3$
		375 – 1300	$1093.29-0.6355521T+0.001633992T^2-1.412935E-6T^3+5.59492E-10T^4-8.663072E-14T^5$
		1300 – 1700	$701.0807+0.8493867T-5.846487E-4T^2+2.302436E-7T^3-4.846758E-11T^4+4.23502E-15T^5$
Θερμική αγωγιμότητα [W/mK]	200 - 1200	$-0.0011+0.0001T-6E-8T^2+3E-11T^3-1E-14T^4+1E-18T^5$	

Στις Εικόνες 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα του συμπαγούς ανοξειδωτού χάλυβα 316L και της κλίνης πούδρας. Παρατηρείται η σημαντική διαφορά ανάμεσα στις αντίστοιχες τιμές (ειδικά στη θερμική αγωγιμότητα), και επιβεβαιώνεται η σημασία της ακριβούς μοντελοποίησης, η οποία λαμβάνει υπ' όψιν τις ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά του υλικού υπό τη μορφή πούδρας.



Εικόνα 4.4 Θερμική αγωγιμότητα κλίνης πούδρας και ανοξείδωτου χάλυβα 316L

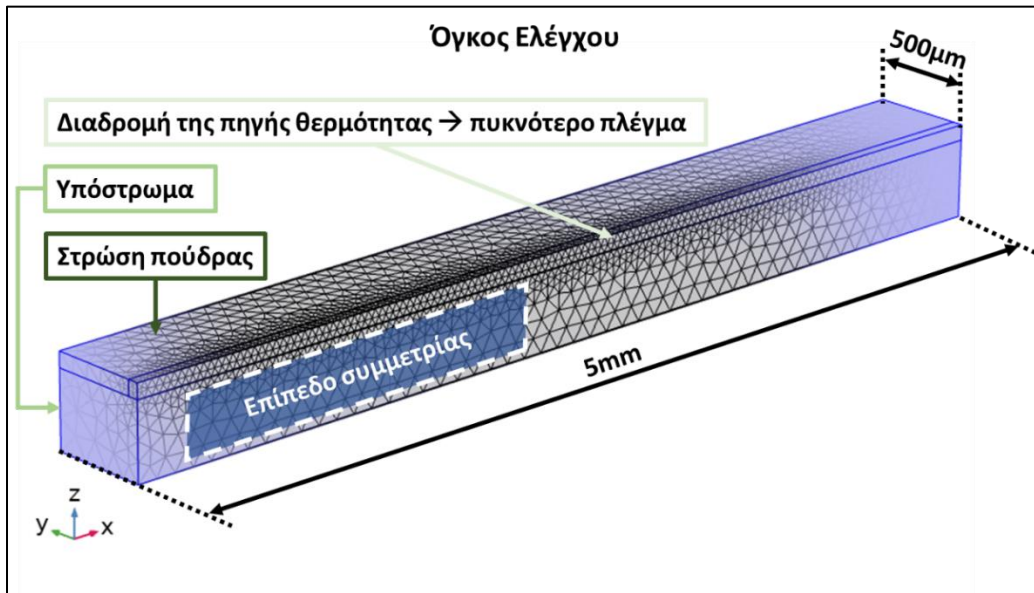


Εικόνα 4.5 Ειδική θερμοχωρητικότητα κλίνης πούδρας και ανοξείδωτου χάλυβα 316L

4.1.3 ΟΓΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Προς οικονομία υπολογιστικής ισχύος και χρόνου, χρησιμοποιήθηκε η συμμετρία ως προς το μέσο κάθετο επίπεδο (yz), και έτσι επιλύθηκε ο ήμισυς του πραγματικού προς μελέτη όγκου. Ο συνολικός όγκος ελέγχου αποτελείται από δύο κύριους υπο-όγκους, έναν για την κλίνη πούδρας και έναν για το υπόστρωμα, με κάθε έναν να έχει ξεχωριστές θερμοφυσικές ιδιότητες. Επίσης, στον υπο-όγκο της κλίνης πούδρας, ορίζεται ένας ακόμα υπο-όγκος κατά μήκος της διαδρομής της πηγής θερμότητας (δέσμης laser), στον οποίο εφαρμόζεται πυκνότερο πλέγμα, καθώς αναμένονται υψηλότερες κλίσεις θερμοκρασίας και πρακτικά είναι η περιοχή μέγιστου ενδιαφέροντος. Στις

επιφάνειες επαφής, των προαναφερθέντων υπο-όγκων ελέγχου, έχει οριστεί οριακή συνθήκη συνέχειας ενέργειας και θερμοκρασίας. Το μήκος και το πλάτος του όγκου ελέγχου ορίζονται στα 5mm και στα 500 μm , αντίστοιχα, ενώ το ύψος καθορίζεται ανά περίπτωση, ώστε τα όρια του όγκου ελέγχου να μην επηρεάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (ήτοι ο όγκος ελέγχου να είναι επαρκώς μεγάλος αλλά ταυτόχρονα να μην γίνεται σπατάλη υπολογιστικού χρόνου). Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για διαδρομή της δέσμης laser 300 μm , με το χρόνο όμως προσομοίωσης να είναι κατάλληλα αυξημένος (κατά 3ms), ώστε να μπορέσει να αναπτυχθεί πλήρως το θερμικό προφίλ. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε έμμεση μέθοδος επίλυσης BDF 2^{ης} τάξης, με επίπεδο αποδεκτού σχετικού σφάλματος 0.001. Στην Εικόνα 4.6 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του όγκου ελέγχου και η διακριτοποίησή του σε τετραεδρικά στοιχεία.



Εικόνα 4.6 Βασικά χαρακτηριστικά του όγκου ελέγχου και η διακριτοποίησή του

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Οι προσομοιώσεις έγιναν για τρεις διαφορετικές VED και τα αποτελέσματα επικυρώθηκαν ως προς τη μακροσκοπική μορφή και τα χαρακτηριστικά που έχουν τα στοιχειώδη ίχνη, το βάθος της περιοχής τήξης και το πλάτος της. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι των προσομοιώσεων (ονομαστική ισχύς δέσμης laser και ταχύτητα σάρωσης, και οι VED που προκύπτουν), μαζί με τα αντίστοιχα βάθη και πλάτη. Παρατηρείται σύγκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτών των προσομοιώσεων.

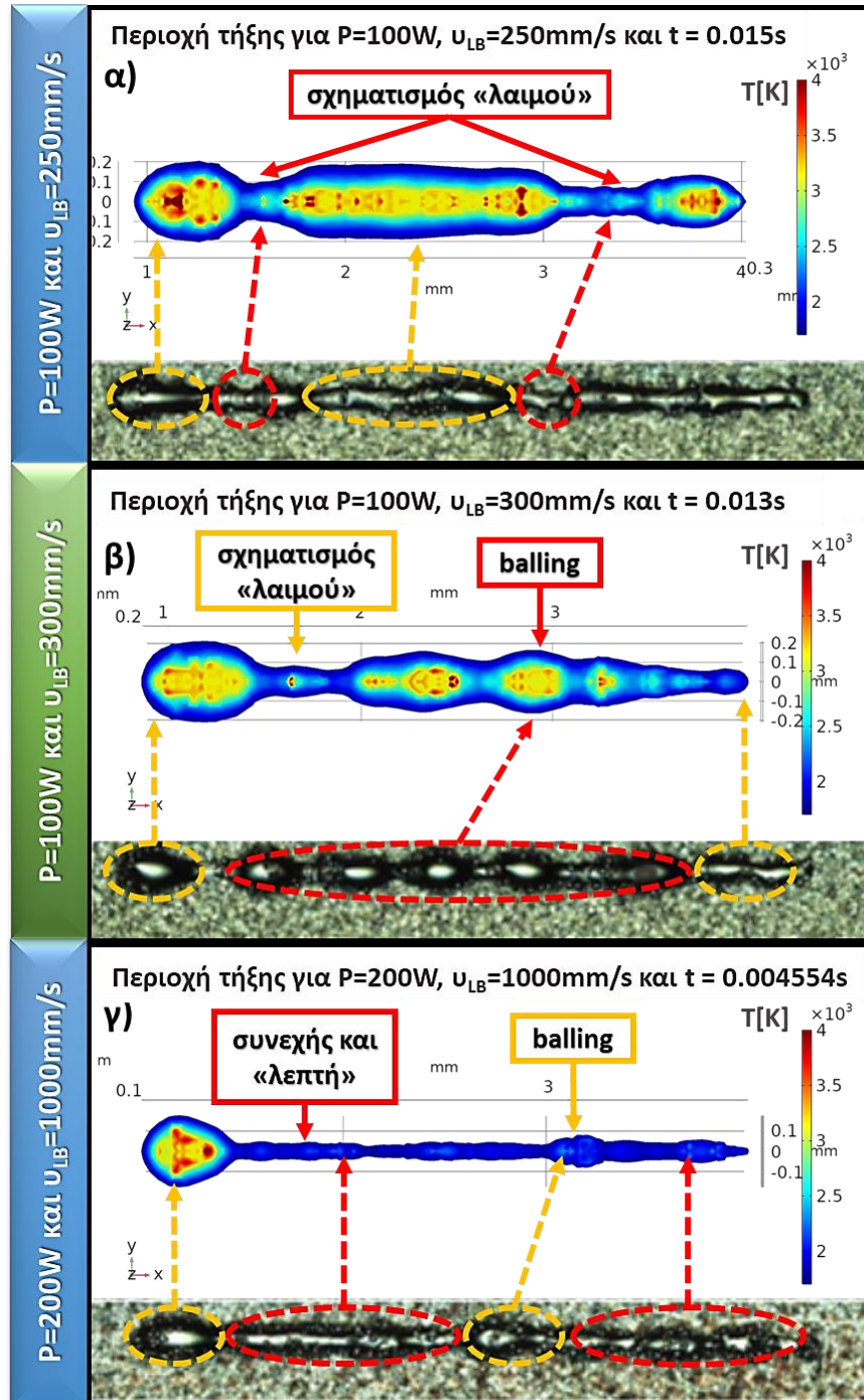
Πίνακας 4.2 Παράμετροι προσομοίωσης και αντίστοιχα αποτελέσματα πειραματικά και προσομοιώσεων

#	P[W]	U_{LB} [mm/s]	VED [J/mm ³]	Βάθος πειρ. [μm]	Βάθος προσομ. [μm]	Πλάτος πειρ. [μm]	Πλάτος προσομ. [μm]
1	100	250	97	75	73	214	216
2	100	300	81	52	50	224	219
3	200	1000	48	37	25	170	160

4.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΞΗΣ

Επισημαίνεται ότι με δεδομένη τη μη απόλυτη ομοιομορφία της περιοχής τήξης (ήτοι, το πλάτος και το βάθος της μεταβάλλονται κατά μήκος του στοιχειώδους ίχνους), τα αποτελέσματα, τόσο τα πειραματικά όσο και των προσομοιώσεων, είναι ορθότερο να εκτιμώνται αρχικά ποιοτικά, και στη συνέχεια ως απόλυτες τιμές, ενώ

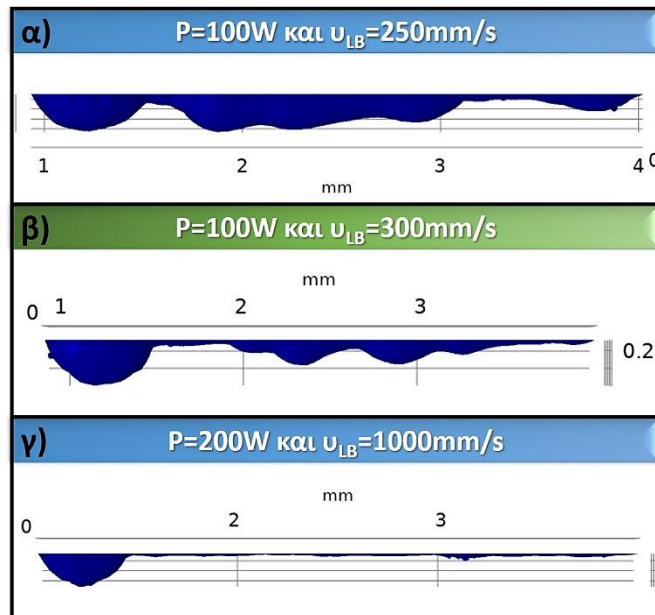
αναμένεται κάποιου βαθμού μικρή απόκλιση. Επίσης, αναφέρεται ότι το πλάτος της περιοχής τήξης υπολογίστηκε εκ νέου, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα που περιλαμβάνονται στην εν λόγω εργασία των Bertoli et al. (2017), με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού ψηφιοποίησης εικόνων. Στην Εικόνα 4.7 γίνεται παράθεση πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, ως προς τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης, για τις διαφορετικές VED.



Εικόνα 4.7 Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης για τις διαφορετικές VED. Παράθεση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

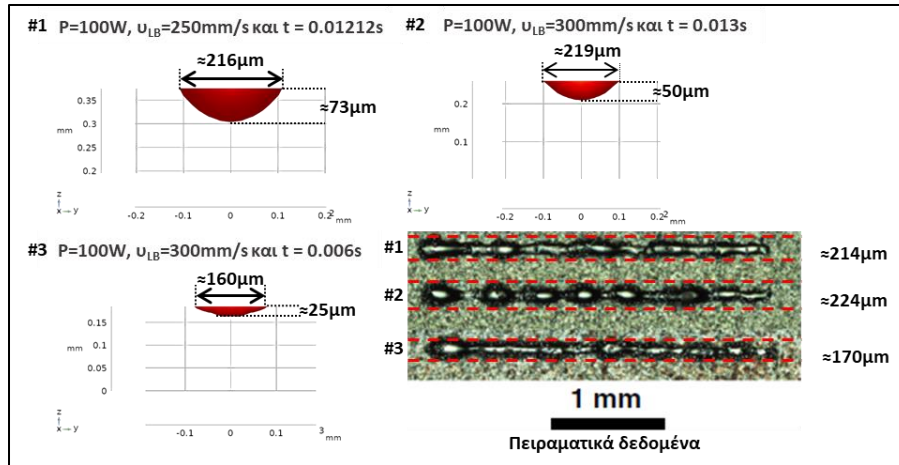
Όπως έχει προαναφερθεί, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης είναι εξαιρετικά σημαντικά καθώς σχετίζονται άμεσα με την ποιότητα της κατεργασίας, ενώ εξαρτώνται άμεσα από τις παραμέτρους αυτής, και κυρίως από την ονομαστική ισχύ της δέσμης laser και την ταχύτητα σάρωσης. Η VED, ως δευτερογενές μέγεθος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση και συσχέτιση των χαρακτηριστικών που αποκτά η περιοχή τήξης με τις παραμέτρους της κατεργασίας. Στόχος είναι η πλήρης τήξη του στρώματος πούδρας και ο σχηματισμός μιας ομοιόμορφης περιοχής τήξης. Καθώς όμως μειώνεται η VED, η περιοχή τήξης τείνει προς την ανομοιομορφία, με το σχηματισμό «λαιμού» και balling. Σταδιακά, η περιοχή τήξης χάνει τη σφαιρικότητά της και γίνεται επιμήκης, με αποτέλεσμα, όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη αστάθειας Plateau-Rayleigh, η περιοχή τήξης να «σπάει» σε μικρές σταγόνες και να εμφανίζεται το φαινόμενο του balling (Cherry *et al.*, 2015; Scipioni Bertoli *et al.*, 2017). Ένας μακροσκοπικός τρόπος εκτίμησης του φαινομένου είναι η αναλογία του μήκους προς το πλάτος της περιοχής τήξης (Meier *et al.*, 2018; Mirkoohi *et al.*, 2018). Από την παράθεση των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών των προσομοιώσεων (Εικόνα 4.7) συμπεραίνεται ότι, μέσω της συγκεκριμένης μεθοδολογίας μοντελοποίησης, δύναται να προβλεφθούν με ακρίβεια το σχήμα και τα χαρακτηριστικά που αποκτά η περιοχή τήξης σε CM, για σημαντικό εύρος διαφορετικών VED.

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.7α, η συνολική περιοχή τήξης για την υψηλότερη VED ($P=100W$, $u_{LB}=250mm/s$, και $VED 97J/mm^3$) είναι σχετικά ομοιόμορφη, ενώ εμφανίζεται ο χαρακτηριστικός και αναμενόμενος σχηματισμός, στην αρχή της διαδρομής. Το κεντρικό τμήμα της περιοχής τήξης είναι ομοιόμορφου πλάτους, ενώ, όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.8α, και το βάθος είναι σχετικά ομοιόμορφο, με μικρές αυξομειώσεις. Εκατέρωθεν του κεντρικού τμήματος σχηματίζονται περιοχές «λαιμού», με σημαντικά μικρότερο πλάτος και βάθος. Τα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνουν την ύπαρξη των προαναφερθεισών περιοχών στην περιοχή τήξης. Καθώς η VED μειώνεται ($P=100W$, $u_{LB}=300mm/s$, και $VED 81J/mm^3$), σε συμφωνία με τη θεωρία και τη βιβλιογραφία, η περιοχή τήξης τείνει προς την ανομοιομορφία, ενώ σχηματίζονται και περιοχές balling. Συγκεκριμένα, στην αρχή της διαδρομής, εμφανίζεται πάλι η χαρακτηριστική



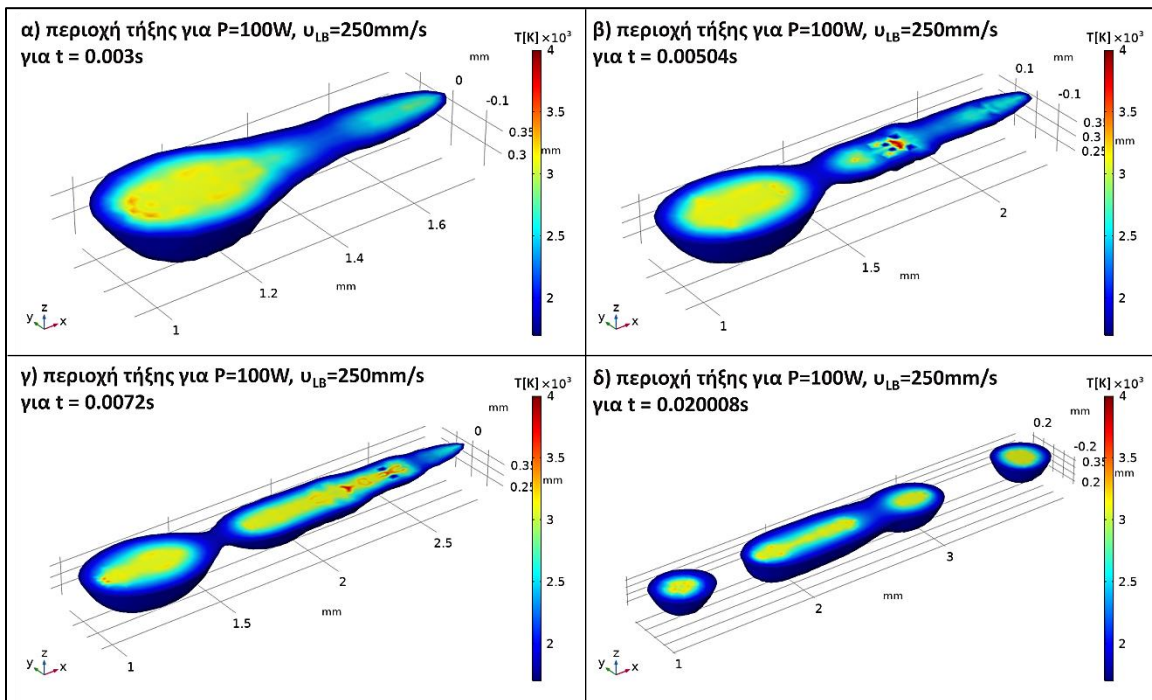
Εικόνα 4.8 Βάθος της περιοχής τήξης όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις

σφαιρική ογκώδης δομή, στη συνέχεια υπάρχει ο σχηματισμός λαιμού, ο οποίος ακολουθείται από μια περιοχή με έντονο το φαινόμενο του balling. Το βάθος της περιοχής τήξης (Εικόνα 4.8β) είναι και αυτό σημαντικά ανομοιόμορφο, καθώς μακροσκοπικά έχει τη χαρακτηριστική μορφή σταγόνων, που εμφανίζονται στο balling. Για τη χαμηλότερη VED ($P=200W$, $u_{LB}=100mm/s$, και $VED 48J/mm^3$) παρατηρείται μια σχετικά ομοιόμορφη περιοχή τήξης (μετά την σφαιρική δομή στην αρχή της διαδρομής), εξαιρετικά όμως μικρού πλάτους και βάθους. Παρότι, λοιπόν, σχετικά ομοιόμορφη, το μικρό βάθος και πλάτος, δύναται να συνεπάγονται την ελλiptή σύνδεση της κάθε στρώσης με τις προηγούμενες και άρα την ανάπτυξη πορώδους ή περιοχών ελαττωμάτων. Στην Εικόνα 4.9 παρουσιάζονται ποσοτικοποιημένα τα προαναφερθέντα μακροσκοπικά ποιοτικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης, με βάση τόσο τα πειραματικά αποτελέσματα όσο και αυτά των προσομοιώσεων, ενώ παρατηρείται επίσης η σταδιακή μετάβαση από ελλειπτικό προφίλ της περιοχής τήξης για χαμηλός VED σε πιο σφαιρικό, καθώς η κατεργασία τείνει από CM προς το TM.

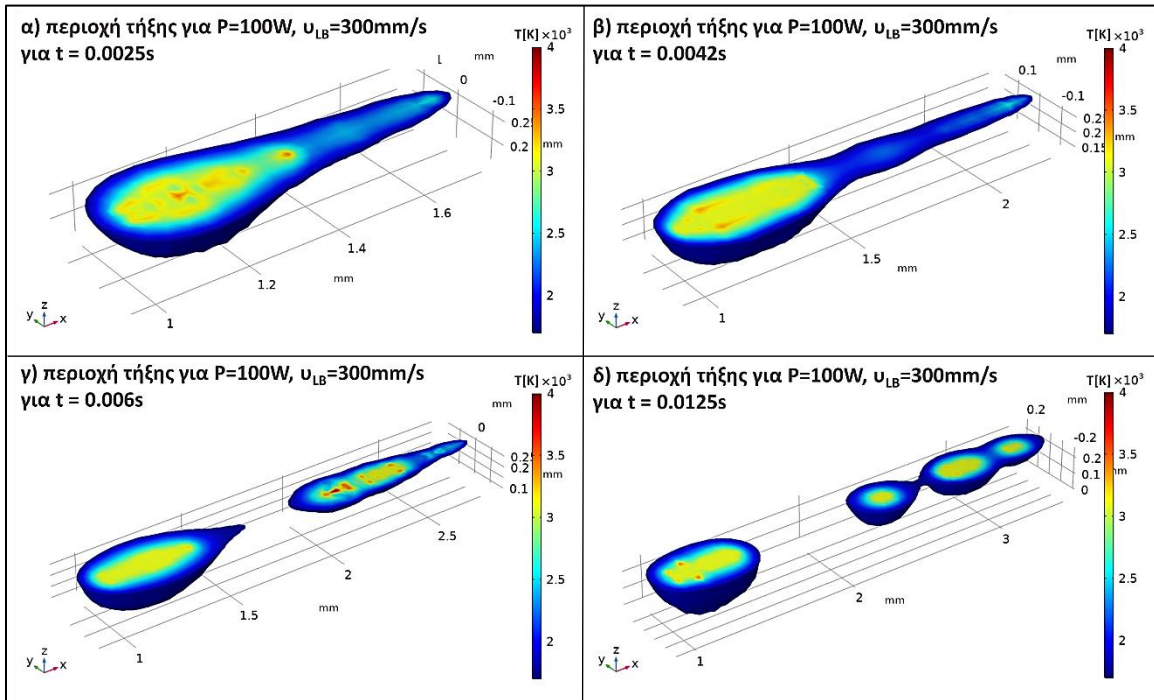


Εικόνα 4.9 Πλάτος και βάθος της περιοχής τήξης

Στις Εικόνες 4.10 – 4.13 παρατίθενται στιγμιότυπα της περιοχής τήξης κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, ως αντιπροσωπευτικά του πως αυτή εξελίσσεται για τις διαφορετικές VED. Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα για $P=100W$ και $u_{LB}=250mm/s$. Για $t=0.003s$ (Εικόνα 4.10α) παρατηρείται ο σχηματισμός της χαρακτηριστικής σφαιρικής δομής, στην αρχή της διαδρομής της δέσμης laser, ενώ στις Εικόνες 4.10β και 4.10γ αποτυπώνεται το πώς σχηματίζεται η κεντρική ομοιόμορφη περιοχή. Για $t=0.020008s$ (Εικόνα 4.10δ), όταν η δέσμη laser πλέον έχει ολοκληρώσει τη διαδρομή της και δεν επιδρά στον όγκο ελέγχου, παρατηρείται ότι υπάρχουν περιοχές που παραμένουν σε θερμοκρασίες υψηλότερες του σημείου τήξης, με άλλες να έχουν ήδη στερεοποιηθεί. Η πληροφορία αναφορικά με την ταχύτητα της πλήρους στερεοποίησης της περιοχής τήξης είναι εξαιρετικά χρήσιμη, καθώς σχετίζεται άμεσα με τα χρονικά διαστήματα που πρέπει να μεσολαβούν ανάμεσα σε διαδοχικές φάσεις της κατεργασίας (π.χ. εναπόθεση νέας στρώσης πούδρας).

Εικόνα 4.10 Εξέλιξη της περιοχής τήξης για $P=100W$ και $u_{LB}=250mm/s$

Στην Εικόνα 4.11 παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα για $P=100W$ και $u_{LB}=300mm/s$. Για $t=0.0025s$ (Εικόνα 4.10α) παρατηρείται και πάλι ο σχηματισμός της χαρακτηριστικής σφαιρικής δομής, στην αρχή της διαδρομής της δέσμης laser, ενώ στις Εικόνες 4.11β και 4.11γ φαίνεται ο σχηματισμός και η εξέλιξη της κεντρικής περιοχής, με τα έντονα χαρακτηριστικά balling. Σε αντίθεση με την περιοχή τήξης για $P=100W$ και $u_{LB}=250mm/s$, λόγω τις χαμηλότερης VED για τις συγκεκριμένες συνθήκες, λαμβάνει χώρα ταχύτερη στερεοποίηση του υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται και να διατηρούνται ανεξάρτητες «νησίδες» από τηγμένο υλικό. Αυτό αποτυπώνεται ακόμα πιο χαρακτηριστικά στην Εικόνα 4.11δ, για $t=0.0125s$ και όταν έχει πλέον πάψει η επίδραση της δέσμης laser, με την περιοχή τήξης να μπορεί πλέον να περιγραφεί ως ένα άθροισμα από ανεξάρτητες (ή σχεδόν ανεξάρτητες) σφαιροειδείς περιοχές εναπομένοντος τηγμένου υλικού, που επί της ουσίας αποτελεί και τον ορισμό του balling.

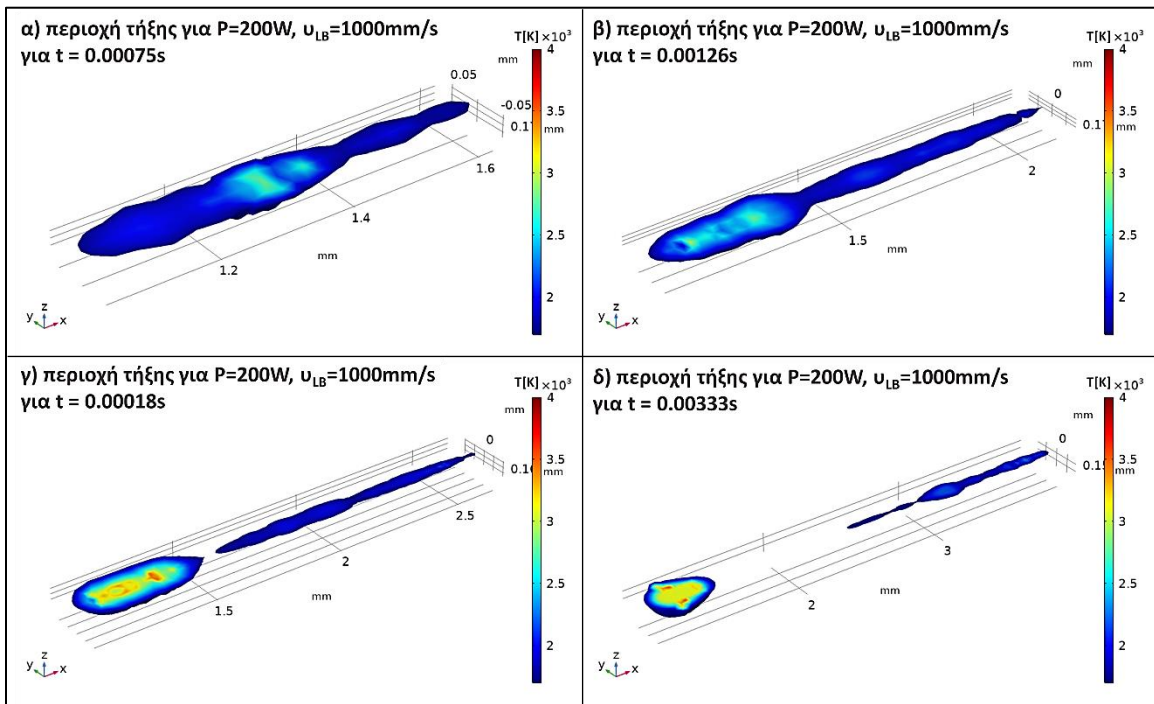


Εικόνα 4.11 Εξέλιξη της περιοχής τήξης για $P=100W$ και $u_{LB}=300mm/s$

Τέλος, στην Εικόνα 4.12, παρατίθενται τα αντίστοιχα στιγμιότυπα για την χαμηλότερη VED και για συνθήκες κατεργασίας $P=200W$ και $u_{LB}=1000mm/s$. Παρατηρείται ότι αρχικά, για $t=0.0075s$ (Εικόνα 4.12α), μοιάζει η περιοχή τήξης στην αρχή της διαδρομής να είναι πιο ομοιόμορφη σε σχέση με την αντίστοιχη για υψηλότερες VED. Σταδιακά, όμως, σχηματίζεται και για τις συγκεκριμένες συνθήκες η χαρακτηριστική δομή, η οποία μάλιστα είναι και εξαιρετικά ευδιάκριτη, με σημαντικά διαφορετικό πλάτος και βάθος από την υπόλοιπη περιοχή τήξης. Το «κύριο» τμήμα της περιοχής τήξης, όπως έχει αναφερθεί, είναι ομοιόμορφο αλλά μικρού πλάτους και βάθους (Εικόνα 4.12β και 4.12γ), με αποτέλεσμα την πιθανότητα ελλιπούς σύνδεσης κάθε νέας στρώσης με τις προηγούμενες. Αξιοσημείωτο, τέλος, είναι ότι για $t=0.00333s$ (ήτοι την χρονική στιγμή που η δέσμη laser ολοκληρώνει την διαδρομή της), ήδη ένα σημαντικό μέρος της περιοχής τήξης έχει επαναστερεοποιηθεί, με το μόνο σημείο που παραμένει σημαντική ποσότητα τήγματος να φαίνεται πως είναι η περιοχή αστάθειας στην αρχή της διαδρομής.

Συμπερασματικά, από την αξιολόγηση τόσο μακροσκοπικά της μορφής και των χαρακτηριστικών που αποκτά η περιοχή τήγματος για διαφορετικές VED, όσο και της εξέλιξής της, συναρτήσει του χρόνου, μπορεί να ειπωθεί ότι, επιλέγοντας κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας (ονομαστική ισχύ δέσμης laser και ταχύτητα σάρωσης), μπορεί να

δημιουργηθεί και να διατηρηθεί ομοιόμορφη και σταθερή περιοχή τήξης, άνευ έντονων φαινομένων αστάθειας και balling. Επίσης, με χρήση ελαφρώς χαμηλότερης ισχύος ή/και ταχύτητας κατά την έναρξη της κατεργασίας (στην αρχή, δηλαδή, της κάθε διαδρομής της δέσμης laser) είναι πιθανό να μπορεί να αποφευχθεί η δημιουργία της κοινής αυτής χαρακτηριστικής δομής που παρατηρήθηκε για όλες τις VED. Τέλος, με κατάλληλη επιλογή VED, η περιοχή τήξης μπορεί και πρέπει να έχει το απαραίτητο πλάτος και βάθος ώστε να εξασφαλιστεί η επαρκής σύνδεση της κάθε στρώσης με τις προηγούμενες. Όλα τα προαναφερθέντα, μπορούν να εκτιμηθούν (τουλάχιστον σε επίπεδο αρχικής μελέτης) σε σημαντικό βαθμό μέσω της προτεινόμενης μεθόδου μοντελοποίησης.

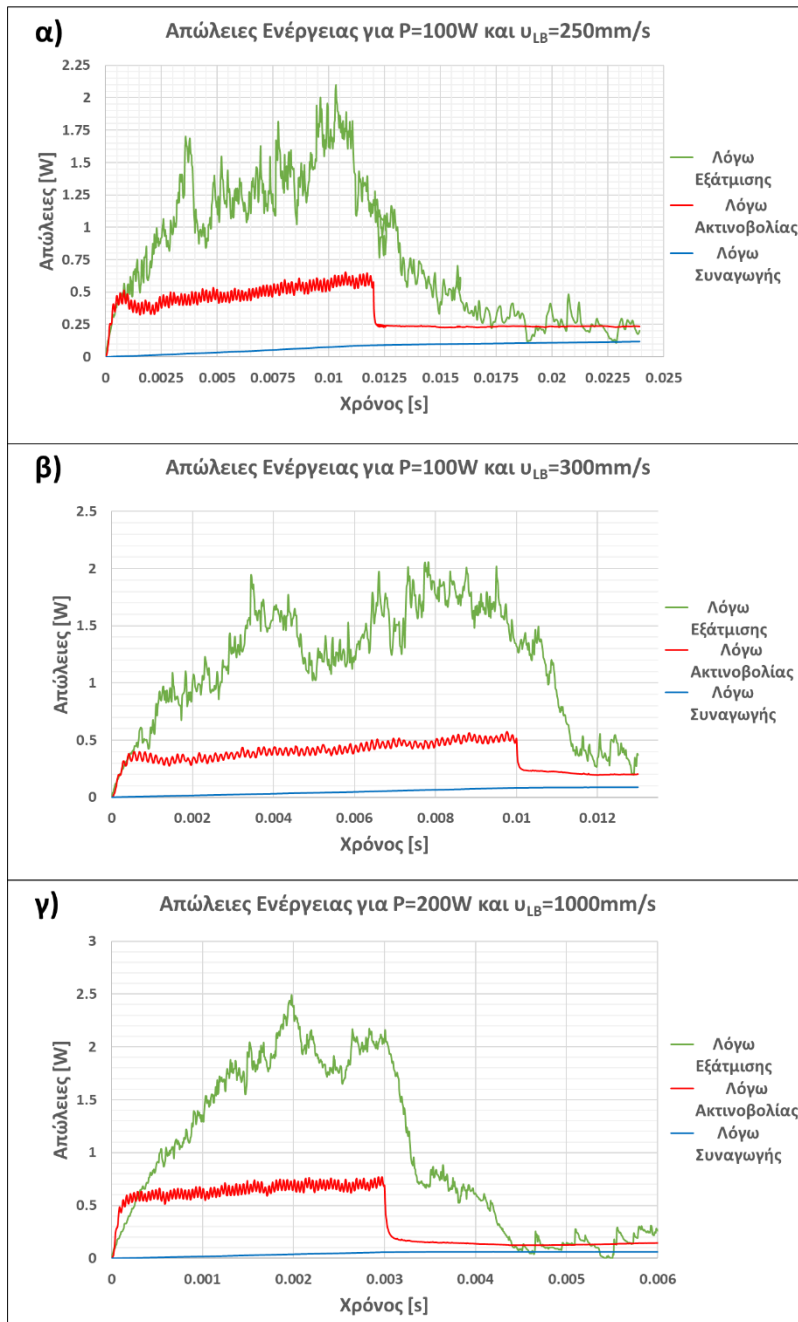


Εικόνα 4.12 Εξέλιξη της περιοχής τήξης για $P=200W$ και $u_{LB}=1000mm/s$

4.2.2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΣ ΨΥΞΗΣ

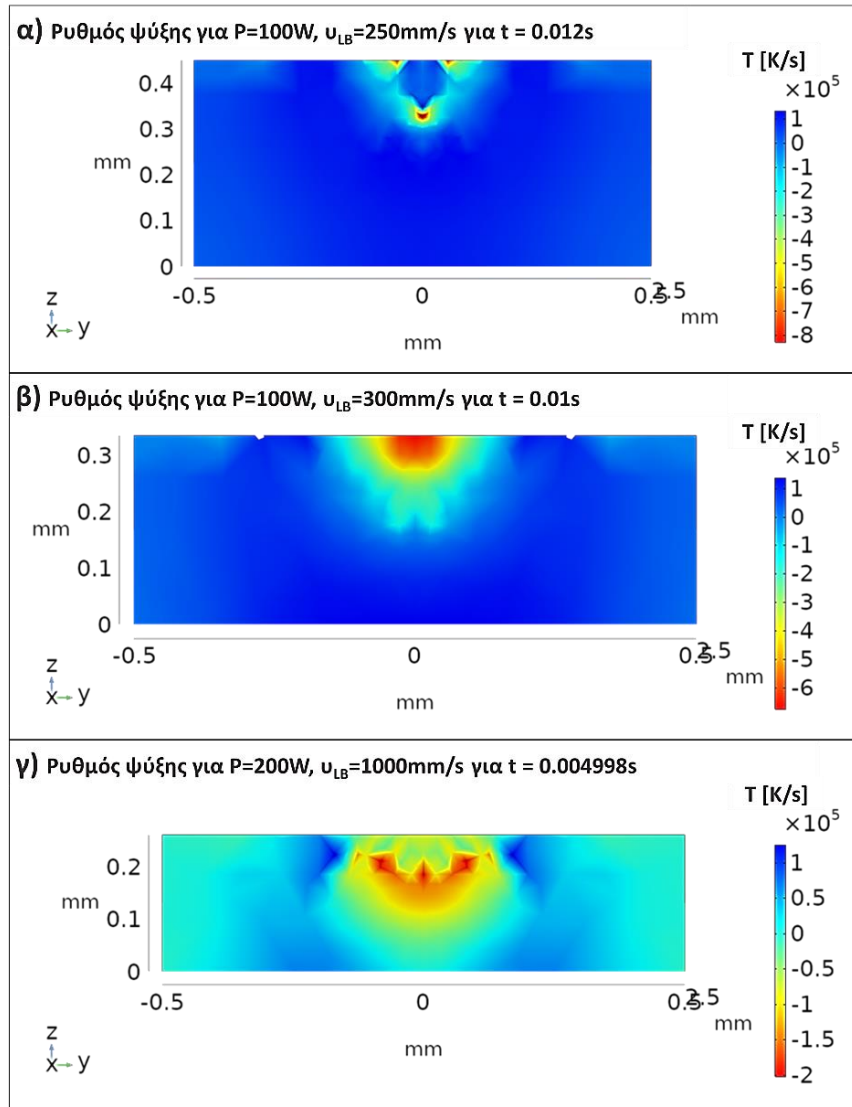
Ολοκληρώνοντας, στην επιφάνεια που αυτές ορίζονται, τις εξισώσεις υπολογισμού των απωλειών ενέργειας, λόγω εξάτμισης, ακτινοβολίας και συναγωγής, μπορούν να εκτιμηθούν και να ποσοτικοποιηθούν τα αντίστοιχα μεγέθη, ώστε να γίνει μια αξιολόγηση της σημασίας τους. Στην Εικόνα 4.13 παρατίθενται οι υπολογισμένες απώλειες λόγω εξάτμισης, ακτινοβολίας και συναγωγής για τις διαφορετικές VED. Αρχικά, συμπεραίνεται ότι για όλες τις VED οι απώλειες λόγω εξάτμισης είναι οι σημαντικότερες, ακολουθούν οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας, με τις απώλειες λόγω συναγωγής να είναι οι μικρότερες. Παρατηρείται ότι, για 100W ονομαστική ισχύ δέσμης laser, οι απώλειες λόγω εξάτμισης είναι $\leq 2W$ (2% της ονομαστικής ισχύος), ενώ για ονομαστική ισχύ δέσμης laser 200W αυξάνονται ελαφρώς και είναι $\leq 2.5W$ (1.25% της ονομαστικής ισχύος). Πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση των συγκεκριμένων απωλειών εμπεριέχει τον μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας καθώς, όπως έχει αναφερθεί, εξαρτώνται άμεσα από τον συντελεστή επανασύνδεσης υλικού. Παρότι η τιμή που υιοθετήθηκε ($\beta_R=0.95$) είναι απόλυτα λογική και συνεπής με τη βιβλιογραφία, η πιθανότητα μια μικρής υπερ/υπο-τίμησης δε μπορεί να αποκλειστεί, με την τάξη όμως μεγέθους και τα ποιοτικά αποτελέσματα να κρίνονται ασφαλή. Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι ανεξάρτητες από τις παραμέτρους κατεργασίας και παραμένουν σχεδόν σταθερές συναρτήσει του χρόνου ($\approx 0.5W$). Η εξάρτησή τους από τη διαφορά της τέταρτης δύναμης των θερμοκρασιών της επιφάνειας της κλίνης πούδρας και του περιβάλλοντος αιτιολογεί την απότομη μείωση, μόλις παύει να επιδρά η δέσμη laser. Τέλος, οι απώλειες λόγω

συναγωγής είναι εξαιρετικά χαμηλές ($0.1W \leq q_{conv} \leq 0.2W$) και παρατηρείται ότι αυξάνονται συναρτήσει του χρόνου επίδρασής της πηγής, ήτοι του χρόνου αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της κλίνης πούδρας. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη γραμμική εξάρτησή τους από την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια της κλίνης πούδρας και το περιβάλλον. Ως βασικό συμπέρασμα μπορεί να διατυπωθεί ότι η μοντελοποίηση και συμπερίληψη των απωλειών λόγω εξάτμισης και ακτινοβολίας είναι εξαιρετικά σημαντική, ειδικά με δεδομένο ότι λαμβάνουν χώρα εστιασμένα σε περιοχές όπου επικρατούν ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, ενώ η μοντελοποίηση των απωλειών λόγω συναγωγής καθίστανται πιο καιρίες και ανάλογες των υπολοίπων, κατά την ψύξη του συστήματος και «επιστροφής» του στις αρχικές συνθήκες.



Εικόνα 4.13 Απώλειες ενέργειας λόγω εξάτμισης, ακτινοβολίας και συναγωγής

Τέλος, στην Εικόνα 4.14, παρατίθενται οι ρυθμοί ψύξης για τις διαφορετικές VED στο μέσο επίπεδο της διαδρομής, και κατά τη χρονική στιγμή που η δέσμη laser παύει να επιδρά. Αρχικά, ο εκτιμώμενος μέγιστος ρυθμός ψύξης, για όλες τις διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας, είναι της τάξης των 10^5 K/s, αποτέλεσμα σύμφωνο με τη βιβλιογραφία (Srivatsan and Sudarshan, 2016), με τους ρυθμούς ψύξης εκατέρωθεν της περιοχής τήξης και στον υπόλοιπο όγκο ελέγχου να είναι τάξεις μεγέθους χαμηλότεροι. Ταυτόχρονα, οι σημαντικά διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες της κλίνης πούδρας σε σχέση με αυτές του συμπαγούς υλικού, καθώς επίσης και η θερμοκρασιακή τους εξάρτηση, οδηγούν στο σχηματισμό ευδιάκριτων περιοχών και μοτίβων. Η στρώση της πούδρας διαχωρίζεται ευκρινώς από το υλικό του υποστρώματος, όπως επίσης και οι περιοχές υψηλής θερμοκρασίας. Η εκτίμηση του ρυθμού ψύξης είναι εξαιρετικά χρήσιμη και σημαντική, καθώς μπορεί να εξηγήσει και να προβλέψει την ανάπτυξη παραμενουσών θερμικών τάσεων, και οι οποίες, υπό συνθήκες, δύναται να οδηγήσουν σε κατασκευαστικά ελαττώματα, όπως παραμορφώσεις ή ακόμα και ανάπτυξης και εξέλιξης ρωγμών. Στην πραγματικότητα, μάλιστα, η ομοιομορφία του ρυθμού ψύξης είναι σημαντικότερη ακόμα και από τον ίδιο τον ρυθμό ψύξης, καθώς αυτή καθορίζει τις κλίσεις θερμοκρασίας που τελικά αναπτύσσονται και κατ' επέκταση τις παραμένουσες θερμικές τάσεις, με ό,τι αυτές συνεπάγονται για την ποιότητα κατασκευής.



Εικόνα 4.14 Ρυθμοί ψύξης για τις διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας

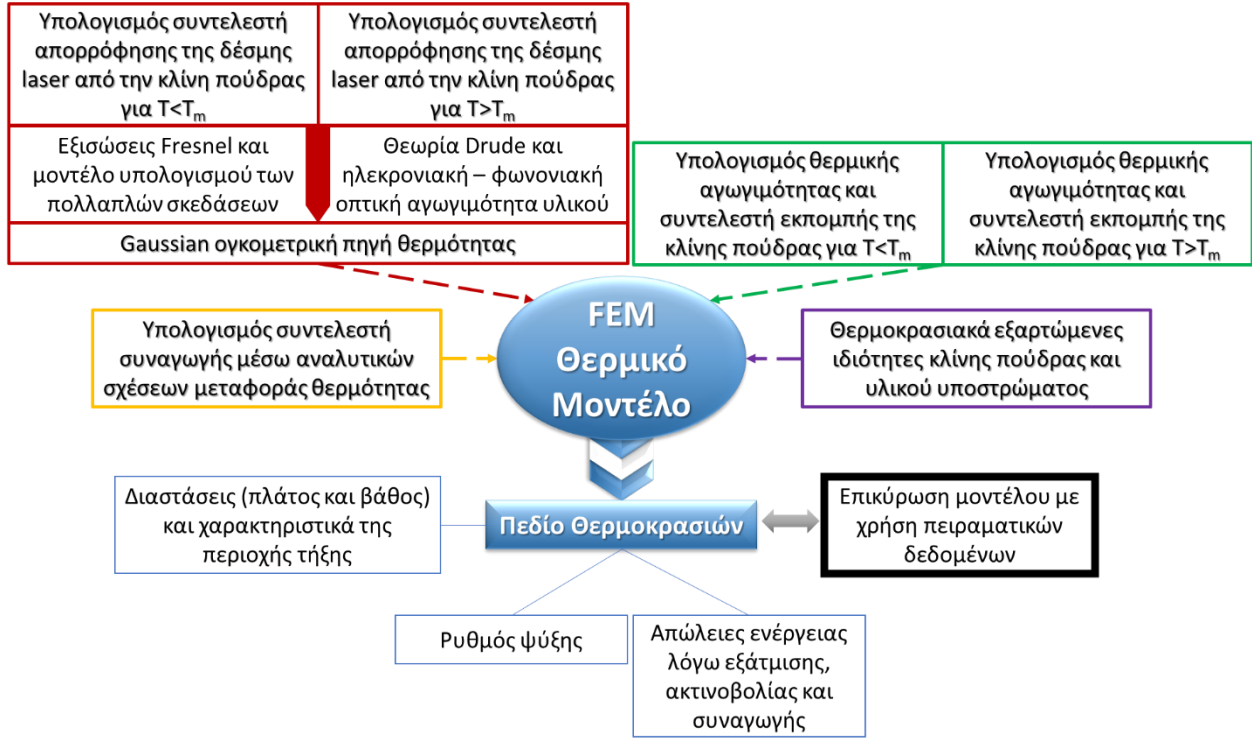
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο και την παρουσίαση της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης του CM, γίνεται μια ανακεφαλαίωση των βασικότερων σημείων και συμπερασμάτων. Για τη μοντελοποίηση του CM χρησιμοποιήθηκε ένα αμιγώς θερμικό μοντέλο στο οποίο η δέσμη laser προσεγγίστηκε ως μια ογκομετρική πηγή θερμότητας, Gaussian κατανομής (ως προς το επίπεδο της κλίνης πούδρας και συναρτήσει του πάχους της κλίνης πούδρας). Για τον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης, για θερμοκρασίες μικρότερες του σημείου τήξης επιλύεται η αρμονική στο χρόνο κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και συνδυάζεται με χρήση μοντέλου εντοπισμού ακτίνων, ώστε να συνυπολογιστούν οι πολλαπλές σκεδάσεις της δέσμης στους κόκκους της πούδρας. Για θερμοκρασίες υψηλότερες του σημείου τήξης, ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης γίνεται σύμφωνα με την θεωρία του Drude και λαμβάνοντας υπ' όψιν την κύρια επίδραση της ηλεκτρονιακής – φωνονιακής οπτικής αγωγιμότητας του υλικού. Οι θερμοκρασιακά εξαρτώμενες θερμοφυσικές ιδιότητες της κλίνης πούδρας υπολογίζονται με βάση τον νόμο των μιγμάτων, με τη θερμική αγωγιμότητα να προκύπτει από το μοντέλο των Zehner και Schlunder. Ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται σύμφωνα με τον αριθμό Nusselt, ενώ, τέλος, στο ισοζύγιο ενέργειας, συνυπολογίζονται οι απώλειες θερμότητας λόγω εξάτμισης του υλικού. Η επικύρωση του μοντέλου έγινε μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, αναφορικά με τα χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις (πλάτος και βάθος) που έχει η περιοχή τήξης για διαφορετικές VED. Τέλος, εκτιμήθηκαν οι απώλειες λόγω εξάτμισης, ακτινοβολίας και συναγωγής, όπως επίσης και οι ρυθμοί ψύξης που εμφανίζονται στην περιοχή τήξης. Τα προαναφερθέντα βασικά στοιχεία της μεθόδου παρουσιάζονται διαγραμματικά στην Εικόνα 4.15.

Εν κατακλείδι, κρίνεται ενδεδειγμένη η συγκεκριμένη μέθοδος μοντελοποίησης για το CM, ενώ τα βασικά συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- με τη χρήση αμιγώς θερμικού μοντέλου και ογκομετρικής πηγής θερμότητας Gaussian κατανομής δύναται να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια το CM της περιοχής τήξης, προβλέποντας τα χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις (πλάτος και βάθος) που αυτή αποκτά για διαφορετικές VED
- το μοντέλο προβλέπει και προσομοιώνει την περιοχή αστάθειας που δημιουργείται στην αρχή της διαδρομής της δέσμης laser, όπως επίσης και τις περιοχές σχηματισμού «λαιμού»
- το μοντέλο, αν και δε συμπεριλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής και ως εκ τούτου περιορίζονται σημαντικά οι βαθμοί ελευθερίας και οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο, μπορεί να προβλέψει τον σχηματισμό balling για συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας
- υποθέτοντας έναν τυπικό χαμηλό συντελεστή επανασύνδεσης υλικού 0.95 προκύπτει από τον υπολογισμό των απωλειών ότι οι σημαντικότερες απώλειες αφορούν την απομάκρυνση ενέργειας λόγω εξάτμισης υλικού, οι αμέσως λιγότερες απώλειες είναι λόγω ακτινοβολίας, ενώ οι απώλειες λόγω συναγωγής είναι οι μικρότερες. Επιβεβαιώνεται λοιπόν η σημασία της λεπτομερούς και ρεαλιστικής μοντελοποίησης και συμπερίληψης των απωλειών λόγω εξάτμισης.
- οι ρυθμοί ψύξης στην περιοχή τήξης είναι της τάξης των 10^5K/s . Ταυτόχρονα, οι υψηλές κλίσεις θερμοκρασίας, σε συνδυασμό με τις θερμοκρασιακά εξαρτώμενες θερμοφυσικές ιδιότητες της κλίνης πούδρας και του υποστρώματος, οδηγούν σε ένα εξαιρετικά ανομοιόμορφο προφίλ ρυθμού ψύξης, το οποίο με την σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε ανάπτυξη παραμενουσών θερμικών τάσεων.

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η μοντελοποίηση του CM, ενώ στη συνέχεια της διατριβής θα παρουσιαστεί κατάλληλη προσαρμογή και «επέκταση» της συγκεκριμένης μεθόδου για τη μοντελοποίηση τόσο του CM όσο και του TM και KM με χρήση αμιγώς θερμικού μοντέλου.



Εικόνα 4.15 Βασικά βήματα και στοιχεία της μεθόδου μοντελοποίησης του CM

5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ TRANSITION MODE & KEYHOLE MODE

Η μετάβαση από το CM σε KM, όπως έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφική ανασκόπηση του κεφαλαίου 3, είναι αποτέλεσμα του ότι επικρατούν και υπερισχύουν διαφορετικοί φυσικοί μηχανισμοί στην περιοχή τήξης. Το χαρακτηριστικό σχήμα του keyhole που αυτή αποκτά οφείλεται και αποδίδεται στην έντονη εξάτμιση υλικού και στην ανάπτυξη της αντίστοιχης πίεσης ανάκρουσης, ενώ τα φαινόμενα ρευστομηχανικής αποκτούν σταδιακά μεγαλύτερη σημασία. Στόχος της συγκεκριμένης προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι χρήση και πάλι ενός αμιγώς θερμικού μοντέλου, το οποίο όμως με την κατάλληλη «προσαρμογή» θα λαμβάνει υπ' όψιν την εξάτμιση υλικού (και άρα την απομάκρυνσή του από τον όγκο ελέγχου), ώστε να προσομοιώνει και να προβλέπει επαρκώς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης, χωρίς όμως την επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής, οι οποίες θα αύξαναν σημαντικά την πολυπλοκότητα του μοντέλου και τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο. Ταυτόχρονα, μέσω της προτεινόμενης μεθόδου, αποφεύγεται η χρήση κάποιας πολύπλοκης και «εξειδικευμένης» πηγής θερμότητας, η οποία απαιτεί εκτεταμένη βαθμονόμηση ή/και προσαρμογή, όπως επίσης περιορίζεται και η χρήση ημι-εμπειρικών συντελεστών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένας μόνον ημι-εμπειρικός συντελεστής, ο οποίος αναφέρεται στο βαθμό επανασύνδεσης του υλικού, εξαρτάται και προσδιορίζεται συναρτήσει της εκάστοτε VED και περιγράφει πρακτικά το βαθμό εξάτμισης του υλικού και το κατά πόσο αυτή επηρεάζει τον σχηματισμό keyhole.

Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο που προτείνεται έχει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- είναι αμιγώς θερμικό
- χρήση επιφανειακής 2D πηγής θερμότητας για την προσομοίωση της δέσμης laser
- χρησιμοποιείται ένας μόνον ημι-εμπειρικός συντελεστής, ο οποίος προσδιορίζεται συναρτήσει της εκάστοτε VED και σχετίζεται με το βαθμό επανασύνδεσης / εξάτμισης του υλικού
- χρησιμοποιείται παραμορφώσιμη γεωμετρία (deformed geometry) για την περιγραφή και μοντελοποίηση της εξάτμισης του υλικού και το σχηματισμό του keyhole
- μέσω της χρήσης όγκου ελέγχου μεταβαλλόμενης γεωμετρίας μοντελοποιείται και προσομοιώνεται η αλληλεπίδραση της δέσμης laser με μη ομοιόμορφη κεκλιμένη επιφάνεια
- λαμβάνεται υπ' όψιν η απώλεια θερμότητας, λόγω της εξάτμισης του υλικού
- ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται με βάση τον αριθμό Nusselt
- οι θερμοφυσικές ιδιότητες (πυκνότητα και θερμοχωρητικότητα) της κλίνης πούδρας υπολογίζονται σύμφωνα με τον νόμο των μειγμάτων, ενώ η θερμική αγωγιμότητα, με βάση το μοντέλο των Zehner και Schlunder. Επίσης λαμβάνονται υπ' όψιν οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης και εξάτμισης του υλικού.
- χρησιμοποιείται πλέγμα μεταβλητής πυκνότητας για περιορισμό των απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο
- η επικύρωση του μοντέλου γίνεται μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας για πέντε διαφορετικές VED, οι οποίες καλύπτουν το σύνολο των διαφορετικών καταστάσεων της περιοχής τήξης (CM, TM και KM) (Dilip *et al.*, 2017).

5.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Καθώς η συγκεκριμένη μεθοδολογία αποτελεί συνέχεια της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του CM, έως ένα βαθμό οι εξισώσεις είναι κοινές. Για αποφυγή εκτεταμένης και άνευ ουσίας επανάληψη, αλλά και προς χάριν της επιστημονικής πληρότητας, τα κοινά στοιχεία των μεθόδων απλά θα αναφερθούν ή θα παρατεθούν εν συντομία, χωρίς κάποια επιπλέον ανάπτυξη και επεξήγηση, ενώ θα δοθεί έμφαση στα νέα χαρακτηριστικά που ουσιαστικά διαφοροποιούν το συγκεκριμένο μοντέλο και το καθιστούν κατάλληλο για τη μοντελοποίηση του KM. Πιο συγκεκριμένα οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας διαφοροποιούνται κυρίως ως προς τη χρήση 2D

επιφανειακής πηγής θερμότητας για την περιγραφή της δέσμης laser (η οποία αντικαθιστά την ογκομετρική πηγή που είχε χρησιμοποιηθεί κατά την μοντελοποίηση του CM), ενώ δε χρειάζεται να οριστούν οι θερμικές απώλειες λόγω εξάτμισης ως ροή θερμότητας, καθώς, με τη χρήση παραμορφώσιμης γεωμετρίας, η εξάτμιση και απομάκρυνση του υλικού με την αντίστοιχη ενθαλπία του, μοντελοποιείται μέσω της παραμόρφωσης του όγκου ελέγχου.

5.1.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας εκφράζονται μαθηματικά ως:

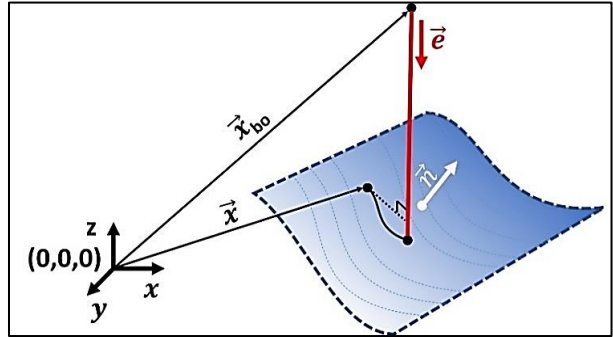
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \dot{Q}_{LB} \quad (5.1\alpha)$$

$$-k \nabla T = \vec{n} \cdot \vec{q}_{LB} + \vec{n} \cdot \vec{q}_{CONV} + \vec{n} \cdot \vec{q}_{RAD} \quad (5.1\beta)$$

Όπως προαναφέρθηκε, στο συγκεκριμένο μοντέλο, η δέσμη laser μοντελοποιείται ως 2D επιφανειακή πηγή θερμότητας χωρικής κατανομής Gauss. Με δεδομένη τη χρήση μεταβλητής γεωμετρίας, η θερμική πηγή επιδρά σε επιφάνεια άγνωστης γωνίας πρόσπτωσης, και η οποία πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά τον υπολογισμό της αντίστοιχης πυκνότητας ισχύος. Η μαθηματική έκφραση της κατανομής της πυκνότητας ισχύος συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης είναι:

$$\vec{n} \cdot \vec{q}_{LB}(x, y) = \frac{P\eta}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r^2}{\sigma^2}\right)} \frac{|\vec{e} \cdot \vec{n}|}{\|\vec{e}\|} \quad \mu\epsilon \quad \sigma_x = \sigma_y = \sigma = \frac{r_{LB}}{2} \quad \kappa\alpha\iota \quad r = \frac{\|\vec{e} \times (\vec{x} - \vec{x}_{bo})\|}{\|\vec{e}\|} \quad (5.2)$$

με \vec{e} το διάνυσμα της δέσμης laser, \vec{x}_{bo} το διάνυσμα της θέσης της πηγής της δέσμης laser, και \vec{x} το διάνυσμα ενός τυχαίου σημείου στον όγκο ελέγχου. Τα προαναφερθέντα διανύσματα θέσης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος της προσπίπτουσας δέσμης laser σε μη επίπεδη επιφάνεια παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1 Διαγραμματική παρουσίαση των διανυσμάτων θέσης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας για μη επίπεδες επιφάνειες

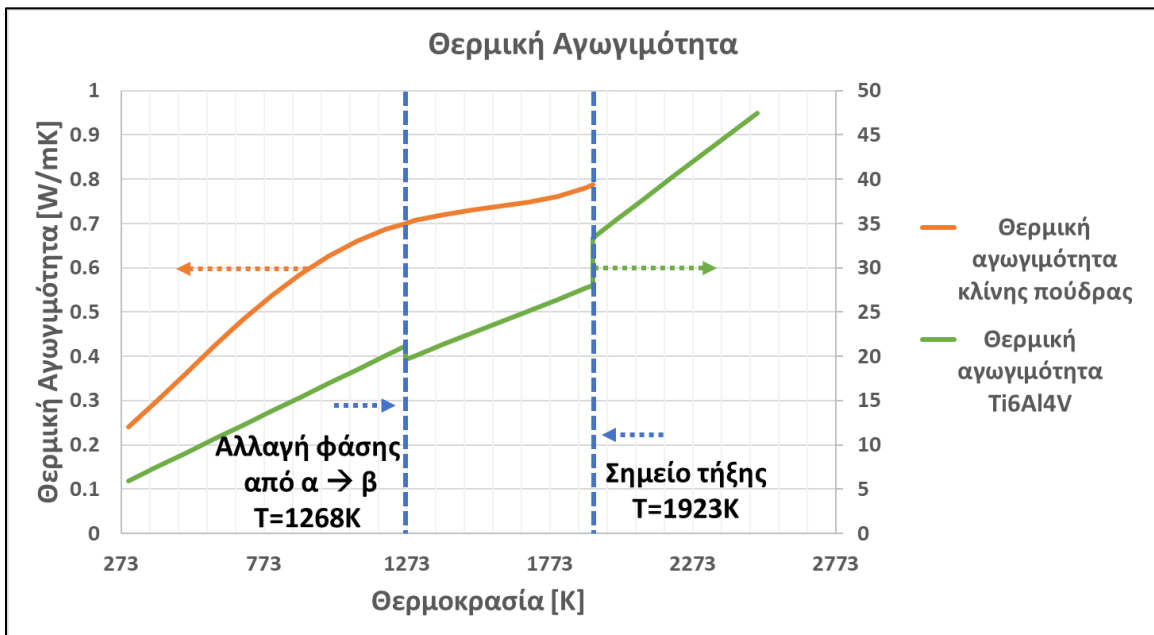
Ο συντελεστής απορρόφησης η θεωρείται 0.77 με βάση την εργασία των Mirkoohi et al. (2019) για Ti6Al4V. Επιλέγεται να παραληφθεί το βήμα χρήσης μοντέλου εντοπισμού ακτίνων για τον υπολογισμό της συνολικής

απορρόφησης λόγω πολλαπλών σκεδάσεων της δέσμης στους κόκκους της κλίνης πούδρας, καθώς κατά το KM η δέσμη laser αλληλεπιδρά κατά κανόνα με τηγμένο υλικό και όχι υλικό υπό μορφή πούδρας, ενώ σκεδάσεις λαμβάνουν χώρα εντός του keyhole, αυξάνοντας τη συνολική απορρόφηση. Ως εκ τούτου ο σημαντικά υψηλός συντελεστής που προτείνεται από του Mirkoohi et al. (2019) κρίνεται ότι είναι αντιπροσωπευτικός, αποτυπώνοντας ρεαλιστικά τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της αλληλεπίδρασης της δέσμης laser με την περιοχή τήξης. Οι απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις (3.17) και (3.18) αντίστοιχα, ενώ ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται και πάλι με βάση τον αριθμό Nusselt:

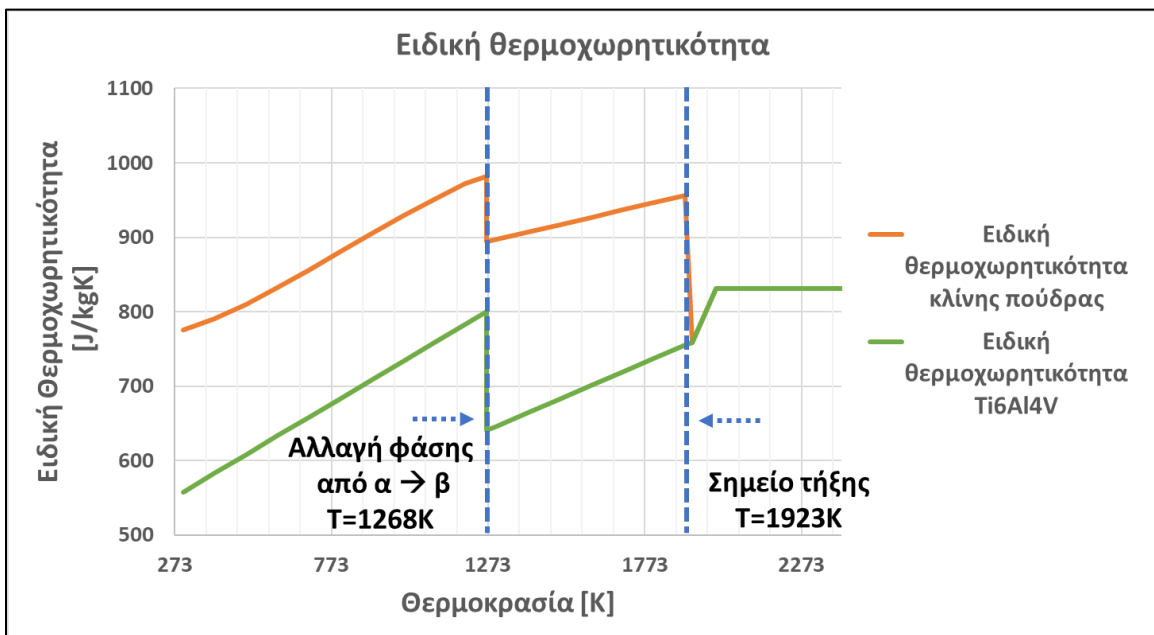
$$h_{CONV}(T) = \frac{Nu(T) \cdot k(T)}{L} \quad \mu\epsilon \quad Nu(T) = 0.54(Gr(T) \cdot Pr(T))^{\frac{1}{4}} \quad (5.3)$$

Ο συντελεστής εκπομπής για κράμα τιτανίου Ti6Al4V ορίζεται με βάση την εργασία των Li et al. (2016). Και πάλι οι θερμοφυσικές ιδιότητες της κλίνης πούδρας (εκτός της θερμικής αγωγιμότητας) ορίζονται με βάση των νόμο των μειγμάτων (βλ. εξίσωση 4.6), ενώ η θερμική αγωγιμότητα σύμφωνα με το μοντέλο των Zehner και Schlunder (βλ.

εξισώσεις 4.7 – 4.12). Στην Εικόνα 5.2 και 5.3 παρουσιάζονται η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα του συμπαγούς Ti6Al4V και της κλίνης πούδρας, αντίστοιχα. Παρατηρείται και πάλι η σημαντική διαφορά ανάμεσα στις αντίστοιχες τιμές, και ειδικά στη θερμική αγωγιμότητα.



Εικόνα 5.2 Θερμική αγωγιμότητα κλίνης πούδρας και Ti6Al4V

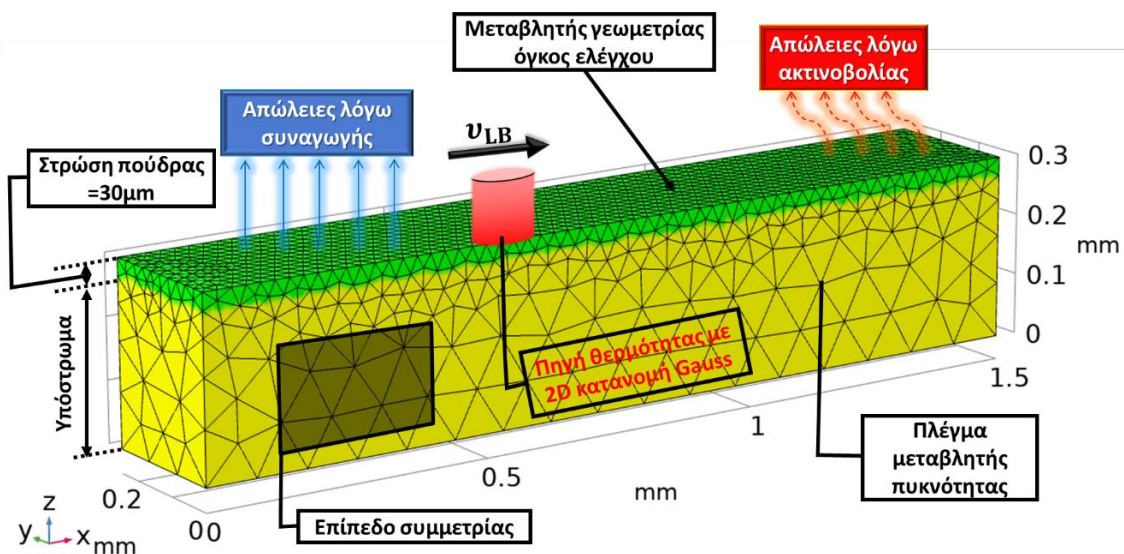


Εικόνα 5.3 Ειδική θερμοχωρητικότητα κλίνης πούδρας και Ti6Al4V

Τέλος, στον Πίνακα 5.1, συνοψίζονται οι βασικές θερμοφυσικές ιδιότητες του κράματος Ti6Al4V και του αζώτου, που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, σύμφωνα με δεδομένα της βιβλιογραφίας (Mills, 2002) και τις βιβλιοθήκες δεδομένων του λογισμικού FEM, ενώ στην Εικόνα 5.4 παρουσιάζονται διαγραμματικά τα προαναφερθέντα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου.

Πίνακας 5.1 Βασικές θερμοφυσικές ιδιότητες

Υλικό	Θερμοφυσικό Μέγεθος	Θερμοκρασιακό εύρος [K]	Έκφραση
Τίταλιον	Πυκνότητα [kg/m ³]	273 – 1268	-0.1419T + 4461
		1268 – 1923	-0.1427T + 4463
		1923 – 3315	-0.6939T + 5255
	Ειδική Θερμοχωρητικότητα [J/kgK]	273 – 1268	0.215T + 483
		1268 – 1923	0.1802T + 412.4
		1923 – 3315	-(1.567E-15) T + 831
	Θερμική Αγωγιμότητα [W/mK]	273 – 1268	0.0157T + 1.257
		1268 – 1923	0.01274T + 3.492
1923 – 3315		0.02449T - 13.72	
Λανθάνουσα Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [kJ/kg]	1268.15	48	
Λανθάνουσα Θερμότητα Τήξης [kJ/kg]	1923.15	282	
Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης [kJ/kg]	3315	10381	
Άζωτο	Πυκνότητα [kg/m ³]	100 – 200	1.5565
		200 – 1200	3.007 - 0.009876T + (1.521E-5) T ² - (1.105E-8) T ³ + (3.048E-12) T ⁴
		T > 1200	0.2877
	Ειδική Θερμοχωρητικότητα [J/kgK]	100 – 200	1051.6
		200 – 1200	1128 - 0.6131T + 0.001322T ² - (8.533E-7) T ³ + (1.844E-10) T ⁴
		T > 1200	1203.2
	Θερμική Αγωγιμότητα [W/mK]	100 – 200	0.0183
		200 – 1200	8.439E-5 + 0.0001006T - (5.027E-8) T ² + (1.837E-11) T ³ - (4.006E-15) T ⁴
T > 1200		0.0718	



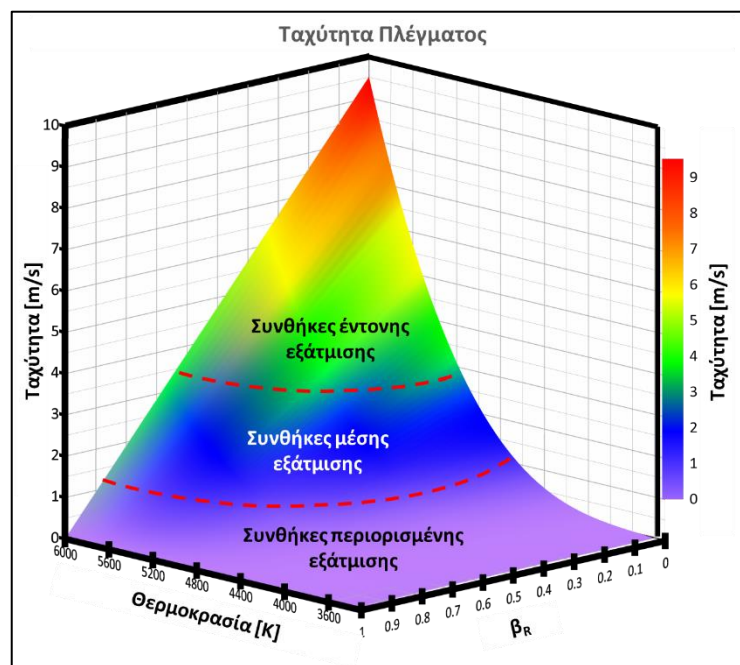
Εικόνα 5.4 Διαγραμματική παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του μοντέλου προσομοίωσης του KM

5.1.2 ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΥΛΙΚΟΥ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Όπως έχει προαναφερθεί, ο σχηματισμός keyhole οφείλεται κατά κύριο λόγο στην έντονη εξάτμιση υλικού και την ανάπτυξη πίεσης ανάκρουσης, ως αποτέλεσμα αυτής, η οποία πίεση ανάκρουσης με τη σειρά της δημιουργεί και διατηρεί τη χαρακτηριστική γεωμετρία του keyhole. Η μοντελοποίηση του keyhole οφείλει να λαμβάνει υπ' όψιν την απομάκρυνση του υλικού λόγω εξάτμισης, την απομάκρυνση από το σύστημα της αντίστοιχης θερμότητας (το υλικό που εξατμίζεται είναι εξαιρετικά υψηλής ενθαλπίας), και την πιθανή πλέον αλληλεπίδραση της δέσμης laser με κεκλιμένη επιφάνεια, το οποίο οδηγεί σε χαμηλότερη επιφανειακή πυκνότητα ισχύος. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, η απομάκρυνση του υλικού προσομοιώνεται μέσω της κατάλληλης παραμόρφωσης και μεταβολής του όγκου ελέγχου, ο οποίος σε κάθε χρονικό βήμα «προσαρμόζεται» στο εναπομείναν στερεό ή τηγμένο υλικό, ενώ ο όγκος που καταλάμβανε το υλικό που εξατμίστηκε δε λαμβάνεται υπ' όψιν στους υπολογισμούς, καθώς δεν αποτελεί πλέον μέρος του «νέου» όγκου ελέγχου. Κατά αυτόν τον τρόπο, αφενός προσομοιώνεται η μεταβολή της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών της περιοχής τήξης, λόγω της εξάτμισης και απομάκρυνσης υλικού, αφετέρου στο ίδιο υπολογιστικό βήμα, απομακρύνεται από το σύστημα (και τον όγκο ελέγχου) η αντίστοιχη ενθαλπία. Η εξάτμιση και απομάκρυνση υλικού μοντελοποιείται και προσομοιώνεται μέσω συνθήκης προσδιορισμού του ρυθμού μεταβολής της θέσης (ήτοι της ταχύτητας) της οριακής επιφάνειας του όγκου ελέγχου, και η οποία εφαρμόζεται στην επιφάνεια πρόσπτωσης της δέσμης laser – εξάτμισης του υλικού. Η ταχύτητα ορίζεται ανάλογη του ρυθμού εξάτμισης υλικού σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.19) και (3.20). Συγκεκριμένα το κάθετο διάνυσμα της ταχύτητας κάθε στοιχείου του πλέγματος μπορεί να εκφραστεί ως:

$$-\vec{n} \cdot \mathbf{v}_{mesh} = \frac{1}{\rho} (1 - \beta_R) \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot T} \right)^{\frac{1}{2}} p_{rec}(T) \quad \text{με} \quad p_{rec}(T) = p_o \cdot \exp \left[\frac{m \cdot L_v}{k_B \cdot T_v} \left(1 - \frac{T_v}{T} \right) \right] \quad (5.4)$$

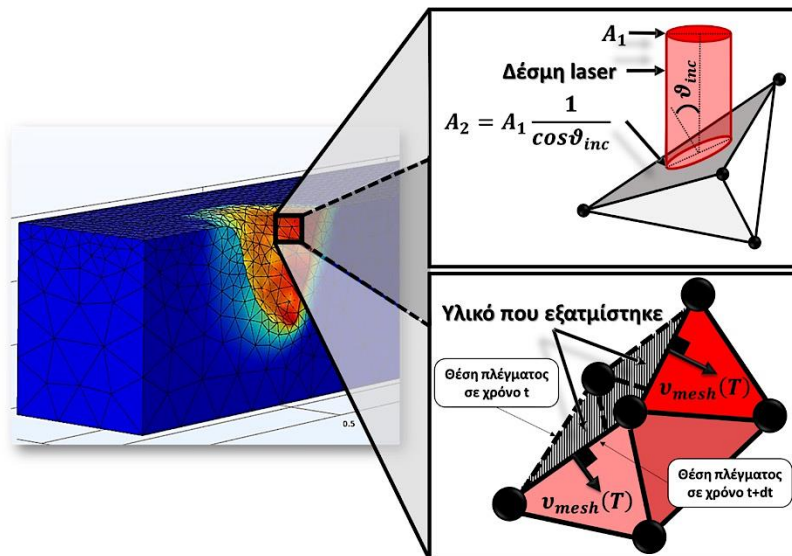
με \mathbf{v}_{mesh} το μέτρο του κάθετου διανύσματος της ταχύτητας κάθε στοιχείου του πλέγματος σε [m/s]. Παρατηρείται ότι για δεδομένο υλικό η ταχύτητα του πλέγματος (επι της ουσίας ο ρυθμός εξάτμισης) εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το συντελεστή επανασύνδεσης του υλικού β_R . Ο συντελεστής αυτός σχετίζεται με τις παραμέτρους κατεργασίας (π.χ. VED), με την τιμή του να τείνει στο 1 για συνθήκες περιορισμένης εξάτμισης (CM) και στο 0 για συνθήκες έντονης εξάτμισης (KM). Στη βιβλιογραφία δεν έχει προταθεί κάποια αξιόπιστη θεωρητική μέθοδος υπολογισμού του, αντιθέτως, όπως τονίζουν στην εργασία τους οι Hirano et al. (2012), μόνο πειραματικά μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται ο «χάρτης» τιμών της ταχύτητας πλέγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για διαφορετικές τιμές β_R .



Εικόνα 5.5 «Χάρτης» τιμών της ταχύτητας πλέγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για διαφορετικές τιμές β_R για Ti6Al4V

Η χρήση παραμορφώσιμης γεωμετρίας εξυπηρετεί έναν ακόμα σκοπό, καθώς δύναται κατά αυτόν τον τρόπο να μοντελοποιηθεί η αλληλεπίδραση της δέσμης laser με κεκλιμένη επιφάνεια. Με δεδομένο ότι η πυκνότητα ισχύος

μιας προσιπτούσας δέσμης μειώνεται σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή πυκνότητα (μέγιστη πυκνότητα ισχύος προκύπτει για γωνία πρόσπτωσης $\theta_{inc} = 0^\circ$, βλ. Εικόνα 5.6) κατά το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης, με τη χρήση των διανυσμάτων θέσης (εξίσωση 5.4), σε κάθε χρονικό βήμα επίλυσης υπολογίζεται εκ νέου η πυκνότητα ισχύος καθώς σχηματίζεται το keyhole και άρα αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης. Έτσι, αν και τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της δέσμης laser παραμένουν σταθερά (ήτοι ονομαστική ισχύς, χωρική κατανομή και διάμετρος δέσμης), η πυκνότητα ισχύος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης συναρτήσει της παραμόρφωσης που συνεπάγεται ο σχηματισμός του keyhole. Η δυναμική αυτή προσαρμογή της πυκνότητας ισχύος τονίζεται ως εξαιρετικά σημαντική καθώς, παρότι προφανώς το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας δε μεταβάλλεται, η χωρική κατανομή της πυκνότητας ισχύος επηρεάζει σημαντικά το προφίλ θερμοκρασιών που προκύπτει, και το οποίο με τη σειρά του σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό εξάτμισης υλικού. Θα μπορούσε, για παράδειγμα, να περιγραφεί μια ρεαλιστική πιθανότητα / αλληλουχία, όπου αρχικά η πυκνότητα ισχύος είναι μέγιστη (μηδενική γωνία πρόσπτωσης) με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και να εξελίσσεται έντονη εξάτμιση υλικού. Η έντονη εξάτμιση προκαλεί τη δημιουργία γεωμετρίας keyhole, όμως, λόγω της κλίσης που αποκτά πλέον η επιφάνεια πρόσπτωσης, η πυκνότητα ισχύος μειώνεται, ακολούθως μειώνονται οι θερμοκρασίες που τοπικά αναπτύσσονται, περιορίζεται ο ρυθμός εξάτμισης υλικού (ο ρυθμός εξάτμισης υλικού εξαρτάται από τη θερμοκρασία), και τελικά το σύστημα φτάνει σε ισορροπία. Η μοντελοποίηση σε ένα μόνο υπολογιστικό βήμα της «απομάκρυνσης» από τον όγκο ελέγχου του υλικού που εξατμίζεται (και της αντίστοιχης ενθαλπίας), με την ταυτόχρονη μεταβολή της γεωμετρίας που το keyhole συνεπάγεται, αποτελεί ίσως το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης παραμορφώσιμης γεωμετρίας. Τα βασικά στοιχεία της χρήσης παραμορφώσιμης γεωμετρίας παρουσιάζονται διαγραμματικά στην Εικόνα 5.6



Εικόνα 5.6 Διαγραμματική παρουσίαση των βασικών στοιχείων της παραμορφώσιμης γεωμετρίας

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει μια αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της παραμόρφωσης από το πλέγμα. Όπως έχει αναφερθεί, η παραμόρφωση του όγκου ελέγχου, προκειμένου να μοντελοποιηθεί η εξάτμιση υλικού, γίνεται μέσω επιβολής οριακής συνθήκης ταχύτητας στην επιφάνεια από όπου λαμβάνει χώρα η εξάτμιση υλικού. Η μετατόπιση που υφίστανται τα οριακά στοιχεία και οι κόμβοι του πλέγματος πρέπει να «διαδοθεί» και να «εξομαλυνθεί» στα γειτονικά στοιχεία και κόμβους, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα να προκύψουν τοπικά ανεστραμμένα στοιχεία (inverted elements). Η «εξομάλυνση» αυτή του πλέγματος ονομάζεται mesh smoothing, και μπορεί να γίνει με διαφορετικές μεθόδους, ανάλογα με τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες του κάθε μοντέλου. Οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι είναι η μέθοδος Laplace, η μέθοδος

Winslow, η μέθοδος Yeoh και η μέθοδος υπερελαστικότητας (Hyperelastic). Η μέθοδος Laplace, ως γραμμική, είναι η πλέον απλή και με τις λιγότερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο, πλην όμως είναι κατάλληλη μόνο για μικρές παραμορφώσεις, καθώς η χρήση της δε συνεπάγεται την αποφυγή αναστροφής στοιχείων. Οι μέθοδοι Winslow, Yeoh και Hyperelastic είναι μη γραμμικές, με σημαντικές απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ. Θεωρητικά, οι συνεχείς λύσεις των συστημάτων εξισώσεων που επιλύουν, εξασφαλίζουν ότι προκύπτουν πλεγματικά στοιχεία θετικού όγκου (ήτοι αποφεύγεται η αναστροφή στοιχείων), πρακτικά, όμως, δεν εξασφαλίζεται “a priori” η ποιότητα του πλέγματος. Σε περιπτώσεις όπου το πλέγμα καλείται να «συμπιεστεί», όπως στην περίπτωση που μοντελοποιείται η απομάκρυνση υλικού από τον όγκο ελέγχου, οι τρεις αυτές μέθοδοι έχουν παρεμφερή «συμπεριφορά» και αποτελέσματα. Οι μέθοδοι Yeoh και Hyperelastic είναι επί της ουσίας παρόμοιες, με την Yeoh να είναι ελαφρώς πιο προηγμένη και να δίνει τη δυνατότητα καλύτερου ελέγχου της κατανομής των παραμορφώσεων και μετατοπίσεων, υπάρχει, όμως, η πιθανότητα με τη συγκεκριμένη μέθοδο να δημιουργηθούν προβλήματα σύγκλισης, ειδικά σε χρονικά εξαρτώμενα προβλήματα. Η μέθοδος Hyperelastic μαθηματικά μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\min(\mathcal{W}) = \min\left(\int_{\Omega} \frac{\mu_{hyp}}{2}(I_1 - 3) + \frac{\kappa_{hyp}}{2}(J - 1)^2 dV\right) \quad (5.5\alpha)$$

$$J = \det\left(\frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial \bar{\mathbf{X}}}\right) \quad \text{και} \quad I_1 = J^{-\frac{2}{3}} \operatorname{tr}\left(\left(\frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial \bar{\mathbf{X}}}\right)^T \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial \bar{\mathbf{X}}}\right)\right) \quad (5.5\beta)$$

\mathcal{W} ορίζεται η ιδεατή «ενέργεια παραμόρφωσης πλέγματος» (mesh deformation energy), η οποία στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί, μ_{hyp} , και κ_{hyp} δύο θεωρητικές σταθερές οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά αντιστοιχία με τους συντελεστές διάτμησης (shear moduli) και συμπίεσης (bulk moduli), καθώς η συγκεκριμένη μέθοδος εξομάλυνσης βασίζεται ως γενική ιδέα στην περιγραφή ενός ιδεατού neo-hookean υλικού, $\bar{\mathbf{x}}$ το διάνυσμα θέσης του παραμορφωμένου πλέγματος, και $\bar{\mathbf{X}}$ το διάνυσμα θέσης του απαραμόρφωτου πλέγματος. Η μέθοδος Yeoh μαθηματικά αποδίδεται από την εξίσωση:

$$\min(\mathcal{W}) = \min\left(\frac{1}{2} \int_{\Omega} C_1(I_1 - 3) + C_2(I_1 - 3)^2 + C_3(I_1 - 3)^3 + \kappa_{yeoh}(J - 1)^2 dV\right) \quad (5.5\gamma)$$

C_1 , C_2 , C_3 , «τεχνητές» σταθερές του υλικού, με τη σταθερά C_3 να καλείται παράγων δυσκαμψίας (stiffening factor) και πρακτικά να ελέγχει την ευκολία παραμόρφωσης του πλέγματος, ενώ κ_{yeoh} ένα «τεχνητό» μέτρο ελαστικότητας.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα προαναφερθέντα, στο συγκεκριμένο μοντέλο, επιλέχθηκε η χρήση της Hyperelastic μεθόδου εξομάλυνσης. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση παραμορφώσιμης γεωμετρίας απαιτεί τον συνεχή έλεγχο κατά τη διάρκεια της επίλυσης του μοντέλου για την εξασφάλιση της ποιότητας των στοιχείων. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που ο όγκος ελέγχου υφίσταται σημαντικές παραμορφώσεις, όπως για παράδειγμα στο σχηματισμό keyhole, υπάρχει ο κίνδυνος να προκύψουν προβλήματα σύγκλισης, ως αποτέλεσμα της δημιουργίας στοιχείων χαμηλής ποιότητας. Η πλέον αποτελεσματική μέθοδος αντιμετώπισης τέτοιου είδους προβλημάτων είναι η επαναδιακριτοποίηση του όγκου ελέγχου (remeshing), όταν διαπιστωθεί η υποβάθμιση του πλέγματος. Κλείνοντας την περιγραφή του τρόπου μοντελοποίησης της εξάτμισης του υλικού, αξίζει να σημειωθεί ότι, για περιορισμό των απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο, το μοντέλο επιλύθηκε με χρήση επιπέδου συμμετρίας (βλ. Εικόνα 5.4), ενώ χρησιμοποιήθηκε πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων μεταβλητής πυκνότητας. Συγκεκριμένα, στην επιφάνεια πρόσπτωσης της δέσμης laser και εξάτμισης του υλικού εφαρμόστηκε πλέγμα υψηλότερης πυκνότητας με μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος στοιχείων 25 μm και 15 μm αντίστοιχα, ενώ στον υπόλοιπο όγκο ελέγχου, πλέγμα χαμηλότερης πυκνότητας (βλ. Εικόνα 5.4). Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ενιαίος όγκος ελέγχου, με τις θερμοφυσικές ιδιότητες να ορίζονται συναρτήσει των συντεταγμένων, ώστε να διαφοροποιούνται σε ιδιότητες υλικού υποστρώματος και ιδιότητες κλίνης πούδρας.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Η επικύρωση του μοντέλου έγινε με βάση τα πειραματικά δεδομένα από την πειραματική εργασία των Dilip et al. (2017). Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε (όπως έχει προαναφερθεί) κράμα Ti6Al4V, με μέση διάμετρο κόκκου 30μm και ονομαστικό πάχος στρώσης 30μm. Χρησιμοποιήθηκε Yb-fiber laser ονομαστικής διαμέτρου 100μm, ενώ τα πειράματα έλαβαν χώρα υπό ατμόσφαιρα αζώτου. Για τις προσομοιώσεις, επιλέχθηκαν πέντε διαφορετικοί συνδυασμοί ονομαστικής ισχύος δέσμης laser και ταχύτητας σάρωσης, ώστε να προκύπτουν διαφορετικές VED και να καλύπτουν το φάσμα καταστάσεων της περιοχής τήξης από CM έως και KM. Η επικύρωση της μεθόδου μοντελοποίησης έγινε με σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της προσομοίωσης ως προς το βάθος της περιοχής τήξης, το βάθος και το πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης υλικού (Heat Affected Zone – HAZ) ($T > 1268$ K), και τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά που η περιοχή τήξης αποκτά. Στον Πίνακα 5.2 παρατίθενται οι παράμετροι των προσομοιώσεων και τα αποτελέσματα αυτών.

Πίνακας 5.2 Παράμετροι προσομοιώσεων και αποτελέσματα αυτών

#	P [W]	U_{LB} [mm/s]	VED [J/mm ³]	β_R	Βάθος πειρ. [μm]	Βάθος προσομ. [μm]	Βάθος HAZ πειρ. [μm]	Βάθος HAZ προσομ. [μm]	Πλάτος HAZ πειρ. [μm]	Πλάτος HAZ προσομ. [μm]
1	50	1200	13.88	1	5	5.5	-	-	59	54
2	100	1200	27.77	0.8	22	21	40	40	110	140
3	150	1000	50	0.6	53	51	70	70	170	200
4	195	750	86.66	0.55	111	116	126	128	212	246
5	195	500	130	0	177	162	187	180	232	266

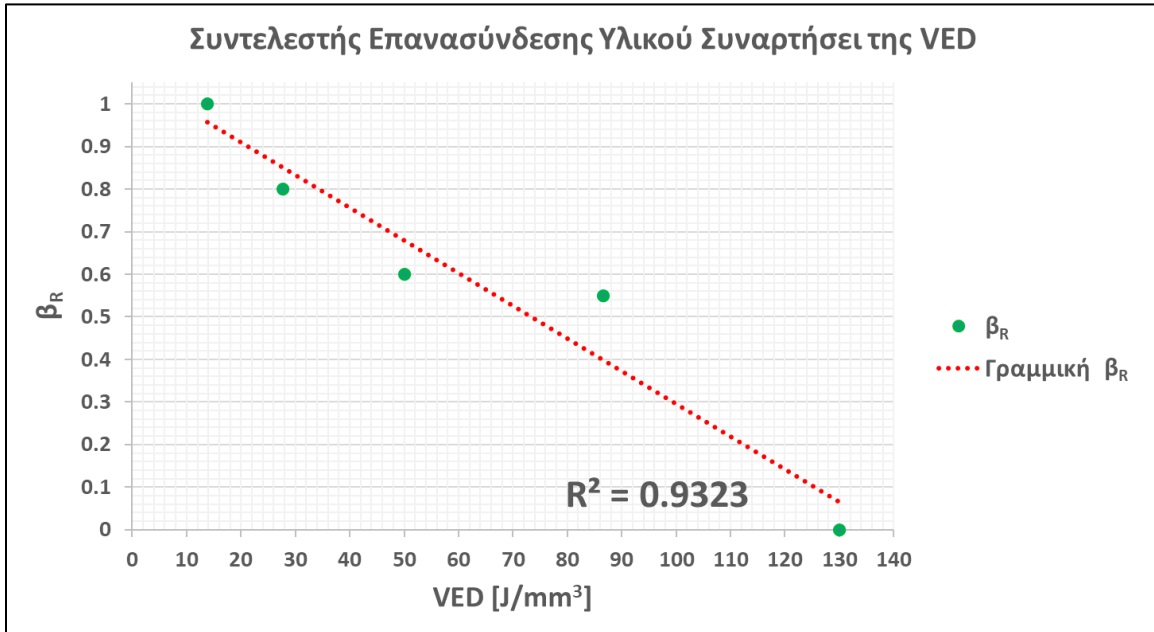
5.2.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού αποτελεί την μοναδική ημι-εμπειρική παράμετρο που πρέπει να προσδιοριστεί προκειμένου να προσομοιωθεί ο σχηματισμός keyhole. Όπως έχει αναφερθεί, η αυθαίρετη και περιπτώσιολογική χρήση συντελεστών κατά τη μοντελοποίηση, δεν ενδείκνυται καθώς μια τέτοια «στρατηγική» σύγκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δρα αρνητικά στη γενικότητα και επιστημονική συνέπεια του εκάστοτε μοντέλου. Ως εκ τούτου, πρέπει να δοθεί και για τον συντελεστή επανασύνδεσης μια ερμηνεία και να συσχετιστεί με συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος, ώστε να μην αποτελεί πλέον μια τυχαία και αυθαίρετη τιμή. Με δεδομένο ότι ο μηχανισμός εξάτμισης υλικού, τον οποίο περιγράφει ο συγκεκριμένος συντελεστής, συνδέεται και εξαρτάται από τις παραμέτρους κατεργασίας, και πιο συγκεκριμένα από την ονομαστική ισχύ της δέσμης laser και την ταχύτητα σάρωσης, επιλέγεται να συσχετιστεί με την VED, η οποία περιλαμβάνει και τις δύο αυτές παραμέτρους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.2 μπορεί να χαραχθεί το διάγραμμα της Εικόνα 5.7, στο οποίο παρουσιάζεται ο συντελεστής β_R συναρτήσει της VED. Παρατηρείται ο σαφής συσχετισμός της VED με τον συντελεστή β_R , ενώ προτείνεται η γραμμική σχέση υπολογισμού του β_R συναρτήσει της VED:

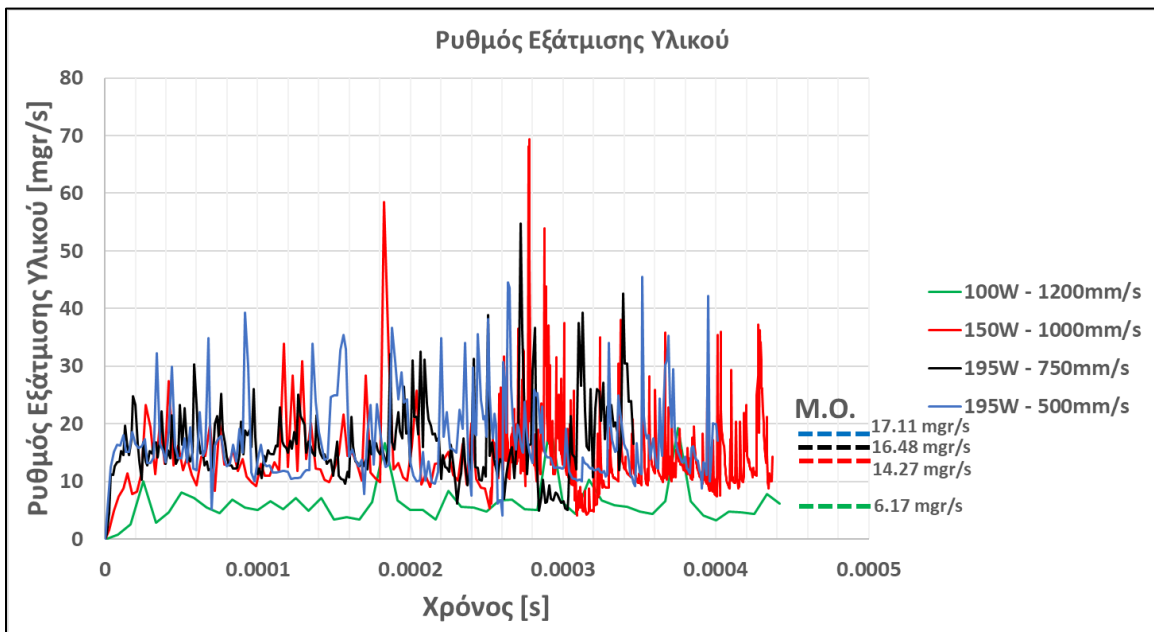
$$\beta_R = -0.0077 \cdot VED + 1.0641 \quad (5.6)$$

Επιλέγεται το γραμμικό μοντέλο καθώς, αν και είναι το πλέον απλό, προκύπτει αποδεκτό $R^2 > 0.93$, ενώ η χρήση πολυπλοκότερου μοντέλου (π.χ. πολυώνυμο υψηλότερου βαθμού) δε μπορεί να στηριχθεί με βάση την απαραίτητη επιστημονική αυστηρότητα, και δυνητικά μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο υπερπροσαρμογής του μοντέλου (overfitting). Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη σχέση, ορθό είναι να θεωρείται αξιόπιστη μόνο για το κράμα Ti6Al4V, ενώ η χρήση της θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν και τις λοιπές παραμέτρους που

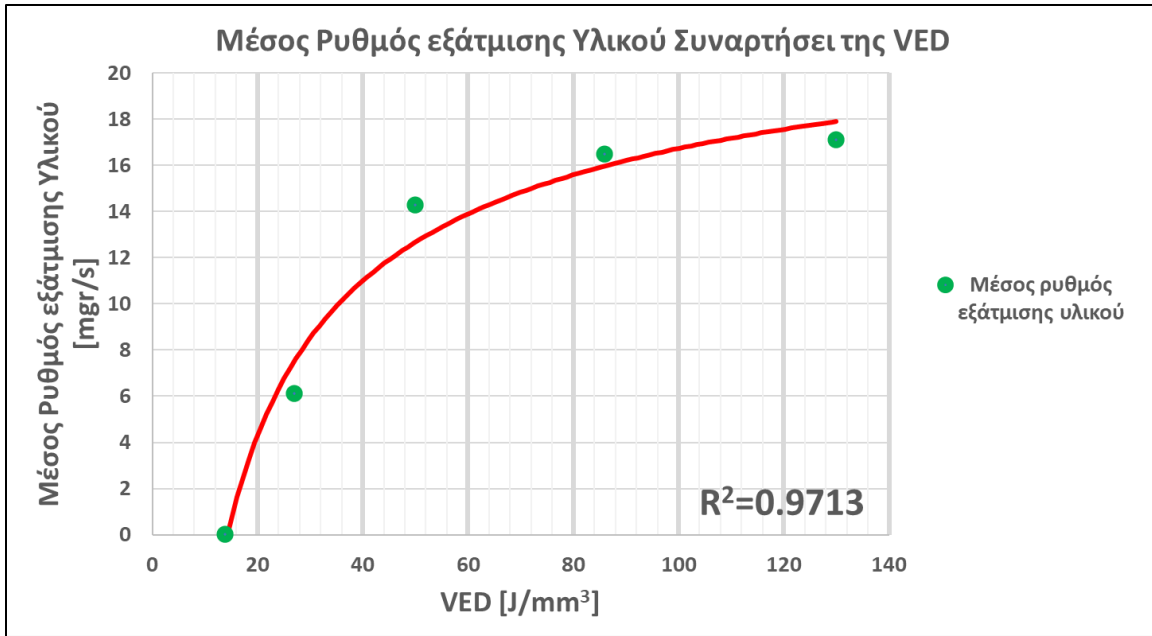
περιλαμβάνει η VED (π.χ. το ονομαστικό πάχος στρώσης και την ονομαστική διάμετρο της δέσμης laser). Όπως έχει άλλωστε επισημανθεί στο Κεφάλαιο 2, η VED αποτελεί μεν έναν εξαιρετικά εύχρηστο και χαρακτηριστικό δείκτη, ο οποίος όμως δε μπορεί και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται κατά τη μελέτη και αξιολόγηση της κατεργασίας «τυφλά» και απόλυτα.



Εικόνα 5.7 Συντελεστής επανασύνδεσης υλικού συναρτήσει της VED



Εικόνα 5.8 Ρυθμός εξάτμισης υλικού



Εικόνα 5.9 Ρυθμός εξάτμισης υλικού συναρτήσεως της VED

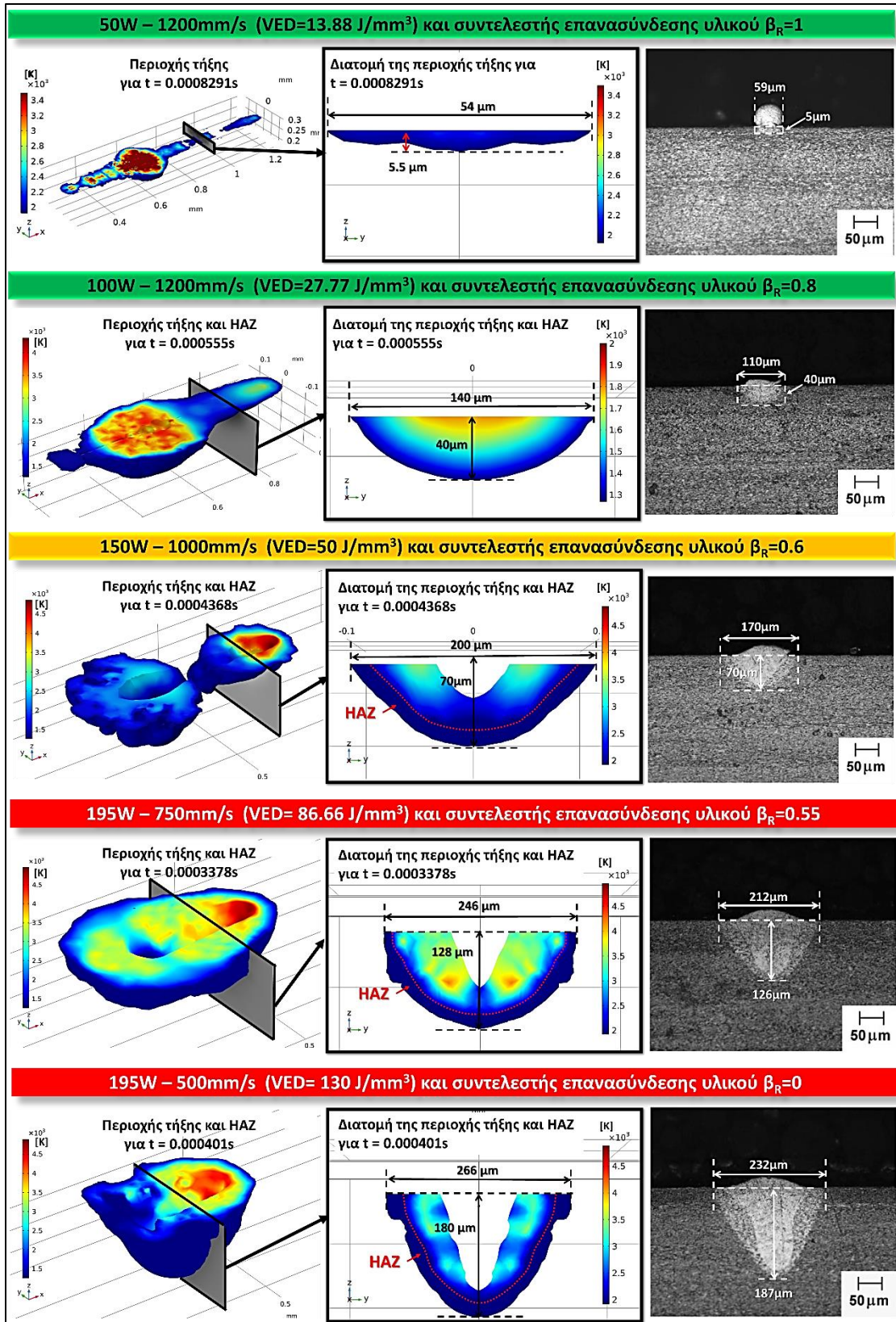
Επίσης, στην Εικόνα 5.8 παρουσιάζεται ο ρυθμός εξάτμισης του υλικού για τις διάφορες VED. Παρατηρείται πως ο ρυθμός εξάτμισης δεν είναι σταθερός αλλά εμφανίζει σημαντικές χρονικές διακυμάνσεις, με τον μέσο όρο να διαφοροποιείται σημαντικά, συναρτήσεως της εκάστοτε VED. Πιο συγκεκριμένα για VED 27.77 J/mm³ ο μέσος ρυθμός εξάτμισης υλικού υπολογίζεται στα 6.17 mgr/s ενώ για 130 J/mm³ έχει σχεδόν τριπλασιαστεί στα 17.11 mgr/s. Στην Εικόνα 5.9 αποτυπώνεται σε διάγραμμα ο μέσος ρυθμός εξάτμισης υλικού συναρτήσεως της VED και προκύπτει πάλι ισχυρή και σαφής συσχέτιση, η οποία όμως αυτή την φορά μπορεί να αποδοθεί καλύτερα από μια εκθετική σχέση:

$$\text{Μέσος Ρυθμός Εξάτμισης Υλικού} = -109.9VED^{-0.5494} + 25.49 \quad (5.7)$$

Η εκτίμηση μέσω προσομοίωσης του ρυθμού εξάτμισης είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς δεν υπάρχει κάποιος άμεσος και εύκολος πειραματικός τρόπος μέτρησής του. Ως τελευταία σημαντική παρατήρηση, πρέπει να αναφερθεί η τάση που παρατηρείται για «σταθεροποίηση» του ρυθμού εξάτμισης. Για αύξηση της VED από 50 σε 130 J/mm³ (σχεδόν τριπλασιασμός), ο μέσος ρυθμός εξάτμισης αυξάνεται μόνο κατά περίπου 20%, γεγονός που μπορεί, λογικά, να αποδοθεί σε ένα μηχανισμό σταθεροποίησης (έχει προαναφερθεί) του keyhole, προς μια μέγιστη τιμή εξάτμισης υλικού, η οποία προφανώς σχετίζεται με το ισοζύγιο ενέργειας και περιορίζεται από την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ για τη θέρμανση και εξάτμιση συγκεκριμένης μάζας υλικού.

5.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΞΗΣ

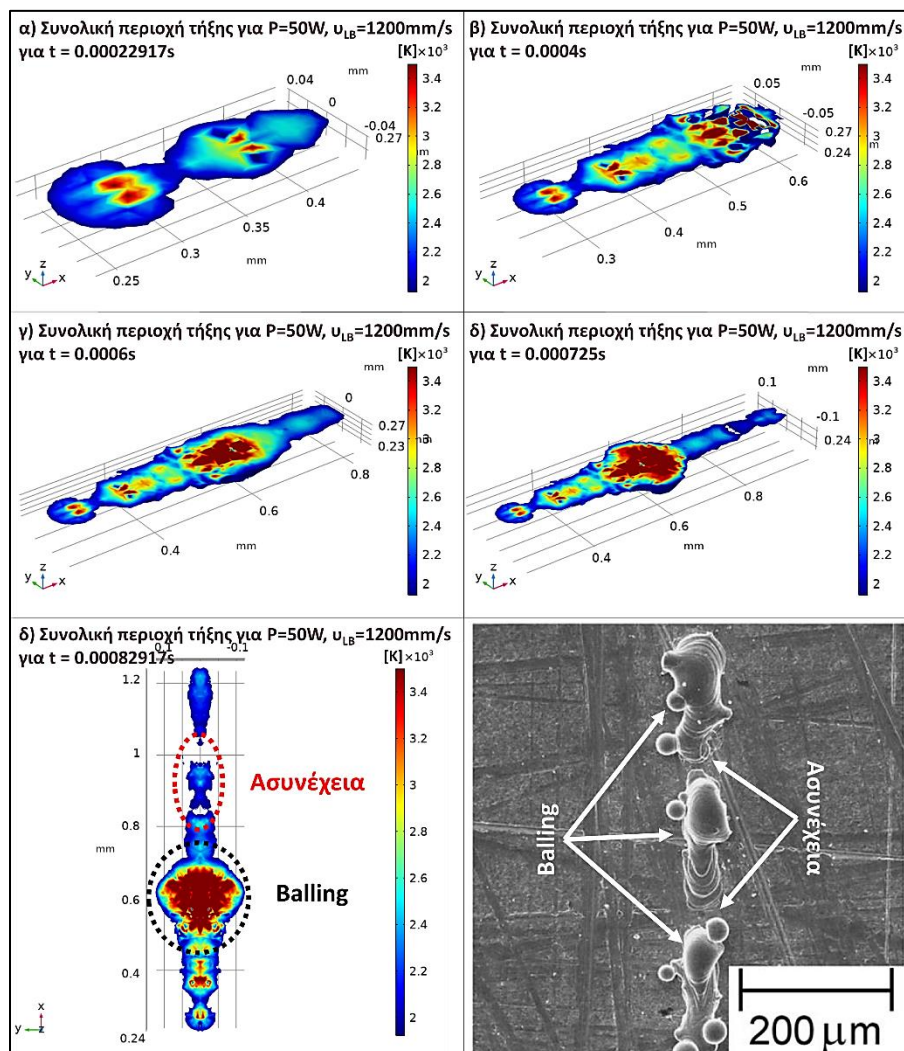
Στην Εικόνα 5.10 παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά, και γίνεται η εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της περιοχής τήξης και της HAZ. Προκειμένου να καθοριστούν αντιπροσωπευτικές τιμές για το βάθος της περιοχής τήξης και το βάθος και πλάτος της HAZ, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για επαρκή χρόνο κατεργασίας, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η κατεργασία έχει μεταβεί σε μια σταθερή φάση (steady state). Συγκεκριμένα, αφού το υλικό έχει επανέλθει σε θερμοκρασίες μικρότερες του σημείου τήξης (ήτοι δεν αναμένεται να αλλάξουν περαιτέρω τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης), η «τελική» γεωμετρία της περιοχής τήξης διατηρεί ένα σταθερό ή ελαφρώς μεταβαλλόμενο βάθος.



Εικόνα 5.10 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης και της HAZ, πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοιώσεων

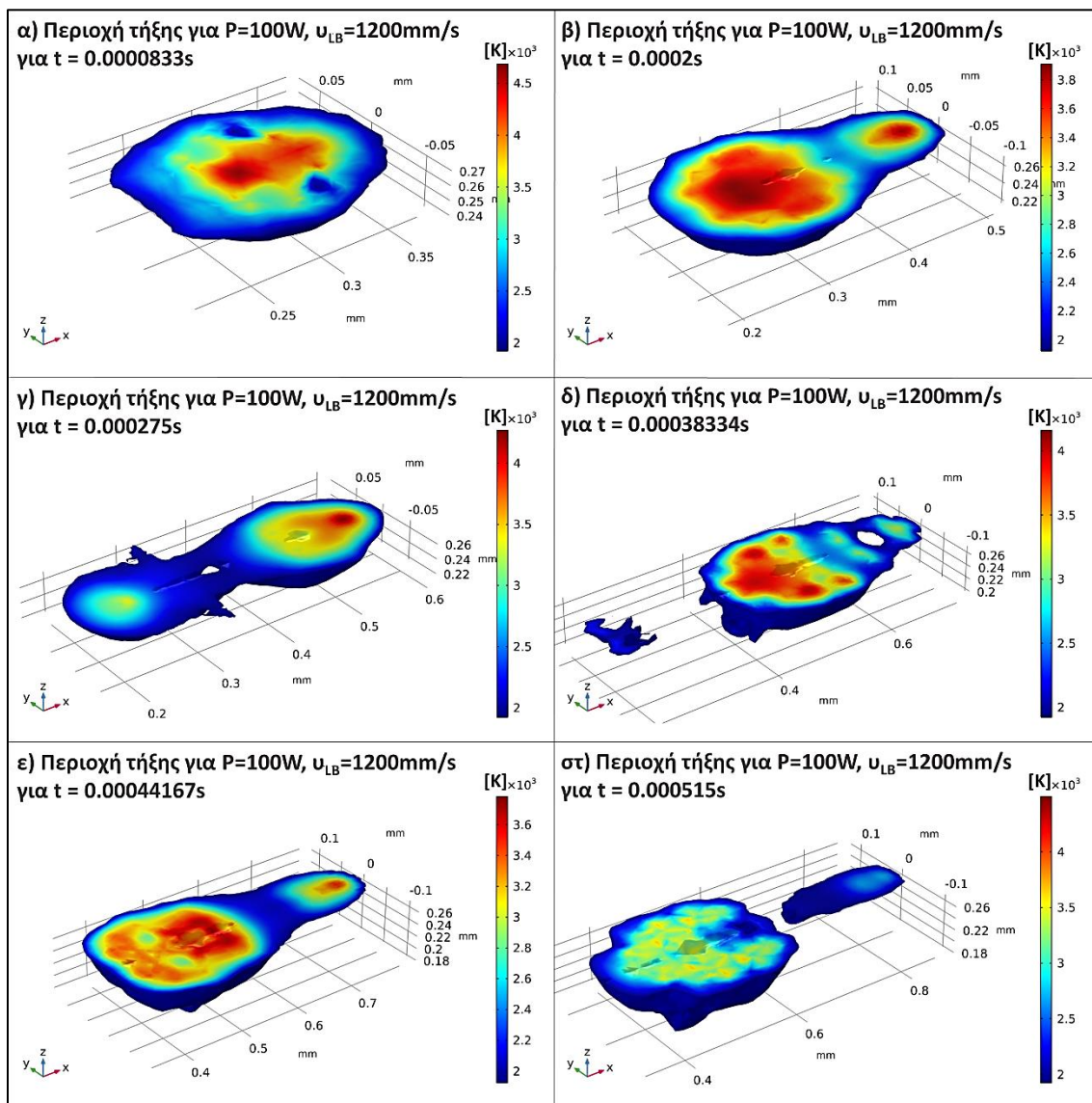
Ως μια αρχική γενική παρατήρηση, συνάγεται ότι για VED 13.88 και 27.77 J/mm³, η περιοχή τήξης βρίσκεται σε CM, για 50 J/mm³ σε TM, ενώ για 86.66 και 130 J/mm³ σε KM. Στις Εικόνες 5.11 – 5.14 παρουσιάζεται αναλυτικά η εξέλιξη και τα χαρακτηριστικά που αποκτούν οι περιοχές τήξης για τις διαφορετικές VED.

Η περιοχή τήξης για P=50W και u_{LB}=1200mm/s εμφανίζει τα τυπικά χαρακτηριστικά του CM, όπως έχουν συζητηθεί και στο Κεφάλαιο 4. Αρχικά παρατηρείται ο σχηματισμός μιας κυκλικής δομής, ως αποτέλεσμα της αστάθειας στην αρχή της διαδρομής της δέσμης laser, η οποία ακολουθείται από το σχηματισμό λαϊμού (Εικόνα 5.11α). Στη συνέχεια, η περιοχή τήξης τείνει να σταθεροποιηθεί, λόγω όμως της εξαιρετικά χαμηλής VED (χαμηλή ισχύς της δέσμης laser και υψηλή ταχύτητα σάρωσης), δε μπορεί να σχηματιστεί και να διατηρηθεί μια ομοιόμορφη και συνεχής περιοχή τήξης, αλλά εμφανίζονται φαινόμενα balling και ασυνέχειας (Εικόνα 5.11β - Εικόνα 5.11δ). Στην Εικόνα 5.11δ γίνεται άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα του μοντέλου να προβλέψει και να προσομοιώσει επαρκώς τα βασικά χαρακτηριστικά που αποκτά η περιοχή τήξης. Το σημαντικότερο συμπέρασμα για τις συγκεκριμένες παραμέτρους κατεργασίας είναι ο σχηματισμός ασυνεχούς και εξαιρετικά μικρού βάρους περιοχής τήξης, η οποία θα είχε ως αποτέλεσμα την ελλιπή σύνδεση των διαδοχικών στρώσεων, την πιθανή ανάπτυξη πορώδους και κατά συνέπεια την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του τεμαχίου.



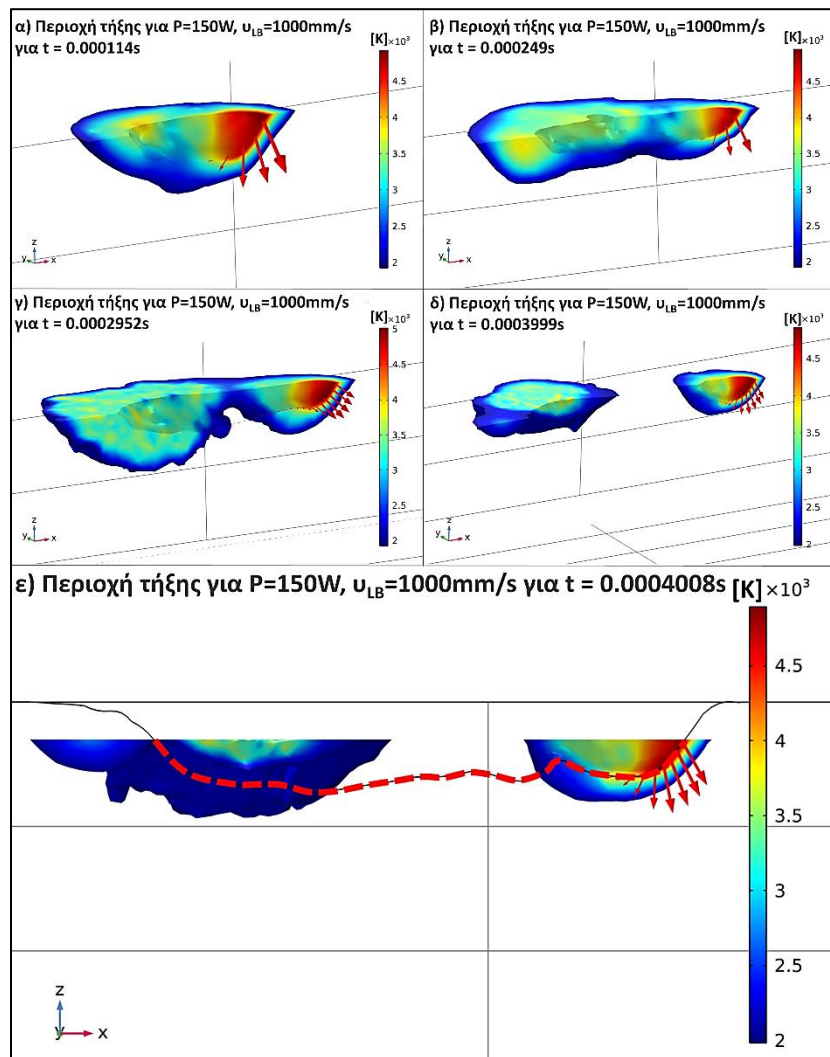
Εικόνα 5.11 Εξέλιξη της περιοχής τήξης για P=50W και u_{LB}=1200mm/s

Καθώς διπλασιάζεται η VED, μέσω αύξησης της ονομαστικής ισχύος από 50W σε 100W, δημιουργείται περιοχή τήξης μεγαλύτερου βάθους ($\approx 21\mu\text{m}$), πιο σταθερή και ομοιόμορφη. Η κατεργασία συνεχίζει να βρίσκεται σε CM, καθώς το βάθος της περιοχής τήξης είναι μικρότερο του πλάτους της, όμως το αυξημένο αυτό βάθος επιτρέπει την επαρκή σύνδεση της κάθε νέας στρώσης με τις προηγούμενες. Ταυτόχρονα, δεν είναι ορατά φαινόμενα ασυνέχειας που οφείλονται σε χαμηλή πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου υλικού. Στην Εικόνα 5.12 παρουσιάζεται η εξέλιξη της περιοχής τήξης με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και μπορεί να παρατηρηθεί ένα επαναλαμβανόμενο «μοτίβο». Αρχικά σχηματίζεται μια σφαιροειδής περιοχή τήγματος ακολουθούμενη από ένα «λαιμό», ενώ στη συνέχεια του «λαιμού» σχηματίζεται η επόμενη σφαιροειδής περιοχή τήγματος. Ο «λαιμός» που ενώνει τις δύο σφαιροειδείς περιοχές είναι ικανού πλάτους και βάθους ώστε να μην υπάρχουν ασυνέχειες, ενώ και το φαινόμενο balling μπορεί να χαρακτηριστεί ως περιορισμένο, καθώς δε σημειώνονται έντονες μεταβολές στο πλάτος της περιοχής τήξης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά το σχηματισμό κάθε σφαιροειδούς περιοχής τηγμένου υλικού, το υλικό πριν από αυτήν, έχει επιστρέψει κατά σημαντικό ποσοστό σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του σημείου τήξης, ήτοι έχει επαναστερεοποιηθεί.



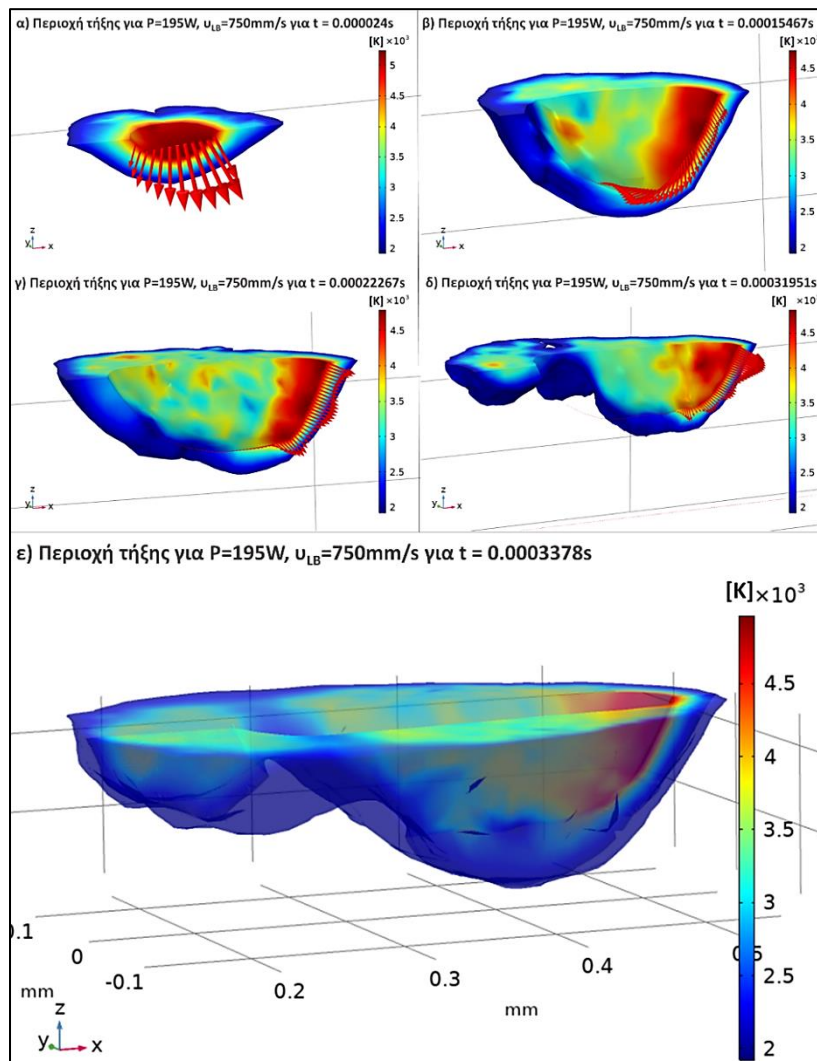
Εικόνα 5.12 Εξέλιξη της περιοχής τήξης για $P=100\text{W}$ και $u_{LB}=1200\text{mm/s}$

Στην Εικόνα 5.13 παρουσιάζεται η εξέλιξη της περιοχής τήξης για VED 50 J/mm³, με την κατεργασία να βρίσκεται πλέον σε TM. Όπως έχει προαναφερθεί, στο TM «συνυπάρχουν» και εναλλάσσονται περιοχές με χαρακτηριστικά του CM και του KM. Για πρώτη φορά, υπάρχει σημαντική εξάτμιση υλικού στην περιοχή του υποστρώματος και με την πηγή θερμότητας να δρα πλέον στην επικλινή επιφάνεια των τοιχωμάτων του σχηματισμένου keyhole. Τα διανύσματα τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.13 αντιστοιχούν στην ταχύτητα του πλέγματος (πρακτικά στον ρυθμό εξάτμισης υλικού και σχηματισμού keyhole) και παρατηρείται ότι, μετά τον αρχικό σχηματισμό του keyhole, όπου τα διανύσματα είναι σχεδόν κατακόρυφα (Εικόνα 5.13α και Εικόνα 5.13β), η πηγή θερμότητας δρώντας στα τοιχώματα του keyhole, δεν επιφέρει την περαιτέρω αύξηση του βάθους αλλά την επέκταση του keyhole προς την κατεύθυνση σάρωσης (Εικόνα 5.13γ και Εικόνα 5.13δ). Και πάλι σχηματίζεται η γνωστή αστάθεια στην αρχή της διαδρομής, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι, με εξαίρεση την περιοχή αυτή της αστάθειας, το υλικό επιστρέφει σε στερεά κατάσταση ($T < T_m$) πολύ γρήγορα, με τηγμένο υλικό να υπάρχει και να διατηρείται μόνο πολύ κοντά στη θέση της δέσμης laser. Τέλος, είναι εξαιρετικά σημαντική και ενδιαφέρουσα η δυνατότητα του μοντέλου να προβλέπει διακυμάνσεις στο βάθος της περιοχής τήξης (Εικόνα 5.13ε), ένα τυπικό χαρακτηριστικό περιπτώσεων TM, όταν η πυκνότητα ενέργειας δεν επαρκεί για να διατηρηθεί ένα απόλυτα σταθερό βάθος στην περιοχή τήξης, και οι οποίες έχουν παρατηρηθεί και πειραματικά (Miyagi and Wang, 2020).



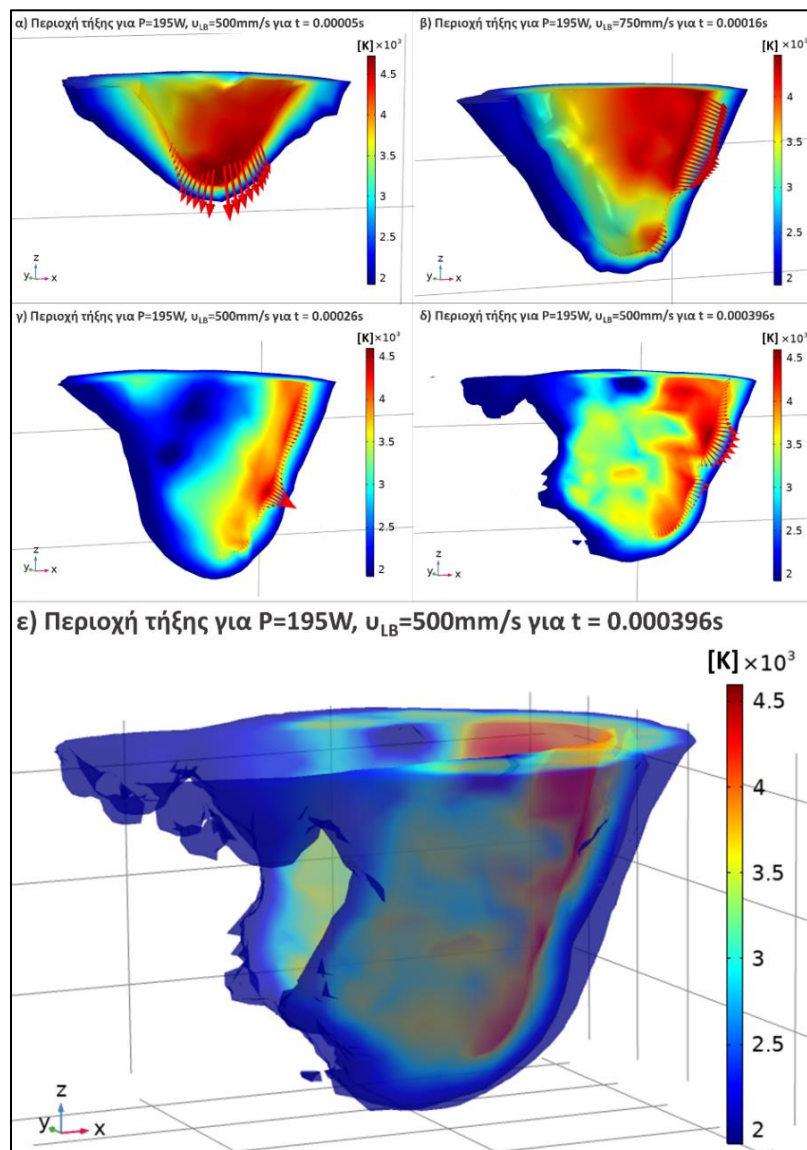
Εικόνα 5.13 Εξέλιξη της περιοχής τήξης για $P=150W$ και $u_{LB}=1000mm/s$

Όπως τεκμαίρεται ξεκάθαρα, τόσο από τα πειραματικά αποτελέσματα όσο και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Εικόνα 5.14), για παραμέτρους κατεργασίας $P=195\text{W}$ και $u_{LB}=750\text{mm/s}$ με $VED\ 86.66\ \text{J/mm}^3$ η περιοχή τήξης έχει μεταβεί πλέον σε ΚΜ. Αρχικά, παρατηρείται και πάλι η φάση δημιουργίας του keyhole με τα διανύσματα ταχύτητας να είναι κατακόρυφα (Εικόνα 5.14α), ενώ σταδιακά η πηγή θερμότητας αρχίζει να επιδρά στα κεκλιμένα τοιχώματα του keyhole, με αποτέλεσμα την επέκταση και σταθεροποίησή του (Εικόνα 5.14β-δ). Παρατηρείται, επίσης, ότι τα διανύσματα ταχύτητας δεν είναι απαραίτητα ομοιόμορφα, αλλά κατά τη διάρκεια της κατεργασίας σχηματίζονται και εναλλάσσονται περιοχές με υψηλότερη ταχύτητα (έντονη εξάτμιση υλικού) και χαμηλότερη ταχύτητα (λιγότερο έντονη εξάτμιση υλικού). Σε αντίθεση όμως με το TM, όπου παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις στο βάθος της περιοχής τήξης, η αυξημένη διαθέσιμη πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου υλικού έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση ενός σταθερού και ομοιόμορφου βάθους. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ο σχηματισμός μιας ευδιάκριτης HAZ (Εικόνα 5.10), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οποίας προβλέπονται από το προτεινόμενο μοντέλο. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ελαφρώς υπερδιαστασιολογημένο πλάτος της HAZ που προκύπτει από τις προσομοιώσεις, μπορεί να αποδοθεί στην έλλειψη υπολογισμού και μοντελοποίησης της κατάρρευσης των τοιχωμάτων, η οποία προφανώς θα επηρέαζε το προφίλ θερμοκρασιών και θα περιόριζε το πλάτος της περιοχής τήξης.



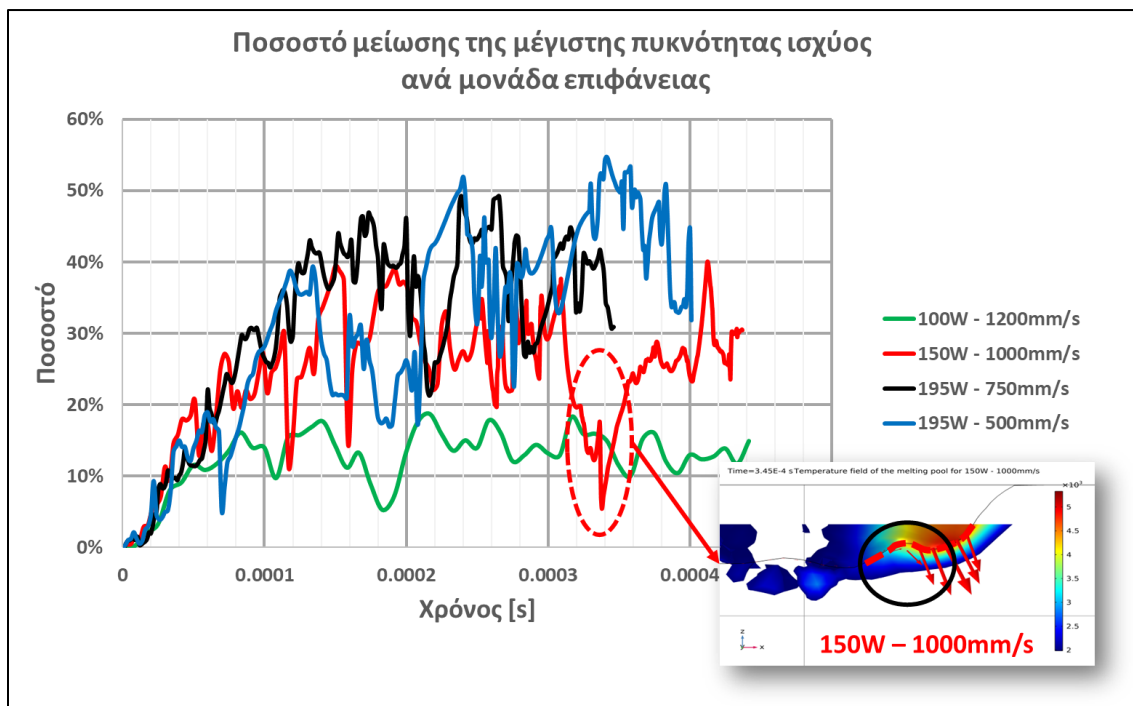
Εικόνα 5.14 Εξέλιξη της περιοχής τήξης για $P=195\text{W}$ και $u_{LB}=750\text{mm/s}$

Η τελευταία προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για $P=195\text{W}$ και $u_{LB}=500\text{mm/s}$ με $\text{VED } 130 \text{ J/mm}^3$ (Εικόνα 5.15). Η κατεργασία προφανώς βρίσκεται στην περιοχή του KM, καθώς η υψηλή διαθέσιμη πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου υλικού προκαλεί έντονη εξάτμιση υλικού. Αρχικά, και πάλι δημιουργείται το keyhole με τα διανύσματα της ταχύτητας να είναι κατακόρυφα, ενώ στη συνέχεια η δέσμη laser επιδρά στα κεκλιμένα τοιχώματα του σχηματισμένου keyhole, επεκτείνοντάς το. Είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον το γεγονός ότι η επέκταση του keyhole, κατά την κατεύθυνση κίνησης της δέσμης laser, δεν είναι μια απόλυτα ομοιόμορφη διαδικασία, αλλά μπορεί να παρατηρηθούν έντονες διακυμάνσεις στα διανύσματα ταχυτήτων, στα τοιχώματα του keyhole. Στην Εικόνα 5.15β, διακρίνεται περιοχή στα τοιχώματα με σχεδόν μηδενική ταχύτητα (ήτοι μηδενική εξάτμιση υλικού), η οποία δημιουργεί προσωρινά μια ανομοιομορφία, στη συνέχεια όμως υπό την εντονότερη επίδραση της δέσμης laser, λόγω της διαφορετικής γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης στη συγκεκριμένη περιοχή, η προαναφερθείσα ανομοιομορφία εξαλείφεται (Εικόνα 5.15γ). Θα μπορούσε, ως γενική παρατήρηση, να ειπωθεί ότι τα διανύσματα ταχύτητας για τις συγκεκριμένες παραμέτρους κατεργασίας δεν είναι χρονικά ομοιόμορφα και σταθερά, με αποτέλεσμα την προσωρινή περιοδική δημιουργία ανομοιομορφιών τοιχωμάτων του keyhole.



Εικόνα 5.15 Εξέλιξη της περιοχής τήξης για $P=195\text{W}$ και $u_{LB}=500\text{mm/s}$

Η σημασία της μοντελοποίησης της αλληλεπίδρασης της δέσμης laser με κεκλιμένη επιφάνεια, μέσω της σχέσης (5.2), αποδείχτηκε στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν, καθώς στις περιπτώσεις του TM και του KM, η πηγή θερμότητας επιδρούσε κατά κύριο λόγο στα κεκλιμένα τοιχώματα του σχηματισμένου keyhole και όχι σε επίπεδη επιφάνεια. Αποτέλεσμα της δυναμικής μεταβολής της πυκνότητας ισχύος συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης είναι η δημιουργία ανομοιομορφων προφίλ ταχυτήτων (ρυθμού εξάτμισης υλικού) στα τοιχώματα του keyhole, αλλά και τελικά η ισορροπία του συστήματος σε ένα σταθερό βάθος keyhole, όπου οι συνθήκες κατεργασίας (VED) το επιτρέπουν. Θέλοντας να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της κεκλιμένης επιφάνειας, υπολογίστηκε το ποσοστό μείωσης της μέγιστης πυκνότητας ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, δηλαδή το ποσοστό μείωσης της πυκνότητας ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας, σε σχέση με την αρχική, όταν δηλαδή η δέσμη laser προσέπιπτε σε επίπεδη επιφάνεια. Στην Εικόνα 5.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και συμπεραίνεται μια σαφής μείωση, η οποία εξαρτάται από τις παραμέτρους κατεργασίας και είναι μεγαλύτερη, συναρτήσει του βάθους του keyhole. Για παράδειγμα για VED 50 J/mm³ το μέσο ποσοστό μείωσης είναι της τάξης του 25% ενώ για VED 130 J/mm³ αυξάνεται στο 34%. Επίσης, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον και σημαντικό το γεγονός ότι η μεταβολή της πυκνότητας ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας σχετίζεται και συνδέεται με τις διακυμάνσεις στο βάθος και στα τοιχώματα του keyhole, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα, με τη χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης, να παρατηρούνται και να προβλέπονται ανάλογα χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης.



Εικόνα 5.16 Ποσοστό μείωσης της μέγιστης πυκνότητας ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας

Ολοκληρώνοντας την ενότητα 5.2, ως ένα γενικό συμπέρασμα, μπορεί να ειπωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος μοντελοποίησης κρίνεται κατάλληλη για την προσομοίωση της περιοχής τήξης σε ένα ευρύ φάσμα VED, και όταν αυτή βρίσκεται σε CM, TM και KM. Ο μοναδικός συντελεστής που χρησιμοποιήθηκε είναι της επανασύνδεσης του υλικού, ο οποίος περιγράφει την ένταση της εξάτμισης του υλικού, ενώ προκύπτει ισχυρή συσχέτισή του με την VED της κατεργασίας, συσχέτιση η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί προκειμένου να προκύψει αντίστοιχη ημι-εμπειρική σχέση. Για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, στη συνέχεια προτείνεται η χρήση ενός 2D μοντέλου, για την ταχύτερη εκτίμηση του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού.

5.3 ΜΟΝΤΕΛΟ 2D

Ως ένας βασικός στόχος της συγκεκριμένης διατριβής είναι η παρουσίαση κατάλληλης μεθοδολογίας μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM σε μικροκλίμακα, η οποία, όμως, εκτός από ακριβή και ρεαλιστικά αποτελέσματα, θα έχει και τις ελάχιστες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο. Στο κεφάλαιο αυτό, προτείνεται η χρήση ενός αμιγώς θερμικού μοντέλου για την προσομοίωση της περιοχής τήξης σε CM, TM και KM, με μοναδική παράμετρο που απαιτεί προσδιορισμό να είναι ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού. Όπως έχει προαναφερθεί, δυστυχώς δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία κάποια αξιόπιστη θεωρητική μέθοδος υπολογισμού του συγκεκριμένου συντελεστή, και παρότι προτείνεται η συσχέτισή του με την VED, είναι απαραίτητος, σε κάποια φάση της όλης μεθόδου μοντελοποίησης, ο προσδιορισμός του μέσω επαναληπτικής διαδικασίας (trial and error method). Λαμβάνοντας υπ' όψιν την απαίτηση για βέλτιστη διαχείριση του υπολογιστικού χρόνου και υπολογιστικής ισχύος, στην ενότητα αυτή προτείνεται η χρήση ενός 2D μοντέλου για τον προσδιορισμό του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού, το οποίο θα έχει, συγκριτικά με το αντίστοιχο 3D, ελάχιστες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ.

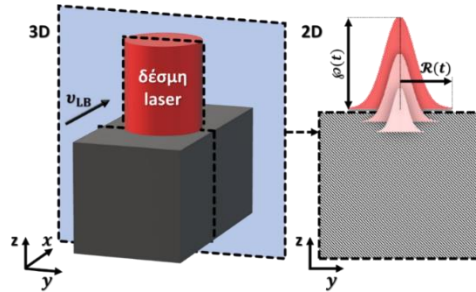
Η βασική ιδέα είναι ότι με χρήση και μοντελοποίηση μια «τομής» της διαδρομής της δέσμης laser μπορεί να προσδιοριστεί με ικανοποιητική ακρίβεια ο συντελεστής επανασύνδεσης του υλικού, ο οποίος στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί σε ένα 3D μοντέλο για την πλήρη και λεπτομερή προσομοίωση της περιοχής τήξης. Η καίρια διαφορά ανάμεσα στο 3D μοντέλο, που έχει ήδη παρουσιαστεί, και στο 2D, που προτείνεται στην συγκεκριμένη ενότητα, είναι ο ορισμός της πηγής θερμότητας, καθώς στο 2D μοντέλο θα πρέπει αυτή να περιγραφεί κατάλληλα, ώστε να προσομοιώνει την κίνηση της δέσμης laser ως προς το επίπεδο μελέτης.

Η πηγή θερμότητας συνεχίζει να έχει χωρική κατανομή Gauss, όμως, λόγω της κίνησής της ως προς το συγκεκριμένο επίπεδο αναφοράς, η ακτίνα και η ισχύς της μεταβάλλονται χρονικά. Με δεδομένη τη χωρικά ομοιόμορφη κατανομή Gauss που έχει η δέσμη laser, η ισχύς της πηγής θερμότητας πρέπει να μεταβάλλεται χρονικά, σύμφωνα με κατανομή Gauss, προκειμένου να προσομοιωθεί η κίνηση της δέσμης laser πάνω από το προς μελέτη επίπεδο, ενώ η ακτίνα της θερμικής πηγής προκύπτει γεωμετρικά. Τούτων λεχθέντων, η εξίσωση 5.2 τροποποιείται σε:

$$\begin{aligned}
 d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (d_z k \nabla T) &= d_z \dot{Q}_{LB} \\
 -k \nabla T &= \vec{n} \cdot \vec{q}_{LB} + \vec{n} \cdot \vec{q}_{CONV} + \vec{n} \cdot \vec{q}_{RAD} \\
 \vec{n} \cdot \vec{q}_{LB}(x, t) &= \frac{\varphi(t)\eta}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r^2}{\sigma^2}\right)} \frac{|\vec{e} \cdot \vec{n}|}{\|\vec{e}\|} \quad \mu\epsilon \quad \sigma_x = \sigma = \frac{\mathcal{R}(t)}{3}, \quad \mathcal{R}(t) = \sqrt{r'^2_{LB} - (r'_{LB} - v_{LB} \cdot t)^2} \\
 r &= \frac{\|\vec{e} \times (\vec{x} - \vec{x}_{bo})\|}{\|\vec{e}\|} \quad \mu\epsilon \quad \varphi(t) = P \cdot norm\left(\frac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t^2}{\sigma'^2}\right)}\right) \quad \mu\epsilon \quad \sigma' = \frac{r'_{LB}}{3 \cdot v_{LB}} \quad \text{και} \quad r'_{LB} = \frac{3}{2} r_{LB}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

με d_z το στοιχειώδες πάχος του επιπέδου. Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει μια παρατήρηση σχετικά με τη χρήση της ακτίνας $r'_{LB} = 3/2 r_{LB}$. Σύμφωνα με τον ορισμό της ονομαστικής ακτίνας της δέσμης laser, ονομαστική ακτίνα ορίζεται η απόσταση από το κέντρο της δέσμης laser, στην οποία η ακτινοβολία ισούται με το 13.5% ($1/e^2$) της μέγιστης ακτινοβολίας. Ως εκ τούτου, και όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τυπική απόκλιση της αντίστοιχης κατανομής Gauss ισούται με το ήμισυ της ονομαστικής ακτίνας της δέσμης. Στη συγκεκριμένη περιγραφή της πηγής θερμότητας, μέσω αναλυτικής σχέσης, πρέπει να περιγραφεί η χρονική μεταβολή της ισχύος $\varphi(t)$ με μια κανονικοποιημένη κατανομή Gauss. Έτσι, προς αποφυγή περιττής πολυπλοκότητας, εισάγεται και χρησιμοποιείται η πραγματική φυσική ακτίνα r'_{LB} που έχει η δέσμη laser και ισούται με τα $3/2$ της ονομαστικής ακτίνας. Η συγκεκριμένη λεπτομέρεια αφορά αποκλειστικά τον τρόπο περιγραφής των οριακών συνθηκών και δεν έχει καμία επίδραση στα αποτελέσματα του μοντέλου, κρίθηκε όμως σκόπιμο να αναφερθεί προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε ασάφεια και παρανόηση σχετικά με την τυπική απόκλιση που χρησιμοποιείται στο 2D και 3D μοντέλο.

Η τυπική απόκλιση είναι ίδια, με τη διαφορά ότι στο 3D μοντέλο είναι $\sigma = \frac{r_{LB}}{2}$ ενώ στο 2D ισχύει $\sigma = \frac{3}{2} \frac{r_{LB}}{3}$. Στην Εικόνα 5.17 παρουσιάζεται διαγραμματικά η βασική ιδέα της χρήσης του 2D μοντέλου, η αναγωγή δηλαδή της 3D γεωμετρίας στη μελέτη ενός μόνο επιπέδου.



Εικόνα 5.17 Διαγραμματική απεικόνιση της βασικής ιδέα της χρήσης 2D μοντέλου

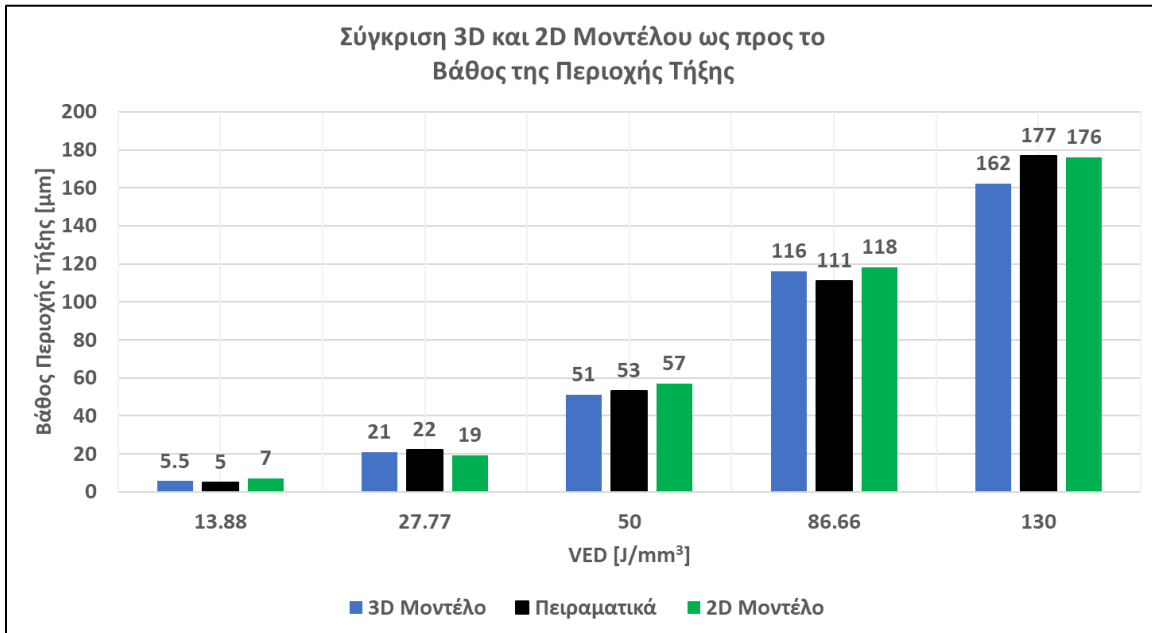
Η καταλληλότητα της χρήσης 2D μοντέλου για την εκτίμηση του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού ελέγχεται και επιβεβαιώνεται με σύγκριση των αποτελεσμάτων του 2D μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα και τα αντίστοιχα του 3D μοντέλου. Για τη σύγκριση των μοντέλων χρησιμοποιούνται οι συντελεστές επανασύνδεσης, όπως έχουν προκύψει και παρουσιαστεί στην ενότητα 5.2.1, με τα αποτελέσματα να αξιολογούνται ως προς το βάθος της περιοχής τήξης και το πλάτος της HAZ. Στον Πίνακα 5.3 συνοψίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα από το 2D και 3D μοντέλο, ενώ στις Εικόνες 5.18 και 5.19 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν.

Πίνακας 5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών, 3D μοντέλου και 2D μοντέλου

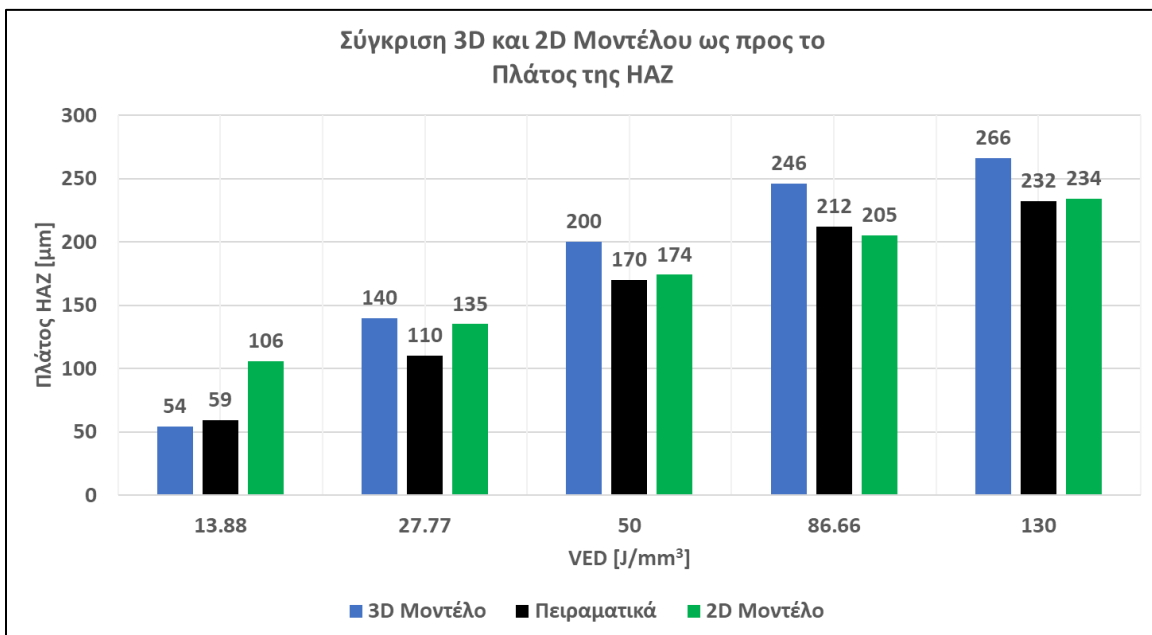
	VED [J/mm ³]	13.88	27.77	50	86.66	130
Βάθος Περιοχής Τήξης [μm]	Πειραματικά	5	22	53	111	177
	3D Μοντέλο	5.5	21	51	116	162
	2D Μοντέλο	7	19	57	118	176
Πλάτος HAZ [μm]	Πειραματικά	59	110	170	212	232
	3D Μοντέλο	54	140	200	246	266
	2D Μοντέλο	106	135	174	205	234

Αναφορικά με το βάθος της περιοχής τήξης (το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στο 3D μοντέλο ως κριτήριο καθορισμού του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού), παρατηρείται εξαιρετική σύγκλιση των αποτελεσμάτων του 2D και 3D μοντέλου, παρέχοντας σαφή ένδειξη για τη δυνατότητα και ορθότητα χρήσης του 2D μοντέλου στην εκτίμηση (αρχική έστω με μικρό περιθώριο σφάλματος) του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο μοντέλων παρατηρείται για VED 13.88 J/mm³, όταν η περιοχή τήξης βρίσκεται σε CM και ο συντελεστής επανασύνδεσης παίρνει την ακραία τιμή 0. Λαμβάνοντας όμως υπ' όψιν ότι, για τις συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας, η περιοχή τήξης βρίσκεται σε μια γενικότερη περιοχή «αστάθειας», με έντονα φαινόμενα ασυνέχειας και balling, είναι αναμενόμενη μια απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων ενός 3D μοντέλου και ενός 2D, καθώς το δεύτερο δε μπορεί να προβλέψει και να προσομοιώσει τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά και φαινόμενα. Ανατρέχοντας στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του 3D μοντέλου για τις συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας (Εικόνα 5.11), παρατηρείται σημαντική μεταβολή στο βάθος της περιοχής τήξης και στο πλάτος της HAZ, κατά μήκος του στοιχειώδους ίχνους, γεγονός που φυσικά δε μπορεί να αποτυπωθεί σε ένα 2D μοντέλο. Έτσι, η διαφορά στο βάθος της περιοχής τήξης και η αντίστοιχη απόκλιση που παρατηρείται στα αποτελέσματα του πλάτους της HAZ είναι αναπόφευκτη, καθώς, οι τιμές που προκύπτουν από το 2D μοντέλο, μπορούν να θεωρηθούν «μέση τιμή» για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής τήξης που στην

πραγματικότητα δεν είναι σταθερά. Ως ένα τελευταίο σχόλιο, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά κανόνα το 2D μοντέλο υποδιασασιολογεί, σε σχέση με το 3D, το πλάτος της HAZ, με τα αποτελέσματα όμως να είναι πιο κοντά στα πειραματικά. Έτσι, ως γενικό συμπέρασμα, μπορεί να ειπωθεί ότι παρά την εγγενή δυσκολία να αναχθεί ένα φυσικό σύστημα κινούμενης πηγής θερμότητας με χωρική κατανομή Gauss σε 2D μοντέλο, κρίνεται επιτυχημένη και ενδεδειγμένη η χρήση του προτεινόμενου 2D μοντέλου για την εκτίμηση του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού, με κριτήριο σύγκλισης το βάθος της περιοχής τήξης, ενώ σημειώνεται η πιθανότητα για πιο ακριβή προσδιορισμό (fine tuning), όταν εφαρμοστεί ο συγκεκριμένος συντελεστής σε ένα 3D μοντέλο



Εικόνα 5.18 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών, 3D μοντέλου και 2D μοντέλου ως προς το βάθος της περιοχής τήξης



Εικόνα 5.19 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών, 3D μοντέλου και 2D μοντέλου ως προς το πλάτος της HAZ

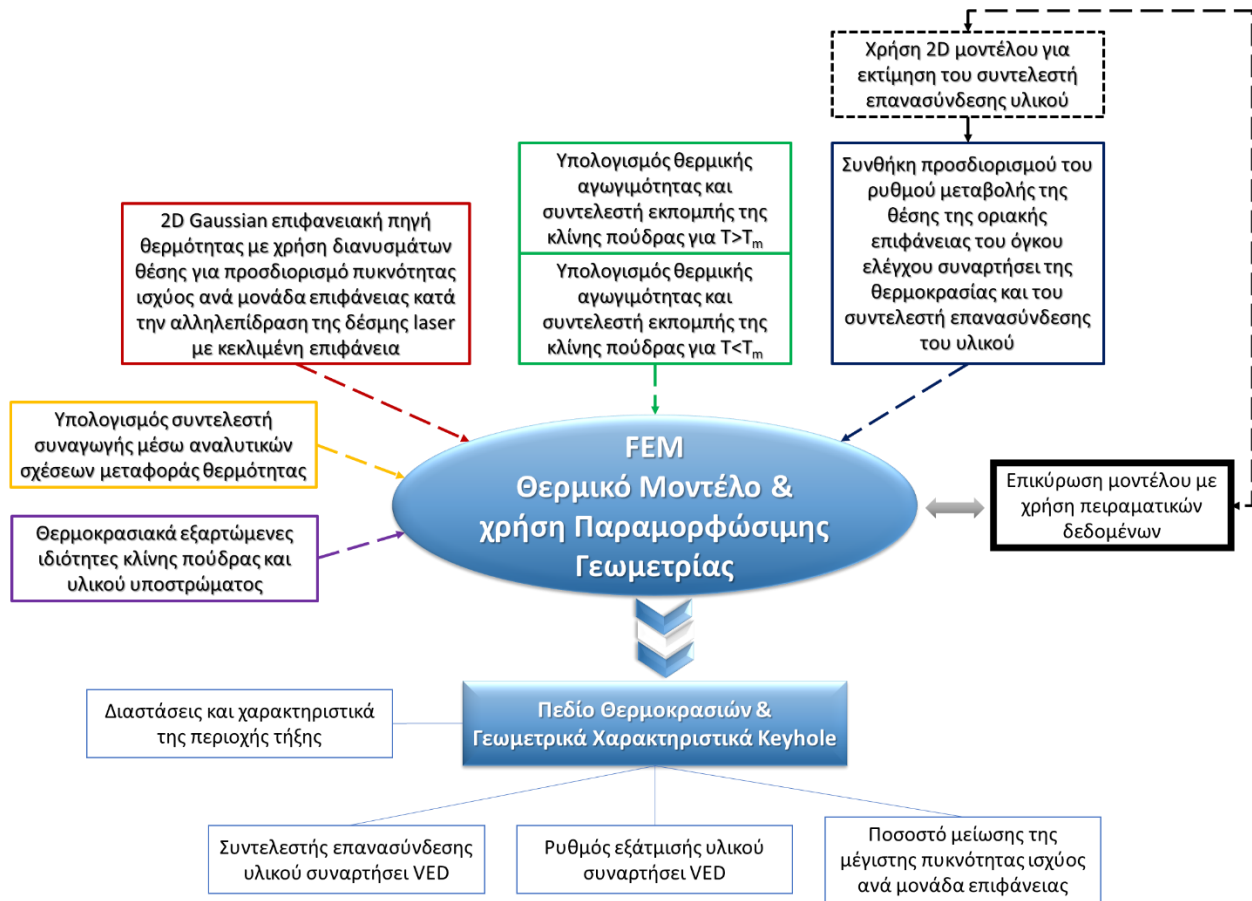
5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται το 5^ο κεφάλαιο, κατά το οποίο αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε μέθοδος μοντελοποίησης της περιοχής τήξης για CM, TM και KM. Με στόχο τον περιορισμό των βαθμών ελευθερίας του μοντέλου και τη μη επίλυση των διαφορικών εξισώσεων ρευστομηχανικής, προτείνεται και πάλι η χρήση ενός αμιγώς θερμικού μοντέλου συνδυαζόμενο με παραμορφώσιμη γεωμετρία, η οποία προσομοιώνει την εξάτμιση υλικού και τη δημιουργία keyhole. Στο συγκεκριμένο θερμικό μοντέλο, η δέσμη laser μοντελοποιείται με τη χρήση επιφανειακής 2D πηγής θερμότητας κατανομής Gauss, ενώ με την κατάλληλη χρήση διανυσμάτων θέσης, συνυπολογίζεται η μεταβολή της πυκνότητας ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας, συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης. Η παραμόρφωση της γεωμετρίας, η οποία προσομοιώνει την εξάτμιση του υλικού, ελέγχεται μέσω συνθήκης προσδιορισμού του ρυθμού μεταβολής της θέσης (ήτοι της ταχύτητας) της οριακής επιφάνειας του όγκου ελέγχου, με την ταχύτητα να ορίζεται συναρτήσει της θερμοκρασίας και του συντελεστή επανασύνδεσης του υλικού. Ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού ουσιαστικά εκφράζει την ένταση της εξάτμισης που λαμβάνει χώρα, λόγω των συνθηκών κατεργασίας, και είναι η μοναδική ημι-εμπειρική παράμετρος που χρήζει προσδιορισμού. Η επικύρωση του μοντέλου γίνεται με βάση πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας και αξιολογείται ως προς το βάθος της περιοχής τήξης και το βάθος και πλάτος της HAZ.

Συμπερασματικά, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων:

- επιβεβαιώνεται η καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθόδου για τη μοντελοποίηση της κατεργασίας, για ένα ευρύ φάσμα VED και ενώ η περιοχή τήξης βρίσκεται σε CM, TM και KM.
- εκτός από τα προαναφερθέντα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης (βάθος της περιοχής τήξης και το βάθος και πλάτος της HAZ), το μοντέλο δύναται να προβλέψει και λοιπά χαρακτηριστικά, όπως τον σχηματισμό balling και ασυνέχειας για τη χαμηλότερη VED, την εμφάνιση «αστάθειας» στην αρχή της διαδρομής της δέσμης laser, διακυμάνσεις στο βάθος της περιοχής τήξης κατά το TM και τοπικές «αστάθειες» στα τοιχώματα του keyhole.
- μπορεί να εκτιμηθεί ο μέσος ρυθμός εξάτμισης υλικού συναρτήσει των συνθηκών κατεργασίας, και το ποσοστό μείωσης της μέγιστης πυκνότητας ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας, λόγω της αλληλεπίδρασης της δέσμης laser με την κεκλιμένη επιφάνεια των τοιχωμάτων του keyhole.
- από τον προσδιορισμό του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού, για τις διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας, προκύπτει ο σαφής συσχετισμός του με την VED, και προτείνεται γραμμική σχέση με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 > 0.93$. Επίσης, προτείνεται εκθετική σχέση συσχέτισης του μέσου ρυθμού εξάτμισης υλικού συναρτήσει της VED, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 > 0.97$.
- καθώς ο προσδιορισμός του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού γίνεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία τείνει να απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ και χρόνο όταν εφαρμόζεται σε ένα 3D μοντέλο, προτείνεται η χρήση ενός 2D μοντέλου, για τον ταχύτερο υπολογισμό του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού. Το φυσικό σύστημα ανάγεται σε 2D και προσομοιώνεται ένα κάθετο επίπεδο της περιοχής τήξης, ενώ η κινούμενη δέσμη laser προσεγγίζεται από πηγή θερμότητας κατανομής Gauss μεταβαλλόμενης ισχύος και διαμέτρου. Η δυνατότητα και ορθότητα χρήσης του 2D μοντέλου ελέγχεται και επιβεβαιώνεται με σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του 2D μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αντίστοιχα του 3D μοντέλου. Συμπεραίνεται η καταλληλότητα χρήσης του 2D μοντέλου, ενώ προκύπτει μια αναμενόμενη μικρή απόκλιση μόνο για την ακραία χαμηλή τιμή VED (και αντίστοιχα του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού), όπου η περιοχή τήξης δεν έχει σταθερό βάθος και πλάτος και ως εκ τούτου δικαιολογείται μια διαφοροποίηση ανάμεσα σε αποτελέσματα ενός 2D μοντέλου και ενός 3D μοντέλου.

Τα προαναφερθέντα βασικά στοιχεία της προτεινόμενης μεθόδου παρουσιάζονται διαγραμματικά στην Εικόνα 5.20.



Εικόνα 5.20 Βασικά βήματα και στοιχεία της προτεινόμενης μεθοδολογίας

6. ΘΕΡΜΟΪΔΡΑΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στα κεφάλαια 4 και 5 παρουσιάστηκαν αμιγώς θερμικά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν το σχηματισμό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης, για περιπτώσεις CM, TM και KM. Όπως έχει προαναφερθεί, το βασικό τους πλεονέκτημα, σε σχέση με τα αντίστοιχα θερμοϋδραυλικά μοντέλα, είναι οι εξαιρετικά χαμηλότερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο, καθώς δεν επιλύονται οι εξισώσεις ρευστομηχανικής, περιορίζοντας έτσι σημαντικά τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος. Ταυτόχρονα όμως με τις αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο, κατά την ανάπτυξη ενός ρεαλιστικού και ακριβούς θερμοϋδραυλικού μοντέλου, πρέπει να ξεπεραστεί και μια σειρά από εγγενείς «δυσκολίες» και «προκλήσεις», οι οποίες άπτονται της φύσης και της πολυπλοκότητας του προς μελέτη συστήματος. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παρουσίαση των «προβλημάτων» που παρουσιάζονται κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM με FEM, όταν επιλύονται και οι εξισώσεις ρευστομηχανικής, ενώ θα προταθούν μέθοδοι και τρόποι αντιμετώπισής τους.

Η σημαντικότερη, ίσως, δυσκολία που προκύπτει κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM με FEM, όταν επιλύονται και οι εξισώσεις ρευστομηχανικής, είναι η ρεαλιστική προσομοίωση και απόδοση των διαφορετικών φάσεων και «συμπεριφορών» του υλικού. Συγκεκριμένα, η περιοχή τήξης αποτελείται από υλικό σε υγρή μορφή με σχετικά χαμηλό ιξώδες, την οποία διαδέχεται μια μεταβατική περιοχή, με το υλικό να βρίσκεται σε ημίρρευστη φάση και με υψηλότερο ιξώδες, ενώ, τέλος, υπάρχει υλικό σε στερεά μορφή, το οποίο περιβάλλει τις προαναφερθείσες φάσεις. Συνήθως, κατά τη μοντελοποίηση ενός συστήματος, οι διαφορετικές φάσεις είθισται να προσεγγίζονται από διαφορετικούς όγκους ελέγχου, με διαφορετικές ιδιότητες και κατάλληλες οριακές συνθήκες. Στην περίπτωση, όμως, της προσομοίωσης της κατεργασίας SLM, η διεπιφάνεια των φάσεων του υλικού δεν είναι σταθερή και προκαθορισμένη αλλά δυναμική, ήτοι δε δύναται να ορισθούν εξ αρχής συγκεκριμένοι και διαφορετικοί όγκοι ελέγχου με διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες. Τα όρια ανάμεσα στο τηγμένο υλικό, το υλικό σε ημίρρευστη φάση και το στερεό υλικό μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου, με τρόπο άγνωστο, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζουν και επηρεάζονται από την εξέλιξη του θερμοκρασιακού προφίλ. Με δεδομένο λοιπόν ότι υποχρεωτικά ορίζεται ένας ενιαίος όγκος ελέγχου, πρέπει, με κατάλληλες μεθόδους, να μοντελοποιείται και να προσομοιώνεται η διαφορετική ρεολογική συμπεριφορά των φάσεων, δηλαδή το ρευστό και ημίρρευστο υλικό να κινούνται «ελευθέρα» εντός της περιοχής τήξης, σύμφωνα με τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ορμής, ενώ το υλικό σε στερεά μορφή να έχει μηδενική ταχύτητα, οριοθετώντας και περιορίζοντας έτσι την κίνηση του ρευστού εντός της περιοχής τήξης.

Μια επιπλέον δυσκολία είναι η εξαιρετικά πολύπλοκη πλέον κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας της περιοχής τήξης. Η κίνησή της ορίζεται από την εξάτμιση υλικού, την επίδραση της πίεσης ανάκρουσης, την ανάπτυξη τριχοειδών δυνάμεων λόγω καμπυλότητας και βαθμίδας θερμοκρασίας, και τέλος την επίδραση της βαρύτητας, η οποία γίνεται εξαιρετικά έντονη όταν η γεωμετρία της περιοχής τήξης αποκτά τοιχώματα και όρια μεγάλης κλίσης. Υπό την επίδραση των προαναφερθέντων φαινομένων – δυνάμεων, η ελεύθερη επιφάνεια τείνει να παραμορφώνεται σημαντικά και απρόβλεπτα, απαιτώντας τον ιδιαίτερα προσεκτικό ορισμό οριακών συνθηκών. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται, η ρεαλιστική πιθανότητα, μέρος της ελεύθερης επιφάνειας, προσωρινά να «αναδιπλωθεί», με αποτέλεσμα, τμήματα της ελεύθερης επιφάνειας να μη δύνανται να προσλάβουν θερμότητα από την επίδραση της δέσμης laser. Ταυτόχρονα, με δεδομένο ότι λαμβάνονται υπ' όψιν οι τριχοειδείς επιφανειακές τάσεις λόγω καμπυλότητας της επιφάνειας, θα πρέπει η μεταβολή της γεωμετρίας – κίνησή της να είναι κατά το δυνατόν ομαλή, αποφεύγοντας μη ρεαλιστικές και έντονες καμπυλότητες. Η έντονη παραμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας συνεπάγεται τη δυσκολία, επίσης, επίλυσης του συστήματος με χρήση επιπέδου συμμετρίας, καθώς οι οριακές συνθήκες συμμετρίας θα έπρεπε να ορισθούν σε ένα «ιδεατό» μέσο επίπεδο, το οποίο δε μπορεί να ορισθεί εξ αρχής.

Τέλος, η συνεχής πλεγματική φύση της μεθόδου FEM αποτελεί έναν εγγενή περιορισμό και δυσκολία στη μοντελοποίηση της κατεργασίας, κατά την οποία εξ ορισμού λαμβάνουν χώρα φαινόμενα αποκόλλησης και διαχωρισμού υλικού. Είναι γνωστό ότι κατά την κατεργασία SLM, και ιδιαίτερα όταν το σύστημα βρίσκεται σε TM και KM, λόγω των υψηλών πιέσεων που αναπτύσσονται τοπικά, σταγονίδια τηγμένου υλικού αποκολλώνται και εκτοξεύονται από την περιοχή τήξης. Το φαινόμενο αυτό, προφανώς, επηρεάζει σημαντικά το σύστημα, δεδομένου ότι αν και η συνολική μάζα και ενέργεια του συστήματος παραμένουν σταθερές, η εκτίναξη υλικού δημιουργεί τοπικά νέες ελεύθερες επιφάνειες, καινούργιας γεωμετρίας - καμπυλότητας, και με διαφορετικά προφίλ ταχύτητας, πίεσης και θερμοκρασίας. Σε ένα μοντέλο FEM συνεχούς πλέγματος, η ασυνέχεια που προκαλείται κατά την αποκόλληση υλικού δε μπορεί να προσομοιωθεί, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται περιοχές υψηλής ταχύτητας, που υποδηλώνουν τη ρεαλιστική πιθανότητα, στο πραγματικό φυσικό σύστημα, να λάβει χώρα εκτίναξη υλικού, οι οποίες όμως, κατά την προσομοίωση, παραμένουν προσκολλημένες και μέρος του αρχικού όγκου ελέγχου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία προβλημάτων σύγκλισης, καθώς επικρατούν τοπικά ακραίες οριακές συνθήκες.

Κατά συνέπεια, στο παρόν κεφάλαιο, επιχειρείται η θερμοϋδραυλική μοντελοποίηση του συστήματος, με στόχο τη ρεαλιστική απόδοση των φαινομένων και χαρακτηριστικών του συστήματος, και περιορισμό / καταγραφή των προβλημάτων σύγκλισης, που αναπόφευκτα προκύπτουν. Τα βασικά βήματα της μεθόδου και χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι:

- με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 5, αναπτύσσεται αμιγώς θερμικό μοντέλο παραμορφώσιμης γεωμετρίας και υπολογίζεται ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού για τις συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας που επιλέχθηκαν
- πραγματοποιείται η επιβεβαίωση του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού μέσω των 2D και 3D θερμικών μοντέλων, με βάση τα πειραματικά δεδομένα από την εργασία των Balbaa et al. (2020)
- ενσωματώνονται οι εξισώσεις ρευστομηχανικής, όπου λαμβάνονται υπ' όψιν η πίεση ανάκρουσης και η ανάπτυξη επιφανειακών τριχοειδών τάσεων λόγω καμπυλότητας και βαθμίδας θερμοκρασίας
- η παραμορφώσιμη γεωμετρία ακολουθεί και αποτυπώνει πλέον, εκτός από την εξάτμιση του υλικού, και την κίνησή του ρευστού λόγω των ρευστομηχανικών φαινομένων
- προτείνονται μέθοδοι ρεαλιστικής μοντελοποίησης των διαφορετικών φάσεων του υλικού
- επιλύεται το θερμοϋδραυλικό, πλέον, μοντέλο και παρατηρούνται – σχολιάζονται προβλήματα σύγκλισης που προκύπτουν από τη χρήση συνεχούς πλέγματος και της μεθόδου FEM

6.1 ΘΕΡΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

Με βάση την εργασία των Balbaa et al. (2020), τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κράμα νικελίου IN718, με πούδρα μέσης διαμέτρου 30 μm και σε περιβάλλον αζώτου. Η δέσμη laser του συστήματος SLM είχε ονομαστική διάμετρο 100 μm , και το ονομαστικό πάχος στρώσης ήταν 40 μm . Στη συγκεκριμένη εργασία, καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα από διαφορετικές ισχύς και ταχύτητες σάρωσης της δέσμης laser, με την κατεργασία να βρίσκεται από CM έως KM, ανάλογα με την εκάστοτε VED. Για το συγκεκριμένο μοντέλο, επιλέγεται ονομαστική ισχύς 320 W και ταχύτητα σάρωσης 1200 mm/s, συνδυασμός παραμέτρων που, αν και σχηματίζουν περιοχή τήξης μη ακραίων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, επιτρέπουν την εξάτμιση υλικού (δηλαδή $\beta_R \neq 1$), ώστε να είναι δικαιολογημένη η μοντελοποίηση της απομάκρυνσης υλικού λόγω εξάτμισης, και ο υπολογισμός της επίδραση από την ανάπτυξη της προβλεπόμενης πίεσης ανάκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία τους οι Balbaa et al. (2020) αναφέρουν, ότι για τις συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας, η περιοχή τήξης βρίσκεται σε KM χωρίς όμως ακραία αναλογία

βάθους προς πλάτος (severe Keyhole), με το βάθος να ορίζεται ανάμεσα σε 50 και 75 μm και πλάτος από 80 έως 112 μm ¹⁸.

Όπως προαναφέρθηκε, το αμιγώς θερμικό μοντέλο βασίζεται στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5 (οι εξισώσεις δεν παρατίθενται εκ νέου, καθώς κρίνεται πως δεν προσθέτουν κάποια νέα πληροφορία). Είναι όμως σημαντικό να γίνει μια σύντομη αναφορά στον συντελεστή απορρόφησης που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και στη μέθοδο «εξομάλυνσης» της ελεύθερης επιφάνειας.

Αρχικά, και όπως έχει ήδη αναφερθεί στην βιβλιογραφική ανασκόπηση του κεφαλαίου 3 και στον Πίνακα 3.1, οι τιμές του συντελεστή απορρόφησης που χρησιμοποιούνται κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας SLM, για κράμα IN718, παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις και κυμαίνονται από 30 έως και 80%. Προφανώς, αυτό προκύπτει και μπορεί να δικαιολογηθεί από τις διαφορετικές παραδοχές του εκάστοτε μοντέλου, παραμένει όμως ασαφής η τιμή απορρόφησης που περιγράφει ρεαλιστικά το σύστημα, ενώ καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη η παρουσίαση ενός πιο γενικού μοντέλου. Στην εργασία των Khorasani et al. (2022) γίνεται μια προσπάθεια συσχέτισης του ποσοστού απορρόφησης με την ονομαστική ισχύ και ταχύτητα σάρωσης της δέσμης laser, όμως τα προτεινόμενα μοντέλα συσχέτισης δεν περιέχουν σημαντικές παραμέτρους, όπως τη διάμετρο της δέσμης laser και τα χαρακτηριστικά της κλίνης πούδρας. Προκειμένου να καταστεί το μοντέλο κατά το δυνατόν πιο γενικό και να αποφευχθεί αυθαίρετη και μη επαρκώς αιτιολογημένη επιλογή συντελεστή απορρόφησης, επιλέγεται η χρήση των δεδομένων από την εργασία του Siegel (Siegel, 1976) για την απορρόφηση από τηγμένο νικέλιο, σε θερμοκρασίες υψηλότερες του σημείου τήξης. Έτσι προκύπτει το ποσοστό απορρόφησης συναρτήσει της θερμοκρασίας:

$$\eta = \begin{cases} T \leq T_m \rightarrow 0.35 \\ T_m < T < T_v \rightarrow 0.35 + 26.7247 \cdot 10^{-5} (T - T_m) \\ T \geq T_v \rightarrow 0.77145 \end{cases} \quad (6.1)$$

Σχετικά με την «εξομάλυνση» της ελεύθερης επιφάνειας, στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε μέθοδος, κατά την οποία το κάθετο διάνυσμα της ταχύτητας «προσαρμόζεται – εξομαλύνεται» ελαφρώς, συναρτήσει της μέσης τοπικής καμπυλότητας και το μέγεθος του πλέγματος. Πλέον, το κάθετο διάνυσμα της ταχύτητας κάθε στοιχείου του πλέγματος μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned} -\vec{n} \cdot \mathbf{v}_{total} &= -\vec{n} \cdot (\mathbf{v}_{mesh} + \mathbf{v}_{sm}) \\ \mathbf{v}_{sm} &= \delta_{sm} \cdot |\mathbf{v}_{mesh}| \cdot ES \cdot MC \end{aligned} \quad (6.2)$$

με δ_{sm} αδιάστατο συντελεστή (τυπική τιμή 0.5), ES το μέγεθος του στοιχείου του πλέγματος σε [m], και MC τη μέση καμπυλότητα σε [1/m], η οποία ορίζεται ως:

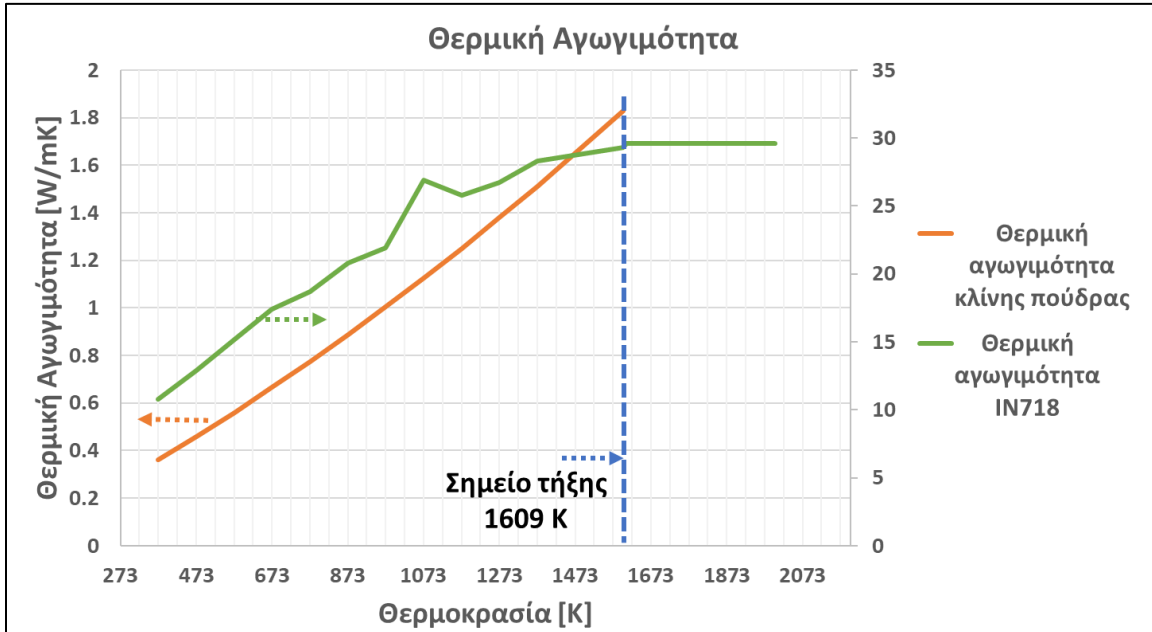
$$MC = -\frac{1}{2} \nabla_T \vec{n} \quad (6.3)$$

και ∇_T η κλίση επιφάνειας (surface gradient).

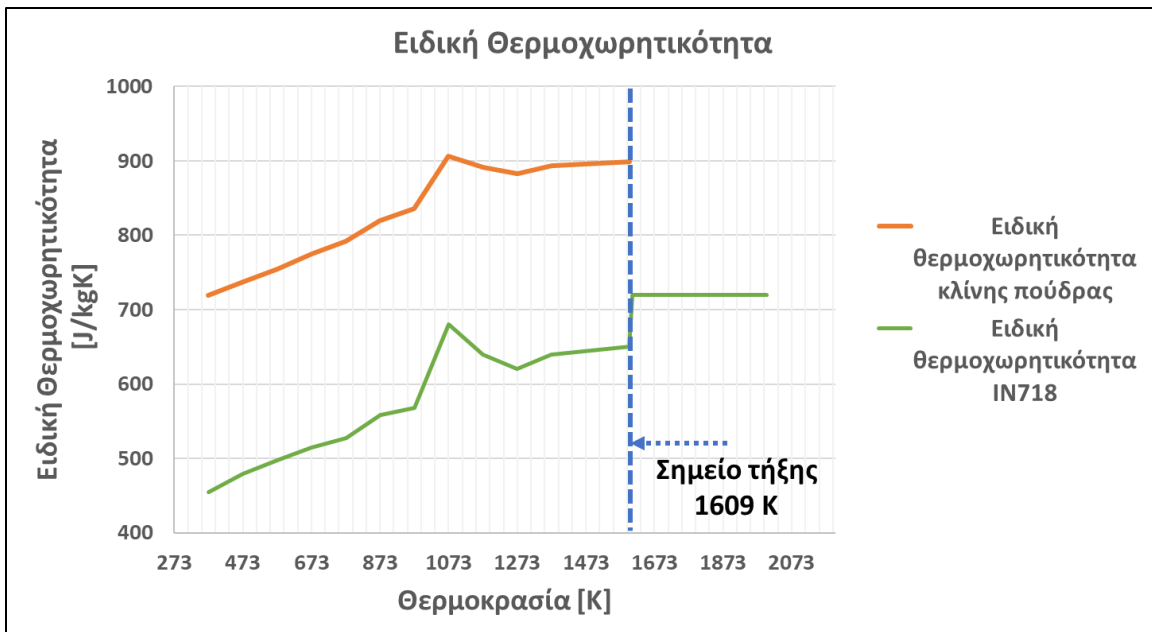
Οι θερμοφυσικές ιδιότητες της κλίνης πούδρας (εκτός της θερμικής αγωγιμότητας) ορίζονται και πάλι με βάση το νόμο των μειγμάτων (βλ. εξίσωση 4.6), ενώ η θερμική αγωγιμότητα σύμφωνα με το μοντέλο των Zehner και

¹⁸ Οι τιμές του βάθους και πλάτους της περιοχής τήξης παρουσιάζουν τη συγκεκριμένη διακύμανση, καθώς αποτελούν την αποδελτίωση των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης εργασίας. Οι μεγαλύτερες τιμές (75 και 112 μm) παρατίθενται σε γράφημα αποτελεσμάτων, ενώ οι μικρότερες (50 και 80 μm) προέρχονται από την άμεση απεικόνιση της περιοχής τήξης. Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας προφανώς ως δεδομένη και μη αμφισβητώμενη την ορθότητα της εργασίας, το εύρος αυτό τιμών εξηγείται και δικαιολογείται από το σχηματισμό περιοχής τήξης μη σταθερού πάχους, φαινόμενο άλλωστε που συναντάται συχνά στην αντίστοιχη βιβλιογραφία (Khorasani et al., 2022).

Schlunder (βλ. εξισώσεις 4.7 – 4.12). Στην Εικόνα 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα του συμπαγούς κράματος IN718 και της κλίνης πούδρας αντίστοιχα, ενώ στον Πίνακα 6.1 συνοψίζονται οι βασικές θερμοφυσικές ιδιότητες του κράματος IN718 και του αζώτου που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο σύμφωνα με δεδομένα της βιβλιογραφίας (Mills, 2002; Queva *et al.*, 2020) και τις βιβλιοθήκες δεδομένων του λογισμικού FEM.

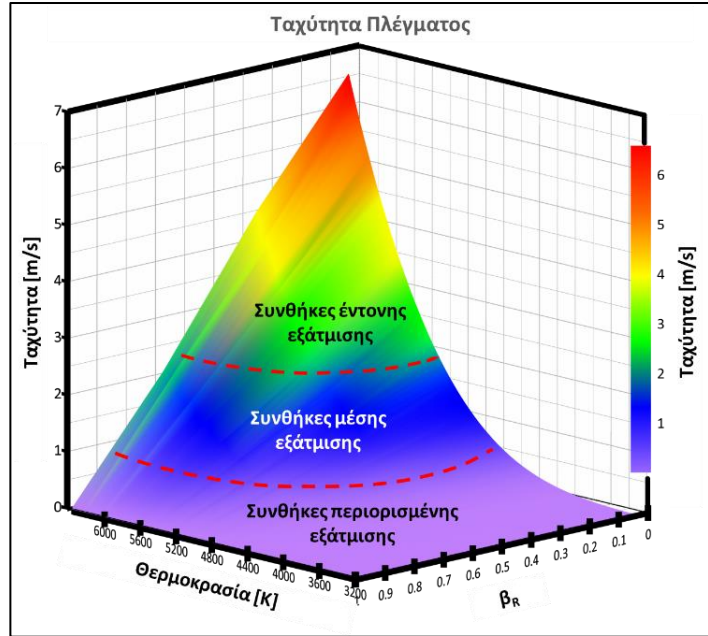


Εικόνα 6.1 Θερμική αγωγιμότητα κλίνης πούδρας και IN718



Εικόνα 6.2 Ειδική θερμοχωρητικότητα κλίνης πούδρας και IN718

Τέλος, στην Εικόνα 6.3, παρατίθεται ο «χάρτης» τιμών της ταχύτητας πλέγματος του κράματος IN718 συναρτήσει της θερμοκρασίας και για διαφορετικές τιμές β_R . Παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες είναι ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές που υπολογίστηκαν για το κράμα τιτανίου Ti6Al4V (Εικόνα 5.5), γεγονός που οφείλεται στις συγκρίσιμες θερμοφυσικές ιδιότητες των δύο κραμάτων (αναφορικά με αυτές που περιλαμβάνονται στον υπολογισμό του ρυθμού εξάτμισης υλικού).

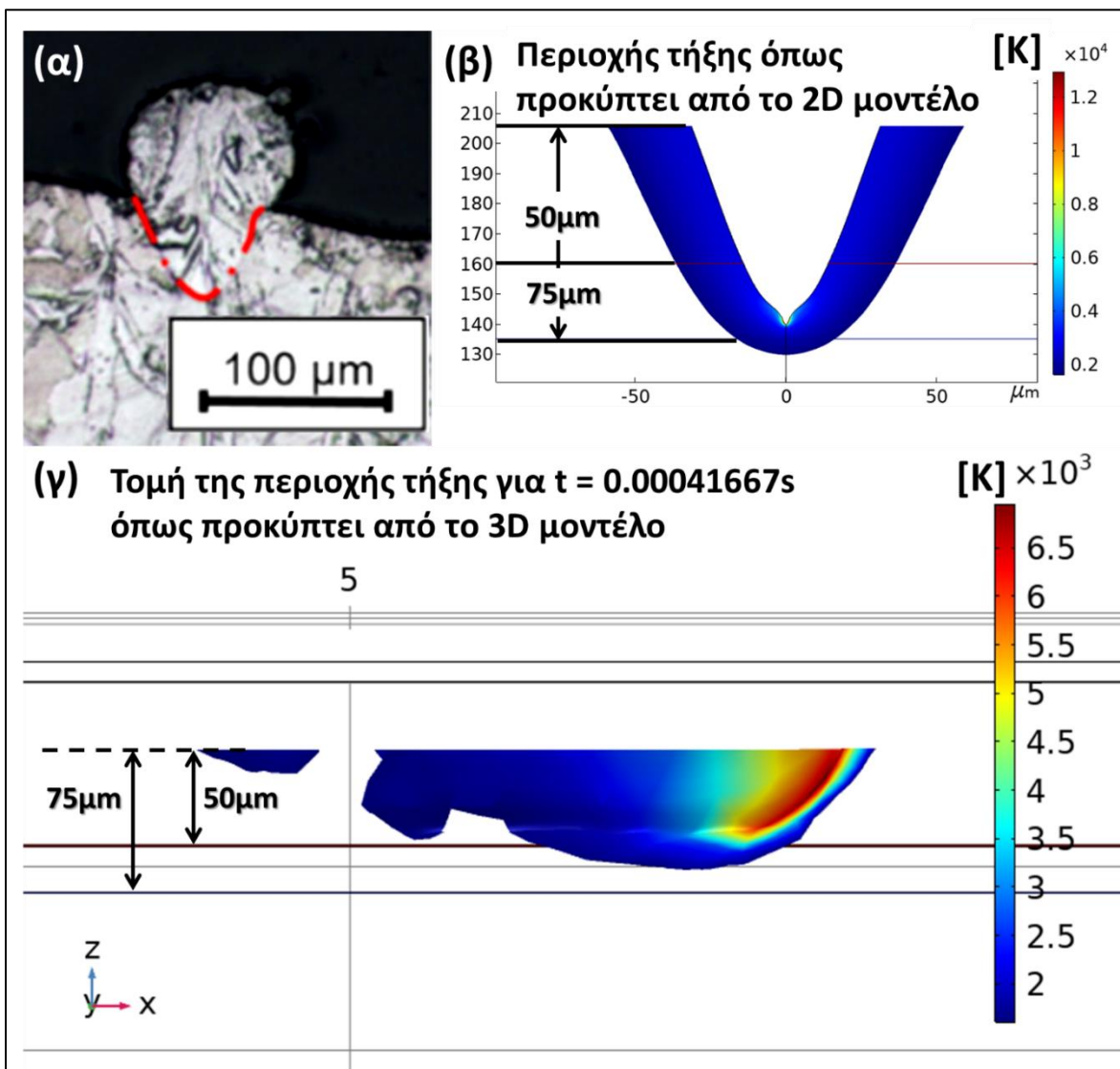


Εικόνα 6.3 «Χάρτης» τιμών της ταχύτητας πλέγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για διαφορετικές τιμές β_R για IN718

Πίνακας 6.1 Βασικές θερμοφυσικές ιδιότητες

Υλικό	Θερμοφυσικό Μέγεθος	Θερμοκρασία κό εύρος [K]	Έκφραση
IN718	Πυκνότητα [kg/m ³]	273 – 1609	8190 - 0.392(T - 298.15)
		1609 – 3186	7400 - 0.88(T - 1609.15)
	Ειδική Θερμοχωρητικότητα [J/kgK]	273 – 1609	20.22T + 439.15
		1609 – 3186	720
	Θερμική Αγωγιμότητα [W/mK]	273 – 1609	$\approx -0.076T^2 + 2.6874T + 7.8469$
		1609 – 3186	29.6
	Ιξώδες [Pa·s]	1609 – 3186	$0.001 \cdot 0.196 \cdot \exp(5848/T)$
Λανθάνουσα Θερμότητα Τήξης [kJ/kg]	1609	270	
Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης [kJ/kg]	3186	6300	
Επιφανειακή Τάση [N/m]	1609 – 3186	$1.842 - 0.00011(T - 1998)$	
Άζωτο	Πυκνότητα [kg/m ³]	100 – 200	1.5565
		200 – 1200	$3.007 - 0.009876T + (1.521E-5) T^2 - (1.105E-8) T^3 + (3.048E-12) T^4$
		T > 1200	0.2877
	Ειδική Θερμοχωρητικότητα [J/kgK]	100 – 200	1051.6
		200 – 1200	$1128 - 0.6131T + 0.001322T^2 - (8.533E-7) T^3 + (1.844E-10) T^4$
		T > 1200	1203.2
	Θερμική Αγωγιμότητα [W/mK]	100 – 200	0.0183
		200 – 1200	$8.439E-5 + 0.0001006T - (5.027E-8) T^2 + (1.837E-11) T^3 - (4.006E-15) T^4$
		T > 1200	0.0718

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 και 5, σχετικά με τη διακριτοποίηση του όγκου ελέγχου, στο 3D μοντέλο χρησιμοποιήθηκε πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων μεταβλητής πυκνότητας. Συγκεκριμένα, στην επιφάνεια πρόσπτωσης της δέσμης laser και εξάτμισης του υλικού εφαρμόστηκε πλέγμα υψηλότερης πυκνότητας, με μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος στοιχείων $35\mu\text{m}$ και $1.5\mu\text{m}$, αντίστοιχα, ενώ στον υπόλοιπο όγκο ελέγχου, πλέγμα χαμηλότερης πυκνότητας. Δεδομένου ότι η περιοχή τήξης μεταβαίνει σχετικά σύντομα σε σταθερή φάση, δεν προκύπτει η ανάγκη για ορισμό όγκου ελέγχου μεγάλων διαστάσεων και αυξημένου αριθμού στοιχείων ($1000 \times 200 \times 300 \mu\text{m}$ με 13989 στοιχεία), και ως εκ τούτου, δε χρησιμοποιήθηκε κατά την επίλυση επίπεδο συμμετρίας στο 3D μοντέλο. Αντίθετα, στο 2D μοντέλο, το οποίο στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε και για την επίλυση των συζευγμένων εξισώσεων θερμο-ρευστομηχανικής, έγινε χρήση επιπέδου συμμετρίας ώστε να περιοριστούν οι βαθμοί ελευθερίας, ενώ για τη διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά στοιχεία ομοιόμορφης πυκνότητας. Στην Εικόνα 6.4 παρουσιάζεται η περιοχή τήξης α) από πειραματικά αποτελέσματα (Balbaa et al., 2020), β) όπως προκύπτει από το 2D μοντέλο και γ) όπως προκύπτει από το 3D μοντέλο.



Εικόνα 6.4 Περιοχή τήξης α) πειραματικά αποτελέσματα (Balbaa et al., 2020), β) όπως προκύπτει από το 2D μοντέλο και γ) όπως προκύπτει από το 3D μοντέλο

Ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού β_R προσδιορίστηκε 0.75, με τα αποτελέσματα του 2D και 3D μοντέλου να βρίσκονται σε απόλυτη σύγκλιση, γεγονός που επιβεβαιώνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η 2D προσέγγιση για τον άμεσο υπολογισμό και εκτίμηση βασικών χαρακτηριστικών της περιοχής τήξης. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι για τις συγκεκριμένες συνθήκες που επιλέχθηκαν ($VED = 66.66 \text{ J/mm}^3$), το β_R που υπολογίζεται με χρήση της εξίσωσης 5.6, είναι 0.55. Συγκρίνοντας τους συντελεστές επανασύνδεσης για τα δύο διαφορετικά κράματα (τιτανίου και νικελίου) παρατηρείται, αν και προβλέπεται σύμφωνα με το β_R η περιοχή τήξης να βρίσκεται σε παρόμοιο mode (KM), οι συντελεστές να διαφέρουν, λόγω των διαφορετικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων αλλά και των διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων από τις οποίες δύναται να προκύψουν ισοδύναμες VED. Τονίζεται, λοιπόν, η σημασία του να υπολογίζεται προσεχτικά ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού για κάθε κράμα ή κραματική ομάδα ξεχωριστά, ενώ επαναλαμβάνεται η επισήμανση ότι αν και η VED αποτελεί έναν ιδιαίτερα εύχρηστο δείκτη, πρέπει να χρησιμοποιείται προσεχτικά για τον χαρακτηρισμό της κατεργασίας, καθώς, λόγω της δευτερογενούς και μη μονοσήμαντης φύσης της, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

6.2 ΘΕΡΜΟΪΔΡΑΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι θερμο-ρυστομηχανικές καταστατικές εξισώσεις που περιγράφουν την περιοχή τήξης σε ένα σύστημα SLM, ενώ θα δοθεί έμφαση στις εγγενείς ιδιαιτερότητες και δυσκολίες που προκύπτουν κατά τη μοντελοποίηση. Στόχος είναι να προταθεί και να παρουσιαστεί μια κατά το δυνατόν απλή αλλά και συνεπής μεθοδολογία μοντελοποίησης, η οποία θα λαμβάνει υπ' όψιν τα φυσικά φαινόμενα και μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα, ενώ ταυτόχρονα θα «αντιμετωπίζει» με τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο τις προαναφερθείσες ιδιαιτερότητες. Με δεδομένο ότι έχει ελεγχθεί και αποδειχθεί ότι το 2D μοντέλο αποτελεί μια ρεαλιστική προσέγγιση, με σημαντικά χαμηλότερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο, και συνυπολογίζοντας ότι ένα θερμοϋδραυλικό μοντέλο έχει εξ' ορισμού σημαντικά περισσότερες απαιτήσεις από κάθε αντίστοιχο θερμικό (λόγω περισσότερων εξαρτημένων μεταβλητών και άρα βαθμών ελευθερίας), η μεθοδολογία μοντελοποίησης θα αναπτυχθεί και θα παρουσιαστεί με βάση το 2D μοντέλο.

Αρχικά, το σύστημα θα περιγραφεί από τη σύζευξη και επίλυση των καταστατικών εξισώσεων μετάδοσης θερμότητας και των εξισώσεων ρυστομηχανικής, για τη διατήρηση της μάζας και της ορμής. Οι εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας είναι παρόμοιες με αυτές που έχουν ήδη παρουσιαστεί (εξίσωση 5.8), προστίθεται, όμως, ο όρος της μετάδοσης θερμότητας, λόγω της κίνησης του ρευστού. Έτσι η εξίσωση 5.8 μετασχηματίζεται σε:

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (d_z k \nabla T) + \underbrace{d_z \rho C_p \vec{v} \cdot \nabla T}_{\substack{\text{μετάδοση} \\ \text{θερμότητας} \\ \text{λόγω κίνησης} \\ \text{ρευστού}}} = d_z \dot{Q}_{LB}$$

$$-k \nabla T = \vec{n} \cdot \vec{q}_{LB} + \vec{n} \cdot \vec{q}_{CONV} + \vec{n} \cdot \vec{q}_{RAD} \quad (6.4)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{q}_{LB}(x, t) = \frac{\wp(t)\eta}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r^2}{\sigma^2}\right)} \frac{|\vec{e} \cdot \vec{n}|}{\|\vec{e}\|} \quad \mu\epsilon \quad \sigma_x = \sigma = \frac{\mathcal{R}(t)}{3}, \quad \mathcal{R}(t) = \sqrt{r'_{LB}{}^2 - (r'_{LB} - v_{LB} \cdot t)^2}$$

$$r = \frac{\|\vec{e} \times (\vec{x} - \vec{x}_{bo})\|}{\|\vec{e}\|} \quad \mu\epsilon \quad \wp(t) = P \cdot \text{norm} \left(\frac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t^2}{\sigma'^2}\right)} \right) \quad \mu\epsilon \quad \sigma' = \frac{r'_{LB}}{3 \cdot v_{LB}} \quad \text{και} \quad r'_{LB} = \frac{3}{2} r_{LB}$$

με \vec{v} το διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού, καθώς πλέον ο όγκος ελέγχου ορίζεται ως ρευστό. Προαναφέρθηκε ότι μια ρεαλιστική πιθανότητα είναι η «αναδίπλωση» της ελεύθερης επιφάνειας υπό την επίδραση των οριακών συνθηκών. Στην περίπτωση αυτή, η ελεύθερη επιφάνεια με αρνητική κλίση, δε δέχεται πλέον θερμότητα από τη δέσμη laser με ό,τι αυτό συνεπάγεται τοπικά στο ενεργειακό ισοζύγιο, ως εκ τούτου εισάγεται η οριακή συνθήκη για την επίδραση της δέσμης laser:

$$\vec{n} \cdot \vec{q}_{LB}(x, t) = \begin{cases} \vec{n}_y > 0 \rightarrow \vec{n} \cdot \vec{q}_{LB}(x, t) = \frac{\varphi(t)\eta}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r^2}{\sigma^2}\right)} \frac{|\vec{e} \cdot \vec{n}|}{\|\vec{e}\|} \\ \vec{n}_y \leq 0 \rightarrow 0 \end{cases} \quad (6.5)$$

με \vec{n}_y την κατακόρυφη συνιστώσα του κάθετου διανύσματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη συνθήκη δεν αποτελεί πλήρη λύση για το πρόβλημα της «αναδίπλωσης» της ελεύθερης επιφάνειας, καθώς προβλέπει ότι μόνο τα σημεία με αρνητική κλίση δε δέχονται ενέργεια. Αντίθετα, λόγω του ορισμού της πηγής θερμότητας ως επιφανειακής πηγής, σημεία που απλά «σκιάζονται», συνεχίζουν να δέχονται ενέργεια, με αποτέλεσμα μια μικρή πιθανή αύξηση στο ισοζύγιο ενέργειας, καθώς για ορισμένες συντεταγμένες υπάρχουν πρακτικά δύο «ενεργές» επιφάνειες που δέχονται ισχύ. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις πολλαπλές σκεδάσεις της δέσμης laser στα τοιχώματα της περιοχής τήξης, ειδικά σε περιπτώσεις KM, η μικρή αυτή τοπική αύξηση του ισοζυγίου ενέργειας θα μπορούσε να θεωρηθεί ακόμα και δικαιολογημένη και επιθυμητή, όμως στα πλαίσια της επιστημονικής αυστηρότητας σημειώνεται ως χαρακτηριστικό που δε μπορεί να αποφευχθεί στη συγκεκριμένη μέθοδο μοντελοποίησης, καθώς για τον ακριβή προσδιορισμό των σκεδάσεων που λαμβάνουν χώρα θα έπρεπε το θερμοϋδραυλικό μοντέλο να συζευχθεί με κατάλληλο μοντέλο Ray Tracing (Khairallah *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020).

Το διάνυσμα ταχύτητας προκύπτει από την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης μάζας και ορμής ασυμπίεστου Νευτώνειου ρευστού:

$$\rho \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (6.6)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = \nabla \cdot [-pI + \vec{K}] + \vec{F} + \rho \vec{g} \quad (6.7)$$

$$\vec{K} = \mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T)$$

με I τον μοναδιαίο πίνακα. Οι οριακές συνθήκες που περιγράφουν την περιοχή τήξης σε σύστημα SLM περιλαμβάνουν επίσης, την πίεση ανάκρουσης λόγω εξάτμισης υλικού, τις τάσεις που αναπτύσσονται λόγω μεταβολής της επιφανειακής τάσης συναρτήσει της βαθμίδας θερμοκρασίας (Marangoni effect) και τη διαφορά πίεσης λόγω επιφανειακών τάσεων και καμπυλότητας της ελεύθερης επιφάνειας.

$$[-pI + \vec{K}] = \underbrace{\frac{1+\beta_R}{2} \cdot p_o \cdot \exp\left[\frac{m \cdot L_v}{k_B \cdot T_v} \left(1 - \frac{T_v}{T}\right)\right]}_{\text{Πίεση ανάκρουσης}} + \underbrace{\frac{\partial \sigma_{surf}(T)}{\partial T} \nabla_t T}_{\text{Marangoni term}} - \underbrace{\frac{\sigma_{surf}(T) \cdot SC}{\text{Τάσεις λόγω καμπυλότητας}}}_{\text{Τάσεις λόγω καμπυλότητας}} \quad (6.8)$$

με SC την καμπυλότητα της επιφάνειας σε $[1/m]$ και $\nabla_t T$ την επαπτομενική βαθμίδα θερμοκρασίας σε $[K/m]$. Ο όρος της πίεσης ανάκρουσης ορίζεται μόνο για θερμοκρασίες υψηλότερες του σημείου βρασμού T_v , ενώ για χαμηλότερες θερμοκρασίες η πίεση ορίζεται στην ατμοσφαιρική p_o .

Όπως έχει προαναφερθεί, η ρεαλιστική μοντελοποίηση των διαφορετικών φάσεων του υλικού (στερεά, ημί-ρευστη, υγρή) αποτελεί μια πρόκληση στην ανάπτυξη θερμοϋδραυλικού μοντέλου προσομοίωσης της περιοχής τήξης με FEM. Στη βιβλιογραφία, δύο βασικές μέθοδοι έχουν υιοθετηθεί: ο ορισμός υψηλού ιξώδους για τον όγκο υλικού που βρίσκεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη του σημείου τήξης, ή/και η χρήση ενός «τεχνητού» όρου στην εξίσωση ορμής, ως μια ογκομετρική δύναμη, η οποία ανθίσταται στην κίνηση του ρευστού όταν η θερμοκρασία του είναι χαμηλότερη του σημείου τήξης. Επί της ουσίας, τα υλικά, ακόμα και στην στερεά τους μορφή, μπορεί να θεωρηθούν ως ρευστά εξαιρετικά υψηλού ιξώδους, άρα η χρήση ενός κλιμακωτού συντελεστή ιξώδους δεν είναι εξ αρχής λάθος, δημιουργούνται όμως σημαντικά προβλήματα αριθμητικής σύγκλισης του μοντέλου. Στην εργασία των Tomashchuk *et al.* (2018) αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι η χρήση συντελεστή ιξώδους για τη στερεά φάση του υλικού $< 200 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, οδηγεί σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα, ενώ αντίθετα τιμές $> 300 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ προκαλούν προβλήματα σύγκλισης. Ούτως ή άλλως, οι τιμές αυτές ιξώδους είναι τάξεις μεγέθους χαμηλότερες από αυτές που περιγράφουν

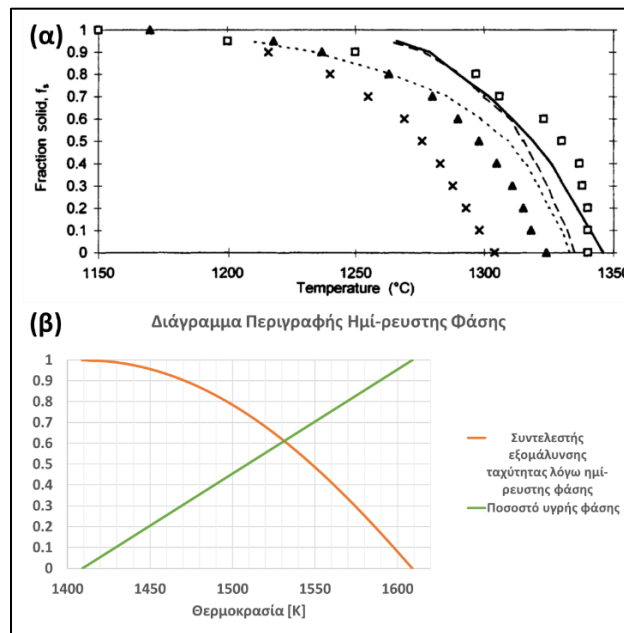
στην πραγματικότητα τη ρεολογική συμπεριφορά ενός συμπαγούς υλικού ($\approx 10^{24}$), και ως εκ τούτου ο «περιορισμός» - μηδενισμός της ταχύτητας του στερεού υλικού, μέσω χρήσης υψηλού συντελεστή ιξώδους, έχει εγγενή δυσκολία. Επίσης, μέσω διαφορο-διάγνωσης που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι και η χρήση ενός «τεχνητού» όρου στην εξίσωση ορμής, ως μια ογκομετρική δύναμη η οποία ανθίσταται στην κίνηση του ρευστού, όπως έχει παρουσιαστεί σε ανάλογα μοντέλα (Courtois *et al.*, 2014; Bayat, Mohanty and Hattel, 2019; Cao, 2019), συνεχίζει να οδηγεί σε σημαντικά προβλήματα σύγκλισης, ενώ τα αποτελέσματα εξαρτώνται σημαντικά από τους συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση περιγραφής του μέτρου της προαναφερθείσας δύναμης (βλ. εξίσωση 3.30).

Προκειμένου να ξεπεραστούν, κατά το δυνατόν, τα προαναφερθέντα προβλήματα, επιλέχθηκε η εφαρμογή κατάλληλου σημειακού περιορισμού (pointwise constraint - PC), ώστε η ταχύτητα στα στοιχεία με θερμοκρασία χαμηλότερης του σημείου τήξης να μηδενίζεται σταδιακά. Η σταδιακή αυτή μείωση γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν την περιοχή ημί-ρευστης φάσης, όπου πρακτικά συνυπάρχει ποσοστό υγρής και στέρεης φάσης, ενώ εκτός από τη φυσική της σημασία, ο ορισμός μια μεταβατικής περιοχής εξυπηρετεί και την ευκολότερη αριθμητική σύγκλιση. Συγκεκριμένα ο σημειακός περιορισμός ορίζεται ως:

$$PC = \begin{cases} T \leq T_m \rightarrow -\vec{v} \\ T_m - \Delta T_{sl} < T < T_m \rightarrow -K_{sm}\vec{v} \\ T \geq T_m \rightarrow 0 \end{cases} \quad (6.9)$$

$$K_{sm} = \frac{10f_l^2}{f_l^3 + 10} \quad \mu\epsilon \quad f_l = \frac{T - (T_m - \Delta T_{sl})}{\Delta T_{sl}}$$

με K_{sm} τον συντελεστή σταδιακής επιβράδυνσης του υλικού στην ημί-ρευστη περιοχή και ΔT_{sl} το θερμοκρασιακό εύρος της ημί-ρευστης περιοχής σε [K], το οποίο για το κράμα νικελίου IN718 είναι 200 K (Mills, 2002). Στην Εικόνα 6.5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που περιγράφουν την ημί-ρευστη περιοχή, και αξίζει να σημειωθεί πως ο τροποποιημένος συντελεστής εξομάλυνσης της ταχύτητας K_{sm} (Εικόνα 6.5β) έχει την ίδια μορφή με τα πειραματικά αποτελέσματα (Εικόνα 6.5α), παρότι η σχέση προσδιορισμού του ποσοστού υγρής φάσης του υλικού συναρτηθεί της θερμοκρασίας f_l ακολουθεί μια απλή γραμμική σχέση.



Εικόνα 6.5 Περιγραφή της ημί-ρευστης περιοχής α) πειραματικά δεδομένα και β) μέσω εξισώσεων

Τέλος, η κάθετη ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας περιγράφεται από την επαλληλία των επιμέρους ταχυτήτων που την ορίζουν, δηλαδή της ταχύτητας λόγω εξάτμισης υλικού (v_{mesh}), τη συνισταμένη ταχύτητα λόγω κίνησης του ρευστού ($n_x \cdot v_x + n_y \cdot v_y$), και τέλος την ταχύτητα για την εξομάλυνση του πλέγματος (v_{sm}). Ως εκ τούτου η οριακή συνθήκη που περιγράφει την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας περιγράφεται από τη σχέση:

$$-\vec{n} \cdot v_{total} = -\vec{n} \cdot (v_{mesh} + v_{sm} + n_x \cdot v_x + n_y \cdot v_y) \quad (6.10)$$

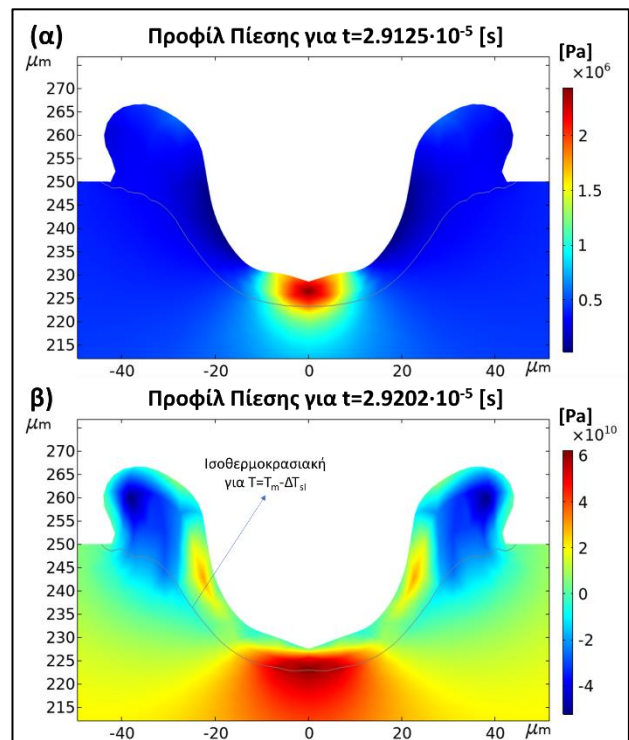
Για την εξομάλυνση του παραμορφώσιμου πλέγματος επιλέχθηκε και πάλι η μέθοδος Hyperelastic, ενώ με στόχο την εξασφάλιση πιο «ομαλής» και ρεαλιστικής ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν 3^{ου} βαθμού τριγωνικά στοιχεία.

6.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

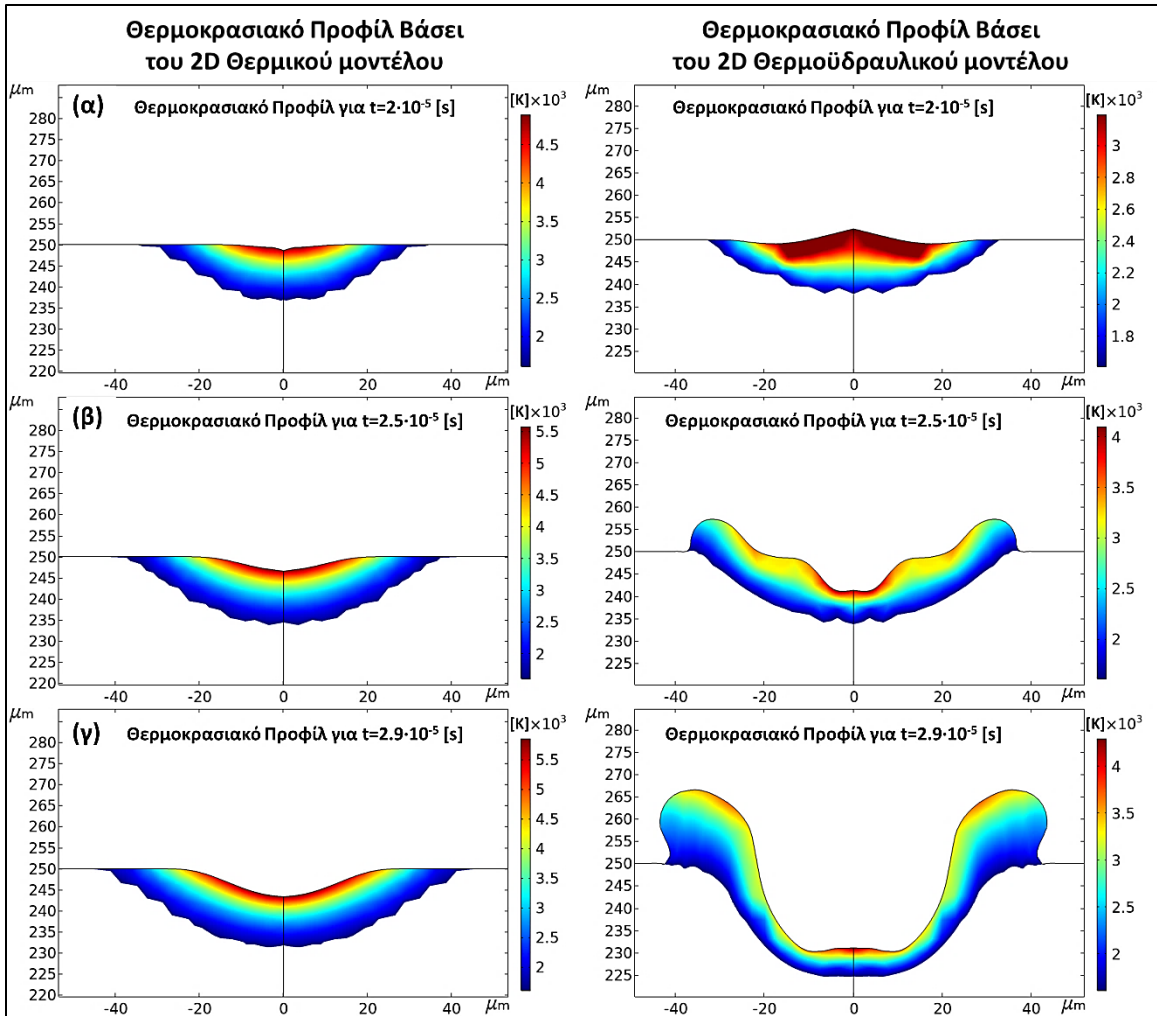
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση του θερμοϋδραυλικού 2D μοντέλου. Εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την ορθότητα της μεθόδου μοντελοποίησης αλλά και την καταλληλότητα (ή μη) της χρήσης FEM για την προσομοίωση της περιοχής τήξης.

Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο επιλύεται έως το χρονικό σημείο του $t=2.9 \cdot 10^{-5}$ s ($\approx 23\%$ του συνολικού προβλεπόμενου χρόνου προσομοίωσης), καθώς στη συνέχεια προκύπτουν προβλήματα σύγκλισης. Πιο συγκεκριμένα, και όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.6, οι τιμές και το προφίλ της πίεσης λαμβάνουν μη ρεαλιστικές και άνευ φυσικής σημασίας τιμές ($P > 10^{10}$ Pa) για $t=2.9202 \cdot 10^{-5}$ s, καθιστώντας έτσι τα αποτελέσματα για $t > 2.9202 \cdot 10^{-5}$ s μη αξιόπιστα και χρήσιμα. Ο ξαφνικός «εξακοντισμός» των τιμών πίεσης αποτέλεσε σημαντικό πρόβλημα στην επίλυση του θερμοϋδραυλικού μοντέλου με την μέθοδο FEM, και ταυτόχρονη ένδειξη του γιατί, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, παρόμοια μοντέλα επιλύονται με χρήση εναλλακτικών μεθόδων, όπως για παράδειγμα με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Όγκων (Finite Volume Method – FVM) (Neill and Hashemi, 2018; L. Wang *et al.*, 2022) ή τη μέθοδο Όγκων Ρευστού (Volume of Fluid – VOF) (Katorpodes, 2019; W. Wang *et al.*, 2022), μέθοδοι οι οποίες, εξ ορισμού, μπορούν να διαχειριστούν και να προσομοιώσουν καλύτερα την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας ενός ρευστού και την ύπαρξη έντονων βαθμίδων (sharp gradients) μέσα στον όγκο ελέγχου (shock-capturing property).

Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπ' όψιν τα προβλήματα σύγκλισης, η αξιολόγηση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, γίνεται ως προς την ορθότητα της βασικής μεθόδου μοντελοποίησης (ήτοι των εξισώσεων που περιγράφουν το φυσικό σύστημα και των οριακών συνθηκών), ενώ επιχειρείται και μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του 2D θερμικού και θερμοϋδραυλικού μοντέλου. Τέλος, η μη επίλυση 3D μοντέλου (κυρίως λόγω εξαιρετικά υψηλών απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ) και ο μη συνυπολογισμός των διαμήκων ταχυτήτων, δεν επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, αλλά μόνο την ποιοτική.



Εικόνα 6.6 Προφίλ πίεσης για α) $t=2.9125 \cdot 10^{-5}$ s και β) $t=2.9202 \cdot 10^{-5}$ s

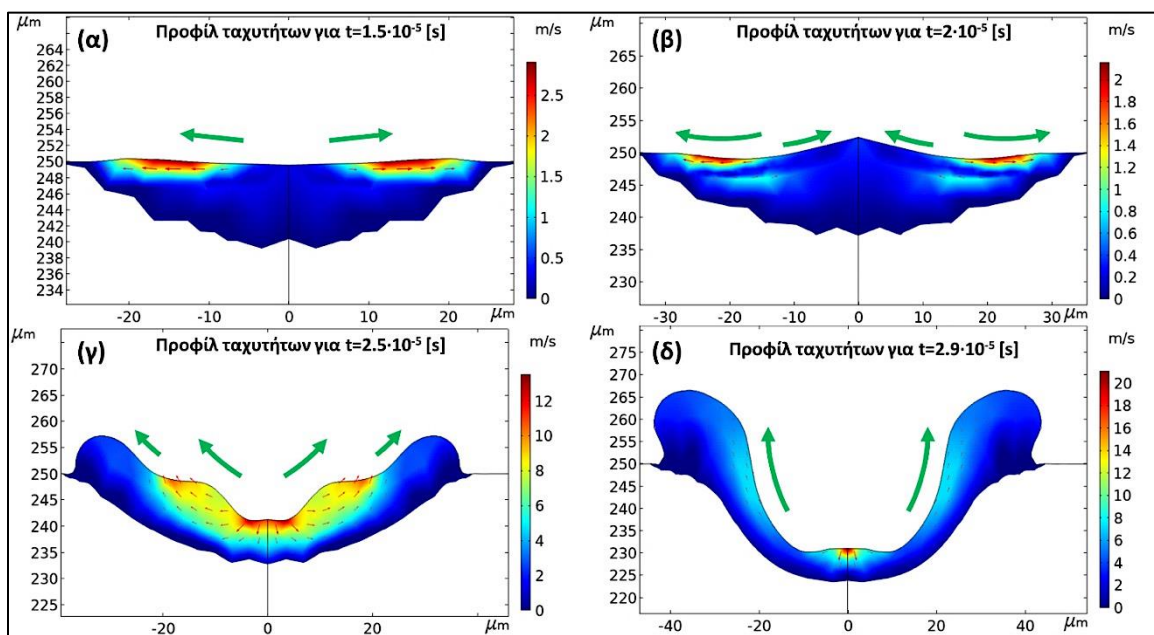


Εικόνα 6.7 Σύγκριση προφίλ θερμοκρασιών της περιοχής τήξης μεταξύ θερμικού και θερμοϋδραυλικού 2D μοντέλου για α) $t=2 \cdot 10^{-5}$ s, β) $t=2.5 \cdot 10^{-5}$ s και γ) $t=2.9 \cdot 10^{-5}$ s

Στην Εικόνα 6.7 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό προφίλ της περιοχής τήξης του 2D θερμικού και θερμοϋδραυλικού μοντέλου για α) $t=2 \cdot 10^{-5}$ s, β) $t=2.5 \cdot 10^{-5}$ s και γ) $t=2.9 \cdot 10^{-5}$ s. Αρχικά, παρατηρείται ότι, λόγω της κίνησης του ρευστού προς τα τοιχώματα, σχηματίζεται μια πιο «λεπτή» περιοχή τήξης, ενώ τηχθέν υλικό συσσωρεύεται στα άνω όρια της περιοχής τήξης. Οι θερμοκρασίες που υπολογίζονται από το θερμικό μοντέλο είναι σταθερά υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες του θερμοϋδραυλικού μοντέλου, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην κίνηση του ρευστού (στο θερμοϋδραυλικό μοντέλο) και την αντίστοιχη «ταχύτερη» μετάδοση θερμότητας που λαμβάνει χώρα, λόγω συνυπολογισμού των φαινομένων αγωγής και συναγωγής. Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση σχετικά με το βάθος της περιοχής τήξης που υπολογίζεται. Σύμφωνα με την εξίσωση 5.4, ο ρυθμός εξάτμισης υλικού εξαρτάται από τη θερμοκρασία της επιφάνειας, με υψηλότερες θερμοκρασίες να οδηγούν σε υψηλότερο ρυθμό εξάτμισης και άρα υψηλότερα βάθη της περιοχής τήξης. Από τη συγκεκριμένη, όμως, σύγκριση προκύπτει ότι αν και οι θερμοκρασίες που υπολογίζονται στο θερμοϋδραυλικό μοντέλο είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του θερμικού, το βάθος της περιοχής τήξης που προκύπτει από το θερμοϋδραυλικό μοντέλο είναι ελαφρώς υψηλότερο από το αντίστοιχο του θερμικού. Αυτό αποδίδεται στην επίδραση των ρευστομηχανικών φαινομένων, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την κίνηση ρευστού προς τα τοιχώματα και τα άνω όρια της περιοχής τήξης, αυξάνοντας έτσι το βάθος. Με δεδομένο, όμως, ότι η

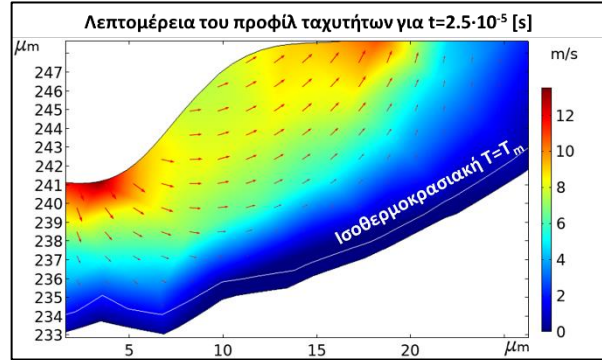
προσομοίωση δεν ολοκληρώνεται, δεν προσομοιώνεται η διαμήκης κίνηση του ρευστού, και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η κίνηση του ρευστού προς τα άνω όρια της περιοχής τήξης προβλέπεται να αναστραφεί από ένα σημείο και μετά υπό την επίδραση της βαρύτητας και την μείωση της πίεσης ανάκρουσης, δε μας επιτρέπεται να εξάγουμε κάποιο βέβαιο συμπέρασμα σχετικά με το βάθος της περιοχής τήξης που υπολογίζεται, παρά μόνο να γίνει μια επισήμανση σχετικά με την προσοχή που πρέπει να δίδεται σε πιθανή διαφορά που δύναται να προκύψει ανάμεσα στα αποτελέσματα ενός θερμικού και ενός θερμοϋδραυλικού μοντέλου. Η επισήμανση αυτή αφορά κυρίως τον υπολογισμό του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού, για τον οποίο θα πρέπει να δηλώνεται πάντα η μέθοδος υπολογισμού του και οι αντίστοιχες απλοποιήσεις – παραδοχές που έχουν γίνει.

Στην Εικόνα 6.8 παρουσιάζεται το προφίλ ταχυτήτων της ρευστής και ημίρρευστης φάσης για α) $t=1.5 \cdot 10^{-5}$ s, β) $t=2 \cdot 10^{-5}$ s, γ) $t=2.5 \cdot 10^{-5}$ s και δ) $t=2.9 \cdot 10^{-5}$ s, με τα κόκκινα βέλη να αντιστοιχούν στα διανύσματα της ταχύτητας εντός του όγκου ελέγχου και τα πράσινα βέλη στην μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Αρχικά, παρατηρείται ότι οι ταχύτητες στον μεγαλύτερο όγκο του υλικού είναι μικρότερες των 10 m/s, τιμές που βρίσκονται σε συμφωνία με τις αντίστοιχες της βιβλιογραφίας (Le, Tang and Wong, 2019; Khairallah *et al.*, 2020). Πρέπει να σημειωθεί, αν και λόγω επίλυσης 2D μοντέλου και μη υπολογισμού της διαμήκου κίνησης του ρευστού, ίσως υπολογίζονται ελαφρώς υψηλότερες ταχύτητες, καθώς το ρευστό δε μπορεί να κινηθεί – εκτονωθεί στη διαμήκη κατεύθυνση, η τάξη μεγέθους και τα διανύσματα των ταχυτήτων παραμένουν ρεαλιστικά και σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Εκτός, όμως, από τα αντίστοιχα μοντέλα προσομοίωσης τα οποία αποτελούν ένδειξη για την ορθότητα των υπολογισμένων ταχυτήτων, συνηγορούν, επίσης, πειραματικά δεδομένα, σχετικά με την ταχύτητα εκτίναξης σωματιδίων κατά την κατεργασία SLM (Zhao *et al.*, 2017). Σε ορισμένα σημεία στο κέντρο της περιοχής τήξης εμφανίζονται υψηλότερες ταχύτητες (≈ 20 m/s), γεγονός που επίσης συνάδει με τα δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Στην εργασία τους οι Matti και Karlan (2015) αναφέρουν ότι οι ταχύτητες σε μέτωπο βρασμού, λόγω επίδρασης δέσμης laser (laser induced boiling-front), είναι της τάξης των 5 – 10 m/s, ενώ οι Chen και Yan (2020) και Ly *et al.* (2017) αναφέρονται σε ακόμα υψηλότερες ταχύτητες. Συμπερασματικά, λοιπόν, μπορεί να ειπωθεί ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία μοντελοποίησης και περιγραφής του φυσικού συστήματος φαίνεται ότι υπολογίζει σωστά και ρεαλιστικά το πεδίο ταχυτήτων που αναπτύσσεται, και την κίνηση του ρευστού υλικού υπό την επίδραση των διαφορετικών δυνάμεων και τάσεων που αναπτύσσονται στον όγκο και την επιφάνειά του.



Εικόνα 6.8 Προφίλ ταχυτήτων της ρευστής και ημίρρευστης φάσης για α) $t=1.5 \cdot 10^{-5}$ s β) $t=2 \cdot 10^{-5}$ s, γ) $t=2.5 \cdot 10^{-5}$ s και δ) $t=2.9 \cdot 10^{-5}$ s

Η τελευταία παρατήρηση σχετικά με την ορθότητα της προτεινόμενης μεθόδου μοντελοποίησης αναφέρεται στην αποτελεσματικότητα διαχείρισης των διαφορετικών φάσεων του υλικού. Όπως προαναφέρθηκε, είναι εξαιρετικά σημαντικό, προκειμένου να προκύψουν ρεαλιστικά αποτελέσματα, η στερεά φάση του υλικού να έχει μηδενική ταχύτητα, ώστε να λειτουργεί ως περιοριστικό όριο για την κίνηση του ρευστού και ημίρρευστου υλικού. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία μοντελοποίησης προτείνεται η χρήση σημειακού περιορισμού, σε συνδυασμό με κατάλληλη συνάρτηση «εξομάλυνσης» $K_{SM}(T)$ για περιγραφή της κίνησης του υλικού στην ημίρρευστη φάση. Από το προφίλ και τα διανύσματα ταχυτήτων στην Εικόνα 6.9 προκύπτει ότι όντως το υλικό έχει μηδενική (ή σχεδόν μηδενική) ταχύτητα για τιμές $T < T_m$, ενώ το ρευστό κινείται με τρόπο παρόμοιο του να υπήρχε κάποιο περιοριστικό «τοίχωμα» στα όρια της περιοχής τήξης. Τα παραπάνω, λοιπόν, επιβεβαιώνουν την καταλληλότητα της χρήσης σημειακού περιορισμού, σε συνδυασμό με συνάρτηση «εξομάλυνσης» για την περιγραφή των διαφορετικών φάσεων του υλικού.



Εικόνα 6.9 Λεπτομέρεια από το προφίλ ταχυτήτων για $t=2.5 \cdot 10^{-5}$ s

6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται το 6^ο κεφάλαιο, στόχος του οποίου ήταν να παρουσιαστεί μια βασική μεθοδολογία μοντελοποίησης των θερμοϋδραυλικών φαινομένων, αλλά και να επισημανθούν οι δυσκολίες που προκύπτουν από την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής με χρήση FEM. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που έχει παρουσιαστεί στο 5^ο κεφάλαιο για την προσομοίωση της περιοχής τήξης και προσδιορισμό του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού σε κράμα νικελίου IN718 και για συνθήκες κατεργασίας με ονομαστική ισχύ δέσμης laser 320W και ταχύτητα σάρωσης 1200mm/s. Ο συντελεστής που υπολογίστηκε στη συνέχεια, χρησιμοποιείται στο θερμοϋδραυλικό μοντέλο, στο οποίο γίνεται σύζευξη των εξισώσεων μετάδοσης θερμότητας και ρευστομηχανικής, ενώ λαμβάνονται επίσης υπ' όψιν η πίεση ανάκρουσης, και η ανάπτυξη επιφανειακών τριχοειδών τάσεων λόγω καμπυλότητας και βαθμίδας θερμοκρασίας. Η παραμορφώσιμη γεωμετρία ακολουθεί πλέον και αποτυπώνει, εκτός από την εξάτμιση του υλικού, και την κίνησή του ρευστού λόγω των ρευστομηχανικών φαινομένων. Τέλος, προτείνεται η χρήση σημειακού περιορισμού, σε συνδυασμό με κατάλληλη συνάρτηση «εξομάλυνσης» για τη ρεαλιστική περιγραφή των διαφορετικών φάσεων του υλικού και των ταχυτήτων που αυτές προβλέπεται να έχουν. Το θερμοϋδραυλικό μοντέλο επιλύεται σε 2D, σε αντιστοιχία με το 2D μοντέλο που παρουσιάστηκε στο 5^ο κεφάλαιο.

Συμπερασματικά, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων:

- ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού β_R προσδιορίστηκε 0.75 για $VED = 66.66 \text{ J/mm}^3$, ο οποίος είναι υψηλότερος σε σχέση με αυτόν που προβλέπεται από την εξίσωση 5.6 για αντίστοιχη VED. Τονίζεται, λοιπόν, η σημασία του να προσδιορίζεται προσεχτικά ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού για κάθε κράμα ή κραματική ομάδα ξεχωριστά, καθώς δύναται να προκύπτουν διαφορές λόγω των ξεχωριστών θερμοφυσικών ιδιοτήτων του κάθε υλικού – κράματος.
- οι θερμοκρασίες που υπολογίζονται από το θερμικό μοντέλο είναι σταθερά υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες του θερμοϋδραυλικού μοντέλου, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην κίνηση του ρευστού (στο θερμοϋδραυλικό μοντέλο) και την αντίστοιχη «ταχύτερη» μετάδοση θερμότητας που λαμβάνει χώρα λόγω συνυπολογισμού των φαινομένων αγωγής και συναγωγής.
- οι ταχύτητες στον μεγαλύτερο όγκο του ρευστού είναι μικρότερες των 10 m/s, ενώ υπάρχουν σημεία στα οποία, για κάποια χρονική στιγμή, αναπτύσσονται ταχύτητες έως και ≈ 20 m/s. Οι τιμές αυτές ταχυτήτων

επιβεβαιώνονται από την αντίστοιχη βιβλιογραφία και αποτελούν σημαντική ένδειξη για την ορθότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης.

- η χρήση σημειακού περιορισμού, σε συνδυασμό με συνάρτηση «εξομάλυνσης» της ταχύτητας, κρίνεται κατάλληλη για την περιγραφή των διαφορετικών φάσεων του υλικού.
- η μέθοδος FEM δεν ενδείκνυται για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής, καθώς προκύπτουν σημαντικά προβλήματα σύγκλισης και διαχείρισης των ελεύθερων επιφανειών, ειδικά όταν λαμβάνουν χώρα σημαντικές παραμορφώσεις.

Τα προαναφερθέντα βασικά στοιχεία της προτεινόμενης μεθόδου παρουσιάζονται διαγραμματικά στην Εικόνα 5.20.



Εικόνα 6.10 Βασικά βήματα και στοιχεία της προτεινόμενης μεθοδολογίας

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι κατεργασίες AM αναμφίβολα αποτελούν και έχουν συντελέσει σε μια «μικρή επανάσταση» στο χώρο του σχεδιασμού και της κατασκευής αντικειμένων, καθώς το τεμάχιο πλέον δεν κατασκευάζεται με την αφαίρεση ή/και την πλαστική παραμόρφωση υλικού, όπως στις παραδοσιακές μεθόδους κατεργασίας, αλλά μέσω της επιλεκτικής προσθήκης και σύνδεσης στοιχειωδών όγκων υλικού, με βάση ένα αρχικό σχέδιο CAD. Ανάμεσα στις διαφορετικές μεθόδους AM, η πλέον διαδεδομένη για κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων είναι η SLM, με το αντικείμενο να κατασκευάζεται μέσω της επιλεκτικής τήξης με χρήση δέσμης laser του υλικού που βρίσκεται υπό τη μορφή κλίνης πούδρας και σε επάλληλες στρώσεις πάχους μερικών μμ. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις για τη μελέτη της συγκεκριμένης κατεργασίας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις πειραματικές και τις υπολογιστικές, με ανάπτυξη αριθμητικών ή/και αναλυτικών μοντέλων προσομοίωσης. Οι υπολογιστικές μέθοδοι, με τη σειρά τους, μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω, ανάλογα με τη χρονική και χωρική τους κλίμακα, σε μοντέλα μικρο-κλίμακας (microscale), μέσο-κλίμακας (mesoscale), μακρο-κλίμακας (macroscale), και σε αυτά πολλαπλής κλίμακας (multi-scale). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή γίνεται ανάπτυξη και παρουσίαση μεθοδολογίας μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM σε επίπεδο μικροκλίμακας, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM). Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν, τόσο κατά την αρχική βιβλιογραφική ανασκόπηση, όσο και κατά την ανάπτυξη των μοντέλων προσομοίωσης, συνοψίζονται στα εξής:

- Παρατηρείται η συχνή χρήση πολύπλοκων σχέσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν και εξαρτώνται από αριθμό ημι-εμπειρικών συντελεστών και παραμέτρων, μη επιτρέποντας κατ' αυτόν τρόπο τη δημιουργία συγκεκριμένου και συνεπούς πλαισίου μοντελοποίησης της κατεργασίας SLM σε επίπεδο μικροκλίμακας. Με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να εξαρτώνται σημαντικά από αρχικές παραδοχές του εκάστοτε μοντέλου, τις οριακές συνθήκες, και τους προαναφερθέντες συντελεστές, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων καθίσταται αμφιβόλου ορθότητας, όπως επίσης και η γενικότερη χρήση τους. Ταυτόχρονα, οι φυσικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα, συχνά μοντελοποιούνται με εξαιρετικά απλουστευτικό τρόπο, εξασφαλίζοντας έτσι σημαντικό όφελος ως προς την απλότητα επίλυσης και τις απαιτήσεις του μοντέλου σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο, εις βάρος όμως της επιστημονικής ακρίβειας και αυστηρότητας. Προκύπτει, λοιπόν, η ανάγκη να υπάρξει ένα κατά το δυνατόν ομοιόμορφο πλαίσιο και μεθοδολογία μοντελοποίησης με συγκεκριμένες, και όχι κατά περίπτωση, υπεραπλουστευτικές νόρμες προσέγγισης των φυσικών μηχανισμών και μεγεθών.
- Με τη χρήση αμιγώς θερμικού μοντέλου και ογκομετρικής πηγής θερμότητας Gaussian κατανομής, δύναται να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια το CM της περιοχής τήξης, ενώ μέσω της μεθόδου εντοπισμού ακτίνων (ray tracing) μπορεί να εκτιμηθεί το ποσοστό απορρόφησης της δέσμης laser από την κλίνη πούδρας. Η Gaussian κατανομή πυκνότητας ισχύος κατά το πάχος της κλίνης πούδρας λαμβάνει υπ' όψιν την καθ' ύψος μεταβολή της πυκνότητας ισχύος, λόγω των σκεδάσεων που υφίσταται η δέσμη laser στους κόκκους της κλίνης πούδρας, ενώ ταυτόχρονα είναι μια απλή και αρκετά ρεαλιστική προσέγγιση, άνευ ανάγκης χρήσης ημι-εμπειρικών συντελεστών.
- Στα μοντέλα προσομοίωσης της κατεργασίας SLM πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στη μοντελοποίηση των διαφορετικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων που έχουν το συμπαγές υλικό και το υλικό υπό τη μορφή πούδρας. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες μπορεί να διαφέρουν ακόμα και τάξη μεγέθους μεταξύ του συμπαγούς υλικού και του υλικού υπό μορφή πούδρας, επηρεάζοντας έτσι σημαντικά τη διάδοση της θερμότητας και κατ' επέκταση το προφίλ θερμοκρασιών και τα χαρακτηριστικά της περιοχής τήξης που υπολογίζονται.
- Με την χρήση αμιγώς θερμικού μοντέλου και ογκομετρικής πηγής θερμότητας Gaussian κατανομής προβλέπεται και προσομοιώνεται η περιοχή αστάθειας που δημιουργείται στην αρχή της διαδρομής της δέσμης laser, όπως επίσης και οι περιοχές σχηματισμού «λαιμού», ενώ, παρότι δε συμπεριλαμβάνει την

επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής, μπορεί επίσης να προβλέψει τον σχηματισμό balling για συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας.

- Από την εκτίμηση των θερμικών απωλειών, και υποθέτοντας έναν τυπικό χαμηλό συντελεστή επανασύνδεσης υλικού 0.95, προκύπτει ότι, για το CM, οι σημαντικότερες απώλειες αφορούν την απομάκρυνση ενέργειας λόγω εξάτμισης υλικού, οι αμέσως λιγότερες είναι λόγω ακτινοβολίας, ενώ οι απώλειες λόγω συναγωγής υπολογίζονται ως οι μικρότερες.
- Με τη χρήση αμιγώς θερμικού μοντέλου στο οποίο η δέσμη laser μοντελοποιείται με τη χρήση επιφανειακής 2D πηγής θερμότητας κατανομής Gauss, ενώ λαμβάνεται υπ' όψιν ο ρυθμός εξάτμισης υλικού και μοντελοποιείται μέσω παραμορφώσιμης γεωμετρίας, δύναται να προσομοιωθεί η περιοχή τήξης σε CM, TM και KM.
- Ο συντελεστής επανασύνδεσης υλικού για διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας αποτελεί τον μοναδικό ημι-εμπειρικό συντελεστή που χρησιμοποιείται, ενώ προκύπτει σαφής γραμμική συσχέτισή του με την VED.
- Δύναται να εκτιμηθεί η μείωση της πυκνότητας ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας, λόγω της αλληλεπίδρασης της δέσμης laser με την κεκλιμένη επιφάνεια των τοιχωμάτων του keyhole, με τη μέγιστη πυκνότητα ισχύος να μειώνεται έως και 34%.
- Προτείνεται η χρήση ενός 2D μοντέλου για τον ταχύτερο υπολογισμό του συντελεστή επανασύνδεσης υλικού, με το φυσικό σύστημα να ανάγεται σε 2D και να προσομοιώνεται ένα κάθετο επίπεδο της περιοχής τήξης. Η κινούμενη, ως προς το επίπεδο προσομοίωσης, δέσμη laser προσεγγίζεται από κατάλληλα προσαρμοσμένη πηγή θερμότητας κατανομής Gauss, μεταβαλλόμενης ισχύος και διαμέτρου συναρτήσει του χρόνου.
- Για την προσομοίωση των ρευστομηχανικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή τήξης είναι καίριας σημασίας η ρεαλιστική και αποτελεσματική μοντελοποίηση των διαφορετικών φάσεων του υλικού, ενώ πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην παραμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας και της αλληλεπίδρασής της με τη δέσμη laser, ώστε να προβλέπεται η τοπική αλλαγή στην πυκνότητα ισχύος, σε περιοχές πιθανής σκίασης.
- Οι θερμοκρασίες που υπολογίζονται σε ένα αμιγώς θερμικό μοντέλο τείνουν να είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες ενός θερμοϋδραυλικού, καθώς στο θερμοϋδραυλικό μοντέλο λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τη μεταφορά θερμότητας και φαινόμενα αγωγής και συναγωγής.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία μοντελοποίησης των ρευστομηχανικών φαινομένων καταλήγει σε ρεαλιστικά αποτελέσματα αναφορικά με το πεδίο ταχυτήτων που υπολογίζεται και την μακροσκοπική κίνηση του ρευστού και ημίρρευστου υλικού.
- Τεκμαίρεται ότι η μέθοδος FEM δεν ενδείκνυται για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής, ειδικά σε περιπτώσεις όπου το πλέγμα προβλέπεται να υποστεί σημαντική παραμόρφωση (π.χ. KM και severe KM). Εγγενείς περιορισμοί και αδυναμίες της μεθόδου FEM, αφενός μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά προβλήματα σύγκλισης και εξακοντισμού των μεγεθών που υπολογίζονται σε μη ρεαλιστικές και ακραίες τιμές, αφετέρου η συνεχής φύση της μεθόδου αδυνατεί να αποτυπώσει την πιθανή αποκόλληση / εκτίναξη υλικού, περιορίζοντας έτσι σημαντικά τις δυνατότητες προσομοίωσης.

Κλείνοντας την παρούσα διατριβή και χάριν πληρότητας πρέπει να γίνει μια αναφορά στην υπολογιστική ισχύ και τον υπολογιστικό χρόνο, έννοιες οι οποίες έχουν προαναφερθεί και αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός μοντέλου. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την πρόοδο που συντελείται στον τομέα των επεξεργαστών και των υπολογιστικών συστημάτων, τεκμαίρεται ότι η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς συνεχώς αυξάνεται και θα συνεχίσει να αυξάνεται (Moore's law), δίνοντας έτσι την δυνατότητα διαχείρισης και επίλυσης όλο και πιο απαιτητικών μοντέλων και προσομοιώσεων. Ταυτόχρονα όμως με την «αιχμή» και τις ανώτατες

σύγχρονες υπολογιστικές δυνατότητες που έχει στην διάθεσή της η επιστημονική κοινότητα, συνεχίζει να υφίσταται η ανάγκη για μοντέλα και προσομοιώσεις τα οποία μπορούν να επιλυθούν σε εμπορικούς προσωπικούς υπολογιστές. Οι προσομοιώσεις και τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στην συγκεκριμένη διατριβή επιλύθηκαν στο σύνολό τους σε προσωπικούς υπολογιστές, αποδεικνύοντας έτσι ότι τις απαιτήσεις τους σε υπολογιστική ισχύ δύναται να τις διαχειριστεί ένας τυπικός προσωπικός υπολογιστής σε εύλογο χρονικό διάστημα. Στην πλειοψηφία τους τα μοντέλα επιλύθηκαν σε προσωπικό υπολογιστή με τα εξής χαρακτηριστικά: CPU Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ @ 2.60GH, RAM 16.0 GB DD4 και GPU NVIDIA GeForce GTX960M01:00.0. 4065 MB.

Μια άμεση σύγκριση των απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ και υπολογιστικό χρόνο ανάμεσα σε μοντέλα που προσομοιώνουν διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων κατεργασίας δεν είναι εύκολη και ίσως δεν είναι και βάσιμη, καθώς ανάλογα με τις παραμέτρους της κατεργασίας, π.χ. ονομαστική ισχύς δέσμης laser και ταχύτητα σάρωσης, ο υπολογιστικός όγκος και χρόνος που απαιτείται να προσομοιωθεί, προκειμένου η κατεργασία να έχει μεταβεί σε σταθερή φάση, διαφέρει. Ταυτόχρονα δύναται να διαφέρει και η απαραίτητη ποιότητα διακριτοποίησης προκειμένου να προκύψουν ακριβή αποτελέσματα. Για παράδειγμα, εάν θεωρήσουμε ότι είναι σκόπιμο να μοντελοποιηθούν 2mm της περιοχής τήξης ως χαρακτηριστικό μήκος, για ταχύτητα σάρωσης 200mm/s, ο χρόνος κατεργασίας που απαιτείται να προσομοιωθεί είναι 0.01s ενώ για ταχύτητα σάρωσης 1000mm/s είναι 0.002s, ήτοι το ένα πέμπτο του προηγούμενου, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για τον χρόνο επίλυσης του μοντέλου. Ανάλογα παραδείγματα μπορούν να αναφερθούν και σχετικά με τον υπολογιστικό όγκο που χρειάζεται ανά περίπτωση να μοντελοποιηθεί και την ποιότητα της διακριτοποίησης. Με δεδομένη, όμως, την ανάγκη για κάποιου είδους αντικειμενικό δείκτη σύγκρισης των διαφορετικών μοντέλων, επιλέγεται ως πλέον χαρακτηριστικός ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας (Degrees of Freedom – DoF) που έχει το κάθε μοντέλο ανάλογα με τις εκάστοτε απλοποιήσεις, παραδοχές και διακριτοποίηση. Ως παράδειγμα θα χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 6. Το 3D θερμικό μοντέλο αποτελείται από 13989 στοιχεία (domain elements), με 2108 από αυτά να είναι συννοριακά στοιχεία (boundary elements) και 158 στοιχεία ακμών (edge elements). Με τη συγκεκριμένη διακριτοποίηση προκύπτουν 72250 βαθμοί ελευθερίας και επιπρόσθετοι 15207 ως εσωτερικοί βαθμοί ελευθερίας (internal DoF). Το συγκεκριμένο μοντέλο, με την ίδια διακριτοποίηση, στην περίπτωση που επιλύονταν και οι εξισώσεις ρευστομηχανικής θα είχε 83802 βαθμούς ελευθερίας και 29197 εσωτερικούς βαθμούς ελευθερίας. Το αντίστοιχο 2D θερμικό μοντέλο αποτελείται από 5418 στοιχεία, εκ των οποίων τα 192 είναι στοιχεία ακμών. Το 2D θερμικό μοντέλο για τη συγκεκριμένη διακριτοποίηση έχει 53051 βαθμούς ελευθερίας και επιπλέον 5614 εσωτερικούς βαθμούς ελευθερίας, ενώ το αντίστοιχο θερμοϋδραυλικό έχει 61469 βαθμούς ελευθερίας και 11033 επιπλέον εσωτερικούς βαθμούς ελευθερίας. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο χρόνος επίλυσης δε σχετίζεται γραμμικά με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας, καθώς σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης και άλλες παράμετροι, όπως για παράδειγμα η ευκολία ή μη σύγκλισης των αλγορίθμων επίλυσης και το αναγκαίο υπολογιστικό βήμα που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Ταυτόχρονα, παράμετροι όπως η ανάγκη για επαναδιακριτοποίηση του όγκου ελέγχου ή η χρήση μεθόδων εξομάλυνσης του πλέγματος πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν στον υπολογισμό του απαιτούμενου χρόνου επίλυσης. Ολοκληρώνοντας την αναφορά στην απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ και χρόνο, παρατίθενται ενδεικτικές τάξεις μεγέθους των χρόνων επίλυσης των διαφορετικών μοντέλων που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διατριβή. Για τα θερμικά μοντέλα προσομοίωσης του CM (κεφάλαιο 4) ο τυπικός χρόνος επίλυσης ήταν δεκάδες έως εκατοντάδες ώρες επίλυσης, ανάλογα με τον εκάστοτε συνδυασμό παραμέτρων κατεργασίας. Τα 3D μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5 για την προσομοίωση του CM – TM – KM είχαν παρόμοιες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο, ενώ τα αντίστοιχα 2D μοντέλα επιλύθηκαν σε μερικές ώρες (<5h). Τέλος, τα θερμικά μοντέλα που επιλύθηκαν στον κεφάλαιο 6 είχαν κατά κανόνα χρόνο επίλυσης μικρότερο της ώρας, με το 2D θερμικό μοντέλο να χρειάζεται μόνο κάποια λεπτά προκειμένου να επιλυθεί (<15min). Το αντίστοιχο θερμοϋδραυλικό 2D μοντέλο λόγω δυσκολιών σύγκλισης είχε πολλαπλάσιο χρόνο επίλυσης (>3h).

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Με δεδομένο ότι ένα επιστημονικό αντικείμενο δε δύναται και δεν προβλέπεται να εξαντληθεί στα πλαίσια μιας διατριβής, είναι σημαντικό, με βάση τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν, να προταθούν βασικές κατευθυντήριες γραμμές και παραινέσεις για συνέχιση της σχετικής έρευνας. Οι προτάσεις αυτές προκύπτουν από τη συνολική μελέτη και ενασχόληση με το συγκεκριμένο αντικείμενο, και στόχο έχουν, όχι μόνον την έρευνα σε καθαρά βασικό και επιστημονικό επίπεδο, αλλά και την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της σε πιο πρακτικές εφαρμογές.

Ξεκινώντας από το βασικό στόχο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής, η δημιουργία ενός συγκεκριμένου, σαφούς και συνεπούς πλαισίου για την περιγραφή των φυσικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα, και κατ' επέκταση της κατεργασίας SLM, είναι απαραίτητη. Με την εξέλιξη και καθιέρωση μιας κοινώς αποδεκτής και αποδεδειγμένα σωστής μεθοδολογίας μοντελοποίησης της κατεργασίας, η έρευνα πλέον δε θα επικεντρώνεται και δε θα αναλώνεται στην αναζήτηση της βέλτιστης μεθοδολογίας μοντελοποίησης, αλλά θα εστιάζει στη βελτιστοποίηση της ίδιας της κατεργασίας και των παραμέτρων που την καθορίζουν. Επίσης, και υπό το ίδιο «πνεύμα», θα πρέπει σταδιακά να δημιουργηθούν αξιόπιστες βάσεις δεδομένων ή / και νόρμες υπολογισμού για τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την κατεργασία (π.χ. ποσοστό απορρόφησης της δέσμης laser από κλίνη πούδρας, συναρτήσε των διαφορετικών χαρακτηριστικών της κλίνης πούδρας, θερμοφυσικές ιδιότητες της κλίνης πούδρας, ρυθμός εξάτμισης υλικού, κτλ.) ώστε στα διαφορετικά μοντέλα να χρησιμοποιούνται κοινώς αποδεκτές, επιστημονικά τεκμηριωμένες, αλλά και μεταξύ τους συνεπείς τιμές και συντελεστές, καθιστώντας τα έτσι μεταξύ τους συγκρίσιμα και αποκτώντας η αντίστοιχη έρευνα αθροιστική αξία.

Στην συνέχεια, και λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συνεχή και ραγδαία αύξηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος, τα μοντέλα θα πρέπει να γίνονται αναλυτικότερα και να περιλαμβάνουν ένα σύνολο από φαινόμενα και μηχανισμούς που μέχρι τώρα απλοποιούνταν, λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο. Θα πρέπει πλέον οι απλοποιήσεις αυτές και οι παραδοχές να περιορίζονται στο δυνατόν ελάχιστο, με τα μοντέλα να παρέχουν σημαντικές και αξιόπιστες πληροφορίες, σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία, πληροφορίες οι οποίες είναι εξαιρετικά δύσκολο ή και αδύνατον μερικές φορές να ληφθούν πειραματικά. Ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα των μοντέλων μικροκλίμακας θα πρέπει να αξιοποιηθούν και να χρησιμοποιηθούν σε ανάπτυξη μοντέλων πολλαπλής κλίμακας ώστε τελικά να είναι εφικτή η προσομοίωση και μοντελοποίηση της κατεργασίας σε μακροσκοπικό επίπεδο, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες του τελικού τεμαχίου που κατασκευάζεται και την επίδραση παραμέτρων σε αυτές, πληροφορίες οι οποίες δε μπορούν να αποτυπωθούν και να προκύψουν από τη μοντελοποίηση σε επίπεδο μικροκλίμακας. Επίσης, αξιόπιστα αποτελέσματα μοντέλων μικροκλίμακας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα για «εκπαίδευση» και εξέλιξη μοντέλων και μετα-μοντέλων Νευρωνικών Δικτύων (Neural Network – NN), δίνοντας τη δυνατότητα για μια εντελώς διαφορετική αλλά εξαιρετικά χρήσιμη προσέγγιση στη μελέτη και τον έλεγχο της κατεργασίας. Τέλος, τα δεδομένα και οι πληροφορίες από προσομοιώσεις της κατεργασίας σε επίπεδο μικροκλίμακας μπορούν και πρέπει να αξιοποιηθούν από της επιστήμες των υλικών για τη βελτίωση των κραμάτων που χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες SLM, αλλά και την ανάπτυξη νέων.

Η τελευταία πρόταση για μελλοντική έρευνα αφορά κυρίως την πρακτική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της έρευνας. Καθώς το AM έχει ήδη «ξεφύγει» από το αποκλειστικά ερευνητικό επίπεδο και διεκδικεί πλέον μια θέση ανάμεσα στις ευρέως χρησιμοποιούμενες κατεργασίες, οι εταιρείες που παρέχουν λογισμικά προσανατολισμένα στην προσομοίωση των κατεργασιών θα πρέπει να συμπεριλάβουν και εξειδικευμένα «πακέτα» για τις μεθόδους AM με δυνατότητα επίλυσης και εύκολης διαχείρισης και εναλλακτικών αριθμητικών μεθόδων (π.χ. VOF και FVM). Με αυτόν το τρόπο, ο τελικός χρήστης μέσω ενός φιλικού interface θα μπορεί να λαμβάνει σημαντικές πληροφορίες για την κατεργασία ώστε να προβεί στην συνέχεια απρόσκοπτα σε διαδικασία βελτιστοποίησής της.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aboulkhair, N. T. *et al.* (2014) 'Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting', *Additive Manufacturing*, 1, pp. 77–86. doi: 10.1016/j.addma.2014.08.001.
- Aboulkhair, N. T. *et al.* (2016) 'On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties', *Journal of Materials Processing Technology*, 230, pp. 88–98. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.016.
- Aboulkhair, N. T. *et al.* (2019) '3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting', *Progress in Materials Science*, 106(August 2018), p. 100578. doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100578.
- Ahmed, N. *et al.* (2022) 'Process parameter selection and optimization of laser powder bed fusion for 316L stainless steel: A review', *Journal of Manufacturing Processes*, 75(January), pp. 415–434. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.12.064.
- Ahn, D. G. (2021) *Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art*, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*. Korean Society for Precision Engineering. doi: 10.1007/s40684-020-00302-7.
- Ansari, M. J., Nguyen, D. S. and Park, H. S. (2019) 'Investigation of SLM process in terms of temperature distribution and melting pool size: Modeling and experimental approaches', *Materials*, 12(8). doi: 10.3390/ma12081272.
- Antony, K., Arivazhagan, N. and Senthilkumaran, K. (2014) 'Numerical and experimental investigations on laser melting of stainless steel 316L metal powders', *Journal of Manufacturing Processes*, 16(3), pp. 345–355. doi: 10.1016/j.jmapro.2014.04.001.
- Ao, X. *et al.* (2020) 'Simulations of microstructure coupling with moving molten pool by selective laser melting using a cellular automaton', *Materials and Design*, 185, p. 108230. doi: 10.1016/j.matdes.2019.108230.
- Arrizubieta, J. I. *et al.* (2017) 'Evaluation of the relevance of melt pool dynamics in Laser Material Deposition process modeling', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, pp. 80–91. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.011.
- Aufa, A. N., Hassan, M. Z. and Ismail, Z. (2022) 'Recent advances in Ti-6Al-4V additively manufactured by selective laser melting for biomedical implants: Prospect development', *Journal of Alloys and Compounds*, 896, p. 163072. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.163072.
- Avrampos, P. and Vosniakos, G.-C. (2022) 'A review of powder deposition in additive manufacturing by powder bed fusion', *Journal of Manufacturing Processes*, 74, pp. 332–352. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.021>.
- Balbaa, M. *et al.* (2020) 'On selective laser melting of Inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses', *Materials and Design*, 193, p. 108818. doi: 10.1016/j.matdes.2020.108818.
- Bandyopadhyay, A. and Bose, S. (eds) (2016) *Additive Manufacturing*. New York, U.S.A: CRC Press.
- Bartolo, P. J. (2011) *Stereolithography*. Springer.
- Bayat, M., Mohanty, S. and Hattel, J. H. (2019) 'Multiphysics modelling of lack-of-fusion voids formation and evolution in IN718 made by multi-track/multi-layer L-PBF', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139, pp. 95–114. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.003.
- Berger, J. *et al.* (1988) 'Fiber-bundle coupled, diode end-pumped Nd:YAG laser', *Opt. Lett.*, 13(4), pp. 306–308. doi: 10.1364/OL.13.000306.
- Bibb, R. *et al.* (2009) 'Rapid manufacture of custom-fitting surgical guides', *Rapid Prototyping Journal*, 15(5), pp.

346–354. doi: 10.1108/13552540910993879.

Bidare, P. *et al.* (2018) 'Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion', *Acta Materialia*, 142, pp. 107–120. doi: 10.1016/j.actamat.2017.09.051.

Boley, C. D., Khairallah, S. A. and Rubenchik, A. M. (2015) 'Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing', *Applied Optics*, (March).

Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C. (1992) 'A continuum method for modeling surface tension', *Journal of Computational Physics*, 100(2), pp. 335–354. doi: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.

Brandt, M. (ed.) (2017) *Laser Additive Manufacturing*. Woodhead Publishing Limited. doi: 10.1103/PhysRevE.69.066504.

Bru, D. and Ro, F. (2011) 'Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage : numerical analysis and comparison with experiments', pp. 1027–1033. doi: 10.1007/s00231-011-0866-9.

Bruna-Rosso, C., Demir, A. G. and Previtali, B. (2018) 'Selective laser melting finite element modeling: Validation with high-speed imaging and lack of fusion defects prediction', *Materials and Design*, 156, pp. 143–153. doi: 10.1016/j.matdes.2018.06.037.

Cao, L. (2019) 'Numerical simulation of the impact of laying powder on selective laser melting single-pass formation', *International Journal of Heat and Mass Transfer*. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.053.

Carslaw, H.; Jaeger, J. (1959) *Conduction of Heat in Solids*. 2nd edn. Oxford: Oxford University Press.

Chen, H. and Yan, W. (2020) 'Spattering and denudation in laser powder bed fusion process: Multiphase flow modelling', *Acta Materialia*, 196, pp. 154–167. doi: 10.1016/j.actamat.2020.06.033.

Chen, Q. *et al.* (2016) 'Finite element modeling of deposition of ceramic material during SLM additive manufacturing', *MATEC Web of Conferences*, 80. doi: 10.1051/mateconf/20168008001.

Chen, Y. *et al.* (2022) 'Multi-scale residual stress prediction for selective laser melting of high strength steel considering solid-state phase transformation', *Optics and Laser Technology*, 146(May 2021), p. 107578. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107578.

Chen, Z. *et al.* (2019) '3D printing of ceramics: A review', *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4), pp. 661–687. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013.

Chen, Z. W. *et al.* (2019) 'Solidification During Selective Laser Melting of Co-29Cr-6Mo Alloy', *JOM*, 71(2), pp. 691–696. doi: 10.1007/s11837-018-3264-7.

Cherry, J. A. *et al.* (2015) 'Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting', pp. 869–879. doi: 10.1007/s00170-014-6297-2.

Childs, T. H. G., Hauser, G. and Badrossamay, M. (2005) 'Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders: Experiments and modelling', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219(4), pp. 339–357. doi: 10.1243/095440505X8109.

Chlebus, E. *et al.* (2011) 'Microstructure and mechanical behaviour of Ti-6Al-7Nb alloy produced by selective laser melting', *Materials Characterization*, 62(5), pp. 488–495. doi: 10.1016/j.matchar.2011.03.006.

Clare, A. T. *et al.* (2008) 'Selective laser melting of high aspect ratio 3D nickel-titanium structures two way trained for MEMS applications', *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 4(2), pp. 181–187. doi: 10.1007/s10999-007-9032-4.

Conti, P., Cianetti, F. and Pilerci, P. (2018) 'Parametric Finite Elements Model of SLM Additive Manufacturing process', *Procedia Structural Integrity*, 8(2017), pp. 410–421. doi: 10.1016/j.prostr.2017.12.041.

- Cook, P. S. and Murphy, A. B. (2020) 'Simulation of melt pool behaviour during additive manufacturing: Underlying physics and progress', *Additive Manufacturing*. doi: 10.1016/j.addma.2019.100909.
- Cooke, S. *et al.* (2020) 'Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling', *Journal of Manufacturing Processes*, 57(April), pp. 978–1003. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.07.025.
- Courtois, M. *et al.* (2014) 'A complete model of keyhole and melt pool dynamics to analyze instabilities and collapse during laser welding', *Journal of Laser Applications*, 26(4), p. 042001. doi: 10.2351/1.4886835.
- Dai, D. and Gu, D. (2015) 'Effect of metal vaporization behavior on keyhole-mode surface morphology of selective laser melted composites using different protective atmospheres', *Applied Surface Science*, 355, pp. 310–319. doi: 10.1016/j.apsusc.2015.07.044.
- Dave, H. k. and Davim, J. P. (2021) *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Springer. doi: 10.1007/978-3-030-68024-4_2.
- Demir, A. G., Colombo, P. and Previtali, B. (2017) 'From pulsed to continuous wave emission in SLM with contemporary fiber laser sources: effect of temporal and spatial pulse overlap in part quality', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5–8), pp. 2701–2714. doi: 10.1007/s00170-016-9948-7.
- Dickey, F. M. (ed.) (2018) *Laser Beam Shaping*. {CRC} Press. doi: 10.1201/b17140.
- Dilip, J. J. S. *et al.* (2017) 'Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting', *Progress in Additive Manufacturing*, 2(3), pp. 157–167. doi: 10.1007/s40964-017-0030-2.
- Dizon, J. R. C. *et al.* (2018) 'Mechanical characterization of 3D-printed polymers', *Additive Manufacturing*, 20, pp. 44–67. doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
- Doubenskaia, M. A. *et al.* (2015) 'Determination of true temperature in selective laser melting of metal powder using infrared camera', *Materials Science Forum*, 834(November), pp. 93–102. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.834.93.
- Eagar, T. and Tsai, N.-S. (1983) 'Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Sources Use of a Gaussian heat distribution in dimensionless form indicates final weld pool shape can be predicted accurately for many welds and materials', *Welding Journal (Miami, Fla)*, 62(December), pp. 154–155.
- Facchini, L. *et al.* (2010) 'Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders', *Rapid Prototyping Journal*, 16(6), pp. 450–459. doi: 10.1108/13552541011083371.
- Fayazfar, H. *et al.* (2018) 'A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties', *Materials and Design*, 144, pp. 98–128. doi: 10.1016/j.matdes.2018.02.018.
- Ferro, P. *et al.* (2020) 'A modified volumetric energy density–based approach for porosity assessment in additive manufacturing process design', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(7–8), pp. 1911–1921. doi: 10.1007/s00170-020-05949-9.
- Fischer, P. *et al.* (2003) 'Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source', *Acta Materialia*, 51(6), pp. 1651–1662. doi: 10.1016/S1359-6454(02)00567-0.
- Foroozmehr, A. *et al.* (2016) 'Finite Element Simulation of Selective Laser Melting process considering Optical Penetration Depth of laser in powder bed', *Materials and Design*, 89, pp. 255–263. doi: 10.1016/j.matdes.2015.10.002.
- Frazier, W. E. (2014) 'Metal additive manufacturing: A review', *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), pp. 1917–1928. doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.

- Gan, Z. *et al.* (2021) 'Universal scaling laws of keyhole stability and porosity in 3D printing of metals', *Nature Communications*, 12(1). doi: 10.1038/s41467-021-22704-0.
- Ge, W. *et al.* (2021) 'Numerical modelling of surface morphology in selective laser melting', *Computational Materials Science*, 186(September 2020), p. 110062. doi: 10.1016/j.commatsci.2020.110062.
- Ge, W., Fuh, J. Y. H. and Na, S. J. (2021) 'Numerical modelling of keyhole formation in selective laser melting of Ti6Al4V', *Journal of Manufacturing Processes*, 62(January), pp. 646–654. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.01.005.
- Gebhardt, A. (2012) *Understanding Additive Manufacturing, Understanding Additive Manufacturing*. doi: 10.3139/9783446431621.
- Gebhardt, A. and Hotter, J.-S. (2016) *Additive Manufacturing - 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*, South Carolina Business. HANSER Publications.
- Ghayoor, M. *et al.* (2020) 'Selective laser melting of 304L stainless steel: Role of volumetric energy density on the microstructure, texture and mechanical properties', *Additive Manufacturing*, 32(May 2019), p. 101011. doi: 10.1016/j.addma.2019.101011.
- Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015) *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9.
- Gibson, M. A. *et al.* (2018) '3D printing metals like thermoplastics: Fused filament fabrication of metallic glasses', *Materials Today*, 21(7), pp. 697–702. doi: 10.1016/j.mattod.2018.07.001.
- Gillham, J. K. (1979) 'Award address formation and properties of network polymeric materials', *Polymer Engineering & Science*, 19(10), pp. 676–682. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.760191005>.
- Goett, G. *et al.* (2013) 'Emissivity and temperature determination on steel above the melting point', *Welding in the World*, 57(4), pp. 595–602. doi: 10.1007/s40194-013-0054-2.
- Goh, G. D. *et al.* (2017) 'Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential', *Aerospace Science and Technology*, 63, pp. 140–151. doi: 10.1016/j.ast.2016.12.019.
- Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M. (1984) 'A New Finite Element Model for Welding Heat Sources', *Metallurgical Transactions B*, 15(B), pp. 299–305. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02667333>.
- Gouge, M. and Michaleris, P. (2017) *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing*. First edit, *Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing*. First edit. Elsevier Inc. doi: 10.1016/c2016-0-00317-0.
- Groover, M. P. (2007) *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems*. 3rd edn. John Wiley & Sons. Available at: papers3://publication/uuid/9A3C30DC-9038-43B3-AE1A-CFE1EA3BE02B%5Cpapers3://publication/uuid/01F0C992-C793-4828-91E7-5CEA9EEBD8DE.
- Gu, D. (2015) *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*. Springer.
- Gu, D. and Yuan, P. (2016) 'Thermal evolution behavior and fluid dynamics during laser additive manufacturing of Thermal evolution behavior and fluid dynamics during laser additive manufacturing of Al-based nanocomposites : Underlying role of reinforcement weight fraction', 233109(2015). doi: 10.1063/1.4937905.
- Gunenthiram, V. *et al.* (2018) 'Experimental analysis of spatter generation and melt-pool behavior during the powder bed laser beam melting process', *Journal of Materials Processing Technology*, 251, pp. 376–386. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.08.012.
- Guo, M. *et al.* (2019) 'Formation of scanning tracks during Selective Laser Melting (SLM) of pure tungsten powder: Morphology, geometric features and forming mechanisms', *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 79, pp. 37–46. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2018.11.003.
- Guo, Y., Xu, Z., Wang, Q., *et al.* (2022) 'Corrosion resistance and biocompatibility of graphene oxide coating on the

- surface of the additively manufactured NiTi alloy', *Progress in Organic Coatings*, 164(January), p. 106722. doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.106722.
- Guo, Y., Xu, Z., Liu, M., *et al.* (2022) 'The corrosion resistance, biocompatibility and biomineralization of the dicalcium phosphate dihydrate coating on the surface of the additively manufactured NiTi alloy', *Journal of Materials Research and Technology*, 17, pp. 622–635. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.01.063.
- Guraya, T., Singamneni, S. and Chen, Z. W. (2019) 'Microstructure formed during selective laser melting of IN738LC in keyhole mode', *Journal of Alloys and Compounds*, 792, pp. 151–160. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.03.419.
- Gusarov, A. V. *et al.* (2009) 'Model of radiation and heat transfer in laser-powder interaction zone at selective laser melting', *Journal of Heat Transfer*, 131(7), pp. 1–10. doi: 10.1115/1.3109245.
- Haghdadi, N. *et al.* (2021) 'Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges', *Journal of Materials Science*, 56(1), pp. 64–107. doi: 10.1007/s10853-020-05109-0.
- Hann, D. B., Iammi, J. and Folkes, J. (2011) 'A simple methodology for predicting laser-weld properties from material and laser parameters', *Journal of Physics D: Applied Physics*. doi: 10.1088/0022-3727/44/44/445401.
- He, Q. *et al.* (2020) 'Modeling and numerical studies of selective laser melting: Multiphase flow, solidification and heat transfer', *Materials and Design*, 196, p. 109115. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109115.
- He, Z. *et al.* (2017) 'Fabrication of Polydimethylsiloxane films with special surface wettability by 3D printing', *Composites Part B*, 129, pp. 58–65. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.07.025.
- Hecht, J. (1999) *The Laser Guidebook*. 2nd edn. McGraw Hill. doi: 10.1063/1.2820035.
- Heeling, T., Cloots, M. and Wegener, K. (2017) 'Melt pool simulation for the evaluation of process parameters in selective laser melting', *Additive Manufacturing*, 14, pp. 116–125. doi: 10.1016/j.addma.2017.02.003.
- Heigel, J. C., Michaleris, P. and Reutzel, E. W. (2015) 'Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V', *Additive Manufacturing*, 5, pp. 9–19. doi: 10.1016/j.addma.2014.10.003.
- Herzog, D. *et al.* (2016) 'Additive manufacturing of metals', *Acta Materialia*, 117, pp. 371–392. doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- Hirano, K., Fabbro, R. and Muller, M. (2012) 'Study on temperature dependence of recoil pressure near the boiling temperature - Towards better modeling and simulation', *ICALEO 2012 - 31st International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, (January), pp. 678–684.
- Holman, J. P. (2010) *Heat Transfer*. 10th edn. McGraw Hill. doi: 10.1080/01973762.1999.9658510.
- Hosseini, E. and Popovich, V. A. (2019) 'A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718', *Additive Manufacturing*, 30(August), p. 100877. doi: 10.1016/j.addma.2019.100877.
- <https://additive-manufacturing-report.com/> (no date).
- Huang, Y. *et al.* (2022) 'Keyhole fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing', *Nature Communications*. Edited by A. Bandyopadhyay and S. Bose, 13(1), p. 1170. doi: 10.1038/s41467-022-28694-x.
- Hussein, A. *et al.* (2013) 'Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting', *Materials and Design*, 52, pp. 638–647. doi: 10.1016/j.matdes.2013.05.070.
- Ishikawa, T. *et al.* (2017) 'Emissivity Measurements of Molten Metals with an Electrostatic Levitator', *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 34(3), pp. 1–6. doi: 10.15011/jjasma.34.340305.

- Iveković, A. *et al.* (2019) 'Effect of processing parameters on microstructure and properties of tungsten heavy alloys fabricated by SLM', *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 82(January), pp. 23–30. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2019.03.020.
- Javidrad, H. R., Ghanbari, M. and Javidrad, F. (2021) 'Effect of scanning pattern and volumetric energy density on the properties of selective laser melting Ti-6Al-4V specimens', *Journal of Materials Research and Technology*, 12, pp. 989–998. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.03.044.
- Jia, Y., Saadlaoui, Y. and Bergheau, J. M. (2021) 'A temperature-dependent heat source for simulating deep penetration in selective laser melting process', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(23). doi: 10.3390/app112311406.
- Jing, G. and Wang, Z. (2021) 'Influence of molten pool mode on microstructure and mechanical properties of heterogeneously tempered 300M steel by selective laser melting', *Journal of Materials Processing Technology*, 296(April), p. 117188. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117188.
- Johnson, P. B. and Christy, R. W. (1974) 'Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd', *Physical Review B*, 9(12), pp. 5056–5070. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>.
- Kafkas, F. and Ebel, T. (2014) 'Metallurgical and mechanical properties of Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy fabricated by metal injection molding', *Journal of Alloys and Compounds*, 617, pp. 359–366. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.07.168.
- Kalpakjian, S. and S. R. S. (2009) 'MANUFACTURING ENGINEERING Illinois Institute of Technology', p. Chapter 31-900-921.
- Kamath, C. *et al.* (2014) 'Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(1–4), pp. 65–78. doi: 10.1007/s00170-014-5954-9.
- Katopodes, N. D. (2019) 'Volume of Fluid Method', in *Free-Surface Flow*, pp. 766–802. doi: 10.1016/b978-0-12-815485-4.00018-8.
- Kazemi, Z. *et al.* (2022) 'Melting pool simulation of 316L samples manufactured by Selective Laser Melting method, comparison with experimental results', *International Journal of Thermal Sciences*, 176(January), p. 107538. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107538.
- Ke, L. *et al.* (2014) 'Effects of peak laser power on laser micro sintering of nickel powder by pulsed Nd:YAG laser', *Rapid Prototyping Journal*, 20(4), pp. 328–335. doi: 10.1108/RPJ-09-2012-0084.
- Khairallah, S. A. *et al.* (2016) 'Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones', *Acta Materialia*, 108, pp. 36–45. doi: 10.1016/j.actamat.2016.02.014.
- Khairallah, S. A. *et al.* (2020) 'Controlling interdependent meso-nanosecond dynamics and defect generation in metal 3D printing', *Science*, 368(6491), pp. 660–665. doi: 10.1126/science.aay7830.
- Khorasani, M. *et al.* (2022) 'The effect of absorption ratio on meltpool features in laser-based powder bed fusion of IN718', *Optics and Laser Technology*, 153(May), p. 108263. doi: 10.1016/j.optlastec.2022.108263.
- Kim, C. S. (1975) *Thermophysical Properties of Stainless Steels*. National Technical Information Service.
- Kim, W. R. *et al.* (2020) 'Microstructural study on a Fe-10Cu alloy fabricated by selective laser melting for defect-free process optimization based on the energy density', *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), pp. 12834–12839. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.09.051.
- King, W. E. *et al.* (2014) 'Journal of Materials Processing Technology Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing', *Journal of Materials Processing Tech.*, 214(12), pp. 2915–2925. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005.

- Korkmaz, M. E. *et al.* (2022) 'A short review on thermal treatments of Titanium & Nickel based alloys processed by selective laser melting', *Journal of Materials Research and Technology*, 16, pp. 1090–1101. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.12.061.
- Kouraytem, N. *et al.* (2019) 'Effect of Laser-Matter Interaction on Molten Pool Flow and Keyhole Dynamics', *Physical Review Applied*, 10(1), p. 1. doi: 10.1103/PhysRevApplied.11.064054.
- Kumar, P. and Farah, J. (2019) 'Influence of processing parameters on properties of Inconel 718', *Materials Letters*, 252, pp. 256–259.
- Kumar, S. (2014) *Selective Laser Sintering/Melting, Comprehensive Materials Processing*. Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01003-7.
- Kumar, S. (2022) *Additive Manufacturing Solutions, Additive Manufacturing Solutions*. Springer. doi: 10.1007/978-3-030-80783-2.
- Kundakc, E. *et al.* (2018) 'Thermal and molten pool model in selective laser melting process of Inconel 625'.
- Ladani, L. *et al.* (2017) 'Effective liquid conductivity for improved simulation of thermal transport in laser beam melting powder bed technology', *Additive Manufacturing*, 14, pp. 13–23. doi: 10.1016/j.addma.2016.12.004.
- Laoui, T. *et al.* (2006) 'Properties of titanium dental implant models made by laser processing', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 220(6), pp. 857–863. doi: 10.1243/09544062JMES133.
- Larimian, T. *et al.* (2021) 'Effect of Laser Spot Size, Scanning Strategy, Scanning Speed, and Laser Power on Microstructure and Mechanical Behavior of 316L Stainless Steel Fabricated via Selective Laser Melting', *Journal of Materials Engineering and Performance*, (Ref 10). doi: 10.1007/s11665-021-06387-8.
- Le, K. Q., Tang, C. and Wong, C. H. (2019) 'On the study of keyhole-mode melting in selective laser melting process', *International Journal of Thermal Sciences*, 145(May). doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.105992.
- Leary, M. (2020) 'Powder bed fusion', *Design for Additive Manufacturing*, pp. 295–319. doi: 10.1016/b978-0-12-816721-2.00011-7.
- Lee, H. *et al.* (2017) 'Lasers in additive manufacturing: A review', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(3), pp. 307–322. doi: 10.1007/s40684-017-0037-7.
- Lee, K. H. and Yun, G. J. (2020) 'A novel heat source model for analysis of melt Pool evolution in selective laser melting process', *Additive Manufacturing*, 36(August), p. 101497. doi: 10.1016/j.addma.2020.101497.
- Lee, K. S. *et al.* (2008) 'Advances in 3D nano/microfabrication using two-photon initiated polymerization', *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 33(6), pp. 631–681. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.01.001.
- Lee, Y. S. *et al.* (2014) 'Influence of fluid convection on weld pool formation in laser cladding', *Welding Journal*, 93(8).
- Lee, Y. S. and Zhang, W. (2016) 'Modeling of heat transfer, fluid flow and solidification microstructure of nickel-base superalloy fabricated by laser powder bed fusion', *Additive Manufacturing*, 12, pp. 178–188. doi: 10.1016/j.addma.2016.05.003.
- Li, C., Tsai, T. and Tseng, C. (2016) 'Numerical simulation for heat and mass transfer during selective laser melting of titanium alloys powder', *Physics Procedia*, 83, pp. 1444–1449. doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.150.
- Li, E. *et al.* (2022) 'Modelling of keyhole dynamics and melt pool flow in laser powder bed fusion process', *Powder Technology*, 400, p. 117262. doi: 10.1016/j.powtec.2022.117262.
- Li, L. *et al.* (2016) 'Study of Ti-6Al-4V alloy spectral emissivity characteristics during thermal oxidation process', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, pp. 699–706. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.069.

- Li, R. *et al.* (2012) 'Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(9–12), pp. 1025–1035. doi: 10.1007/s00170-011-3566-1.
- Liu, B. *et al.* (2020) 'A new ray tracing heat source model for mesoscale CFD simulation of selective laser melting (SLM)', *Applied Mathematical Modelling*, 79, pp. 506–520. doi: 10.1016/j.apm.2019.10.049.
- Liu, S. *et al.* (2018) 'Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis', *Materials and Design*, 142, pp. 319–328. doi: 10.1016/j.matdes.2018.01.022.
- Liu, S. and Guo, H. (2020) 'Balling behavior of selective laser melting (SLM) magnesium alloy', *Materials*, 13(16). doi: 10.3390/MA13163632.
- Liu, Y. J. *et al.* (2015) 'Processing and properties of topologically optimised biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn scaffolds manufactured by selective laser melting', *Materials Science and Engineering A*, 642, pp. 268–278. doi: 10.1016/j.msea.2015.06.088.
- Lodhi, M. J. K. *et al.* (2019) 'Additively manufactured 316L stainless steel with improved corrosion resistance and biological response for biomedical applications', *Additive Manufacturing*, 27(October 2018), pp. 8–19. doi: 10.1016/j.addma.2019.02.005.
- Loh, L. E. *et al.* (2015) 'Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, pp. 288–300. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.014.
- Lu, Z. L. *et al.* (2013) 'Review of main manufacturing processes of complex hollow turbine blades: This paper critically reviews conventional and advanced technologies used for manufacturing hollow turbine blades', *Virtual and Physical Prototyping*, 8(2), pp. 87–95. doi: 10.1080/17452759.2013.790600.
- Ly, S. *et al.* (2017) 'Metal vapor micro-jet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing', *Scientific Reports*, 7(1), pp. 1–12. doi: 10.1038/s41598-017-04237-z.
- Marcu, T. *et al.* (2012) 'Metallurgical and mechanical characterisation of titanium based materials for endosseous applications obtained by selective laser melting', *Powder Metallurgy*, 55(4), pp. 309–314. doi: 10.1179/1743290112Y.0000000007.
- Markl, M. and Körner, C. (2016) 'Multiscale Modeling of Powder Bed-Based Additive Manufacturing', *Annual Review of Materials Research*. doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-032158.
- Markopoulos, A. P., Karkalos, N. E. and Papazoglou, E. L. (2020) 'Meshless Methods for the Simulation of Machining and Micro-machining: A Review', *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(3), pp. 831–853. doi: 10.1007/s11831-019-09333-z.
- Marla, D., Bhandarkar, U. V and Joshi, S. S. (2011) 'Critical assessment of the issues in the modeling of ablation and plasma expansion processes in the pulsed laser deposition of metals APPLIED PHYSICS REVIEWS — FOCUSED REVIEWS Critical assessment of the issues in the modeling of ablation and plasma', (February). doi: 10.1063/1.3537838.
- Martin, A. A. *et al.* (2019) 'Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing', *Nature Communications*, 10(1), pp. 1–10. doi: 10.1038/s41467-019-10009-2.
- Matti, R. S. and Kaplan, A. F. H. (2015) 'Analyzing and Post-modelling the High Speed Images of a Wavy Laser Induced Boiling Front', *Physics Procedia*, 78(August), pp. 192–201. doi: 10.1016/j.phpro.2015.11.043.
- Meier, C. *et al.* (2018) 'Thermophysical Phenomena in Metal Additive Manufacturing By Selective Laser Melting: Fundamentals, Modeling, Simulation, and Experimentation', *Annual Review of Heat Transfer*, 20(1), pp. 241–316. doi: 10.1615/annualrevheattransfer.2018019042.

- Mercelis, P., Froyen, L. and Rombouts, M. (2005) 'Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting', (May 2014). doi: 10.1108/13552540510573365.
- Metelkova, J. *et al.* (2018) 'On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L', *Additive Manufacturing*, 23(April), pp. 161–169. doi: 10.1016/j.addma.2018.08.006.
- Milewski, J. O. (2017) *Additive Manufacturing of Metals From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*. 1st edn. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-58205-4.
- Mills, K. C. (2002) *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys, Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*. doi: 10.1533/9781845690144.
- Minas, C. *et al.* (2016) '3D Printing of Emulsions and Foams into Hierarchical Porous Ceramics', pp. 9993–9999. doi: 10.1002/adma.201603390.
- Mines, R. A. W. *et al.* (2013) 'Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores', *International Journal of Impact Engineering*, 60, pp. 120–132. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2013.04.007.
- Mirkoohi, E. *et al.* (2018) 'Thermal Modeling of Temperature Distribution in Metal Additive Manufacturing Considering Effects of Build Layers, Latent Heat, and Temperature-Sensitivity of Material Properties', *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(63). doi: doi:10.3390/jmmp2030063.
- Mirkoohi, E. *et al.* (2019) 'Heat source modeling in selective laser melting', *Materials*. doi: 10.3390/ma12132052.
- Miyagi, M. and Wang, J. (2020) 'Keyhole dynamics and morphology visualized by in-situ X-ray imaging in laser melting of austenitic stainless steel', *Journal of Materials Processing Technology*, 282(February), p. 116673. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116673.
- Miyauchi, H., Matsumoto, H. and Yokota, K. (2022) 'Selective laser melting with changing input energy periodically for production of partially hardened laminate structure in H13 steel', *Journal of Manufacturing Processes*, 73(December 2021), pp. 839–848. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.11.028.
- Mooney, B. *et al.* (2019) 'Process phenomena influencing the tensile and anisotropic characteristics of additively manufactured maraging steel', *Materials Science and Engineering A*, 745(July 2018), pp. 115–125. doi: 10.1016/j.msea.2018.12.070.
- Moritz, T. and Maleksaeedi, S. (2018) '4 - Additive manufacturing of ceramic components', in Zhang, J. and Jung, Y.-G. (eds) *Additive Manufacturing*. Butterworth-Heinemann, pp. 105–161. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9.00004-9>.
- Mukherjee, T., Zhang, W. and Debroy, T. (2017) 'An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing', *Computational Materials Science*, 126, pp. 360–372. doi: 10.1016/j.commatsci.2016.10.003.
- Mullen, L. *et al.* (2009) 'Selective laser melting: A regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications', *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 89(2), pp. 325–334. doi: 10.1002/jbm.b.31219.
- Mumtaz, K. and Hopkinson, N. (2009) 'Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting', *Rapid Prototyping Journal*, 15(2), pp. 96–103. doi: 10.1108/13552540910943397.
- Mwema, F. M. and Akinlabi, E. T. (2020) *Fused Deposition Modeling*. Springer. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48259-6_1.
- Neill, S. P. and Hashemi, M. R. (2018) *Fundamentals of ocean renewable energy: Generating electricity from the sea, Fundamentals of Ocean Renewable Energy: Generating Electricity from the Sea*. doi: 10.1016/C2016-0-00230-9.

- Ngo, T. D. *et al.* (2018) 'Additive manufacturing (3D printing): A review of materials , methods , applications and challenges', *Composites Part B*, 143(February), pp. 172–196. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- Nield, D. A. and Bejan, A. (2012) *Convection in porous media: Fourth edition, Convection in Porous Media: Fourth Edition*. doi: 10.1007/978-1-4614-5541-7.
- Ning, J. *et al.* (2019) 'Analytical Modeling of In-Process Temperature in Powder Bed Additive Manufacturing Considering Laser Power Absorption, Latent Heat, Scanning Strategy, and Powder Packing', *Materials*, 12(5), p. 808. doi: 10.3390/ma12050808.
- Ning, J. *et al.* (2020) 'Analytical modeling of part distortion in metal additive manufacturing', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(1–2), pp. 49–57. doi: 10.1007/s00170-020-05065-8.
- Nong, X. D. *et al.* (2020) 'Selective laser melting and heat treatment of precipitation hardening stainless steel with a refined microstructure and excellent mechanical properties', *Scripta Materialia*, 178, pp. 7–12. doi: 10.1016/j.scriptamat.2019.10.040.
- Okunkova, A. *et al.* (2014) 'Experimental approbation of selective laser melting of powders by the use of non-Gaussian power density distributions', *Physics Procedia*, 56(C), pp. 48–57. doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.095.
- Oropallo, W. and Piegl, L. A. (2016) 'Ten challenges in 3D printing', *Engineering with Computers*, 32(1), pp. 135–148. doi: 10.1007/s00366-015-0407-0.
- Oropeza, D. and Hart, A. J. (2021) 'A laboratory-scale binder jet additive manufacturing testbed for process exploration and material development', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(11), pp. 3459–3473. doi: 10.1007/s00170-021-07123-1.
- Ozsoy, A. *et al.* (2021) 'Pulsed-mode Selective Laser Melting of 17-4 PH stainless steel: Effect of laser parameters on density and mechanical properties', *Journal of Manufacturing Processes*, 68(PA), pp. 910–922. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.06.017.
- Pal, S. *et al.* (2020) 'Evolution of the metallurgical properties of Ti-6Al-4V, produced with different laser processing parameters, at constant energy density in selective laser melting', *Results in Physics*, 17(May). doi: 10.1016/j.rinp.2020.103186.
- Pan, T. *et al.* (2022) 'Effect of processing parameters and build orientation on microstructure and performance of AISI stainless steel 304L made with selective laser melting under different strain rates', *Materials Science and Engineering A*, 835(November 2020), p. 142686. doi: 10.1016/j.msea.2022.142686.
- Panda, B. K. and Sahoo, S. (2019) 'Thermo-mechanical modeling and validation of stress field during laser powder bed fusion of AISi10Mg built part', *Results in Physics*, 12(January), pp. 1372–1381. doi: 10.1016/j.rinp.2019.01.002.
- Panwisawas, C. *et al.* (2017) 'Mesoscale modelling of selective laser melting : Thermal fluid dynamics and microstructural evolution', *Computational Materials Science*, 126, pp. 479–490. doi: 10.1016/j.commatsci.2016.10.011.
- Papazoglou, E. L. *et al.* (2021) *On the Modeling and Simulation of SLM and SLS for Metal and Polymer Powders : A Review, Archives of Computational Methods in Engineering*. Springer Netherlands. doi: 10.1007/s11831-021-09601-x.
- Patalas-Maliszewska, J. *et al.* (2020) 'Single tracks as a key factor in additive manufacturing technology-analysis of research trends and metal deposition behavior', *Materials*, 13(5). doi: 10.3390/ma13051115.
- Patel, S. and Vlasea, M. (2020) 'Melting modes in laser powder bed fusion', *Materialia*, 9(January). doi: 10.1016/j.mtla.2020.100591.
- Pepper, D. W. and Heinrich, J. C. (2017) *The Finite Element Method*. Third. CRC Press. doi: 10.1137/1.9780898718782.ch7.

- Pérez, M. *et al.* (2021) 'On surface quality of engineered parts manufactured by additive manufacturing and postfinishing by machining', *Additive Manufacturing*, pp. 369–394. doi: 10.1016/B978-0-12-818411-0.00015-X.
- Pham, D. T. and Dimov, S. S. (2001) *Rapid manufacturing, Collaborative Engineering: Theory and Practice*. Springer. doi: 10.1007/978-0-387-47321-5_7.
- Praveena, B. A. *et al.* (2022) 'Materials Today : Proceedings A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods , materials , applications , challenges , trends and future potential', *Materials Today: Proceedings*, (xxxx). doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.059.
- Qi, T. *et al.* (2017) 'Selective laser melting of Al7050 powder: melting mode transition and comparison of the characteristics between the keyhole and conduction mode', *Materials and Design Design*, 135, pp. 257–266. doi: 10.1016/j.matdes.2017.09.014.
- Qiu, C. *et al.* (2015) 'On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting', *Acta Materialia*, 96, pp. 72–79. doi: 10.1016/j.actamat.2015.06.004.
- Queva, A. *et al.* (2020) 'Numerical study of the impact of vaporisation on melt pool dynamics in Laser Powder Bed Fusion - Application to IN718 and Ti-6Al-4V', *Additive Manufacturing*, 35(November), p. 101249. doi: 10.1016/j.addma.2020.101249.
- Reddy, J. N. (2006) *An Introduction to the Finite-Element Method*. 3rd edn. McGraw Hill. doi: 10.1002/0471777447.ch16.
- Rehme, O. and Emmelmann, C. (2009) 'Selective Laser Melting of Honeycombs with Negative Poisson's Ratio', *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 4(2), pp. 128–134. doi: 10.2961/jlmn.2009.02.0010.
- Ren, B. *et al.* (2019) 'Preparation and mechanical properties of selective laser melted H13 steel', *Journal of Materials Research*, 34(8), pp. 1415–1425. doi: 10.1557/jmr.2019.10.
- Roshchupkin, S. *et al.* (2021) 'A brief review of main ideas of metal fused filament fabrication', *Materials Today: Proceedings*, 38, pp. 2063–2067. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.142.
- Saeidi, K. and Akhtar, F. (2019) 'Microstructure-Tailored Stainless Steels with High Mechanical Performance at Elevated Temperature', *Stainless Steels and Alloys*. doi: 10.5772/intechopen.80468.
- Scipioni Bertoli, U. *et al.* (2017) 'On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting', *Materials and Design*, 113, pp. 331–340. doi: 10.1016/j.matdes.2016.10.037.
- Self, S. A. (1983) 'Focusing of spherical Gaussian beams', *Appl. Opt.*, 22(5), pp. 658–661. doi: 10.1364/AO.22.000658.
- Seshu, P. (2012) *Textbook of finite element analysis*. PHI Learning Private Limited. Available at: http://www.worldcat.org/title/textbook-of-finite-element-analysis/oclc/166413523&referer=brief_results.
- Shen, Y. *et al.* (2010) 'The mechanical properties of sandwich structures based on metal lattice architectures', *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 12(2), pp. 159–180. doi: 10.1177/1099636209104536.
- Sheshadri, R. *et al.* (2021) 'Experimental investigation of selective laser melting parameters for higher surface quality and microhardness properties: taguchi and super ranking concept approaches', *Journal of Materials Research and Technology*, 14, pp. 2586–2600. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.07.144.
- Shi, X. *et al.* (2020) 'Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting', *Optics and Laser Technology*, 132(July), p. 106471. doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106471.
- Shrestha, S., Rauniyar, S. and Chou, K. (2019) 'Thermo-Fluid Modeling of Selective Laser Melting: Single-Track Formation Incorporating Metallic Powder', *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(2), pp. 611–619. doi: 10.1007/s11665-018-3574-5.

- Siao, Y. H. and Wen, C. Da (2021) 'Examination of molten pool with Marangoni flow and evaporation effect by simulation and experiment in selective laser melting', *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 125, p. 105325. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105325.
- Siegel, E. (1976) 'Optical Reflectivity of Liquid Metals at their Melting Temperatures', *Physics and Chemistry of Liquids*, 5(1), pp. 9–27. doi: 10.1080/00319107608084103.
- Sih, S. S. and Barlow, J. W. (2004) 'The prediction of the emissivity and thermal conductivity of powder beds', *Particulate Science and Technology*, 22(4), pp. 427–440. doi: 10.1080/02726350490501682.
- Simonds, B. J. *et al.* (2018) 'Time-Resolved Absorptance and Melt Pool Dynamics during Intense Laser Irradiation of a Metal', *Physical Review Applied*, 10(4). doi: 10.1103/PhysRevApplied.10.044061.
- Singh, N. *et al.* (2020) 'Selective laser manufacturing of Ti-based alloys and composites: impact of process parameters, application trends, and future prospects', *Materials Today Advances*, 8, p. 100097. doi: 10.1016/j.mtadv.2020.100097.
- Singh, R. and Davim, J. P. (eds) (2018) *Additive Manufacturing: Applications and Innovations, Manufacturing Design and Technology Series*. CRC Press.
- Song, B. *et al.* (2021) 'Chapter 3 - Preparation and processing of metal materials', in Song, B. *et al.* (eds) *Selective Laser Melting for Metal and Metal Matrix Composites*. Academic Press (3D Printing Technology Series), pp. 35–88. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103005-9.00003-1>.
- Souza, A. F. *et al.* (2019) 'Effect of laser speed, layer thickness, and part position on the mechanical properties of maraging 300 parts manufactured by selective laser melting', *Materials Science and Engineering A*, 767(August), p. 138425. doi: 10.1016/j.msea.2019.138425.
- Soylemez, E. (2018) 'Modelling the Melt Pool of the Laser Sintered Ti6Al4V Layers with Goldak 's Double-Ellipsoidal Heat Source', (August).
- Srivastava, M. *et al.* (eds) (2020) *Additive Manufacturing - Fundamentals and Advancements*. CRC Press.
- Srivastava, T. S. and Sudarshan, T. S. (eds) (2016) *Additive Manufacturing-Innovations, Advances, and Applications*. New York, U.S.A: CRC.
- Srivatsan, T. S. and Sudarshan, T. S. (2016) *Additive Manufacturing, Innovations, Advances, and Applications, Additive Manufacturing (AM)*. Available at: <http://www.arcam.com/technology/additive-manufacturing.aspx>.
- Stamp, R. *et al.* (2009) 'The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting', *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 20(9), pp. 1839–1848. doi: 10.1007/s10856-009-3763-8.
- Thompson, S. M. *et al.* (2015) 'An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics', *Additive Manufacturing*, 8, pp. 36–62.
- Tian, Y. *et al.* (2020) 'Numerical analysis of powder bed generation and single track forming for selective laser melting of SS316L stainless steel', *Journal of Manufacturing Processes*, 58(September), pp. 964–974. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.09.002.
- Tomashchuk, I. *et al.* (2018) 'The numerical challenges in multiphysical modeling of laser welding with arbitrary Lagrangian-Eulerian method', *COMSOL Conference*, (1), p. 8.
- Tran, H. C. and Lo, Y. L. (2018) 'Heat transfer simulations of selective laser melting process based on volumetric heat source with powder size consideration', *Journal of Materials Processing Technology*, 255(May 2017), pp. 411–425. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.12.024.
- Trapp, J. *et al.* (2017) 'In situ absorptivity measurements of metallic powders during laser powder-bed fusion

- additive manufacturing', *Applied Materials Today*, 9, pp. 341–349. doi: 10.1016/j.apmt.2017.08.006.
- Unger, S. *et al.* (2019) 'Experimental study on the air-side thermal-flow performance of additively manufactured heat exchangers with novel fin designs', *International Journal of Thermal Sciences*, 146(May), p. 106074. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106074.
- Vaglio, E. *et al.* (2020) 'Single tracks data obtained by selective laser melting of Ti6Al4V with a small laser spot diameter', *Data in Brief*, 33, p. 106443. doi: 10.1016/j.dib.2020.106443.
- Vyavahare, S. *et al.* (2020) 'Fused deposition modelling: a review', *Rapid Prototyping Journal*, 26(1), pp. 176–201. doi: 10.1108/RPJ-04-2019-0106.
- Wahab Hashmi, A., Singh Mali, H. and Meena, A. (2021) 'Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: A review', *Materials Today: Proceedings*, (xxxx). doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.223.
- Wang, H. *et al.* (2020) 'Differences in microstructure and nano-hardness of selective laser melted Inconel 718 single tracks under various melting modes of molten pool', *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), pp. 10401–10410. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.07.029.
- Wang, H. and Zou, Y. (2019) 'Microscale interaction between laser and metal powder in powder-bed additive manufacturing: Conduction mode versus keyhole mode', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 142, p. 118473. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118473.
- Wang, L. *et al.* (2022) 'Mechanism of keyhole pore formation in metal additive manufacturing', *npj Computational Materials*, 8(1). doi: 10.1038/s41524-022-00699-6.
- Wang, L. zhi, Wang, S. and Hong, X. (2018) 'Pulsed SLM-manufactured AlSi10Mg alloy: Mechanical properties and microstructural effects of designed laser energy densities', *Journal of Manufacturing Processes*, 35(September), pp. 492–499. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.09.007.
- Wang, W. *et al.* (2022) 'Mesoscopic evolution of molten pool during selective laser melting of superalloy Inconel 738 at elevating preheating temperature', *Materials and Design*, 213, p. 110355. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110355.
- Wang, X. C. *et al.* (2002) 'Direct selective laser sintering of hard metal powders: Experimental study and simulation', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(5), pp. 351–357. doi: 10.1007/s001700200024.
- Wang, Y. and Shi, J. (2020) 'Developing very strong texture in a nickel-based superalloy by selective laser melting with an ultra-high power and flat-top laser beam', *Materials Characterization*, 165. doi: 10.1016/j.matchar.2020.110372.
- Wang, Z. *et al.* (2012) 'The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting', *Journal of Alloys and Compounds*, 513, pp. 518–523. doi: 10.1016/j.jallcom.2011.10.107.
- Waqar, S., Guo, K. and Sun, J. (2021) 'FEM analysis of thermal and residual stress profile in selective laser melting of 316L stainless steel', *Journal of Manufacturing Processes*, 66(November 2020), pp. 81–100. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.03.040.
- Waqar, S., Guo, K. and Sun, J. (2022) 'Evolution of residual stress behavior in selective laser melting (SLM) of 316L stainless steel through preheating and in-situ re-scanning techniques', *Optics and Laser Technology*, 149(December 2021), p. 107806. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107806.
- Wehmöller, M. *et al.* (2005) 'Implant design and production-a new approach by selective laser melting', *International Congress Series*, 1281, pp. 690–695. doi: 10.1016/j.ics.2005.03.155.
- Wischeropp, T. M. (2021) *Advancement of Selective Laser Melting by Laser Beam Shaping*. Springer.

- Wong, M. *et al.* (2007) 'Selective laser melting of heat transfer devices', *Rapid Prototyping Journal*, 13(5), pp. 291–297. doi: 10.1108/13552540710824797.
- Wright, C. S. *et al.* (2006) 'Selective laser melting of prealloyed high alloy steel powder beds', *Materials Science Forum*, 514–516(PART 1), pp. 516–523. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.514-516.516.
- Wu, H. *et al.* (2021) 'Selective laser melted AlSi10Mg alloy under melting mode transition: Microstructure evolution, nanomechanical behaviors and tensile properties', *Journal of Alloys and Compounds*, 873, p. 159823. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.159823.
- Wu, Y. C. *et al.* (2018) 'Numerical modeling of melt-pool behavior in selective laser melting with random powder distribution and experimental validation', *Journal of Materials Processing Technology*, 254(July 2017), pp. 72–78. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.032.
- Yadroitsev, I. (2009) *Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders*. 1st edn. LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Yadroitsev, I. *et al.* (eds) (2021) *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*. Springer.
- Yan, J. *et al.* (2019) 'A Comprehensive Study of Steel Powders (316L, H13, P20 and 18Ni300) for Their Selective Laser Melting Additive Manufacturing', *Metals*, 9(1), p. 86. doi: 10.3390/met9010086.
- Yang, J. *et al.* (2016) 'Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy', *Materials and Design*, 110, pp. 558–570. doi: 10.1016/j.matdes.2016.08.036.
- Yang, J. *et al.* (2018) 'Prediction of microstructure in selective laser melted Ti-6Al-4V alloy by cellular automaton', *Journal of Alloys and Compounds*, 748, pp. 281–290. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.03.116.
- Yang, Q. *et al.* (2016) 'Finite element modeling and validation of thermomechanical behavior of Ti-6Al-4V in directed energy deposition additive manufacturing', *Additive Manufacturing*, 12, pp. 169–177. doi: 10.1016/j.addma.2016.06.012.
- Yang, X. H. *et al.* (2021) 'Effects of laser spot size on the mechanical properties of aisi 420 stainless steel fabricated by selective laser melting', *Materials*, 14(16). doi: 10.3390/ma14164593.
- Yap, C. Y. *et al.* (2015) 'Review of selective laser melting: Materials and applications', *Applied Physics Reviews*, 2(4). doi: 10.1063/1.4935926.
- Ye, Q. and Chen, S. (2017) 'Numerical Modeling of Metal-Based Additive Manufacturing Using Level Set Methods', *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(7), p. 071019. doi: 10.1115/1.4036290.
- Zhang, B., Li, Y. and Bai, Q. (2017) 'Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review', *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 30(3), pp. 515–527. doi: 10.1007/s10033-017-0121-5.
- Zhang, D. *et al.* (2018) 'Thermofluid field of molten pool and its effects during selective laser melting (SLM) of Inconel 718 alloy', *Additive Manufacturing*, 21(100), pp. 567–578. doi: 10.1016/j.addma.2018.03.031.
- Zhang, J. *et al.* (2019) 'A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends', *Journal of Materials Science and Technology*, 35(2), pp. 270–284. doi: 10.1016/j.jmst.2018.09.004.
- Zhang, L. C. *et al.* (2011) 'Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy', *Scripta Materialia*, 65(1), pp. 21–24. doi: 10.1016/j.scriptamat.2011.03.024.
- Zhang, L., Zhang, S. and Zhu, H. (2021) 'Effect of scanning strategy on geometric accuracy of the circle structure fabricated by selective laser melting', *Journal of Manufacturing Processes*, 64(February), pp. 907–915. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.02.015.

Zhang, W. *et al.* (2022) 'Prediction of powder bed thickness by spatter detection from coaxial optical images in selective laser melting of 316L stainless steel', *Materials and Design*, 213, p. 110301. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110301.

Zhang, Z. *et al.* (2019) '3-Dimensional heat transfer modeling for laser powder-bed fusion additive manufacturing with volumetric heat sources based on varied thermal conductivity and absorptivity', *Optics and Laser Technology*, 109(July 2018), pp. 297–312. doi: 10.1016/j.optlastec.2018.08.012.

Zhao, C. *et al.* (2017) 'Real-time monitoring of laser powder bed fusion process using high-speed X-ray imaging and diffraction', *Scientific Reports*, 7(1), pp. 1–11. doi: 10.1038/s41598-017-03761-2.

Zhuang, J. R. *et al.* (2018) 'Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti6Al4V powder', *Optics and Laser Technology*, 103, pp. 59–76. doi: 10.1016/j.optlastec.2018.01.013.

Zinovieva, O., Zinoviev, A. and Ploshikhin, V. (2018) 'Three-dimensional modeling of the microstructure evolution during metal additive manufacturing', *Computational Materials Science*, 141, pp. 207–220. doi: 10.1016/j.commatsci.2017.09.018.

Δεδούσης, Β. και Γιαννατσής, Γ. (eds) (2017) *Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής*. Κριτική.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Papazoglou, E. L., Karkalos, N. E. and Markopoulos, A. P. (2020) 'A comprehensive study on thermal modeling of SLM process under conduction mode using FEM', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(9–10), pp. 2939–2955.

Papazoglou, E. L. *et al.* (2021) *On the Modeling and Simulation of SLM and SLS for Metal and Polymer Powders: A Review*, *Archives of Computational Methods in Engineering*. Springer Netherlands.

Alexopoulou, V. E. *et al.* (2022) '3D finite element modeling of selective laser melting for conduction, transition and keyhole modes', *Journal of Manufacturing Processes*, 75(October 2021), pp. 877–894.