



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ
ADDITIVE MANUFACTURING ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΤΩΝ
ΜΟΝΤΕΛΩΝ

ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

1057610

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΟΡΩΝ

3D	Τρισδιάστατο
Additive Manufacturing (AM)	Προσθετική διεργασία
Computer -Aided Design (CAD)	Σχεδίαση με υποστήριξη υπολογιστή
Cyber-Physical Systems (CPS)	Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα
Difference Equation	Εξίσωση Διαφορών
Digital Twin (DT)	Ψηφιακό δίδυμο
Finite Element (FE)	Πεπερασμένο στοιχείο
Finite Element Analysis (FEA)	Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων
Finite Element Method (FEM)	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων
Fourth Industrial Revolution (I4.0)	Τέταρτη βιομηχανική επανάσταση
Key Performance Indicator (KPI)	Δείκτης απόδοσης
Laser based Additive Manufacturing (LbAM)	Προσθετική διεργασία βασιζόμενη στη χρήση laser
Laser Powder Bed Fusion (LPBF)	Συγκόλληση σε στρώμα σκόνης με χρήση λείζερ
Machine Learning (ML)	Μηχανική Μάθηση
Partial Differential Equation (PDE)	Μερική Διαφορική Εξίσωση
Proportional Controller (P)	Αναλογικός Ελεγκτής
Spatiotemporal Identification (ST-ID)	Χωροχρονική αναγνώριση
Spatiotemporal Surrogate Model (ST-SM)	Χωροχρονικό υποκατάστατο μοντέλο
Surrogate Model (SM)	Υποκατάστατο μοντέλο
Temporal Identification (T-ID)	Χρονική αναγνώριση
Temporal Surrogate Model (T-SM)	Χρονικό υποκατάστατο μοντέλο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ADDITIVE MANUFACTURING ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

Μέσα από τη μετάβαση προς την ψηφιοποίηση και αυτοματοποίηση της παραγωγής προϊόντων, η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση έχει επηρεάσει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται τα προϊόντα. Τα Δίκτυα, η μηχανική μάθηση, η ανάλυση δεδομένων, η ρομποτική, η προσθετική διεργασία (ΠΔ), μεταξύ άλλων, είναι τεχνολογικές εξελίξεις που προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στις βιομηχανικές διαδικασίες, ενώ μειώνουν την εξάρτηση από την ανθρώπινη εργασία, την λήψη αποφάσεων και ελαχιστοποιούν το ανθρώπινο σφάλμα. Τα υποκατάστατα μοντέλα, μια απλοποιημένη προσέγγιση ενός αρχικού μοντέλου, χρησιμοποιούνται ευρέως στην προσθετική διεργασία, ή αλλιώς τρισδιάστατη εκτύπωση, για διάφορες εργασίες, συμπεριλαμβανομένων της βελτιστοποίησης διαδικασίας, επιλογή υλικού, πρόβλεψη ανωμαλιών κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, πρόβλεψη και παρακολούθηση της θερμοκρασίας. Τα υποκατάστατα μοντέλα μειώνουν το υπολογιστικό κόστος της εκτέλεσης προσομοιώσεων ή πειραμάτων για κάθε επανάληψη του σχεδιασμού ή της ρύθμισης παραμέτρων και είναι κρίσιμοι για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της αποδοτικότητας των βιομηχανικών διαδικασιών. Τα όλο και πιο περίπλοκα και υψηλής ποιότητας προϊόντα που εμφανίζονται καθώς η προσθετική διεργασία και γενικότερα η τεχνολογία συνεχίζουν να εξελίσσονται με γοργούς ρυθμούς, καθιστούν τα υποκατάστατα μοντέλα άκρως απαραίτητα. Ο στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι να παρουσιάσει την έννοια ενός Χωροχρονικού - Υποκατάστατου Μοντέλου σε μια προσθετική διεργασία, και συγκεκριμένα στη διαδικασία Laser Powder Bed Fusion (LPBF), με σκοπό την παρακολούθηση και πρόβλεψη της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία (κόμβοι) ενός εξαρτήματος συναρτήσει του χρόνου, το οποίο εξάρτημα αποτελείται από δομικό χάλυβα και αναπτύχθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης. Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων που προσομοιώνει το εξάρτημα αυτό, το οποίο θερμαίνεται απευθείας από το λέιζερ για τον υπολογισμό του προφίλ θερμοκρασίας των επιλεγμένων κόμβων. Τα δεδομένα που συλλέγονται από την προσομοίωση χρησιμοποιούνται για την δημιουργία, την εκπαίδευση του και την επικύρωση του Υποκατάστατου Μοντέλου. Η χρήση του Υποκατάστατου Μοντέλου στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται πρωτίστως για την

παρακολούθηση και πρόβλεψη της θερμοκρασίας του υλικού, όπως προαναφέρθηκε, ωστόσο, το μοντέλο θα μπορούσε να επιτρέπει την πρόβλεψη και παρακολούθηση της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια μιας πραγματικής διαδικασίας παραγωγής, για μεγαλύτερο έλεγχο και δυνατότητα πρόληψης πιθανών προβλημάτων παραγωγής. Στην συνέχεια, το μοντέλο επεκτείνεται και για χρήση στον έλεγχο της διεργασίας, αλλά και στην ανίχνευση τυχόν ελαττωμάτων που μπορεί να παρουσιάζει το εξάρτημα. Οι κατασκευαστές μπορούν να προσαρμόσουν παραμέτρους παραγωγής για να βελτιώσουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος, καθώς και να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για δοκιμές, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους. Τέλος, με την ικανότητα πρόβλεψης της θερμοκρασίας, θα μπορούσε να εξασφαλιστεί υψηλότερης ποιότητας τελικά προϊόντα. Λέξεις κλειδιά Προσθετική Διεργασία, 4η Βιομηχανική Επανάσταση, Χωροχρονικό - Υποκατάστατο Μοντέλο, Διεργασία LPBF, Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

Λέξεις κλειδιά

Προσθετική Διεργασία, 4^η Βιομηχανική Επανάσταση, Χωροχρονικό - Υποκατάστατο Μοντέλο, Διεργασία LPBF, Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

1.1 ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΟ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ LPBF ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Μια μελέτη περίπτωσης έχει διατυπωθεί για να αξιολογηθεί η καταλληλότητα του υπάρχοντος πλαισίου, χρησιμοποιώντας το FEM ως μοντέλο αναφοράς για τη διαδικασία LPBF AM και εφαρμόζοντας δομικό χάλυβα ως υλικό μοντέλου. Η προσέγγιση μοντελοποίησης προσπαθεί να προβλέψει τη θερμοκρασία του κατεργαζόμενου υλικού με την πάροδο του χρόνου. Οι παράμετροι που εξετάζονται περιλαμβάνουν την ισχύ του laser και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι οποίες είναι ουσιώδεις για τη διαδικασία κατασκευής. Ο κύριος δείκτης απόδοσης (KPI) είναι η θερμοκρασία του εξαρτήματος. Η θερμοκρασία του υλικού, παρακολουθείται με την πάροδο του χρόνου μέσω επιλεγμένων κόμβων που βρίσκονται σε διάφορες περιοχές του προσομοιωμένου εξαρτήματος. Το μοντέλο του εξαρτήματος έχει κατασκευαστεί σε 3D χώρο χρησιμοποιώντας το λογισμικό ANSYS. Ο δομικός χάλυβας, όπως προκύπτει από τις τιμές των ιδιοτήτων του, παρουσιάζεται ως γραμμικό ελαστικό υλικό για μια ευρεία γκάμα θερμοκρασιών και η επιλογή του υλικού γίνεται για πρακτικούς και υπολογιστικούς λόγους. Ιδιότητες υλικού όπως η ελαστικότητα Young, ο λόγος Poisson, η πυκνότητα, η θερμική χωρητικότητα και άλλες παραμένουν σταθερές, οπότε διευκολύνουν τη δημιουργία, εκπαίδευση, εκτέλεση και επικύρωση του SM. Όσον αφορά την αποδοτικότητα του ST-SM, η επιλογή υλικού εξαρτήματος με ιδιότητες εξαρτώμενες από την θερμοκρασία, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την πολυπλοκότητα των προσομοιώσεων. Αυτό συμβαίνει, διότι εισάγονται μη γραμμικότητες στην ανάλυση, οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους υπολογισμού, και επιφέρουν υψηλότερο βαθμό περιπλοκότητας στην ανάπτυξη ενός SM. Για τις συνοριακές και αρχικές συνθήκες του εξαρτήματος ισχύει ότι η επάνω επιφάνεια του μοντέλου είναι άμεσα εκτεθειμένη στη θερμική επίδραση της κεφαλής του laser, ενώ η θερμική διάχυση προς το περιβάλλον συμβαίνει μέσω συναγωγής από τις κάτω και πλευρικές επιφάνειες του κυβικού μεταλλικού μοντέλου, παραβλέποντας την επίδραση των απωλειών θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Η θερμική ενέργεια που απορροφάτε από την επάνω επιφάνεια διαδίδεται μέσω αγωγής στο υπόλοιπο υλικό του εξαρτήματος.

Για να επιτευχθεί μια συνολική χωροχρονική ανάλυση και να αξιολογηθεί η απόδοση του SM, είναι απαραίτητο να προβλεφθούν τόσο οι συντελεστές του, όσο και οι θερμοκρασίες των κόμβων. Όσον αφορά τη γεωμετρία, βασιζόμενοι στις υποθέσεις, το μοντέλο της FEA είναι

κυβικό. Επιπλέον, το υλικό είναι ομογενές σε όλες τις τρεις διαστάσεις χωρίς εξάρτηση από τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Οι DE που θα χρησιμοποιηθούν (Εικόνα 1), αποτυπώσουν τη θερμική συμπεριφορά του εξαρτήματος σε διακριτά χρονικά διαστήματα. Οι DEs εφαρμόζονται σε όλους τους κόμβους του υλικού. Για τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται στις ακμές και τις γωνίες έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί DEs· ωστόσο, μια διαφορετική, τροποποιημένη προσέγγιση. Να σημειωθεί ότι για να λάβει χώρα η ST-ID, όλοι οι κόμβοι απέχουν το ίδιο μεταξύ τους σε κάθε κατεύθυνση του κύβου. Αφού δημιουργηθούν οι DE για κάθε κόμβο και αναδιατάσσοντας τους όρους, δημιουργείται ένας αλγεβρικό σύστημα. Η επίλυση αυτού του συστήματος υπολογίζει τις θερμοκρασίες σε κάθε κόμβο για το τρέχον χρονικό βήμα. Στη συνέχεια, το χρονικό βήμα προχωρά κατά ένα, και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται, μέχρι να φτάσει η διαδικασία στο τελικό βήμα. Τα ανακτηθέντα δεδομένα από το FEM χρησιμεύουν ως σύνολο δεδομένων για την εκπαίδευση του ST-SM. Η εκπαίδευση του ST-SM – ο υπολογισμός των παραμέτρων του – και ο υπολογισμός των θερμοκρασιών των κόμβων συνοψίζονται στις δύο επόμενες εξισώσεις πινάκων.

$$[C] = [PI]^+ * [TM] \quad (1)$$

$[TM]$: Πίνακας δεδομένων θερμοκρασιών προσομοίωσης τρέχοντος χρονικού βήματος για κάθε κόμβο

$[PI]^+$: Ψευδοαντίστροφος πίνακας με τα υπόλοιπα δεδομένα της προσομοίωσης

$[C]$: Πίνακας παραμέτρων του ST-SM

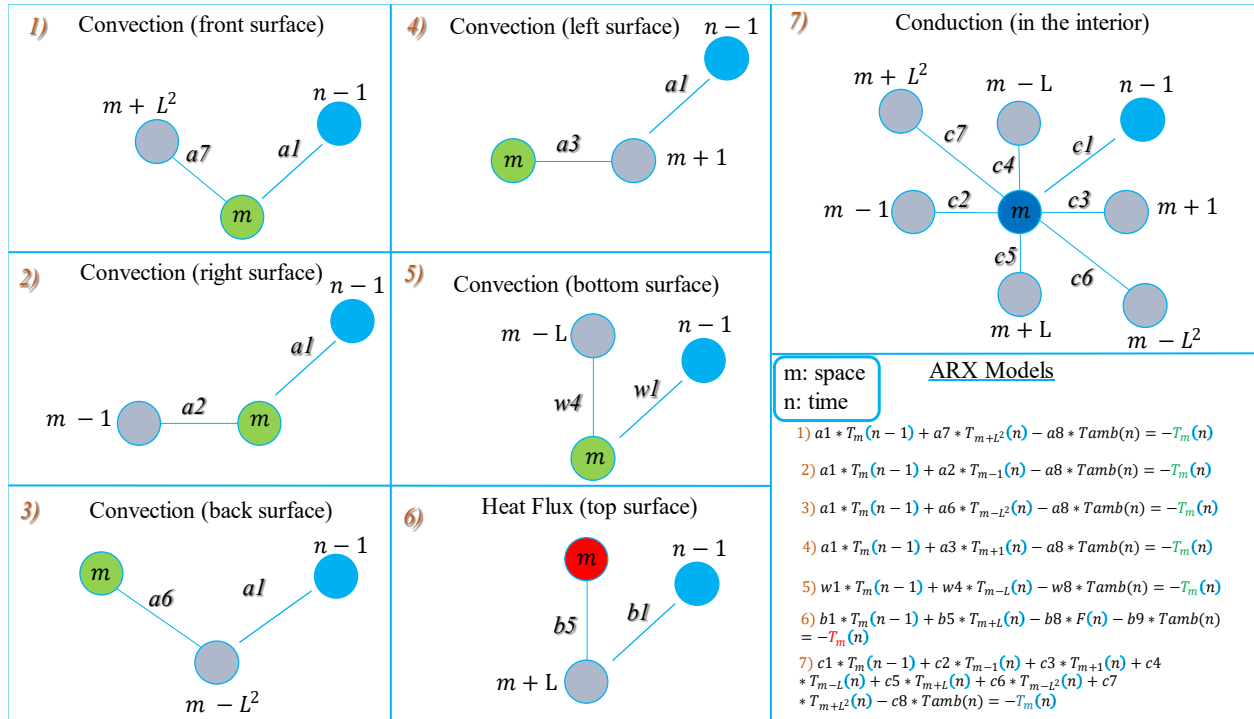
$$[TP] = [MA]^{-1} * [D] \quad (2)$$

$[MA]^{-1}$: Πίνακας των παραμέτρων

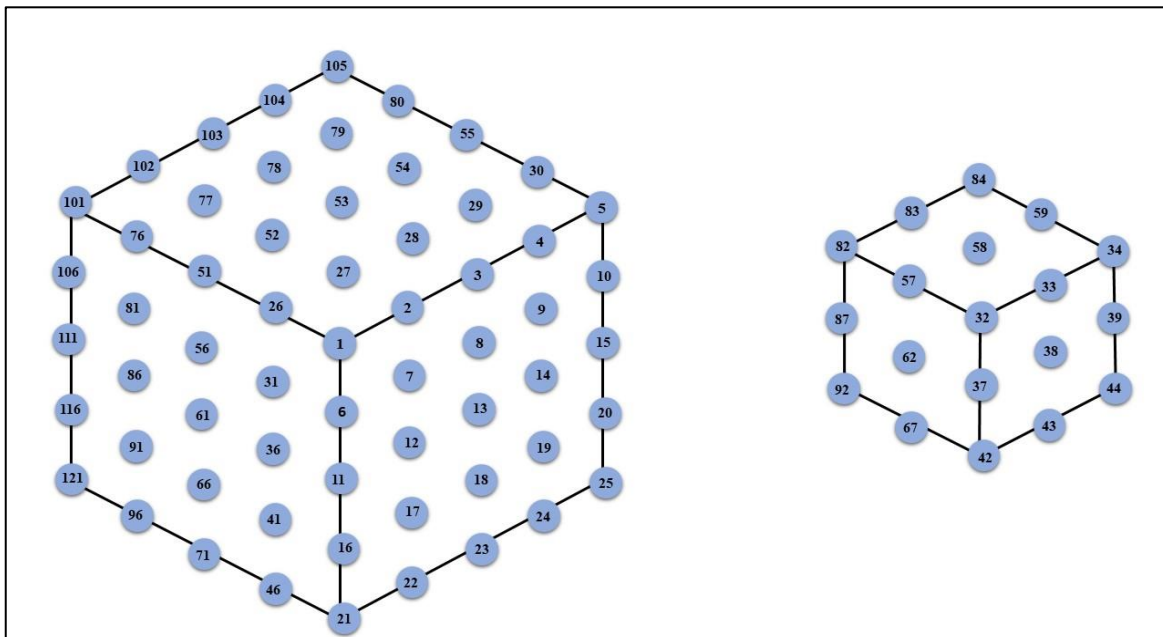
$[D]$: Πίνακας που περιέχει τις αρχικές συνθήκες

$[TP]$: Πίνακας των θερμοκρασιών που θα υπολογιστούν

Τέλος, το κομμάτι του δομικού χάλυβα που έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της προσομοίωσης, την δημιουργία του ST-SM και την επιλογή των σημείων (κόμβων) για την πρόβλεψη των θερμοκρασιών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 1: Εξισώσεις διαφορών (μοντέλα ARX) για κάθε κόμβο.



Εικόνα 2: Μοντελοποίηση εξαρτήματος δομικού χάλυβα

1.2 ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΟ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ LPBF ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

Μία άλλη μελέτη περίπτωσης, που εμπλέκει την προσομοίωση ελαττωματικού εξαρτήματος δομικού χάλυβα στην διαδικασία LPBF, εξετάζεται σε αυτήν την ενότητα. Τα ελαττώματα στη διαδικασία LPBF μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα και τη λειτουργικότητα των κατασκευασμένων εξαρτημάτων. Αυτά περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων ρωγμές, ατελείς συγκολλήσεις και ανωμαλίες στη δομή, οδηγώντας σε μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά και εν τέλει στη μειωμένη συνολική αξιοπιστία του τελικού προϊόντος. Η διαδικασία μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται εδώ μοιάζει στενά με την προσέγγιση που περιγράφεται στην Ενότητα 1.1. Σε αυτήν την περίπτωση, επιλέχθηκε μια τρισδιάστατη θερμική ανάλυση για την προσομοίωση χρησιμοποιώντας το λογισμικό ANSYS. Ο σκοπός αυτής της μελέτης περίπτωσης, εκτός από τον έλεγχο της εφαρμοσιμότητας και της αποτελεσματικότητας του ST-SM στην πρόβλεψη των θερμοκρασιών των κόμβων σε ελαττωματικό εξάρτημα, αποσκοπεί στο να εξετάσει εάν η παρουσία ελαττωμάτων μπορεί να καθοριστεί με βάση τη σύγκριση των συντελεστών του ST-SM, που προκύπτουν από την εκπαίδευση του υποκατάστατου μοντέλου, μεταξύ των εξαρτημάτων. Συγκεκριμένα, για τις διαστάσεις της ατέλειας (ή ελαττώματος) σφαιρικής μορφής στο εξάρτημα του δομικού χάλυβα, επιλέχθηκαν οι διαστάσεις 0,1 χιλιοστά διαμέτρου και 0,05 χιλιοστά διαμέτρου. Οι συνοριακές, η αρχική συνθήκη και οι διαστάσεις γεωμετρίας του εξαρτήματος σε αυτήν την περίπτωση παρέμειναν αναλλοίωτα, Επιπλέον, οι ίδιες ιδιότητες υλικού έχουν εφαρμοστεί σε αυτήν την ανάλυση, εξασφαλίζοντας ότι η συνοχή του υλικού διατηρείται κατά τη διάρκεια της μελέτης.

1.2.1 Έλεγχος Παρουσίας ελαττωμάτων στην σκόνη δομικού χάλυβα

Όσον αφορά την πρόβλεψη της παρουσίας ή όχι ατέλειας, πρέπει να συγκριθούν οι συντελεστές του ST-SM μεταξύ των περιπτώσεων 0.1 χιλιοστών διαμέτρου (0.1def) και 0.05 χιλιοστών διαμέτρου (0.05def) με αυτούς του μη ελαττωματικού εξαρτήματος (non-def). Αρχικά δημιουργήθηκε ένα ST-SM, λαμβάνοντας υπόψη τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά των άνω και κάτω μεσαίων κόμβων του κύβου (ο μέσος κόμβος αγνοήθηκε). Χτίζοντας και εκτελώντας το ST-

SM για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις (0.1def, 0.05def, non-def.), τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν από τις Εξισώσεις 4 και 5 και παρουσιάστηκαν σε γραφικές. Η ελάχιστη τιμή για τους όρους παλινδρόμησης για το ST-SM επιλέχθηκε να είναι $q=2$ για τη μεταβλητή εξόδου κάθε κόμβου και ένας για τη μεταβλητή εισόδου (πέντε συντελεστές συνολικά για το ST-SM).

$$\frac{coef_{non-def} - coef_{0.1def}}{coef_{non-def}} * 100\% \quad (4)$$

$$\frac{coef_{non-def} - coef_{0.05def}}{coef_{non-def}} * 100\% \quad (5)$$

Μια σχέση μεταξύ ελαττωμάτων και συντελεστών είναι εμφανής. Ειδικότερα, οι συντελεστές του κάτω κόμβου στο μοντέλο ARX εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στην παρουσία ελαττωμάτων σε σύγκριση με αυτούς του επάνω κόμβου. Φαίνεται ότι το μέγεθος του ελαττώματος επίσης επηρεάζει τους συντελεστές· τα μεγαλύτερα ελαττώματα τείνουν να έχουν μεγαλύτερη επίδραση στους συντελεστές. Συνεπώς, γίνεται δυνατή η εκτίμηση της θέσης ή του μεγέθους του ελαττώματος εντός του κατεργαζόμενου εξαρτήματος. Ωστόσο, είναι κρίσιμο να τονιστεί ότι μια αξιόπιστη εκτίμηση, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα ευρήματα, είναι εφαρμόσιμη μόνο σε αυτήν την συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, και η διεξαγωγή πρόσθετων πειραμάτων με ποικίλες και πιο πολύπλοκες γεωμετρίες είναι απαραίτητη για την απόκτηση επιπλέον γνώσεων για μια πιο συνολική και συμπεριληπτική ανάλυση.

1.3 ΈΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στο πλαίσιο της LPBF AM, ένας Proportional Controller (P ελεγκτής) διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον έλεγχο της ισχύος του laser για τη διατήρηση μιας βέλτιστης θερμοκρασίας για το υπό κατεργασία εξάρτημα. Στην LPBF, η επίτευξη και διατήρηση μιας συγκεκριμένης θερμοκρασίας είναι κρίσιμη για την επιτυχή συγκόλληση και την ακεραιότητα του υλικού. Ο P ελεγκτής

λειτουργεί ως μέρος ενός συστήματος ανάδρασης, συγκρίνοντας συνεχώς τη μετρημένη θερμοκρασία με την επιθυμητή θερμοκρασία αναφοράς. Μια επιθυμητή αναφορά θερμοκρασίας καθορίζεται με βάση το υλικό και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της διαδικασίας εκτύπωσης. Συγκρίνοντας την έξοδο του ST-SM και την απόκλισή του από το σημείο αναφοράς, ο P ελεγκτής υπολογίζει συνεχώς το σφάλμα μεταξύ τους. Με βάση αυτό το σφάλμα, πραγματοποιούνται αναλογικές προσαρμογές στην ισχύ του laser. Αν η μετρούμενη θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή θερμοκρασία, ο ελεγκτής αυξάνει την ισχύ του laser. Αντίστροφα, εάν η μετρούμενη θερμοκρασία είναι υψηλότερη, μειώνεται η ισχύς του. Μέσω επαναλαμβανόμενων προσαρμογών, ο P ελεγκτής στοχεύει στη μείωση του σφάλματος μεταξύ της πραγματικής και της θερμοκρασίας αναφοράς. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής, έχει καθιερωθεί μια απλή μορφή ενός P ελεγκτή για τον έλεγχο της ροής θερμότητας, για μια επιθυμητή θερμοκρασία (σημείο αναφοράς) σε έναν συγκεκριμένο κόμβο του εξαρτήματος που θα επιλεγεί. Συγκεκριμένα, η Εξίσωση 6 χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ της ροής θερμότητας, της αναφοράς θερμοκρασίας και της τρέχουσας θερμοκρασίας.

$$FLUX(n) = R - Kp * Tp(n - 1) \quad (6)$$

Το R αντιπροσωπεύει το σημείο αναφοράς ή την επιθυμητή θερμοκρασία που ο ελεγκτής στοχεύει να επιτύχει. Το Kp σηματοδοτεί το κέρδος του ελεγκτή P. Αυτό το κέρδος καθορίζει το μέγεθος της διορθωτικής ενέργειας που εφαρμόζει ο ελεγκτής σε απάντηση του σφάλματος μεταξύ της επιθυμητής θερμοκρασίας (σημείο αναφοράς) και της προβλεπόμενης θερμοκρασίας. Το Tp αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία σε κάθε χρονικό βήμα στο σύστημα. Αυτή η μεταβλητή μετριέται, αντικατοπτρίζοντας την τρέχουσα θερμοκρασία εντός του εξαρτήματος. Το FLUX υποδεικνύει τιμές ροής θερμότητας. Αυτές οι τιμές υπολογίζονται με βάση τη διαφορά μεταξύ του σημείου αναφοράς και του γινομένου του κέρδους και της τρέχουσας θερμοκρασίας. Η διαδικασία υπολογισμού τόσο του FLUX όσο και του Tp ακολουθεί αυτήν που περιγράφεται στην Ενότητα 1.1, καθώς εισάγεται στη φάση λειτουργίας του ST-SM στον κώδικα MATLAB. Μετά την ανάγνωση των αποτελεσμάτων και την εξέταση του ευσταθούς σφάλματος, μπορούν να γίνουν προσαρμογές στο Kp για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα.

1.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει βγάλει αρκετά σημαντικά αποτελέσματα που συμβάλλουν στην κατανόηση του πολύπλοκου πεδίου των διεργασιών AM, και ειδικότερα στην περίπτωση της LPBF. Ένα από τα κεντρικά επιτεύγματα αυτής της έρευνας είναι η ανάπτυξη του ST-SM. Αυτό το μοντέλο σχεδιάστηκε προσεκτικά για να προβλέπει τις κατανομές θερμοκρασίας του μοντέλου FEA που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό ANSYS. Η αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης διαφαίνεται ξεκάθαρα από γραφήματα τα οποία αποκαλύπτουν την εξαιρετική απόδοση του ST-SM στην εκπλήρωση του σκοπού του. Προέβλεψε με αρκετή ακρίβεια τη θερμοκρασία του υλικού μέσω μίας χωροχρονικής ανάλυσης, χρησιμοποιώντας δεδομένα από την προσομοίωση. Για να επιβεβαιωθεί περαιτέρω η αποτελεσματικότητα του ST-SM, προχωρήσαμε στη διαδικασία επικύρωσης αυτού. Η επικύρωση, περιλαμβάνει τον έλεγχο του SM χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεταβλητές εισόδου για τέσσερις διακριτές περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας, φωτίζουν την κρίσιμη σημασία της επιλογής των σωστών μεταβλητών εισόδου. Γίνεται εμφανές ότι η επιλογή των μεταβλητών εισόδου επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια του SM. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις όπου οι μεταβλητές εισόδου είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη φάση εκπαίδευσης του μοντέλου, παράγονται τα πιο ακριβή αποτελέσματα, όσον αφορά στην πρόβλεψη των θερμοκρασιών. Ωστόσο, σε άλλες περιπτώσεις, τα σφάλματα είναι πιο εμφανή. Για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντιμετωπίζονται, μια πιθανή κατεύθυνση βελτίωσης περιλαμβάνει την εκ νέου εκπαίδευση του SM. Συγκεκριμένα, το μοντέλο θα μπορούσε να εκπαιδευτεί εκ νέου για να προβλέπει συντελεστές βασισμένους σε ένα διαφορετικό σύνολο μεταβλητών εισόδου. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει αποτελεσματικά στο SM να προσαρμοστεί σε ένα ευρύτερο φάσμα περιπτώσεων και να επιδείξει βελτιωμένες δυνατότητες πρόβλεψης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, για μια πιο σφαιρική αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου, η διαδικασία επικύρωσης θα πρέπει ιδανικά να καλύπτεται από όλους τους κόμβους του κύβου, για μια πιο ολιστική αξιολόγηση και μια καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων πρόβλεψης του ST-SM. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το υποκατάστατο μοντέλου για την εύρεση ελαττωμάτων μέσα στο εξάρτημα. Δηλαδή, εάν η παρουσία ελαττωμάτων επηρεάζει κάπως τις τιμές των συντελεστών του μοντέλου. Διαπιστώθηκε ότι υπάρχει εμφανής σχέση μεταξύ ελαττωμάτων και συντελεστών. Ειδικότερα, οι συντελεστές του κάτω κόμβου στο μοντέλο εμφανίζουν διακύμανση

στην παρουσία ελαττωμάτων, και συγκεκριμένα μεγαλύτερη διακύμανση σε σύγκριση με εκείνους του επάνω κόμβου. Φαίνεται ότι το μέγεθος του ελαττώματος επίσης επηρεάζει τους συντελεστές· τα μεγαλύτερα ελαττώματα τείνουν να έχουν μεγαλύτερη επίδραση στους συντελεστές. Συνεπώς, γίνεται εφικτό να εκτιμηθεί η θέση ή το μέγεθος του ελαττώματος μέσα στο εξάρτημα. Εκτός από την ανάπτυξη και την επικύρωση του ST-SM, η διπλωματική εργασία παρουσιάζει έναν απλό ελεγκτή P. Αυτός ο ελεγκτής σχεδιάστηκε ειδικά για να ρυθμίζει τη ροή θερμότητας και να διατηρεί την επιθυμητή θερμοκρασία αναφοράς σε μεμονωμένους κόμβους μέσα στο μοντέλο FEA. Η επιλογή του κατάλληλου κέρδους για τον ελεγκτή, επιτρέπει τον καλό έλεγχο της ισχύος του laser για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία με τον μικρότερο δυνατό μόνιμο σφάλμα.

Μια σημαντική περιοριστική πτυχή της διπλωματικής εργασίας αφορά το γεγονός ότι τόσο το υποκατάστατο όσο και η σχετική προσομοίωση δεν λαμβάνουν υπόψη την φάση αλλαγής του υλικού, η οποία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε διαδικασίες όπως η LPBF. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας LPBF, το υλικό υφίσταται μεταβολές φάσης, μετατρέποντας από στερεό σε υγρό. Αυτή η αλλαγή φάσης συνοδεύεται από σημαντικές αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού, συμπεριλαμβανομένης της θερμικής αγωγιμότητας, της θερμικής χωρητικότητας και ακόμα και της επέκτασης του όγκου, οι οποίες δεν αντιπροσωπεύονται επαρκώς στην τρέχουσα ανάλυση. Η αγνόηση αυτών των επιπτώσεων της αλλαγής φάσης θα οδηγήσει σε ανακρίβειες. Στην πράξη, η συμπερίληψη στην ανάλυση αλλαγής φάσης είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των πραγματικών λεπτομερειών της LPBF και των προβλέψεων του υποκατάστατου με τα πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας AM. Ένας επιπλέον σημαντικός περιορισμός σχετίζεται με την υπόθεση ότι ο δομικός χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση, συμπεριφέρεται ως γραμμικό ελαστικό υλικό, και έτσι χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά γραμμικοί όροι στο ST-SM. Αν και αυτή η απλοποίηση είναι κοινή σε πολλά μηχανολογικά πεδία, ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζει επαρκώς τις λεπτομερείς αντιδράσεις του υλικού σε διαδικασίες AM που χαρακτηρίζονται από σημαντικές διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Στην πραγματικότητα, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των περισσότερων υλικών AM επηρεάζονται σημαντικά από τις μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες, συμπεριλαμβανομένων, του μέτρου της ελαστικότητας, της πυκνότητας και των συντελεστών επέκτασης λόγω θερμότητας. Η εξάρτηση μόνο από γραμμικά ελαστικά μοντέλα και γραμμικούς όρους στην ανάλυση μπορεί να μην αρκεί για την πλήρη αναπαράσταση της πολύπλοκης συμπεριφοράς του υλικού κατά τις μεταβολές της

θερμοκρασίας, ειδικά σε περιπτώσεις με γρήγορη θέρμανση και ψύξη, που είναι χαρακτηριστικές στην LbAM. Ως αποτέλεσμα, αυτός ο περιορισμός εισάγει πολυπλοκότητα στην ανάλυση, απαιτώντας περαιτέρω διερεύνηση, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης μη γραμμικών όρων στο ST-SM ώστε να επιτευχθούν πιο ακριβή αποτελέσματα. Αυτός ο περιορισμός γίνεται εμφανής μέσω των επεξηγηματικών σχημάτων που παρέχονται. Σε αυτά τα σχήματα, επιχειρήθηκε να εκπαιδευτεί το ST-SM χρησιμοποιώντας το Stainless Steel 316, ένα μη ελαστικό υλικό που χρησιμοποιείται συχνά στην διαδικασία LPBF. Ενώ το ST-SM εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα στους κόμβους που είναι άμεσα εκτεθειμένοι στην ροή θερμότητας, η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων FEM και SM γίνεται πιο έντονη στους κόμβους που βρίσκονται πιο μακριά από την πηγή του laser. Ως αποτέλεσμα, η ενσωμάτωση μη γραμμικών όρων μέσα στο SM κρύβει τη δυνατότητα να ενισχύσει σημαντικά την ακρίβεια του και, στη συνέχεια, να βελτιώσει την LPBF, όπου η ακρίβεια διαδραματίζει σημαντικό ρόλο.

Τέλος, τα υποκατάστατα μοντέλα προσφέρουν ένα σημαντικά επιταχυνόμενο μέσο απόκτησης αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές προσομοιώσεις. Με την αξιοποίηση μαθηματικών προσεγγίσεων ή τεχνικών βασισμένων σε δεδομένα, τα υποκατάστατα συμπυκνώνουν πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων εισόδου και εξόδου, επιτρέποντας για γρήγορες εκτιμήσεις ή προβλέψεις χωρίς την υπολογιστική ένταση των πλήρων προσομοιώσεων. Η ικανότητά τους να προσεγγίσουν τη συμπεριφορά του συστήματος με μειωμένο υπολογιστικό κόστος επιτρέπει γρήγορη λήψη αποφάσεων. Ένα καλά εκπαιδευμένο υποκατάστατο μοντέλο διαθέτει τη δυνατότητα να εξαλείψει ενδεχομένως την ανάγκη για εκτεταμένες προσομοιώσεις. Με το να ενσωματώνει ακριβώς τη συμπεριφορά του υποκείμενου μοντέλου, μπορεί να λειτουργήσει ως μια υψηλά αξιόπιστη και αποτελεσματική εναλλακτική λύση.

1.5 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην ανάπτυξη της διπλωματικής εργασίας, ο κύριος στόχος ήταν η δημιουργία ενός ST-SM για να προβλέψει τις θερμοκρασίες στη διαδικασία LPBF AM. Κεντρικό θέμα στην προσπάθεια αυτή

ήταν η άμεση εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιώντας δεδομένα προσομοίωσης από ένα μοντέλο FEM, που χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την αρχική ανάπτυξη και κατανόηση του μοντέλου. Ένα ενδιαφέρον μονοπάτι για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνει την ενσωμάτωση τεχνικών ML για την εκπαίδευση του ST-SM. Αυτή η δυνητική επέκταση παρέχει μια ευκαιρία για τη βελτίωση των δυνατοτήτων πρόβλεψης του μοντέλου προσφέροντας ένα διαφορετικό τρόπο μάθησης από τα δεδομένα FEM, βελτιώνοντας πιθανώς την ακρίβεια και την αποδοτικότητα στην πρόβλεψη των αλλαγών θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της διεργασίας. Σημαντικό να σημειωθεί ότι η ανάλυση της διπλωματικής εργασίας δεν κάλυψε τις επιδράσεις της αλλαγής φάσης, ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις ιδιότητες των υλικών και τις μεταβάσεις θερμοκρασίας. Η ενσωμάτωση της αλλαγής φάσης στο ST-SM είναι κρίσιμη για μια πιο συνολική και ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των υλικών κατά τις μεταβολές φάσης. Αυτή η ενσωμάτωση είναι σημαντική για να συμπεριλάβει τις λεπτομέρειες και τις πολυπλοκότητες που σχετίζονται με τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία LPBF, αναβαθμίζοντας το αναλυτικό βάθος της εργασίας. Επιπλέον, το τρέχον μοντέλο, που αποτελείται από γραμμικούς όρους για να αναπαραστήσει τη θερμική συμπεριφορά των δεδομένων FEM για δομικό χάλυβα, αναγνωρίζει μια περιορισμένη πτυχή. Δεν αντιμετωπίζει επαρκώς τις πολυπλοκότητες των μη γραμμικών υλικών που είναι κοινά στην AM. Η αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού με τη βελτίωση του μοντέλου για να ενσωματώσει μη γραμμικές συμπεριφορές στα υλικά θα βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια σε περιπτώσεις όπου τα μη γραμμικά θερμικά χαρακτηριστικά παίζουν σημαντικό ρόλο. Η ένταξη του ST-SM στα DTs μπορεί να προσφέρει υψηλής ακρίβειας προβλέψεις θερμοκρασίας, κρίσιμες σε εφαρμογές όπου, ο έλεγχος της θερμοκρασίας και η κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς είναι σημαντικά, όπως σε προηγμένες διαδικασίες κατασκευής. Η δυνατότητα των DTs να προσαρμόζουν δυναμικά τις παραμέτρους βάσει πραγματικών συνθηκών και σε πραγματικό χρόνο, και σε συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες, συμφωνεί καλά με την έμφαση της έρευνας στην προσαρμοστικότητα και την ακρίβεια. Επιπλέον, η επέκταση της επικύρωσης του ST-SM σε όλους τους κόμβους του υλικού υπό μοντελοποίηση, μπορεί να διασφαλίσει ολοκληρωμένη ακρίβεια στις προβλέψεις και συνεχή μάθηση από δεδομένα του πραγματικού κόσμου, συμβάλλοντας στην εξέλιξη και βελτίωσή τους με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η ένταξη αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προόδου στα CPS και στην I4.0, εναρμονίζοντας την με τους βασικούς στόχους της προσαρμογής και της ακρίβειας στην ψηφιακή μοντελοποίηση.