

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Manufacturability design optimization for AM

Αντώνιος Συκιώτης

Στις μέρες μας, οι Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής είναι ταχέως αναπτυσσόμενες τεχνολογίες παραγωγής των οποίων οι εφαρμογές χρησιμοποιούνται σε μεγάλο αριθμό βιομηχανικών τομέων. Ορίζονται ως διαδικασίες ένωσης υλικών με την επιλεκτική εναπόθεσή τους στρώση επί στρώση με σκοπό την κατασκευή εξαρτημάτων ή συγκροτημάτων εξαρτημάτων που βασίζονται σε ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση εξαρτημάτων με σύνθετες γεωμετρίες που διαθέτουν αυξημένη απόδοση, υψηλό βαθμό σχεδιαστικής ελευθερίας και ελαφριά δομή. Επιπλέον, τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται με AM (Additive Manufacturing: AM) μπορούν να κατασκευαστούν από μια ποικιλία υλικών όπως μέταλλα, πλαστικά, κεραμικά, σύνθετα υλικά, είναι φιλικά προς το περιβάλλον και παρουσιάζουν ασήμαντη ποσότητα υπολειμμάτων υλικού σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής. Παρόλο που η AM προσφέρει σημαντικά οφέλη όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν περιορισμοί στην κατασκευή που επιβάλλονται όπως: χαμηλή παραγωγικότητα, κακή ποιότητα επιφάνειας, ανάγκη για υποστηρικτικές δομές και υπάρχει ένα επίπεδο αβεβαιότητας σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού εξαρτήματος που κατασκευάζεται. Αυτοί οι περιορισμοί προέρχονται από τη φύση της συγκεκριμένης τεχνολογίας και πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψιν κάθε φορά που χρησιμοποιούνται διεργασίες AM για μια συγκεκριμένη εργασία. Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να αναφέρει τους περιορισμούς κατασκευασιμότητας της AM που αποδίδονται κυρίως σε προεξέχουσες γεωμετρίες καθώς και να μελετήσει υπάρχουσες προσεγγίσεις βελτιστοποίησης σχεδιασμού που αντιμετωπίζουν αυτά τα ζητήματα έτσι ώστε να αξιολογηθεί μια προτεινόμενη μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης που εφαρμόζεται για την κατασκευή ενός εξαρτήματος. Για το σκοπό αυτό, το λογισμικό, όπου η τοπολογική βελτιστοποίηση του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου του στοιχείου εκτελείται, υλοποιείται με τη

χρήση του Millipede που είναι ένα πρόσθετο εργαλείο του Grasshopper ενώ το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο οπτικοποιείται χρησιμοποιώντας το περιβάλλον του Rhinoceros 3D. Τα αποτελέσματα που εξάγονται σχετικά με σημαντικές σχεδιαστικές παραμέτρους συγκρίνονται με αυτές ενός ίδιου στοιχείου που δεν βελτιστοποιείται τοπολογικά έτσι ώστε να αξιολογηθούν και να επικυρωθούν τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου.

Η μελέτη οργανώνεται σε επιμέρους κεφάλαια, κάθε ένα από τα οποία συνεισφέρει με σταδιακό τρόπο στην πληροφόρηση και ανάλυση σχετικά με την κεντρική θεματολογία.

Στο πρώτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια σύντομη εισαγωγή στις Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής. Ειδικότερα, διατυπώνεται ένας ορισμός για τις Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής και παρουσιάζονται ορισμένα πλεονεκτήματα τους έναντι συμβατικών τεχνολογιών κατασκευής, τα οποία αποτυπώνονται μέσω κατάλληλης εικόνας. Επιπλέον, διατυπώνεται ότι λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν αυτές οι τεχνολογίες, εφαρμόζονται ευρύτατα σε βιομηχανικούς τομείς και αναφέρονται οι κυριότεροι από αυτούς. Με τη χρήση εικόνων, αποσαφηνίζονται τα πεδία εφαρμογών που σχετίζονται με τον κάθε τομέα αλλά και τα οφέλη που απορρέουν από τη χρήσης τους σε αυτόν. Παράλληλα, υποστηρίζεται μέσω ερευνών ότι η υιοθέτησή και χρήση τους από τους βιομηχανικούς κλάδους έχει οδηγήσει στην αύξηση του μεριδίου τους στην αγορά το οποίο διαπιστώνεται σχηματικά. Στη συνέχεια, αναφέρονται ορισμένοι περιορισμοί και μειονεκτήματα που απορρέουν από την χρήση τους και είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη. Τέλος, πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή του σκοπού της μελέτης και της μεθόδου που προτάθηκε για την υλοποίηση της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μελετώνται και σχολιάζονται ερευνητικές εργασίες και κριτικές που σχετίζονται με τους περιορισμούς που επιβάλλονται στην κατασκευασσιμότητα ενός εξαρτήματος με Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής καθώς και με τις σχεδιαστικές μεθόδους που επιτελούν διαδικασίες βελτιστοποίησης. Οι εργασίες αυτές κατηγοριοποιούνται με κριτήριο τις ομοιότητες που εμφανίζουν ως προς στην προσέγγιση που ακολουθούν και περιγράφονται συνοπτικά ως προς το αντικείμενο που αναπτύσσουν και αναλύουν. Στη συνέχεια

σχολιάζεται η σχετικότητα τους με την θεματολογία της παρούσας μελέτης και ο βαθμός στον οποίο συνεισφέρουν στην περαιτέρω εξέλιξή της.

Στο τρίτο κεφάλαιο, διατυπώνεται αναλυτικότερα ο σκοπός της παρούσας μελέτης, περιγράφεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε καθώς και τα υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για να υλοποιήσουν αυτή τη μεθοδολογία. Πιο συγκεκριμένα, σκοπό της εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός και η παραγωγή ενός εξαρτήματος, εντός ενός προκαθορισμένου χώρου, που θα χαρακτηρίζεται από ελάχιστο βάρος και υψηλή δομική απόδοση. Για το εξάρτημα κατασκευάζεται ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και αναλύεται δομικά με τη χρήση γλώσσας οπτικού προγραμματισμού, βελτιστοποιείται χρησιμοποιώντας μια μεθοδολογία τοπολογικής βελτιστοποίησης και τελικά οπτικοποιείται ψηφιακά ως τρισδιάστατο μοντέλο με τη χρήση κατάλληλου σχεδιαστικού προγράμματος.

Επιπλέον η εργασία αυτή στοχεύει στο να αναφέρει τους περιορισμούς κατασκευασιμότητας της AM που αποδίδονται κυρίως σε προεξέχουσες γεωμετρίες καθώς και να μελετήσει υπάρχουσες προσεγγίσεις βελτιστοποίησης σχεδιασμού που αντιμετωπίζουν αυτά τα ζητήματα έτσι ώστε να τα σχολιάσει όταν μια μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης, που προτείνεται, εφαρμόζεται για την κατασκευή ενός εξαρτήματος. Τα αποτελέσματα που εξάγονται σχετικά με σημαντικές σχεδιαστικές παραμέτρους συγκρίνονται με αυτές ενός ίδιου στοιχείου που δεν βελτιστοποιείται τοπολογικά έτσι ώστε να αξιολογηθούν και να επικυρωθούν τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου. Ειδικότερα, τα υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται διακρίνονται στο σχεδιαστικό πρόγραμμα του Rhinoceros 3d και στο γραφικό περιβάλλον προγραμματισμού του Grasshopper το οποίο εμφανίζει συνδεσιμότητα με πλήθος πρόσθετων εφαρμογών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία όπως το Millipede, Elefront, Pancake. Συνδυάζοντας κατάλληλα τις δυνατότητες που προσφέρει κάθε ένα από αυτά δημιουργείται ένα εργαλείο στο οποίο μπορούν να οριστούν ή να εισαχθούν γεωμετρίες, να αναπαρασταθούν με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, να μελετηθούν και να αναλυθούν ως προς κρίσιμες παραμέτρους και να εξαχθούν τα αποτελέσματά τους. Αναλυτικότερα, ορίζονται η περιοχή του προβλήματος, η περιοχή τοποθέτησης των στηρίξεων, η περιοχή άσκησης του φορτίου με τη χρήση κατάλληλων μπλοκ (blocks) που τα οριοθετούν στο χώρο και προσδίδουν τιμές εισόδου σε διάφορες παραμέτρους

τους. Έπειτα, η περιοχή του προβλήματος διακριτοποιείται, κατασκευάζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πραγματοποιείται δομική ανάλυση σε αυτό. Η υπολογισμοί της ανάλυσης γίνονται με επαναληπτικό τρόπο και έχοντας ορίσει τις τιμές κρίσιμων παραμέτρων εισόδου που συνδέονται άμεσα με τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα που θέλουμε να πετύχουμε. Με αυτό τον τρόπο, εξάγονται αποτελέσματα που σχετίζονται με τις κατευθύνσεις και το μέτρο των αναπτυσσόμενων τάσεων όπως και την πυκνότητα, την μετατόπιση, τον αριθμό και τα κέντρα των στοιχείων όγκου που αποτελούν το μοντέλο. Επιπλέον, απεικονίζεται η τελική κατανομή της εναπόθεσης υλικού στην περιοχή του προβλήματος με την μορφή πλέγματος και μορφοποιείται η τελική γεωμετρία που θα χαρακτηρίζει το εξάρτημα. Η γεωμετρία αυτή στη συνέχεια οπτικοποιείται στο περιβάλλον του Rhinoceros 3D και εξάγεται ως αρχείο μορφής STL σε προκαθορισμένη θέση εντός φακέλου, χρησιμοποιώντας κατάλληλα μπλοκ. Οι διαδικασίες της μεθοδολογίας που διατυπώνεται παρουσιάζονται με την μορφή εικόνων στις αντίστοιχες θέσεις του εγγράφου. Στη συνέχεια απεικονίζονται δύο διαγράμματα ροής, το ένα εκ των δύο αναπαριστά συνολικά την περιγραφόμενη μεθοδολογία στην οποία στηρίζεται η εργασία, ενώ το άλλο αναπαριστά την ροή των διαδικασιών που υλοποιήθηκαν σταδιακά κατά την εφαρμογή του εργαλείου στο περιβάλλον του Millipede.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η εφαρμογή που επιλέχθηκε με σκοπό να επιβεβαιώσει την αποτελεσματικότητα και την εγκυρότητα της παραπάνω μεθοδολογίας. Αναλυτικότερα, η εφαρμογή σχετίζεται με την υλοποίηση τοπολογικής βελτιστοποίησης σε μια δοκό συγκεκριμένων διαστάσεων που είναι πακτωμένη στο αριστερό της άκρο, ενώ στο δεξιό της καταπονείται από κατανεμημένο φορτίο καθορισμένης τιμής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, σχολιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της τοπολογικά βελτιστοποιημένης δοκού σχετικά με κρίσιμες παραμέτρους όπως το συνολικό βάρος, η δυσκαμψία και ο χρόνος κατασκευής και έπειτα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της δοκού που δεν βελτιστοποιήθηκε. Συμπεραίνεται ότι η τοπολογικά βελτιστοποιημένη δοκός παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή συνολικού βάρους κατά ένα σημαντικό παράγοντα, ελάχιστα χαμηλότερη τιμή δυσκαμψίας και υψηλότερη τιμή απαιτούμενου χρόνου κατασκευής. Παρόλο που ο χρόνος κατασκευής αυξάνεται, η αισθητή μείωση της τιμής του βάρους αλλά και το γεγονός ότι οι τιμή της

δυσκαμψίας δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα επικυρώνουν την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της μεθόδου.

Στο έκτο κεφάλαιο, αναφέρεται συνοπτικά ο σκοπός και το εργαλείο που αναπτύχθηκε, κρίνεται η αποτελεσματικότητα, πρωτοτυπία και ευχρηστία του σε σύγκριση με ομοειδείς εφαρμογές και εξάγονται συμπεράσματα για την λειτουργία του. Επιπρόσθετα, διατυπώνονται πιθανές προσεγγίσεις που θα μπορούσαν να αποτελέσουν μελλοντικό έργο για την περαιτέρω εξέλιξη του εργαλείου και εφαρμογή του σε επίκαιρα προβλήματα που καλούνται να επιλυθούν όπως η αντιμετώπιση των περιορισμών που εμφανίζονται στην κατασκευασσιμότητα του εξαρτήματος κατά την διάρκεια της διαδικασίας του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης του.

Στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι ερευνητικές εργασίες και συναφείς πηγές πληροφοριών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της σπουδαστικής εργασίας.

LIST OF TERMINOLOGY AND ACRONYMS

ACRONYM	DEFINITION	EXPLANATION
AM	Additive Manufacturing	Manufacturing technology based on a layer by layer material deposition
DfAM	Design for Additive Manufacturing	Rules that define the manufacturability limitations that have to be considered when deploying a specific AM technology
3D	Three dimensional	Space that requires three parameters to define the position of an element
STL	Standard Triangle Language	File format that depicts the shape of an object using triangulated surfaces
EF - M	Enhanced function means model	Model that represents the constraints related to a specific design space
CAD	Computer Aided Design	Technology that utilizes computers to aid the design process
PD	Part Decomposition	Technique that partitions a model into sub-parts.
2D	Two dimensional	Space that requires two parameters to define the position of an element
BESO	Bidirectional Evolutionary Structural Optimization	Topology optimization method

MMC	Moving Morphable Components	Method that optimizes the geometric characteristics of a topology [32]
NURBS	Non-uniform rational basis spline	Mathematical model that depicts surfaces and curves using basis splines