Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού

Κατεύθυνση Β':

Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και Ρομποτικής

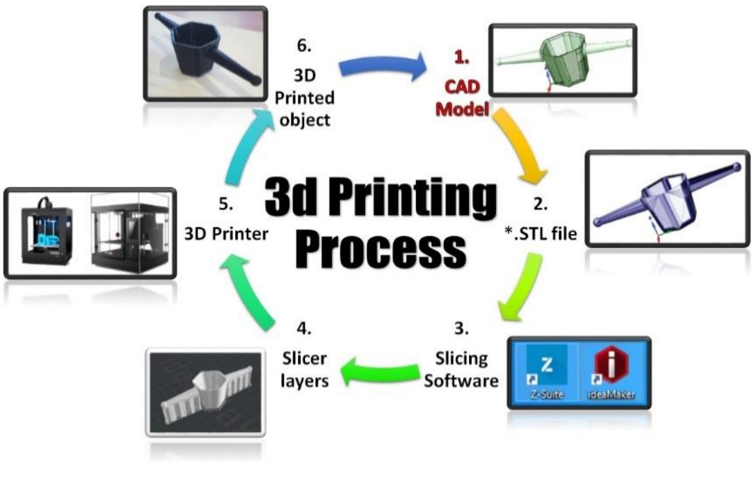
Μεταπτυχιακό Μάθημα:

Τεχνολογίες και Εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής/3D Εκτύπωσης

Πρώτη Άσκηση

Όνομα Φοιτητή – Α.Μ.:

Γεώργιος Κρομμύδας – 02121208



ΑΘΗΝΑ,

2023

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή: 3
Ζητούμενο - 1: 3
Ζητούμενο - 2: 4
Ζητούμενο - 3: 5
Ζητούμενο - 4: 6
Ζητούμενο - 5: 8

Εισαγωγή:

Μας δίνονται τα εξής στοιχεία του εκτυπωτή που θα χρησιμοποιηθεί

- 3D Εκτυπωτής FDM που χρησιμοποιεί νήμα υλικού διαμέτρου $D_f = 2{,}85\ mm$
- Κεφαλή εναπόθεσης (nozzle) τήγματος διαμέτρου $D_n = 0{,}6\ mm$
- Δυνατότητα αλλαγής κεφαλών σε 0,25, 0,4 και 0,8 mm
- Ωφέλιμος χώρος κατασκευής (X-Y-Z): $22 \times 22 \times 20\ cm$
- Μέγιστος ρυθμός διάστρωσης υλικού: $u_{V,max} = 20\ mm^3/sec$
- Πυκνότητα χρησιμοποιούμενου υλικού: $\rho = 1{,}24\ g/cm^3$

Με βάση αυτά τα δεδομένα θα υπολογιστούν και θα τεκμηριωθούν τα παρακάτω ζητούμενα.

Ζητούμενο - 1:

Γνωρίζουμε πως ο συγκεκριμένος 3D Εκτυπωτής FDM παράγει με μέγιστο ρυθμό διάστρωσης του υλικού κατά την εκτύπωση ενός αντικειμένου στον χώρο κατασκευής $u_{V,max} = 20\ mm^3/sec$. Για να μπορέσει να διατηρηθεί η συγκεκριμένη παροχή όγκου του υλικού στην κεφαλή, θα πρέπει η ταχύτητα πρόωσης του νήματος να έχει την εξής τιμή:

$$u_{V,max} = A_f u_{f,max} = \pi \left(\frac{D_f}{2}\right)^2 u_{f,max}$$

$$\Rightarrow u_{f,max} = \frac{4u_{V,max}}{\pi {D_f}^2} = \frac{4 \times 20\ mm^3/sec}{\pi \times (2{,}85)^2 mm^2}$$

$$\Rightarrow u_{f,max} = 3{,}135\ mm/sec$$

Καθώς δεν έχουμε απομείωση της διατομής του τήγματος κατά την εξώθησή του δια μέσου της κεφαλής του εκτυπωτή, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε το εμβαδόν διατομής του ως εμβαδό κύκλου με διάμετρο αυτή της κεφαλής εναπόθεσης του τήγματος. Έτσι, θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε την μέγιστη ταχύτητα επίστρωσης του θερμοπλαστικού τήγματος με τον εξής τύπο:

$$u_{V,max} = A_n u_{n,max} = \pi \left(\frac{D_n}{2}\right)^2 u_{n,max}$$

$$\Rightarrow u_{n,max} = \frac{4u_{V,max}}{\pi {D_n}^2} = \frac{4 \times 20\ mm^3/sec}{\pi \times (0{,}25)^2 mm^2}$$

$$\Rightarrow u_{n,max} = 407{,}436\ mm/sec$$

Μέσω των υπολογισμών και των δοκιμών των αντίστοιχων διαμέτρων κεφαλών, παρατηρήθηκε πως η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται κατά την εφαρμογή της μέγιστης παροχής του υλικού και της μεγαλύτερης διαθέσιμης κεφαλής.

Ζητούμενο - 2:

Ως πρώτο βήμα για τον υπολογισμό του συνολικού μήκους νήματος που χρειαζόμαστε, θα πρέπει να βρούμε τον συνολικό όγκο του υλικού που θα χρειαστεί για την κατασκευή της σφαίρας. Αρχικά, η σφαίρα έχει εξωτερικό κέλυφος πάχους 1 mm. Για να προκύψει το κέλυφος αυτό, θα πρέπει να αφαιρεθεί τόσο πάχος από την σφαίρα ακτίνας 40 mm. Δηλαδή, θα αφαιρεθεί ο όγκος της εσωτερικής σφαίρας με ακτίνα $r = 39\ mm$. Έτσι:

$$V_{shell} = V_{outer\ sphere} - V_{inner\ sphere} = \frac{4}{3}\pi R^3 - \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi(40\ mm)^3 - \frac{4}{3}\pi(39\ mm)^3$$

$$\Rightarrow V_{shell} = 268082 - 248474 = 19608\ mm^3$$

Επίσης, γνωρίζουμε πως ο όγκος του υλικού που απαιτείται για την εσωτερική πλήρωση βασίζεται στον όγκο της εσωτερικής σφαίρας που προκύπτει επί τον συντελεστή πλήρωσης $percentage_{fill} = 20\%$. Επομένως ισχύει ότι:

$$V_{fill} = percentage_{fill} V_{inner\ sphere} = 0{,}2 \times 248474$$

$$\Rightarrow V_{fill} = 49695\ mm^3$$

Το επόμενο βήμα είναι να υπολογίσουμε τον όγκο της υποστήριξης που θα χρειαστεί η σφαίρα για την κατασκευή της. Η υποστηρικτική δομή της σφαίρας που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο έχει διαστάσεις $R \times 2R \times 2R$. Το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο θα εκτυπωθεί μέχρι το μέσο της σφαίρας ως υποστήριξη. Επομένως, ο όγκος που θα χρειαστεί θα είναι η διαφορά των όγκων του ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου με τον όγκο του ημισφαίριου, με την διαφορά αυτή να πολλαπλασιάζεται με την πυκνότητα του όγκου, η οποία είναι $\rho_V = 7\%$. Έτσι θα έχουμε ότι:

$$V_{support} = \rho_v \left(V_{rectangle} - \frac{1}{2} V_{sphere}\right) = 0{,}07\left(R \times 2R \times 2R - \frac{1}{2}\frac{4}{3}\pi R^3\right)$$

$$\Rightarrow V_{support} = 0{,}07\left(40\ mm \times 2 \times 40\ mm \times 2 \times 40\ mm - \frac{1}{2}\frac{4}{3}\pi(40\ mm)^3\right)$$

$$V_{support} = 0{,}07(256000\, mm^3 - 134041\, mm^3) = 8538\, mm^3$$

$$\Rightarrow\ V_{support} =\ 8538\, mm^3$$

Οπότε, ο συνολικός όγκος που θα προκύψει θα είναι:

$$V_{total} = V_{shell} + V_{fill} +\ V_{support} = 19608\, mm^3 + 49695\, mm^3 +\ 8538\, mm^3$$

$$\Rightarrow\ V_{total}\ = 77841\, mm^3$$

Τέλος, το συνολικό μήκος νήματος που θα χρησιμοποιηθεί κατά την διαδικασία της εκτύπωσης θα είναι:

$$V_{total} =\ \ A_f L = \frac{\pi D_f^2}{4} L$$

$$\Rightarrow\ L = V_{total} \frac{4}{\pi\ D_f^2} = 77841\, mm^3 \frac{4}{\pi\ (2{,}85\, mm)^2}$$

$$\Rightarrow\ L\ = 12{,}201\, m$$

Ζητούμενο - 3:

Για την εκτύπωση και των τεσσάρων σφαιρών, θα πρέπει πρώτα να ελέγξουμε εάν γίνεται να τοποθετηθούν εντός του ωφέλιμου χώρου κατασκευής του εκτυπωτή. Γνωρίζουμε πως οι διαστάσεις του ωφέλιμου χώρου είναι $22 \times 22 \times 20\ cm$. Η κάθε σφαίρα έχει διάμετρο $D_{sphere} = 8\ cm$. Για να επιτευχθεί η σωστή τους στοίχιση εντός του χώρου κατασκευής, θα πρέπει να έχουμε μεταξύ τους απόσταση $2\ cm$. Πράγματι έτσι κατά τον y άξονα και κατά τον x άξονα, διαπιστώνεται πως μπορούν να τοποθετηθούν και βρίσκονται εντός των ορίων. Επίσης, οι σφαίρες έχουν ακτίνα $4\ cm$ και δεν ξεπερνάνε την διάσταση του άξονα z, όσο θα γίνεται η εκτύπωση.

Για κάθε σφαίρα που θα εκτυπωθεί γνωρίζουμε το επιθυμητό πάχος στρώσης ότι είναι $0{,}3\ mm$ και το ύψος της σφαίρας προς εκτύπωσης είναι όσο η διάμετρό της, δηλαδή $80\ mm$. Επομένως, θα χρειαστούμε

$$N_{layers} = \left\lceil \frac{D_{sphere}}{L_{thickness}} \right\rceil = \left\lceil \frac{80\ mm}{0{,}3\ mm} \right\rceil = 277$$

$$\Rightarrow\ N_{layers} = 277$$

Επιπλέον, γνωρίζουμε πως ο συνολικός όγκος υλικού που χρειάζεται μια σφαίρα είναι 77.841 mm^3. Τέλος, γνωρίζουμε πως με την χρήση της κεφαλής με διάμετρο $D_n = 0.6\ mm$ και με μέση ταχύτητα εκροής $u_{εκ} = 27\ mm/sec$, μπορούμε να εκτιμήσουμε τον χρόνο που χρειάζεται συνολικά η επίστρωση του υλικού στο τραπέζι. Άρα ισχύει το εξής:

$$t_{layers} = \frac{V_{total}}{A_n u_{εκ}} = \frac{77841\ mm^3}{\pi\left(\frac{0,6}{2}\ mm\right)^2 27\frac{mm}{sec}} = \frac{77841\ mm^3}{\pi \times 0,09\ mm^2 \times 27\frac{mm}{sec}} = \frac{77841}{7,6340}\ sec$$

$$\Rightarrow t_{layers} = 10197\ sec$$

Επιπρόσθετα, υπάρχει προσαύξηση του χρόνου κατά 15% λόγω των μετακινήσεων που εκτελεί η κεφαλή εντός του χώρου εκτύπωσης και των εσωτερικών *infills* που γίνονται κατά την διάρκεια λειτουργίας. Οπότε

$$t_{increment} = 15\% \times t_{layers} = 0,15 \times\ 10197\ sec$$

$$\Rightarrow t_{increment} = 1530\ sec$$

Τέλος, γνωρίζουμε πως σε κάθε στρώση του υλικού έχουμε έναν νεκρό χρόνο των 10 *sec*. Επομένως, ο συνολικός νεκρός χρόνος που περνάει για την κατασκευή όλων των στρωμάτων είναι:

$$t_{dt} = 10\ sec \times\ 277 = 2770\ \mathrm{sec}$$

$$\Rightarrow\ t_{dt} = 2770\ sec$$

Επομένως, ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται για να εκτυπωθεί μία σφαίρα εντός του χώρου κατασκευής θα είναι:

$$t_{sphere} = 4(t_{layers} + t_{increment} + t_{dt}) = 4(10197\ sec +\ 1530\ sec + 2770)\ sec$$

$$t_{sphere} = 46908\ sec + 11080\ sec = 57988 sec$$

$$\Rightarrow t_{sphere} = 16,11\ h$$

Ζητούμενο - 4:

Ζήτημα του ερωτήματος είναι να βρούμε έναν τρόπο ώστε να μειωθεί ο χρόνος κατασκευής δίχως αλλαγή της μάζας των αντικειμένων. Συνεπώς, εξ αρχής απορρίπτεται η μείωση της εσωτερικής κάλυψης υλικού των σφαιρών. Οπότε, θα πρέπει να βρεθεί μία διαφορετική λύση στο πρόβλημα. Με τα δεδομένα του προηγούμενο ερωτήματος διαπιστώνουμε πως ο ρυθμός διάστρωσης του υλικού είναι:

$$u_{material} = A_n u_{εκ} = \pi \left(\frac{0{,}6}{2}\ mm\right)^2 27\frac{mm}{sec} = 7{,}635\frac{mm^3}{sec}$$

Ο ρυθμός παροχής του όγκου είναι μικρότερη συγκριτικά με την μέγιστη δυνατή παροχή διάστρωσης του υλικού που παρέχεται. Οπότε, θα πρέπει να αυξηθεί με χρήση διαφορετικής κεφαλής και πάχους στρώσης. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μεγαλύτερη δυνατή κεφαλή ώστε να το πετύχουμε αυτό. Επίσης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το 75% της μέγιστης παροχής του υλικού (που είναι το άνω όριο) για ην εκτύπωση των σφαιρών. Έτσι, ο απαιτούμενος χρόνος για την εκτύπωση της σφαίρας θα είναι:

$$t_{layers} = \frac{V_{total}}{0.75u_{V,max}} = \frac{77841\ mm^3}{0.75 \times 20\frac{mm^3}{sec}}$$

$$\Rightarrow t_{layers} = 5190\ sec$$

Επιπρόσθετα, υπάρχει προσαύξηση του χρόνου κατά 15% λόγω των μετακινήσεων που εκτελεί η κεφαλή εντός του χώρου εκτύπωσης και των εσωτερικών *infills* που γίνονται κατά την διάρκεια λειτουργίας. Οπότε

$$t_{increment} = 15\% \times t_{layers} = 0{,}15 \times\ 5190\ \ sec$$

$$\Rightarrow t_{increment} = 778{,}5\ sec$$

Επίσης, γνωρίζουμε πως το πάχος της στρώσης του υλικού θα πρέπει να κυμαίνεται από το 25% έως το 75% της διαμέτρου της κεφαλής του εκτυπωτή. Κατά την χρήση της δυνατότερης μεγαλύτερης κεφαλής διαμέτρου $D_n = 0{,}8\ mm$, μπορούμε να ορίσουμε εμείς ένα πάχος μεταξύ του $0{,}2\ mm$ και $0{,}6\ mm$. Με γνώμονα αυτό θα επιλέξουμε ένα νέο πάχος στρώσης στα $0{,}5\ mm$. Έτσι, μπορούμε να υπολογίσουμε τον συνολικό αριθμό των *layers* που εκτυπωθούν:

$$N_{layers} = \left\lceil\frac{D_{sphere}}{L'_{thickness}}\right\rceil = \left\lceil\frac{80\ mm}{0{,}5\ mm}\right\rceil = 160$$

Επιπροσθέτως, γνωρίζουμε πως σε κάθε στρώση του υλικού έχουμε έναν νεκρό χρόνο των 10 *sec*. Επομένως, ο συνολικός νεκρός χρόνος που περνάει για την κατασκευή όλων των στρωμάτων είναι:

$$t_{dt} = 10\ sec \times\ 160 = 1600\ \text{sec}$$

$$\Rightarrow\ t_{dt} = 1600\ \ sec$$

Επομένως, ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται για να εκτυπωθεί μία σφαίρα εντός του χώρου κατασκευής θα είναι:

$$t_{sphere} = 4(t_{layers} + t_{increment} + t_{dt}) = 4(5190\,sec + \ 778{,}5\,sec + 1600)\ \ sec$$

$$t_{sphere} = 30274\,sec$$

$$\Rightarrow t_{sphere} = 8.41\,h$$

Έτσι, διαπιστώνουμε πως ο χρόνος κατασκευής των σφαιρών γίνεται μικρότερος των 12 h.

Ζητούμενο - 5:

Για την κοστολόγηση των τεσσάρων σφαιρών, θα πρέπει να υπολογίσουμε αρχικά τη συνολική μάζα υλικού της κατασκευής. Γνωρίζουμε πως ο συνολικός όγκος υλικού που θα χρειαστεί θα είναι:

$$V_{material} = 4V_{total} = 4 \times 77.841\,mm^3 = 311.364\,mm^3$$

Επομένως, η συνολική μάζα υλικού που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι

$$m_{material} = \rho V_{material} = \ 0{,}00124\,\frac{g}{mm^3} \times 311.364\,mm^3 = 386{,}09\,g$$

$$\Rightarrow m_{material} = 0,38609\,Kg$$

Συνεπώς, το συνολικό κόστος που θα χρειαστούμε για την κατασκευή των σφαιρών θα είναι:

$$Cost = Km_{material} = 30\,\frac{€}{Kg}\ 0,38609\,Kg$$

$$Cost = 11{,}58\ €$$