

## ANALIZA UTICAJA PARAMETARA PRINTANJA NA STABILNOST 3D PRINTANIH AKSIJALNO OPTEREĆENIH KONSTRUKCIONIH ELEMENATA

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PRINTING PARAMETERS ON THE STABILITY OF 3D PRINTED AXIALLY LOADED STRUCTURAL ELEMENTS

Selma Duranović, dipl. inž. maš.  
Mašinski fakultet u Zenici

Almina Mujanović-Hrustić, dipl. inž. maš.  
Mašinski fakultet u Zenici

Elma Ekinović, prof. dr. sc.  
Mašinski fakultet u Zenici

Amel Karić, mr. sc.  
Mašinski fakultet u Zenici

### REZIME

*Ovaj rad se bavi analizom uticaja parametara 3D printanja na stabilnost konstrukcionih elemenata izloženih aksijalnom opterećenju. Ispitivanje je sprovedeno na osam različitih greda, gdje su mjenjanja četiri parametra na dva nivoa: gustina ispune, debljina stijenke, pravac printanja i intenzitet aksijalne sile. Cilj istraživanja bio je da se odredi koji od parametara printanja u kojoj mjeri utiče na stabilnost konstrukcionih elemenata izloženih djelovanju pritiska aksijalne sile kako bi se postigla maksimalna krutost uz minimalan utrošak materijala i vremena printanja.*

*Za efikasno planiranje i obradu eksperimenta primijenjena je Taguchi metoda koristeći L8 ortogonalnu matricu. Na osnovu dobijenih rezultata, identifikovani su ključni parametri koji doprinose većoj otpornosti konstrukcije, čime se omogućava optimizacija procesa 3D printanja za strukturalne primjene.*

**Ključne riječi:** 3D printane grede, akcelerator, frekventni odziv, Taguchi eksperiment##

### ABSTRACT

*This paper analyzes the impact of 3D printing parameters on the stability of structural elements subjected to axial loading. The investigation was conducted on eight different beams, varying four parameters at two levels: infill density, wall thickness, printing orientation, and axial force intensity. The aim of the research was to determine the extent to which each printing parameter affects the stability of structural elements under compressive axial force in order to achieve maximum structural rigidity with minimum material usage and minimum printing time.*

*To efficiently plan and process the experiment, the Taguchi method was applied using the L8 orthogonal array. Based on the obtained results, key parameters contributing to greater structural resistance were identified, enabling optimization of the 3D printing process for structural applications.*

**Keywords:** 3D printed beams, accelerometer, frequency response, Taguchi experiment

## 1. UVOD

3D printanje FDM postupkom uključuje veliki broj procesnih parametara kao što su: materijal filameta, gustoća popune unutrašnjeg volumena dijela materijalom, rastojanje između slojeva, orijentacija dijela na postolju mašine kod izrade, brzina i temperatura printanja. Konstrukcioni elementi, poput stubova ili greda, imaju prirodne (sopstvene) frekvencije vibracija koje zavise od njihove mase, geometrije i graničnih uslova. Kada je takav element dodatno izložen aksijalnoj sili, dolazi do promjene u njegovom dinamičkom ponašanju – tačnije, do promjene njegovih prirodnih frekvencija.

Veza između krutosti (engl. stiffness) i frekvencije vlastitih vibracija (engl. natural frequency) u mehaničkim sistemima često se koristi u dinamici konstrukcija, mašinstvu i vibracijskoj analizi. Ovaj fenomen je važan u inženjerskoj praksi jer omogućava analizu stabilnosti i bezbjednosti konstrukcija pod opterećenjem, kao i njihovo ponašanje u dinamičkim uslovima, npr. pri zemljotresima, udarima ili vibracijama. [1] U naučnom radu “Nonlinear vibratory properties off additive manufactured continious carbon fiber reinforced polymer composites” proučavani su efekti parametara proizvodnje na vibracione osobine 3D printanih polimernih kompozitnih nosača. Cilj ovog rada i istraživanja je bio da se procjene efekti parametara izrade uključujući gustinu ispune i način ispune materijala matrice. Utvrđeno je da parametri izrade mjenjaju ne samo krutost nosača, već i utiču i na faktor prigušenja. [2] U doktorskoj disertaciji autora Adi P., koji je također ispitivao mehaničke osobina 3D printanih dijelova sa različitim dizajnom ispune, zaključeno je da je gustina ispune najutjecajniji parametar dizajna ispune na ukupno vrijeme printanja uzorka, količinu potrošenog materijala kao i vrijeme printanja strukture ispune. [3]

Za planiranje i izvođenje eksperimenta primijenjena je **Taguchi metoda**. Ova metoda omogućava efikasnu analizu uticaja više faktora na neku pojavu ili rezultat, uz minimalan broj eksperimenata. [4] Cilj rada je da se identifikuju faktori koji najviše utiču na stabilnost 3D printanih elemenata, kao i da se pomoću eksperimentalnih podataka donesu preporuke za optimizaciju procesa printanja u svrhu postizanja boljih mehaničkih osobina.

## 2. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Parametri koji su određeni prije samog printanja su gustina ispune, debljina stijenke i pravac printanja, i prikazani su u *tabeli 1*. Ulazni parametri su raspoređeni na dva nivoa. Izlazni podaci nakon printanja su vrijeme printanja i masa uzorka. Printanje uzoraka 2, 4, 6 i 8 ima veću masu i vrijeme printanja jer je osim grede printan i oslonac u obliku kvadrata na dnu grede radi ojačanja. Prikazano vrijeme printanja i masa greda u *tabeli 2*, je za grede zajedno sa osloncem.

*Tabela 1. Parametri za eksperiment – nivoi faktora#*

Nivo	Gustina ispune	Debljina stijenke	Pravac printanja	Sila [N]
1	20%	0,8 mm	Horizontalno	50 N
2	90%	1.6 mm	Vertikalno	200 N

Tabela 2. Ulazni i izlazni parametri 3D printanja

Experiment	Gustina	Debljina	Pravac	Vrijeme printanja (min)	Masa (g)
1	1	1	1	52	16
2	1	1	2	114	17
3	1	2	1	66	25
4	1	2	2	138	23
5	2	1	1	98	30
6	2	1	2	223	57
7	2	2	1	110	30
8	2	2	2	233	59

### 3. KORIŠTENA OPREMA I UREĐAJI

U okviru eksperimenta korišten je 3D printer – Ultimaker (FDM tehnologija), pomoću kojeg su izrađene grede od PLA materijala sa varijacijama u parametrima printanja: nivo ispune (20% i 90%), debljina stjenke (0.8 mm i 1.6 mm) i pravac printanja (uzdužno i poprečno). Za eksperiment je korišten akcelerometar i impulsni čekić, a rezultati su obrađeni u programskom paketu PULSE LabShop. Ukupno je izrađeno osam greda prema L8 ortogonalnoj matrici. Svaka greda je postavljena u stezni mehanizam kojim je simuliran zglobni oslonac na obe strane, pri čemu je prilikom stezanja korišten mjerač sile (load cell) Kistler, kako bi se kontrolisala sila stezanja i eventualna deformacija konstrukcije. Pomjeranje grede uslijed stezanja provjeravano je pomoću mjernog indikatora pomaka Mitutoyo (dial gauge ili LVDT senzor). Dinamičko ispitivanje sprovedeno je pomoću udarnog čekića Brüel & Kjaer sa integrisanim senzorom sile a podaci su prikupljeni sistemom za akviziciju signala i obrađeni u softveru za modalnu analizu. Na slici 2 su prikazani korišteni uređaji. [5]



Slika 1. 3D isprintane grede sa osloncima i nakon odsjecanja oslonaca



Slika 2. Mjerna oprema u laboratoriji tokom mjerenja [5]

### 4. PROVEDBA EKSPERIMENTA

Oslonac vertikalno printanih greda je uklonjen pomoću ručne pile. Na slici 1 prikazane su 3D printane grede sa osloncima i izgled greda kada se uklone oslonci i višak materijala. Eksperiment je proveden U LORAM-u na Mašinskom fakultetu u Zenici. Uzorci su na strugarskoj mašini pritisnuti minimalnom ili maksimalnom silom. Na sredini grede je

postavljen akcelerometar što je prikazano na *slici 3*. Uzorci su testirani udarcem čekića pri čemu je mjerena frekvencija oscilovanja svakog pojedinog uzorka. Mjerenja su izvedena dva puta pri čemu je mogućnost greške svedena na minimum. Pomoću uređaja za mjerenje sile određeno je koja je minimalna sila kako uzorak ne bi ispao iz zahvata prilikom udara čekićem i koja je maksimalna sila kako ne bi došlo do pojave izvijanja grede. U *tabeli 3* je postavljena L8 ortogonalna matrica četiri parametra na dva nivoa.



*Slika 3. Pritisnuta greda na strugu i akcelerometar na sredini grede*

*Tabela 3. Postavka parametara za eksperiment*

Exp.	Gustina ispune	Debljina stijenke	Pravac printanja	Sila
1.	1	1	1	1
2.	1	1	2	2
3.	1	2	1	2
4.	1	2	2	1
5.	2	1	1	2
6.	2	1	2	1
7.	2	2	1	1
8.	2	2	2	2

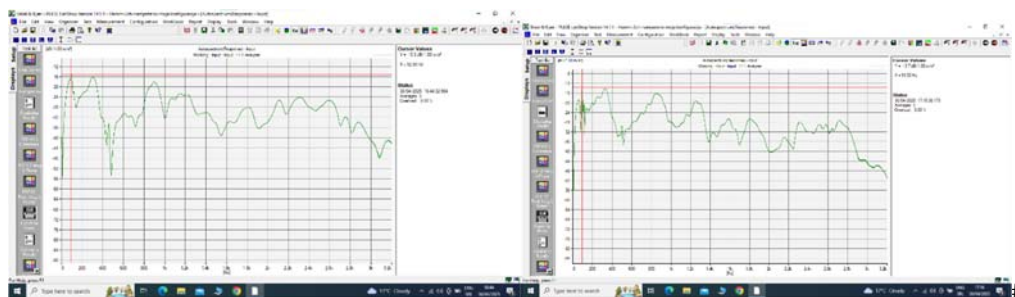
## 5. REZULTATI EKSPERIMENTA

Rezultati su očitani pomoću softvera za prikaz mjerene frekvencije grede. U *tabeli 4* su prikazani rezultati dva mjerenja, kao i srednja vrijednost mjerenja koju ćemo koristiti pri proračunu efekta glavnih faktora u nastavku.

*Tabela 4. Rezultati mjerenja frekvencije*

Exp.	Gustina	Debljina	Pravac	Sila	1.mjerenje (Hz)	2. mjerenje (Hz)	Srednja vrijednost mjerenja (Hz)
1	1	1	1	1	95,5	89,5	92,5
2	1	1	2	2	95,5	91,5	93,5
3	1	2	1	2	77	77	77
4	1	2	2	1	95	95	95
5	2	1	1	2	76,5	76,5	76,5
6	2	1	2	1	82	82	82
7	2	2	1	1	92,5	92,5	92,5
8	2	2	2	2	77	77	77

Na slici 4 su prikazani primjeri očitavanja dobijene frekvencije nakon udarca čekićem u greda.



Slika 4. Primjer prikaza rezultata mjerenja frekvencije 3D printanih greda

## 6. ANALIZA REZULTATA

Da bi se mogli analizirati rezultati dobijene frekvencije, izračunati su efekti glavnih faktora: gustine – Faktor A, debljine – Faktor B, pravca – Faktor C i sile – Faktor D.

Faktor A

Nivo 1

$$N_{1A} = \frac{92,5+93,5+77+95}{4} = 89,5 \dots (1)$$

Nivo 2

$$N_{2A} = \frac{76,5+82+92,5+77}{4} = 82 \dots (2)$$

$$\text{Efekat od A } \delta_A = 89,5 - 82 = 7,5 \dots (3)$$

Faktor B

Nivo 1

$$N_{1B} = \frac{92,5+93,5+76,5+82}{4} = 86,125 \dots (3)$$

Nivo 2

$$N_{2B} = \frac{77+95+92,5+77}{4} = 85,375 \dots (4)$$

$$\text{Efekat od B } \delta_B = 86,125 - 85,375 = 0,75 \dots (5)$$

Faktor C

$$N_{1C} = \frac{92,5+77+76,5+92,5}{4} = 86,625 \dots (6)$$

$$N_{2C} = \frac{93,5+95+82+77}{4} = 86,875 \dots (7)$$

$$\text{Efekat od C } \delta_C = 84,625 - 86,875 = -2,25 \dots (8)$$

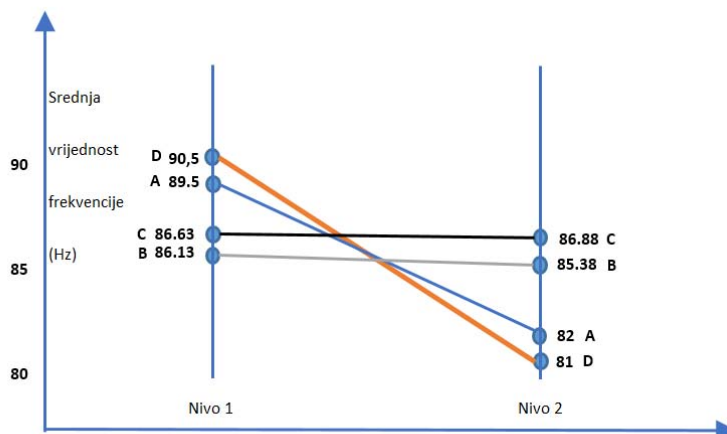
Faktor D

$$N_{1D} = \frac{92,5+95+82+92,5}{4} = 90,5 \dots (9)$$

$$N_{2D} = \frac{93,5+77+76,5+77}{4} = 81 \dots (10)$$

$$\text{Efekat od D } \delta_D = 90,5 - 81 = 9,5 \dots (11)$$

Na osnovu dobijenih rezultata, zaključuje se da najveći utjecaj na promjenu frekvencije ima faktor D = 9,5, tj. sila, zatim faktor A = 7,5 gustina. Faktori B i C sa efektima 0,75 i -2,25 imaju manji utjecaj. Utjecaj datih faktora na frekvenciju prikazan je dijagramom na slici 5.



Slika 5. Dijagram efekta glavnih faktora na frekvenciju

## 7. ZAKLJUČAK

Analizom glavnih efekata četiri faktora (A, B, C i D) utvrđeno je da ne utiču svi faktori jednako na frekvenciju. Najveći efekat ima faktor **D** ( $\delta = 9,5$ ) tj. sila, što ukazuje da ovaj faktor ima najznačajniji uticaj na povećanje frekvencije. Sljedeći po uticaju je faktor **A** ( $\delta = 7,5$ ) tj. gustina, koji takođe doprinosi porastu frekvencije. Nasuprot tome, faktor **B** debljina stijenke pokazuje minimalan efekat ( $\delta = 0,5$ ), što sugerise da njegov uticaj na frekvenciju nije značajan. Faktor **C** pravac printanja ima negativan efekat ( $\delta = -2,75$ ), što znači da drugi nivo ovog faktora – vertikalni pravac printanja, dovodi do **smanjenja frekvencije** u poređenju s prvim nivoom – horizontalnim pravcem printanja. Na osnovu mjerenja je utvrđeno, a na dijagramu efekta glavnih faktora na frekvenciju prikazano da su frekvencije za nivo 2 to jest za više vrijednosti parametara, niže. Kao što je već spomenuto, na vrijednost frekvencije najviše djeluju sila i gustina ispune i njihovim povećanjem, frekvencija znatno opada. S obzirom na ove rezultate može se zaključiti da bi u daljoj optimizaciji procesa prioritet trebalo dati faktorima D i A, dok se faktor B može tretirati kao zanemarljiv.

## 8. LITERATURA

- [1] Meirovitch, L.: Fundamentals of Vibrations, New York McGraw-Hill, 2001.
- [2] Zhao, J.; Perkins, E. Li. X.; Bond, A.; Marghitu, D.: Nonlinear vibratory properties of additive manufactured continuous carbon fiber reinforced polymer composites, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.
- [3] Pandžić, A.: Prilog procjeni mehaničkih osobina FDM printanih polimernih materijala sa različitim dizajnom ispune, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu, 2022.
- [4] Taguchi, G.; Chowdhury, S.; Taguchi, S.: Robust Engineering: Learn How to Boost Quality While Reducing Costs & Time to Market, New York: McGraw-Hill, 2000.
- [5] Karić, A.: Razvoj eksperimentalnog modela zavisnosti sopstvene frekvencije oscilovanja i sile kod aksijalno opterećenih greda, Magistarski rad, Zenica 2019.