

# Analiza geometrijskih specifikacija proizvoda dobijenih različitim strategijama 3D štampe

Miloš Ranisavljev,  
Dejan Movrin,  
Branko Štrbac,  
Ivan Matin  
Miodrag Hadžistević,  
Departman za proizvodno mašinstvo  
Fakultet tehničkih nauka  
Novi Sad, Srbija

[mranisavljev97@uns.ac.rs](mailto:mranisavljev97@uns.ac.rs), [movrin@uns.ac.rs](mailto:movrin@uns.ac.rs),  
[strbacb@uns.ac.rs](mailto:strbacb@uns.ac.rs), [matini@uns.ac.rs](mailto:matini@uns.ac.rs), [miodrags@uns.ac.rs](mailto:miodrags@uns.ac.rs)

Vladimir Blanuša,  
Mašinski odsek  
Visoka tehnička škola strukovnih studija  
Novi Sad, Srbija  
[blanusa@vtsns.edu.rs](mailto:blanusa@vtsns.edu.rs),

**Sažetak**—Mogućnost realizacije prototipova projektnih rešenja uz minimalno sredstava učinila je deponovanje istopljenog filameta (eng. *Fused Deposition Modeling*) najpopularnijom tehnikom aditivne proizvodnje. Radni predmeti nastali ovom metodom 3D štampe mogu imati značajna odstupanja od specifikacije. Odstupanja od idealnih dimenzija i oblika geometrijskih primitiva se javljaju usled neadekvatno odabrane strategije štampanja koja između ostalog podrazumeva parametre kao što su: temperatura mlaznice/radne ploče, brzina štampe i procenta ispune. U ovom radu, uz pomoć koordinatne merne mašine i 3D skenera, izvršena je analiza uticaja procenta ispune radnih predmeta na odstupanja karakteristika kvaliteta od idealne geometrije u vidu CAD modela. Obradom podataka utvrđeno je da radni predmet sa manjim procentom ispune ima manja odstupanja od radnog predmeta sa potpunom ispunom.

**3D štampa; deponovanje istopljenog filameta - FDM; dimenziona tačnost;**

## I. UVOD

Aditivne tehnologije (eng. *Additive Technologies*) predstavljaju postupke spajanja materijala sa ciljem formiranja radnog predmeta na osnovu digitalnog 3D modela, najčešće sloj po sloj. S početka korišćene samo za brzu izradu prototipova (*Rapid Prototyping*), sa razvojem tehnologije i materijala, tehnologije za aditivnu proizvodnju su evoluirale do stepena koji omogućava izradu završnih, funkcionalnih proizvoda (eng. *Additive Manufacturing*) ili finalnih alata (eng. *Rapid Tooling*). Uz pomoć CAD modela (eng. *Computer-Aided Design*) omogućila je inženjerima i dizajnerima da bolje sagledaju projektno rešenje bez upotrebe skupe proizvodne opreme [2]. Takođe, ovim tehnologijama je moguće izraditi radne predmete koji se veoma teško, a ponekad i nemoguće, realizuju konvencionalnim načinima izrade (mašinska obrada rezanjem, deformisanje itd.).

Jedna od najpopularnijih tehnologija 3D štampe je deponovanje istopljenog filameta (eng. *Fused Deposition Modeling* - FDM). Proces dobijanja radnih predmeta FDM

metodom se svodi na deponovanje istopljenog materijala (najčešće polimera) sloj po sloj, kako bi se generisao kompletan radni predmet [3]. Osnovni delovi 3D štampe koji radi na principu FDM-a su: noseća konstrukcija štampe, ekstruder, zagrejana dizna kroz koju izlazi rastopljen materijal (filament), radni sto, upravljanje. Princip funkcionisanja 3D štampe koji je baziran na FDM metodi se može objasniti u nekoliko koraka: pomoću ekstrudera, filament (materijal u obliku žice) se prinudno kreće ka zagrejanom dizni štampe; dizna deponuje rastopljeni materijal u skladu sa upravljačkim programom u obliku G-koda; pokretanje izvršnog organa štampe se vrši pomoću koračnih motora; slojevi materijala se slažu jedan na drugi dok se ne dobije potpuni model.

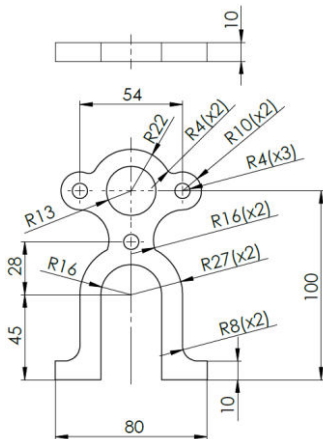
Zbog specifičnosti procesa proizvodnje ovom metodom, i male čvrstoće i krutosti polimera, mehaničke karakteristike nastalog radnog predmeta su inferiorne u poređenju sa tradicionalnim tehnikama formiranja (injekciono brizganje, ekstrudiranje itd.) [4]. Pored mehaničkih karakteristika, geometrijske specifikacije proizvoda kao što su dimenziona tačnost, greške oblika i hrapavost predstavljaju važan aspekt kvaliteta radnih predmeta dobijenih FDM metodom. Tačnost 3D istampanih delova se definiše kao bliskost saganja dimenzija realnog radnog predmeta i njegove specifikacije (CAD model) [5]. Hrapavost radnih predmeta predstavlja bitnu karakteristiku koja definiše funkcionalnost, stoga je od vitalnog značaja smanjiti hrapavost dobijenih komponenti.

Presudan faktor na kvalitet proizvoda nastalog ovom metodom ima strategija štampe. Strategija štampe podrazumeva variranje visine slojeva štampe, brzine štampe, temperature radnog stola i mlaznice, prečnika mlaznice, definisanje ispune radnog predmeta (pun model, školjkasti model, itd.). Važnost strategije štampe potvrđuju mnogobrojni radovi nastali na temu optimizacija parametara strategije štampe kako bi se dobila najveća tačnost radnih predmeta, poboljšale mehaničke osobine, minimizovala masa, itd.

U ovom radu posmatrana su dva različita radna predmeta dobijena različitim strategijama 3D štampe. Jedan radni predmet je odrađen sa potpunom ispunom (eng. *Infill pattern - solid*) dok je drugi imao školjkastu ispunu (eng. *Infill pattern - triangles*). Provera dimenzionalnih karakteristika je odrađena na koordinatnoj mernoj mašini Carl Zeiss Contura G2 RDS i 3D skeneru EinScan Pro 2X firme Shining 3D. Merenje hrapavosti je odrađeno na uređaju MarSurf PS1 firme MarSurf. Cilj je bio utvrditi koji radni predmet ima veća odstupanja od nominalnih karakteristika kvaliteta.

## II. EKSPERIMENT

Tehnička dokumentacija radnog predmeta koji je korišćen za sprovođenje studije je prikazana na Sl. 1.



Slika 1. Tehnička dokumentacija radnog predmeta

Na radnom predmetu su merene sve naznačene dimenzionalne karakteristike kvaliteta kao i geometrijske karakteristike kvaliteta kružnost, cilindričnost i ravnost pojedinih geometrijskih primitiva. Dodatno, merena je hrapavost na čeonj površini na tri različita mesta, a kako bi se dobila „šira“ slika o odstupanjima kompletnog radnog predmeta, izvršeno je skeniranje radnog predmeta. Obrada podataka dobijenih skeniranjem je izvršena u softveru GOM inspect 2021.

Na Sl. 2 su prikazani realni radni predmeti korišćeni tokom studije.

Radni predmet koji je odštampan plavim filamentom ima 100% ispunu, odnosno, predstavlja „pun“ model, a radni predmet koji je u beloj boji ima 10% ispune u obliku trouglova.



Slika 2. Realni radni predmeti

3D štampač korišćen za dobijanje radnih predmeta je Zortrax M200 PLUS, prikazan na Sl. 3. Radna zapremina ovog štampača je 200×200×180 mm. Konstrukcijska izvedba ovog štampača je „XY Core“ što znači da ima relativno krutu noseću strukturu. Sklop *x* i *y*-ose, koji definišu kretanje mlaznice, se kreću u *XY* ravni, dok se radni sto pomera po *z*-osi. Štampač ima zatvorenu noseću strukturu što mu omogućava da štampa materijale koji zahtevaju zagrejanu atmosferu u zoni štampe a ne samo zagrejani radni sto. Prečnik mlaznice korišćen pri izradi je 0,4 mm, a prečnik filameta je 1,75 mm. Softver korišćen za formiranje upravljačkog koda (G-koda) je Z-Suite. U okviru ovog programskog paketa definisani su sledeći parametri strategije: debljina sloja 0,14 mm (*High Quality*); broj slojeva na vrhu 8 i na dnu 4. Navedeni parametri su korišćeni za oba modela. Kao što je ranije napomenuto razlika između modela je samo u procentu ispune, i zadatak rada je bio da se utvrdi koji model ima manja odnosno veća odstupanja od idealne geometrije (CAD modela).



Slika 3. Zortrax M200 plus

Merenje karakteristika kvaliteta je odrađeno na nekoliko različitih mernih uređaja. Merenje dimenzionih karakteristika i oblika geometrijskih primitiva je rađeno na koordinatnoj mernoj mašini Zeiss Contura G2 RDS. Maksimalno dozvoljena greška ove mašine, prema izrazu (1), iznosi:

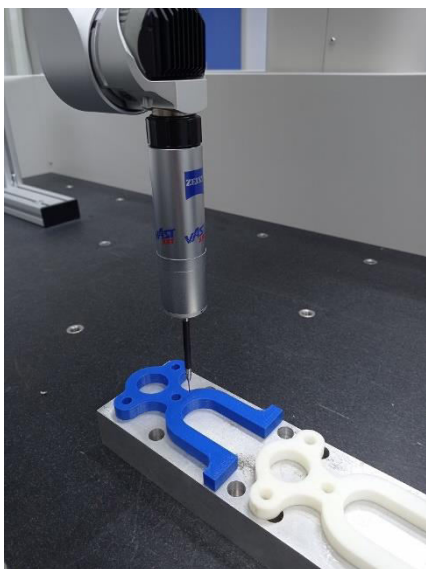
$$MPE_E = (1,9 + L/330) \mu\text{m} \quad (1)$$

pri čemu je *L* u mm. Pri merenju upotrebljen je pasivni VAST XXT senzor koji može da uzorkuje tačke u diskretnom i kontinualnom modu.

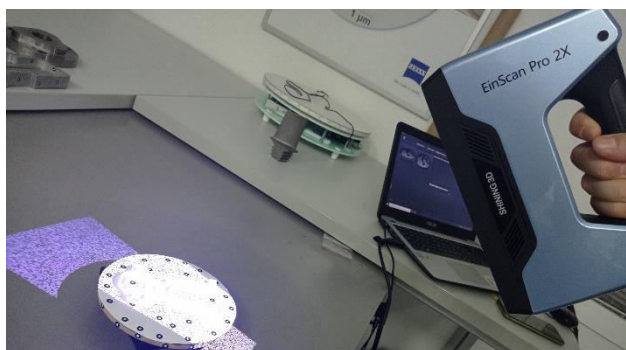
Za većinu geometrijskih primitiva korišćena je diskretna metoda uzorkovanja mernim pipkom prečnika 1 mm, dok je za procenu greške oblika (kružnost, cilindričnost i ravnost) korišćena metoda kontinualnog uzorkovanja sa više od 50 uzorkovanih tačaka. Na Sl. 4 prikazan je položaj i merenje radnih predmeta na KMM.

Drugi merni sistem koji je upotrebljen za merenje karakteristika kvaliteta je EinScan 2X Pro. Skeniranje radnog predmeta je izvršeno ručno sa podešenom rezolucijom od 0,2 mm (*High Detail*). Na tačnost rekonstruisanog modela, pored broja tačaka, utiču i karakteristike površine radnog predmeta

(hrapavost, izraženi geometrijski primitivi, refleksivnost, itd...). Na Sl. 5 prikazan je radni predmet u procesu skeniranja 3D skenerom.



Sl. 4 Merenje radnih predmeta na KMM



Slika 5. Prikupljanje podataka na radnom predmetu pomoću 3D skenera

Hrapavost je merena na tri različita mesta na čeonj površini radnog predmeta. Parametar hrapavosti koji je meren je srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$ , dok je dužina snimanja iznosila  $l=17,5$  mm.

### III. REZULTATI I DISKUSIJA

Izmereni rezultati koji su dobijeni na koordinatnoj mernoj mašini su analizirani pomoću softverskog paketa Minitab 17. Odstupanja od nominalnih vrednosti su uneta u statistički softver i izračunata je srednja vrednost i standardna devijacija tih odstupanja. Dodatno je urađen upareni  $t$ -test kako bi se utvrdilo da li se srednje vrednosti odstupanja plavog radnog predmeta i belog radnog predmeta značajno razlikuju sa pragom značajnosti  $\alpha=0.05$ .

Izračunata srednja vrednost odstupanja za plavi radni predmet i beli radni predmet iznose 0.01166 mm i 0,02942 mm, respektivno, dok je standardna devijacija odstupanja plavog radnog predmeta 0,4946 mm a belog 0,4181 mm. Na osnovu uparenog  $t$ -testa utvrđeno je da nema razlike između srednjih vrednosti odstupanja plavog i belog radnog predmeta pošto je  $p$  vrednost iznosila 0.742 što je veće od praga

značajnosti 0.05, pa ne možemo odbaciti nultu hipotezu tj. da nema značajne razlike između odstupanja ovih radnih predmeta. Iako sa statističkog gledišta nema značajnijih razlika između radnih predmeta, određene razlike u karakteristikama kvaliteta kao što su ravnost, kružnost, cilindričnost i hrapavost se mogu uočiti. Naime, razlika u odstupanjima se uočava kod karakteristika kružnosti cilindra R13 (pogledati Sl. 1.) gde vrednost kružnosti plavog radnog predmeta iznosi 0.1954 mm, a belog radnog predmeta iznosi 0.1460 mm. Kružnost je merena na istoj visini pomenutog cilindra, sa istom strategijom uzorkovanja tačaka (brzina skeniranja 10 mm/s i broj tačaka 50). Razlika u cilindričnosti istog cilindra takođe se pokazala kao značajna pa je cilindričnost plavog radnog predmeta 0.1777 mm a belog radnog predmeta 0,1163 mm.

Očigledno je da veća odstupanja od cilindričnosti i kružnosti ima plavi radni predmet koji je izrađen sa 100 % ispunom. Na ovom radnom predmetu, vizuelno se mogu uočiti nepravilnosti kao što je istisnut materijal koji doprinosi povećanju devijacije ove karakteristike kvaliteta, u poređenju sa belim radnim predmetom.

Ravnost plavog radnog predmeta je iznosila 0.2790 [mm] dok je ravnosti belog radnog predmeta iznosila 0,2873 [mm]. Kao što se može uočiti, nema značajne razlike između vrednosti ove dve ravnosti. Potrebno je napomenuti da se za proračun supstitutivne geometrije koristila metoda najmanjih kvadrata (eng. *Least Squares - LS*).

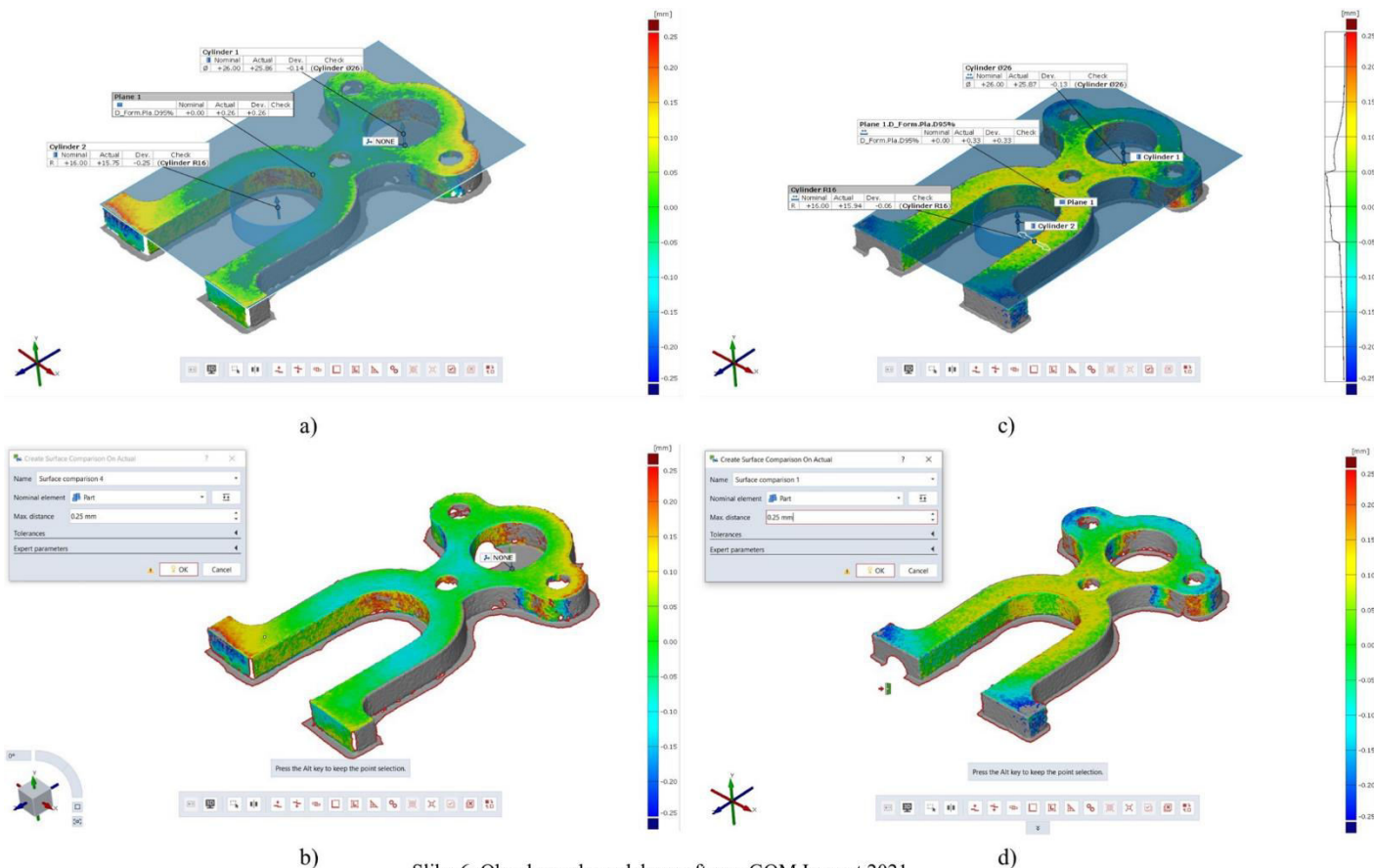
Pošto se na makro nivou nisu pokazale značane razlike u ravnosti, odrađeno je i merenje hrapavosti na čeonj površini na radnim predmetima. U Tabeli I. prikazane su vrednosti srednje aritmetičke hrapavosti koje su izmerene na 3 merna mesta.

TABELA I. HRAPAVOST RADNIH PREDMETA

Merno mesto	Hrapavost – plavi radni predmet $R_a$ u $\mu\text{m}$	Hrapavost – beli radni predmet $R_a$ u $\mu\text{m}$
Merno mesto 1	11,6	41,95
Merno mesto 2	12,56	41,09
Merno mesto 3	10,21	37,40

Jasno se mogu uočiti razlike u hrapavosti, pri čemu na sva tri merna mesta veličina srednje aritmetičke hrapavosti belog radnog predmeta trostruko prevazilazi vrednost hrapavosti plavog radnog predmeta.

Dalja analiza je sprovedena na rezultatima koji su dobijeni pomoću uređaja za 3D skeniranje. Oba radna predmeta su skenirana pod istim uslovima, s tim što su se bolji rezultati u smislu boljeg oblaka tačaka dobili na plavom radnom predmetu. Izlaz iz procesa skeniranja je bio STL fajl oba radna predmeta koje je trebalo filtrirati od nepotrebnih podataka. Kako bi se karakteristike kvaliteta izračunale, neophodno je bilo izvršiti poravnavanje CAD modela radnog predmeta sa odgovarajućim *mesh* modelima. Inicijalno poravnavanje je izvršeno opcijom 3-2-1 *alignment*, kako bi se *mesh* podaci približno poravnali sa nominalnim podacima, a zatim glavno poravnavanje je odrađeno preko opcije *local-best-fit*.



Slika 6. Obrada mesh modela u softveru GOM Inspect 2021

Tek nakon što je čišćenje podataka i poravnavanje odrađeno pristupilo se formiranju geometrijskih primitiva i određivanju odstupanja. Na Sl. 6 prikazana je analiza dobijenih rezultata.

Odstupanja su određena za 3 karakteristike kvaliteta: ravnost čeonu površine, vrednost prečnika cilindra R13 i radijus R16 (pogledati Sl. 1.). Slike pod a) i b) se odnose na analizu belog radnog predmeta dok se slike pod c) i d) odnose na plavi radni predmet. Za fitovanje podataka za cilindar poluprečnika R13 i radijus R16 kao i za ravnost čeonu ravni korišćena je best-fit metoda. Greška ravnosti za beli radni predmet, pod a), iznosi 0.26 mm dok za plavi radni predmet iznosi 0.33 mm. Može se uočiti povećanje vrednosti ravnosti kod plavog radnog predmeta u odnosu na rezultate dobijene na KMM, odnosno, smanjenje vrednosti ravnosti za beli radni predmet u odnosu na rezultate dobijene na KMM. Odstupanja cilindra R13 i radijusa R16 plavog radnog predmeta iznose -0.13 mm i -0.06 mm, respektivno. Analogno, odstupanja istih karakteristika kvaliteta za beli radni predmet iznose -0,14 mm i -0.25 mm. Može se uočiti da značajnije razlike nema između odstupanja cilindra R13, ali da se kod radijusa R16 lošiji rezultati dobijaju kod belog radnog predmeta. Ova pojava ne mora biti direktno u vezi sa greškama radnog predmeta, već se može javiti i zbog boje radnog predmeta, pri čemu je skener bolje digitalizovao površinu tamnijeg (plavog) radnog predmeta.

Da bi se stekao dojam o globalnom odstupanju izmerenih tačaka (*mesh*) i idealne geometrije radnog predmeta, moguće je

prikazati obojenu šemu belog (Sl. 6. b)) i plavog Sl. 6. d) radnog predmeta. Tamno plava boja *mesh*-a predstavlja negativna odstupanja, dok crvena boja predstavlja pozitivna odstupanja. Zelena boja označava regije koje imaju minimalno odstupanja od idealne geometrije. Na osnovu šema u boji, kvalitativno, beli radni predmet ima ujednačeniju čeonu površinu, dok površine koje su normalne na čeonu površinu imaju značajno veća odstupanja u odnosu na plavi radni predmet, pogotovu u predelu radijusa R16. Sive zone, tj. zone koje nisu obojene prevazilaze opseg  $\pm 0.25$  mm. Tabela II. predstavlja zaključna razmatranja o uticaju ispune na karakteristike kvaliteta koje su obrađene u ovom radu. Oznaka „+“ govori o manjem odstupanju jednog radnog predmeta u odnosu na drugi, u zavisnosti od mernog sistema kojim je izmerena određena karakteristika kvaliteta.

TABELA II. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

	<i>KMM</i>	<i>3D skener</i>	<i>Hrapavost</i>
Beli radni predmet	+	+	
Plavi radni predmet			+

#### IV. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je imao za cilj da na minimalnom broju radnih predmeta pokaže uticaj strategije 3D štampe na dimenzionalna

odstupanja, odstupanja od oblika i hrapavost površine. Na osnovu merenja karakteristika kvaliteta na različitim mernim sistemima (KMM i 3D skener) došlo se do zaključka da povećanjem gustine ispune kod izrade fizičkih modela ima negativan uticaj na tačnost dimenzija i oblika pojedinih geometrijskih primitiva. Ovakav zaključak se slaže sa literaturnim izvorima [2], [6]. Buduća istraživanja će se odnositi na smanjenje uticaja procenta ispune na tačnost izrađenih delova, a naročito u slučaju ispune od 100%. Istraživanja će se bazirati na korigovanju određenih parametara štampe kao što su *Flow rate* i *Extrusion Multiplier*. Ovim postavkama se može redukovati protok filameta i na taj način uticati na tačnost modela.

#### LITERATURA

- [1] J. Nagendra, M. K. Srinath, S. Sujeeth, K. S. Naresh, and M. S. Ganesha Prasad, "Optimization of process parameters and evaluation of surface roughness for 3D printed nylon-aramid composite," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 674–682, 2021.
- [2] K. M. Agarwal, P. Shubham, D. Bhatia, P. Sharma, H. Vaid, and R. Vajpeyi, "Analyzing the Impact of Print Parameters on Dimensional Variation of ABS specimens printed using Fused Deposition Modelling (FDM)," *Sensors Int.*, vol. 3, no. September 2021.
- [3] A. Mohanty et al., "Parametric optimization of parameters affecting dimension precision of FDM printed part using hybrid Taguchi-MARCOS-nature inspired heuristic optimization technique," *Mater. Today Proc.*, 2021.
- [4] K. Chen, L. Yu, Y. Cui, M. Jia, and K. Pan, "Optimization of printing parameters of 3D-printed continuous glass fiber reinforced polylactic acid composites," *Thin-Walled Struct.*, vol. 164, no. November 2020, p. 107717, 2021.
- [5] M. M. Hanon, L. Zsidai, and Q. Ma, "Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors," *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 3089–3096, 2021.

- [6] Stephen Oluwashola Akande, "Dimensional Accuracy and Surface Finish Optimization of Fused Deposition Modelling Parts using Desirability Function Analysis," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V4, no. 04, 2015.

#### ABSTRACT

The possibility of realizing prototypes of design solutions with minimal funds has made Fused Deposition Modeling the most popular technique of additive production. Workpieces created by this method of 3D printing can have significant deviations from the specification. Deviations from the ideal dimensions and shapes of geometric primitives occur due to inadequately chosen printing strategy, which includes, among other things, parameters such as nozzle/heated bed temperature, print speed, and infill percentage. In this paper, with the help of a coordinate measuring machine and a 3D scanner, the analysis of the influence of the infill percentage of workpieces on the deviations of quality characteristics from the ideal geometry in the form of CAD models was performed. Data processing showed that the workpiece with a lower infill percentage has smaller deviations from the specification than the workpiece with 100% infill (solid part).

#### **Analysis of geometric product specifications obtained by different 3D printing strategies**

Miloš Ranisavljev  
Vladimir Blanuša  
Dejan Movrin  
Branko Štrbac  
Ivan Matin  
Miodrag Hadžistević