

**Conferința Națională Multidisciplinară
„PROFESORUL ION D. LĂZĂRESCU
FONDATORUL ȘCOLII ROMÂNEȘTI
DE TEORIA AȘCHIERII”
Ediția a VIII-a
Cugir, 13 decembrie 2024**

STUDIU PRIVIND INFLUENȚA PARAMETRILOR PROCESULUI DE IMPRIMARE 3D ASUPRA PRECIZIEI SUPRAFEȚELOR CIRCULARE

Alexandru-Florin MUNTEAN, Ferenc GASPAR

STUDY ON THE INFLUENCE OF 3D PRINTING PROCESS PARAMETERS ON THE ACCURACY OF CIRCULAR SURFACES

Abstract: The aim of this work is to analyze and optimize the 3D printing process, focusing on the influence of printing parameters on the accuracy of printed parts. Experiments were carried out with the Creality Ender 3 V2 Neo printer, using various settings optimized by the RSM Design Expert software. Two types of materials were used, PLA and PETG. The printed parts were measured with a digital caliper and the deviations were calculated to determine the best combinations of parameters. The size deviations of PLA parts were smaller compared to PETG, printing nozzle size of 0.4 mm and a printing speed of 30 mm/s produced the best results, fill degree of 90% was found to be optimal for reducing deviations.

Keywords: FDM 3D printing, printing parameters, 3D printing process

Cuvinte cheie: printare 3D FDM, parametrii de printare, proces de printare 3D

1. Considerații generale

Imprimarea 3D, cunoscută și sub denumirea de fabricare aditivă, reprezintă un proces de creare a obiectelor tridimensionale prin adăugarea succesivă de straturi de material [12]. Această tehnologie a fost inițial dezvoltată în anii 1980, iar primul brevet pentru tehnica Stereolitografiei (SLA) a fost obținut de Charles Hull în 1986. De atunci, tehnologia a evoluat rapid, cu noi metode de imprimare 3D, cum ar fi Fused Deposition Modeling (FDM) și Selective Laser Sintering (SLS) [4], care au extins aplicabilitatea în diverse domenii [3]. În prezent, imprimarea 3D este utilizată pe scară largă în industrie, medicină, arhitectură și chiar în educație, datorită capacității sale de a produce prototipuri și piese funcționale într-un timp scurt și cu costuri reduse.

Un aspect esențial al imprimării 3D este flexibilitatea în alegerea materialelor, de la polimeri și metale până la materiale compozite și biomateriale. Prin controlul parametrilor de imprimare, cum ar fi temperatura, viteza de imprimare, gradul de umplere [6] și grosimea stratului, este posibilă optimizarea proprietăților mecanice și dimensionale ale pieselor. Această tehnologie permite fabricarea de obiecte complexe, care ar fi dificil sau imposibil de realizat prin metode tradiționale. Potrivit cercetătorilor, imprimarea 3D a revoluționat procesele de prototipare rapidă, permițând dezvoltarea produselor într-un mod mult mai eficient și economic decât metodele convenționale [2].

Imprimarea 3D este un proces de fabricație aditivă [8], în care obiectele tridimensionale sunt construite strat cu strat pornind de la un model digital. Spre deosebire de metodele de fabricație tradiționale, care implică îndepărtarea materialului pentru a obține forma finală (cum ar fi tăierea, frezarea sau turnarea), imprimarea 3D adaugă materialul strat cu strat, ceea ce reduce semnificativ risipa de material și permite crearea unor geometrii complexe.

Procesul de imprimare 3D începe cu crearea unui model digital 3D, care este realizat într-un software CAD (Computer-Aided Design) sau prin scanare 3D. Odată ce modelul 3D este creat și exportat într-un format corespunzător, acesta este procesat de un software de slicing. Slicing-ul este procesul prin care modelul tridimensional este împărțit în sute sau mii de straturi subțiri, fiecare strat având o grosime specifică (de obicei între 0,1 mm și 0,3 mm, în funcție de setările imprimantei) [10]. Acest proces este esențial pentru imprimare, deoarece determină modul în care imprimanta va construi obiectul strat cu strat. În funcție de tipul imprimantei 3D și de materialul utilizat, software-ul de slicing poate

optimiza parametri precum viteza de imprimare, temperatura de extrudare și grosimea stratului [11].

În tehnologia Fused Deposition Modeling (FDM), care este una dintre cele mai utilizate tehnologii de imprimare 3D, un filament de plastic (de tip PLA, ABS sau PETG) este topit într-un extruder și depus strat cu strat pe o platformă de construcție.

Scopul acestei lucrări este de a studia influența unor parametri cum ar fi viteza de printare, temperatura, gradul de umplere, tipul de material [7], diametrul duzei de extrudare asupra preciziei dimensionale ale pieselor rezultate, în acest caz precizia dimensională a suprafețelor circulare, respectiv a găurilor generate de imprimanta 3D.

2. Metode și instrumentele folosite

Pentru efectuarea măsurătorilor experimentale, în prima fază a fost modelată în programul SolidWorks piesa din figura 1, fiind definită de dimensiunile de gabarit 200x100x1,77 mm. Pe piesă sunt generate 11 orificii, cu diametrele nominale care variază între 2,5 și 100 mm.

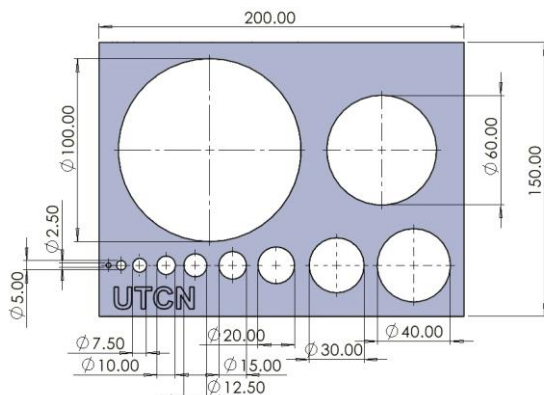


Fig. 1 Schița piesei cu dimensiunile prevăzute.

Modelul 3D al piesei, salvat în format STL (Standard Tessellation Language) a fost ulterior încărcat în programul Cura, utilizat pentru procesul de feliere în vederea generării codului necesar imprimării 3D. În Cura, au fost setați parametrii de imprimare specifici pentru fiecare piesă, inclusiv dimensiunea duzei, temperatura de imprimare, viteza de imprimare, și gradul de umplere. Aceste setări au fost optimizate în funcție de tipul materialului (PLA sau PETG). Cura a generat estimări ale

timpului de imprimare și a permis ajustarea stratificării pentru a obține calitatea optimă a suprafeței pieselor.

Pentru imprimarea pieselor a fost utilizată imprimanta 3D Creality Ender 3 V2 Neo (Fig. 2.) care are tehnologia de imprimare FDM, cu un volum de lucru 220x220x250 mm, are rezoluția stratului depus de 0.1 – 0.4 mm, temperatura maximă de lucru a capului de extrudare 260 grade Celsius, permite folosirea mai multor tipuri de materiale de imprimare (PLA, PETG, ABS etc.), are viteza de imprimare setabilă in intervalul 30-100 mm/s, fiind dotată cu platformă magnetică încălzită [5].

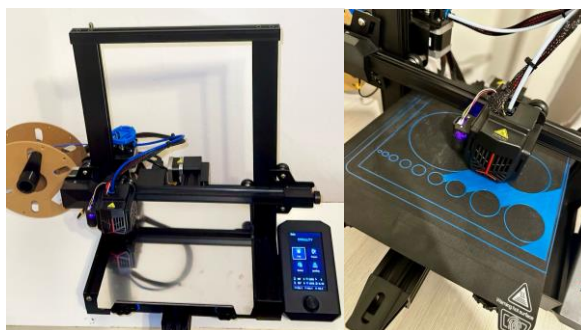


Fig. 2 Imprimanta 3D Creality Ender 3 V2 Neo.

În cadrul acestui studiu, RSM Design Expert a fost utilizat pentru optimizarea parametrilor de imprimare (Tabel 1), cum ar fi tipul de material (PLA sau PETG), dimensiunea duzei (0,4 mm, 0,8 mm, 1 mm), viteza de imprimare (30 mm/s, 60 mm/s, 100 mm/s), temperatura de imprimare (190°C, 220°C, 260°C) și gradul de umplere (10%, 50%, 90%).

Tabel 1

Variabilele și nivelurile utilizate pentru optimizarea parametrilor de imprimare in cadrul studiului

	Name	Units	Type	Levels	L[1]	L[2]	L[3]
A [Categoriq]	Material	-	Nominal	2	PLA	PET-G	
B [Categoriq]	Duză de printare	mm	Nominal	3	0,4	0,8	1
C [Categoriq]	Viteza de printare	mm/s	Nominal	3	30	60	100
D [Categoriq]	Temperatură de printare	Grade celsius	Nominal	3	190	220	260
E [Categoriq]	Gradul de umplere	%	Nominal	3	10	50	90

Software-ul a fost utilizat pentru a introduce acești factori și niveluri în diferite combinații experimentale, permițând identificarea influenței fiecărui parametru asupra rezultatului final și determinarea setărilor optime pentru fiecare piesă. În urma analizei, RSM Design Expert a generat recomandări precise pentru optimizarea fiecărui parametru,

reducând astfel erorile de imprimare și îmbunătățind calitatea pieselor imprimate.

Ca urmare a introducerii variabilelor în programul RSM Design Expert, aceasta a generat 89 variante posibile combinații de parametrii.

Materialul de printare ales a fost PLA (Polylactic Acid) și PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-modified) [9]. PLA a fost ales pentru acest experiment datorită ușurinței de utilizare, a biodegradabilității și a stabilității sale termice. PLA este un material ușor de imprimat, care se topește la temperaturi relativ scăzute (aproximativ 190-220°C) și care nu necesită o platformă de imprimare încălzită. În plus, PLA are o contracție minimă în timpul răcirii, ceea ce îl face ideal pentru piese care necesită o precizie ridicată și toleranțe stricte. PETG a fost inclus în acest studiu datorită rezistenței sale superioare și a durabilității în comparație cu PLA. PETG combină avantajele oferite de PLA (ușurința de imprimare) cu o durabilitate mecanică mai mare, fiind rezistent la impact și flexibil. În plus, PETG are o rezistență termică mai ridicată și este rezistent la substanțe chimice, ceea ce îl face potrivit pentru piese funcționale în aplicații care necesită stabilitate la temperaturi ridicate (aproximativ 230-260°C) [1]. Cu toate acestea, PETG prezintă unele provocări legate de contractarea materialului în timpul răcirii, ceea ce poate duce la abateri dimensionale mai mari.

Ca urmare fiecare variantă propusă de combinații de parametrii a fost printată de două ori, rezultând în total 76 de piese printate (Fig.3.), se menționează că piesele cu combinațiile de parametrii cu temperatură sub 190 grade Celsius pentru materialul PETG nu au fost posibile de imprimat.

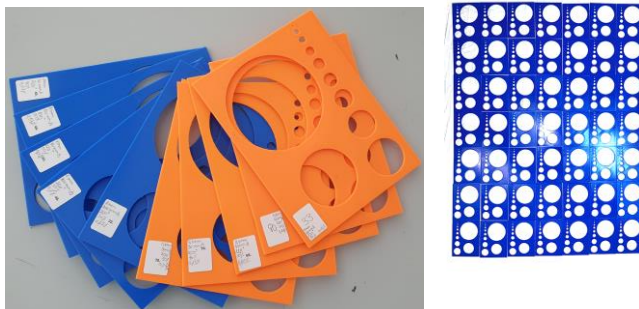


Fig.3 Piese imprimate 3D cu diferite combinații de regimuri de printare.

După imprimarea pieselor, fiecare orificiu circular a fost măsurat folosind șublerul digital. Dimensiunile nominale (cele specificate în fișierul CAD) au fost comparate cu dimensiunile reale (cele măsurate după imprimare) pentru a determina deviația dimensională.

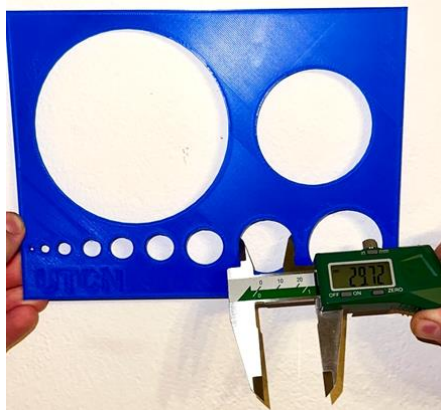


Fig.4. Măsurarea dimensiunilor efective ale orificiilor de pe piesele imprimare 3D

Pentru a cuantifica precizia pieselor, a fost calculată cu (relația 1) abaterea dimensională în milimetri și, de asemenea, deviația procentuală (relația 2), care arată cât de mult se abate dimensiunea reală față de dimensiunea nominală, exprimată ca procent.

$$Abaterea\ dimensională_{(mm)} = D_{nominal} - D_{real} \quad (1)$$

$$Abaterea\ procentuală = \frac{(D_{nominal} - D_{real})}{D_{nominal}} \times 100 \quad (2)$$

Eroarea procentuală este extrem de utilă în evaluarea performanței imprimantei 3D, deoarece permite analizarea abaterilor în mod relativ, indiferent de dimensiunea piesei. Acest lucru este esențial, deoarece o abatere de 0,2 mm poate fi nesemnificativă pentru o piesă mare (cum ar fi una cu un diametru nominal de 100 mm), dar poate fi considerabilă pentru o piesă mică (cum ar fi una cu un diametru de 2 mm).

Calculul au fost efectuate pentru fiecare piesă și fiecare combinație de factori, permițându-ne să evaluăm modul în care fiecare parametru de imprimare influențează precizia pieselor.

3. Rezultatele obținute și discuții

Abaterea procentuală medie funcție de dimensiunile orificiilor, respectiv material sunt prezentate în tabelul 2.

Tabel 2

Abaterile medii procentuale funcție de dimensiunea orificiilor și material

Dimensiunea nominală (mm)	Dimensiunea reală (mm)	Material	Abatere procentuală (%)
100	99,8	PLA	0,2%
60	59,7	PETG	0,5%
30	29,5	PLA	1,67%
20	19,8	PETG	1,0%

Pentru orificii cu dimensiuni mari (de exemplu, 100 mm și 60 mm) au fost determinate abateri procentuale mici, sub 0,5%, mai ales atunci când s-au folosit duze mici și viteze moderate de imprimare. Acest lucru este valabil mai ales pentru PLA, care tinde să aibă o contractare mai mică în timpul răcirii. În cazul orificiilor cu diametre mai mici (20 mm sau mai puțin), abaterile procentuale au fost mai mari, mai ales în cazul PETG, unde abaterile au ajuns la 1% sau mai mult. Aceste abateri sunt explicate prin contractarea mai pronunțată a PETG la temperaturi ridicate și prin necesitatea de a ajusta mai atent dimensiunile nominale în CAD. Un parametru important urmărit a fost și timpul de imprimare (Tabel 3) funcție de tipul de material, respectiv dimensiunea duzei de extrudare, corelat și cu viteza de imprimare. Timpul de imprimare variază semnificativ în funcție de dimensiunea duzei și de materialul utilizat. PETG, datorită necesității unor temperaturi și viteze de imprimare diferite, a avut în general timpi de imprimare mai lungi decât PLA, în special la dimensiuni mai mici ale duzei.

Tabel 3

Timpul de imprimare funcție de material, dimensiunea duzei și viteza de imprimare

Material	Dimensiunea duzei	Timp de imprimare (ore)	Viteză de imprimare (mm/s)
PLA	0,4 mm	3	30
PLA	0,8 mm	2,5	60
PETG	0,4 mm	4	30
PETG	0,8 mm	4,5	60

Influența diferitelor parametri asupra abaterii procentuale, rezultate în urma analizei cu ajutorul programului RSM Design Expert sunt afișate în figurile următoare.

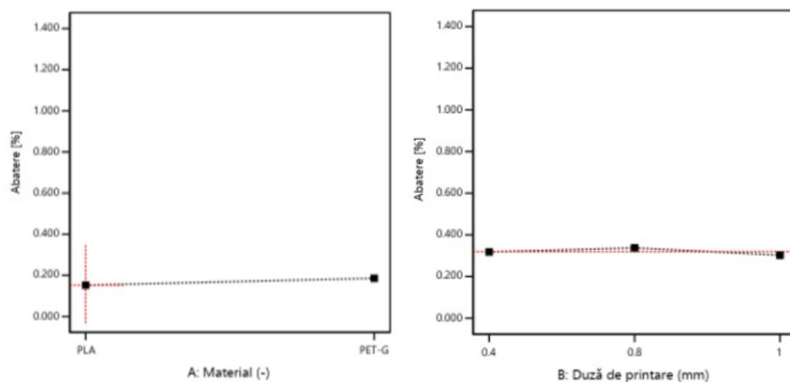


Fig.5. Variația abaterii procentuale funcție de tipul de material și dimensiunea duzei de extrudare.

Din punct de vedere al tipului de material utilizat, abaterea procentuală determinată este mai mică în cazul PLA comparativ cu PETG (Fig.5).

Funcție de dimensiunea duzei (0,4 mm, 0,8 mm, 1 mm), abaterea este cea mai mică atunci când se utilizează o duză de 0,4 mm, ceea ce indică o precizie mai mare a imprimării la detalii fine (Fig. 5). Pe măsură ce dimensiunea duzei crește, abaterea devine mai vizibilă. Duzele de 0,4 mm oferă cea mai bună precizie, dar compromit timpul de imprimare. Acestea sunt recomandate pentru piese mici și detalii fine, unde precizia dimensională este esențială. Abaterile medii pentru găuri circulare mari au fost sub 0,5% la utilizarea acestei dimensiuni a duzei. Duzele de 1 mm sunt eficiente pentru piese mari și prototipuri rapide, dar generează abateri mai mari, în special la dimensiuni mici, din cauza stratului mai gros de material depus. Acestea sunt potrivite pentru aplicații care nu necesită o precizie ridicată, reducând semnificativ timpul de imprimare.

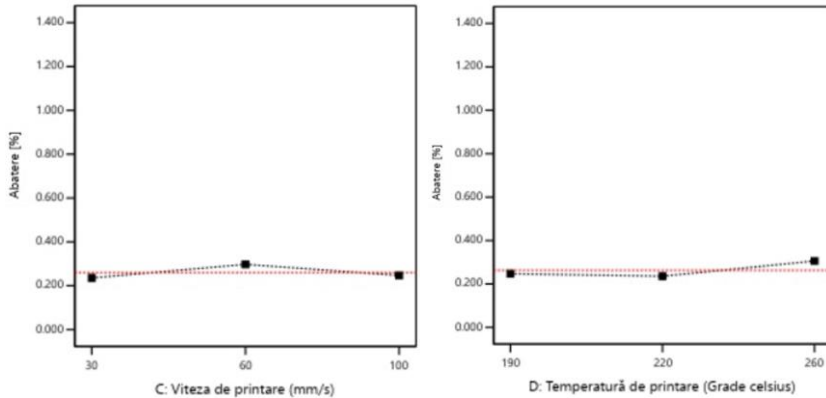


Fig.6 Variația abaterii procentuale funcție de viteza și temperatura de printare.

Viteza de imprimare de 30 mm/s a oferit cea mai mare precizie (Fig. 6), permițând imprimantei să depună materialul în mod controlat. La această viteză, abaterile au fost sub 1% pentru dimensiuni mari și medii. Viteza de 100 mm/s este utilă pentru aplicațiile care necesită un timp de imprimare scurt, dar vine cu o pierdere de precizie. Această setare este mai puțin recomandată pentru găurile circulare mici, unde abaterile au depășit 0,5%.

Materialul PLA a oferit cea mai mare precizie la temperaturi de 190°C și 220°C (Fig. 6). La aceste temperaturi, contractarea materialului a fost minimă, iar piesele au rămas stabile dimensional, cu abateri sub 1% pentru majoritatea dimensiunilor. Materialul PETG a înregistrat abateri mai mari la temperaturi ridicate (260°C), în special la dimensiuni mici. În aceste condiții, contractarea și deformarea pieselor au fost mai pronunțate, conducând la abateri de până la 0,8% pentru dimensiuni mari.

Un grad de umplere de 90% este recomandat pentru aplicații care cer rigiditate și precizie dimensională. Piesele cu umplere ridicată au prezentat cele mai mici abateri (Fig. 7), mai ales la dimensiuni mari și medii, cu abateri sub 0,5 %. Umplerea de 10% este potrivită pentru piese decorative sau pentru prototipuri rapide, dar compromite precizia și stabilitatea dimensională. Chiar dacă abaterile au rămas sub 1%, stabilitatea pieselor a fost mai redusă comparativ cu piesele imprimate cu un grad de umplere mai mare.

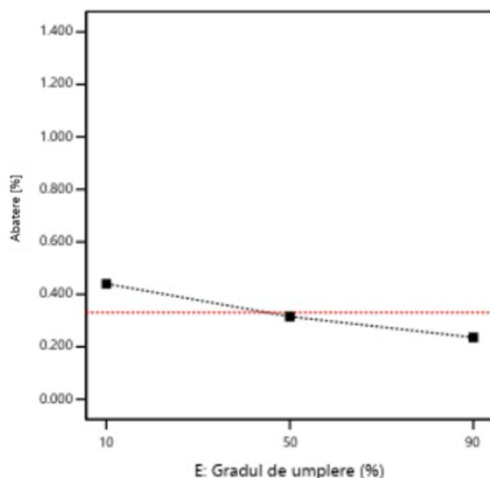


Fig. 7 Variația abaterii procentuale funcție de gradul de umplere.

Combi-națiile de parametri care au compromis cel mai mult precizia au fost cele care au implicat materialul PETG, duza de 1 mm, viteza de printare 100 m/s și gradul de umplere de 10%, această combinație a generat o abatere procentuală medie de 2% pentru orificiile cu dimensiunile mari, și de peste 5% pentru orificiile cu dimensiunile mici.

4. Concluzii

Studiul evidențiază rolul esențial al optimizării parametrilor de imprimare 3D în obținerea unor piese geometrice cu precizie dimensională ridicată, utilizând materiale precum PLA și PETG. Materialul PLA a oferit cea mai mare precizie la dimensiuni mari și medii ale orificiilor. Cele mai bune rezultate au fost obținute cu duza de extrudare de 0,4 mm. Viteza de printare mică oferă precizie bună și detalii fine ale suprafețelor, dar se mărește semnificativ timpul de imprimare. Piesele cu un grad de umplere de 90% au avut o stabilitate dimensională mai bună, mai ales la dimensiuni mari. În schimb, piesele cu umplere redusă (10%) au fost mai susceptibile la deformări și contractări, având abateri procentuale semnificative, mai ales în cazul PETG.

Pentru a obține rezultate optime în imprimarea 3D, se recomandă compensarea în CAD pentru materialele care se contractă, precum PETG. Ajustarea dimensiunilor nominale înainte de imprimare

poate reduce abaterile și poate îmbunătăți precizia pieselor finale. Alegerea dimensiunii duzei în funcție de detalii. Duzele mici (0,4 mm) oferă cea mai bună precizie pentru detalii fine și piese mici, dar pentru piese mari, duzele de 0,8 mm sau 1 mm pot reduce timpul de imprimare, cu un compromis asupra preciziei. Setarea vitezei de imprimare în funcție de cerințele piesei. Piese mici și complexe necesită viteze mai mici pentru a obține o aderență uniformă între straturi și pentru a minimiza deformările. În schimb, viteze mai mari sunt acceptabile pentru piesele mari, unde toleranțele largi sunt suficiente.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Anderson P., Green R., The Effects of Moisture Absorption on PLA and PETG Filament Used in 3D Printing. *International Journal of Polymer Science*, Vol. 10(3), 2018.
- [2] Berman B., 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, Vol. 55(2), 2012.
- [3] Gibson I., Rosen D.W., Stucker B., *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing.*, Springer, 2015.
- [4] Hull C.W., Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. U.S. Patent, 1986.
- [5] Issal A., Ender 3 (V2/Pro) Calibration: 5 Simple Steps. *All3DP.*, 2023.
- [6] Jatti V.S., Shah K.A., Ambade V., Effect of infill density, infill pattern and extrusion temperature on mechanical properties of part produced by 3D printing FDM technology using ABS, PLA, and PETG filament: A critical review. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019.
- [7] Johnson K., Miller D., The Influence of Material Batch Variations on Dimensional Accuracy in FDM 3D Printing. *Journal of Manufacturing Science*, Vol. 22(4), 2019.
- [8] Lipson H., Kurman M., *Fabricated: The New World of 3D Printing*. John Wiley & Sons., 2013.
- [9] Shabbir A., PLA vs PETG: Differences and Which Is Stronger? 2021.
- [10] Smith J. Taylor A., The Role of Layer Thickness in FDM 3D Printing: Balancing Quality and Durability. *Journal of Additive Manufacturing*, Vol. 15(2), 2020.
- [11] Walker L., Edwards B., Layer Thickness and Mechanical Properties in FDM 3D Printing: A Comparative Study of PLA and PETG. *Engineering Materials Journal*, Vol. 15(2), 2017.
- [12] Wohlers T., *Wohlers Report 2020: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates., 2020.

Ing. Alexandru-Florin MUNTEAN
Facultatea de Autovehicule Rutiere, Mecatronică și Mecanică,
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

St.Dr.Ing. Ferenc GASPAR*
Departamentul de Autovehicule Rutiere și Transporturi,
Facultatea de Autovehicule Rutiere, Mecatronică și Mecanică,
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Ferenc.gaspar@auto.utcluj.ro