

Sprejeto

1. 11. 2025

Recenzirano

27. 11. 2025

Izdano

28. 11. 2025

**MODELIRANJE TOPOGRAFSKIH LASTNOSTI 3D
TISKANIH KOVINSKIH MATERIALOV**

MATEJ BABIČ

Fakulteta za informacijske študije, Novo mesto, Slovenija

matej.babic83@gmail.com

DOPISNI AVTOR

matej.babic83@gmail.com

Znanstvena veda:

Matematika

Ključne besede:aditivna proizvodnja,
selektivno lasersko
taljenje,
hrapavost površine,
fraktalna geometrija,
teorija omrežij,
genetsko programiranje

Ta raziskava predstavlja prelomno metodo, ki združuje fraktale, teorijo omrežij in genetsko programiranje, z analizo topografije površine kovinskih aditivnih delov. Natančneje, osredotočena je na selektivno lasersko taljenje maragingnega jekla EOS MS1, obdelanega s 3D-tiskalnikom EOS M 290. Ugotovitve kažejo na znatno izboljšanje natančnosti karakterizacije hrapavosti površine pri uporabi genetskega programiranja. Uporaba fraktalne geometrije in strojnega učenja je izboljšala naše razumevanje kompleksnosti selektivnega laserskega taljenja površin. Ta študija ne le prispeva k področju aditivne proizvodnje s ponujanjem učinkovitejšega in natančnejšega pristopa k nadzoru kakovosti, temveč tudi postavlja temelje za prihodnja raziskovanja drugih materialov in izpopolnjevanje analitičnih tehnik. Potencial te metode pri podpori praks 3D-tiskanja kovin je precejšen, kar kaže na obetavno prihodnost za industrijo tako v smislu inovacij kot uporabe.



<https://doi.org/10.18690/analipazu.15.1-2.43-53.2025>
Besedilo © Babič, 2025



MODELING THE TOPOGRAPHIC PROPERTIES OF 3D PRINTED METAL MATERIALS

MATEJ BABIČ

Faculty of Information Studies, Novo mesto, Slovenia
matej.babic83@gmail.com

CORRESPONDING AUTHOR
matej.babic83@gmail.com

Accepted
1. 11. 2025

Revised
27. 11. 2025

Published
28. 11. 2025

This research presents a groundbreaking method that combines fractals, network theory, and genetic programming to analyze the surface topography of metal additive parts. Specifically, it focuses on the selective laser melting of EOS M1 maraging steel processed with the EOS M 290 3D printer. The findings show a significant improvement in the accuracy of surface roughness characterization using genetic programming. The use of fractal geometry and machine learning has improved our understanding of the complexity of selective laser melting of surfaces. This study not only contributes to the field of additive manufacturing by offering a more efficient and accurate approach to quality control, but also lays the foundation for future research into other materials and the refinement of analytical techniques. The potential of this method in supporting metal 3D printing practices is considerable, indicating a promising future for the industry in terms of both innovation and application.

Science:
Mathematics

Keywords:

senzor additive
manufacturing,
selective laser melting,
surface roughness,
fractal geometry,
network theory,
genetic programming

1 Uvod

Aditivna proizvodnja (AM) je, pogosto [1] znana kot 3D-tiskanje [2], tehnologija, ki lahko z uporabo digitalnih modelov, ki jih zajame računalnik ali 3D-skener, ustvari karkoli. Medtem ko 3D-tiskanje uporablja aditivne tehnike, ki za gradnjo plasti materiala uporabljajo kemikalije, svetlobo, elektronske žarke ali lepilo, tradicionalna proizvodnja pogosto uporablja subtraktivne postopke, kot so rezanje, vrtanje, rezkanje in brušenje. Vpliv 3D-tiskanja na proizvajalce, potrošnike in lastnike pravic intelektualne lastnine je ogromen in radikalno spreminja ustaljene tehnologije in industrijska načela. Čeprav ta tehnologija proizvajalcem omogoča hitro izdelavo prototipov kompleksnih idej in izdelavo končnih delov z uporabo drastično raznolikih tehnik, omogoča tudi vsakomur, da replicira obstoječe zasnove izdelkov ter jih proizvaja, uporablja in distribuira brez soglasja prvotnega ustvarjalca. Podjetja, ki konstruirajo in uporabljajo 3D-tiskalnike v tem okolju aditivne proizvodnje, se soočajo z novimi izzivi glede svojih avtorskih pravic, poslovnih skrivnosti, trgovske podobe, patentov in blagovnih znamk. Ta tehnologija vpliva na skoraj vse imetnike pravic do oblikovanja izdelkov in potrebuje smernice pri presoji intelektualne lastnine. Za ustvarjanje tridimenzionalnega predmeta je 3D-tiskanje postopek, pri katerem računalnik določi obliko tankega prereza z uporabo tridimenzionalnih (3D) CAD podatkov. Materiali se nato nanašajo v plasteh glede na ugotovitve izračuna. Zaradi dostopnosti poceni modelov za posameznike, postaja tehnologija aditivne proizvodnje vse bolj priljubljena in pravijo »celo posamezniki lahko postanejo proizvajalci«.

Ena najbolj zapletenih in izjemnih tehnologij, ki so na voljo pri hitri izdelavi prototipov, je selektivno lasersko taljenje [3]. Za izdelavo vložkov, modelov in zapletenih vzorcev, ki jih ni mogoče izdelati s tradicionalnimi tehnikami, so bili uporabljeni le podatki CAD. 3D-aktivacija vam zagotavlja jeklo iz SS420 in 1.4404 (L 316) ter kovine: baker, bron, medenino in aluminij za postopek 3D-tiskanja SLM. V letalskem sektorju so 3D-modeli iz aluminija še posebej iskani za prototipe zaradi njihove odpornosti na mehanske in dinamične obremenitve. Pri 3D-aktivaciji se uporablja zlitina, ki vsebuje 89,5 % aluminija, 10 % silicija in 0,5 % magnezija. Nasprotno pa je tiskanje nakita glavna uporaba bakra, brona in medenine. Izjemne oblike teh kovin cenijo oblikovalci in umetniki, tehnologija 3D-tiskanja pa omogoča ustvarjanje nežnih oblik, ki jih s tradicionalnimi proizvodnimi tehnikami ni mogoče doseči. Tako SS420 kot 1.4404 (L 316), posebni jekleni zlitini, sta znani po tem, da

ne rjavita. SS420 je znan tudi po svoji močni toplotni odpornosti, medtem ko 1.4404 (L 316) izstopa po odlični odpornosti proti koroziji in visoki duktilnosti. Komponente iz titana (Ti64), izdelane s tehniko SLM, izpolnjujejo standarde ASTM F1472, ASTM B348 in ISO 5832-3 [4,5,6] glede kemične sestave. 3D material Ti64 se zaradi strogih fizikalnih in kemičnih zahtev, ki so mu naložene, večinoma uporablja v industrijskih aplikacijah. Titan postaja vse bolj priljubljen. Izjemna odpornost proti koroziji in nizka teža titana sta še posebej cenjeni v letalih, njegova biokompatibilnost pa ga dela idealnega za medicinske tehnologije. Z natančnostjo 0,5 mm zlitina Ti64, ki se uporablja pri 3D aktivaciji, omogoča debeline sten do 0,3 mm. Filigranske oblike je mogoče ustvariti z enako lahkoto kot zapletene strukture in geometrije, zahvaljujoč selektivnemu postopku laserskega strižnega taljenja pri 3D-tiskanju, ki omogoča tudi spodreze in votline. 3D-tiskanje kovin odpira nove možnosti v proizvodnji kovin. 3D-tiskanje s SLM omogoča tudi potencial za proizvodni postopek brez orodja. 3D-tiskanje kovin omogoča ustvarjanje zelo kakovostnih modelov za razstavljanje zaradi obsežnih prostorov za namestitve, ki jih lahko zagotovi 3D-aktivacija.

Lubja dreves ni mogoče opisati kot gladkega, oblakov ni mogoče opisati kot krogel, gora ni mogoče opisati kot stožcev, obalnih črt ni mogoče predstaviti s krogi in strele ne morejo slediti ravni poti. Na splošno pravim, da so številne naravne oblike tako neenakomerne in razdrobljene, da narava kaže le višjo stopnjo kompleksnosti – ne povsem drugačno raven – kot evklidske figure. Za vsak praktičen problem lahko količinsko različne dolžinske lestvice v naravnih oblikah obravnavamo kot neomejene. Takšni pojavi nam predstavljajo izzive in nas motivirajo k dodatnim poglobljenim raziskavam. Matematiki so to težavo prezrli in so se namesto tega odločili ustvariti nešteto teorij, ki sploh ne pojasnjujejo stvari, ki jih zaznavamo ali doživljamo. Tvegal sem, da sem se spopadel z izzivom in ustvaril novo geometrijo narave, ki ima uporabo na širokem področju. Nova geometrija opredeljuje družino figur, ki jih imenujem fraktali in je sposobna prikazati številne asimetrične in razdrobljene vzorce v svetu okoli nas. Lahko pa privede tudi do popolnoma razvitih teorij.

Grafi ali omrežja [7] so pomembno matematično orodje, ki omogoča modeliranje in analizo različnih sistemov in odnosov med objekti. Graf je abstraktna matematična struktura, ki je sestavljena iz množice vozlišč (verig) in robov (povezav) med temi vozlišči. Grafi se pogosto uporabljajo za modeliranje in analizo različnih sistemov in

odnosov. V grafu vsako vozlišče predstavlja posamezen element ali objekt, robovi pa povezave ali odnose med temi elementi. Na primer, v grafu družbenih povezav lahko vsako vozlišče predstavlja posameznika, robovi pa prijateljstvo ali poznanstvo med ljudmi. Grafi so pomembno orodje v teoriji grafov in imajo širok spekter uporabe na različnih področjih, kot so računalništvo, transportna logistika, družbena omrežja, biologija, znanost o materialih in druga.

Računalnik lahko skenira ogromne količine podatkov, prepozna vzorce, skrite v podatkih, in razvije pravila za ocenjevanje neznanih podatkov, zahvaljujoč tehnologiji, imenovani strojno učenje. V zadnjih letih je pridobila na priljubljenosti kot tehnologija, ki se pozicionira kot komponenta »umetne inteligence«. Trenutno ta tehnologija začne vplivati na številne discipline, vključno z biologijo, avtonomno vožnjo, obdelavo slik in finančnim inženiringom. Strojno učenje je sistem, v katerem računalnik prejme ogromne količine podatkov in jih analizira na podlagi različnih algoritmov. Z večkratnim učenjem računalnika je mogoče najti skrite značilnosti in vzorce v podatkih. Algoritmi, ki se tukaj uporabljajo, se razlikujejo glede na značilnosti in namen podatkov, ki se vnašajo v računalnik, zato je treba pripraviti algoritme, ki so primerni za vsak namen.

Cilj te študije je predstaviti modeliranje topografskih lastnosti 3D selektivnega laserskega tiskanja kovinskih materialov z uporabo metode inteligentnega sistema.

2 Priprava materiala in eksperimentalno delo, metodologija in modeliranje

Tukaj je bil uporabljen stroj EOS M 290 SLM (slika 1). Široka paleta uporabnih materialov, obsežen nadzorni sistem in enostavna integracija v proizvodne korake, naredijo ta stroj jasno izbiro za prilagodljivo serijsko proizvodnjo kovinskih delov.



Slika 1: EOS M 290 SLM

Kot osnovni material uporabljamo EOS Maraging Steel MS1. To je orodni jekleni prah, namenjen za obdelavo na sistemih EOS DMLSTM. Deli, izdelani iz EOS Maraging Steel MS1, imajo kemično sestavo, ki ustreza ameriški klasifikaciji 18 % Ni Maraging 300, evropski 1.2709 in nemški X3NiCoMoTi 18-9-5. Za to vrsto jekla so značilne zelo dobre mehanske lastnosti in enostavna toplotna obdelava z uporabo preprostega termičnega postopka staranja za doseganje odlične trdote in trdnosti. Deli, izdelani iz EOS Maraging Steel MS1, so po postopku izdelave enostavno strojno obdelani in jih je mogoče enostavno naknadno utrditi na več kot 50 HRC s staranjem pri 490 °C 6 ur. Tako v izdelanem kot v staranem stanju je mogoče dele strojno obdelovati, erodirati z iskro, variti, polirati in po potrebi premazati. Zaradi metode plastne gradnje imajo deli določeno anizotropijo, ki jo je mogoče zmanjšati ali odstraniti z ustrezno toplotno obdelavo – npr. z raztapljanjem pri 940 °C 2 uri. Izdelali smo 20 kockastih vzorcev dolžine 10 mm.

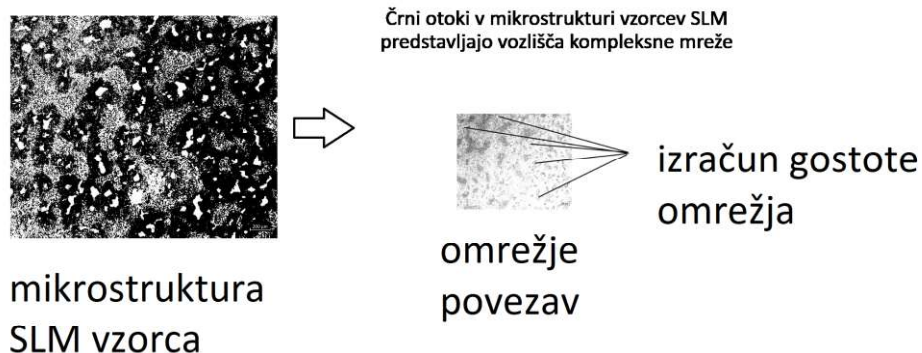
Ker je mikrostruktura SLM vzorcev zelo kompleksna in je ne moremo opisati s klasično Evklidsko geometrijo, smo uporabili fraktalno geometrijo za opis kompleksnosti vzorcev mikrostrukture, in sicer izračunali smo fraktalno dimenzijo z box-counting metodo. Box-counting metoda zbiranja podatkov za analizo kompleksnih vzorcev z razdelitvijo nabora podatkov, predmeta, slike itd. na vedno manjše dele, običajno v obliki "škatile", in analizo delov v vsakem manjšem merilu. Z metodo Box-counting je fraktalna dimenzija naklon premice, ko na osi y narišemo

vrednost $\log(N)$ glede na vrednost $\log(r)$ na osi x. Ista enačba se uporablja za definiranje fraktalne dimenzije, D . Tokrat je N število kvadratkov, ki pokrivajo vzorec, r pa je povečava oziroma obratna vrednost velikosti kvadrata.

$$D = \frac{\log N}{\log r}$$

Zanima nas kako geometrija vzorcev (fraktalna dimenzija) vpliva na hrapavost SLM vzorcev.

Teorijo omrežij smo uporabili za analizo vzorcev mikrostrukture. Izračunali smo gostoto omrežja mikrostrukture SLM vzorcev. Slika 2 predstavlja uporabo teorije omrežij za analizo vzorcev mikrostrukture SLM vzorcev. Črni otočki v mikrostrukturi predstavljajo vozlišča kompleksne mreže oz. omrežja. Te točke povežemo s sosedi in dobimo omrežje. Potem izračunamo gostoto D omrežja, ki je definirana kot normalizirano razmerje med 0 in 1 števila robov E in številom možnih robov v omrežju z N vozlišči.



Slika 2: Uporaba teorija omrežij za analizo vzorcev mikrostrukture SLM vzorcev

Za merjenje hrapavosti smo uporabili profilomer. Hrapavost R_a je izračunano povprečje med vrhovi in dolinami na površini SLM vzorcev. Gre za linijske profile po x in y osi.

Za modeliranje hrapavosti površine 3D SLM materialov uporabljamo metode inteligentnih sistemov, in sicer: genetsko programiranje in nevronske mreže. Inteligentni sistemi so zasnovani tako, da so prilagodljivi in rešujejo probleme čim bolj ustvarjalno z minimalnim človeškim vnosom. Najprej sistem prepozna in definira problem. Inženiring inteligentnih sistemov (ISE) je splošen izraz, ki se uporablja za različne pristope umetne inteligence, vključno z nevronskimi mrežami, evolucijskimi algoritmi, napovedovanjem in krmiljenjem na podlagi modelov, diagnostičnimi sistemi na podlagi primerov, konvencionalno teorijo krmiljenja in simbolno umetno inteligenco.

V umetni inteligenci je genetsko programiranje (GP) [8] samodejno ustvarjanje ali spreminjanje programov z uporabo genetskih algoritmov. Z uporabo te metodologije se »gojijo« programi, ki vedno bolje rešujejo dani računski problem (v skladu z določeno funkcijo primernosti za kromosome). V genetskem programiranju posamezniki v populaciji predstavljajo programe. Te programe je priročno predstaviti kot drevesa, kjer so funkcije predstavljene z notranjimi vozlišči, na katera so kot vhodni parametri pritrjena poddrevesa. Listi takega drevesa bodo konstante, vhodni parametri nalog ali ukazi programskih direktiv. Uporabili smo program LISP.

Izraz nevronska mreža [9], ki izhaja iz raziskav delovanja možganov, se nanaša na ohlapno povezano družino modelov, za katere je značilen velik parametrični prostor in fleksibilna struktura. Z rastjo družine je bila večina novih modelov razvitih za nebiološke aplikacije, čeprav mnogi povezani izrazi odražajo njihov izvor. Nevronska mreža je masovno vzporedni porazdeljeni procesor, ki ima naravno sposobnost shranjevanja empiričnih informacij in njihovega dajanja na voljo za uporabo. Podobna je možganom na dva načina: omrežje pridobiva znanje skozi proces učenja. Za shranjevanje znanja se uporabljajo mednevronske povezave različnih jakosti, imenovane sinaptične uteži. Uporabili smo program Orange.

3 Rezultati in diskusija

Tabela 1 predstavlja parametre SLM vzorca. V prvem stolpcu označujemo vzorce z S1 do S17. Drugi stolpec predstavlja moč laserja v W, ta parameter označujemo z X1. Tretji stolpec predstavlja hitrost laserja v mm/s, ta parameter označujemo z X2. Četrti stolpec predstavlja kompleksnost SLM vzorcev, ta parameter označujemo z X3. Peti stolpec predstavlja gostoto mreže mikrostrukture laserskih SLM vzorcev, ta

parameter označujemo z X4. Gostota omrežja predstavlja črne luknjice v mikrostrukturi SLM vzorcev in ima enoto $1/\text{mm}^2$. Uporabili smo razdaljo šrafure 0,11 mm. Zadnja dva stolpca predstavljata hrapavost Rax in Ray 3D SLM kovinskih materialov, ki jo označujemo z Y. Šesti stolpec predstavlja hrapavost Rax, zadnji stolpec pa hrapavost Ray.

Tabela 1: Parametri 3D tiskanih vzorcev SLM

Specimen	Power (W)	Speed (mm/s)	FD	Density of network η ($1/\text{mm}^2$)	Ra x (μm)	Ra y (μm)
	X1	X2	X3	X4	Y	Y
S1	320	1000	1.62	0.74	6.84	6.23
S2	320	1150	1.49	0.68	6.51	5.89
S3	320	1300	1.65	0.89	5.89	5.01
S4	270	850	1.78	0.52	6.29	5.68
S5	270	1000	1.55	0.61	7.31	4.90
S6	270	1150	1.67	0.65	7.19	5.90
S7	270	1300	1.47	0.42	6.69	5.86
S8	220	700	1.83	0.78	7.14	5.63
S9	220	850	1.74	0.42	5.64	5.57
S10	220	1000	1.66	0.35	6.50	5.83
S11	220	1150	1.86	0.74	7.15	5.48
S12	220	1300	1.59	0.32	6.81	6.96
S13	170	700	1.68	0.73	5.50	5.29
S14	170	850	1.51	0.65	5.60	5.34
S15	170	1000	1.72	0.43	5.06	5.53
S16	170	1150	1.83	0.29	6.48	5.23
S17	170	1300	1.69	0.59	6.99	5.29

Tabela 2 predstavlja napoved hrapavosti Rax in Ray 3D laserskega oblaganja kovinskih materialov z GP in NN. Drugi stolpec predstavlja model genetskega programiranja za hrapavost Rax. Tretji stolpec predstavlja model genetskega programiranja za hrapavost Ray. Četrty stolpec predstavlja model nevronske mreže za hrapavost Rax. Zadnji stolpec predstavlja nevronske mrežo. Natančnost iz izmerjenih in napovedanih podatkov smo izračunali na podlagi procentualne razlike

med napovedanimi in izmerjenimi podatki, nato pa smo izračunali povprečno vrednost. Model genetskega programiranja Ray nam daje 97,6 % natančnost iz izmerjenih in napovedanih podatkov. Model genetskega programiranja Rax nam daje 98,2 % natančnost iz izmerjenih in napovedanih podatkov. Najmanjšo hrapavost Rax ima vzorec S15. Največjo hrapavost Rax ima vzorec S6. Najmanjšo hrapavost Ray ima vzorec S5. Največjo hrapavost Ray ima vzorec S12.

Tabela 2: Napoved hrapavosti Rax in Ray z GP in NN

Specimen	GP Ra x	GP Ra y	NN Ra x	NN Ra y
S1	6.81	6.23	7.31	4.90
S2	6.49	5.92	6.84	5.01
S3	5.88	5.43	6.51	5.89
S4	6.44	5.68	5.50	5.63
S5	7.25	4.89	7.19	5.86
S6	6.36	5.91	5.89	5.01
S7	6.36	5.68	7.19	5.34
S8	7.23	5.57	5.50	5.29
S9	5.59	5.74	5.60	5.30
S10	6.50	5.86	5.64	5.23
S11	7.49	5.42	6.81	6.71
S12	6.50	6.96	6.99	5.81
S13	5.67	5.30	5.60	5.35
S14	5.85	5.32	5.50	5.41
S15	4.99	5.51	6.99	5.62
S16	6.48	5.78	7.01	5.29
S17	6.91	5.34	6.48	5.23

4 Zaključek

Ta raziskava predstavlja prelomno metodo, ki združuje fraktale, teorijo omrežij in genetsko programiranje z analizo hrapavosti površine kovinskih aditivnih delov. Natančneje, osredotočena je na selektivno lasersko taljenje maragingnega jekla EOS MS1, obdelanega s 3D-tiskalnikom EOS M 290. Ugotovitve kažejo na znatno izboljšanje natančnosti karakterizacije hrapavosti površine pri uporabi genetskega programiranja. Uporaba fraktalne geometrije in strojnega učenja je izboljšala naše

razumevanje kompleksnosti selektivnega laserskega taljenja površin. Ta študija ne le prispeva k področju aditivne proizvodnje s ponujanjem učinkovitejšega in natančnejšega pristopa k nadzoru kakovosti, temveč tudi postavlja temelje za prihodnja raziskovanja drugih materialov in izpopolnjevanje analitičnih tehnik. Potencial te metode pri podpori praks 3D-tiskanja kovin je precejšen, kar kaže na obetavno prihodnost za industrijo tako v smislu inovacij kot uporabe.

Literatura

- [1] Groth, J.-H.; Magnini, M.; Tuck, C.; Clare, A. Stochastic design for additive manufacture of true biomimetic populations. *Addit. Manuf.* 2022, 55, 102739. [Google Scholar] [CrossRef]
- [2] Shahrubudin, N.; Lee, T.C.; Ramlan, R. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manuf.* 2019, 35, 1286–1296. [Google Scholar] [CrossRef]
- [3] Soni, N.; Renna, G.; Leo, P. Advancements in Metal Processing Additive Technologies: Selective Laser Melting (SLM). *Metals* 2024, 14, 1081. [Google Scholar] [CrossRef]
- [4] ASTM F1472; Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56400). ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- [5] ASTM B348; Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- [6] ISO 5832-3; Implants for Surgery—Metallic Materials. Part 3: Wrought Titanium 6-Aluminium 4-Vanadium Alloy. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2021.
- [7] Al-Taie MZ, Kadry S (2017). "Information Diffusion in Social Networks". *Python for Graph and Network Analysis. Advanced Information and Knowledge Processing*, pp. 165–184. doi:10.1007/978-3-319-53004-8_8. ISBN 978-3-319-53003-1, PMC 7123536
- [8] Kovačič, Miha, Župerl, Uroš. Continuous caster final electromagnetic stirrers position optimization using genetic programming. *Materials and manufacturing processes*. 31 May 2023, vol. 38, iss. [12], 9 str., ilustr. ISSN 1042-6914. DOI: 0.1080/10426914.2023.2219317© 2023 Taylor & Francis.
- [9] Hardesty, Larry (14 April 2017). [Explained: Neural networks](#). MIT News Office. Retrieved 2 June 2022

O avtorju*

Matej Babič je doktoriral iz računalništva na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo Univerze v Mariboru. Matematiko je študiral na Fakulteti za naravoslovje in matematiko v Mariboru. Njegovo raziskovalno področje so fraktalna geometrija, teorija grafov, inteligentni sistemi, hibridno strojno učenje, topografija materialov po utrjevanju in 3D-tiskanje. Je višji znanstveni sodelavec na Fakulteti za informacijske študije v Novem mestu.