

Kísérlettervezés 3D nyomtatott alkatrészek szilárdságtani vizsgálatához

Design of experiments for the strength testing of 3D printed parts

DEBRECENI Attila¹, dr. BODZÁS Sándor²

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Magyarország, Debrecen, Ótemető utca 2-4,
debreceni.attila@eng.unideb.hu

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Magyarország, Debrecen, Ótemető utca 2-4,
bodzassandor@eng.unideb.hu

Abstract

The mechanical properties of FDM 3D printed parts are significantly influenced by manufacturing parameters, so proper Design of Experiments (DOE) is key to effective testing. The aim of this paper is to develop a DOE-based method for selecting relevant printing parameters, varying their values and collecting the related data for strength analysis.

The paper presents the selection of specimen materials and geometries that are adapted to the requirements of standard mechanical testing and the specificities of 3D printing. The printing parameters to be tested, which have a particular impact on the strength properties of the part, are defined.

The paper will also show the data requirements of different machine learning based methods and how they influence the experimental design process. Accordingly, requirements for data processing are taken into account in the design of the experiments. This approach will ensure that the data collected will provide an adequate basis for subsequent machine learning analyses, supporting the exploration of the relationships between printing parameters and mechanical properties.

Keywords: additive manufacturing, design of experiments, machine learning, measurement data acquisition, mechanical strength

Kivonat

Az FDM 3D nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságait jelentősen befolyásolják a gyártási paraméterek, így a megfelelő kísérlettervezés (Design of Experiments, DOE) kulcsfontosságú a hatékony vizsgálatokhoz. A cikk célja egy DOE-alapú módszer kidolgozása, amely lehetővé teszi a releváns nyomtatási paraméterek kiválasztását, értékük változtatását és az ehhez kapcsolódó adatgyűjtést szilárdságtani elemzések céljából.

A tanulmányban bemutatásra kerül a próbatestek anyagának és geometriájának kiválasztása, amely igazodik a szabványos mechanikai vizsgálatok követelményeihez és a 3D nyomtatás sajátosságaihoz. Meghatározásra kerülnek a vizsgált nyomtatási paraméterek, amelyek kiemelt hatással rendelkeznek a darab szilárdsági jellemzőire.

A tanulmányban emellett bemutatja, hogy a különböző gépi tanuláson alapuló módszerek milyen adatigénnyel rendelkeznek, és ezek hogyan befolyásolják a kísérlettervezési folyamatot. Ennek megfelelően a kísérleti terv kialakítása során figyelembe kerül a későbbi adatfeldolgozás szempontjai, optimalizálva az adatpontok számát és a változók kombinációját, az adatok dimenzióját. Ez a megközelítés biztosítja, hogy a gyűjtött adatok a későbbi gépi tanulási elemzésekhez megfelelő alapot nyújtsanak, támogatva a nyomtatási paraméterek és a mechanikai tulajdonságok közötti összefüggések feltárását.

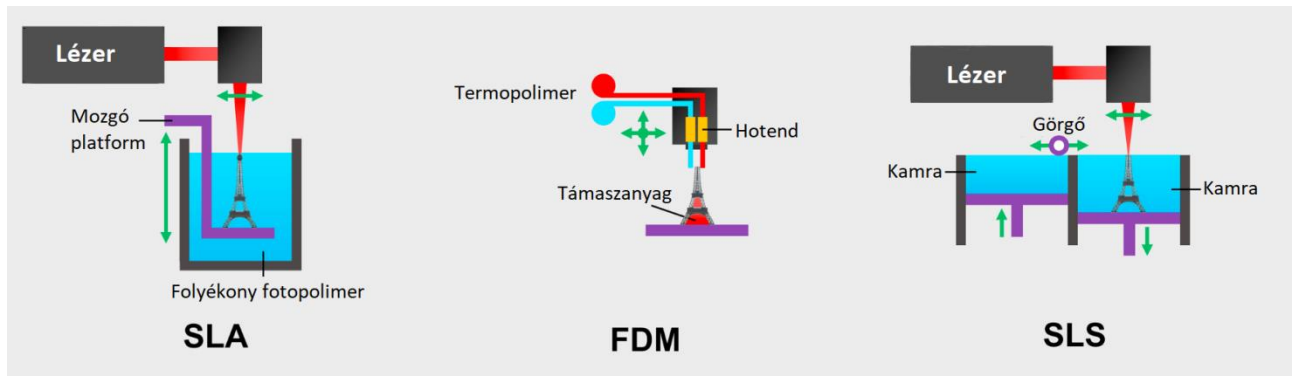
Kulcsszavak: additív gyártás, kísérlettervezés, gépi tanulás, mérési adatgyűjtés, mechanikai szilárdság

ADDITÍV GYÁRTÁS ÁTTEKINTÉSE

1.1. A 3D nyomtatás jellemzői

A 3D nyomtatás, másik megfogalmazásban az additív gyártás egy relatíve új gyártási technológia. Bár a 3D nyomtatás és az additív gyártás alapvetően ugyanarra a rétegek hozzáadásával történő gyártási eljárásra utalnak, a szakirodalomban és az ipari környezetben az additív gyártás (AM) kifejezést elsősorban a nagy teljesítményű, ipari szintű technológiákra használják, míg a 3D nyomtatás inkább a fogyasztói és kisebb léptékű alkalmazások – például prototípusgyártás vagy hobbi célú nyomtatás – kapcsán elterjedt kifejezés [1].

Az additív gyártás az 1980-as évek végén jelent meg, elsőként a sztereolitográfia (SLA) technológiával, amely UV-lézer segítségével folyékony gyantát szilárdít meg rétegenként [2, 3]. 1991-ben az FDM, SGC és LOM technológiák jelentek meg, de közülük csak az FDM terjedt el széles körben. Az FDM hőre lágyuló műanyagokat használ, amelyeket egy extruder hotend részében olvasztanak meg, majd rétegenként építik fel az alkatrészt [3, 4]. 1992-ben jelent meg a szelektív lézerszinterezés (SLS) technológia, amely nagy teljesítményű lézert alkalmaz por állagú alapanyagok, amelyek lehetnek fémek vagy műanyagok megolvasztására. Az SLS rendszer általában két kamrából áll, ahol az adagolt port egy görgő osztatja el az nyomtatási felületen, és így rétegenként építi fel az alkatrészt. Ez a három technológia (SLA, FDM, SLS) az additív gyártás meghatározó alapszereivé vált [3].



1. ábra: SLA, FDM és SLS eljárások összehasonlítása [5]

A polimerek a leggyakrabban használt anyagok az additív gyártásban. A műanyagok általánosan könnyű, egyszerűen megmunkálható anyagok. A műanyagok bár kis sűrűségűek, de mechanikai tulajdonságaik gyengébbek a fémekhez és kerámiákhoz képest [6, 7]. Ebből fakadóan felhasználhatóságuk limitált olyan esetekben, ahol fontos a jó mechanikai tulajdonságok. Szálas erősítéssel azonban ezek a tulajdonságok javíthatók, így könnyű, de erősebb kompozit anyagok hozhatók létre, amelyek lehetővé teszik a mechanikailag fejlettebb alkatrészek gyártását additív eljárásokkal. Az additív gyártásban alkalmazott szálerősített kompozitok lehetnek folytonos vagy rövid szálas erősítésűek. A folytonos szálak jobb mechanikai tulajdonságokat biztosítanak, de több anyagot igényelnek, míg a rövid szálak költségkímélőbbek. Ezen túlmenően bizonyos szálak, például a szénszálak, javíthatják az anyag elektromos és hővezető képességét, így új lehetőségeket kínálnak az elektronikai alkatrészek additív gyártására [7].

1.2. Az FDM próbatestek mechanikai tulajdonságait befolyásoló paraméterek angol nyelvű kutatásai

FDM 3D nyomtatás során számos paraméter állítható, mint például a hőmérséklet (hotend, asztal, kamra), nyomtatási sebesség, kitöltés stb. A releváns nyomtatási tulajdonságok meghatározása a korábban publikált folyóiratcikkek alapján történik.

Rajkumar [8] PLA alapú alkatrészek esetén a nyomtatási orientáció és a kitöltés mintázatának mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatást vizsgálta. Hatféle kitöltési mintázatot (háromszög, kockás,

koncentrikus, tetraéderes, vonal és zigzag) és háromféle orientációs síkot (lapos/XY, élirányú/XZ és függőleges/ZX) tesztelt. 3 pontos hajlító vizsgálatokat végzett, hogy meghatározza a mechanikai tulajdonságokat, mint például a hajlítási modulus, maximális hajlítási feszültség és deformáció. Az eredmények azt mutatták, hogy a kockás kitöltési mintázat élirányú orientációval a legnagyobb hajlító szilárdságot (107,95 MPa) eredményezte, míg a zigzag mintázat függőleges orientációval a legkisebbet. A háromszög kitöltés eredményezte a legnagyobb hajlítási modulus (3,36 GPa). A lapos orientáció általában magasabb hajlítószilárdság biztosított más orientációkhoz képest [8].

Vălean és társai [9] az FDM technológiával készült PLA próbadarabok húzó tulajdonságaira gyakorolt hatást vizsgálták, figyelembe véve a térbeli nyomtatási irányokat (0°, 45°, 90°) és a próbadarab vastagságát. A húzási vizsgálatok azt mutatták, hogy a térbeli orientáció kevésbé befolyásolta a Young-modulust, de jelentős hatással volt a szakítószilárdságra. A rétegek számának növelése csökkentette a Young-modulust és a szakítószilárdságra egyaránt. A tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy míg a lapos orientáció jobb mechanikai tulajdonságokat biztosított, a méret hatás (vastagság) kulcsszerepet játszott a nyomtatott alkatrészek szilárdságának meghatározásában.

Solomon és társai [10] az FDM folyamatparaméterek hatását vizsgálja, mint például a rétegvastagság, raszter szög (rétegek bezárt szöge a szakítóerő hatásvonalához képest), kitöltési tényező és nyomtatási orientáció, kitöltés mintázatát a 3D-nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságaira. A tanulmány hangsúlyozza, hogy a rétegvastagság és raszter szög jelentős hatással van a húzó- és hajlítószilárdságra, a vékonyabb rétegek és a 0°-os raszter szög biztosította a legjobb mechanikai tulajdonságokat. A kitöltési tényező szintén fontos szerepet játszik, a nagyobb sűrűség javítja az erőt, de növeli a nyomtatási időt [10].

Doshi és társai [11] áttekintik az FDM nyomtatási paraméterek hatását, mint például a rétegvastagság, kitöltési tényező, nyomtatási sebesség (kitöltés), nyomtatási orientáció és raszter szög, a 3D-nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságaira. A tanulmány megállapította, hogy a rétegvastagság és kitöltési tényező jelentős hatással van a húzó- és hajlítószilárdságra, a vékonyabb rétegek és nagyobb kitöltési tényező általában jobb mechanikai teljesítményt biztosítanak. A nyomtatási sebesség esetén 90mm/s-os sebességet találták a legjobbnak Young modulus szempontjából 70-110 mm/s-os tartományban. A nyomtatási orientáció és a raszter szög szintén kritikus szerepet játszottak, a 0° orientáció biztosította a legjobb húzóerőt [11].

táblázat 1: Nyomtatási paraméterek szilárdságtani hatásainak összegzése az angol nyelvű kutatások alapján.

	Hajlító modulus	Hajlító szilárdság	Hajlítási alakváltozás	Young modulus	Szakító szilárdság
Kitöltési mintázat	Háromszög	Kockás	Vonal	Hexagonális	Hexagonális
Nyomtatási orientáció	NEM VIZSGÁLTA	NEM VIZSGÁLTA	NEM VIZSGÁLTA	NEM BEFOLYÁSOLTA	0°
XY síkban	XY	XY	XZ	XY	XY
Nyomtatási síkja	XY	XY	XZ	XY	XY
Kitöltési tényező	100%	100%	100%	100%	100%
Raszter szög	NEM VIZSGÁLTA	NEM VIZSGÁLTA	NEM VIZSGÁLTA	0°	0°

1.1. Az FDM próbatestek mechanikai tulajdonságait befolyásoló paraméterek magyar kutatásai

Ádám és Polgár [12] zöld PLA-n végzett szakító és Charpy féle ütés-hajlító vizsgálatot. A nyomtatáshoz kiválasztott vizsgálandó paraméterek a nyomtatási hőmérséklet, sebesség, felépítési struktúra (orientáció). MLFD (mixed-level factorial design) kísérlettervet alkalmaztak, amely során egy faktor 3 szinttel, míg 2 faktor 2 szinttel rendelkezett. 3 hőmérsékleten (205, 215, 225 me: °C), két sebességgel (40, 60 me:mm/s), két raszter orientációval (±45°, ±90°) nyomtattak. A raszter szög két réteg esetén egymásra merőleges, tehát +45°, -45° szöget zárnak be. Hajlító szilárdság esetén a legnagyobb

értéket 45°-60 mm/s 225 °C paraméterek esetén érték el, amely értéke 23 kJ/m², a legkisebb érték 90°-60 mm/s -225 °C paraméterek esetén tapasztalták, értéke 18,4 23 kJ/m². 90° orientáció esetén a hajlító szilárdság a hőmérséklet, nyomtatási sebesség növekedésével fordítottan arányosan viselkedett, míg 45° esetén nem egyértelműen meghatározhatóan. A pontosabb kiértékeléshez több mérési eredményt javasolnak [12].

Szakítással Young modulus, szakító szilárdság, szakadási nyúlás került meghatározásra. A 90°-os szög eredményezett kisebb Young modulust, a hőmérséklet és a sebesség növelésével a modulus értéke is nőtt. A szakítószilárdság 45°-os orientáció esetén ért el magasabb értéket, a hőmérséklet növelésével a szakító szilárdság értéke is nő, ám a sebesség hatása nem egyértelműen levonható a mérések alapján. A szakadási nyúlás bár minden esetben rideg viselkedést mutat, a 45°-szög és a 40 mm/s sebesség tized milliméteres további nyúlást eredményezett. A hőmérséklet hatása kismértékű, nem egyértelmű [12].

Molnár és Zsótér [13] FDM és SLS eljárásokkal előállított próbatesteken végeztek szakítóvizsgálatokat, majd ezeket a fröccsentés útján előállított darabok mechanikai tulajdonságaival vetették össze. FDM nyomtatás során PLA, ABS, PC és PA próbadarabokat nyomtattak. A nyomtatás során a kitöltési tényezőt (10 szintet határoztak meg), rétegvastagságot (7 szintet határoztak meg) és a héjvastagságot (5 szintet határoztak meg) változtatták. A mérést OFAT (one factor at a time) kísérletterv szerint végezték el, tehát a változók(faktorok) kölcsönhatását nem vizsgálták. A szakítást 5mm/s sebességgel végezték ISO 527 próbatesten. 3 nyomtatási orientációt alkalmaztak (X, Y, Z) [13].

A kutatásban prezentált paraméterek-szakítószilárdság görbéit PLA anyagra adták meg a cikk szerzői. A mérések alapján a kitöltés monoton növekvő (20%-os kitöltési értéket kivéve) szakítószilárdságot eredményezett. A kitöltés nem növelte jelentős mértékben a szakítószilárdságot 0-60%-os kitöltés esetén, 5% esetén átlagos 10,29 Mpa, 60% esetén 13,81 Mpa. 80% és 100% kitöltés esetén már jelentősebb növekedést tapasztaltak, ennek mértéke 16,82 MPa és 35,70 MPa. A rétegvastagság esetén nem egyértelműen növekvő, vagy csökkenő a szakítószilárdság. 0,05-0,1-0,15 mm rétegvastagság esetén a szakítószilárdság csökkenő tendenciát mutatott, ám 0,2-0,25-0,35 értékek esetén arányosan növekedett a szakítószilárdság. A jelenség további vizsgálatot igényel. A héjvastagság növekedésével monoton növekvő szakítószilárdság függvényt kaptak. 0,4mm hély esetén 7,38 MPa a szakítószilárdság, míg 2mm esetén 37,45 MPa. A héjvastagság növelése során 20%-os kitöltést alkalmaztak, míg a kitöltés növelésekor 0,8 mm héjvastagságot [13].

táblázat 2: Nyomtatás paraméterek mechanikai hatásainak összegzése a magyar nyelvű kutatások alapján.

Az anyag minden esetben PLA

	HAJLÍTÓ SZILÁRDSÁG	YOUNG MODULUS	SZAKÍTÓ SZILÁRDSÁG	SZAKADÁSI NYÚLÁS
HŐMÉRSÉKLET	225 °C	225 °C	225 °C	225 °C
RASZTER SZÖG	±45°	±90°	±45°	±45°
NYOMTATÁSI SEBESSÉG	60 mm/s	60 mm/s	60 mm/s	40 mm/s
KITÖLTÉS TÉNYEZŐ	NEM VIZSGÁLTA	NEM VIZSGÁLTA	100%	NEM VIZSGÁLTA
RÉTEGVASTAGSÁG	NEM VIZSGÁLTA	NEM VIZSGÁLTA	0,05 mm	NEM VIZSGÁLTA
HÉJVASTAGSÁG	NEM VIZSGÁLTA	NEM VIZSGÁLTA	2 mm	NEM VIZSGÁLTA

2. GÉPI TANULÁS ALKALMAZÁSÁNAK FELTÉTELEI

Gép tanulás segítségével részletes statisztikai mintázatot, információt lehet különböző adatkészletekből kinyerni. Erre alapozva lehetséges összetett előrejelzéseket készíteni [14]. Ezeket az algoritmusokat felhasználva a 3D nyomtatott alkatrészek szilárdságtani tulajdonságait is előre lehet jelezni, így segítve az optimális nyomtatási paraméterek kiválasztását. Ebben a fejezetben az algoritmusok adatigénye kerül vizsgálatra, amely jelentősen befolyásolja a kísérlettervezést.

Alapvetően egy adatkészletnek két fontos tulajdonsága van, az adatpontok száma (sorok száma) és a dimenziója, jellemzők száma (oszlopok száma). Kis méretű, nagy dimenziójú adatkészlet esetén

nehéz elfogadható előrejelzést alkotni [15]. Ebből fakadóan fontos a megfelelő mennyiségű jellemző kiválasztása és a megfelelő mennyiségű adatpont rendelkezésre állása. Tipikusan az adatpontok növekedésével egyre jobb előrejelzéseket lehet alkotni, ám egy adott érték felett nem hoz jelentősebb javulást a mérőszámokat tekintve [16, 17].

2.1. Adatkészlet mérete és dimenziója

Vabalas és társai [18] szerint kis adatkészletek overfittinghez vezethetnek, különösen, ha a validációhoz K-fold cross-validation (K-szoros keresztvalidáció) kerül alkalmazásra. A nested cross-validation (beágyazott keresztvalidáció) és a train/test split (tanító/tesztalmez felosztás) validációs módszerek megfelelőbb eredményeket adnak kis adatkészletek esetén [18]. Rajput és társai [16] cikke alapján az adatkészlet növelése javítja az osztályozás pontosságot, de egy bizonyos határ után a további növekedés már nem hoz jelentős javulást [16]. Nagyobb adathalmazok általában javítják az ML algoritmusok teljesítményét, különösen a Random Forests (RF) esetén, míg a Naive Bayes hatékonyabb kisebb adathalmazokon [17].

Vabalas és társai [18] és Rajput és társai [16] cikkei alapján a magas jellemző-adatpont arány növeli az overfitting kockázatát. Ez a hatás kis adatkészlet esetén különösen kifejezett, de nagyobb adatkészletek esetén is fennmaradhat (akár 1000 mintáig) [16, 18]. A jellemzőkiválasztási technikák, például a korreláció-alapú jellemzőkiválasztás (CFS) csökkenthetik az overfitting kockázatát és javíthatják az ML algoritmusok teljesítményét, különösen magas dimenziójú adathalmazoknál. Az adathalmazok dimenziója továbbá csökkenthető Principal Component Analysis (PCA) segítségével [16].

2.2. Algoritmusok kis méretű adatkészlet esetén

Mivel az adatgyűjtés időigényes és költséges lehet könnyen 3D nyomtatás esetén, így az elsősorban olyan regressziós és osztályozós algoritmusokat célszerű alkalmazni, amelyek kisebb méretű adathalmazok esetén is megfelelő előrejelzést, osztályozást végez. A Naive Bayes hatékony kis adatkészleteken, különösen, ha az adatok minősége jó. A logisztikus regresszió is jól teljesít kis adathalmazokon, ha kis adatkészleteken szintén hatékony validációs módszerek (pl. nested CV vagy train/test split) kerülnek alkalmazásra [16, 18]. Emellett Zhang és társai [19] cikke alapján a gradient boosting és a kernel ridge regressziós modellek kisebb mint 7%-os hibát eredményeznek közel 100 adatpont esetén, a jószág megállapításához a RMSE mérőszámot alkalmazták [19].

2.3. Kísérlettervezés

Nagy mennyiségű jellemző áll rendelkezésre, ezért egy például egy teljes faktoriális kísérlettervezés nem megvalósítható, mivel az túl sok mérési pontot igényelne. A 6 jellemző, 3 szint esetén $3^6=729$ mérési pontra lenne szükség. Részleges faktoriális kísérletterv vagy változó szintű faktoriális kísérletterv alkalmazásával csökkenthető a mérési pontok száma [20]. Ebből fakadóan egy olyan részleges faktoriális kísérlettervet célszerű alkotni, amely maximum 100 mérési pontot generál, ilyen például egy $3^{6-2}=84$ részleges kísérletterv. Egy így elkészített adatkészlet a megfelelő gépi tanuláson alapuló algoritmussal várhatóan képes egy elfogadható előrejelzési pontosságot elérni.

3. KONKLÚZÓ

Az irodalmak áttekintése alapján sikerült meghatározni több olyan nyomtatási paramétert is amelynek hatása alapvetően ismert a nyomtatott darabok mechanikai tulajdonságaira. Ilyen változók a kitöltési mintázat és tényező, nyomtatási orientáció, raszter szög, rétegvastagság, nyomtatási sebesség. Ezekre alapozva, mint független változók lehetséges olyan gépi tanuláson alapuló algoritmusokat tanítani, amelyekkel megfelelő pontosságú előrejelzés alkotható egy kisebb adatkészlet esetén is (körülbelül 100 darab). Az adatkészlet elkészítéséhez alkalmazható teljes vagy részleges faktoriális kísérlettervezés is. Teljes faktoriális kísérlettervezés esetén kifejezetten nagy mennyiségű mérést kellene elvégezni, így a részleges célszerűbb lehet, mind anyagi mind idő szempontjából. Gépi tanulás esetén alkalmazható osztályozás esetén naive bayes és logisztikus regresszió, míg regressziós alkalmazás esetén a gradient boosting és a kernel ridge regresszió.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] M. Attaran, "The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing," *Business Horizons*, vol. 60, no. 5, pp. 677-688, 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.
- [2] D. Godec, J. Gonzalez-Gutierrez, A. Nordin, E. Pei, and J. Ureña, *A Guide to Additive Manufacturing*. Cham: Springer, Cham, 2022.
- [3] T. T. Wohlers, W. Associates, and T. Caffrey, *Wohlers Report 2015: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates, 2015.
- [4] K. Wong, "K.V. Wong, A.Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing," ISRN Mechanical Engineering, Vol 2012 (2012), Article ID 208760, 10 pages," *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, 08/16 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [5] Z.-X. Low, Y. T. Chua, B. M. Ray, D. Mattia, I. S. Metcalfe, and D. A. Patterson, "Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques," *Journal of Membrane Science*, vol. 523, pp. 596-613, 2017, doi: 10.1016/j.memsci.2016.10.006.
- [6] J. Y. Boey, C. K. Lee, and G. S. Tay, "Factors Affecting Mechanical Properties of Reinforced Bioplastics: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 18, Sep 7 2022, doi: 10.3390/polym14183737.
- [7] S. Liampas, N. Kladovasilakis, K. Tsongas, and E. M. Pechlivani, "Recent Advances in Additive Manufacturing of Fibre-Reinforced Materials: A Comprehensive Review," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 22, doi: 10.3390/app142210100.
- [8] M. Santosh and S. Rajkumar, *Effect of infill pattern and build orientation on mechanical properties of FDM printed parts: an experimental modal analysis approach*. 2022.
- [9] C. Vălean, L. Marşavina, M. Mărghiţaş, E. Linul, N. Razavi, and F. Berto, "Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens," *Procedia Structural Integrity*, vol. 26, pp. 313-320, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.040>.
- [10] R. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, U. Sabino, and Z. Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," *Open Engineering*, vol. 11, pp. 639-649, 04/01 2021, doi: 10.1515/eng-2021-0063.
- [11] M. Doshi, A. Mahale, S. Kumar Singh, and S. Deshmukh, "Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects," *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, pp. 2269-2275, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.003.
- [12] B. Ádám, B. Polgár, "3D Nyomtatott Próbatetek Mechanikai Vizsgálata," *Gradus*, vol. 6, no. 1, p. 6, 2019.
- [13] T. Molnár, B. Zsótér "3D Nyomtatott Ipari Műanyagok Anyagvizsgálata A Műszaki Gyakorlatban," *Gép*, vol. 74, no. 2-3, pp. 35-45, 2023.
- [14] J. D. Kelleher, B. M. Namee, and A. D'Arcy, *Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics: Algorithms, Worked Examples, and Case Studies*. The MIT Press, 2015.
- [15] O. O. Aremu, D. Hyland-Wood, and P. R. McAree, "A machine learning approach to circumventing the curse of dimensionality in discontinuous time series machine data," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 195, p. 106706, 2020/03/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106706>.
- [16] D. Rajput, W. J. Wang, and C. C. Chen, "Evaluation of a decided sample size in machine learning applications," *BMC Bioinformatics*, vol. 24, no. 1, p. 48, Feb 14 2023, doi: 10.1186/s12859-023-05156-9.
- [17] C. Catal and B. Diri, "Investigating the effect of dataset size, metrics sets, and feature selection techniques on software fault prediction problem," *Information Sciences*, vol. 179, no. 8, pp. 1040-1058, 2009, doi: 10.1016/j.ins.2008.12.001.
- [18] A. Vabalas, E. Gowen, E. Poliakoff, and A. J. Casson, "Machine learning algorithm validation with a
- [19] Y. Zhang and C. Ling, "A strategy to apply machine learning to small datasets in materials science," *npj Computational Materials*, vol. 4, no. 1, 2018, doi: 10.1038/s41524-018-0081-z.
- [20] B. Durakovic, "Design of experiments application, concepts, examples: State of the art," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, vol. 5, no. 3, 2017, doi: 10.21533/pen.v5i3.145.