

Rákosi Sára,¹ Sebők István,² Szalai Tamás,³ Vég Róbert László⁴

A 3D-nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai

Safety and Environmental Aspects of 3D Printing

A 3D-nyomtatás mint hirtelen fellendült iparág ma már nemcsak vállalatok számára készít termékeket, hanem otthoni felhasználásra is azon személyek számára, akik hobbi szinten érdeklődnek a technológia iránt. Ezért is kiemelten fontos, hogy tisztában legyünk azzal, mire képesek ezek az eszközök. Ismernünk kell az eszközök működési elvét, valamint azt, hogy milyen, esetleg környezetünkre és egészségünkre is káros, anyagokat bocsát ki.

Kulcsszavak: 3D-nyomtató, 3D-nyomtatás, környezetvédelem, biztonságtechnika

3D printing as a suddenly booming industry is now not only producing for companies, but also for home application for people who show interest in this field of technology as a hobby. That is why it is extremely important to be aware of what these tools are capable of. We need to know the operating principle of the devices, as well as what substances they emit, which may be harmful to our environment and health.

Keywords: 3D printer, 3D printing, environment protection, safety technology

¹ Hallgató főtörzsőr-mester, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, e-mail: sara.rakosi@gmail.com

² Tanársegéd, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, e-mail: sebok.istvan@uni-nke.hu

³ Szakoktató, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, e-mail: szalai.tamas@uni-nke.hu

⁴ Egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, e-mail: vegh.robert@uni-nke.hu

Bevezetés

Ma a folyamatos technológiai fejlődéssel lépést tartani nehéz feladat. Feltűnnek újabb és újabb anyagok és eszközök, amelyek nagyban hozzájárulnak a gyorsabb és nagyobb léptékű termeléshez, valamint több esetben jobb minőséget is eredményeznek.

Az iparosodás kezdete óta számos körülmény megváltozott a gyártási folyamatok során. Kezdetben csak a mennyiségi termelést vették figyelembe, később kezdett fontossá válni, hogy ne csak mennyiségileg, de minőségileg is jobban teljesítsenek a gyárak, ugyanis minél magasabb minőségű volt a termék, annál magasabbak voltak az eladási mutatók.⁵ A technológiai fejlődés mellett ügyelnünk kell, hogy környezetünket és egészségünket megőrizzük, ugyanis az újabb és újabb technológiai vívmányok mindig rejtenek magukban megoldandó problémát is. Ezek az új eszközök kihívásokat tartogatnak a kutatók és a fejlesztők számára, amelyeket számos tesztelés és fejlesztési kísérlet árán sikerül kiküszöbölni.

Jelen korra a tudomány és a technológia eljutott arra a szintre, hogy számítógépek és szoftverek segítségével tervezni tudunk, a tervezetteket pedig le is tudjuk gyártani. Egyes munkafolyamatok nem igényelnek emberi beavatkozást, ugyanakkor az eszközöknek számos előírásnak és szabványnak kell megfelelniük, hogy biztonságosan használhatók legyenek. Munkavégzés során előfordulnak eltérő súlyosságú balesetek, ezek elkerülése érdekében elengedhetetlen, hogy szabályokhoz kössük az eszközök használatát, így minimalizálni tudjuk az esetlegesen keletkező sérüléseket.

A gyorsuló ütemben fejlődő technológiai háttérnek köszönhetően ma már letisztult módszerek és eljárások állnak akár a professzionális ipari felhasználók, akár a kutatás, fejlesztés, innováció területén érdekelt cégek, illetve szakemberek rendelkezésére. A háromdimenziós nyomtatás gyors megoldást kínál számos szakterületen, a prototípusgyártás mellett többek között az alkatrész-utánpótlási problémákra, de a felhasználási lehetőségek között találkozhatunk számos katonai aspektussal is.⁶

A hadi alkalmazás esetében kiemelhető a katonai robbantástechnika mint lehetséges felhasználó. A kis szériaszámban vagy egyedi méretekben készített töltetek alkatrészeinek gyártásához ideális megoldást kínál a 3D-nyomatás. A kumulatív töltetházak esetében például jelenleg is folynak gyakorlati alapokon nyugvó vizsgálatok a témában.⁷

A háromdimenziós nyomtatás létrejötté sok tudományág számára kívánt kedvező megoldást az alkatrész- és modellgyártás terén, ugyanis egyfajta 3D-nyomatató segítségével számos modellt készíthetünk, sokrétű felhasználásra.

A 20. század végéig két egyszerű eljárásra korlátozódott az ipari termelés, egyrészt az öntésre, másrészt megmunkálásra. Az eljárásnak komoly jelentősége van a hadiiparban és a felsőoktatásban is.⁸ Ezen eljárásokat összefoglaló néven elvevési gyártásnak nevezik,

⁵ SZABÓ 2017.

⁶ GÁL-NÉMETH 2019.

⁷ EMBER-ÁDÁM 2022.

⁸ GYARMATI et al. 2018; GYARMATI et al. 2016.

vagyis a formázás során az alapanyagot alakítva (abból elvéve) marás, formába öntés útján kapjuk meg a kívánt végső állapotú munkadarabot.⁹

A 3D-nyomatás elmélete és gyakorlata

3D-nyomatás során digitális modellekből állítunk elő háromdimenziós tárgyakat. Jelenleg leggyakoribb felhasználása az otthoni hobbi szintű modellkészítés mellett a gyors prototípuskészítés.¹⁰ A 3D-nyomatást további elnevezésekkel is illetik, mint az additív gyártás, desktop termelés, digitálistermék-előállítás. Mivel a 3D-nyomatás a terméket úgymond nulláról állítja elő, vagyis anyag hozzáadásával, a legpontosabb lényegi elnevezés az additív gyártás.¹¹ Kompozitanyagokat nap mint nap használunk, tudományterületeket ível át és köt össze. Jelenleg a 3D-fémnyomatókat a fogászatban is előszeretettel használják, a technológiák folyamatos fejlődésének köszönhetően az orvostudomány többi ága is használhatja a későbbiekben.

Gyors prototípusgyártás története

A gyors prototípusgyártás (RPT¹²) egy tetszőlegesen választott háromdimenziós fizikai test numerikus leírásából történő előállítását jelenti. Az előállítás teljesen automatizált, az elkészült modell nagy rugalmasságú, sokféle igénybevételnek ellenálló lesz. A modelleket általában tervezőprogramokkal készítik el, például CAD, Fusion 360.

A 3D-nyomatás ötlete egészen 1945-ig nyúlik vissza, amikor a sci-fi író, Murray Leinster először írta le meglepő pontossággal a technológiát *Things Pass By* című novellájában. Elképzelt egy gépet, amely a rajzait egy mozgó kar segítségével újraalkothatja olvasztott műanyagból.¹³ Időbe telt, amíg ezek az ötletek túlléptek a fikción, de 1971-ben áttérés történt, amikor Johannes F. Gottwald szabadalmat nyújtott be egy folyékony fémextruderre. Úgy képzelte el, hogy ez az extruder olyan, mint egy irodai nyomtató, csak fémmel nyomtat 3D-s tárgyakat, nem pedig tintával. Sajnos nem sikerült elkészítenie a gépet, mielőtt lejárt volna a szabadalma.¹⁴ Az 1980-as években a 3D-nyomatási ötletek valósággá váltak.¹⁵ Az évtizedben az első kiemelkedő szabadalmat Dr. Hideo Kodama japán feltaláló nyújtotta be 1981-ben. A találmányát „gyors prototípuskészítő eszközként” nevezte meg. Az ő szabadalma volt az első, amely lézersugaras kikeményítési eljárást tárgyal.¹⁶ Charles „Chuck” Hull 1984-ben szabadalmat nyújtott be egy sztereolitográfiai rendszerre, UV-lámpa segítségével rétegről rétegre kikeményítette a fényérzékeny gyantát, így állította elő az egyedi alkatrészeket.

⁹ SINGH 2006: 4.

¹⁰ *Guide to Rapid Prototyping for Product Development.*

¹¹ KRASSENSTEIN 2015.

¹² RPT: rapid prototyping technology – gyors prototípusgyártás.

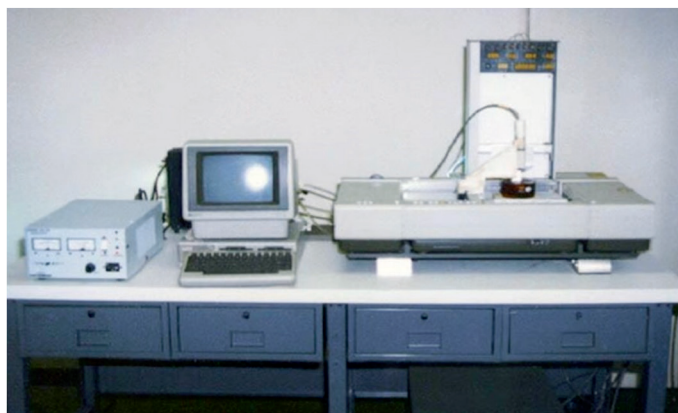
¹³ LEINSTER 1945.

¹⁴ Lásd: <https://englisch-albanisch.englischdeutsch.at/uebersetzer5/20724-1970s-in-1971-johannes-f-gottwald-patented-the-liquid-metal-recorder-u-s-patent-3596285a-a-continuou>

¹⁵ HORVÁTH–KURUCZ 2017.

¹⁶ *When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing.* 2020.

1986-ban hagyták jóvá a szabadalmát, és megalapította saját cégét, amely a 3D Systems nevet viselte.¹⁷ Mindössze két évvel a cég indítása után, 1988-ban kiadták az úttörő, első kereskedelmi forgalomban kapható 3D-nyomatót – az SLA-1-et (1. ábra). Hull fejlesztette ki az STL-fájlformátumot a modellek könnyű elkészítése érdekében, valamint azt a digitális szeletelési eljárást, amelyet a mai napig használunk 3D-nyomatás során.



1. ábra: SLA-1, az első 3D-nyomató

Forrás: www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/

Az SLA-1 volt az első olyan 3D-nyomatógép, amely kereskedelmi forgalomba került, ugyanakkor az FDM- (*fused deposition modeling*) és az SLS- (*selective laser sintering*) eljárások nem sokkal később szintén piacra törtek. A szelektív lézeres szinterézést egy texasi egyetemi kutató, Carl Deckard találta fel.¹⁸ A kezdetleges nyomatóval csak alapvető műanyagdarabokat tudott készíteni, az ötlet viszont már akkor is az volt, ami alapján később az SLS-nyomatás készült. 1988-ban érkezett még egy szabadalmi ötlet a Stratasys társalapítójától, Scott Crumptól. Egy olvasztott lerakódású modellezőgépet akart készíteni, ugyanakkor a Startasys a piac élére tört az akkor modernnek számító FDM-nyomatóival.¹⁹

1993-ban az MTA professzora először alkalmazta a 3D-nyomatást mint fogalmat lexikonokban, ekkortól kezdve az iparág már ezt a nevet viselte. A Zcorp nevű vállalat 2000-ben bevezette az első több színnel nyomtatni képes 3D-nyomatót, amely nem vált szabvánnyá, ugyanakkor közkedvelt volt. 2004-ben elindult a RepRap mozgalom azzal a céllal, hogy 3D-nyomatók segítségével állítsanak elő még több 3D-nyomatót.²⁰ 2006-ban mutatták be az Objekt által az első kereskedelmi forgalomban árusított asztali 3D-nyomatót, amely lehetővé tette az otthoni modellezést mint hobbist. A 2000-es években lejártak azok a szabadalmak, amelyek az első 3D-nyomatógépek gyártását engedélyezték, ezt követően hatalmas piaci versengés indult be a különböző technológiák és gépek előállítására. 2014-ben

¹⁷ Lásd: www.3dsystems.com/our-story

¹⁸ HOPKINSON–HAGUE–DICKENS 2006: 64.

¹⁹ HOPKINSON–HAGUE–DICKENS 2006: 75.

²⁰ HOPKINSON–HAGUE–DICKENS 2006: 78.

lezárult az utolsó szabadalom is, azt követően szabad felhasználásúvá váltak az eszközök, a 3D-nyomatás három fő formája szabadabbá vált kísérletezésre.²¹

SLA²²-eljárás

Az SLA a kádas polimerizációs nyomatás egyik formája. A kádas polimerizációhoz folyékony fotopolimer gyantából készült kádat használnak, amelyből rétegről rétegre építik fel a modellt. Szükség esetén ultraibolya fényt alkalmaznak a gyanta kikeményítésére, egy platform minden új réteg kikeményítése után lefelé mozgatja a készülő modellt.²³ A gyantának az egyik legfontosabb tulajdonsága az, hogy ultraibolya fényre érzékeny. Ennek a tulajdonságnak köszönhetően a 3D-nyomatók speciális lézert alkalmaznak, amelyen a modellek formázása közben külön keményíthetők ki az adott területek. Ez a technológia nemcsak a gyantahasználatban különbözik az ismert FDM-módszertől, hanem a felbontásban is. Míg az FDM-eljárás során a rétegek több száz mikron vastagok, addig az SLA-technológiával készített modellek átlagosan 50 mikron vastagságú rétegekből épülnek fel.

Az SLA- (2. ábra) nyomatók általában egy gyantatartályból, egy építőlemezből, egy lézerből és két galvanométerből épülnek fel. A galvanométerek olyan tükörrel ellátott szerzők, amelyek a tükrök segítségével a lézert pontosan és precízen irányítják. A szilárd testek lézerhullámhossza 405 nm tartományban van. Ez a 405 nm-es fény, ha rávilágít a gyantára, megkeményíti azt. Kétféleképpen építhetik fel a modell rétegeit: alulról felfelé vagy fentről lefelé. Az alulról felfelé irányuló építési technikában az építőlemez leengedik a gyantatartályba, addig ott tartják, amíg egy vékony gyantaréteg marad csak közöttük és egy átlátszó film vagy membrán a tartály alján. A lézert a fejek pontosan rányomják a film másik oldalára, megadott minta alapján pedig kikeményítik a gyantát. Ezt követően az építőlemez felemelik, ezzel leválasztják a már megkeményedett réteget a fóliáról, majd megadott értékkel lejjebb engedik, így a következő réteg lejjebb fog készülni. Ezt a folyamatot akár több százszor ismételve elkészül a modellünk.

Az iparban használt nyomatók esetén gyakoribb a fentről lefele történő modellezés, ez esetben az építőlemez a tartály aljából emelik fel a tetejére, a lézert ráhúzzák a folyékony gyantarétegre, majd kikeményítik a felső néhány mikrométert az építőlemezen. Ezt követően az építőlemez lejjebb engedik a kádban, egészen addig ismételve ezeket a lépéseket, amíg el nem készül a tervezett alkatrész.²⁴

Léteznek olyan technológiák, amelyek hasonlóak az SLA-technológiához, de találhatóak benne eltérések. A DLP-²⁵ eljárás abban tér el az SLA-tól, hogy nem lézert használ, hanem egy nagy felbontású kivetítőt és digitális mikrotükört. Ugyanaz a hatása, mint a lézernak, azzal a különbséggel, hogy egyszerre több réteg kikeményíthető, a nyomatás ideje lerövidíthető.

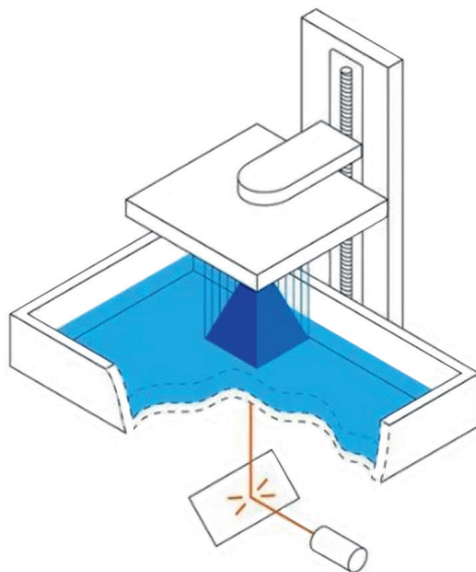
²¹ HAINES 2022.

²² SLA: sztereolitográfia.

²³ All3DP 2019.

²⁴ GRAMES 2019.

²⁵ DLP: digital light processing.



2. ábra: Az SLA-nyomatás vázlatja

Forrás: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>

FDM²⁶-eljárás

Az FDM-eljárás egy anyagextrudálási módszer az additív gyártástechnológiák közül, ahol az anyagokat egy fúvókán keresztül extrudálják és összeillesztik, hogy így hozzanak létre 3D-objektumokat. A standard FDM-eljárás eltér a többi anyagextrudálási eljárástól, hőre lágyuló műanyagokat alkalmaznak alapanyagként filamentek vagy pelleték formájában. A filamentet egy felfűtött fúvókán nyomja át a nyomtató, így az megolvad, majd ezeket kétdimenziós rétegekben lefekteti az építési felületre. Míg meleg, a rétegek összeolvadnak, így létrehozva a háromdimenziós réteget. Az FDM a 3D-nyomatás legegyszerűbb technológiája, felhasználóbarát és széles körben elterjedt. Otthoni felhasználásra sokkal egyszerűbb ez a módszer, mint a gyantás 3D-nyomatási módszerek, és olcsóbbak, mint a por alapú eljárások.

Az FDM-technológia előnyei között ugyanakkor célszerű megemlíteni a kedvező nyomtatási sebességet is, amely az alapanyagtól, mérettől és kitöltési geometriától függően változhat néhányszor 10 perc és néhány nap között.²⁷

²⁶ FDM: fused deposition modeling.

²⁷ NÉMETH-SZABÓ-BALOG 2020.

Az FDM-eljárás viszonylag egyszerű. Fő funkcióit két rendszer látja el, az egyik rendszer felel az extrudálásért,²⁸ valamint az anyag lerakásáért, a másik rendszer pedig a nyomtatófej mozgásáért felel. Az eljáráshoz használt hőre lágyuló műanyagok filamentorsókban kaphatóak. A nyomató „hideg vége” felel azért, hogy az anyag a nyomtatóba be legyen táplálva az orsóról. Itt szabályozzák a sebességet is, amivel a nyomtató lerakja az anyagot. A nyomtató „forró vége” pedig azért felel, hogy az anyagot megfelelő szintre melegítse fel, hogy azt a fúvókákon keresztül lehessen extrudálni. Ez a rendszer tartalmaz fűtőpatronokat, hűtőbordákat és fúvókákat. A két fő rendszernek, azaz a hideg és forró végnek szinergikusan²⁹ kell működni ahhoz, hogy a megfelelő mennyiségű anyagot megfelelő hőmérsékleten és fizikai állapotban lehessen rétegezni.

Az extrudálási folyamat szempontjából kétféleképpen lehet beállítani a nyomtatót. A hideg és a forró vég elhelyezhető egymás mellett, így közvetlen lesz az extrudálás, a másik megoldás pedig amikor a hideg véget a nyomtató keretéhez rögzítik. Ebben az esetben szükség van egy összekötő csőre, amely segítségével az izzószálakat átvezetik a forró végbe. A forró végek több kialakításban kaphatóak, az egyik az All-Metal, amely magasabb hőmérséklet elérését teszi lehetővé a fúvókákban. A másik kialakítás a PTFE³⁰-bevonatú forró vég, amelyben rövidebb csövet használnak, ezzel csökkentve az izzószál súrlódását – ugyanakkor ez a típus korlátozza a hőmérsékletet maximum 240 °C-ra.³¹

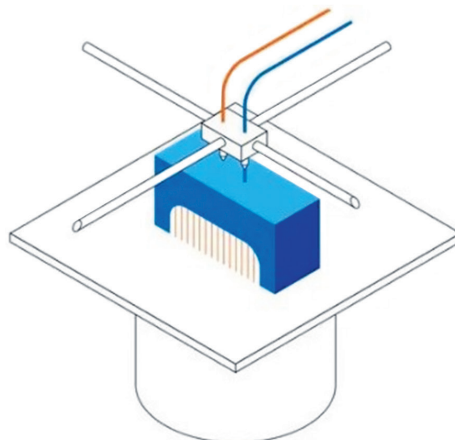
A legjelentősebb eltérés az FDM-eljárás és a többi 3D-nyomatási eljárás között a tervezésben, valamint a mozgásrendszerben található. Az FDM 3D-nyomtatók mozgásrendszere felelős azért, hogy a melegvégszerelvényt a háromdimenziós térben mozgassa az olvadt anyag megfelelő lerakásához. Többféleképpen is megvalósítható a forró vég mozgatása, ugyanakkor ehhez ismernünk kell a különböző beállításokhoz szükséges koordináta-rendszereket. 3D-nyomtatók esetén a leggyakrabban a derékszögű koordináta-rendszereket alkalmazzák, ahol az x, y és z lineáris tengelyek adják meg a pontos pozíciót. Azonban van az FDM-nyomtatóknak egy kis csoportja, amely poláris koordináta-rendszert alkalmaz. A poláris koordináta-rendszer lineáris, és szögértéket is alkalmaznak, ezzel előállítva a fizikai pozíciót. A derékszögű koordináta-rendszert alkalmazó gépek további csoportokra oszthatók. A Delta 3D-nyomtatók függőleges síneket és három, egymástól függetlenül vezérelt kart alkalmaznak, amelyek a forró véghez vannak rögzítve, amelyek együtt mozognak, így megfelelően pozicionálják a forró véget. A SCARA nyomtatók a derékszögű gépek másik kategóriája, amelyek vízszintesen mozgatott karokat használnak a síkmozgások elvégzéséhez. Nemrégiben egy új típusú FDM-nyomtató jelent meg, a szalagos 3D-nyomtatók. Az építő platform folyamatosan mozgásban van, működési elve olyan, mint a futószalagé, ez lehetővé teszi hosszú alkatrészek előállítását.

²⁸ Extrudálás: Képlékeny anyagok sajtolása felmelegített formanyíláson keresztül. Az anyag felveszi a formanyílás alakját és így hűl ki.

²⁹ Szinergia: együttműködő.

³⁰ PTFE: politetrafluoretilén, ismertebb nevén teflon.

³¹ CAROLO 2022.



3. ábra: SLA-nyomatás vázlat

Forrás: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>

SLS³²- és SLM³³-eljárások

Az SLS a szelektív lézeres szinterezés rövidítése, a 3D-nyomatás leggyakrabban használt technológiája ipari környezetben. Az SLS-gépekben a finom polimerporból szinterelve és helyileg összeolvasztva rétegekből jön létre az alkatrész.³⁴ Az SLS-nyomatókban található lézerek teljesítményei eltérőek, ez határozza meg, milyen anyagokat képes kinyomtatni a gép. A nyomatókban alkalmazott anyagokat por állagúként helyezik a nyomatóba, ezeket egy görgős eszköz segítségével rétegezik egymásra. Ezzel a módszerrel nincs szükség támasztékokra a nyomtatott modellhez, így sokkal bonyolultabb felépítésű alkatrészeket és modelleket készíthetünk, vékony falú tárgyak és bonyolult geometriák is előállíthatók. A legtöbb ma kereskedelmi forgalomban elérhető SLS-nyomató rendkívül fejlett technológiailag a 3D-nyomatók között, ezért drága.³⁵

Az SLM-technológiát fémötvözetek 3D-nyomatásához fejlesztették ki. Az SLM 3D-nyomatók nagy energiájú lézerekkel teljes mértékben megolvasztják a fémport, ezáltal hozva létre az alkatrész rétegeit, ezért magasabb hőmérsékletet kell elérnie, amely hosszabb lehűtési időt igényel. Az SLM nyomtatott fém alkatrészekre nagy precizitás jellemző, ideális vékony falú alkatrészek és bonyolult geometriák előállítására, amelyek hagyományos forgácsolós technológiákkal nem, vagy csak nehezen lennének előállíthatók. A nyomtatás pontossága függ a lézerek sugár szélességétől, valamint az alkatrész rétegvastagságától. Az el-

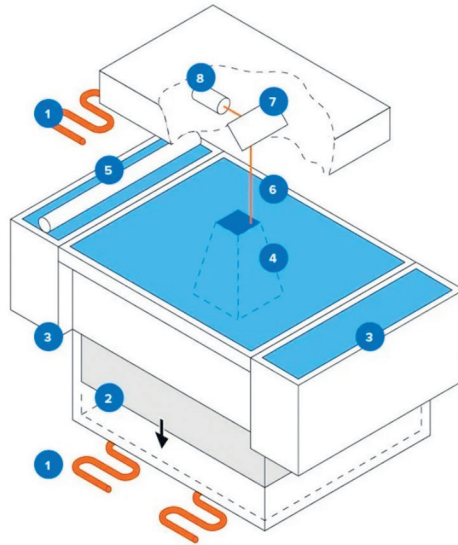
³² SLS: selective laser sintering – szelektív lézeres szinterezés.

³³ SLM: selective laser melting – szelektív lézeres olvasztás.

³⁴ Guide to 3D printing, Lásd: <https://formlabs.com/3d-printers/>

³⁵ Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing, Lásd: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>

készült alkatrész utómunkálási igénye nagy, és szükséges hőkezelné is. Az SLM-nyomatáshoz használt fémpor drága, valamint a használata veszélyes.³⁶



4. ábra: SLS-nyomatás vázlat

Forrás: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>

Megjegyzés: 1 – fűtőkészülékek, 2 – építőkamra, 3 – porszállító rendszer, 4 – nyomtatott elem, 5 – újrafestő, 6 – lézersugár, 7 – X-Y letapogató rendszer, 8 – lézer

A 3D-nyomatás környezetvédelmi vonatkozásai

A hatalmas technológiai fejlődés mellett kiemelkedően fontos a környezetvédelmi aspektusokat is figyelembe venni. A legtöbb gyártástechnológiai folyamat valamilyen melléktermékkel jár, amely nem újrahasznosítható, bizonyosak pedig emellett károsak akár a környezetre, akár az emberi egészségre is. Ezzel szemben a 3D-nyomatási technológiák nagy része kevés, vagy semennyi károsanyag-kibocsátással sem jár.

A 3D-nyomatási technológiák legnagyobb környezetvédelmi „előnye” működésükben rejlik. A gyártástechnológiai módszerek legtöbb esetben szilárd anyaggal dolgoznak, például fémmel vagy műanyaggal, ezt különböző munkafolyamatoknak vetik alá, és leválasztják a felesleges anyagot. Az így termelődött hulladékot hulladéklerakókban helyezik el, ezzel növelve a környezetszennyezés veszélyét akár a talajon, akár a természetes vizeken keresztül.

Az asztali háromdimenziós nyomtatók egyre népszerűbbek. A kereskedelemben kapható, fogyasztói piacra tervezett asztali 3D-nyomtatók többsége FDM-technológiával működik,

³⁶ A 3D fémnyomatás módszerei. Lásd: www.freedee.hu/a-3d-femnyomatatas-modszerei/; Hogyan határozza meg a 3D nyomtatás tűrései a nyomtatok méretét és méretbeli pontosságát? Lásd: <http://m.hu.insta3dp.com/info/how-3d-printing-tolerances-determine-the-size-44742520.html>

azaz olvadtpolimer-leválasztással. Az otthon használatos 3D-nyomatókban sokféle izzószálat alkalmaznak. Ezek közé tartozik az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS), a politejsav (PLA), a polivinil-alkohol (PVA), a polikarbonát (PC), a nagy teljesítményű és sűrűségű polietilén (HDPE), a nagy ütésálló polisztirol (HIPS), nejlón és sok más polimer, fém, kerámia és egyéb anyagok. A jelenleg legelterjedtebb két anyag az ABS és a PLA, ugyanakkor az előbb felsorolt anyagok közül több is egyre nagyobb népszerűségnek örvend.

A hőre lágyuló anyagok termikus feldolgozása során a részecskék és gázok kibocsátása elkerülhetetlen. 3D-nyomatók üzem közben 1 és 100 nanométer közötti részecskéket bocsátanak ki, amelyeket ultrafinom részecskéknek nevezünk.

Egy publikált kutatás keretében azt vizsgálták, hogy az otthon alkalmazható asztali 3D-nyomatók az alkalmazott anyag függvényében mennyi káros anyagot bocsátanak ki üzem közben. A károsanyag-kibocsátás mennyisége függ az anyag típusától, valamint az alkalmazott filament vastagságától. A kísérletben egy FDM-technológiájú 3D-nyomatót üzemeltettek egy kis kamrában, egyszer ABS-filamentet alkalmazva, utána pedig PLA-filamentet. A méréseket 3,6 m³-es rozsdamentes acél kamrában végezték, amely egy rozsdamentes acél keverőventilátorral volt ellátva. Mindkét esetben egy kamrán kívüli számítógéphez volt csatlakoztatva a nyomtató. A nyomtatások megkezdése előtt mindkét alkalommal szűrt levegőt juttattak a kamrába állandó sebességgel legalább nyolc órán keresztül, hogy elérjék a kísérlet eredményességéhez szükséges levegőtisztaságot és nyomást. Nyomtatás előtt a nyomtatóágyakat izopropil-alkohollal kezelték, vagy pedig a gyártó által előírt kis mennyiségű ragasztót vittek fel a nyomtatóágyra. Ezután a kamrát lezárták és megkezdték a nyomtatást. Egy 10 × 10 × 1 cm-es kis méretű tárgy készült mindkét esetben, amelyet a National Institute of Standards and Technology (NIST) tervei alapján gyártottak.³⁷ A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a hőre lágyuló műanyagok hőbomlásából származó emisszióknak való folytonos közvetlen kitettség hatással van mind az állatokra, mind pedig az emberekre.

A kísérlet során megmérték az illékony szerves vegyületek (VOC³⁸) kibocsátásának mértékét, számos aldehid, ftalát, benzol, toluol, etilbenzol és m-, p-xilol esetében. A mérési eredmények azt mutatták, hogy az ABS-filamenteket használó nyomtatók részecskékibocsátása sokkal magasabb, mint a PLA-filamentet alkalmazó nyomtatóké.

1971 óta évente megrendezik Svájc Davos városában a Genfben megalapított Világgazdasági Fórum csúcstalálkozóját, amelyen a világ legnagyobb politikai vezetői, elismert tudósok, közgazdászok és üzletemberek is részt vesznek. A 2019-es csúcstalálkozó egyik legfontosabb érintett témája az ipar környezetre gyakorolt hatása volt.

Annak érdekében, hogy a fenntartható termelés és a további technológiai fejlesztések kisebb környezetszennyezéssel járjanak, a fogyasztói társadalomban szükség van szemléletváltásra. Ahhoz, hogy a 3D-nyomatás környezetbarát módon elérhető legyen közösségi felhasználásra, szükség van bizonyos lépésekre. Szükség van egy egységes, mindenki számára elérhető és felhasználható adatbázisra, amelyben az összes eddig tervezett digitális alkatrész

³⁷ AZIMI et al. 2016: 2.

³⁸ VOC: volatile organic compounds. Szerves vegyületek, amelyek nagy nyomással és alacsony vízdoldhatósággal rendelkeznek, azaz illékonyak és nem oldódnak fel vízben. Gáz-halmazállapotban fordulnak elő, így szennyezve a levegőt.

és minta megtalálható, ugyanis ez csökkenti a tervezéssel töltött időt, ami kevesebb károsanyag-kibocsátást eredményez.

A hagyományos gyártástechnológiák napjainkban is számos területen előfordulnak, főleg a gépiparban és a gépjárműgyártásban, ugyanakkor számos területen egyre nagyobb népszerűségnek örvend a háromdimenziós nyomtatás és kezdi felváltani a hagyományos technológiákat.

A hagyományos gyártástechnológiák több munkafolyamatot öleltek fel, összefoglaló néven „elvevéses gyártásnak”, azaz *subtractive manufacturing*nek nevezik, ugyanis a gyártási folyamat összes fázisa során keletkezik hulladék anyag, amelyet nem használunk fel, és újrafelhasználása sem lehetséges. Ezzel szemben a 3D-nyomatás során minimális a hulladék anyagok keletkezése, valamint ezek nagy része újra felhasználható, ezzel is költséghatékonyabbá és környezetkímélőbbé téve az eljárást. Az egyre fejlődő technológia lehetővé teszi, hogy egyfajta nyomtatóval több anyagot is felhasználhassunk, ezzel a termékek előállítása is sokrétűbbé válik. Világszerte számos olyan nagyvállalat van, amelyek a hagyományos gyártástechnológiákról kezdenek áttérni a 3D-nyomatásra. 3D-nyomatással mindössze pár óra alatt kész modellt állítható elő, amely készen áll a tesztesésre, ennek köszönhetően sokkal gyorsabban, sokkal nagyobb mennyiségű alkatrészt képesek eladásra gyártani rövid időn belül.

A 3D-nyomatás biztonságtechnikai (munkavédelmi) vonatkozásai

Az utóbbi 10 évben jelentősen megnőtt a nyomtatás során alkalmazható alapanyagok száma, így a hagyományos műanyagok mellett megjelent a porcelán, acél, üveg és a fa is. Az asztali 3D-nyomtatók alkalmazása során kockázatot jelenthet a nyomtató nagy mennyiségű ultrafinom szemcsék (100 nm-nél kisebb részecskék), illetve egyes veszélyes illékony szerves vegyületek (VOC-k) kibocsátása.³⁹

Az ipari és az otthoni nyomtatás során alkalmazott alapanyagok eltérnek egymástól. Az otthon biológiai úton lebomló PLA mellett leggyakrabban használt alapanyag az olajalapú, ezért használat közben inkább toxikus (a kibocsátott anyagnak tüdőkárosító hatásuk van) ABS.⁴⁰ A PLA használata esetén a szellőztetés ajánlott, az ABS esetén pedig szükséges.⁴¹ Ipari használat esetén leggyakrabban poliamidot (például nejlont) használnak folyékony vagy por formában, ami olajalapú, melegítése során mérgező füstgáz szabadul fel, ezért a szellőztetés szükséges. Egyes nyomtatók köré burkolatot építenek, amely megakadályozza a mérges gázok munkahelyi környezetbe jutását.

A sztereolitográfiában és a nyomtatott tárgyak felületkezelésére műanyag vegyszereket (például epoxi gyantákat) használnak, amelyek allergiás kontakt bőrgyulladást okozhatnak. Az alkalmazott (nem hőkezelt) műanyag vegyszerek megérintése tilos, valamint meg kell előzni a felületek és ruházat szennyeződését is. Az utólagos feldolgozáshoz és felületkezeléshez használt más vegyszerek szintén veszélyesebbek lehetnek, ezért azokat óvatosan kell kezelni.

³⁹ AZIMI 2016: 2.

⁴⁰ GILPIN 2014.

⁴¹ PLA Filament Types: The Best Special Blends, lásd: <https://all3dp.com/1/pla-filament-3d-printing/>

A por alakú poliamidot esetenként alumíniummal keverik (alumid), kevésbé toxikus, de a használata biztonsági és egészségmegővő intézkedéseket igényel. Az iparban gyakran alkalmaznak a poliszulfont (PSU) és a polifenil-szulfont (PPSU), amelyek a szellőztetés és kezelés szempontjából egyaránt biztonsági intézkedéseket igénylő szintetikus műanyagok.⁴²

Fémek használata esetén kiemelten fontosak a szellőztetéssel kapcsolatos intézkedések, mivel a fémeket olajalapú szintetikumokkal kombinálják. A nyomatás során a magas hőmérsékletek szintén biztonsági és kezelési intézkedéseket igényelnek. Figyelembe kell venni, hogy a fémnyomatás során alkalmazott anyagok rákkeltők lehetnek, valamint hogy emiatt a porok kezelése során légzésvédelmet kell alkalmazni.⁴³

A por formában levő anyagok nyomatása esetén fontos a porok terjedésének megelőzése füstgáz- és porszivás alkalmazásával. A fémporok öngyulladásának veszélye is fennáll, amelyet figyelembe kell venni robbanásveszélyes térben alkalmazandó különleges minősítésű eszközök használatával.

A 3D-nyomatás egészségügyi vonatkozásai

3D-nyomatás egészségügyi kockázataival kapcsolatos kutatások és vizsgálatok jelenleg is folyamatosan zajlanak, és fejlesztés alatt állnak a 3D nyomatóeszközök közelmúltbeli gyors elterjedése miatt. 2017-ben az Európai Munkahelyi Biztonsági és Egészségvédelmi Ügynökség tanulmányt adott ki a 3D-nyomatás folyamatairól és anyagairól, a technológia lehetséges következményeiről a munkahelyi biztonságra és egészségvédelemre, valamint a lehetséges veszélyek ellenőrzésének módjairól.

Az additív gyártástechnológiák elterjedése óta folyamatosan bővül azoknak a szakterületeknek a köre, amelyek használják a 3D nyomatóeszközöket. A gépjárműipar, a repülőgépipar, a fogászat és fogtechnika rendkívül széles skálán alkalmazza a gyártástechnológiában alkalmazott eszközöket. A technológiák folyamatos fejlődése egyre több lehetőséget biztosít más iparágak és szakterületek számára is, hogy fejlesszék saját szakterületüket, valamint kihasználják a 3D-technológiák által biztosított előnyöket.

Fogászati felhasználás esetén a páciens fogsoráról egy digitális lenyomatot készítenek 3D-szkennerrel. A szkennerhez csatlakoztatott számítógépen azonnal megjelenik a fogsor teljes 3D-s modellje, CAD tervezőprogram segítségével elkészíthető a páciens fogsorához tökéletesen illeszkedő fogpótlás. A tervezést követően 3D-nyomató segítségével elkészítik a személyre szabott modellt. A fogászati nyomatók pontosabbak más műszaki területeken üzemelő nyomatókhoz képest, akár 16 mikrométeres rétegeket is képesek nyomtatni, ami rendkívül pontos, bonyolult és egyedi formák gyártását is lehetővé teszi. A fogtechnikában a 3D nyomatási technológiák fém nyomatási ágát alkalmazzák. A legismertebb eljárás a *laser metal fusion* (LMF, lézeres fémfúzió), amelyet *selective laser melting* (SLM, szelektív lézeres olvasztás) és *powder bed fusion* (PBD, porágyús fúzió) néven is neveznek. Ezen eljárás során

⁴² Lásd: www.ensingerplastics.com/hu-hu/felkesz-muanyag/nagyteljesitmenyu-muanyagok/psu

⁴³ European Agency for Safety and Health at Work 2019.

a nyomtató lézer segítségével fémporból, rétegről rétegre állítja elő a modellt. Rendkívül pontos munkadarab készíthető ezzel az eljárással, a fogászati implantátumok elkészítéséhez alkalmazzák. A 3D-nyomtató csak annyi fémport dolgoz fel, amennyire valóban szüksége van a modell elkészítéséhez, a felhasználók anyagot és pénzt takaríthatnak meg. Az előállítás közben feleslegként levált port a nyomtatási folyamat után újból fel lehet használni.

A 3D-nyomatást nem csak a fogászatban alkalmazzák, megjelent az orvostudományok egyéb területein is. Emberi szervek modellezésére is alkalmazható egy-egy műtét előtt, így a sebész pontosan fel tud készülni az adott műtetre, ez elősegíti a megfelelő bemetszési pont és a megfelelő eljárás megválasztásában, valamint bizonyos mértékig lehetőség van a műtét megtervezésére.

A röntgen a mai napig alkalmazott módszer a csontozat megvizsgálására, ugyanakkor a röntgen csak kétdimenziós képet tud alkotni, csak a sugárzás vetületi pontjából vizsgálható a csontozat. Ilyen kétdimenziós képalkotási módszerekkel, ha több irányból vizsgáljuk az adott szervet vagy csontot, akkor a számítógépes tervezőprogram segítségével megalkothatjuk a háromdimenziós modellt. A betegekről CT- vagy MR-technológiával készült felvételeket felhasználva a 3D-nyomtatókkal tökéletes, akár életnagyságú és élethű modelleket is alkoshatnak, amely lehetővé teszi a műtetre való alapos felkészülést, jelentősen növelve az orvos magabiztosságát, és csökkentve a váratlan helyzetek kialakulásának valószínűségét. Az orvostudományban használt DICOM-⁴⁴ fájlok konvertálhatóak STL-fájlokká, így 3D-nyomtatóval elkészíthető a kívánt modell.⁴⁵

Az FDM-technológia lehetővé teszi, hogy pontosan illeszkedő pótlást (csontpótlást) készítsenek a páciensnek személyre szabottan. Probléma, hogy a 3D-nyomtatók nem biokompatibilis anyagokkal dolgoznak, hanem biológiailag lebomló műanyagokkal, így a modell emberi szervezetbe történő beültetésre nem alkalmas. Ugyanakkor az elkészült modell szolgálhat mintának további munkafolyamathoz, például a modellt szilikonnal bevonva öntőformát hozhatunk létre, amelybe ha csontcementet helyezünk, akkor beültetésre alkalmas csontpótlást készíthetünk. 3D-fémnyomtatók bizonyos fajtái orvosi titánnal is képesek nyomtatni, amely hatékonyabb és sterilebb, mint a forgácsolási módszereken alapuló eljárások. Sokkal pontosabb pótlások készíthetőek 3D-fémnyomatással, amelyek könnyebben beépülnek a páciens csontszövetébe, ezzel csökkentve a kilökődés és a fertőzés veszélyét. A speciálisan készített titán csontpótlásokat bevonják egy biokerámia réteggel, így egy beültethető és anatómiailag megfelelő implantátumot elkészíthetünk 3D-nyomtatással teljes egészében.

3D-nyomatáshoz orvostudományi felhasználásra alkalmas anyagokat is előállítanak, amelyek gyártásánál figyelembe kell venni, hogy biokompatibilisek legyenek, vagyis, hogy az emberi szervezettel érintkezve ne okozzanak a gazdatestnek reakciót. Az orvostechnikai eszközök és anyagok tervezésénél és gyártásánál alkalmazni kell az ISO 13485 szabványt.

⁴⁴ DICOM: Digital Imaging and Communication in Medicine. Orvosi információk, mint például az ultrahang, CT- és MR-felvételek, valamint a páciens információi egy fájlban tárolhatók. A formátum biztosítja, hogy az összes adat és kép egy fájlban maradjon.

⁴⁵ Hogyan készül 3D nyomtatható modell CT- és MRI-felvételekből? – desktop 3D nyomtatók az egészségügyi 3D nyomtatás szolgálatában, lásd: <https://bit.ly/40jckPe>

A 3D-nyomatató iparág számos előnnyel rendelkezik, ugyanakkor egészségügyi veszélyeket is rejt magában. A 3D-nyomatáshoz alkalmazott anyag fajtájától eltekintve minden típusú 3D-nyomatató bocsát ki gázokat és finom porokat. Ezek belelegezve bekerülnek az emberi tüdőbe, ahol a mindössze néhány mikronnyi szemcsék lerakódnak. Ezek a tüdő teljes területén képesek lerakódni, különféle gyulladásokat okozva. Nagy dózisban ezek az anyagok mérgezési tüneteket okoznak az érintett személyeknél.

A legkárosabbak a műanyagokból származó anyagok, ugyanis háztartásban ritkán található 3D-fémnyomatató, háztartásokban inkább a 3D műanyag nyomatatókat alkalmazzák. Az egyik ilyen káros anyag az ABS, azaz akrilnitril-butadién-sztirol. Az ABS ütésálló, nagy keménységgel és szilárdsággal rendelkező, vegyszerálló, hőre lágyuló műanyag. Három fő alkotóelemből áll, az akrilnitrilnek köszönhetően az anyag rendkívül nagy keménységgel rendelkezik, a sztirol biztosítja a feldolgozhatóságot, a butadiénnek köszönhetően pedig alacsony hőmérsékleten keményedik az anyag. Felhasználása sokrétű, mindennapi használatú háztartási cikkekben is fellelhető. A mobiltelefonok külső burkolata, biztonsági sisakok és gyermekjátékok alapanyaga.

A másik káros anyag a politejsav néven ismert PLA. Biológiai úton lebomló, hőre lágyuló műanyag. Magas keményítőtartalmú gabonafélékből állítják elő, mint például a kukorica, a rizs vagy a búza. E növények tejsavas erjesztésével és polikondenzációval nyerhető ki a politejsav. Leggyakoribb felhasználási területe az egyszer használatos műanyagok előállítása, vagy hétköznapi használatra gyártott egyszerűbb háztartási kellékek, például tálca, virágcserep.

Számos fejlesztés köthető a politejsavhoz, kísérletek folynak a politejsav szálanyag-kénti gyártására, ugyanis ezek széles körben felhasználhatók lennének a textil- és ruházati, valamint egészségügyi anyagok gyártásánál, ugyanakkor biológiailag lebomló hulladékot eredményeznének.

3D-nyomatatók beltéri használata csak megfelelő szűrőberendezések mellett javasolt.⁴⁶ A károsanyag-kibocsátás így sem kerülhető el teljes mértékben, ugyanakkor csökkenthető a mennyisége. A 3D-nyomatatók által kibocsátott káros anyagokkal történő nagymértékű és gyakori érintkezés eredményeképpen felléphetnek tüdő-, vér- és idegrendszeri betegségek, súlyosabb esetben vagy a kialakult betegségek kezelésének hiányában halálhoz is vezethet.

Összefoglalás

A környezetszennyezés napjainkra hatalmas mértéket öltött, amelynek visszafordítása nehéz és költséges folyamatok árán lehetséges. Minden alkalommal, amikor megjelenik egy új technológiai eszköz, a kutatások hosszú sorára van szükség azért, hogy felismerjük a technológiához köthető hibákat. A 3D nyomtatási technológia alkalmazásának széles a skálája, megjelent az otthoni hobbi szintű felhasználásban és az ipari technológiában is. A 3D-nyomatás után érdeklődik a hadiipar, emellett alkalmazása szerephez juthat a katonai felsőoktatásban is.⁴⁷ A 3D-nyomatatók otthoni felhasználása számos egészségügyi veszélyforrást rejt magában, mivel

⁴⁶ DUNN et al. 2018.

⁴⁷ GYARMATI–HEGEDŰS–GÁVAY 2022 és VÉGVÁRI–ZENTAY–HEGEDŰS 2022.

nem megfelelő körülmények között történő használata az egészségre káros hatással lehet. Az alkalmazott anyagok köre lehetővé teszi, hogy számos feladatnak és igénybevételnek megfelelő termékeket állítsunk elő, ugyanakkor legtöbbjük káros a környezetre. A 3D-technológia szélesebb körű alkalmazásával, és terjedésével egyre jobban jelentkezik az igény a környezet-szennyezési és egészségre káros hatások feltérképezésére.

A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a Tématerületi Kiválósági Program 2021 TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- All3DP (2019): *Resin 3D Printing. The Ultimate Guide*. Online: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
- AZIMI, Parham et al. (2016): Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. *Environmental Science & Technology*, 50(3), 1260–1268. Online: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04983>
- CAROLO, Lucas (2022): *What is FDM 3D Printing? – Simply Explained*. 2022. június 8. Online: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- DUNN, Kevin L. et al. (2018): Characterizing 3D Printing Emissions and Controls in an Office Environment. *Centers for Disease Control and Prevention*, 2018. augusztus 16. Online: <https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2018/08/16/3d-printing/>
- EMBER István – ÁBÁM Balázs (2022): Kumulatív töltetházak 3D nyomtatása. *Hadmérnök*, 17(3), 35–44. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2022.3.2>
- European Agency for Safety and Health at Work (2019): *3D Printing and Additive Manufacturing – The Implications for OSH*. Online: <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/3d-printing-and-additive-manufacturing-implications-osh>
- GÁL Bence – NÉMETH András (2019): Additív gyártástechnológiák katonai alkalmazásának vizsgálata, különös tekintettel a katonai elektronika területére. *Hadmérnök*, 14(1), 231–249. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2019.1.19>
- GILPIN, Lyndsey (2014): The Dark Side of 3D Printing: 10 Things to Watch. *TechRepublic*, 2014. március 5. Online: www.techrepublic.com/article/the-dark-side-of-3d-printing-10-things-to-watch/
- GRAMES, Emmett (2019): SLA vs SLS: The Differences – Simply Explained. *All3DP*, 2019. május 1. Online: <https://all3dp.com/2/sla-vs-sls-3d-printing-technology-shootout/>
- Guide to Rapid Prototyping for Product Development*. Online: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-rapid-prototyping/>
- GYARMATI József et al. (2016): Védelmi célú kutatások a Hadtudományi és Honvédtisztviselői Katonai Haditechnikai Tanszéken, együttműködésben a HM Védelemgazdasági Hivatallal. *Hadtudomány*, 26(3–4), 89–99. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2016.26.3-4.89>
- GYARMATI József et al. (2018): A katonai felsőoktatás részvételének lehetőségei a kutatás-fejlesztési folyamatokban. *Műszaki Katonai Közlöny*, 28(1), 193–208. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/1755/1061>
- GYARMATI József – HEGEDŰS Ernő – GÁVAY György (2022): Automata sebességváltóban alkalmazott kapcsolt bolygóművek – Wilson váltó: Harckocsi-sebességváltó modellt kialakítása 3D nyomtatással oktatási célból. *Műszaki Katonai Közlöny*, 32(3), 113–126. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2022.3.7>

- HAINES, Justin (2022): History of 3D printing: When was 3D printing invented? 2022. április 29. Online: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- HOPKINSON, Neil – HAGUE, Richard – DICKENS, Philip M. (2006): *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. [H. n.]: John Wiley & Sons. Online: <https://doi.org/10.1002/0470033991>
- HORVÁTH Ádám – KURUCZ Attila (2017): A 3D nyomtatás története és jövőbeli kérdései. In REISINGER Adrienn – KECSKÉS Petra (szerk.): „Ifjúság – jövőképek”: Kautz Gyula Emlékkonferencia 2016. június 15. elektronikus formában megjelenő kötete. Győr: Széchenyi István Egyetem. Online: https://kgk.sze.hu/images/dokumentumok/kautzkiadvany2016/HorvathA_KuruczA.pdf
- KRASSENSTEIN, Brian: *What is 3D Printing & How Do 3D Printers Work? – A Guide*. 2015. július 18. Online: <https://3dprint.com/82272/what-3d-printing-works/>
- LEINSTER, Murray (1945): *Things Pass By*. [h. n.]: [k. n.]. Online: <http://technovelgy.com/ct/content.asp?Bnum=2445>
- NÉMETH, András – SZABÓ, András – BALOG, Ferenc (2020): 3D Virtualisation and Visualisation Technologies for Archiving the Results. In HAUSNER, Gábor – NÉMETH, András (szerk.): *Zrínyi-Újvár: A Seventeenth-Century Border Defence System on the Edge of the Ottoman Empire*. Budapest: Ludovika, 225–268.
- SINGH, Rajender (2006): *Introduction To Basic Manufacturing Processes And Workshop Technology*. New Delhi: New Age International. Online: <https://blogpuneet.files.wordpress.com/2013/07/introduction-to-basic-manufacturing-processes-and-workshop-technology.pdf>
- SZABÓ Gábor (2017): Industry 4.0. Egy forradalom küszöbén. Online: <https://pte3d.hu/hirek/index.php?s=2018-01-10-industry-4-0-egy-forradalom-kszbn>
- VÉGVÁRI Zsolt – ZENTAY Péter – HEGEDŰS Ernő (2022): A 3D nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I. rész. *Haditechnika*, 6, 56–60.
- When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing*. 2020. május 15. Online: www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/