

Daruka Norbert,¹ Dénes Kálmán,² Kovács Zoltán,³ Vég Róbert,⁴
Ember István⁵

Az additív gyártástechnológia térnyerésének munkavédelmi kérdései⁶

Occupational Safety and Health Issues Related to the Take-Up of Additive Manufacturing

A digitális technológia fejlődésének hatására mára már mindenütt megtalálhatók az additív gyártástechnológia különböző típusú és funkciójú 3D-nyomatói. Mivel a 3D-nyomatás egyre népszerűbb és szinte mindenki számára elérhető, nagy mennyiségben jelennek meg különböző formájú, méretű és funkciójú alkatrészek, kiegészítő elemek. Jelenleg a felhasználók többsége kizárólag a pozitív eredményekkel és felhasználási prioritásokkal foglalkozik, és csak nagyon kevesen foglalkoznak azzal a ténnyel, hogy maga a technológia alkalmazása egészségügyi kockázatokat is hordoz magában. Cikkünkben a lehetséges egészségügyi kockázatokat vizsgáljuk, nemcsak a szervezeten foglalkoztatott munkavállalók, hanem a teljes felhasználói szektor tekintetében.

Kulcsszavak: additív gyártástechnológia, 3D-nyomatás, munkavédelem, egészségügyi kockázatok

With the development of digital technology, printers with different types and functions of additive manufacturing technology are now ubiquitous. As 3D printing is becoming more and more popular and accessible to almost everyone, parts and accessories of different shapes, sizes and

¹ Robbanóanyag-ipari szakmérnök, e-mail: daruka.norbi@gmail.com

² Építőmérnök, e-mail: denes.kalman.1975@gmail.com

³ Egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Műveleti Támogató Tanszék, e-mail: kovacs.zoltan@uni-nke.hu

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

⁵ Tanársegéd, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Műveleti Támogató Tanszék, e-mail: ember.istvan@uni-nke.hu

⁶ A cikk a 2022-2.1.1-NL-2022-00012 számú „Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratórium” projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási és Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Laboratóriumok pályázati program finanszírozásában valósult meg.

functions are appearing in large quantities. At present, the majority of users are concerned only with the positive results and priorities for use, but very few are concerned with the fact that the use of the technology itself carries health risks. In this article, we look at the potential health risks, not only for the workers employed in the organisation, but for the whole user sector.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, occupational health and safety, health risks

Bevezetés

A digitális technológia robbanásszerű fejlődése és egyre nagyobb mértékű térnyerése innovatív és széles spektrumú fejlesztési lehetőségeket tesz elérhetővé, mindemellett korábban még nem ismert kihívásokat teremtett a különböző munkaterületeken. Az új, digitális alapokon nyugvó technológiák esetében ki kell használnunk azokat az előnyöket, amelyek a munkavédelem szempontrendszer szerint már nem jelentenek veszélyt a szervezett munkavégzés keretében foglalkoztatottakra. Ezzel egy időben viszont fel kell tárunk azokat a veszélyforrásokat, amelyek a munkakörnyezet biztonságosságára hatást gyakorolnak. A digitális technológia megfelelő és észszerű alkalmazásával csökkenthetők a foglalkoztatásból eredő egészségkárosító kockázatok, illetve javíthatók a szervezett munkavégzést befolyásoló munkakörülmények is.

A mobil technológiák, az online felületek és többek között a robotika eszközrendszerén keresztül folyamatosan változik a munkavégzés jellege, helye, valamint az is, hogy ki és mikor dolgozik. Ebben a rendszerben eléggé nehéz megszervezni magának a munkavégzésnek a felügyeletét, ellenőrzését. Jó példa volt erre a vilávjárvány idején számos helyen megvalósított *home office*, ahol a szervezett munkavégzés ugyan megvalósult, de annak a felügyelete és ellenőrzése még a mai napig is komoly kihívások elé állítja a munkáltatókat. A technológia fejlett és tovább fejlődő eszközrendszerén keresztül nagyon nehéz megvalósítani, illetve koordinálni az egészséges és biztonságos munkavégzés feltételeit.

A digitális technológia talán egyik legnagyobb potenciált rejtő területe a mesterséges intelligencia, amely a robotika elemeivel ötvözve intelligens, együttműködő és mindemellett mobil eszközöket foglal magába. Ezek a gépek már nemcsak fizikai, hanem kognitív értelemben is helyettesíthetik a munkavállalókat, ezzel is csökkentve a munkakörnyezet veszélyeinek való kitettségüket. Emellett természetesen az is fontos szempont lehet, hogy az emberi szervezetet érő munkahelyi terhelés hiánya is éppolyan káros elemeket hordozhat magában, mint a fizikális vagy a mentális túlterheltség. Az is elgondolkodtató, hogy néhány fejlettebb üzem területén a munkafolyamatok felügyeletét már technológiai eszközök, illetve az azokhoz megalkotott algoritmusok látják el. Félve tesszük fel a – néhány éve még csak *science fiction*-be illő – kérdést: Mi lesz, ha a jövőben az emberi tevékenységet (szervezett munkavégzést) intelligens gépek fogják irányítani?

Additív gyártástechnológia

Az additív gyártás⁷ olyan technológiai folyamat, amelynek segítségével rétegről rétegre történő anyaghozzáadással háromdimenziós tárgyakat hozhatunk létre. Az említett anyag lehet műanyag, fém, beton vagy egyes elképzelések szerint egy nap akár élő szövet is. Ha a mai technológiai lehetőségeket vesszük figyelembe, akkor egyértelműen kijelenthető, hogy a formatervezés határozza meg a gyártást. A megfelelő tervezőszoftver segítségével digitális formában elkészíthetünk szinte bármilyen háromdimenziós alakzatot, amelyet a megfelelő nyomtatók segítségével rétegenként lehet felépíteni.

Ez az új gyártástechnológiai eljárás határtalan lehetőségeket hordoz magában, nem véletlen, hogy az utóbbi években robbanásszerű a technológia elterjedése. Maga a gyártástechnológiai eljárás nem új keletű, hiszen az ötlet maga már az 1970-es években megfogalmazódott.⁸ David Edward Hugh Jones – Daedalus néven publikáló kémikus és író – ugyanis 1974-ben a *New Scientist*⁹ folyóiratban már ismertette elképzeléseit. Egy évtizeddel később Chuck Hull, a 3D Systems alapítója is foglalkozott a témával, és 1986-ban az ő közreműködésével fejlesztették ki a sztereolitográfia¹⁰ – vagyis a tartályos fotopolimerizáció –, SLA-technológiát, amely a 3D-nyomtatási technológia egyik formája. A technológiai folyamatban folyékony állagú fotopolimert alkalmaznak a 3D-nyomtatóban, majd UV-lézerrel megkeményítik a réteget, így alakítják ki a kívánt alakzatot.

Szinte az SLA-nyomtatási eljárással egy időben fejlesztette ki Carl Deckard és Joe Beaman a szelektív lézeres szinterezést, az SLS-technológiát¹¹ az Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma kutatási és fejlesztési ügynökségének¹² támogatásával. A technológia leglényegesebb eleme, hogy lézert használ energia- és hőforrásként porított anyagok (például nylon vagy poliamid) szinterezéséhez. Maga a lézer automatikusan a tér 3D-s modellje által meghatározott pontjaira van irányítva, ami ott megolvastja az anyagot, majd annak megszilárdulását követően jön létre a megtervezett szerkezet.

Nem sokkal később egy harmadik technológia is megjelent a 3D-nyomtatás történetében, amelyet Steven Scott Crump és felesége Lisa Crump fejlesztett ki¹³ az általuk 1989-ben alapított minnesotai Stratasys nevű vállalatnál. Az eljárás az olvasztott leválasztásos modellezés,

⁷ *Additive manufacturing.*

⁸ ELLAM 2016: 53.

⁹ Népszerű tudományos magazin, amely a tudomány és a technológia minden aspektusát lefedi. A *New Scientist* első kiadása 1956. november 22-én jelent meg. A magazin 1996 óta elérhető online formában is.

¹⁰ SLA – *stereolithography*: fotokémiai eljárás, amelyben a fény hatására a kémiai monomerek és oligomerek térhálósodnak egymással, és polimerek keletkeznek. A szakirodalomban optikai gyártásnak, fotoszilárdításnak vagy gyantanyomtatásnak is nevezik.

¹¹ SLS – *selective laser sintering.*

¹² Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA) a katonai felhasználásra szánt új technológiák fejlesztéséért felelős szervezet.

¹³ A cégtörténet szerint Scott 1988-ban játék békát akart készíteni kislányának polietilén és gyertyaviasz keverékével töltött ragasztópisztollyal. Az elképzelés csak úgy működött, hogy rétegről rétegre hozta létre az alakzatot. A játék olyan jól sikerült, hogy feleségével azon elmélkedett, hogyan automatizálja a folyamatot.

vagyis az FDM – *fused deposition modeling*¹⁴ volt. Az FDM-technológia során egy műanyag huzal olvasztásával és irányított kipréselésével építik fel a modellt, rétegről rétegre.

Látható tehát, hogy a 3D-nyomatás mint technológia éppen fél évszázada fogalmazódott meg, és több évtizede folyamatosan fejlődik. A technológia első generációs gépei kezdetben nagyon drágák és nehezen kezelhetők voltak, alkalmazásukra is csak az ipari szektorban volt lehetőség. Ennek ellenére elterjedése forradalmasította az ipart és csökkentette a termékfejlesztés időszükségletét és természetesen annak költségét is.

Az ipari szektorból történő kilépést az MIT doktoranduszainak, Tim Andersonnak és Eden Prairie-nek köszönhetjük. A két fiatal kutató egy tintasugaras nyomtatót alakított át olvasztásos technológiára 1995-ben. Ettől az időponttól beszélhetünk arról a 3D-nyomatási technológiáról, amelyet ma közvetlenül is használhatunk, akár szervezett munkavégzés keretében, akár magáncélú felhasználóként. Nem véletlen, hogy magát a 3D-nyomatást mint fogalmat is ettől az időponttól értelmezzük.

Kezdetben a módszert prototípusgyártásra használták, azonban az elmúlt évek robbanásszerű elterjedésének és a technológia fejlődésének köszönhetően ma már kész alkatrészt, terméket is gyártanak ezzel a technológiával. Kijelenthető, hogy az additív gyártástechnológia alkalmazása nem ismer határokat, hiszen alkatrészeket – légi, vízi, illetve szárazföldi felhasználásra – éppúgy sorozatszerűen gyártanak, mint személyre szabható orvosi implantátumokat (fogpótlásokat) vagy divattermékeket.

A 3D-nyomatás munkavédelmi aspektusai

Magyarország Alaptörvénye mint elsődleges jogforrás foglalja össze az államszervezetre vonatkozó alapvető szabályokat, illetve tartalmazza azokat a jogokat és kötelezettségeket, amelyek minden magyar állampolgár számára kötelező érvényűek.¹⁵ Az Alaptörvény XVII. cikkelyének (3) bekezdése szerint: „Minden munkavállalónak joga van az egészségét, biztonságát és méltóságát tiszteletben tartó munkafeltételekhez.” Magára a munkavégzésre vonatkozó, úgynevezett részletekbe menő meghatározásokat a munkavédelmi törvény ismerteti. A munkavédelmi törvény rendelkezései szerint a munkavédelem nem más, mint: „Az egészséget nem veszélyeztető és biztonságos munkavégzés személyi, tárgyi, szervezeti feltételeinek szabályozása a szervezetten munkát végzők, az egészséges és munkavégző képesség megőrzése, munkakörülmények humanizálása, a munkabalesetek és foglalkozási balesetek megelőzése érdekében.” A törvény értelmében az egészséges és biztonságos munkavégzés érdekében az állam meghatározza a munkáltatók és a munkavállalók jogait és kötelezségeit, valamint ebbe a tevékenységbe az érdeképviseletek érintett elemeit is bevonja. Az állam egyúttal a törvényi szabályozás betartásának érdekében, illetve az egészséget nem veszélyeztető és biztonságos munkavégzés feltételrendszerének megteremtése okán felügyeleti szerveket is létrehozott,

¹⁴ FFF – 3F – *fused filament fabrication*: olvasztott filament gyártás megnevezéssel is olvashatunk róla.

¹⁵ Magyarország Alaptörvénye R cikk, (2) bekezdés.

amelyek segítik és ellenőrzik a törvényi előírásokat, azok be nem tartását pedig szankcionálja.¹⁶ A munkavédelmi törvény értelmében a munkavédelem a szervezett munkavégzésre vonatkozó munkaegészségügyi, illetve munkabiztonsági követelmények összessége, továbbá a jogszabályban meghatározott célok megvalósítására szolgáló törvénykezési, szervezési, intézményi előírások rendszerét, valamint mindezek végrehajtását hivatott foganatosítani. Az említett munkaegészségügyi követelmények vonatkozásában a munkakörnyezeti kóroki tényezők feltárása, a munkaköri alkalmasság tényének megállapítása és időszakos ellenőrzése, illetve a munka és a munkakörnyezet hatásainak munkavállalót érintő megterhelésének megállapítása a feladata. Az említett tevékenységek kizárólag a foglalkozás egészségügy feladatrendszerébe tartoznak. A területen tevékenykedő munkavállalók védelme azonban nem tekinthető teljesnek, mivel a munkaegészségügy másik területét, a munkahigiénét érintő kockázati tényezőket még nem állapították meg. A publikáció témáját figyelembe véve a munkahigiéné feladatkörébe tartozik – a szervezett munkavégzés tekintetében – 3D-nyomtatás munkakörnyezetében a kóroki tényezők méréséhez, illetve kimutatásához szükséges módszerek kidolgozása. Továbbá a munkahigiéné feladatkörébe tartozik, hogy az additív gyártástechnológiát alkalmazó üzem vagy létesítmény kialakításakor megállapítsa a várható egészségkárosító kockázatokat. Ebből adódóan elengedhetetlen és szükséges, hogy minőségi és/vagy mennyiségi alapon jellemezze magát a munkakörnyezetet, illetve az additív gyártástechnológiával történő termék gyártását, illetve a 3D-nyomtatás alkalmazásához szükséges anyagokat, vegyületeket. Szintén a munkahigiéné feladatkörébe tartozik, hogy a rendelkezésre álló információk (szabványok, kockázatbecslések, technológiai leírások stb.) alapján az egészséget nem károsító, az adott munkahelyhez kötött higiénés határértékeket állapítson meg, és a munkafolyamatok egyes részeire és a teljes gyártási tevékenység munkaegészségügyi biztosítására megelőző stratégiát dolgozzon ki. A munkahigiéné feladata, hogy a szakterülethez köthető feladatok végrehajtásának érdekében a hatósági felügyeletet is gyakorolja.¹⁷

A munkavédelmi törvény rendelkezéseinek maradéktalan teljesülése érdekében szükséges a szervezett munkavégzés keretében megvalósuló additív gyártástechnológia munkakörülményeinek és a munkavégzés szabályainak meghatározása, amelyek a munkabiztonság teljesülésének feltételei. A munkabiztonság teljesülésének alapfeltétele, hogy a 3D-nyomtatással történő gyártás minden munkafolyamatánál megelőzzük a balesetek kialakulásának lehetőségét. Természetesen tökéletes, balesetmentes munkahely nem létezik, így, ha egy baleset már bekövetkezett, annak teljes körű kivizsgálása, illetve a megfelelő intézkedések foganatosítása elengedhetetlen annak érdekében, hogy az még egyszer ne ismétlődhessen meg.

Az additív gyártástechnológia szempontjából a munkabiztonság a gyártóüzem környezetét (az ott tartózkodókat), a gyártás közvetlen helyszínét, a gyártóberendezéseket (3D-nyomtatókat, technikai berendezéseket), az alkalmazott technológiákat és természetesen a munkavállalók kollektív és egyéni védelmének eszközeit foglalja magába. Fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy mindez, a jelenlegi szabályozás szerint kizárólag a szervezett munkavégzés keretében megfogalmazott követelmény. Tehát, ha maga a gyártás, nyomtatás nem szervezeten

¹⁶ 25/2024. (II. 14.) Korm. rendelet.

¹⁷ SZÉKELY 2021.

(munkáltató és munkavállaló kapcsolatrendszerben) valósul meg, akkor a törvényi szabályozásnak nincs relevanciája. Ez azért is fontos, mert a különböző kóroki tényezők és azok emberi szervezetre gyakorolt hatásai valójában függetlenek attól, hogy szervezeten foglalkoztatott munkavállalóról, vagy otthon a saját hobbijaként tevékenykedő személyről beszélünk.

A 1993. XCIII. törvény a munkavédelemről, Alapelvek 8. §-ában munkaegészségi és munkabiztonsági tevékenységgel kapcsolatban az alábbi szabályt fogalmazza meg:

„Jogszabály egyes feladatokat munkabiztonsági szaktevékenységnek, illetve munkaegészségügyi szaktevékenységnek minősíthet. A munkáltató a munkabiztonsági szaktevékenységnek minősített feladatokat csak külön jogszabályban meghatározott munkavédelmi, a munkaegészségügyi szaktevékenységnek minősített feladatokat pedig munkaegészségügyi [foglalkozásorvostan (üzemorvostan), munkahigiéne, közegészségtan-járványtan, megelőző orvostan és népegészségtan] szakképesítéssel rendelkező személlyel végezetheti.”

Az 5/1993. (XII. 26.) MüM rendelet a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról 4. §-ában leírtak szerint a meghatározott tevékenységet folytató és veszélyességi osztályba sorolt munkáltató létszámhoz és képesítési feltételekhez igazodóan köteles munkavédelmi (munkabiztonsági) szakképesítéssel rendelkező szakembert alkalmazni.¹⁸

Az additív gyártástechnológia egészségügyi kockázatai

Ahogy a bevezetőben is említettük, az additív gyártástechnológia mára az életünk részévé vált, és egyes kutatók úgy vizionálják, hogy a következő három évet is beleszámítva, 2027-re az eladott 3D-nyomtatók mennyisége meg fogja haladni az évi 8 millió darabot.¹⁹ Az eladott darabszámot természetesen nemcsak a technológiai fejlődés, hanem a felvásárlópiac is alapvetően befolyásolhatja. Utóbbi azért is bonyolult és komplex területként azonosítható, mert számos piaci szegmens hatásainak következményeként változik szinte napról napra.

A 3D-nyomtatás piaca az alábbi területek mentén vizsgálható:

- komponensek (hardver, szoftver, szolgáltatások);
- felhasználási terület (asztali 3D-nyomtató, ipari 3D-nyomtató);
- technológia (sztereolitográfia, olvasztott leválasztásos modellezés, elektronsugaras olvasztás, szelektív lézeres szinterezés, közvetlen fémlézeres szinterezés, polyjet stb.);
- nyomtatás, elektronsugaras olvasztás, lézer, fémléválasztás, digitális fényfeldolgozás, laminált tárgyak gyártása, egyéb;
- szoftver (tervezőszoftver, ellenőrző szoftver, nyomtatást vezérlő szoftver, szkennelő szoftver);

¹⁸ 1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről és az 5/1993. (XII. 26.) MüM rendelet a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról.

¹⁹ Grand View Research 2019.

- alkalmazás (prototípus-készítés, szerszámkészítés, funkcionális alkatrészek);
- anyag (mesterséges polimerek, fém, kerámia);
- régió (Észak-Amerika, Európa, Ázsia-csendes-óceáni, Dél-Amerika, MEA).

A piaci szegmenseket alapul véve, a különböző gyártók termékeit megvizsgálva és a hazai értékesítés prioritásaira tekintettel azt a következtetést tudjuk levonni, hogy a leggyakrabban használt alapanyagok:

- az *Akrilnitril-butadién-sztirol* (ABS):²⁰ jó ütésálló képességgel, nagy keménységgel és szilárdsággal, jó hőállósággal és vegyszerállósággal rendelkező, hőre lágyuló műanyag, amely az amorf polimerek közé sorolható;
- a *Politejsav* (*polylactic acid*, PLA):²¹ biológiai úton lebomló, hőre lágyuló műanyag, amelyet magas keményítőtartalmú gabonafélékből állítanak elő;
- illetve a kifejezetten 3D-nyomatáshoz alkalmazott *műgyanta* (*resin*): egy UV-ra keményedő folyékony műanyag, amelyet a sztereolitográfiai eljárások során alkalmaznak.²²

A felsorolt anyagok tekintetében megállapítható, hogy azok 3D-nyomatás során történő felhasználásakor olyan kockázatokkal kell számolnunk, mint például a nanorészecskéknek és az illékony szerves vegyületeknek²³ (VOC) való kitettség.²⁴ Annak ellenére, hogy az Európai Vegyianyag-ügynökség (ECHA) folyamatosan azon dolgozik, hogy mind uniós, mind nemzeti szinten megfelelő határértékeket állapítson meg egy adott anyag veszélyeinek vonatkozásában, számos országban nincs elfogadott munkahelyi expozíciós határérték (OEL) a nanorészecskékre.²⁵ A munkahelyi expozíciós határértékek olyan szabályozói értékek, amelyek a munkahely levegőjében előforduló vegyi anyagok tekintetében (az egészség szempontjából) biztonságosnak tartott expozíciós szinteket jelzik. A nemzetközi szakirodalom egyes esetekben tartalmaz olyan referenciaértékeket, amelyek segítségével a 3D-nyomatás során keletkező nanorészecskék expozícióját értékelhetjük.²⁶

²⁰ A PLA alapvető tulajdonságait az alkotóelemek határozzák meg. A sztirol biztosítja a jó feldolgozhatóságot, az akrilnitril a keménységet, hőállóságot és a kémiai ellenálló képességet, a butadién pedig a rugalmasságot és az alacsony hőmérsékleten való keménységet. A különböző adalékanyagok hozzáadásával, illetve az arányában módosítható alkotóelemeknek köszönhetően eltérő, specifikus jellemzőkkel rendelkező 3D-nyomatási alapanyagok is létrehozhatók.

²¹ A PLA számos szerves oldószerben oldódik, így ezeket az oldószereket alkalmazzák a 3D-nyomatókban az extruderfejek tisztítására.

²² A fényérzékeny gyanta lézerrel vagy fényvel keményíthető.

²³ Illékony szerves vegyület (VOC – *volatile organic compound*): bármely, normál szobahőmérsékleten nagy gőznyomással rendelkező szerves vegyület, amelynek forráspontja nem éri el a 250 °C-ot, ami nagyszámú molekula elpárolgását és a környező levegőbe való bejutását okozza.

²⁴ BYRLEY et al. 2019: 395–407; GU et. al 2019: 476–485; KWON et al. 2017: 10357–10368.

²⁵ Munkahelyi expozíciós határérték (OEL – *occupational exposure limit*): olyan szabályozói érték, amely a munkahely levegőjében előforduló vegyi anyagok tekintetében (az egészség szempontjából) biztonságosnak tartott expozíciós szinteket jelzi. Magyarországon a határértékeket az 5/2020. (II. 6.) ITM rendelet a kémiai kóroki tényezők hatásának kitett munkavállalók egészségének és biztonságának védelméről tartalmazza.

²⁶ GARCIA-GONZALEZ – POLA 2023: 195–211.

Illékony szerves vegyületek

Az illékony szerves vegyületek bizonyos szilárd vagy folyékony anyagokból gáz formájában szabadulnak fel. Ezek a gázok olyan vegyi anyagokat tartalmazhatnak, amelyek rövid vagy hosszú távon káros hatással lehetnek az emberi szervezetre. Befolyásoló tényező az is, hogy az illékony szerves vegyületek koncentrációja akár tízszer magasabb lehet a beltéri helyiségekben, mint a kültéren. Ez a 3D-nyomtatás esetében fokozottan jelentkezik, hiszen az előzőekben már említett alapanyagokat használó technológia elhelyezése szinte kivétel nélkül zárt helyiségekben történik. Az illékony vegyi anyagokat kibocsátó termékek darabszáma több ezerre tehető az Egysült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) szerint.²⁷

Az EPA Kutatási és Fejlesztési Hivatalának *Teljes expozíció felmérési módszertan tanulmánya* I–IV. kötet már 1980-as években megállapította,²⁸ hogy körülbelül egy tucat gyakori szerves szennyező anyag szintje 2–5-ször magasabb a lakások belsejében, mint a kültéren, függetlenül azok elhelyezkedésétől. Ez azért is fontos, mert miközben az emberek (nem feltétlenül a munkavállalók) szerves vegyi anyagokat tartalmazó termékeket használnak a 3D-nyomtatási eljárás közben, nagyon magas szennyezőanyag-szinteknek tehetik ki magukat és környezetüket, ami a tevékenység befejezése után is hosszabb ideig megmaradhat a levegőben.

Az EPA az illékony vegyi anyagok esetében a következő besorolást alkalmazza:

- nagyon illékony szerves vegyületek (VVO, *very volatile organic compounds*) Forrásponttartomány: < 50–100 °C (például propán, bután és metil-klorid);
- illékony szerves vegyületek (VOC, *volatile organic compounds*) 50–100 °C < Tb²⁹ < 240–260 °C (például formaldehid, d-limonén, toluol, aceton, etanol [etil-alkohol], 2-propanol [izopropil-alkohol] és hexanal);
- félig illékony szerves vegyületek (SVOC, *semi-volatile organic compounds*) 240–260 °C < Tb < 380–400 °C (peszticidek – esetünkben lágyítószeres – vagy égésgátlók).³⁰

Hazánkban a 4/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről rendelkezik az említett szintekről, illetve határértékekről. A rendelet 3. §-a a légszennyező anyagokat az egészségre, valamint a környezetre gyakorolt hatásuk alapján – különösen veszélyes, fokozottan veszélyes, veszélyes, mérsékeltlen veszélyes – veszélyességi fokozatba sorolja.

Az additív gyártástechnológia vonatkozásában a jogszabályban a helyhez kötött légszennyező pontforrásokra történik utalás. Ennek értelmében a helyhez kötött légszennyező pontforrásokra:

- technológiai (általános, eljárás-specifikus) kibocsátási határértéket;
- integrált kibocsátáskezelés alapján megállapított kibocsátási határértékeket;

²⁷ US EPA O. 2024.

²⁸ *Total Exposure Assessment Methodology (TEAM) Study*. I–IV. 1985.

²⁹ Boyle-hőmérséklet. A Boyle–Mariotte-törvényt kísérleti tapasztalat útján alkották meg, ideális gázok speciális állapotváltozásainak leírására. Azt mondja ki, hogy adott gázmennyiség nyomásának és térfogatának szorzata állandó, ha a hőmérséklet nem változik.

³⁰ US EPA O. 2024.

- egyedi kibocsátási határértéket;
- ösztömögű kibocsátási határértéket kell alkalmazni, illetve megállapítani.³¹

Véleményünk szerint ezt a hazai jogszabály meglehetősen szigorú határértékekkel szabályozza. Ezt a megállapítást arra alapozzuk, hogy a spanyolországi INSST – Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo 2022-ben kiadott egy *Vegyí anyagok munkahelyi expozíciós határértékei* elnevezésű anyagot,³² amelyben a munkahelyi szerves vegyületek expozíciós határértékeinek legújabb mérési eredményeit teszik közzé.

Összevetve az említett mérési eredményeket, illetve a Magyarországon 2011-ben megalkotott rendeletben foglalt mérőszámokat, az állapítható meg, hogy a hazai szabályozás sokkal szigorúbb kibocsátási határértékeket állapít meg, mint a nemzetközi gyakorlat. Például az etilbenzol esetében a INSST által megadott munkahelyi expozíciós határérték 441 (mg/m³), míg a 4/2011. (I. 14.) VM rendelet 6. melléklete szerint 150 (mg/m³). Hasonló eltérések figyelhetők meg etil-acetát, p-xilol, m-xilol vagy N-butil-acetát esetében is, de ezt a felsorolást még hosszasan taglalhatnánk.

Az illékony szerves vegyületek között olyan anyagok is megtalálhatók (az akrilnitril, a benzol, az 1–3-butadién, a triklór-etilén, a vinil-klorid, illetve a formaldehid), amelyeket a Nemzetközi Rákkutató Ügynökség (IARC – International Agency for Research on Cancer) karcinogénnek minősített. Minden esetben törekedni kell ezeknek az anyagoknak a kiváltására, de ha ez nem lehetséges, akkor minden rákkeltő anyaggal szembeni expozíciónak a műszakilag lehetséges legalacsonyabbnak kell lennie.³³ Jelentős szerep hárul a szellőztetés kérdéére is, hiszen ez alapvetően befolyásolhatja a szennyezőanyag-koncentrációt az adott területen. Ez a szellőztetés nem csak ipari méretekben képzelhető el. Egy szlovák tanulmány szerint³⁴ a normál háztartások takarítása közben történő szellőztetésnek is komoly egészségmegőrző hatásai lehetnek. A háztartásokban – tehát nem munkahelyi használatban – az említett tanulmány szerint a teljes illékony szerves vegyületek vonatkozásában a referenciaszint általában 200 µg/m³. Ahogy már említettük, az additív gyártástechnológia nem kizárólag egy szervezett munkavégzés keretében megvalósuló alkatrész- vagy késztermék-előállítás. Ebből adódóan arra is fel kell hívni a figyelmet, hogy ha valaki otthon, saját lakásában állít elő valamilyen terméket, akkor milyen biztonsági intézkedéseket kell megtenni annak érdekében, hogy ez a tevékenység ne legyen negatív hatással a helyszínen tartózkodók egészségére.

A beltéri levegő minőségével és annak befolyásoló tényezőivel számtalan tanulmány foglalkozott már. Véleményünk szerint az egyik legmeghatározóbb anyag ezek közül az angliai közegészségügyi útmutató,³⁵ amely az Egyesült Királyságban a beltéri levegő minőségére vonatkozó irányelveket foglalja össze a kiválasztott illékony szerves vegyületek vonatkozásában.

³¹ 4/2011. (I. 14.) VM rendelet 5. §.

³² INSST 2022.

³³ Az egyes rákkeltő légszennyező anyagok kibocsátási határértékeivel a 4/2011. (I. 14.) VM rendelet 6. melléklet, 2.5.1. táblázata foglalkozik részletesen.

³⁴ MEČIAROVÁ et al. 2017.

³⁵ Public Health England 2019.

1. táblázat: Beltéri levegőminőségi irányelvek a kiválasztott illékony szerves vegyülethez

Illékony szerves vegyület	CAS-azonosító	Határértékek ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Forrás
		Rövid távon	Hosszú távon	
Acetaldehid	75-07-0	1420 (1 óra)	280 (1 nap)	Health Canada (2018)
α -pinén	80-56-8	45 000 (30 perc)	4500 (1 nap)	EPHECT (Trantallidi et al., 2015)
D-limonén	5989-27-5	90 000 (30 perc)	9000 (1 nap)	EPHECT (Trantallidi et al., 2015)
Formaldehid	50-00-0	100 (30 perc)	10 (1 év)	Egészségügyi Világszervezet (2010)
Sztirol	100-42-5	Nincs adat	850 (1 év)	Health Canada (2018)
Tetraklór-etilén	127-18-4	Nincs adat	40 (1 nap)	Health Canada (2018)
Toluol	108-88-3	15 000 (8 óra)	2300 (1 nap)	Health Canada (2018)
Xilol-keverék	1330-20-7	Nincs adat	100 (1 év)	Health Canada (2018)

Forrás: a szerzők szerkesztése *Public Health England 2019: 9. alapján*

Felmerül a kérdés, hogy miért fontos ez, illetve az ehhez hasonló adatsorokban foglalt referenciaérték. Nos, a válasz egyszerű: az illékony szerves vegyületek – a munkahelyi határértékek alatti koncentrációban – általában az olvasztott filament gyártás (FDM, FFF vagy 3F) során kerülnek a légtérbe.³⁶ Az említett nyomtatási típusnál az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) anyaggal történő termék-előállítás esetén sztirolt bocsát ki, míg a politejsav (PLA) alkalmazásakor gyakran fordul elő metil-metakrilát.³⁷

Annak érdekében, hogy akár a munkahelyen, akár az otthonainkban alkalmazzuk az additív gyártástechnológia elemeit, és megőrizzük egészségünket, a következő lépéseket kell megtennünk:

- a helyszíntől függetlenül ellenőriznünk (ellenőriztetnünk) kell a munkabiztonsági szabályokat;
- folyamatosan alkalmazni kell az egyéni, illetve kollektív védőeszközöket;
- végre kell hajtanunk a levegőminőség ellenőrzését, ami magában foglalja a klímaméterek ellenőrzését és a kockázatos vegyi anyagok mérését;
- a rendelkezésünkre álló információk és mérési eredmények alapján meg kell becsülnünk az expozíció mértékét.

A nem szervezett munkavégzés keretében alkalmazott 3D-nyomtatási eljárások esetében a szakirodalom azt tartja relevánsnak, ha direkt kijelzésű műszereket alkalmaznak az illékony szerves anyagok mérésére. Természetesen ennek olyan előnyei vannak, mint a riasztás/figyelmeztetés lehetősége, az azonnali eredmények kimutatása és persze a relatív költség-hatékonyság. Arról azonban nem szabad megfeledkezni, hogy az ilyen eszközök hátrányaiként megjelenik a pontatlanság, az érzékenység, a szelektivitás, illetve a kalibráció vagy a stabilitás mint hiányosság is. A direkt kijelzésű mérőberendezések, még ha néha pontatlanok is, arra mindenképpen alkalmasak, hogy felkeltsék a figyelmet, ha valamilyen változás következik be az otthonunk levegőminőségében.

³⁶ KARWASZ–OSIŃSKI–ŁUKASZEWSKI 2022.

³⁷ MOHAMMADIAN–NASIRZADEH 2021.

Nanoanyagok és nanorészecskék

A nanorészecskék apró méretű, környezetüktől jól elkülönülő objektumok. Nanorészecskéknek – az ISO/TS 27687 szabvány szerint – azokat az anyagokat szokás nevezni, amelyek mérete legalább két dimenzióban az 1 és 100 nm közötti tartományba esik.³⁸ A rúd alakú (tűszerű) nanorészecskék esetében az átmérő nanométeres, míg a hosszúság akár több mikron méretű is lehet. A nanorészecskék általában monoform (gömbszerű) alakúak, ennek termodinamikai oka van, ami a felületi energia minimalizálása miatt alakul ki. Ha a nanorészecske kémiai összetétele nem heterogén, akkor gyakran találkozhatunk deformált gömb alakzattal is.³⁹

A nanoanyagok olyan természetes, véletlenszerű vagy mesterségesen előállított anyagok, amelyek szilárd, önmagukban vagy aggregátumokban azonosítható részecskékből állnak, és ahol a számalapú méreteloszlás legalább fele megfelel az alábbi feltételek legalább egyikének:

- a részecske egy vagy több külső mérete 1 és 100 nm közötti mérettartományba esik;
- a részecske hosszúkás alakú (rúd, szál vagy cső), ahol két külső méret kisebb, mint 1 nm, a másik méret pedig nagyobb, mint 100 nm;
- a részecske lemezszerű alakú, ahol az egyik külső mérete kisebb, mint 1 nm, a többi mérete pedig nagyobb, mint 100 nm.

Mivel nem állnak rendelkezésre olyan levegő minőségével foglalkozó szabványok, amelyek a levegőben szálló nanorészecskéknek való kitettség szabályozását segítenék elő, és ebből adódóan nincsenek konszenzusos mérési módszerek és eszközök sem, nagyon nehéz a megfelelő védelmet kialakítani.⁴⁰ Nyilvánvaló azonban, hogy a káros hatások elsősorban a nanorészecskék felületétől függenek. Ez abból adódik, hogy a nanorészecskék felület/térfogat arányú ugyanazon anyaghoz képest ömlesztett formában jobb mérőszámot jelentenek a kockázatok felmérésére, mint a hagyományosan alkalmazott tömegalapú megközelítés.⁴¹

A nanorészecskék mérésének fontosságát a legjobban egy példán keresztül lehet bemutatni. Ha 0,1 g tömeg van a levegőben, amelynek sűrűsége $2,65 \text{ g/cm}^3$, akkor könnyen kiszámítható, hogy különböző méretű részecskékből hány darab részecskeegység lehet a levegőben.

³⁸ Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, (SCENIHR), European Commission Health & Consumer Protection Directorate-General Directorate C–Public Health and Risk Assessment C7 – Risk assessment 2006.

³⁹ BÓTA 2013.

⁴⁰ GARCIA-GONZALEZ et al. 2022.

⁴¹ GARCIA-GONZALEZ – POLA 2023.

2. táblázat: Részecskék számának és felületének szimulációja a részecskeméret függvényében

Méret	Részecskeszám	Terület (cm ²)	Terület (m ²)
1 µm	72,071,806,726,62	2264,14	0,2264
10 µm	72,071,806,73	226,41	0,0226
5 µm	576,574,453,81	452,83	0,0453
100 nm	72,071,806,726,621,50	22641,36	2,2641
10 nm	72,071,806,726,621,500,00	226413,58	22,6414
1 nm	72,071,806,726,621,500,000,00	2264135,81	226,4136

Forrás: a szerzők szerkesztése GARCIA-GONZALEZ – POLA 2023 alapján

A táblázat értékeiből jól kiolvasható, hogy ha a 0,1 g tömegű részecskék mindegyike 1 µm méretű lenne, akkor a részecske területe körülbelül 0,23 m² területet fedne le. Az 1 nm részecskeméret esetén a teljes lefedett terület 226 m² lehet. A nanorészecskék a tüdőbe bekerülve komoly irritációt okozhatnak, és ahogy a számok mutatják, mérettől függően a legrosszabb esetben 0,22 m² – 226 m² felületen képesek kifejteni hatásukat. Egyes becslések szerint egy teljesen kifejlett ember tüdeje 70–100 m² lehet. Mivel a nanorészecskék nem egyenletesen rakódnak le a tüdőben, nem lehet csak becslésekbe bocsátkozni annak valószínűségét illetően, hogy milyen lerakódás okozhat tüneteket és elváltozásokat.

Az látható, hogy a nanorészecskék mérete alapvetően befolyásoló tényező a védekezés tekintetében, de meg kell ismernünk azokat a referenciaszinteket is, amelyek munkavédelmi szempontból lehetnek relevánsak. Ez, ahogy már korábban is írtuk, azért nehéz feladat, mert a különböző típusú nanorészecskék eltérő vagy ismeretlen egészségügyi hatással bírnak. A területet kutató szakemberek jelenleg is foglalkoznak ennek a problémának a megoldásával, de egyelőre nem született olyan eredmény, amelyet releváns forrásként be lehetne mutatni, illetve amit minősített szervezetek is elfogadnának.

„Számos tanulmány foglalkozik a 3D-nyomatás során fellépő részecskebocsátással. Az összes nemzetközi szakirodalom egyetért abban, hogy a belélegezhető por mérése jóval az OELV (3 mg/m³) alatt van, így a 3D-nyomatás nem jelent kockázatot, ha csak a por tömegének hagyományos és hivatalos értékelését (koncentráció mg/m³) vesszük figyelembe.”⁴²

Egészségügyi kockázatok

Az additív gyártástechnológia egészségre, emberi szervezetre gyakorolt hatásait bár már vizsgálják, még mindig nem kapunk megfelelő referenciaértékeket, ami annak köszönhető, hogy a gyártástechnológia az elmúlt években kezdett el rohamosan terjedni. Ahhoz, hogy a káros hatásokat egyáltalán vizsgálni lehessen, akár többéves vagy évtizedes expozíció is szükséges lehet.

A 3D-nyomatatók által termelt gázok, gőzök, ködök és porok hatásának kitéve, folyamatos expozíció esetén különböző tüdőbetegségek is kialakulhatnak, és azok az egyéni érzékenységek

⁴² GARCIA-GONZALEZ – POLA 2023 alapján fordították a szerzők.

függvényében okozhatnak enyhébb vagy súlyosabb tüneteket.⁴³ Azt is fontos megemlíteni, hogy a technológia alkalmazását csak nagy körültekintéssel és megfelelő orvosi vizsgálatokat követően érdemes megkezdeni, mivel hazánkban is nagyon sok az asztmás beteg, így érdemes nemcsak a nyomtatást végző (felügyelő) személy állapotáról tájékozódni, hanem a nyomtató közvetlen környezetében lévő személyek egészségügyi állapotáról is.

A különböző nylonnyomatások során keletkező anyagok nemcsak a tüdőt, hanem a szemet és a nyálkahártyát is irritálhatják, illetve szélsőséges esetben idegrendszeri elváltozásokat is eredményezhetnek. Nylonnal történő nyomtatásnál a megállapított határértéknél magasabb CO₂-koncentrációkat mértek, és a különböző tesztek során szén-monoxid, szénhidrogén, ammónia, kaprolaktám és hidrogén-cianid is kimutatható volt.⁴⁴

Nem feledkezhetünk meg a különböző anyagokkal közvetlenül érintkező bőrfelületekről sem. A színezett filamentek tartalmazhatnak alumíniumot, arzént, cinket, rezet, ónt, nikkelt, krómot és egyéb vegyi anyagokat, illetve a nyomtatás során reaktív oxigénfajták keletkezhetnek. Arra is van példa, hogy zárt nyomtatóban 9 µg/m³ ózonszintet mutattak ki. Az ózon és a telítetlen illékony szerves vegyületek kölcsönhatása reaktív termékeket hozhat létre, mint például karbonil vegyületek és másodlagos szerves aeroszolok.

A filamentumok fejlesztésére a nagyon népszerű felhasználásnak köszönhetően van szükség, de ehhez olyan, többnyire költséghatékony adalékokat használnak fel, mint a szerves színezékek, fémrészcsekék, nanoanyagok, fémtartalmú égésgátlók, antioxidánsok, hőstabilizátorok és katalizátorok. Ezeknek az anyagoknak a felhasználása nemcsak a környezetre jelent terhelést, de az élő szöveteket, így az emberi szervezetet is megterheli, rombolja.

A fémporos és gyantanyomatók veszélyeit is folyamatosan vizsgálják, de egyelőre itt is kevés a referenciaérték. Az azonban bizonyos, hogy míg előbbi esetében az olyan anyagok, mint az alumínium, a króm, a nikkelt, a kobalt, utóbbi esetében a gyantával kevert tisztítóalkohol okozhat károsodást.

Következtetések

Annak ellenére, hogy az additív gyártástechnológia már egy évtizedek óta jelen lévő technológiai eljárás, csak az elmúlt években vált lakossági felhasználású technikává. Magának a technológiának az előnyeit nap mint nap láthatjuk, de a lehetséges alkalmazási problémákról, káros hatásokról még keveset tudunk. A témával foglalkozó kutatók folyamatosan vizsgálják a 3D-nyomatás során fellépő veszélyeket, veszélyforrásokat, de sok esetben még mindig csak sejteni lehet, hogy a technológiai fejlődés és annak robbanásszerű elterjedése milyen negatív hatásokat gyakorolhat majd az alkalmazók és a technológia közvetlen környezetében élők szervezetére, egészségére.

Megállapítottuk, hogy a jogi szabályozás ellenére nemcsak a szervezett munkavégzés keretében tevékenykedő személyek vannak kitéve a veszélyeknek, hanem az otthon, saját

⁴³ GARCIA-GONZALEZ – POLA 2023.

⁴⁴ MOHAMMADIAN – NASIRZADEH 2021.

lakókörnyezetükben a 3D-technológiát használó személyek is. A jogi szabályozást ennek érdekében javasolt lenne felülvizsgálni, hiszen az elmúlt években a *home office*, az otthoni munkavégzés egyre népszerűbb lett, de annak szabályozása még nem megfelelő.

Az additív gyártástechnológia során kibocsátott szennyező anyagok egy részét már azonosították, és egyes országokban már paramétereket is állapítottak meg annak érdekében, hogy a 3D-nyomatás során keletkező anyagok ne károsítsák az emberi szervezetet, azonban országonként a védelmi stratégiák és az alkalmazási kritériumok nem egységesek. Véleményünk szerint olyan nemzetközi szabványosított módszert, eljárásrendet kellene kialakítani, amely alapján a különböző vizsgálati eredmények összehasonlíthatók.

Fontos, hogy a munkaterületeken a megfelelő óvintézkedéseket végrehajtsák, mielőtt a gyártástechnológia elemeit alkalmaznánk. Ez természetesen független a szervezett vagy otthoni munkavégzés (akár a hobbicélú felhasználás) helyszínétől, hiszen maga az áramellátás, a szellőztetés minden tekintetben gondos előkészítést igényel. Azt sem szabad elfelejteni, hogy a 3D-nyomatás során potenciálisan veszélyes anyagok, illékony szerves vegyületek, nanorészecskék és egyes típusoknál fémek is a légtérbe kerülnek, amelyek az expozíció függvényében komoly egészségkárosító hatással is bírhatnak.

Látható, hogy a fő problémát maga a légszennyezés okozza, így fontos felülvizsgálni azokat a szabályzókat, amelyek a levegő minőségével is foglalkoznak. Ez abból adódóan is releváns, hogy a porokra vonatkozó jelenlegi szabályozás a tömegkoncentráción ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) alapul, de a 3D-nyomatás során kibocsátott szintek jóval alacsonyabbak ezeknél az értékeknél. A nanorészecskék koncentrációs szintje azonban annak ellenére, hogy nincs jogszabályban, káros lehet az egészségre.

Véleményünk szerint, ha azonnali megoldást keresünk a felvetett problémákra, akkor a fő feladat a szellőztetés megoldása. Mindenképp szükséges olyan elszívó berendezéseket alkalmazni az additív gyártástechnológia elemeinél, amelyek nagy hatékonyságú szűrőkkel vannak ellátva, illetve otthoni felhasználás esetén a gondos szellőztetés is jelentősen csökkentheti a veszély mértékét. Arra azonban oda kell figyelni, hogy ezek az elszívó berendezések plusz energiaigénnyel rendelkeznek, és a szűrőfelületeik is (a hosszú időtartamú használat miatt) gyorsabban használódnak el.

A technológia fejlődése és gyors terjedése is elősegíti az alapanyagok iránt jelentkező igényeket. Az elmúlt években a piacon fellelhető filamentek típusai csaknem megszázorozódtak, így megjelentek a silányabb minőségű alapanyagok is, amelyek esetenként tiltott vegyszereket, színezőanyagokat is tartalmazhatnak. Fontos tehát, hogy csak minősített és megbízható gyártó termékeit alkalmazzuk tevékenységünk során.

Végül a legfontosabb javaslatunk, hogy ha bármilyen problémát észlelünk, legyen az gyakori fejfájás, érzékeny bőrfelület vagy köhögés, illetve fáradékonyság a nyomtatások során, akkor haladéktalanul forduljunk orvoshoz, mert ez akár hosszú távon életet is menthet. Ne feledjük, hogy ez a technológia még „gyerekcipőben jár” nincsenek évtizedekre visszanyúló expozíciós eredmények, hatásvizsgálatok, így a hosszú távú hatások tekintetében még bőven van mit elemezni és értékelni.

Felhasznált irodalom

- BÓTA Attila (2013): Nanorészecskék általános fizikai-kémiai tulajdonságai. *Természet Világa*, 144(11), 486–488. Online: https://epa.oszk.hu/02900/02926/00011/pdf/EPA02926_termeszeti_vilaga_2013_11_486-488.pdf
- BYRLEY, Peter et al. (2019): Particle Emissions from Fused Deposition Modeling 3D Printers: Evaluation and Meta-Analysis. *Science of the Total Environment*, 655, 395–407. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.070>
- ELLAM, Richard (2016): 3D Printing: You Read It Here First. *NewScientist*, 2016. november 12–18., 52–53. Online: www.dl.apadana-ielts.com/Magazine/newscientist/New_Scientist_-_November_12-16_2016.pdf
- GARCIA-GONZALEZ, Hector et al. (2022): Particulate Matter Characterization in a Hospital's Underground Car Park. *Powders*, 1(4), 194–206. Online: <https://doi.org/10.3390/powders1040013>
- GARCIA-GONZALEZ, Hector – POLA, Teresa Lopez (2023): Health and Safety in 3D Printing; Advances in 3D Printing. In SHARMA, Ashutosh (szerk.): *Advances 3D printing*. Ebook. Online: <https://doi.org/10.5772/intechopen.109439>
- Grand View Research (2019): *3D Printing Market Analysis, 2016–2017*. Online: www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis/request/rs1
- GU, Jianwei et al. (2019): Characterization of Particulate and Gaseous Pollutants Emitted During Operation of a Desktop 3D Printer. *Environment International*, 123, 476–485. Online: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.014>
- Health Canada (2018). Online: www.canada.ca/en/health-canada.html
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), O.A., M.P. (2022): *Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos en España*. Online: www.insst.es/documents/94886/2927460/LEP%202022.pdf
- KARWASZ, Anna – OSIŃSKI, Filip – ŁUKASZEWSKI, Krzysztof (2022): Pollutants Emitted from 3D Printers to Operators. *Sustainability*, 14(3), 1400. Online: <https://doi.org/10.3390/su14031400>
- KWON, Ohhun et al. (2017): Characterization and Control of Nanoparticle Emission During 3D Printing. *Environmental Science & Technology*, 51(18), 10357–10368. Online: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01454>
- MEČIAROVÁ, Ľudmila et al. (2017): Factors Effecting the Total Volatile Organic Compound (TVOC) Concentrations in Slovak Households. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1443. Online: <https://doi.org/10.3390/ijerph14121443>
- MOHAMMADIAN, Yousef – NASIRZADEH, Nafiseh (2021): Toxicity Risks of Occupational Exposure in 3D Printing and Bioprinting Industries: A Systematic Review. *Toxicology and Industrial Health*, 37(9), 573–584. Online: <https://doi.org/10.1177/07482337211031691>
- Public Health England (2019): Indoor Air Quality Guidelines for Selected Volatile Organic Compounds (VOCs) in the UK. Online: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5d7a2912ed-915d522e4164a5/VO_statement_Final_12092019_CS_1.pdf
- Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), European Commission Health & Consumer Protection Directorate-General Directorate C – Public Health and Risk Assessment C7 – Risk Assessment (2006).
- SZÉKELY Katalin: *Munkahelyi balesetek megelőzése és a munkahigiénében rejlő lehetőségek*. Online: <http://users.atw.hu/balesetmegeloz/munka1.html>
- TRANTALLIDI, Marilena – DIMITROULOPOULOU, C. – WOLKOFF, Peder – KEPHALOPOULOS, Stylianos – CARRER, P. (2015): EPHECT III: Health Risk Assessment of Exposure to Household Consumer Products. *Science of the Total Environment*, 536, 903–913. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.123>

- US EPA O. (2024): *Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality*. Online: www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality
- WHO World Health Organisation (2010): *Guidelines for Indoor Air Quality*. Online: www.who.int/publications/i/item/9789289002134

Jogi források

- Magyarország Alaptörvénye (2011. április 25.)
1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről
- 5/1993. (XII. 6.) MüM rendelet a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról
- 4/2011. (I. 4.) VM rendelet a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről
- 25/2024. (II. 4.) Korm. rendelet a munkavédelmi bírság mértékéről és a kiszabására vonatkozó részletes szabályokról, valamint a munkabiztonsági szaktevékenység végzésére jogosult személyek nyilvántartásának és továbbképzésének szabályairól