

Vég Róbert László<sup>1</sup> 

# A 4D nyomtatás és az okosanyagok alkalmazásának lehetőségei<sup>2</sup>

## Possibilities of Using 4D Printing and Smart Materials

*A 3D nyomtatás mint additív gyártási technológia egyre jobban elterjed napjainkban, egyrészt az ipari felhasználás szintjén, másrészt pedig az otthoni hobbi-felhasználásban. A 3D nyomtatás során egy számítógépes modellt valósítanak meg valamilyen nyomtatási technológia segítségével rétegről rétegre. A felhasználási terület széles körűvé válása által új fogalom jelent meg, a 4D nyomtatás, ahol a negyedik dimenzió az idő lett. Az így létrehozandó nyomtatott anyag képes lesz a külső hatásoknak (például hőmérséklet, nyomás, nedvesség) megfelelően módosulni, átalakulni vagy pedig mozogni. A nyomtatás során felhasznált anyagok köre mára már nagyon széles körűvé vált, ezek mellett megjelentek az úgynevezett okosanyagok is, amelyek új távlatokat nyitnak az additív gyártástechnológia területén.*

**Kulcsszavak:** 3D nyomtató, 3D nyomtatás, 4D nyomtatás, okosanyagok

*3D printing as an additive manufacturing technology is becoming more and more widespread today, both for industrial applications and for hobby use at home. During 3D printing a computer model be realized layer by layer using some kind of printing technology. As the field of application has expanded, a new concept has also emerged, called 4D printing, where the fourth dimension has become time. The printed material thus created will be able to change, transform or move according to external influences (e.g. temperature, pressure, humidity). The range of materials used for printing has now become very wide, and the so-called smart materials have also appeared, opening up new horizons in the field of additive manufacturing.*

**Keywords:** 3D printer, 3D printing, 4D printing, smart materials

<sup>1</sup> Egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, e-mail: [vegh.robert@uni-nke.hu](mailto:vegh.robert@uni-nke.hu)

<sup>2</sup> A cikk a TKP2021-NVA-16 számú project 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.

## Bevezetés

A technika folyamatos fejlődése mindig egy-egy új területet nyit meg a lehetőségek tárházából, és most idetartozik a 3D nyomtatás is. Jelenleg a tudomány és a technológia eljutott arra a szintre, hogy számítógépek és megfelelő programok segítségével tervezni tudjunk, esetleg előzetes vizsgálatokat is végre tudunk hajtani, és le is tudjuk gyártani a termékeket. Az ipari termelés a 20. század végére két egyszerű szubsztraktív eljárásra korlátozódott, egyrészt az öntésre, másrészt pedig a megmunkálásra. A 3D nyomtatás a terméket nulláról állítja elő, vagyis anyag hozzáadásával, ezért ezt az eljárást additív gyártásnak nevezik.

Napjainkban a 3D nyomtatás különböző technológiáival már nemcsak műanyagokat, hanem fémeket és egyéb speciális anyagokat, akár építőanyagokat is lehet nyomtatni. Alapvetően viszont a 3D nyomtatást először műanyagok nyomtatására fejlesztették ki, csak később váltak vele nyomtathatóvá más anyagok, mint például a fémek. Napjainkra már számos nyomtatási technológia vált ismertté, amelyeket nagyon sok cikkben és tanulmányban kellő részletességgel feldolgoztak.

A 3D nyomtatás gyors megoldást kínál különböző szakterületeken, így a prototípusgyártás mellett többek között az alkatrész-utánpótlási problémákra is, de a felhasználási lehetőségek között számos katonai aspektussal is találkozhatunk.<sup>3</sup>

A 3D nyomtatás katonai alkalmazásában kiemelhető a katonai robbantástechnika mint egyik lehetséges felhasználó. A 3D nyomtatás alkalmas kis szériaszámban vagy egyedi méretekben tervezett töltetek alkatrészeinek gyártásához. A kumulatív töltetek alkatrészei és lineáris vágótöltetek esetében jelenleg is folynak gyakorlati alapokon nyugvó vizsgálatok a 3D nyomtatás területén.<sup>4</sup>

Nem teherviselő fegyveralkatrészek gyártására is alkalmas lehet a 3D nyomtatás.<sup>5</sup> Katonai felhasználás szempontjából egy további említésre érdemes terület például a katonai célra alkalmazott drónok, UAV-k (Unmanned Aerial Vehicle – pilóta nélküli légi jármű) gyártása, illetve ezek alkatrész-utánpótlása céljából alkalmazott 3D nyomtatás is.<sup>6</sup>

A 3D nyomtatást széleskörűen alkalmazzák a legkülönbözőbb területeken, így már az űruhafejlesztés esetében is kihasználják ennek az új gyártástechnikának a lehetőségeit. A 3D Knit BioSuit™ nevű űruha prototípusának karhüvely részét egy speciális, többrétegű 3D kötési technikával készítik, amely biztosítja az elvárt tömítést. Anyagként többfunkciós polietilén szálakat használnak, amely rugalmas és nagy szakítószilárdságú anyagként biztosítja a nyomást, hőmérséklet-szabályozást és a részleges sugárvédelmet.<sup>7</sup>

A technológia alkalmazása megkönnyítheti és segítheti az oktatói munkát, többek között a műszaki felsőoktatásban. A működő alkatrészek, részegységek grafikus megjelenítése például ma már elvárás, de nem helyettesítheti a fizikai modelleket, metszeteket teljes mértékben.

<sup>3</sup> GÁL–NÉMETH 2019.

<sup>4</sup> EMBER–ÁDÁM 2022: 36–38; EMBER 2023: 9–13.

<sup>5</sup> VÉGVÁRI–HEGEDŰS–ZENTAY 2022.

<sup>6</sup> HEGEDŰS 2023.

<sup>7</sup> Self-Assembly Lab 2023a.

Ezeknek az oktatási eszközöknek a nagy pontosságú előállítására mára már alkalmazott gyakorlattá vált.<sup>8</sup>

A 3D nyomtatók otthoni és ipari felhasználása számos veszélyt rejt, mivel nem megfelelő használata káros hatással lehet az egészségre. Az alapanyagok és a nyomtatási paraméterek kiválasztása összetett folyamat, amelyet különböző eljárásokkal támogatni lehet.<sup>9</sup>

A nyomtatás során felhasznált anyagok köre egyre bővül, nagyon sok feladatra és különböző igénybevételre tudunk tárgyakat elkészíteni, ugyanakkor ezek nagy része káros a környezetre és esetleg az egészségre. A 3D technológia elterjedésével és az alkalmazott anyagok körének bővülésével egyetemben szem előtt kell tartani és foglalkozni kell a környezetszennyezési és egészségre káros hatások feltérképezésével is.<sup>10</sup>

## A 4D nyomtatás

A 4D nyomtatás olyan 3D nyomtatás, amely egy negyedik dimenziót ad a gyártástechnológiához, az időt, vagyis az idővel változik. A kinyomtatott tárgy képes lesz a környezeti ingerekre reagáló belső tulajdonságai miatt átalakulni, módosulni vagy pedig önállóan mozogni.<sup>11</sup>

A 4D nyomtatás közvetlenül a nyomtatott tárgy létrehozásához felhasznált anyagoktól függ. Ezek az anyagok az úgynevezett intelligens anyagok, olyan szilárd anyagok, amelyek tulajdonságaikat külső ingerek (hő, fény, páratartalom, nyomás, mágnesesség stb.) hatására megváltoztatják. Egy kutató<sup>12</sup> szerint: „A mai háromdimenziós anyagi világ passzív, élettelen anyagokból épül fel, mint a téglák, az acél és az üveg. A négydimenziós struktúrák aktív, animált, úgynevezett intelligens anyagokból készülnek, amelyek önállóan mozognak – egy ingerre reagálva duzzadnak, zsugorodnak vagy hajlanak – passzív anyagokkal kombinálva. Ez lehetővé teszi számukra, hogy robotika, elektronika vagy motorok nélkül mozogjanak és változtassák meg alakjukat.”<sup>13</sup>

Az anyagok egy része úgynevezett emlékező lehet, vagyis visszanyerik eredeti alakjukat a körülmények ismételt megváltozásakor. Ezek az anyagok nagyrészt még kísérleti fázisban vannak, így az egészségre gyakorolt hatásaik, kockázataik nem ismertek.

A 4D nyomtatáshoz ihletet adtak a növények, amelyek nagy rugalmassággal és hatékonysággal alkalmazkodnak a természet összetett folyamataihoz. A fenyőtoboz például természetes intelligens anyagnak tekinthető, amelynek működése két különböző irányban futó merev szálrétegen keresztül történik. Ezek a szálrétegek lehetővé teszik a kúp kinyitását vagy zárását, ezáltal a magok csak akkor szabadulnak fel, amikor a talajban csírázniuk kell meleg és száraz időjárás esetén. Ha a páratartalom magas, a kúp zárva marad, így védve meg a magokat.

<sup>8</sup> GYARMATI–HEGEDŰS–GÁVAY 2022.

<sup>9</sup> GYARMATI 2006: 11–16; GYARMATI 2011.

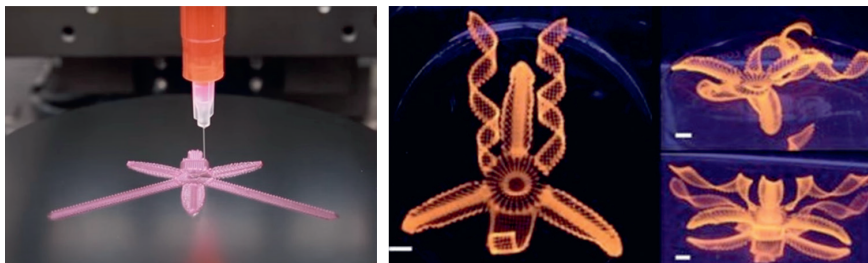
<sup>10</sup> RÁKOSI et al. 2023.

<sup>11</sup> Shaoxing Xinshan Tudományos Technológiai Co., Ltd. 2021.

<sup>12</sup> Anna Ploszajski (anyagtudós).

<sup>13</sup> SOUZA 2021.

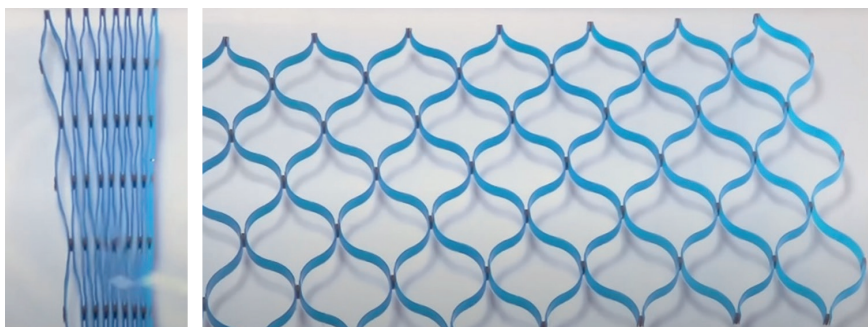
A 4D nyomtatás célja, hogy képes legyen magát az anyagot programozni, ami a nyomtatás után reagál a környezeti paraméterekre. Növény ihlette az 1. ábrán látható szerkezetet: a 4D nyomtatott hidrogél (a hidrogél csillám és adott fémek nyomelemeiből összetevődő polimer anyag) kompozit szerkezetei vízbe merülve alakot váltanak.



1. ábra: 4D nyomtatással előállított, növények ihlette szerkezet

Forrás: Mandiner 2016 és EFH 2021

A 4D nyomtatás példaként látható egy rácsos elem (2. ábra), amely nyomtatási méretének sokszorosára bontakozik ki, vagy pedig egy nyomtatott virágforma (3. ábra), amely összeshárja szirmait, amikor meleg vízzel érintkezik.



2. ábra: 4D nyomtatással előállított rácsos elem méretváltozása

Forrás: Műszaki Magazin [é. n.]



3. ábra: 4D nyomtatással előállított virágforma méretváltozása

Forrás: Műszaki Magazin [é. n.]

A 4D technológia problémájaként lehet megemlíteni, hogy rendkívül időigényes és bonyolult utómunkálatokkal, a komponensek mechanikus programozásával jár. Nehézséget jelent, hogy a felhasználható anyagok köre legtöbbször csak a puha polimerekre korlátozódik, ezáltal kevesebb a lehetőség a különböző szerkezeti kialakításokra. Egy nemzetközi kutatócsoport (Georgia Tech, Singapore University of Technology and Design [SUTD], a Pekingi Jiaotong Egyetem, valamint a Zhejiang University, kínai állami kutatóegyetem) a 4D nyomtatást leegyszerűsítő, ugyanakkor a lehetőségeit növelő megoldást dolgozott ki, amelynek keretében a mechanikus utóprogramozást a 3D nyomtatási folyamatba integrálták. A kidolgozott számítógépes szimulációs tervezéssel nagyfelbontású 3D részek nyomtathatók ki, majd hővel közvetlenül és gyorsan állandó alakzatokká dolgozhatók át. Ezzel a módszerrel az anyagok és a nyomtatási idő is 90 százalékkal csökkenthető, a mechanikus programozás ezáltal a tervezési és gyártási folyamatokból kiiktatható. Olyan kompozitanyagokat is ki tudnak nyomtatni, amelyek egyik összetevője szobahőmérsékleten puha, de belső nyomásra programozható, a másik pedig merev.<sup>14</sup>

Ahogy a 3D nyomtatás mellett megjelenik a 4D nyomtatás és a speciális anyagok (okosanyagok) alkalmazása, úgy várható, hogy az egyre jobban terjedő mesterséges intelligencia (AI)<sup>15</sup> is megjelenik ebben a gyártástechnológiában, és elkezdődik a 3D nyomtatás és mesterséges intelligencia együttműködése is. Az AI alkalmazása optimalizálhatja a nyomtatási folyamatot, ezáltal segíthet elkerülni a hibákat, az együttműködés képes lehet megtalálni azokat a hibákat, amelyek miatt a modell nem nyomtatható 3D-ben. Az AI valós idejű vezérlése csökkentheti a nyomtatási időt és az anyagfelhasználást, valamint a nyomtatási folyamat után is használható a problémák észlelésére és a nyomtatott modellek minőségellenőrzésének javítására. A fejlesztésben eredményeket ért el egy AI Build nevű londoni cég, amely többek között megalkotott egy automatizált MI-alapú 3D nyomtatási technológiát, úgynevezett intelligens extruderrel, ami lehetővé teszi a problémák észlelését. Az AiMaker nevű nagy pontosságú robotvég-végfeldolgozó egység, amely ipari robotkarokhoz csatlakozik, képes nagyméretű tárgyak nyomtatására nagy sebességgel és pontossággal. Az AI algoritmusokat érzékelőkből és kamerákból származó valós idejű gyártási adatokkal kombinálva észleli a problémákat, és a gyártási folyamat közben önálló döntéseket hoz a lehető legjobb nyomtatási minőség elérése érdekében. A cég fejlesztései között megtalálható az AiSync nevű szoftver, amely még a legfejlettebb, többszempélyes szerszámpályák létrehozását is felgyorsítja és automatizálja egyetlen, intuitív felhasználói felületen keresztül. Hatékony jelentéskészítési és elemzési funkciókkal is fel van szerelve, így a teljes 3D nyomtatási folyamat optimalizált és teljes mértékben megismételhető. Az AiSync 86%-kal gyorsabban építi fel a szerszámpályákat, a sikertelen felépítések 65%-kal csökkentek, az alkatrészek 3x erősebbek.<sup>16</sup> Az AI részt vehet új anyagok feltalálási folyamatában is, ahol algoritmusai segítségével „előre megjósolhatja”, hogy mely kémiai építőelemek kombinálhatók mikroszinten a kívánt funkciókkal és tulajdonságokkal rendelkező szerkezet létrehozásához.<sup>17</sup>

<sup>14</sup> Mandiner 2017.

<sup>15</sup> NÉMETH-VIRÁGH 2022.

<sup>16</sup> AiSync [é. n.].

<sup>17</sup> *A mesterséges intelligencia és a 3D nyomtatás együttműködése* [é. n.].

## A 4D nyomtatás alkalmazási lehetőségei

Az ipari alkalmazásnál is fontosabb területe lehet a jövőben a 3D nyomtatásnak az orvostudomány. Elsőként sérült állapotoknak készítettek protéziseket (például műláb kutyának, műcsőr sasnak), de egyre jobban terjed az emberi pótvégtagok előállítására is. Egyik jellemző alkalmazási orvostechikai terület a fogászat. A gyógyítás területén új lehetőséget teremt a 4D nyomtatás, amikor a 3D nyomtatással előállított termék a testbe beépítve valamilyen hatásra (például víz, elektromos áram, hő stb.) megváltoztatja alakját vagy tulajdonságát. Elő lehet állítani olyan orvostechikai termékeket (implantátumok), amelyek képesek az alakváltozásra, amint a testtel érintkeznek. További lehetőségeket tartogat a bionyomtatás, amikor sejtek nyomtatásával szöveteket, szerveket lehet létrehozni, ezáltal a beteg saját sejtjeiből készült szövetekkel lehet helyettesíteni a károsodott részeket.<sup>18</sup>

Példaként lehet említeni a 4D nyomtatással svájci kutatók által előállított világ legkisebb sztentjét (a sztent egy érfalat kítámasztó speciális drótháló, amelyet az érsebészetben alkalmaznak az elzáródott erek tágitására és a vér áramlásának biztosítására), amely magzatoknál, méhen belüli műtételnél alkalmazható. Ez az érháló negyvenszer kisebb, mint a jelenleg használatos változatok.<sup>19</sup>

További példa lehet a Harvard kutatói által kifejlesztett speciális, úgynevezett „élő tinta”, amely előállításánál genetikailag módosított kólibaktériumot és egyéb más mikrobákat használtak fel, amelyeket vegyítve élő nanoszálakat hoztak létre. Ezeket kötegelve és további vegyi anyagokkal keverve hozták létre azt a „tintát”, amelyet egy egyszerű 3D nyomtatóban is fel lehet használni.<sup>20</sup>

Az élő, szerves szövetek 3D nyomtatását bioprintingnek nevezik, ahol a 3D nyomtató bioprintingfejből adagolnak sejteket oda, ahova pontosan szükséges, ez lehetővé teszi szerves szerkezetek felépítését vékony rétegekből. A bionyomtatók nyomtatás közben vagy az után oldható gélt is ki tudnak juttatni, amely alkalmas a sejtek védelmére és megtartására. Sikeres kísérleteket hajtottak végre, amelynek keretében gombákat vagy algákat tartalmazó, úgynevezett élő anyagot nyomtattak ki. A 3D bionyomtatás problémája, hogy a nyomtatás után a sejtek és hidrogélek (biotinták) felhasználásával létrehozott szövetek (szervek) megmaradnak statikus formájukban. Az így létrehozott szervekből hiányzik az emberi szervezetben meglévő komplexitás. A 4D nyomtatás pótolja a hiányt, amikor a létrehozott szövet dinamikussá válik, vagyis képes a molekuláris térszerkezet megváltoztatására, így reagál az ingerekre és a biomechanikai tulajdonságai hasonlóak az emberi szervekhez. A negyedik dimenzió olyan szövetek létrehozását teszi lehetővé, amelyek teljes mértékben utánozzák a fizikai környezetet, és lehetővé teszik a teljes körű alkalmazásukat az orvostudományban.<sup>21</sup>

A 3D nyomtatás és a nanotechnológia kombinálásával lehetőség nyílik tárgyak nano- vagy molekulaszinten történő alakítására. A nanoprinting alkalmazásával lehetséges lehet bármilyen formájú tárgyat előállítani bármilyen anyagból, bármilyen formában. Ez a technológia jelen-

<sup>18</sup> Weborvos 2023; FÜZES 2018b.

<sup>19</sup> MTI 2019.

<sup>20</sup> Hvg.hu 2023.

<sup>21</sup> MEIXNER 2022.

leg még csak elméleti lehetőség, így a nanoprinting munkakörnyezetre gyakorolt hatásával kapcsolatban nincs információ.

A 4D nyomtatás valódi alkalmazási lehetőségei még növekedési, fejlesztési szakaszban vannak, de bizonyos alkalmazási lehetőségeit érdemes megvizsgálni, ilyen terület a textilipar is. Már jelenleg is számos vállalat (Adidas, Nike stb.) állít elő 3D nyomtatással, az egyedi igényeket szem előtt tartva ergonomikus cipőket. Ez a technológia alkalmassá válhat arra, hogy katonáknak készítsenek vele egyénre szabott felszereléseket, például egészségügyi szenzorokkal felszerelt bakancsot. A 4D nyomtatással lehetőség van olyan ruházat előállítására, amely megváltoztathatja az alakját és alkalmazkodhat a klímához vagy egy adott pillanat körülményeihez. A ruházat alapanyaga, a textil képes lehet arra, hogy mint egy függöny az ablakban – a perforációi programozásával – erős napfényre reagálva bezáródjon, így biztosítja a szükséges árnyékolást, vagy hogy felhős időben nyitva legyen.<sup>22</sup>

Az építőiparban a 4D nyomtatás és az intelligens anyagok alkalmazása olyan épületburkoló elemeket eredményezhet, amely alkalmazkodni tud az éghajlat változásához, reagálva a kapott ingerekre. A jövőbeli alkalmazás során, bár kissé futurisztikusnak tűnhet most, az építőiparban és a gyártásban az alkatrészek emberi beavatkozás nélkül önállóan átalakulhatnak a nyersanyagokból a végleges beépített szerkezetekké. A 4D nyomtatás olyan anyagokat állíthat elő a jövőben, amelyek alkalmazkodnak a használatukhoz vagy az őket körülvevő környezethez. Ez az építési technológia rugalmasabb és könnyebb szerkezetek előállításához vezethet, amelyek képesek reagálni a körülöttük levő világra.<sup>23</sup>

Az infrastruktúra területén egy vízelvezető cső akár összehúzódhat vagy kitágulhat a víz áramlásának megfelelően, vagy pedig a csatornarendszer a bél perisztaltikus mozgásának megfelelő mozgásra is képes lehet, vagyis összehúzódásokon és ellazulásokon keresztül képes elszállítani a hulladékot, illetve legyőzni a terep egyenetlenségeit.<sup>24</sup>

A 4D nyomtatás egyik fő alkalmazási területe a jövőben az űripar lehet, ahol fontos szempont a helytakarékoság. Egy lapos, fix és mozgatható részekkel ellátott kiindulási forma egy lépésben történő kinyomtatása nagyon hatékony, mivel bonyolultabb és időigényesebb lenne az ilyen összetett tárgyakat külön-külön legyártani, vagy több részből összeilleszteni. Az így kinyomtatott lapos tárgyak lényegesen helytakarékosabban szállíthatók és csak a célállomáson, az űrben kell őket összeilleszteni. Példaként lehet említeni az Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich) tudományos kutatóintézet munkáját, amely 4D nyomtatási technológia segítségével mozgatható, megváltoztatható objektumokat fejlesztett ki, amelyekből 3D tárgyak hajtogathatók, vagy pedig az alakjuk a terheléstől függően változik. A kutatócsoport egyelőre csak nyomóerő hatására változó szerkezeteket állít elő, de fejlesztési céljuk, hogy az alapanyag variálásával olyan tárgyakat állítsanak elő, amelyek a hő vagy a páratartalom változása hatására változtassák meg formájukat. Az űriparban hasznos lehet olyan napelemtáblák előállítása, amelyeket összehajtogatva juttatnak Föld körüli pályára és végleges alakjukat keringés közben veszik fel.<sup>25</sup> A ZORTRAX cég a Formnext 2022 kiállításon

<sup>22</sup> SANCHEZ 2021; GÁL-NÉMETH 2019: 240–241.

<sup>23</sup> TIBBITS [é. n.].

<sup>24</sup> SOUZA 2021.

<sup>25</sup> *Jön a 4D nyomtatás?* [é. n.]; BERTA 2017.

4D modelleket is bemutatott, amelyeket egy M300 Dual 3D nyomtatóval állított elő. Ezeket az elektromosan aktivált mozgású alkatrészeket az Európai Űrügynökséggel való szerződés keretén belül készítették el.<sup>26</sup>

## Hagyományos és különleges nyomtatási anyagok, okosanyagok

A 3D nyomtatáshoz elsőként alkalmazott anyagok a műanyagok voltak. A technológia terjedésével, az alkalmazás széleskörűvé válásával nagymértékben megnőtt a 3D nyomtatókban felhasználható anyagok köre. A hagyományos és széleskörűen alkalmazott alapanyagok (PLA – Polylactic Acid, Nylon – Polyamide stb.) mellett már porcelánt, acélt, üveget és akár fát is fel lehet használni, ugyanakkor megnyílt a lehetőség az úgynevezett okosanyagok alkalmazására is. Hogy megérthessük az okosanyagokban rejlő lehetőségeket, célszerű áttekinteni a hagyományos és széles körben, otthoni és ipari felhasználásra alkalmas anyagok körét.

A PLA egy általános felhasználású, sokoldalúan alkalmazható anyag, amely a legtöbb nyomtatóval jól nyomtatható, a nyomtatás során fellépő hibalehetőség minimális és nagyon sok színben kapható. Biokompatibilis, kukoricakeményítóből állítják elő. A kinyomtatott tárgy kellő szilárdsággal rendelkezik, ugyanakkor nem rideg. Hobbicélra kiválóan alkalmas, de nem UV-álló, így kültéri használatra nem megfelelő. A PLA-nak sok variációja létezik, például a soft PLA, a rugalmas változat, de megtalálható a karbonszállal erősített is. A Glow PLA változathoz az alapanyaghoz sötétben foszforeszkáló anyagot kevernek, amellyel eléri, hogy a sötétben a megfelelő feltöltődés (erős fényforrás segítségével) után zölden foszforeszkálnak. ESD PLA egy antiszztatikus változat, amelynek használata olyan környezetben ajánlott, ahol fontos az előállított termék kislülés elleni védelme (műszerdobozok, speciális szerszámok).

Az ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) az iparban gyakran előforduló alapanyag, amely jól bírja az igénybevételt, a hőt és az UV-sugárzást, ugyanakkor rugalmasabb, mint a PLA, és kevésbé törékeny. Hátrányaként lehet említeni, hogy nem biokompatibilis, nyomtatás során kellemetlen szagot áraszt, a PLA-hoz képest hosszabb a nyomtatási ideje, nehéz vele nyomtatni, mert magas nyomtatási hőmérséklet szükséges, ugyanakkor érzékeny a környezeti hőmérsékletre, és rosszul is tapad a tárgyasztalra. Az aceton oldja, így acetonos oldatban felületkezelve, tökéletesen sima és fényes felület állítható elő. Az ABS alternatívájaként lehet említeni az ASA-t (Acrylonitrile Styrene Acrylate), amely az ABS jó tulajdonságait megtartja. Egyszerűbb, gyorsabb nyomtatást lehet elérni vele, magasabb fokú ellenállással rendelkezik a környezeti hatásokkal szemben. Matt végeredménnyel rendelkezik, alkalmas kültéri használatra emelt hőterhelés esetén is.

A nylon (Polyamide) erős, de mégis flexibilis alapanyag, amely jól bírja a fizikai igénybevételt. Magas nyomtatási hőmérséklet szükséges a nyomtatásához, és a párát erőteljesen szívja magába, ami csúnyább végeredményt eredményez.

<sup>26</sup> 3D ipar 2022.



A PP (PolyPropylene) úgynevezett „food safe”, vagyis ételmyszerrel is kapcsolatba kerülhet. Flexibilis, de magas nyomtatási hőmérséklettel rendelkezik, és a párát erőteljesen magába szívja, így a nyomtatási végeredmény csúnyább lesz.

Különleges nyomtatási anyagnak nevezhetjük a WoodFill nevű filamentet, amely farostokat tartalmaz (biopolimerből készül farostok hozzáadásával), és általa élethű fahatású termékeket lehet előállítani. Szilárdsága a PLA-hoz képest alacsonyabb. A nyomtatás során erőteljes faillatot áraszt és 100%-ban biológiailag lebomló. Szintén különleges nyomtatási anyag a StoneFill, amely 50%-ban köport tartalmaz. Porózus tapintású terméket lehet vele elérni, de az adalékok miatt a mechanikai szilárdsága kisebb. Kőhatású modelleket, maketteket lehet előállítani vele.<sup>27</sup> Ezeknek a speciális anyagoknak az egyik legjellemzőbb felhasználási területe lehet különböző műtárgyak reprodukciója, így csata- és hadszíntérkutatás során Zrínyi-Újvárnál előkerült leletek másolatát is esztétikusan lehet felhasználásukkal elkészíteni.<sup>28</sup>

A Forust (amerikai székhelyű cég) speciális fanyomtatást fejlesztett ki, amelyben a fagémunkálás melléktermékét, a fűrészport használják fel 3D nyomtatáson keresztül különböző tárgyak előállítására. A nyomtató alapanyag előállításához a fűrészport speciális anyaggal, a ligninnel keverik, a természetes, a fás szárú növények sejtfalában megtalálható polimerrel. A 3D nyomtatás során a fűrészport rétegenként hordják fel, majd a rétegek közé biológiailag lebomló ragasztóanyagot (nem mérgező) juttatnak. A nyomtatás során létrejött terméket a hagyományos fához hasonlóan lehet csiszolni és festeni. A 3D fanyomtatással készülhetnek bútorok, használati tárgyak, autók belső terében megtalálható faelemek, amelyek megszólalásig a valódi fára hasonlítanak.<sup>29</sup>

A hagyományos, különleges nyomtatási anyagok, okosanyagok felosztás mellett beszélhetünk egy generációs felosztásról is, amelyben hat különböző generációt különböztetünk meg alapvetően történeti, időrendi meghatározás szerint. Az első generációs alapanyagoknál, amelyek viaszszerű, UV-fényre kikeményedő anyagok voltak, a fontos szempont az alakadás volt. A második generációnál már az esztétikus megjelenés is fontos volt, de a funkcionalitás még nem teljesült. A harmadik generációs anyagok (például ABS) már részleges funkcionális termékeket eredményeztek, de nem volt a 3D nyomtatáshoz teljes mértékben optimalizálva. A negyedik generációs anyagokból kinyomtatott termékek a más gyártási eljárásokkal előállítottakhoz hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek, és magas követelményeket támaztó alkalmazásokban is jól használhatók. Az ötödik generációs anyagoknál az anyag fejlesztésénél kimondottan a 3D nyomtatáshoz állítják elő az alapanyagot, nem csak egy meglevő anyagot tesznek alkalmazhatóvá. Ez a folyamat a monomer kiválasztásától a polimerizáción és huzalkészítésen keresztül a késztermék előállításáig tart. A hatodik generációs anyagoknál már új módon funkcionáló termékeket lehet létrehozni, ahol megjelennek egy gyűjtőfogalom szerint csak okosanyagoknak nevezett alapanyagok.<sup>30</sup>

Azokat az anyagokat, amelyeket úgy terveztek, hogy formájukban és funkciójukban rendkívül dinamikusak legyenek, ugyanakkor költséghatékonyabbak, mint a hagyományos anyagok,

<sup>27</sup> Kreatív3D.hu 2023; Tesztarena 2023.

<sup>28</sup> NÉMETH-SZABÓ-BALOG 2020.

<sup>29</sup> ANDERSEN 2021; Forust 2021.

<sup>30</sup> FÜZES 2018a: 8–9.

programozható anyagoknak (egyres megfogalmazásban hívják okosanyagoknak is) nevezik. Ezek könnyen előállíthatók, és képesek lapos csomagolású szállításra és önszerelésre (például önátalakító szénszál, egyedi textil kompozit), különleges képességekkel rendelkezhetnek, például programozható működtetés, és akár a színüket is képesek lehetnek megváltoztatni.<sup>31</sup>

A Rutgers mérnökei által a 3D nyomtatásnál felhasználható okosgél (hidrogél, víztartalmú gél) kifejlesztését a polip bőre inspirálta, amelyben színváltó sejtek, úgynevezett kromatoforok vannak. A polip ezekkel a sejtekkel tudja megváltoztatni puha bőre színét álcázás és kommunikáció céljából. A fejlesztés során fényérzékelő nanoanyagot építettek be a hidrogélbe, úgymond mesterséges izommá alakítva, amely a fény változásaira reagálva összehúzódik. A fényérzékelő okosgél a 3D nyomtatott rugalmas anyaggal kombinálva megváltoztatja színét, így álcázó hatást eredményez. A fejlesztések további célja a technológia érzékenységének, méretre szabhatóságának, tartósságának, valamint válaszidejének javítása.<sup>32</sup>

Megalkottak egy 4D nyomtatási módszert az okosgélhez, amely úgynevezett élő struktúrák kialakulásához vezethet az emberi szervezetben, és alkalmas lehet célzott gyógyszeradagoláshoz. Az okosgél szerkezeti merevséget adhat a tüdőnek, és tartalmazhat kis molekulákat, vizet vagy gyógyszereket, amelyeket a testben kell szállítani és felszabadítani. Egy úgynevezett lágy robotika területét is létrehozhatja, és új alkalmazásokat tehet lehetővé a rugalmas érzékelőkben és beavatkozókban, valamint orvosbiológiai eszközökben. Gyakorlati alkalmazás során a litográfiatechnikát használták, amely gyors és olcsó anyagok 3D nyomtatását biztosítja. Ennek során a 3D elem nyomtatása egy speciális gyanta rétegeiből áll, ahol a gyanta a hidrogélből, egy vegyi anyagból, amely kötőanyagként működik, egy másik vegyi anyagból, amely megkönnyíti a kötést és egy festékből – amely szabályozza a fény bejutását – áll össze. Megismerték, hogy hogyan kell a hidrogél növekedését és zsugorodását szabályozni. 32 °C alatti hőmérsékleten a hidrogél több vizet szív fel és megduzzad, viszont ha a hőmérséklet meghaladja a 32 °C-ot, akkor a hidrogél elkezd kiüríteni a vizet és zsugorodni kezd. Megállapították, hogy a hőmérséklet megváltoztatásával a 3D nyomtatott elemet programozni lehet, és létre lehet hozni mozgást. A hidrogéllal az emberi haj szélességétől a több milliméter nagyságú tárgyak hozhatók létre.<sup>33</sup>

## Összefoglalás

A 3D nyomtatási technológia napjainkra egyre jobban kiforrja magát, és alig van olyan terület, ahol valamilyen formában ne alkalmazzák. Az ipar széleskörűen felhasználja ezt az additív gyártástechnológiát műanyagok, fémek és sok egyéb különleges anyag alkalmazásával. Az ipari használat mellett már elérhető az otthoni, hobbicélú felhasználás is, mivel viszonylag könnyen és olcsón beszerezhetővé vált. Természetesen sok olyan terület van, amely most még úgymond felfutóban van, és kevés lehetőséget lehet látni a tényleges felhasználásra. Ha

<sup>31</sup> Self-Assembly Lab 2023b.

<sup>32</sup> The Engineer 2021; PEREJ 2021.

<sup>33</sup> BATES 2018.

belegondolunk, minden technológia hasonlóképpen indult, először szinte tudományos fantasztikumnak tűnt (mobiltelefon, mesterséges intelligencia stb.), és manapság pedig átszövik az életünket, szinte nélkülözhetetlenné váltak. Mivel a 3D nyomtatási technológia elterjedt, a technika fejlődésével egyetemben a cikkben vázolt egyes, talán túlzónak tűnő gondolatok is lehet, hogy ténylegesen megvalósított, reális megoldások lesznek.

## Felhasznált irodalom

- 3D ipar (2022): *4D nyomtatás*. Online: [www.3dipar.hu/post/%C3%BAj-term%C3%A9kek-a-zortrax-t%C3%B3l-a-formnext-2022-n](http://www.3dipar.hu/post/%C3%BAj-term%C3%A9kek-a-zortrax-t%C3%B3l-a-formnext-2022-n)
- 4D nyomtatás: adalékgyártás intelligens anyagokkal 2021. Online: <https://kp.hu/4d-nyomtatás-adalékgyártás-intelligens-anyagokkal-video/>
- AiSync [é. n.]: *Additív gyártási szoftver*. Online: <https://ai-build.com/>
- ANDERSEN Dávid (2021): *Már fát is lehet 3D-nyomtatni*. Online: [www.zoldpalya.hu/design/fa-3d-nyomtatás-forust-302502.html](http://www.zoldpalya.hu/design/fa-3d-nyomtatás-forust-302502.html)
- BATES, Todd B. (2018): *Engineers 3-D Print Shape-Shifting Smart Gel*. Online: <https://phys.org/news/2018-01-d-shape-shifting-smart-gel.html>
- BERTA Sándor (2017): *Jön a 4D-nyomtatás?* *Sg.hu*, 2017. május 9. Online: <https://sg.hu/cikkek/it-tech/125183/jon-a-4d-nyomtatás>
- FÜZES László (2018a): *A 3D nyomtatás alkalmazása a termelésben*. Online: <https://quattroplast.hu/muanyagipariszemle/2018/06/a-3d-nyomtatás-alkalmazása-a-termelésben-07.pdf>
- FÜZES László (2018b): *A 3D nyomtatás egészségügyi és építészeti alkalmazásai*. Online: <https://quattroplast.hu/muanyagipariszemle/2018/05/a-3d-nyomtatás-egeszsegugyi-es-epiteszeti-alkalmazásai-01.pdf>
- EMBER István – ÁDÁM Balázs (2022): *Kumulatív töltetházak 3D nyomtatása*. *Hadmérnök*, 17(3), 35–44. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2022.3.2>
- EMBER István (2023): *Additív gyártástechnológia alkalmazási lehetőségei vágótöltet készítésére*. In SZELEI Ildikó (szerk.): *A hadtudomány és a 21. század*. Budapest: Doktoranduszok Országos Szövetsége, 9–15. Online: <https://hdi.uni-nke.hu/document/hdi-uni-nke-hu/hadtudomány-es-a-21-sz-kotet-2023.pdf>
- Forust (2021): *Forust is Building a Greener Future Through 3D Printed Wood*. Online: [www.forust.com/](http://www.forust.com/)
- GÁL Bence – NÉMETH András (2019): *Additív gyártástechnológiák katonai alkalmazásának vizsgálata, különös tekintettel a katonai elektronika területére*. *Hadmérnök*, 14(1), 240–241. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2019.1.19>
- GYARMATI József – HEGEDŰS Ernő – GÁVAY György (2022): *Automata sebességváltóban alkalmazott kapcsolt bolygóművek – Wilson-váltó: Harckocsi-sebességváltó modell kialakítása 3D nyomtatással oktatási célból*. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(3), 113–126. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2022.3.7>
- GYARMATI József (2006): *A nehézpuskát jellemző szempontok fontosságát kifejező súlyszámok számítása és statisztikai vizsgálata*. *Haditechnika*, (2), 11–16.
- GYARMATI József (2011): *Haditechnikai eszközök összehasonlítása*. Útmutató. Budapest: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem.
- HEGEDŰS Ernő (2023): *Szálerősítéssel készült anyagok 3D-s nyomtatásának hadiipari alkalmazási lehetőségei I. rész: UAV-k és könnyűjárművek a haderőben és a katonai logisztikában*. *Haditechnika*, 57(4), 62–66. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.57.4.12>

- Hvg.hu (2023): Korábban még nem sikerült olyan élő anyagot készíteni, amit 3D-nyomtatásra is fel lehetett volna használni, a Harvard Egyetem tudósainak azonban most sikerült. *Hvg.hu*, 2021. november 29. Online: [https://hvg.hu/tudomany/20211129\\_3d\\_nyomtatás\\_elo\\_tinta\\_epulet\\_elo\\_struktura](https://hvg.hu/tudomany/20211129_3d_nyomtatás_elo_tinta_epulet_elo_struktura)
- Jön a 4D nyomtatás? [é. n.] Online: <https://iparnegyed.hu/jon-a-4d-nyomtatás/>
- Kreativ3D.hu (2023): *3D nyomtatás alapanyagai*. Online: <http://kreativ3d.hu/3d-nyomtatás-alapanyagai>
- Logisztika.com (2018): *A jövő technológiái, avagy mi jöhet az IoT és a mesterséges intelligencia után?* Online: <https://logisztika.com/a-jovo-technologiai-avagy-mi-johet-az-iot-es-a-mesterseges-intelligencia-utan/>
- Mandiner (2016): 4D nyomtatás. *Mandiner*, 2016. március 7. Online: <https://mandiner.hu/kultura/2016/03/4d-nyomtatás>
- Mandiner (2017): Egyszerűbb és gyorsabb lesz a 4D nyomtatás. *Mandiner*, 2017. április 19. Online: <https://mandiner.hu/kultura/2017/04/egyszerubb-es-gyorsabb-lesz-a-4d-nyomtatás>
- MEIXNER Zoltán (2022): 3D bionymtatás – kis iparág, mérhetetlenül nagy potenciállal. *Computerworld*, 2022. február 20. Online: <https://computerworld.hu/technologia/3d-bionymtatás-egy-kis-iparág-merhetetlenul-nagy-potenciallal-306729.html>
- MTI (2019): 40x kisebb, mint amit most használnak az orvosok: kész az új sztent. *Hvg.hu*, 2019. augusztus 10. Online: [https://hvg.hu/tudomany/20190810\\_a\\_vilag\\_legkisebb\\_sztentje\\_erhalo\\_etz\\_zurich](https://hvg.hu/tudomany/20190810_a_vilag_legkisebb_sztentje_erhalo_etz_zurich)
- Műszaki Magazin [é. n.]: *Jön a 4D nyomtatás*. Online: [www.muszaki-magazin.hu/2017/04/24/jon-a-4d-nyomtatás/](http://www.muszaki-magazin.hu/2017/04/24/jon-a-4d-nyomtatás/)
- 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.
- NÉMETH András – VIRÁGH Krisztián (2022): Mesterséges intelligencia és haderő – A mesterséges intelligencia területei. III. rész. *Haditechnika*, 56(3), 2–7. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.56.3.01>
- PEREI Dóra (2021): Az alakváltó okosgél hamarosan új, rugalmas robotok és összehajtható kijelzők alapvető összetevője lehet. *Rakéta.hu*, 2021. január 25. Online: <https://raketa.hu/az-alakvalto-okosgel-hamarosan-uj-rugalmas-robotok-es-osszehajthato-kijelzok-alapveto-osszetevoje-lehet>
- RÁKOSI Sára et al. (2023): A 3D-nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(1), 133–148. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.1.10>
- SANCHEZ, Jesus (2021): *4D nyomtatók: Mik ezek és mit tehetnek?* Online: <https://movilforum.com/hu/impresoras-4d/>
- Self-Assembly Lab (2023a): *3D Knit BioSuit*. Online: <https://selfassemblylab.mit.edu/3d-knit-biosuit>
- Self-Assembly Lab (2023b): *Programmable Materials*. Online: <https://selfassemblylab.mit.edu/programmable-materials>
- Shaoxing Xinshan Tudományos Technológiai Co., Ltd. (2021): *Ismeri a 4D nyomtatási technológiát?* Online: <http://m.hu.xslelamp.com/news/do-you-know-4d-printing-technology-43944044.html>
- SOUZA, Eduardo (2021): *4D Printing? Bridging Additive Manufacturing with Smart Materials*. Online: [www.archdaily.com/966556/have-you-heard-of-4d-printing-bridging-additive-manufacturing-with-smart-materials?ad\\_source=search&ad\\_medium=projects\\_tab&ad\\_source=search&ad\\_medium=search\\_result\\_all](http://www.archdaily.com/966556/have-you-heard-of-4d-printing-bridging-additive-manufacturing-with-smart-materials?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_all)
- Tesztarena (2023): *3D nyomtatás, 5. rész – milyen alapanyag?* Online: <https://tesztarena.hu/3d-nyomtatás-5-resz-milyen-alapanyag/>
- TIBBITS, Skylar [é. n.]: 4D Printing: Buildings That Can Change Over Time. *BBC*, [é. n.]. Online: [www.bbc.com/future/article/20130709-buildings-that-can-make-themselves](http://www.bbc.com/future/article/20130709-buildings-that-can-make-themselves)
- The Engineer (2021): *Colour Changing Cephalopods Inspire Smart Gel*. Online: [www.theengineer.co.uk/content/news/colour-changing-cephalopods-inspire-smart-gel](http://www.theengineer.co.uk/content/news/colour-changing-cephalopods-inspire-smart-gel)

*A mesterséges intelligencia és a 3D nyomtatás együttműködése.* [é. n.]. Online: <https://3dmed.szikha.hu/a-mesterseges-intelligencia-es-a-3d-nyomtatasi-egyuttmukodese/>

VÉGVÁRI Zsolt – HEGEDŰS Ernő – ZENTAY Péter (2022): A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I. rész. *Haditechnika*, 56(6), 56–60. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.56.6.09>

Weborvos (2023): *A gyógyítást segítheti a 4D technika is.* Online: <https://weborvos.hu/lapszemle/a-gyogytast-segitheti-a-4d-technika-is-240391>