

## 3D nyomtatás újdonságai: alkalmazás az építőiparban és a méretpontosság növelése

Az ipar digitalizációs átalakítása részeként az új, 3D nyomtatáson alapuló gyártástechnológia megkezdte behatolását az építőiparba is. Ennek eredményeképpen nő az iparág termelékenysége és csökken környezeti károsító hatása is. A 3D nyomtatással készült gépalkatrészek, autóiipari, illetve gyógyászati termékek méretpontossága elmarad a hagyományos technológiákkal készültéktől. Német kutatók a méretpontosság javítására végeztek sikeres kísérleteket.

*Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; fém feldolgozás; 3D nyomtatás; ABS; PLA; SAN; kompozitok.*

### Épületek 3D nyomtatása

Az additív gyártástechnológiák, amelyeket gyakran 3D nyomtatásnak neveznek, fő előnye, hogy nincs szükség költséges gyártószerszámok elkészítésére, a műanyag vagy fém termékek rétegenként, a számítógépes tervrajz szerint állíthatók elő. Ugyanakkor a 3D nyomtatású termékek méretpontossága és mechanikai szilárdsága elmarad a hagyományos technológiákkal készültékhöz képest.

A környezeti fenntarthatóság nevében gyakran elítélik a műanyagokat, ezért különösen jelentős az amerikai építészek és mérnökök egy csoportja által létrehozott SHoP Architects cég fejlesztése, ami műanyag kompozitokból állít elő 3D nyomtatással nyitott cellaszerkezetű falakból álló épületeket, melynek során természetes erősítő anyagként bambuszt használ a politejsav (PLA) polimer kompozitjaihoz.

A cég szorososan együttműködik a Tennessee's Oak Ridge National Laboratory (ORNL) és a 3D specialista Branch Technology céggel, továbbá a műanyag kompaundáló Techmer PM vállalattal. 2016-ban elnyerték a Design Miami globális fórum *Design Visionary Award* díját egy szemet gyönyörködtető, de mégis teljes mértékben funkcionális 3D nyomtatású pavilonjukkal, amely lehetőséget adott a látogatók leültetésére és a bárpultjánál akár 1000 pezsgős pohár elhelyezésére is.

A lendületes, görbe vonalvezetésű új épületeik kivitelezéséhez a Branch új, *Cellular Fabrication (C-Fab<sup>TM</sup>)* 3D nyomtatási technológiáját alkalmazzák, hogy görbült boltíves épületeket készítsenek egy „kuka” robotkar segítségével, amely 11,6 m hosszban képes mozogni. Ebben az esetben szénszál erősítésű ABS alapanyagot alkalmaztak, amelyet a Technomer cég készített erre a célra.

Azonban újabban bioműanyagot (PLA) bambuszerősítéssel ellátva is sikerült felhasználniuk, miáltal a teljes épület biodegradálható lesz használatát követően. Az új kompozitot néhány hét alatt fejlesztették ki, amibe beletartozott a bambusz beszerzése egy, számukra teljesen ismeretlen, új forrásból. Végül a Techmer cégnek sikerült időre legyártania a projekthez szükséges 4,5 t PLA/bambusz kompozitot. Miután nem volt világos, hogy az ilyen épületekre milyen tűzvédelmi előírások vonatkoznak, kifejlesztették az égésgátolt változatot is, de erre végül nem volt szükség.

Az ORNL időközben az amerikai Cincinnati Inc. cég „Big Area Additive Manufacturing” (BAAM) (Nagy Területű Additív Gyártástechnológia) berendezését alkalmazta, hogy 3D nyomtatással állítsa elő a PLA komponenseket demonstrációs célra a saját Oak Ridge-i telephelyén. Ehhez PLA granulatúmot és granulátum formátumú adalékanyagokat alkalmaztak, amely jól használható egyszeri és korlátozott számú alkalmazásokhoz, illetve csomagolási és promóciós célokra is.

A bambusz-szálerősítés számos előnyt nyújt a hagyományos, petrokémiai alapú 3D nyomtató alapanyagokhoz képest. A bioanyagok kevesebb energiával állíthatók elő, kisebb karbonlábnyomuk van és hasznos élettartamukat követően bi-degradálhatók. A PLA részegységek energiaigénye mintegy harmada, karbonlábnyoma pedig egy nagyságrenddel kisebb a hasonló célokra használt, szénszállal erősített hagyományos műanyag rendszerekhez viszonyítva. A Branch cég robosztus szerkezetei igen tartósak is.



Ezen túlmenően a globális mérnöki konzulens cég, a Thornton Tomasetti, elemezte a két önálló boltíves részegység (amelyek tréfásan a „Lim” és „Lom” nevet kapták) összeerősítési lehetőséget, hogy a támasztó gerendák szögének módosításával javítsa a két egység teljes teherbírását. Az így előállított szerkezet egyike a legnagyobb 3D nyomtatással készült megoldásoknak, amely mintegy  $45,3 \text{ m}^3$  térfogatú teret biztosít (1. ábra). Magassága teljesen összeszerelve 4,3 m, Az építmény leghosszabb egyetlen darabból álló része 7,6 m hosszú, 1,8 m széles és 2,4 m magas (projekt video: <https://vimeo.com/214207883>). A legnagyobb darab méretét a Branch cég gyártócsarnoka ajtajának méretei határozták meg, azonban időközben a cég egy nagyobb telephelyre költözött.

Amikor a 2016-os kiállítás befejeződött, a SHoP cég átvitte a két nagy panelt (Lim&Lom) egy másik telephelyre a Miami-ban lévő Jungle Plaza területére. A két nagy panelt fonott zipzáras kötéssel egyesítik. A pavilon szilárdságára jellemző, hogy sikeresen átvészelte az Irma hurrikánt is.

Ezután partnereivel folytatva az együttműködést, a SHoP cég átszállította a pavilont Kenyába, a Nairobi-ban megnyitásra kerülő Egyesült Nemzetek Habitate Assembly rendezvény színhelyére (2. ábra). Az összes alkatrész szállítására 12 kamionra volt szükség, amelyek a speciális ládákból (a legnagyobb:  $6 \times 2,4 \times 2,4 \text{ m}$ ) utaztak. A rendezvény után a pavilont újra visszahozták az USA-ba.



2. ábra A Miami-ban lévő nagy pavilon egy részét Kenyában állították fel. Elhelyeztek benne ülőhelyeket, bárpultot és ellátó pultot is. A PLA bioműanyagot bambusz szálakkal erősítették meg, a részegységeket fonott zipzáras megoldással erősítették egymáshoz

Az előző projektben is résztvevő Branch Technology cég egy  $111 \text{ m}^2$ -es lakótérrel és  $186 \text{ m}^2$  nyílt tornáccal és autóbeállóval rendelkező családi házat nyomtatott saját Free Form (Szabad Forma) 3D eljárásával (2. ábra). A rendszert a 2019-es ANTEC® rendezvényen (Det-



roit) tartott előadáson is bemutatták. Az új módszer nagymértékben digitalizált, termelékeny és nagyon kevés hulladékkal működik. A cég szerint ez *Amerika első, 3D nyomtatással készített nagyméretű, kereskedelmi célú épületek gyártására alkalmas eljárása.*

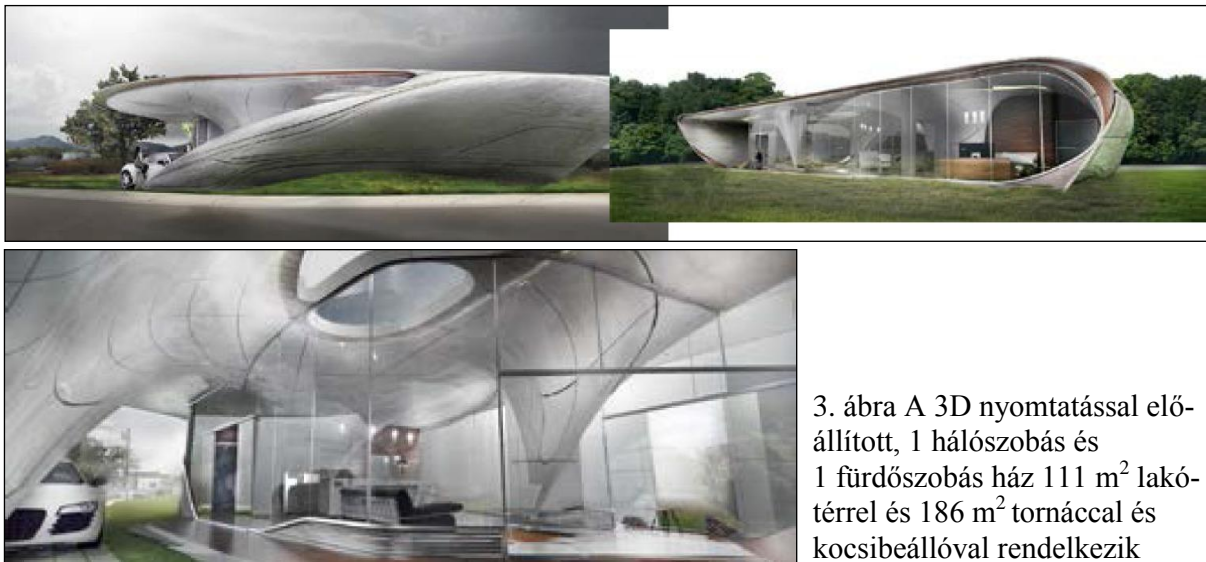
A cég egy szabadalmaztatott extruderfejet erősített egy Kuka robotkar végére, kombinálja az ipari robotokat a kifinomult számítógépes algoritmussal, és elsősorban szénszálerősítésű hőre lágyuló kompozitokat használ nyílt cellaszerkezetű, nagyméretű épületelemeinek gyártásához, ami új, jobban fenntartható és szabad formavezetésű épületekhez vezet.

Az eljárás képes 2,4 m széles, 3,65 m magas és 9,1 m hosszú elemeket legyártani, amelyeket egymáshoz lehet erősíteni, miáltal meglehetősen nagy épületek is könnyen létrehozhatók. A vállalat adatai szerint eljárásuk 80%-kal hatékonyabb, mint a hagyományos építési módszerek, miközben nagyon magas szilárdság/súly arányt biztosít.

Az új eljárással már több demonstratív projektet is megvalósítottak:

- megnyerték a NASA pályázatát a Marson kialakítandó 3D nyomtatású lakóépület tervezésére,
- elkészítették a Design Miami rendezvényre a pavilont, amelynek egy részét a fentiek szerint Nairobi-ba szállították és ott is felállították,
- elkészítettek egy nagyon nagy, kültéri színházi hangvisszaverő félkupolát (Nashville, Tennessee),
- elkészítettek egy nagyméretű beltéri függőkeretet a Chicago Szabadtéri Múzeum számára.

A 3. ábrán látható egyszintes családi ház egy hálószobával és egy fürdőszobával rendelkezik. Ez az új eljárás mentes azoktól a megszorításoktól, amelyektől a hagyományos építési módszerek szenvednek. Ez utóbbiaknál az egyedi alakok, formák kialakítása ugyanis nagyon drága és sokszor kivitelezhetetlen. A *C-Fab* eljárás mindenki számára lehetővé teszi az egyedi formaigények olcsó, költséghatékony megvalósítását.



3. ábra A 3D nyomtatással előállított, 1 hálószobás és 1 fürdőszobás ház 111 m<sup>2</sup> lakótérrel és 186 m<sup>2</sup> tornáccal és kocsibeállóval rendelkezik

Az ilyen újítások létfontosságúak az építőipar számára, ami eddig elmaradt az új, hatékony digitalizált termelési módszereket használó más iparágaktól. A McKinsey Global Insti-

tute (MGI) felmérése szerint az építőipar digitalizáltsága az USA-ban az utolsó előtti, Európában pedig az utolsó helyen áll az iparágak rangsorában. Az építőipar gyenge hatékonysága világszerte mintegy 1,6 billió USD költséggel jár. A felmérés szerint az innovatív cégek és régiók példái azt sugallják, hogy hét területen szimultán feljavítható az építőipar termelékenysége 50–60%-kal. E területek közé tartozik a tervezési és méretezési folyamatok újragondolása, a beszerzési módszerek és az ellátási lánc szervezésének javítása, a helyszíni kivitelezés fejlesztése, a digitális technológiai módszerek bevezetése, új anyagok használata és a fejlett automatizáció. A Branch cég mindezen területekkel intenzíven foglalkozik.

Most a „jövő üzeme” projektben a cég egy új koncepciót igyekszik Chattanooga területén megvalósítani: egy 3716 m<sup>2</sup>-es üzemcsarnokot kívánnak megépíteni a világ 12 legnagyobb „free-form” 3D nyomtatójával. Ez az üzem lehetne a jövő gyárainak prototípusa, amelynek elemeit a helyszínrre szállítják, és ott összeerősítik, de az elemeket akár a helyszínen, vagy annak közvetlen közelében is legyárthatják.

Jelenleg gyártási kapacitásuk 228 kg/hét, amely a 3D nyomtatásban nagyon soknak számít. A jelenlegi 12 robotból álló kapacitást 32-re kívánják növelni a közeljövőben. A jelenlegi üzem csendes, tiszta, napfényes és kialakításorientált elrendezésű. A jelenlegi alapanyag beszállító partnerük a Techmer PM (Clinton, Tennessee), amely a Branch cég által legtöbbször használt szénszál-erősítésű ABS kompozitot is szállítja, amely nagyon tartós anyagnak bizonyult. Azonban alkalmaznak erősítés nélküli biopolimert is, amelynek használata környezetvédelmi okokból (bio-degradálhatóság) kívánatos az építőiparban. A Branch cég által használt biopolimerekhez megfelelő adalékokat is kevernek, hogy a szerkezeti elemeik megfeleljenek az épületek belsejére vonatkozó tűzvédelmi előírásoknak.

### **3D nyomtatású alkatrészek méretpontossága**

A 3D nyomtatással készülő műanyag- és fém alkatrészek méretpontossága és felületi minősége elmarad a hagyományos technológiákkal (pl. fröccsöntéssel) készültétől. Ennek alapvető oka az, hogy az ilyen alkatrészek egymáshoz hegedő vékony rétegekből épülnek fel. A német Paderborni Egyetem egyik intézetének (DMCR) kutatói kísérleteket végeztek annak érdekében, hogy feltárják a méretek ingadozásának mértékét és módszereket találjanak ennek csökkentésére.

A rétegek vastagsága egy adott berendezés esetén nagyjából állandó és a legtöbbször 0,2 mm alatti érték. A kutatók által használt berendezés egy FDM (Fused Deposit Modelling ~ összeolvasztott réteges modellezés) elven működő készülék az extrúzióhoz hasonló megoldásokat használt a rétegek felépítéséhez szükséges műanyag cseppek előállításához. A kísérletekhez alapanyagként a 70% metilmetakrilát-akrilnitril-butadién-sztirol (MABS) és 30% sztirol-akrilnitril (SAN) kopolimer elegyét alkalmazták. A kísérletek második fázisában előállított komplex formájú alkatrészhez egy *SR-30* típusjelű, lúggal kioldható támasztó anyagot is használtak. Az első körben hasáb alakú, egyszerű geometriájú próbatesteket készítettek állandó 10x10 mm keresztmetszettel és változó, 3–400 mm közötti hosszban.

A méretpontosságot befolyásoló bizonyos tényezőket, mint amilyen az anyag- és géptípus, a tárolási körülmények és az utókezelés, állandó értéken tartották, vagyis nem változtatták. Ugyanakkor más tényezők, mint a mérettartomány, névleges méretek, kialakítás és elhelyezés hatását vizsgálták. A próbatestek méretei megfelelték a *DIN EN ISO 286-1* és a *DIN 1642* szabványoknak.

A vizsgálatoknál csak a méretek ingadozását mérték, nem foglalkoztak a forma, az állapot és a felületi minőség kérdésével. E vizsgálatoknál méretként két egymással szemben lévő pont közötti távolságot értünk, amelyet kengyeles mikrométerrel határoztak meg (0,01 mm). Minden próbatestet három helyen mérték meg:

- a keletkező hegedési varratnál,
- a mérőfelület középpontjánál,
- átlósan az első mérőponttal szemben.

A próbatesteket egy modern, *Fortus 400mc* FDM berendezésen (Stratasys Ltd., USA) készítették el, amelynek maximális (XYZ) termékmérete 406x355x406 mm, és amely egy zárt, fűthető munkakamrával rendelkezik. A rétegek vastagsága 0,1778 mm volt és a standard gyártási paraméterek beállításáról a Stratasys *Insight 9.1* szoftverje gondoskodott. Ennek eredményeképpen teljes mértékű darabkitöltést értek el, egy 90°-os alternáló 45°-os X tengely irányú raszterszöggel. A névleges méreteket az építőkamra X, Y, és Z tengelyének irányában készítették el. Az eredmények statisztikus módszerekkel történő kiértékeléséhez max. 6–6 próbatestet készítettek, így az átlagot hasonlíthatták a névértékhez.

A mérések szerint minél nagyobb névleges méreteket használtak, annál nagyobb méret-ingadozásokat tapasztaltak. Az X és Z tengelyirányban a tényleges méretek nagyobbak voltak a névlegesnél, míg 80 mm felett az Y irányban kisebbek. A legnagyobb mért eltérés kb. 0,6 mm volt és a 400 mm névleges méretű próbatestnél lépett fel, az X tengely irányában. A Z irányú méretingadozásokat a rétegenkénti felépítés magyarázza., mivel csak egész számú réteget lehet létrehozni, ami szisztematikus hibát okoz. Az X és Y irányú méreteltéréseket az FDM fej mozgó motorjainak ingadozásai okozzák, annak függvényében, hogy milyen értékű az egységnyi hosszra eső szög elfordulás („lépés”/coll, vagyis PPU). Ezt az értéket a szerviz menüben minden motorral egyedileg lehet beállítani, ami jobb méretpontosságot eredményez.

A kutatók kísérletet tettek a feldolgozási paraméterek optimalizálására. A vizsgálatok szerint egyes feldolgozási paraméterek nagy hatással vannak a méretpontosságra, ezért a termékenkénti optimalizálásuk potenciális sikerforrás lehet. A gyártási folyamat végén a darab lehűlése a hőtágulás révén a méretek csökkenését okozza, amit a gyártás során kialakított nagyobb méret kompenzálhat. Az ilyen zsugorodás független a darab geometriájától. A paraméterek optimalizálásával sikerült az X irányú eltéréseket max. –0,2 mm-ig csökkenteni a 400 mm névleges értékű próbatesteknél. A Z és Y irányú eltéréseknél a 80 mm névértékű próbatesteknél viszonylag jelentős, –0,09mm és +0,17 mm eltéréseket voltak tapasztalhatók, de a nagyobb méreteknél ezek az értékek alig emelkedtek.

A következő lépés egy reális, alkatrészként ténylegesen felhasználható, bonyolult kialakítású darab gyártása volt. A termék hengeres részeket (pl. furatokat) és egyenes szakaszokat (7–224 mm) is tartalmazott. Itt is az *ABS-M30* alapanyagot használták és minden beállításnál 3–3 párhuzamost gyártottak le. A méreteket itt is kengyeles mikrométerrel határozták meg.

A méretek meghatározása után *regresszió analízist* végeztek. A mért és számított méretek eltérései felvilágosítást adtak arról, hogy a próbatestek optimalizálásának eredményeit mennyire lehet egy valós darab készítéséhez átültetni. A regresszió analízis kimutatta, hogy a mért eredmények egy  $\pm 15\%$ -os konfidencia sávban helyezkedtek el, ami megnyugtató eredménynek számít. A kiértékelés továbbá megmutatta, hogy közepesen a számított regressziós érték a 0,05 mm-es nagyságrendbe esik.

A méretpontosság növelésére irányuló kutatómunkát a jövőben is folytatják, a mérési eredményeket a feldolgozási paraméterek optimális beállításához kívánják széles körben alkalmazni.

Összeállította: Dr. Füzes László

Grace R.: Stunning 3D-Printed Pavilion Weathers Time, Nature's Wrath and Overseas Travel = *Plastics Engineering*, 5.sz. 2019. p.16–21.

Knoopp F., et.al.: Additive Fertigung nach Maß = *Kunststoffe*, 6. sz. 2018. p.70–73.