

## Rövid szállal erősített műanyagok nyomtatási technológiája

A rövid szálal erősítőanyagok a 3D nyomtatásban is jelentős szerepet játszanak a termékek mechanikai szilárdságának javításában. A hagyományos kompaundálás – filament extrúzió – 3D nyomtatás sorrend mellett léteznek olyan módszerek is, amelyekkel a feldolgozási lépések száma csökkenthető. Az egyik ilyen a rétegek közti szálak szórása a nyomtatási lépések között, a másik a granulátum alapú 3D nyomtatás. Az első esetben a kompaundálási lépés kerülhető el, a második esetben a filament extrúzió.

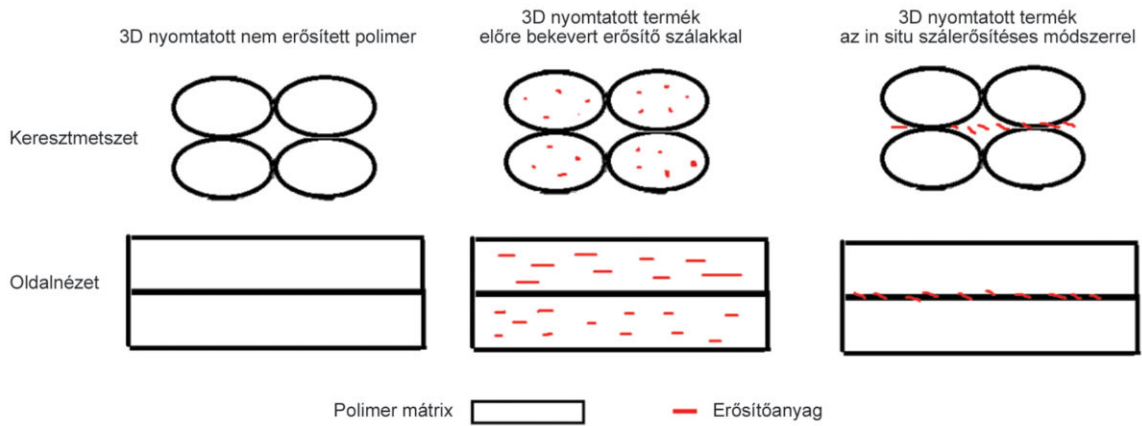
*Tárgyszavak: rövid szálak, erősítőanyag, szálszórás, granulátum alapú nyomtatás*

Az ömledék alapú 3D nyomtatásban (FFF = fused filament fabrication), akárcsak a fröccsöntésben, népszerűek a rövid szállal erősített műszaki műanyagok, amelyek jelentős mértékben javítják a mechanikai tulajdonságokat, mégis könnyebben feldolgozhatók, mint a folyamatos szállal erősített hőre lágyuló kompozitok. A hagyományos technológia már bejáratos: a rövid szálakat kompaundálják a hőre lágyuló mátrix anyaggal, abból nyomtatószálat (filament) extrudálnak, majd a szálakat hagyományos 3D nyomtatókkal feldolgozzák. Itt olyan technológiákat mutatunk be, amelyek kevesebb technológiai lépéssel dolgoznak. Az egyik hagyományos szál-nyomtatással dolgozik, de a rövid szálakat helyben (in situ) adagolják a frissen kinyomtatott filamentbe, ebben az esetben a kompaundálás nem különül el a nyomtatásból. A másik technológia úgy működik, hogy a kinyomtatott műanyag filament-rétegre szórnak rövid szálakat, majd egy lézerrel melegítik, hogy segítsék a rétegek közti tapadást javító szálak beépülését. A harmadik esetben a kompaundálás megtörténik és rövid szállal erősített granulátumok képződnek, itt viszont nincs filament-extrúzió, hanem a nyomtatás közvetlenül a granulátumokból történik.

### Rövid szálak in situ kompaundálása filament-nyomtatás során

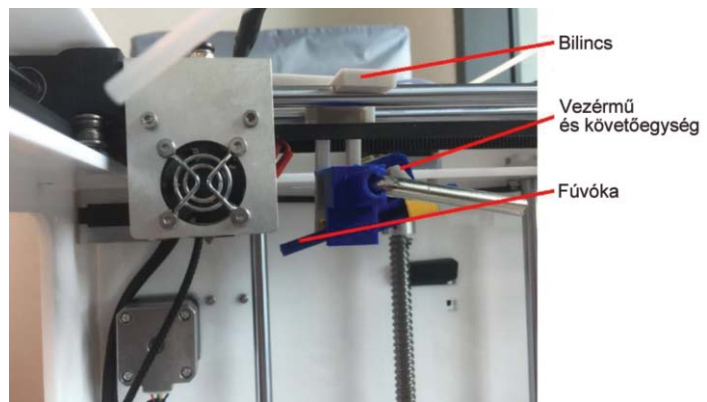
A leírt megoldásban a rövid szálakat a hőre lágyuló filament nyomtatása során adják a rendszerhez, amihez új száladagolót fejlesztettek ki, de ez ráhelyezhető már létező 3D nyomtatókra is. A koncepciót PLA mátrixon próbálták ki, kb. 1, 2,4 és 5% üvegszál tartalom mellett. A rövid szálak bevitelére eddig lényegében háromféle technológiát alkalmaztak: előzetes kompaundálás, a nyomtató fűvókába történő adagolás, és a kinyomtatott filamenthez való hozzáadás. Az első a legelterjedtebb módszer. A második hosszú és folytonos szálak esetében használt (helyben történő impregnálás). A rövid szállal erősített rendszerekben a nyomtatott filamentek mechanikai jellemzői javulnak, de a rétegek közti adhézió nem mindig, tehát a nyomtatott tárgyakban nem mindig realizálható az erősítő hatás. Az itt leírt módszerben a frissen kinyomtatott, még viszkózus – viszkoelasztikus filament rétegek közé juttatják be a rövid szálakat, amely egyszerre javítja a rétegek közti szilárdságot, és csökkenti a rétegek közti porozitást. (A nem erősített, az anyagában erősített és a rétegek között erősített nyomtatott filamentek közti különbséget az 1. ábra mutatja).

A szokásos FFF 3D nyomtatók el vannak látva egy vagy két ömledék-fűvókával, ehhez kell még egy rövid szál adagolót tervezni, amely egyenesen tudja adagolni a rövid szálakat, együtt képes mozogni a nyomtatófejvel, és arra könnyen rászerezhető vagy leszerelhető róla. Az adagoló helyzetét vagy szögét is tudni kell állítani. Az adagoló egy rázott, rövid szálakat tartalmazó tartályhoz csatlakozik. Mikor az adagoló megfelelő pozícióba kerül, egy egyenáramú motor bekapcsolja a vibrációs mozgást

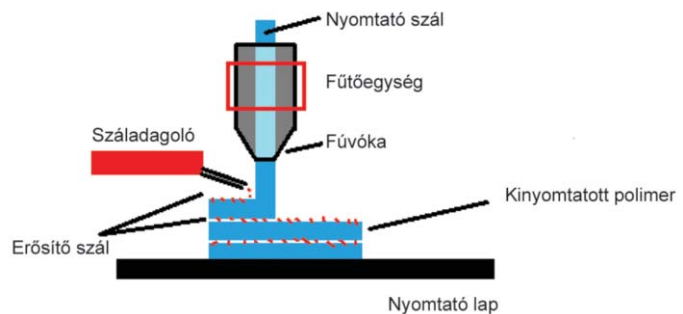


**1. ábra.** Az erősítőszálat nem tartalmazó (bal oldalt), anyagában erősített (középen) és a rétegek között erősített (jobb oldalt) nyomtatott filamentek közti különbség (Forrás: Ismail K.I. és munkatársai).

és a száladagolás megkezdődik. A 2. ábra mutatja a felszerelt száladagolót. Az adagolót egy Forcemaker S220 3D nyomtatóra szerelték fel. A nyomtatás menetét sematikusán a 3. ábra mutatja. A kísérletben PLA (politejsav) nyomtató filamenteket használtak, a nyomtatás iránya  $\pm 45^\circ$  volt. Az üveg erősítőszálakat (átmérő:  $13 \mu\text{m}$ , hossz:  $160 \mu\text{m}$ ) a frissen nyomtatott PLA rétegekre adagolták, a száltartalmat az adagolás sebességével változtatták és termogravimetriás (TGA) módszerrel határozták meg. Az üveg jelenlétét SEM-EDX (energiadiszperzív elemvizsgálattal kiegészített pásztázó elektronmikroszkópos) módszerrel is igazolták.



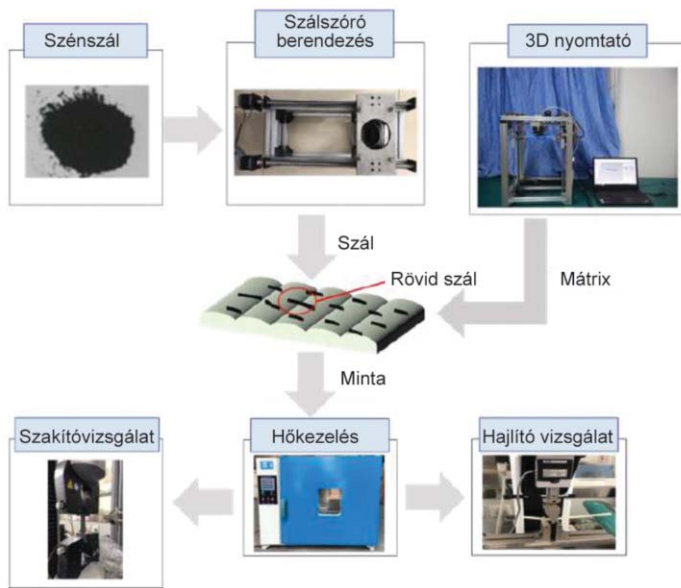
**2. ábra.** A felszerelt száladagoló fényképe.



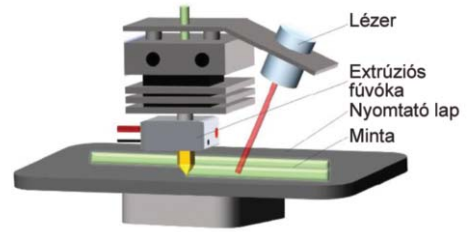
**3. ábra.** A nyomtatás menetének sematikus bemutatása.

### Nyomtatott rétegekre szórt rövid szálak beépítése lézerrel

Egy másik kutatócsoport az előbb említett módszertől eltérő megoldást javasolt: kinyomtattak egy réteget hőre lágyuló műanyagból, majd egy szórófej segítségével rövid szálakat szórtak rá és lézeres megvilágítással lágyították meg a nyomtatott réteg felszínét, hogy a szálak beépülését elősegítsék. Ezzel a módszerrel a szálak orientációja, mennyisége is befolyásolható, valamint a szálakkal erősített és erősítetlen rétegek aránya is. Itt is PLA mátrixot és különböző hosszúságú (0,1; 0,5; 1 és 2 mm) szénszálakat használtak. A felhasznált nyomtató AM-FW300 típusú volt. A mintaelőállítás menetét a 4. ábra mutatja. A nyomtató fejhez egy lézer is kapcsolódott (5. ábra), amely műanyag filament nyomtatása során ki volt kapcsolva, a szálszórás ideje alatt azonban előmelegítette a szálakat és segítette azok belépülését a műanyagba. Végül a nyomtatott mintát különböző hőmérsékletű (80 és  $140^\circ\text{C}$  közötti) hőkezeléseknek tették ki a jobb konzolidáció érdekében. A rétegeket koncentrikus pályán nyomtatták, majd egyes helyeken közbe iktatták a szórt szénszálakat. A különböző mennyiségű szénszálat tartalmazó minták keresztmetszeti képe a 6. ábrán látható. A különböző mintákon mért mechanikai jellemzőket a 7. ábra mutatja. A húzó és hajlítószilárdság esetében viszonylag jól látható maximum rajzolódik ki, és a túl sok száltartalom minden



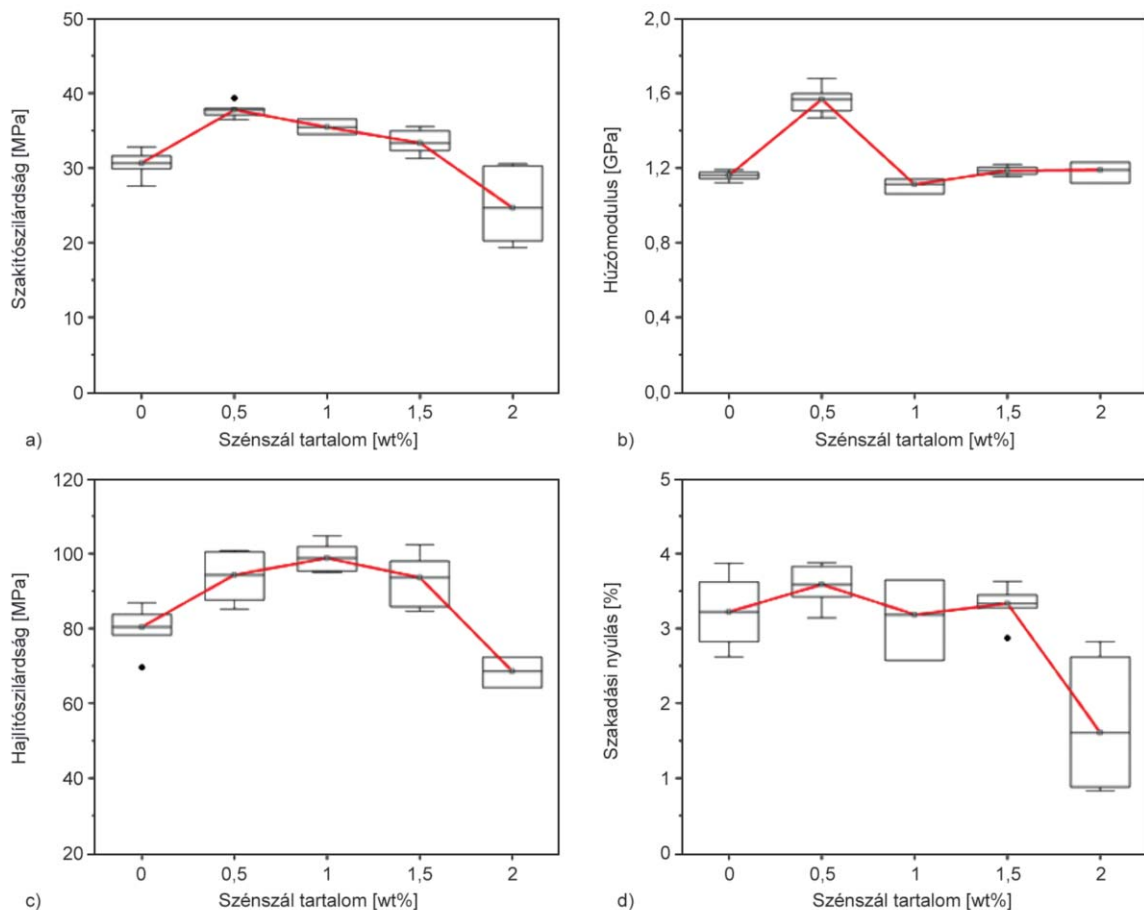
4. ábra. A rétegek közé szórt rövid szállal erősített 3D nyomtatott kompozitok előállításának vázlatja (Forrás: Fan C. és munkatársai).



5. ábra. A szénszálak beépülését elősegítő lézeres kezelés.



6. ábra. A különböző mennyiségű szórt rövid szénszálal tartalmazó, PLA-ból készült nyomtatott minták képe.



7. ábra. A 6. ábrán bemutatott minták mechanikai jellemzői.

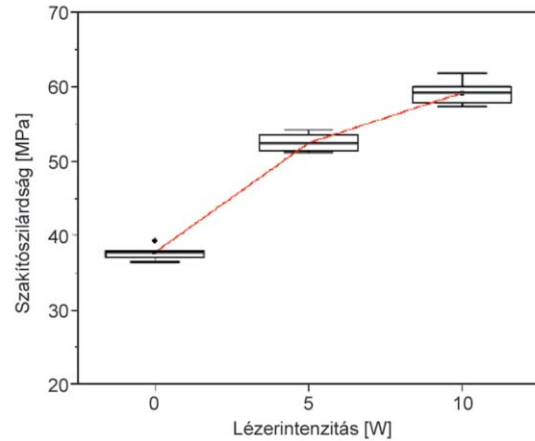
esetben kedvezőtlen. (Hangsúlyozni kell, hogy ez erre az elrendezésre vonatkozik, a kompaundált szálat tartalmazó rendszerekre más törvényszerűségek érvényesek). A törési felületeken SEM (pásztázó elektronmikroszkópos) vizsgálatok azt jelezték, hogy 0,5% száltartalomnál a szálak jól beépülnek a mátrixba,

de már 1,5% fölött megkezdődik a delamináció. Az itt be nem mutatott eredmények szerint a szálhossz függvényében is van egy optimum a szakítószilárdságban és a húzómodulus értékében kb. 0,5 mm szálhossznál. Az utóhőkezelés hatása a mechanikai jellemzőkre csekély volt, noha a kristályosság 100 °C-on maximumot mutatott. A lézeres hőkezelés teljesítményének viszont szignifikáns hatása volt a szakítószilárdságra (8. ábra). Ez részben a porozitás csökkenésének, részben a jobb szál-mátrix kölcsönhatásnak köszönhető.

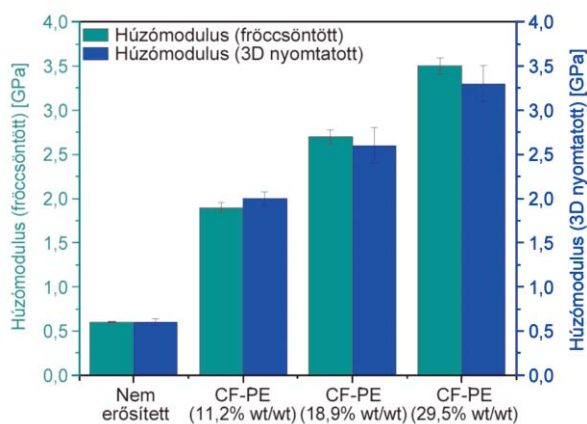
### Reciklált polietilén és reciklált szénszál 3D nyomtatása granulátum alapú nyomtatással

Az utolsó bemutatott technológia csak annyiban tér

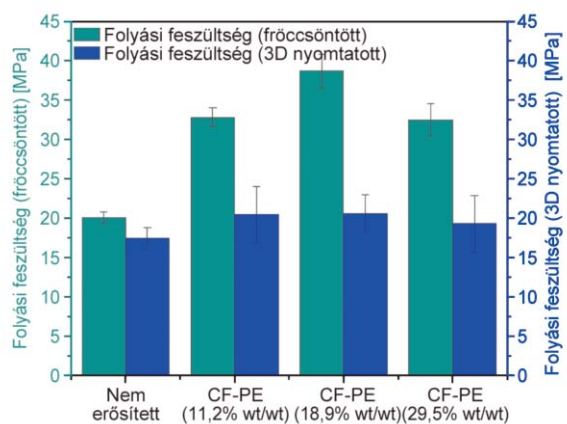
el a szokásostól, hogy a kompaundálás után nincs szálképzés, hanem a nyomtatás közvetlenül a kompaundált granulátumból történik. Az ismertetett megoldás aktualitását az adja, hogy segít csökkenteni mind a csomagolóanyag-hulladék (HDPE) mind a szélerőművek lapátjaiból visszanyert vagy a szénszál-gyártás során keletkező szénszál-hulladék mennyiségét. A HDPE/CF granulátum előállításához gyártási hulladékként képződő 6k (6000 elemi szálát tartalmazó) szálkötegeket használtak. A szénszáltartalom három mintában 11,2, 18,9 és 29,3% volt. A két első esetben a szálhossz-eloszlás maximuma 200 és 400 µm között volt, a harmadik esetben 100 és 300 µm között (erősebb töredezés). A kapott granulátumokat mind fröccsöntéssel, mind 3D nyomtatással feldolgozták, az utóbbi esetben egy Polylab (Ausztrália) berendezést használva. A próbatestek nyomtatása a terhelés irányával párhuzamosan történt. A nyomtatott kuponokon szakító és hajlítóvizsgálatokat végeztek. A húzómodulus a várható módon nőtt a száltartalommal (9. ábra), a 3D nyomtatott minták esetében nagy száltartalomnál a 3D nyomtatott minták esetében valamivel kisebb értéket lehet mérni. Jóval nagyobb az eltérés (a fröccsöntött minták javára) a folyási feszültség (húzószilárdság) esetében (10. ábra). Ami azonban a hajlítási jellemzőket (a hajlítási moduluszt és a folyási feszültséget) illeti, ott a 3D nyomtatott minták rendre jobb tulajdonságokat mutattak, mint a fröccsöntöttek. Ez bizonyára az erősebb szálorientációnak tudható be. (Természetesen a nyomtatási irányban mérhető értékek kisebbek lennének, de ezt nem mérték).



8. ábra. Az 5. ábrán mutatott lézeres kezelés teljesítményének hatása a szakítószilárdságra.



9. ábra. A fröccsöntött és 3D nyomtatott, reciklált szénszál tartalmú HDPE minták húzómodulusa a szénsszál tartalom függvényében (Forrás: Borkar A. és munkatársai).



10. ábra. A fröccsöntött és 3D nyomtatott, reciklált szénszál tartalmú HDPE minták folyási feszültsége a szénsszál tartalom függvényében.

A bemutatott példák azt mutatják, hogy az erősítő szálak hozzáadása a hőre lágyuló műanyag mátrixhoz jelentősen növeli azok modulusát és szilárdságát akkor is, ha olyan módszerekkel juttatjuk be őket a rendszerbe, ami csökkenti a feldolgozási lépések számát.

Összeállította: dr. Bánhegyi György

Ismail K.I., Ramarad S., Yap T.C.: Design and Fabrication of an In Situ Short Fiber Doser for Fused Filament Fabrication 3D Printer: A Novel Method to Manufacture Fiber-Polymer Composite = *Inventions*, 2023, 8. sz, 10.

Fan C., Shan Z., Zou G., Zhan L., Yan D.: Performance of Short Fiber Interlayered Reinforced Thermoplastic Resin in Additive Manufacturing = *Materials*, 2020, 13.k., 2868.

Borkar A., Hendlmeier A., Simon Z., Randall J.D., Stojcevski F., Henderson L.C.: A comparison of mechanical properties of recycled high-density polyethylene/waste carbon fiber via injection molding and 3D printing = *Polymer Composites*, 2022. 43.k., 2408-2418.