

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Additív gyártástechnológiával előállítható rugalmas műanyagok vizsgálata

Készítette: Kis Katalin

Konzulens: Dr. Ficzere Péter

TDK Dolgozat

2017.10.26.

Tartalomjegyzék:

Tartalom

1. Jelöléses, rövidítések:	4
2. Bevezetés:	5
3. Additív gyártástechnológiák:	7
3.1 A sztereolitográfia (SLA):	7
3.2 Szelektív lézeres szinterezés (SLS):	8
3.3 3D nyomtatás (3D Printing, 3DP):	8
3.4 Lemezelt darabgyártás (Laminated Object Manufacturing, LOM):	9
3.5 Objet-Polyjet eljárás: (OBJ)	9
3.6 Huzalfelrakás vagy más néven 3D extrudálás (FDM):	10
4. Anyagok jellemzése:	11
4.1 Anyagok tulajdonságai irányfüggőség szerint:	11
4.2 Az anyagok jellemzői időtől függően és függetlenül:	11
4.2.1 Időtől független anyagi jellemzők:	11
4.2.2 Lineárisan rugalmas, anizotróp anyagok:	12
4.2.3 Az ortotróp anyagmodell:	13
4.2.4 Nem lineárisan rugalmas anyagok:	13
4.2.5 Rugalmas, képlékeny anyagok:	15
4.2.6 Hiperelasztikus anyagok mechanikai tulajdonságai:	16
4.3 Időfüggő anyagtörvények:	17
5. Polimerek mérés technikája:	18
5.1 Húzóvizsgálat:	18
5.2 Nyomóvizsgálat:	18
6. PLA (Politejsav):	21
7. A téma kidolgozása	23
7.1 Alkalmazott gép:	23
7.2 Húzó próbatest méretei:	25
7.3 Nyomtatási paraméterek:	26
7.4 Próbatestek nyomtatási paramétereinek beállítása, optimalizálása:	27
8. Az eredmények értékelése, következtetések levonása	32
8.1 Nyomtatás Soft PLA anyaggal:	32
8.2 Különböző nyomtatási paraméterek, melyek nem hoztak megfelelő eredményt:	32

9.	Soft PLA anyagvizsgálat:	36
9.1	Alkalmazott gép:.....	36
9.2	Húzóvizsgálat eredményei:.....	37
9.3	Nyomóvizsgálat eredményei:	40
9.3.1	Nyomó rugalmassági modulus:	40
9.3.2	Szilárdság:	44
9.4	A szakítóvizsgálat kiértékelése:.....	46
9.5	Nyomóvizsgálat kiértékelése:.....	47
9.5.1	Nyomó rugalmassági modulus:	47
9.5.2	Szilárdság:	49
9.6	Összesítés:	49
10.	Összefoglalás:.....	50
11.	Hivatkozások:.....	51
12.	Mellékletek:.....	53

1. Jelöléses, rövidítések:

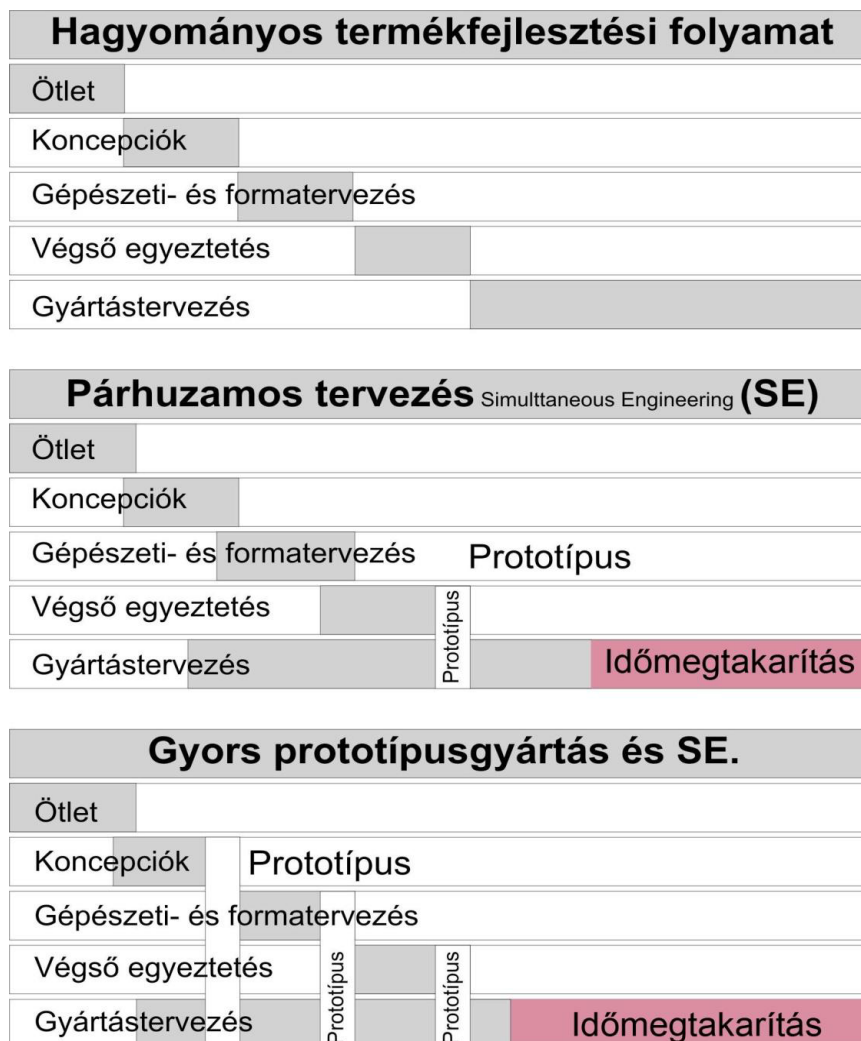
3D	Háromdimenziós
CAD	Computer Aided Design (Számítógéppel segített tervezés)
SE	Simultaneous Engineering (Egyidejű tervezés)
SLA	Stereolithography (Sztereolitográfia)
SLS	Selective Laser Sintering (Szelektív lézeres szinterezés)
LOM	Laminated Object Manufacturing (Lemezelt darabgyártás)
OBJ	Objet-Polyjet
FDM	Fused Deposition Modelling (Huzalfelrakás vagy más néven 3D-s extrudálás)
3DP	3D Printing (Háromdimenziós nyomtatás)
PLA	Polylactid Acid (Politejsav)
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene (Akrilnitril-butadién-sztirol)
PCL	Polycaprolactone (Polycaprolactone)
UV	Ultraviola
MSZ	Magyar szabvány
ISO	International Organization for Standardization (Nemzetközi Szabványügyi Szervezet)
E	Rugalmassági modulus [MPa]
G	Csúszató rugalmassági tényező [MPa]
K	Kompresszibilitási tényező [MPa]
ν	Poisson tényező
ε	Nyúlás [%]
σ	Feszültség [MPa]
d	Átmérő [mm]
l	Hossz [mm]
A	Keresztmetszet [mm ²]
h	távolság [mm]
S _{ij}	Komplementer mátrix

2. Bevezetés:

A mai világban az emberek egyre inkább vágnak az új technológiákra, folyamatosan fejlődő termékekre, ezért a termékek életciklusa egyre inkább rövidül. A gyártók rájöttek, hogy megéri életre tervezni, így akár olcsóbban, gazdaságosabban, továbbá specifikusabban tudnak gyártani, valamint így egyre inkább előtérbe kerülnek a fejlesztések, ami mind a cégek, mind a vevők szempontjából nagy jelentőségű.

A gyártók egyre inkább próbálják a különböző tervezési és gyártási lépéseket összehangolni. Már nem csak az egyik lépés követi a másikat, hanem ezek a lépések összeolvadnak, hogy minél gyorsabban a rajzból kézben fogható, mérhető, elemezhető terméket kapjanak. Ez meggyorsítja az egyes termékek tervezés lépéseinek ciklusát, vagy hamarabb, még a sorozatgyártás előtt észlelhetők az egyes hibák, problémák, amit az additív gyártástechnológia segítségével gyorsan, kisebb költségből korigálni lehet, valamint megrövidíti a piacra jutás idejét is. Ennek számos gazdasági előnye van a gyártókra nézve. Az egyes termékek előállításánál nem szükséges szerszám, gyártó készülék tervezése és elkészítése, hanem a CAD modellből képes az additív elven működő gép egy kész alkatrészt legyártani. Ezzel időt is takarítunk meg, amivel a produktív időalap csökkenését érhetjük el, amivel egyenes arányosan csökken a költség is.

Az 1. ábrán látható, hogy a hagyományos gyártáshoz képest a gyors prototípus-gyártással és a szimulációs mérnökivel időt takarítunk meg.

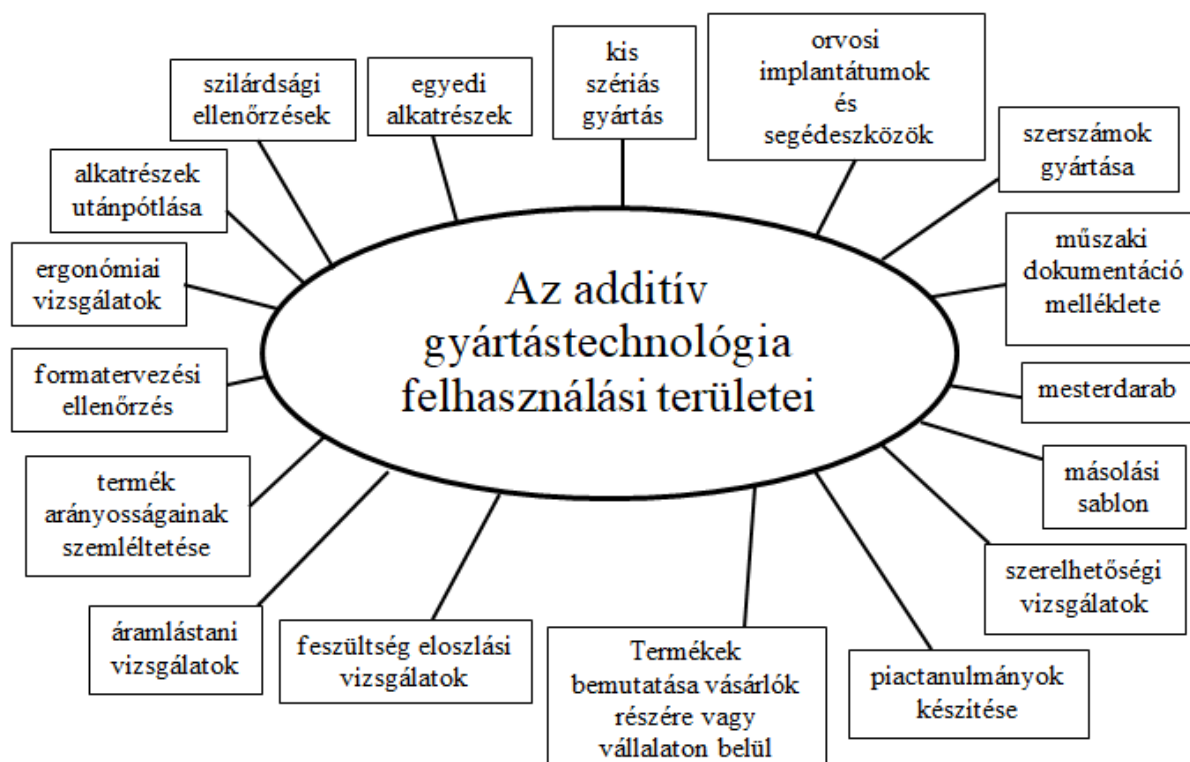


1. ábra: A hagyományos és párhuzamos tervezés időszükségletét mutatja [2]

Az additív eljárások minden esetben felépítő elven működnek. Lényege a modellek rétegenkénti felépítése.

A hagyományos eljárásnak a lényege, hogy tömbből forgácsolási technológiákkal alakítják ki a terméket. Szilárdsági, és pontossági szempontból ez jóval kedvezőbb eljárás, de általában szerszámok tervezése és készítése szükséges hozzá, így ezt elsősorban sorozatgyártásnál alkalmazzák. Az additív gyártásnál nincs szükség szerszámok gyártására, ami mind költségben, mind időben kedvezőbb eljárás elsősorban kis sorozatgyártás szempontjából.

Az additív eljárásokkal készült termékek felhasználási területeit mutatja a 2. ábra. Látható, hogy ez a gyártástechnológia egyre több területen elfogadottá és mind inkább keresetté válik, így az additív eljárások jövője korunk fejlődésével egyre inkább növekvő tendenciát mutat. Ez a felhasználási területek növekedésével magyarázható.



2. ábra: Az additív gyártástechnológia felhasználási területei

3. Additív gyártástechnológiák:

Minden test elkészíthető rétegenkénti felépítéssel, vagyis egymásra helyezett, megfelelő vastagságú rétegekből. Az additív gyártástechnológián belül számos eljárás képes felépítő elven alkatrészeket gyártani. Minden eljárástípusra jellemző, hogy minél vékonyabb rétegből épül fel a termék, annál jobb felületi minőséget, pontosságot érhetünk el, de ezáltal megnő a gyártási idő és a költség is. A rétegmentűket a 3D CAD modellből párhuzamos szeleteléssel állítjuk elő.

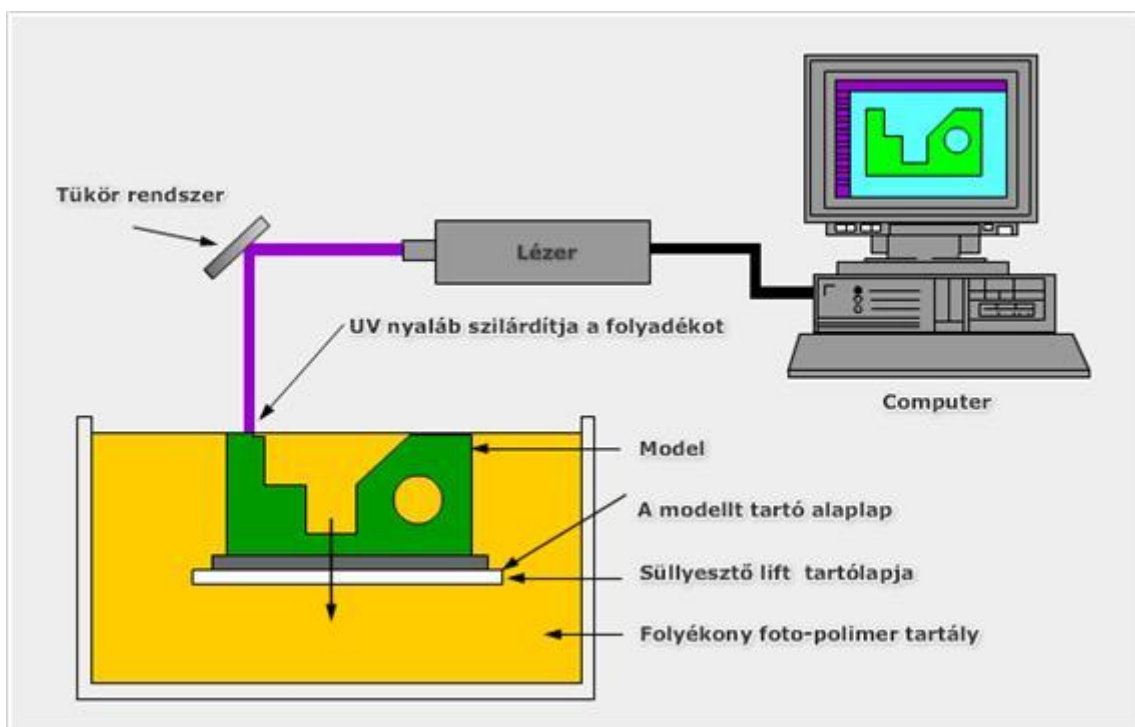
A teljesség igénye nélkül bemutatom az egyes additív eljárásokat.

3.1 A sztereolitográfia (SLA):

Angol megnevezése Stereolithography. Ez az eljárás a legrégebbi. A technológia a fotopolimerizáció elvén működik. Felhasználási anyaga fényre keményedő anyag, általában epoxi gyanta. Az eljárás lényege, hogy a fényérzékeny anyagot vékony rétegenként az asztalra terítjük, majd lézersugár segítségével megszilárdítjuk, térhálósítjuk az anyagot. A felesleges anyagmennyiséget oldószer segítségével távolítjuk el az elkészült termékből. A technológia során a lézer fókuszáltsága biztosítja a munkadarabok pontosságát.

Eljárás előnye, hogy igen pontos, bonyolult alkatrészek is elkészíthetők vele, üreges termékek is előállíthatók vele, a termék ragasztható, polírozható.

Hátránya, hogy csak fotoérzékeny anyagok alkalmazására alkalmas, melyeknek szilárdsága általában alacsony, valamint lézer alkalmazása miatt költsége drága, a termék zsugorodásra, vetemedésre hajlamos.



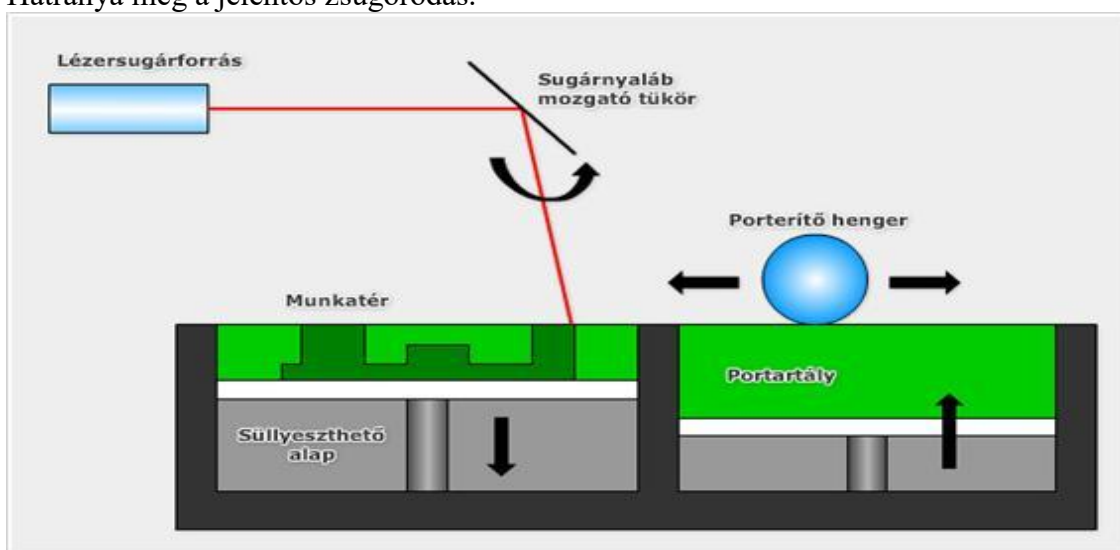
3. ábra: SLA technológia elvét ábrázoló rajz [13]

3.2 Szelektív lézeres szinterezés (SLS):

Idegen kifejezése: Selective Laser Sintering. Ez a technológia, nagyban hasonlít az SLA eljárásához, csak itt fotoérzékeny anyag helyett por állagú, hő hatására megolvasható anyagokat használunk. Általában fém, üveg, műanyag, kerámia alapú porok. Működési elve, hogy a szilárd fázisú, por állagú anyagot vékony rétegenként az anyagra terítjük, tömörítjük, majd lézersugár segítségével összeolvasztjuk a szemcséket.

Előnye, hogy igen pontos, de ezt alapvetően a por átmérője, a rétegvastagság és a lézer fókuszáltsága határozza meg. További előny még a nagy mechanikai szilárdságú termékek is előállíthatók.

Hátránya, hogy nagyon drága. Ennek oka a lézeres eljárás, valamint a porok előállítása. Hátránya még a jelentős zsugorodás.



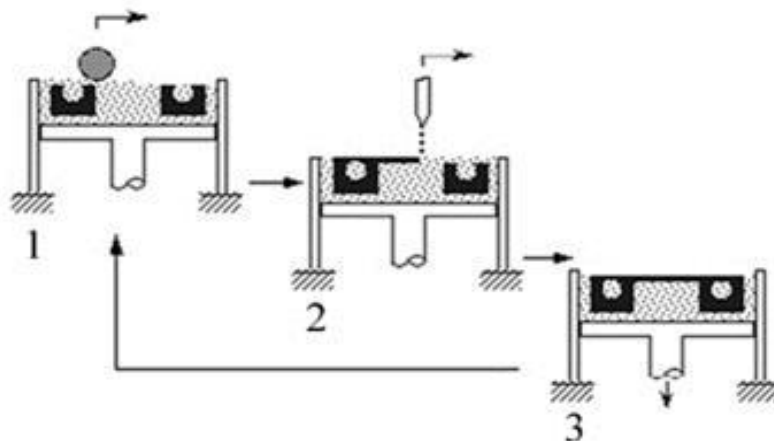
4. ábra: SLS technológia elvi felépítése [1]

3.3 3D nyomtatás (3D Printing, 3DP):

Az eljárás alapanyaga, mint az SLS technológia esetében, egy por állagú anyag, de itt a drága lézeres technológiát kiküszöbölve, kötőanyag használatával tapasztjuk össze az szemcséket.

Előnye, hogy viszonylag olcsó, utómegmunkálás tehetséges a terméknél.

Hátránya, hogy kisebb mechanikai szilárdság érhető el, mint az SLS eljárással.



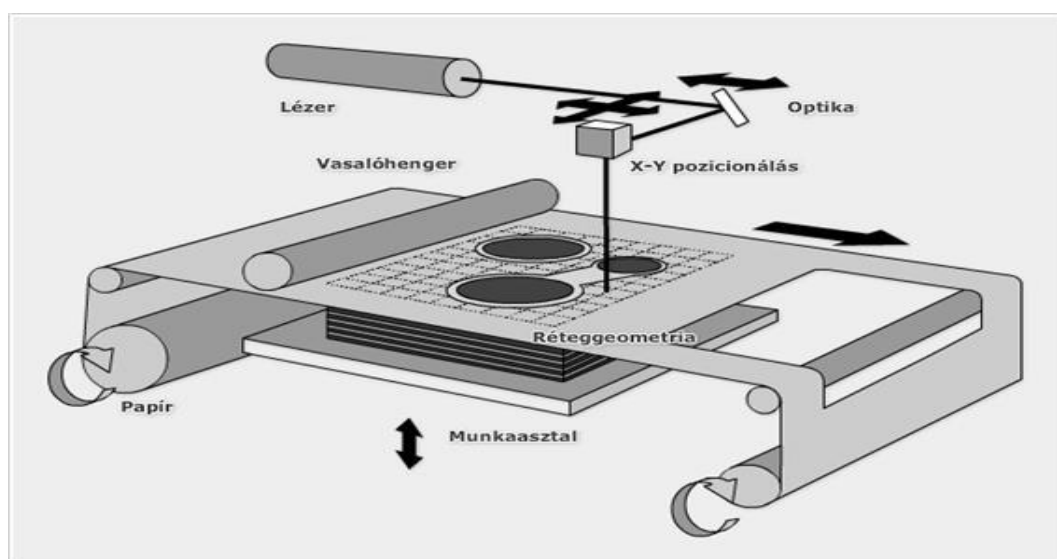
5. ábra: 3D nyomtató elvi felépítése [6]

3.4 Lemezelt darabgyártás (Laminated Object Manufacturing, LOM):

Ez volt az egyik legelterjedtebb gyártástechnológia. Alapanyaga: papír, műanyag, fém, fém, szövet, kompozit lemez vagy fólia. Az eljárás lényege, hogy az egyes rétegeket ragasztóanyaggal egymáshoz rögzítjük, majd az elkészült közeget lézer segítségével a kontúrok mentén körbevágjuk. Általában olyan ragasztóanyagot választunk, mely valamilyen aktiváló hatására, általában UV sugár hatására, ragasztja össze az egyes rétegeket, így csak a termék rétegei tapadnak össze.

Az eljárás előnye, hogy viszonylag egyszerű, többféle anyag használható, éles sarkok is előállíthatók vele.

Hátránya, hogy korlátozva van a rétegek vastagsága, kicsi a termékek szilárdsága, jól látható rétegek maradnak, valamint viszonylag drága berendezés szükséges.



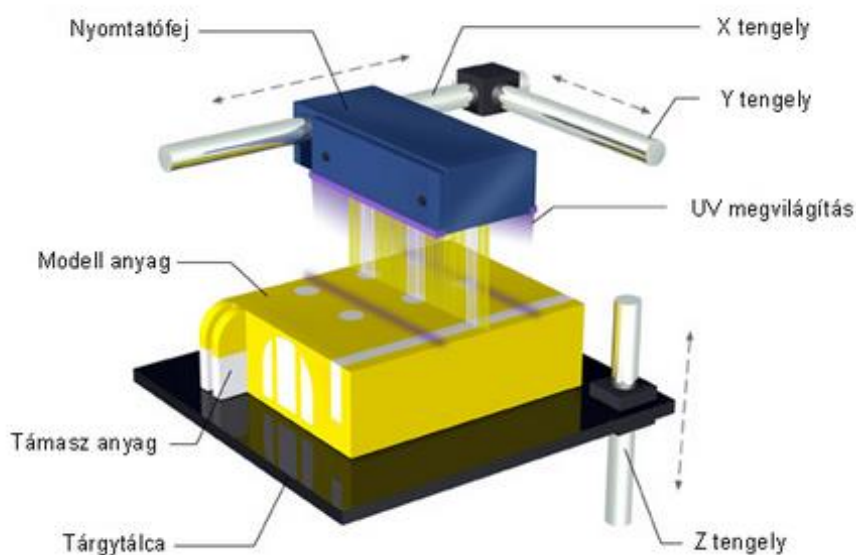
6. ábra: Lom technológia elvi felépítése [6]

3.5 Objet-Polyjet eljárás: (OBJ)

Ez az eljárás egyesíti az additív gyártástechnológia előnyeit. Az Objet-Polyjet eljárás ötvözi az SLA eljárás kiváló anyagait, illetve a 3D-s nyomtatás építkezési módszerét. Az alapanyag fényérzékeny fotopolimer. Az eljárás lényege, hogy a nyomtatófej a folyékony fotopolimert elteríti, majd UV fény segítségével térhálósítja, megszilárdítja. Egyszerre többféle alapanyagot (fotopolimert) is használhatunk.

Az eljárás előnye, hogy igen gazdaságos, kis rétegvastagság alakítható ki vele (14 μm), így pontossága nagy. A technológiával előállított termékek akár polírozhatók, festhetők.

Hátránya, hogy csak fotopolimerek alkalmazása lehetséges, aminek hatására a mechanikai szilárdsága a termékeknek viszonylag alacsony.

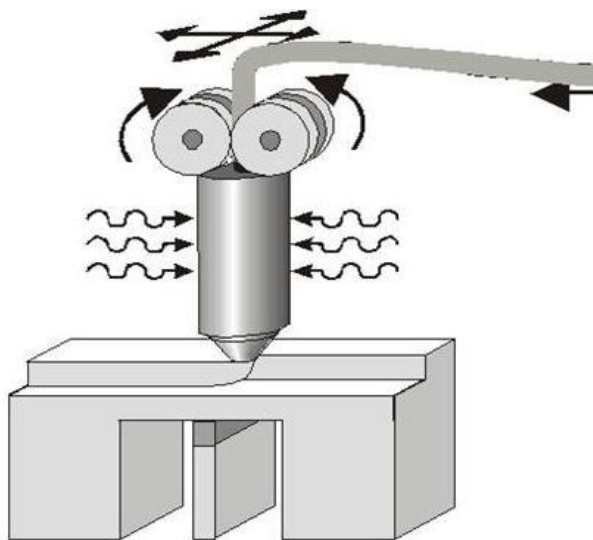


7. ábra: Az Objet-Polyjet eljárás elvi felépítése [21]

3.6 Huzalfelrakás vagy más néven 3D extrudálás (FDM):

Az eljárás neve Fused Deposition Modelling, melyet később FDM-ként fogom említeni. Az eljárás során hőre keményedő műanyagokat alkalmaznak, melyeket olvasztó pisztoly segítségével az olvadási hőmérséklet fölé melegítenek és rétegenként egymásra olvasztanak. A technológia előnye, hogy viszonylag egyszerű, olcsó. A berendezés üzemelése könnyű, több alapanyag használható, minimális az anyagvesztés és nincsenek különleges követelmények a környezettel kapcsolatban.

Hátránya a kisebb pontosság, munkadarabon éles sarkok nem készíthetők, lassú rétegépítés, rétegek jól láthatók maradnak, az anyag csak huzal állapotban használható, az olvadék viszkozitásának elég magasnak kell lennie, hogy szerkezeti támaszt nyújtson, de elég alacsonynak ahhoz, hogy lehetővé tegye az extrudálást. A rétegek között hézag alakulhat ki a nem megfelelő összeolvadás miatt.



8. ábra: FDM technológia elve [6]

4. Anyagok jellemzése:

Minden új anyag esetében fontos az anyagok jellemzése. Kísérletem során egy igen újszerű polimer anyagi jellemzőit vizsgálom. Tanulmányozom, hogy a nyomtatás során előállított darabok rendelkeznek-e bármiféle irányfüggőséggel, valamint jellemzem az anyagot időfüggőtől független tulajdonságai alapján. Ezek legfőbb sajátosságait tartalmazza ez a fejezet.

4.1 Anyagok tulajdonságai irányfüggőség szerint:

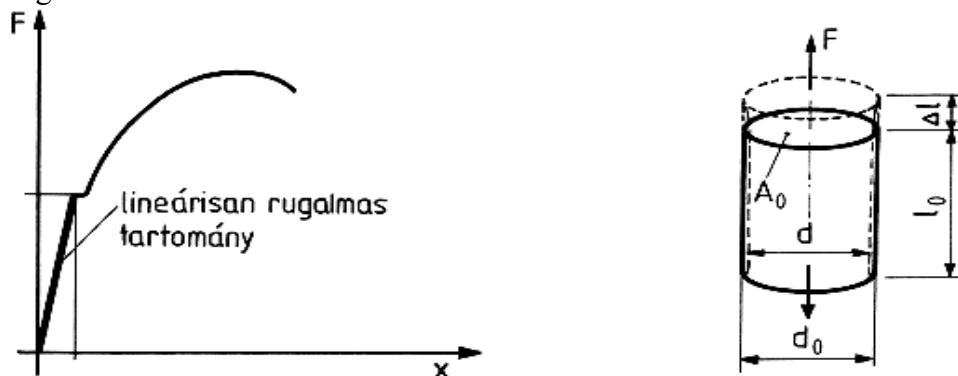
- Izotróp anyagok: Az anyagi tulajdonságok minden irányban egyezők.
- Anizotróp anyagok: Az anyagi tulajdonságok különböző irányokban eltérő viselkedést mutatnak.
- Ortotróp anyagok: Ha az anyagi tulajdonságok az egymástól valamilyen főirányú tengelyek irányában eltérők és egymástól függetlenek.

4.2 Az anyagok jellemzői időtől függően és függetlenül:

Az anyagok viselkedésénél meg kell különböztetnünk időtől függő és független anyagi jellemzőket, mivel ez az anyagtörvényeket befolyásolja. Ma az elsődleges tervezési szempontok közé tartozik az életre tervezés, amit szimulációk segítségével valósítunk meg, ebben az esetben az idő is befolyásoló tényező a méretezés szempontjából.

4.2.1 Időtől független anyagi jellemzők:

Lineárisan rugalmas, izotróp anyagok anyagtörvényét a Hooke-törvény jellemzi, ami tisztán húzó- vagy nyomófeszültségi állapotban jellemzi az anyag viselkedését a folyáshatárig.



9. ábra: A lineárisan rugalmas tartomány jellemzése szakítódiagrammal [12]

A képletekben szereplő szimbólumok a 9. ábra segítségével értelmezhetők.

Tengelyirányú feszültség:
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Fajlagos nyúlás:
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

A rugalmassági modulus (E) meghatározza a lineárisan rugalmas viselkedést. Ez meghatározható a szakítódiagram lineárisan rugalmas tartományához húzott legnagyobb meredekséggel.

Az Hooke-törvény összefüggést definiál a feszültségi- és az alakváltozási állapot között.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Lineárisan rugalmas anyagmodellről akkor beszélünk, ha a feszültség-alakváltozás karakterisztikája egy egyenesre esik, vagyis a feszültség egyenesen arányos az alakváltozással, ellenkező esetben nemlineáris anyagmodellről beszélünk. A terhelés megszüntetésével az anyag teljes mértékben visszanyeri az eredeti alakját.

Fontos anyagi jellemzők továbbá:

Poisson tényező (ν) az egyirányú feszültségi állapot keresztirányú és a hosszirányú fajlagos nyúlásának a hányadosával adható meg hosszirányú terhelés esetén, mivel az anyagok térfogat állandósággal rendelkeznek.

$$\nu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l} = \frac{\frac{\Delta d}{d_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (4)$$

A Poisson tényező segítségével kifejezhető a csúsztató rugalmassági tényező (G) és a kompresszibilitási tényező (K).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

$$K = \frac{E}{3(2-\nu)} \quad (6)$$

A kompresszibilitási tényező határértékével határozzuk meg, hogy egy anyag mennyire összenyomható, határértékével kiszámítható az összenyomhatatlan anyag, vagyis az inkompresszibilis anyag Poisson tényezője:

$$\nu = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E}{3K} \right) = 0,5 \quad (7)$$

4.2.2 Lineárisan rugalmas, anizotróp anyagok:

Izotróp anyagok esetében a Hooke törvény, anizotróp esetben az általánosított Hooke törvény írja le az anyag viselkedését. [11]

Általános Hooke-törvény rugalmas anyagoknál:

$$\sigma_i = \varepsilon_i \cdot E + \nu(\sigma_j + \sigma_k) \text{ vagy,} \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \delta_{ij} \cdot \varepsilon_{kk} + 2G \cdot \varepsilon_{ij} \quad (9)$$

ahol i, j, k a derékszögű koordináta rendszer x, y, z koordinátáinak felelnek meg, vagy a főirányok koordináta rendszerében 1,2,3-nak.

δ_{ij} ,a Kronecker delta függvény, ami egy matematikai kétváltozós függvény, melynek értéke 1, ha a két szám egyenlő, vagyis $i=j$, minden más esetben a függvény értéke 0.

λ , a Lamé-féle anyagjellemző, mely $\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}$.

4.2.3 Az ortotróp anyagmodell:

Az ortotróp anyagok esetében a 3 kijelölt főirány mentén más és más anyagi tulajdonságokkal jellemezhetők. Az ortotróp anyag esetén a rugalmassági modulusok, a Poisson-tényezők és a nyírási modulusok együttes megadása szükséges.

Az additív technológiák sajátossága a rétegről rétegre történő építkezés, ezért feltételezhető, hogy az anyagtulajdonságok azonosak egy-egy rétegen belül, viszont azok között, arra merőleges irányban már eltérőek. Ez azt jelenti, hogy az anyag azonos nagyságú, de különböző irányú terhelések esetén eltérő mértékű deformációt szenved.

Az irányfüggő anyagok viselkedését az anizotróp anyagmodell ír le. Ennek egy speciális esete az ortotróp anyagmodell. Van néhány kitüntetett irány, amelyek meghatározzák az anyag viselkedését. Ennek az irányfüggésnek a számszerű jellemzésére szolgál az ortotróp anyagokra érvényes Hooke törvény.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

S_{ij} pedig a kiegészítő, vagy komplementer mátrix,

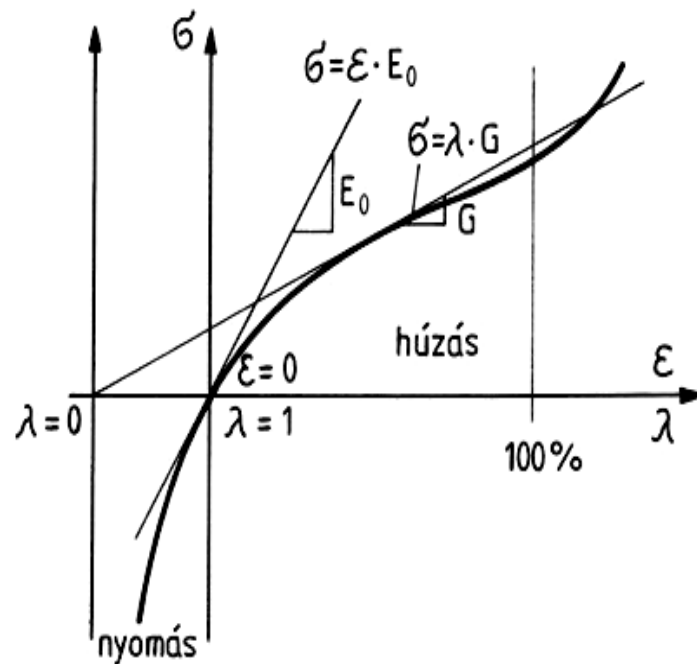
$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

A kiegészítő mátrixban E_1, E_2, E_3 a rugalmassági modulusok, ν_{ij} a Poisson-tényező, a keresztirányú nyúlások (j -irányban) és a hosszirányú nyúlások (i -irányban) aránya, i -irányú húzás esetén ($i \neq j$), G_{ij} a nyíró rugalmassági modulus, ($i, j=1,2,3$) ($i \neq j$), továbbá a szimmetria következtében: $S_{ij}=S_{ji}$ ($i, j=1,2,3$). Ezekből az összefüggésekből jól látható, hogy az ortotróp anyagtulajdonságok egzakt definiálásához 9 független anyagállandóra van szükségünk.

4.2.4 Nem lineárisan rugalmas anyagok:

A nemlineáris anyagi viselkedés jellemzője, hogy a feszültség és fajlagos nyúlás közötti kapcsolat nem lineáris, tehát nem érvényes rá a Hooke törvény. Nemlineáris feszültség-alakváltozás tulajdonsággal rendelkező plasztikus, multilineáris rugalmas, és a nagyrugalmasságú anyagmodellek különböző terhelési szinteken és hőmérsékleten a szerkezet különböző merevségét eredményezik.

Ezekre az anyagokra általánosan az jellemző, hogy alakváltozásuk nagymértékű lehet. Ilyenkor a feszültség-nyúlás diagramot 3 különböző részre bontjuk, a 10. ábrán látható módon.



10. ábra: Nem lineárisan rugalmas anyagok feszültség-nyúlás(σ - λ) karakterisztikája [12]

A karakterisztikát a következő összefüggéssel közelíthetjük:

$$\sigma = G\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right) \quad (12)$$

λ , a fajlagos nyúlás, mely a nagy alakváltozás esetében alkalmazható, a következő egyenlettel kifejezhető:

$$\lambda = \frac{\Delta l + l_0}{l_0} = 1 + \varepsilon \quad (12)$$

A nyomás tartományában a diagram meredek és enyhén progresszív, a húzás tartományában, kezdetben meredeken indul, utána ellaposodik, majd, majdnem 100 %-os fajlagos alakváltozás után ismét meredeken emelkedik. Ezt az utolsó szakaszt már nem tekintjük a mérnöki analízis részének, ebben a szakaszban az alakváltozás növekedése hirtelen szakadáshoz vezethet.

A görbe két szakaszát külön linearizálhatjuk, az első szakaszt a Hooke-törvény alapján, összefüggése a (3) számú képletben látható.

A görbe második szakaszát a következő egyenlettel linearizálhatjuk:

$$\sigma = G \cdot \lambda \quad (13)$$

A két függvény közötti összefüggés megadható az (5) számú képlettel.

4.2.5 Rugalmas, képlékeny anyagok:

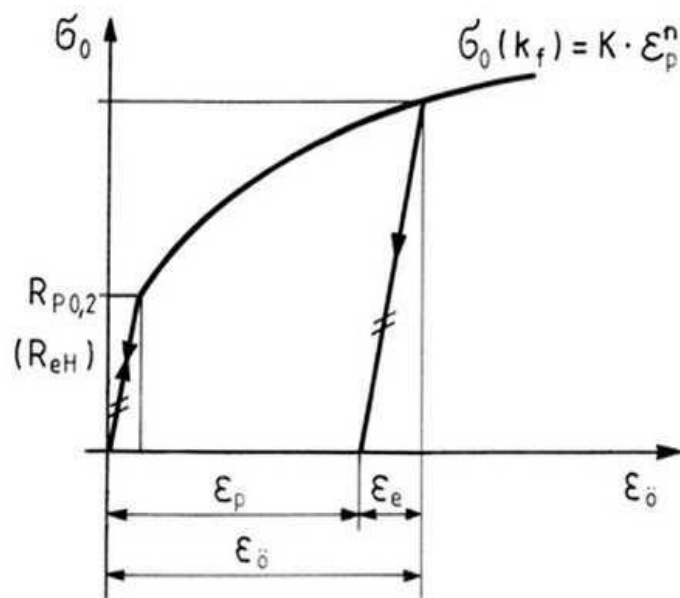
Rugalmas-képlékeny anyag esetén az anyagjellemzőket két részre bontjuk. A rugalmas részt lineárisan rugalmasnak vesszük a folyáshatárig, majd a folyási feltételt kiegészítő feszültségi állapot hatására az anyag képlékeny alakváltozást szenved és a folyásgörbéje mentén felkeményedik. A képlékeny alakváltozás addig tart, amíg a megnövekedett aktuális folyáshatár el nem éri a folyást megindító egyenértékű feszültséget.

A következő képlet megmutatja a feszültségi állapotokat, mellyel ezek az anyagokat jellemezni lehet:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \geq \sigma_0(k_f) \quad (14)$$

σ_0 az aktuális folyáshatár $\sigma_0 \geq R_{eH}$, amit az alakítástechnikában alakítási ellenállásnak (k_f) neveznek

$\sigma_{1,2,3}$ a feszültségi állapotot jellemző főfeszültségek



11. ábra: Fémek rugalmas-képlékeny alakváltozására jellemző feszültség-nyúlás görbe [12]

A görbéről leolvasható, hogy a folyáshatárt elérve az anyag nem ugyanabba a nyúlási állapotba kerül vissza, mivel a folyáshatárnál már képlékeny alakváltozást szenved, ami befolyásolja az anyag további tulajdonságait.

A jelölések a görbén az ϵ_p , a plasztikus, vagyis képlékeny nyúlást, az ϵ_e pedig az elasztikus, vagyis a rugalmas nyúlást mutatja ennek összege az ϵ_0 , az összes nyúlást mutatja.

$$\epsilon_0 = \epsilon_p + \epsilon_e \quad (15)$$

A (15) számú egyenletet kifejtve megkapjuk a rugalmas, képlékeny anyag nem lineáris összefüggését:

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E} + \sqrt[n]{\frac{\sigma_0}{K}} \quad (16)$$

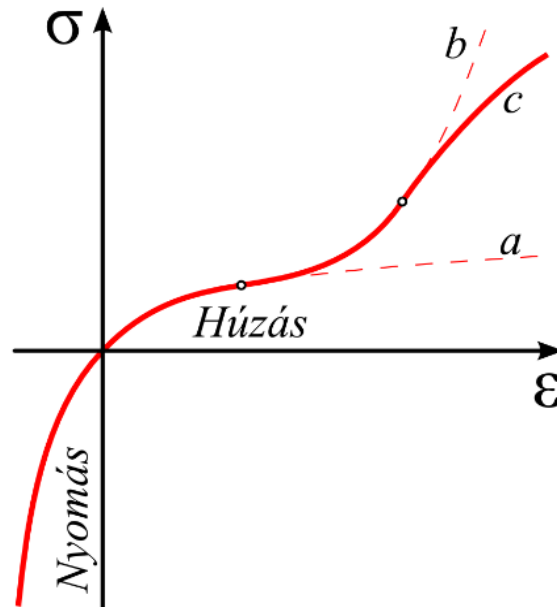
n : az anyag keményedési kitevője

K : az anyag keményedési együttható

4.2.6 Hiperelasztikus anyagok mechanikai tulajdonságai:

A hiperelasztikus anyagmodell viselkedését az alakváltozási-energia sűrűség, vagyis az egységnyi térfogatú deformált anyagban tárolt potenciális energia írja le. Ez lehetővé teszi a nagy alakváltozásokat. A hiperelasztikus, vagy Green féle anyagmodelleket gyakran használják olyan anyagok esetében, amelyek nagy rugalmas alakváltozásnak vannak kitéve, mint a gumiszerű anyagok és egyes biológiai szövetek.

Feszültség-nyúlás görbéje hasonló a nem lineárisan rugalmas anyagok karakterisztikájához, mely a 12. ábrán látható.



12. ábra: Hiperelasztikus anyag feszültség-nyúlás (σ - ϵ) görbéje [11]

A gumiszerű anyagokra jellemző:

- a nagymértékű alakváltozási képesség, amely általában több 100 % de akár 1000 % fölé is emelkedhet,
- a döntően rugalmas deformáció,
- erősen nemlineáris feszültség-nyúlás karakterisztika, általában húzás esetén először lágyul, majd felkeményedik, nyomás esetén felkeményedés tapasztalható,
- a deformáció során bekövetkező kis- vagy elhanyagolható mértékű térfogatváltozás (összenyomhatatlan, $\nu \approx 0,5$.)

Felkeményedési szabály: Ha a képlékeny alakváltozás szakaszában csak a feszültség további növelésével folytatódik az alakváltozás, felkeményedő anyagokról beszélünk. Tökéletesen képlékeny anyag esetén a folyási felület a feszültségi térben fix, míg felkeményedő anyagnál elmozdulhat, és/vagy az alakját változtathatja.

Összenyomhatatlan anyagok: Más néven térfogatállandó, inkompresszibilis anyagok. Poisson tényezője a kompresszibilitási tényező határértékével kiszámítható:

$$\nu = \lim_{K \rightarrow \infty} \nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E}{3K} \right) = 0,5 \quad (17)$$

4.3 Időfüggő anyagtörvények:

Léteznek olyan anyagi viselkedések, amelyek függenek a deformáció sebességétől és az eltelt időtől. Ilyenek például a viszkoelaszticitás, viszkoplaszticitás, kúszás és a csillapítás. A polimerek és magas hőmérsékletű fémötvözetek jelentős kúszást mutatnak.

Mivel az időfüggő anyagtörvények nem tartalmazzák a dolgozat részét, ezért erre részletesebben nem térek ki. Ellenben fontos megjegyezni, hogy a vizsgált anyag is rendelkezik időfüggő anyagi jellemzőkkel is, de ezt az idő és a rendelkezésünkre alkalmas mérőgépek hiányában nem áll módomban vizsgálni.

Dolgozatom során csak az időtől nem függő anyagi méréseket végzem el, melyben vizsgálok szakítóvizsgálat segítségével, hogy milyen feszültség-nyúlási diagrammal jellemezhető a Soft PLA anyag, valamint hogy az egyes nyomtatási pozíciók mutatnak-e eltéréseket, és ha igen, akkor milyeneket, majd meghatározom az anyag szilárdságát és modulusát nyomóvizsgálat segítségével.

5. Polimerek mérés technikája:

5.1 Húzóvizsgálat:

A húzóvizsgálat célja, hogy meghatározzuk az anyag húzóerővel szembeni ellenállását, vagyis a húzószilárdságot. Ennek mérésére használható berendezés a szakítógép. A húzóvizsgálat célja a szerkezeti anyagok terhelés alatti viselkedésének modellezése.

A vizsgálatot kapcsolatos teendőket, a próbatest alakját, méretét, a vizsgálat lefolyását, a kísérleti eredmények felvételét és kiértékelését hazánkban az MSZ EN ISO 527:2012 szabvány határozza meg.

A szakítóvizsgálattal kapcsolatos fogalmak és meghatározások az [1] mellékletben megtalálhatók.

A szakítóvizsgálat során a terhelés alatt álló anyagokra az erőhatás következtében feszültség hat. Ez a húzó feszültség az erő (F) és a próbatest keresztmetszetének (A) hányadosával jellemezhető, jele: σ .

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (18)$$

A húzás során az eredeti próbatest megnyúlik, a nyúlás jele: ε . A terhelés hatására σ feszültség alakul ki és a próbatest deformálódik.

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (19)$$

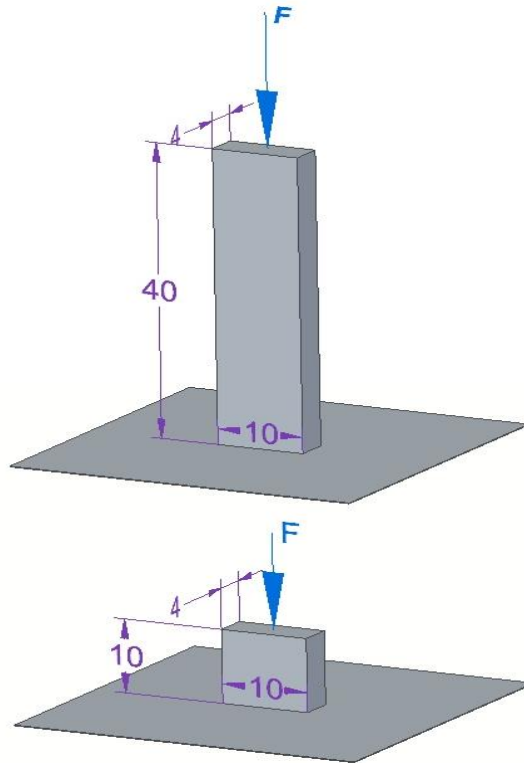
A képletben használt jelölések: l , a próbatest eredeti hossza, l_0 , a az egytengelyű húzás hatására kialakult hosszúság.

A polimerek esetében a húzóvizsgálat eredményét a hőmérséklet nagyban befolyásolja, így ez fontos tényező lehet, de mivel a vizsgálatok mérőszobában történnek, valamint ezek a mérések viszonylag gyors lefolyásúak, ezért ennek hatásával jelen tanulmányban nem foglalkozom.

5.2 Nyomóvizsgálat:

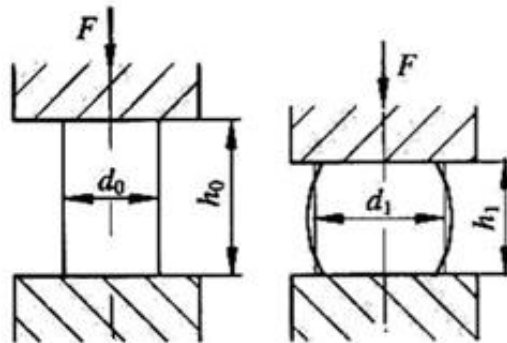
A szerkezeti anyagok nyomószilárdsága fontos tervezési adat. A húzóvizsgálattal ellentétben a nyomóvizsgálat során a vizsgálandó anyag eredeti hossz mérete csökken, így a mechanikai behatás során a vizsgálandó anyag nem megnyúlik, hanem erő hatására összenyomódásra kényszerül. A nyomóvizsgálat tulajdonképpen statikus eljárásnak minősül, ugyanis a terhelés az idő függvényében igen lassan változik.

A hagyományos nyomóvizsgálat elve, hogy a vizsgálat során a próbatest terhelését folyamatosan a törésig növelik és a mért törőerőből, valamint a keresztmetszetből számítják ki a szilárdsági mérőszámokat. Az egyirányú nyomóvizsgálatnál a próbatestet két szemben lévő alkotója mentén, párhuzamos nyomólapok között kell terhelni.



13. ábra: Nyomóvizsgálat elvi felépítése a Young modulus és a szilárdság meghatározásánál

A szívós, és képlékeny anyagok a nyomóvizsgálat során "hordósodnak", bizonyos alakváltozás után felületükön repedések jelennek meg, egyértelmű törést nem mutatnak.



14. ábra: Nyomóvizsgálat során a szívós, képlékeny anyagok hordósodása [22]



15. ábra: Hordósodás konkrét példa alapján

A szívósabb anyagok sokkal nagyobb nyomóterhelést bírnak, és nagyobb az alakváltozásuk, ahogy az alábbi ábrán (16. ábra) is látszik.



16. ábra: Soft PLA anyag nyomóvizsgálat során kialakult alakváltozása

A polimerek esetében a nyomó vizsgálatot az ISO 604-es szabványban meghatározottak szerint kell elvégezni.

Esetünkben 3D nyomtatott próbatesteket mérünk, melyek anyagjellemzői eltérnek a hagyományos elven előállított polimerekéitől. Mérése ugyanúgy zajlik, de előírt szabvány nem fedi le ezeknek az anyagoknak a mérését, szabványos eljárás még nincs a 3D nyomtatott darabok anyagjellemzőinek egzakt meghatározásához.

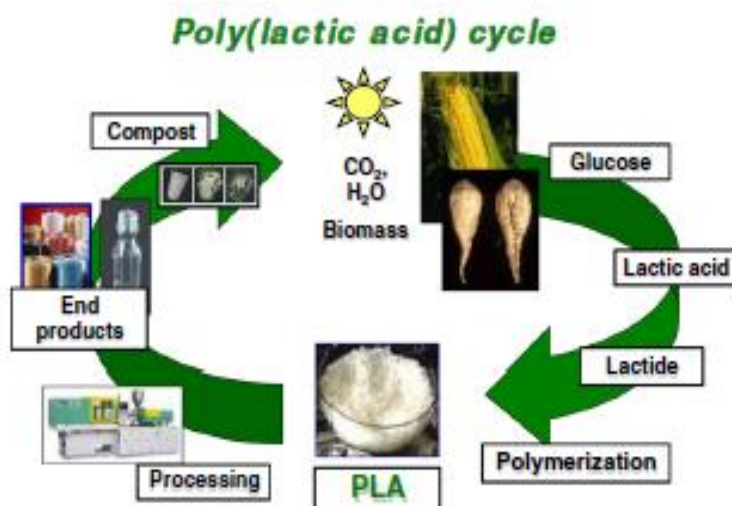
6. PLA (Politejsav):

Az alacsony olvadáspontú polimer anyagokat széles körben használják a 3D nyomtatási technológiákban. Az FDM technológia során leggyakrabban alkalmazott alapanyag a PLA. Ennek az anyagnak számos pozitív környezeti hatása van az általános polimerekkel szemben. Az anyag a természetben megtalálható alapanyagok felhasználásával készül, valamint lebomlása is jóval egyszerűbb és kevesebb időt igényel, így akár lehetséges válasz lehet a környezetvédelmi problémákra.

A politejsav magas keményítőtartalmú növények, elsősorban kukorica, rizs, búza cukraiból lehet előállítani, tejsavas erjesztéssel, és polimerizációból vagy dilaktid polimerizációval.

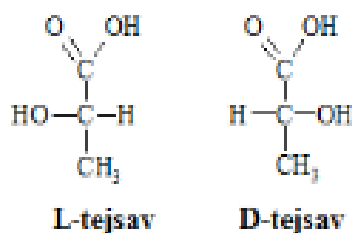
Régebben elsősorban csomagolásként, vagy orvos biológiai területen használták, implantátumokként, de a környezeti hatásai miatt, mivel a gyártása egyre gazdaságosabbá vált, valamint a világgazdaság egyre nagyobb korlátozást a nehezen lebomló műanyagok területén, ezért számos más területen is elkezdték hasznosítani. Ilyen terület az additív gyártástechnológia is. Az FDM technológiához huzalokat készítenek a PLA-ból.

17. ábra mutatja a PLA típusú termékek gyártásának lépéseit, hogy miként állítják elő és hasznosítják, valamint semmisítik meg a PLA alapanyagú kompozitokat.



17. ábra: PLA életciklusának lépései [15]

A politejsav biológiailag lebontható alifás poliészter, mely hőre lágyuló, komposztálható, biokompatibilis polimer, monomere a tejsav ($C_3H_6O_3$). Az 18. ábrán látható a PLA előállítására alkalmas néhány monomer szerkezete.



18. ábra: PLA előállításához alkalmas monomer szerkezetek [14]

A monomer szerkezetből különböző típusú biopolimer típusokat állítanak elő, melynek fizikai és kémiai tulajdonságai eltérnek egymástól. Kompozit formájában lehet leginkább felhasználni, ezért is több típusát használják fel a PLA monomereknek.

A PLA egy kristályos szerkezetű, nagyon törékeny polimer, melynek ütőszilárdsága is nagyon alacsony, valamint nem rendelkezik megfelelő hajlékonysággal sem. Ezen tulajdonságok miatt a PLA-t PCL-el (Poli ϵ -kaprolakton) ötvözik, mivel a PCL igen rugalmas polimer, így keverékük egy nagy húzó- és ütőszilárdságú kompozitot képez.

ϵ -kaprolakton ($C_6H_{10}O_2$) színtelen folyadék, mely a legtöbb szerves oldószerben oldódik.

A 6-hidroxi-kapronsav önmagával alkotott gyűrűs észtere, azaz laktonja. Ezen kívül még plasztifikáló (ömlesztő) szerek segítségével javítható a PLA anyagok mechanikai tulajdonságait és felhasználásuk is megkönnyebbül.

Az általunk vizsgált Soft PLA anyag igen újszerű, ezért pontos szerkezeti összetétele nem ismert. Vizsgálataim során számomra az összetétel nem releváns csak adott anyag mechanikai tulajdonságait kutatom.

7. A téma kidolgozása

Az anyag, melyet vizsgálataim során használni fogok, Soft PLA, mely igen rugalmas anyag.

A forgalmazók és a felhasználók is keveset tudnak erről az anyagról, de egyre nagyobb népszerűségnek örvend ez az anyag, hiszen rugalmas, így felhasználása sokrétű lehet.

A köztudatban elsősorban telefon tokok, gyermekjátékok gyártásához használják ezen anyagot, mert természetes anyag és elasztikus tulajdonsága előnyös ezeknél termékeknél.

A PLA egy minőségi bioműanyag, melyet kukoricakeményítóből állítanak elő. Ha átfogó képet kapunk a mechanikai tulajdonságairól, akkor a gépészetben is nagy szerepet tölthet be.

Rugalmas gyors prototípusokat eddig csak az Opjet-Polyjet technológiával készítettek, de ez hatalmas előrelépés lehet, ha FDM technológiával is el lehetne készíteni rugalmas anyagokat, hiszen így gyártásuk jóval olcsóbb lenne, mert mind anyag-, mind gépköltség szempontjából az FDM eljárás jóval gazdaságosabb.

Rugalmas anyagok a gépészetben is számos területen megjelennek, ezért nagy szerepet tölthet be a Soft PLA ebben az iparágban. Fontos felhasználási terület lehet továbbá az orvosi eszközök, akár implantátumok készítése során.

A sok pozitív tulajdonsága miatt, fontos lenne erről az anyagról minél többet tudni, így szélesebb körben elterjedhetne a használata, ezért célom, a Soft PLA anyagvizsgálata. Tervem továbbá a beépítéshez, méretezéshez szükséges anyagjellemzők ismerete.

7.1 Alkalmazott gép:

Szakedolgozatomhoz a próbatesteket Hephestos Prusa i3 típusú gép segítségével készítem el, mely a következő tulajdonságokkal bír:

- nyomtatási térfogat méretei: 215-210-180 mm (x-y-z)
- fúvóka átmérője: 0,4 mm
- maximális ajánlott nyomtatási sebesség: 80 mm/s
- ajánlott szoftver környezet: Cura
- támogatott fájlok: gcode
- adatátvitel: SD kártya
- mozgás: az extrúder mozgása x-y-z irányban
- ajánlott nyomtatandó anyagok: ABS, PLA

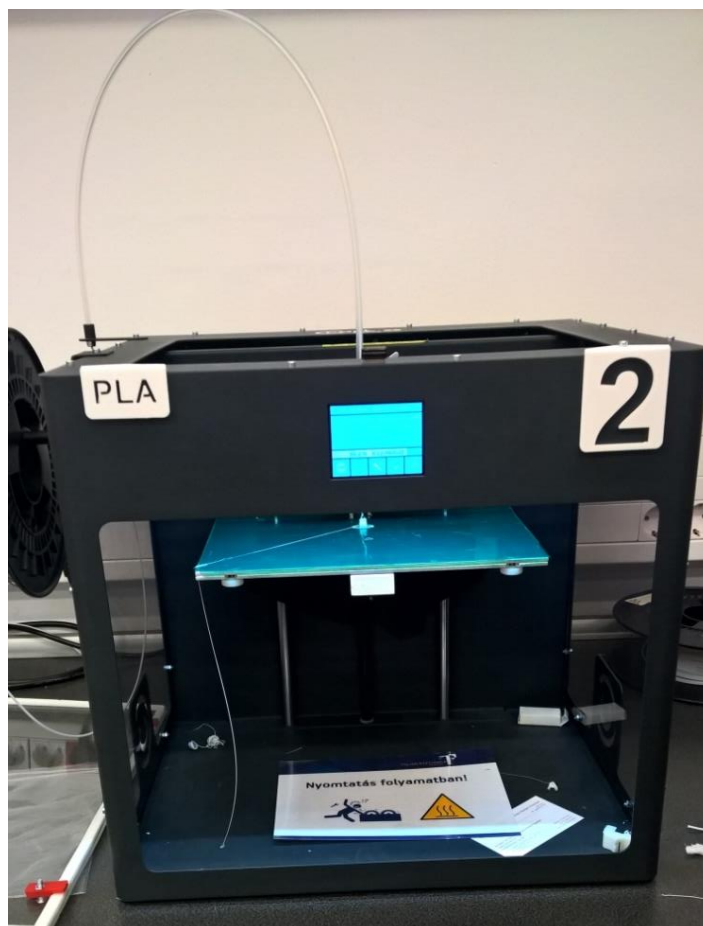


19. ábra: Prototípusok gyártására alkalmazott 3D nyomtató (Hephestos Prusa i3)

BME Polimertechnika Tanszék által nyomtatott próbatesteknél alkalmazott gép: CraftBot2 típusú gép.

3D nyomtató tulajdonságai:

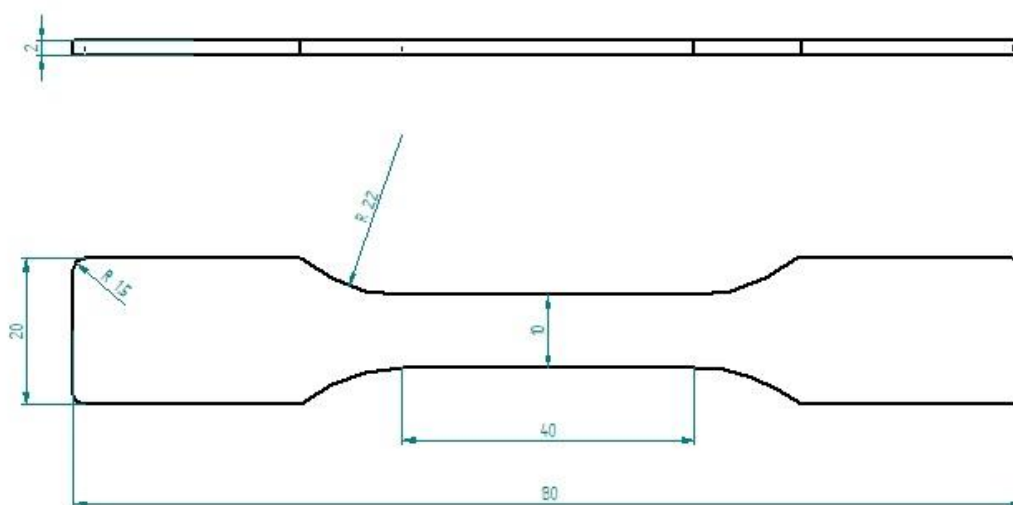
- nyomtatási térfogat méretei: 250-200-200 mm (x-y-z)
- fúvóka átmérője: 0,4 mm
- maximális ajánlott nyomtatási sebesség: 200 mm/s
- ajánlott szoftver környezet: CraftWare
- támogatott fájlok: gcode
- adatátvitel: USB kábel, USB pendrive, WiFi kapcsolat
- kezelése: WIFI kapcsolattal ellátott, vezeték nélkül is vezérelhető és kezelhető, érintőképernyő a gépen, nyomtatási paraméterek változtatása akár kézi vezérléssel is
- mozgás: az extrúder mozgása x-y irányban, asztal mozgása z irányban
- ajánlott nyomtatandó anyagok: ABS, PLA



20. ábra: Prototípusok gyártására alkalmazott 3D nyomtató(CraftBot2)

7.2 Húzó próbatest méretei:

A húzóvizsgálathoz egy szabványos, rövid próbatestet választottunk. A próbatest méretei milliméterben értendők.

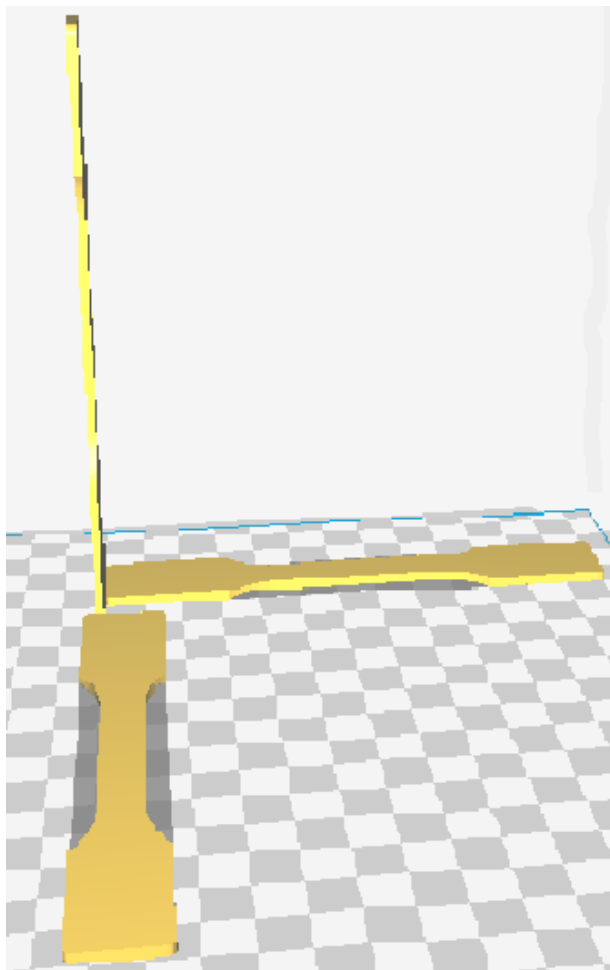


21. ábra: Húzóvizsgálathoz készített próbatest főbb méretei

7.3 Nyomtatási paraméterek:

3 különböző nyomtatási pozícióban készítünk próbatesteket a húzóvizsgálathoz. Az FDM technológia tulajdonsága, hogy műanyagból, a rétegeket egymásra helyezve építi fel az elkészítendő darabot, ezért az elhelyezés iránya befolyásolhatja a mechanikai tulajdonságokat. A 22. ábra mutatja a 3 pozícióban álló próbatesteket.

Minden pozícióhoz 5-5 darab próbatest készül, hogy elegendő mennyiségű adattal rendelkezünk a mérések után, valamint ezzel kiküszöbölhetők a gyártási eljárással kapcsolatos hibák.



22. ábra: Húzóvizsgálathoz készülő próbatestek 3 nyomtatási pozíciója

A nyomóvizsgálathoz szükséges próbatestek a 13. ábrán láthatók.

A nyomtató nyomtatási területének méretei miatt a húzóvizsgálathoz minden pozíciót külön nyomtatunk.

A nyomóvizsgálathoz a próbatesteket egyben ki tudjuk nyomtatni.

7.4 Próbatestek nyomtatási paramétereinek beállítása, optimalizálása:

Minden új anyag esetében vizsgálni kell a nyomtatás feltételeit. Ezt próbadarabok nyomtatásával érhetjük el. Különböző nyomtatási paraméterekkel próbáltam előállítani a próbatestet, melyekről képek az eredmények értékelésében megtalálhatók.

Több beállítással is próbálkoztam sikertelenül. A Hephestos Prusa i3 gép egyfogaskerekes behúzó rendszerrel rendelkezik. Az egyik oldalon egy csapágyhoz nyomja a huzalt, a másik oldalon pedig a fogaskerék segítségével betolja a szálát az extrúderbe, ami felmelegíti, majd a 0,4 mm-es fűvókán keresztül rétegről rétegre felépíti a kívánt modellünket.

Nyomtatás során észrevettem, hogy a nyomtató nem képes megfelelő réteget építeni.



23. ábra: A nem megfelelő, lyukacsos szerkezetű réteg nyomtatás során

Több próbálkozás után azt állapítottam meg, hogy a behúzó rendszer nem képes elegendő mennyiségű anyagot behúzni, ennek oka, hogy behúzás során túlzott mértékben megnyúlik a szál. A próbadarabok lyukacsos szerkezetűek lettek. Ez az 23. ábrán látható.

Vizsgálatok során szakértőkkel konzultálva - 3dee üzlet, BME Járműelemek és Járműszerkezetanalízis Tanszék, BME Polimertechnika Tanszék - optimális megoldást kerestük.

A 3dee üzlettel beszélve, két fogaskerekes behúzó rendszert ajánlottak, mely képes az anyag megfelelő behúzására. Ennek költségessége miatt másik megoldást kellett választanunk, ezért megpróbáltuk extrém lassú nyomtatási sebességet. Ennek a kísérlete a kiértékelés résznél szerepel, jobb eredményt hozott, de számunkra még ez sem volt elfogadható.

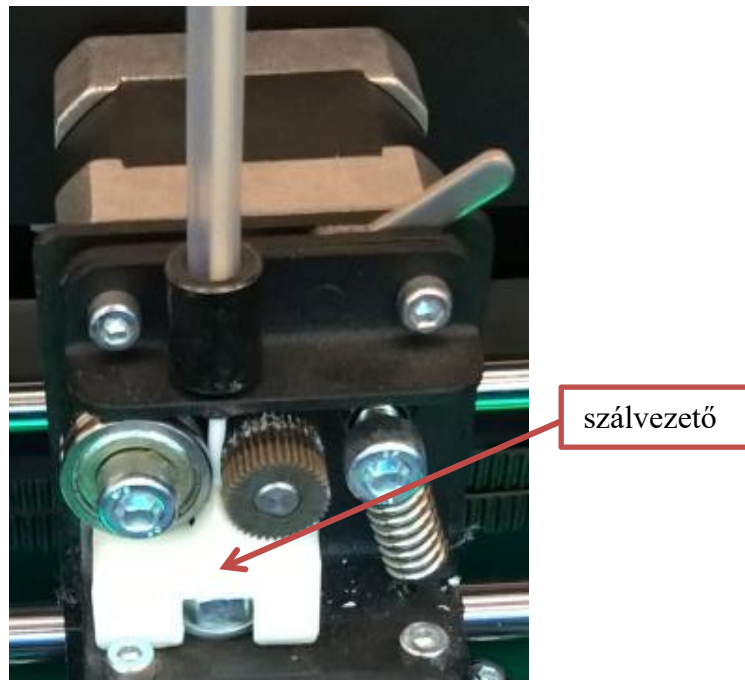
A BME Polimertechnika Tanszék segítségével ismételten próbanyomtatásokat végeztünk, de már az ő általuk használt 3D nyomtatóval (CraftBot2), melynek elvi felépítése megegyezik az általunk használt géppel. A Hephestos Prusa i3 gép nem volt alkalmas a próbatestek nyomtatására. A BME Polimertechnika Tanszék által használt CraftBot2 típusú gépet alkalmaztuk, mely gép képes nyomtatás közben is beavatkozni és változtatni a nyomtatási paraméterein, ami elősegíti a nyomtatás optimalizálását. Ez a gép nyitott extúderrel rendelkezik, így látható, hogy a fogaskerék a csapágyhoz nyomja a huzalt. Így tudja biztosítani a melegítőfejbe jutását az anyagnak. Észrevehetővé vált, hogy az adagolás során a fogaskerék és a csapágy között a huzal ki tud hajolni az anyag rugalmassága miatt, így képes a huzal felgyűrődésére, ezáltal nem kerül elegendő mennyiségű anyag a fűvókához. A 24. ábrán látható, hogy a meggyűrődés hatására kihajlott a huzal.

A huzal szemrevételezése után megállapítható vált, hogy a Hephestos Prusa i3 gép esetében is ugyanez okozta a problémát.



24. ábra: Kép a meggyűrődött huzalról

Ennek elkerülése érdekében plusz alkatrészt kellett a nyomtatóra szerelni, ami meggátolja a huzal kihajlását. Ez az alkatrész képes megvezetni a huzalt. Az alkatrész nagyban elősegítette a nyomtatás optimális feltételeit.



25. ábra: CraftBot2 3D nyomtató extrúdere valamint a nyomtatóhoz tett szálvezető

Az anyag rugalmassága és viszkozitás hatására a fogaskerék képes belerágni az anyagba, ez csökkenti az anyagmennyiséget. Erről a jelenségről készült fotó a 26. ábrán megtekinthető.



26. ábra: Kép a huzalról, ahol a fogaskerék belerágott az anyagba

Annak érdekében, hogy elegendő mennyiségű anyag kerüljön a fűvókába a nyomtatási paraméterek beállításánál lehetőségünk van arra, hogy az anyag mennyiségének a bejutását a fűvókába változtassuk. Egy bizonyos áttételt képezünk a huzal behúzása és a fűvókába jutása között, így biztosítjuk, hogy a fűvóka minden esetben teljesen tömített legyen. Ezáltal mindig elegendő anyagmennyiség jut a rétegek felépítéséhez.

A nyomtatások során ezeken felül azt is megállapítottuk, hogy a dob és az anyag egymáson való mozgása során nagyban növeli a súrlódást.



27. ábra: A dobra csévélt anyag

Ez a sűrűdés képes volt meggátolni, hogy a behúzó rendszer ne legyen képes megfelelő mennyiségű anyagot továbbítani. A huzal, amit alkalmazunk igen rugalmas, ezért képes megnyúlni, így csökken a huzal átmérője, ami szintén csökkenti az optimális anyagmennyiséget, valamint az átmérő csökkenés miatt, a fogaskerék és a csapágy között ismételtelen hézag keletkezett. Ennek elkerülése érdekében az anyagot lecsévéltük a dobról és a szükséges huzalhosszt kiszámítva csak az adott mennyiséget tesszük a nyomtatóhoz. Ez azért volt szükséges mivel a dobra felcsévélt anyag bontatlan állapotban 700 gramm tömegű, ami a sűrűdások szuperonálódása miatt igen jelentősé vált.

A problémák kiküszöbölése után, sikerült optimalizálni a nyomtatás teljes folyamatát, így megfelelő nyomtató beállítás során sikerült minőségileg jó próbatesteket kialakítani.

A nyomtató beállítási paraméterei az egyes próbatestek esetében az alábbi táblázatokban megtekinthetők.

Rétegmagasság [mm]	0,2
Falvastagság [mm]	1
Kitöltöttség/Kiöltési sűrűség [%]	100
Nyomtatási hőmérséklet [°C]	215
Anyag átmérője [mm]	1,75
Anyagfolyam [%]	90
Nyomtatási sebesség [mm/s]	10
Asztal hőmérséklete [°C]	60
Építőlemez tapadás (build plate adhesion)	-
Támasz	-
Nyomtatási idő [h]	7 óra 27 perc

1. táblázat: X és y irányú próbatest nyomtatási beállításai

Rétegmagasság [mm]	0,2
Falvastagság [mm]	1
Kitöltöttség/Kiöltési sűrűség [%]	100
Nyomtatási hőmérséklet [°C]	215
Anyag átmérője [mm]	1,75
Anyagfolyam [%]	90
Nyomtatási sebesség [mm/s]	10
Asztal hőmérséklete [°C]	60
Építőlemez tapadás (build plate adhesion)	van (raft)
Támasz	van
Nyomtatási idő [h]	7 óra 41 perc

2. táblázat: Z irányú próbatest nyomtatási beállításai

A huzal átmérője adott, mivel a nyomtató csak egy adott átmérővel (\emptyset 0,4 mm) tud dolgozni. Az extrúder egy fogaskerekes behúzó rendszerrel rendelkezik, ami csak 1,75 milliméteres átmérővel tud dolgozni. A behúzó rendszer az egyik oldalához nyomja a huzalt, a másik oldalon pedig a fogaskerék segítségével betolja a szálát az extrúderbe, ami felmelegíti, majd a 0,4 mm-es fúvókán keresztül az adott rétegnek megfelelő helyekre kerül az anyag.

A rétegenkénti magasságot normál minőségűre (0,2 mm) választottuk, mert ez nagymértékben befolyásolhatja az egymásra épített rétegek felületét, ezáltal a növeli a termék minőségét, de nő a késztermék előállítás ideje is. A kitöltöttség is fontos tényező, hisz ez adja meg, hogy mennyire lesz összefüggő az adott felület.

Az anyagfolyam definíciója szerint, az extrudált anyag mennyisége megszorozódik ezzel az értékkel. Ezt azt jelenti, hogy egy bizonyos áttételt képezünk a huzal behúzása és a fúvókába jutása között, így biztosítjuk, hogy a fúvóka minden esetben teljesen tömített legyen. Ezáltal mindig elegendő anyagmennyiség jut a rétegek felépítéséhez.

Az asztal fűthető, ezzel elősegíthető a jobb összetapadás, így tovább fenntartható az összeolvadáshoz optimális hőmérséklettartomány.

Az állított pozícióban nyomtatott próbatesthez szükséges építőlemez (build plate adhesion) valamint támasz használata, a többi esetben ez elhanyagolható. Állított pozícióban igen komplikált a nyomtatás, hisz a rugalmas anyag túl lágy a vékony próbatest előállításához, még támasz használatával is.

Több próbálkozás után is építés közben a fúvóka minimális érintkezése az éppen készült réteggel a próbatest kihajlását eredményezte. A nyomtatási paraméterek változtatása ezt a problémát nem oldja meg, több támasz hozzáépítése nem lehetséges, ezért az állított pozíció nyomtatása során méretváltoztatásra van szükség.

Rétegmagasság [mm]	0,2
Falvastagság [mm]	1
Kitöltöttség/Kiöltési sűrűség [%]	100
Nyomtatási hőmérséklet [°C]	215
Anyag átmérője [mm]	1,75
Anyagfolyam [%]	90
Nyomtatási sebesség [mm/s]	10
Asztal hőmérséklete [°C]	60
Építőlemez tapadás (build plate adhesion)	-
Támasz	-
Nyomtatási idő [h]	6 óra 38 perc

3. táblázat: Nyomóvizsgálathoz (szilárdság, Young-modulus) készült próbatestek nyomtatási beállításai

A nyomóvizsgálathoz szükséges próbatesteket, méretükből adódóan, egyszerre ki tudtuk nyomtatni, így a nyomtatási idő az összes nyomó próbatestet magában foglalja.

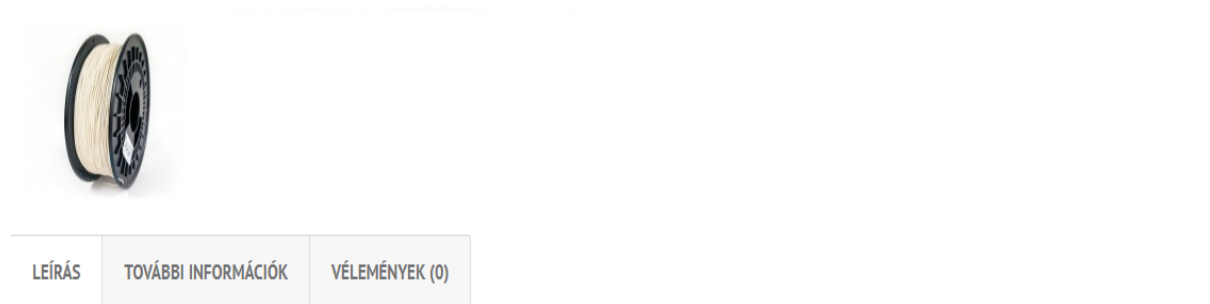
A főbb nyomtatási paramétereket a nyomó próbatesteknél is azonosra választottuk, hogy ez se befolyásolja a mérések összehasonlíthatóságát.

8. Az eredmények értékelése, következtetések levonása

8.1 Nyomtatás Soft PLA anyaggal:

A nyomtatás során több nyomtatási paraméterrel is próbálkoztam. Ez szükséges, mint a megfelelő minőségű termék előállításának optimalizálásához, mint a huzal nyomtatási tartományainak vizsgálatához.

A gyártó és a forgalmazó is megszab egy bizonyos nyomtatási hőmérséklet tartományt és maximális nyomtatási határt, de ezek nem minden esetben ideálisak az adott 3D nyomtató esetén. Esetünkben a nyomtatási hőmérséklet maximum $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, nyomtatási sebesség maximum 30 milliméter/másodperc. Ezeket figyelme véve választottam ki a nyomtatási paraméterek. A 28. ábra mutatja a Soft PLA általános leírását és egyes jellemzőit.



A soft PLA filament különösen magas flexibilitással rendelkezik, valamint a guminál is puhább. Ideális tömitések és egyéb rugalmas alkatrészek nyomtatásához.

Prémium minőségű PLA-Filament. A PLA egy minőségi bio-műanyag, melyet kukoricakeményítékből állítanak elő. Könnyű nyomtathatósága és a nyomtatott felület magas minősége miatt a legszélesebb körben elterjedt nyomtatóanyag FDM-nyomtatók számára. Nyomtatása teljesen szagtalan, fűtött platform nem szükséges hozzá.

- Átmérő: 1,75mm (+/- 0,05mm)
- Nyomtatási hőmérséklet: 210-230 °C
- Nyomtatási sebesség: max 30 mm/s (ajánlott)
- netto tömeg: 750 g
- Származási hely: Németország

28. ábra: Soft PLA leírása, valamint ajánlott nyomtatási paraméterei [20]

8.2 Különböző nyomtatási paraméterek, melyek nem hoztak megfelelő eredményt:

Először a nyomtatási hőmérsékletnek $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot választottam, nyomtatási sebességnek 20 mm/másodpercet, réteg magasságának 0,1 millimétert adtam meg, így lett 20 rétegből álló próbatestünk a szakító vizsgálat során. Kitöltésnek 100 %-ot adtam meg, mivel a későbbiekben tömítés alkalmazására is szeretném megvizsgálni az anyagot. Tömegáramként is 100 %-ot adtam meg.

Nyomtatás során nem megfelelő minőségű próbatestet kaptam, mely a 29. ábrán látható, nyomtatási paraméterei pedig a 4. táblázatban.

Rétegmagasság [mm]	0,1
Falvastagság [mm]	0,4
Kitöltöttség/Kiöltési sűrűség [%]	100
Nyomatási hőmérséklet [°C]	220
Anyag átmérője [mm]	1,75
Anyagfolyam [%]	100
Nyomatási sebesség [mm/s]	20
Asztal hőmérséklete [°C]	-
Építőlemez tapadás	-
Támasz	-
Nyomatási idő [óra, perc]	13 óra 46 perc

4. táblázat: 20mm/s nyomatási sebességű próbatest



29. ábra: Adott beállítások mellett az elkészült próbatestek

A Soft PLA egy igen rugalmas anyag, mely huzalként is puha, ezért nyomatása komplikáltnak mutatkozott. Az általunk használt géppel nem lehetséges a hagyományos beállítások szerint, melyek az anyag hivatalos adatlapján (28. ábra) fel vannak tüntetve. Több beállítással is próbálkoztam sikertelenül. A próbatestek minden esetben lyukacsos szerkezetűek lettek.

A kísérletezés során sikerült megállapítanom, hogy a behúzó rendszer nem képes megfelelően adagolni az anyagot az extrúder számára. Megpróbáltam egy extrém lassú sebességű nyomatást is (1 milliméter/másodperc). A 30. ábrán látható az extrém lassú sebességgel készült próbatestet. Nyomatási paraméterei az 5. táblázatban olvashatók.

Ennek a próbatestnek a méretét 60 %-al kisebbre vettük, mint a szabványos próbatest. Ebben az esetben nem az ideális termék előállítása volt a cél, hanem a nyomatási feltételek optimalizálása.

Rétegmagasság [mm]	0,1
Falvastagság [mm]	0,4
Kitöltöttség/Kiöltési sűrűség [%]	100
Nyomatási hőmérséklet [°C]	220
Anyag átmérője [mm]	1,75
Anyagfolyam [%]	100
Nyomatási sebesség [mm/s]	1
Asztal hőmérséklete [°C]	60
Építőlemez tapadás	-
Támasz	-
Nyomatási idő [óra, perc]	54 perc

5. táblázat: A kicsinyített próbatetest nyomtatási paramétereinek beállításai



30. ábra: 1mm/másodperc sebességgel előállított, kicsinyített próbatetest

Ez sem hozott teljesen jó eredményt, így megpróbáltuk az alapanyag száldobjának a sűrűségét csökkenteni. Emiatt le kellett csévélni a szükséges mennyiséget a dobról, mert a dob súlya miatt a szál a behúzó fogaskerék előtt megnyúlik az anyag az adagolás és behúzás során.

A próbanyomtatások során észrevett hibákat kiküszöbölve és a megfelelő nyomtatási paraméterek alkalmazása mellett, mely az 5.5 fejezetben olvasható, sikerült minőségileg megfelelő és nyomtatási sebességben is ideális prototípusok nyomtatni.

A nyomtatott próbatestekről készült fotók a 31-33. ábrákon láthatók.

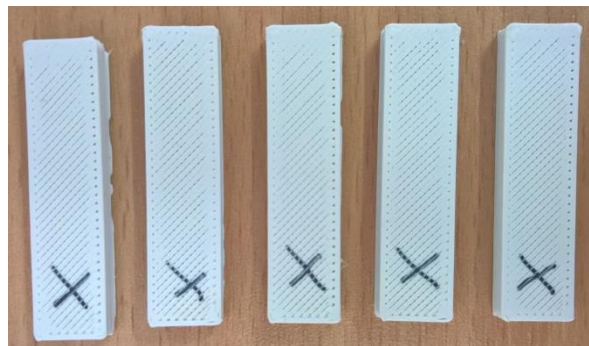
A próbatestek megfelelő minőségűek lettek. Láthatók az éles kontúrok, a felsőbb rétegek is homogénebb szerkezetet alkottak. Egyes darabokon észlelhető, hézag a kontúr és a belső réteg között, valamint a belső rétegek között is a nem megfelelő összeolvadás miatt. Ez az FDM technológia egyik velejárá hibája. Vizsgálataim során lehet, hogy ez a hiba is befolyásolja majd a mechanikai tulajdonságokat.



31. ábra: A húzóvizsgálathoz készült szabványos próbatestek

A húzó próbatestnél a z irányú darabok nyomtatása nem hozott eredményt, mivel a próbatest vastagsága 2 milliméter és magassága 130 milliméter. Ezt álló pozícióban nem tudtuk kinyomtatni, még támaszok segítségével sem. A próbatest minden esetben kihajlott. Rugalmas anyag révén a fűvóka minimális érintkezésére is elmozdította a próbatestet, így a rétegek építése meghiúsult.

Nyomó próbatestek esetében fontos, hogy a befogó pofákkal érintkezett felületek síklapúság szempontjából síkok legyenek, valamint ferdeség szempontjából értéke kicsi legyen. Esetünkben a befogási felületek nem lettek teljesen síkfelületek, így ezek befolyásolhatják a vizsgálat eredményeit. A szilárdsághoz használt próbatesteknél ez még jelentősebb.



32. ábra: A nyomóvizsgálathoz készült nyomó próbatestek (Young-modulus meghatározásához)



33. ábra: Nyomó próbatestek a szilárdsághoz

9. Soft PLA anyagvizsgálat:

Esetünkben 3D nyomtatott próbatesteket mérünk. Szabványos eljárás még nincs a 3D nyomtatott darabok esetében. Az additív gyártástechnológiával előállított polimereknek az anyagi jellemzői eltérnek a hagyományos elven előállított polimerektől. Előírt szabvány nem fedí le ezeknek az anyagoknak a mérését, ezért mérése ugyanúgy zajlik, mint a hagyományos polimerek esetében. A mérés során az MSZ EN ISO 527:2012 szabványt és az ISO 604-es szabványt alapul véve végeztük el a húzó- és a nyomóvizsgálatokat.

9.1 Alkalmazott gép:

A vizsgálat során alkalmazott gép a BME Polimertechnika Tanszék akkreditált szakítógépe, mely azt jelenti, hogy hivatalos szervezet által elismert eredmények elvégzése alkalmas.

A 34. ábrán a Zwick Z020 típusú számítógép vezérlésű univerzális szakítógépe látható, melyet vizsgálataim során használtam.



34. ábra: Mérés során alkalmazott akkreditált szakítógép

9.2 Húzóvizsgálat eredményei:

A mérés kezdete előtt a gépen beállított adatok:

- a próbatest adatai:
 - próbatest vastagsága: 2 milliméter
 - próbatest szélessége a mérendő tartományban: 10 milliméter
- az alap távolság a befogó pofák között: 70 milliméter
- mérési sebesség: 10 milliméter/perc

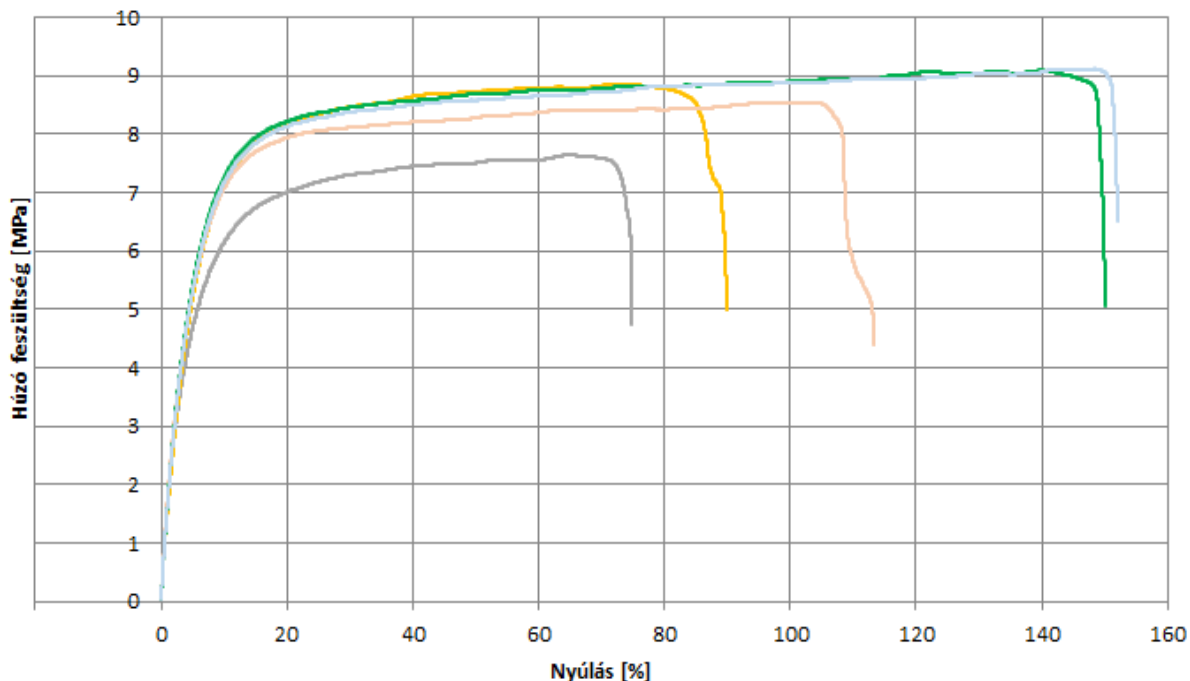
A szakítógépet beállítási paramétereit után elkezdtük a mérést. A próbatestet ideálisan behelyeztem a befogó pofák közé. A mérőgép egytengelyű húzóerőt fejt ki a próbatestekre. Először nyúlás tapasztalható, majd további húzóerő hatására a próbatest elszakad (35. ábra).



35. ábra: A kép bal oldalán látható, próbatest húzóvizsgálat közben, ahol már tapasztalható a plasztikus deformáció, a jobb oldalán az elszakadt próbatest látható.

A mérési eredményeket feszültség-nyúlás (σ - ϵ) diagramban ábrázoltam, mely megmutatja a húzóvizsgálat adatait.

X pozícióban nyomtatott próbatetek szakítódigramjai



36. ábra: X pozícióban nyomtatott próbatetek szakítódigramjai

A mérési adatokból meghatároztam az egyes próbatetek Young-modulusát (E), szakítószilárdságát (Rm), és szakadási nyúlását (ϵ_{szak}), melynek értékeit a 6. táblázat tartalmazza.

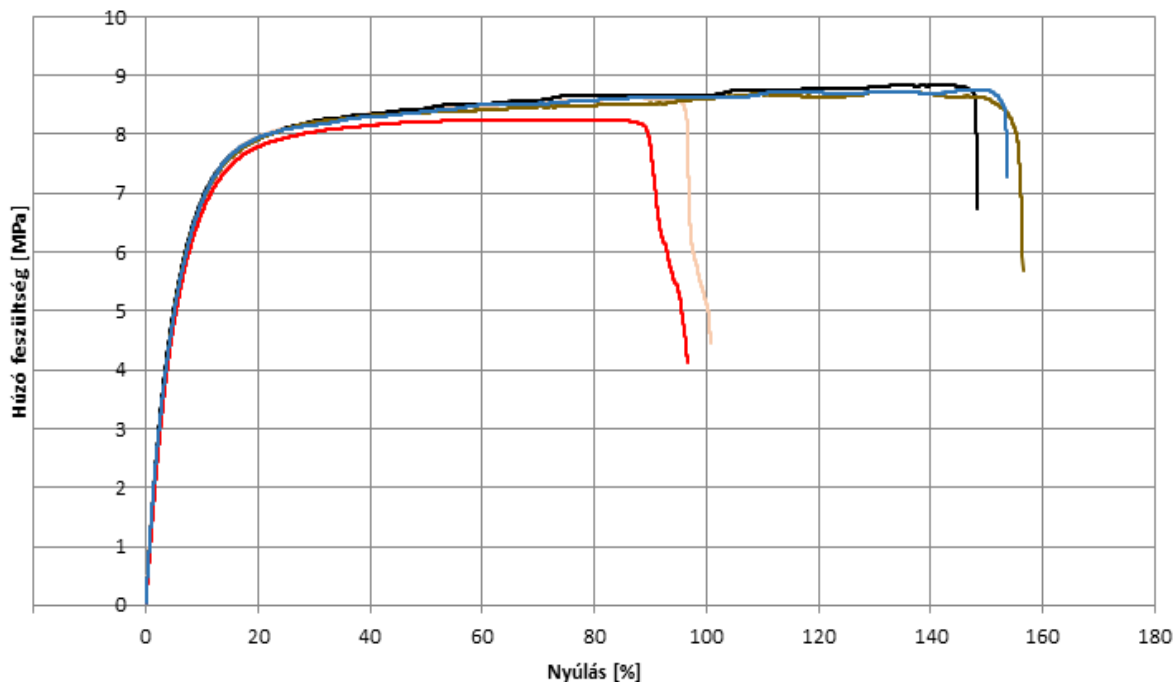
	E [MPa]	Rm [MPa]	ϵ_{szak} [%]
x1	174,52	7,609	73,4337
x2	179,94	8,802575	88,91339
x3	186,1	8,532385	108,6763
x4	177,3	9,0508	149,5702
x5	182,36	9,1001	151,917
átlag értékek	180,044±5,52	8,619±1,01	114,5021±41,069

6. táblázat: Az x pozícióban nyomtatott próbatetek húzóvizsgálat során a diagramokból kiértékelt eredményei

A Young- modulusok meghatározásánál, mint a diagramokon is látható, a kezdeti szakaszok meredeksége közel azonos. Az értékek átlaga 180,044 MPa-ra adódott. Az átlagtól való eltérések is igen kicsik, $\pm 5,52$ MPa.

A szakítószilárdságok (átlaga: 8,619 MPa) és a szakadási nyúlások (átlaga: 114,5021 %) már jelentősebb eltéréseket mutatnak. Szakítószilárdság esetében a legkisebb érték az x1 próbatestnél adódott, ami 7,609 MPa, legnagyobb érték pedig az x5 próbatestnél van, ami 9,1 MPa. Ennek analógiára a szakadási nyúlások is ugyanezen esetekben lettek a legkisebb és a legnagyobb.

Y pozíciójú próbatetek szakítódigramjai



37. ábra: y pozícióban nyomtatott próbatetek szakítódigramjai

Az y pozícióban nyomtatott próbatetek szakítódigramjai is jellegre megegyeznek az x pozíciókéval, ami a 37. ábrán látható.

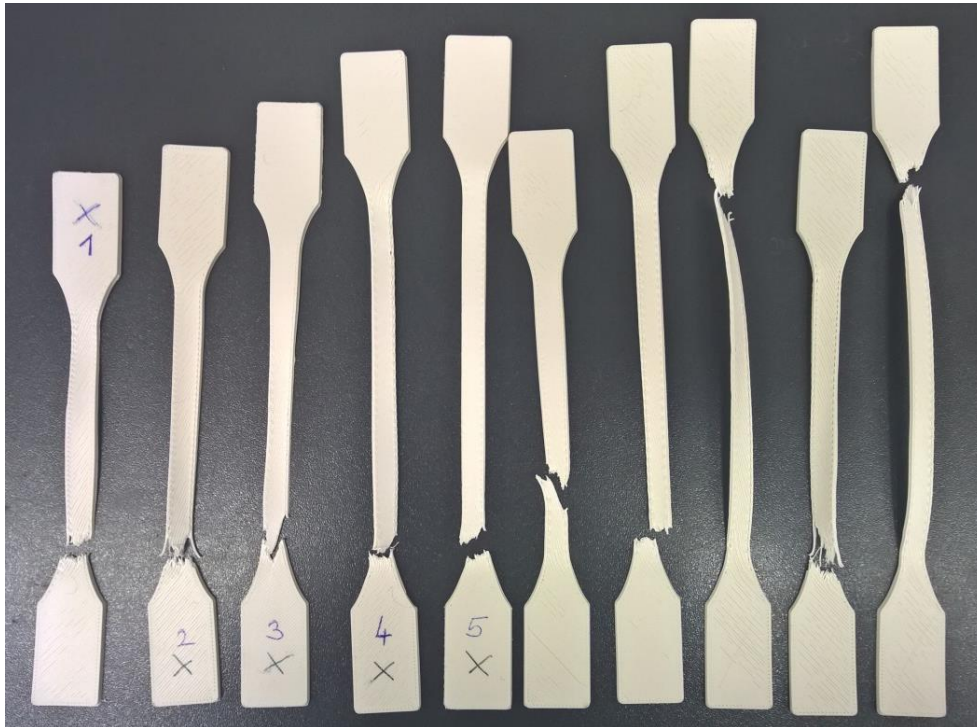
A mérési adatokból meghatároztam az egyes próbatetek Young-modulusát (E), szakítószilárdságát (Rm), és szakadási nyúlását (ϵ_{szak}), aminek értékeit a 7. táblázat tartalmazza.

	E [MPa]	Rm[MPa]	ϵ_{szak} [%]
y1	176,43	8,622428	96,8732
y2	152,73	8,83245	148,38
y3	158,72	8,645268	156,447
y4	124,73	8,244628	90,9352
y5	166,29	8,760426	153,6414
átlag értékek	$155,78 \pm 31,05$	$8,62104 \pm 0,3764$	$129,2554 \pm 38,321$

7. táblázat: Az y pozícióban nyomtatott próbatetek húzóvizsgálat során a diagramokból kiértékelt eredményei

Az y pozícióban nyomtatott próbatetek esetében a rugalmassági modulus értékei 155,78 MPa-t adtak. Itt jelentős eltérés van az átlaghoz képest ($\pm 31,05$ MPa). Szakadási nyúlásuk ellenben 129,26 %-os átlag értékre adódott. Ennek is elég magas az átlagtól való eltérése ($\pm 38,321$ %). A szakítószilárdság tekintetében átlag értéként 8,62104 MPa értéket kaptam. Itt az eltérések is minimálisra adódtak ($\pm 0,3764$ MPa).

A 38. ábrán jól láthatók a maradó alakváltozással járó nyúlások.



38. ábra: x és y irányú próbatetek maradó plasztikus nyúlása

9.3 Nyomóvizsgálat eredményei:

9.3.1 Nyomó rugalmassági modulus:

A Young modulus mérés kezdete előtt a gépen beállított adatok:

- a próbatest adatai:
 - próbatest magassága: 42 milliméter
 - próbatest vastagsága: 4 milliméter
 - próbatest szélessége a mérendő tartományban: 10 milliméter
- az alap távolság a befogó pofák között: 42 milliméter
- mérési sebesség: 200 milliméter/perc
- felső erő limit: 5000 N
- erő leállításának a küszöbe: maximális erőhatás 80 %-ánál
- minimális távolsága a befogó pofáknak: 2 milliméter
- maximális deformáció: 30 milliméter

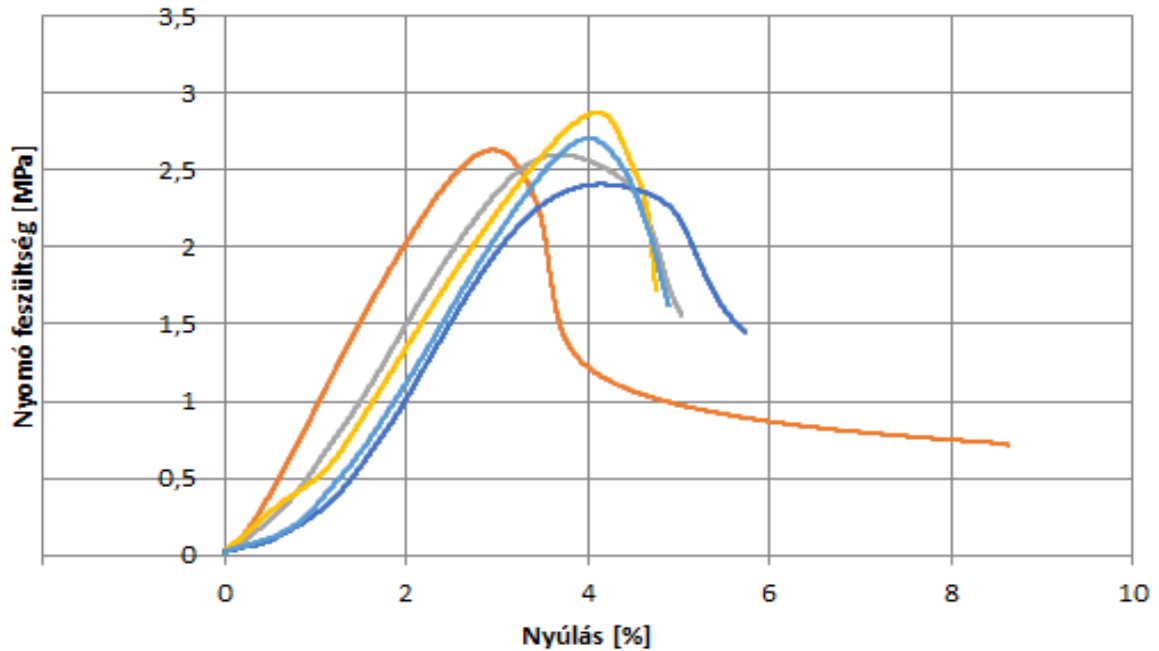
A mérés során a próbatest alakjából adódóan kihajlik, ez a 39. ábrán megfigyelhető. Ennek segítségével a nyomó rugalmassági modulus meghatározható.



39. ábra: A nyomó erő hatására a próbatest kihajlik.

A rugalmassági modulust a görbe két pontjához vett legnagyobb meredekségű egyenesével határozzuk meg. Ezeket az értékeket meghatározva megkapjuk próbatestek nyomó rugalmassági modulusait.

x pozícióban nyomtatott próbatestek nyomás diagramjai



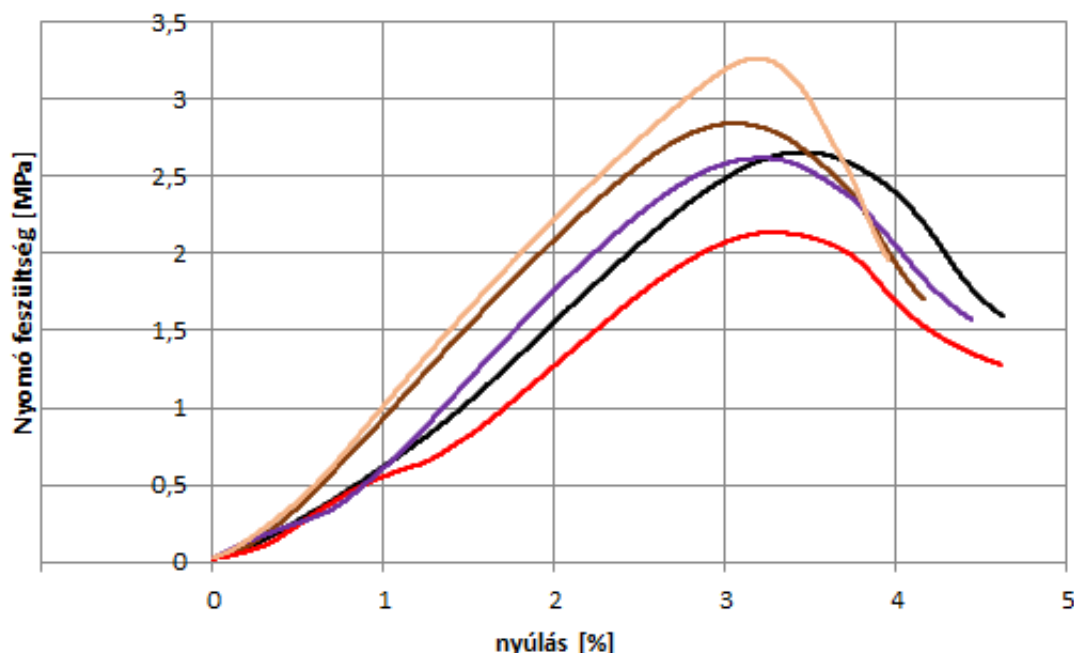
40. ábra: X pozícióban nyomtatott próbatestek nyomás hatására kialakult diagramjai a rugalmassági modulus meghatározásához

	E [MPa]
x1	102,754
x2	100,434
x3	94,923
x4	102,266
x5	98,56
átlag érték	99,7874±2,97

8. táblázat: A rugalmassági modulusok az x irányú nyomtatás során

A 8. táblázatban szereplő értékek megadják az x pozícióban nyomtatott nyomó próbatestek rugalmassági modulusait. Ezeknek átlag értéke 99,7874 MPa értékre adódott. Az egyes mérési eredmények között igen kis eltérés mutatkozik ($\pm 2,97$ MPa).

y pozícióban nyomtatott próbatestek nyomás diagramjai



41. ábra: Y pozícióban nyomtatott próbatestek nyomás hatására kialakult diagramjai a rugalmassági modulus meghatározásához

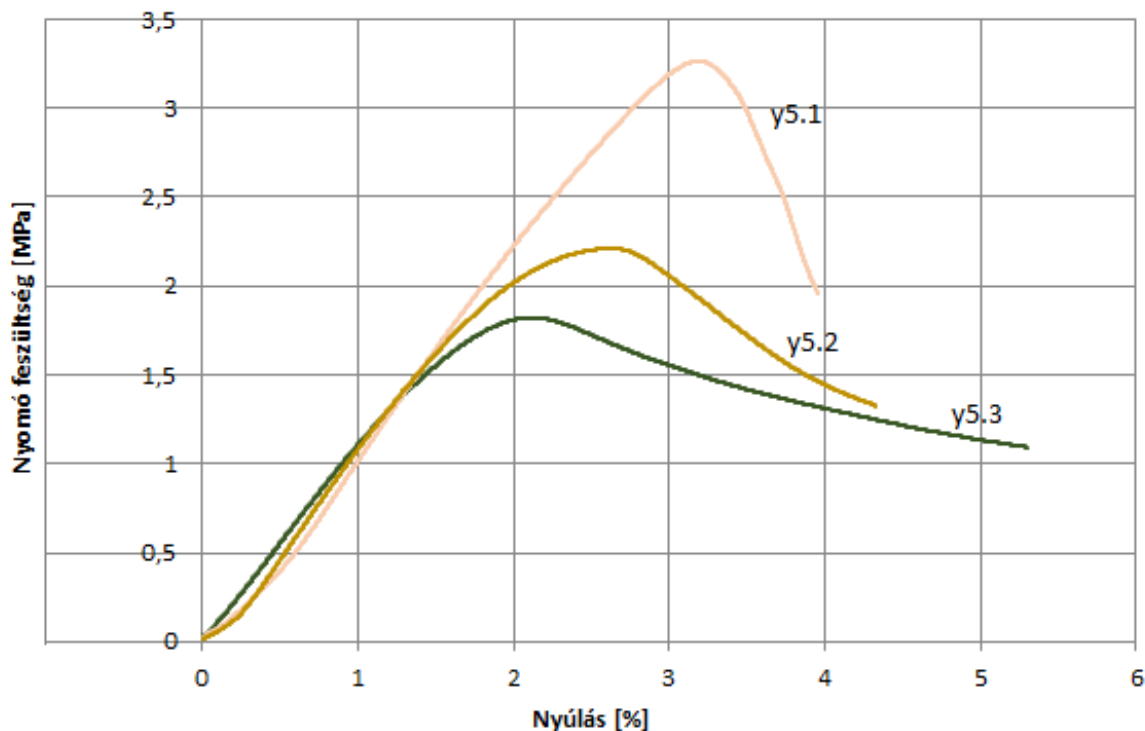
	E [MPa]
y1	101,5869
y2	120,547
y3	94,30509
y4	116,3908
y5	127,8716
átlag érték	112,1403±17,84

9. táblázat: A rugalmassági modulusok az x irányú nyomtatás során

Az y pozícióban nyomtatott nyomó próbatestek rugalmassági modulusának átlag értéke 112,1403 MPa. Ebben az esetben az eredmények igen nagy eltéréseket mutatnak mind negatív, mind pozitív irányban. Az átlag értéktől való eltérés $\pm 17,84$ MPa.

A próbatetek a vizsgálat során visszanyerték eredeti alakjukat, így lehetőségünk adódott újratérhelni a nyomó próbatestet. Ez az y pozícionál nyomtatott próbatest esetében tettünk meg.

y pozícióban nyomtatott próbatest újratérhelése



42. ábra: Y pozícióban nyomtatott próbatetek nyomás hatására kialakult diagramjai a rugalmassági modulus meghatározásához, visszaterhelés után

A 42. ábrán jól megfigyelhető az újratérhelések következtében hogyan változik a terhelhetőség (nyomószilárdság) mértéke.

	E [MPa]
y5.1	127,8716
y5.2	113,8355
y5.3	110,3946

10. táblázat: A rugalmassági modulus változása visszaterhelések hatására

A mért adatokból jól látható, hogy újratérhelés hatására a rugalmassági modulus értéke csökken. Ez ismételten utal a rugalmas, képlékeny anyagjellemzőkre, mivel minimális felkeményedés jelent meg a próbatesten, ami a nyomó rugalmassági modulus csökkenését eredményezte.

9.3.2 Szilárdság:

A szilárdság mérésének kezdete előtt a gépen beállítandó adatok:

- a próbatest adatai:
 - próbatest magassága: 10 milliméter
 - próbatest vastagsága: 4 milliméter
 - próbatest szélessége a mérendő tartományban: 10 milliméter
- az alap távolság a befogó pofák között: 42 milliméter
- mérési sebesség: 5 milliméter/perc
- felső erő limit: 5000 N
- erő leállításának a küszöbe: maximális erőhatás 80 %-ánál
- minimális távolsága a befogó pofáknak: 2 milliméter
- maximális deformáció: 30 milliméter



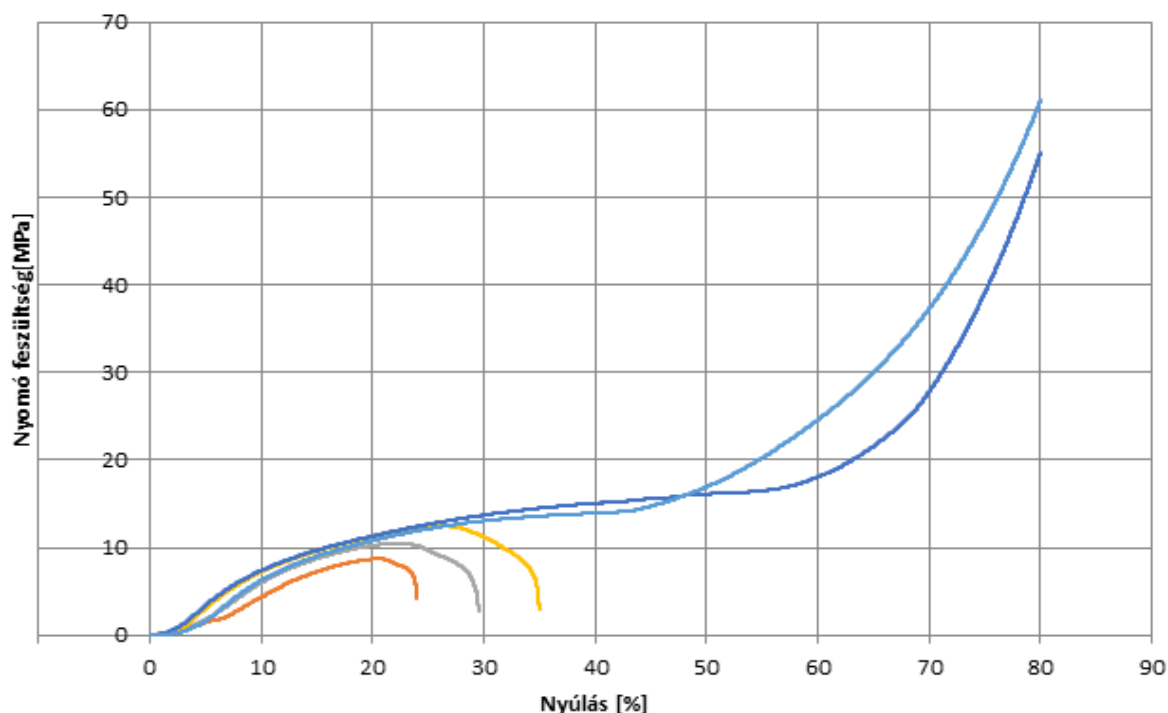
43. ábra: A nyomószilárdság meghatározása közben készült fotó



44. ábra: A próbatestek nyomóvizsgálat után

A szilárdság meghatározásakor mért eredményekből diagramot készítettem, mely a 45. ábrán látható.

Diagram a szilárdság meghatározásához



45. ábra: Szilárdság meghatározáshoz mért értékek

A görbék nagy eltéréseket mutatnak, ez a próbatetek nyomóvizsgálatából is meghatározható. Itt az eltérő görbék kiértékelésénél más módszer alkalmazása szükséges. Három esetben meg kell keresni a diagramok maximális értékét, addig a másik két esetben az inflexiós pont meghatározása szükséges. Ezekben a pontokban van egyértelmű nyomószilárdság. A diagramokon is látható, hogy a maximális szilárdsági határ elérése után is folytattuk a vizsgálatot, ezt a 45. ábra is igazolja.



46. ábra: Delaminálódott próbatest

Jól látható a próbatest gyűrődése, valamint a felépítéséből adódó probléma a delaminálódás. (46. ábra)

	E [MPa]
1	8,726
2	10,4913
3	12,467
4	16,252
5	13,974
átlag érték	12,382±3,87

11. táblázat: Szilárdság meghatározásához szükséges értékek

A nyomószilárdság átlag értéke 12,382 MPa-t adott. Az átlagtól való eltérés ±3,87 MPa.

9.4 A szakítóvizsgálat kiértékelése:

Az x és az y pozíciókban nyomtatott próbatetek vizsgálata során meghatározott átlag értékeit jeleníti meg a 12. táblázat.

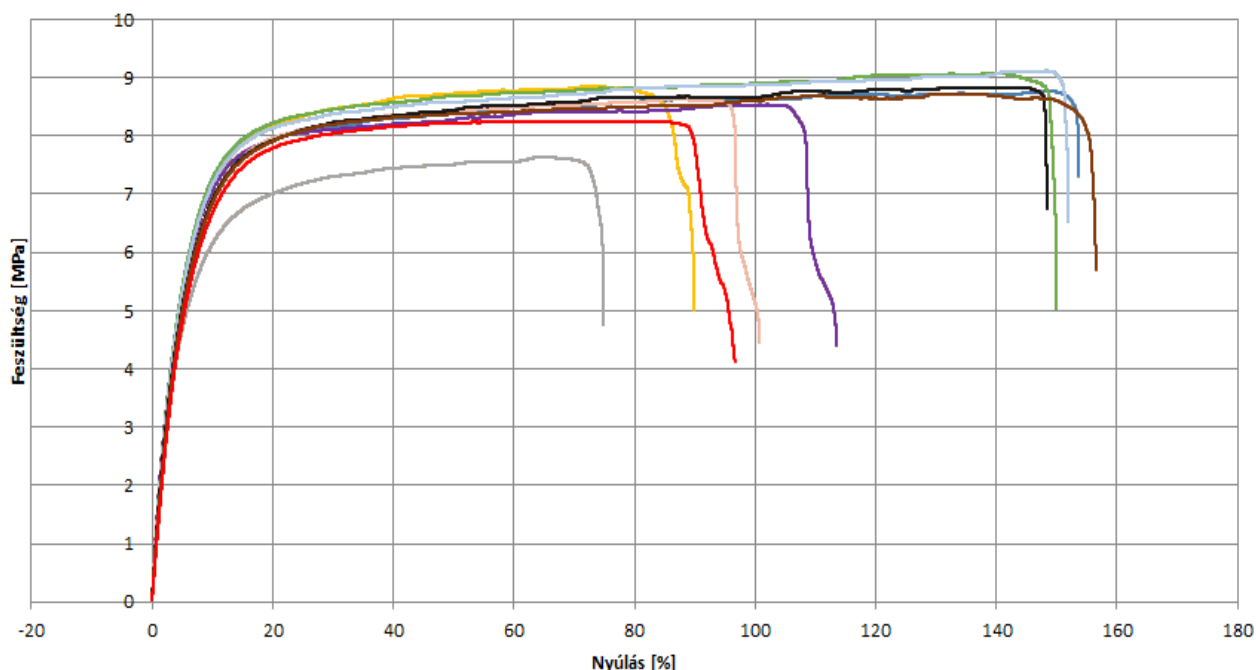
	E [MPa]	Rm[MPa]	ϵ_{szak} [%]
x átlag értékek	180,044±5,52	8,619±1,01	114,5021±41,069
y átlag értékek	155,78±31,05	8,62104±0,3764	129,2554±38,321

12. táblázat: Mindkét nyomtatási pozícióban vett eredmények átlag értékei

A két pozícióban nyomtatott átlag értékeiből kiolvashatjuk, hogy milyen eltéréseket mutatnak a nyomtatási pozíciók. Látható, hogy az y irányban lévő nyomtatás Young-modulusainak az eredményei nagyobb szórást produkáltak, mint az x esetben. Ellenben észrevehető az is, hogy valamelyest kisebb értékek adódtak. Ez az eltérés látható a szakadási nyúlások esetében is. A szakadási szilárdság értékek közel ugyanolyan eredményt adtak mindkét esetben.

Az összesített szakítódiagramokon is látható, hogy az x és az y pozícióban nyomtatott próbatetek jellegre hasonlóságot adnak.

Húzóvizsgálat eredményei x és y pozíciójú próbateteknél



47. ábra: x és y pozícióban nyomtatott próbatetek szakítóvizsgálatainak eredményei egy közös diagramban

Mint minden húzóvizsgálat során itt is az egyenletes erőhatás miatt a próbatetek kezdeti keresztmetszetei elkezdtek megnyúlni, vagyis kontrahálni. Ezt követően a folyamatos erőhatás következtében az anyag nem bírja tovább a terhelést és a szakadási nyúlásnál a próbatest elszakad.

A diagramokról (47. ábra) leolvasható, hogy kezdeti, rugalmas szakaszban ugyanolyan jelleget mutatnak. Ez a szakasz a rugalmas alakváltozás szakasza. Ezt a rugalmassági modulus segítségével tudjuk pontosan jellemezni. A folyamatos húzófeszültség további növekedésének

hatására, a diagram kezdeti szakaszainak meredeksége csökken. A szakaszok érintő egyeneseinek csökkenésével áttérünk a maradó alakváltozás tartományába. Itt már a terhelés megszűnése után sem nyeri vissza eredeti alakját a próbatest. Ebben az esetben a próbatest elkezd plasztikusan deformálódni, az anyagot összekötő molekulák elkezdenek megnyúlni, majd az anyag nem képes több egytengelyű húzóerőt elviselni és elszakad.

A diagramokról (47. ábra) megállapítható, hogy nincs jól látható folyáshatára, ami polimerek esetében szinte mindig igaz. A 4. fejezetben vett feszültség-nyúlás diagramokkal összehasonlítva jellegre a rugalmas, képlékeny anyagokra jellemző görbéket kaptunk (4.2.5). A rugalmas, képlékeny anyagok esetében számolnunk fel felkeményedéssel.

Az y pozícióban nyomtatott próbatestek szakítódigramjai (36. ábra) jellegre megegyeznek az x pozíciókéival (37. ábra), ami arra enged következtetni, hogy a két nyomtatási pozíció között nincsenek számottevő eltérések a rugalmassági modulus tekintetében. Azonban a számszerű eredmények eltérő eredményt adtak. Fontos megjegyezni, hogy a modulusok tekintetében igen jelentős eltérések adódtak. Ez azt jelenti, hogy az eredmények reprodukálhatósága nem biztosított. Ez a gyártási paraméterek megfelelést is megkérdőjelezi. Az y pozícióban nyomtatott próbatestek esetében probléma adódott a darabok felszedésével is, így enyhén deformálódtak. Ezt szemlélteti a 48. ábra.



48. ábra: Az y pozícióban nyomtatott húzó próbatest felszedése utáni deformáció

Feltehetően ez is befolyásolta a próbatestek húzó rugalmassági modulusok eltéréseit x és y irányban nyomtatott próbatestek esetében.

A szakadási nyúlások az átlag értéktől igen nagy eltéréseket mutatnak, mind pozitív, mind negatív irányban. Ez feltételezhetően amiatt lehet, hogy a nyomtatás következtében kialakult próbatestek kialakítása során nem minden esetben lett egyenletes a rétegek összetapadása, így hézagok keletkeztek a rétegek között. Viszont ez már a mérnöki tervezés tartományán kívül esik, így nem okoz problémát.

9.5 Nyomóvizsgálat kiértékelése:

Nyomó próbatestek esetében fontos, hogy a befogó pofákkal érintkezett felületek síkok legyenek. A nyomó próbatestek esetében fontosak az alak- és helyzettűrések megfelelése. Esetünkben a befogási felületek nem lettek teljesen síkfelületek, így ezek befolyásolhatják a vizsgálat eredményeit.

9.5.1 Nyomó rugalmassági modulus:

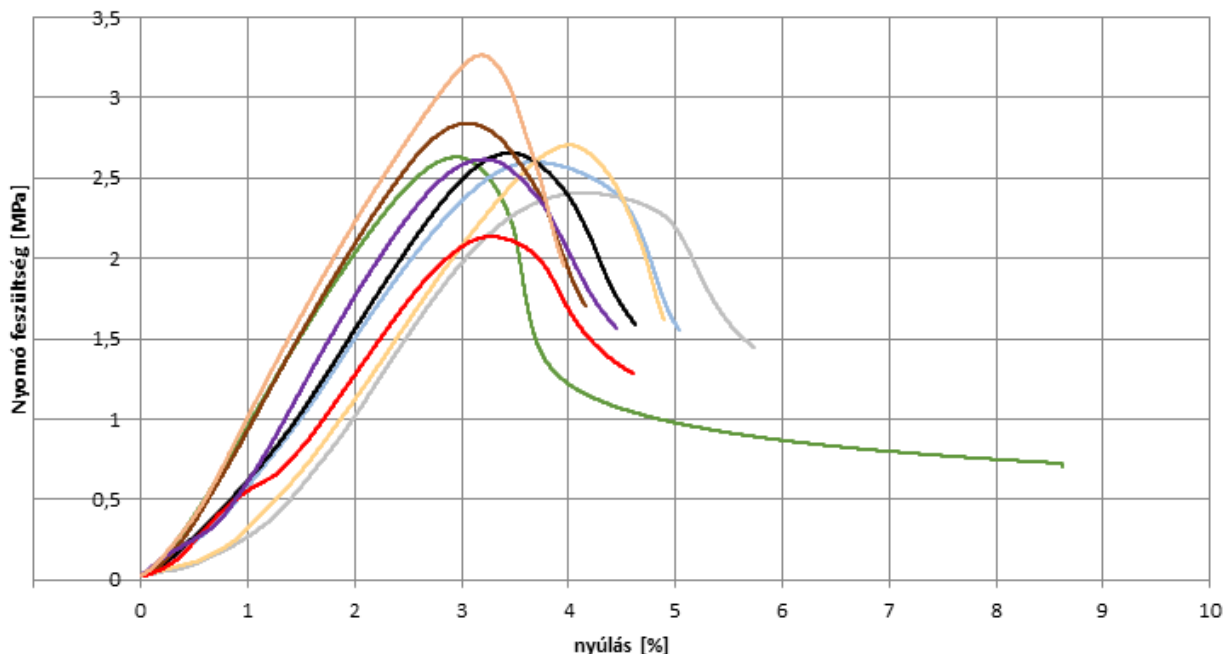
A 13. táblázatban megtalálhatók a rugalmassági modulusok átlag értékei x és y pozícióban nyomtatott próbatesteknél.

	E [MPa]
x átlag érték	99,7874±2,97
y átlag érték	112,1403±17,84

13. táblázat: A rugalmassági modulusok átlagértékei

A két pozíció átlagértékeit összehasonlítva, az y esetében vett átlag érték nagyobbra adódott, mint az x esetében, de így is jóval alább maradt a szakítási diagramoknál kiértékelt eredményekhez képest.

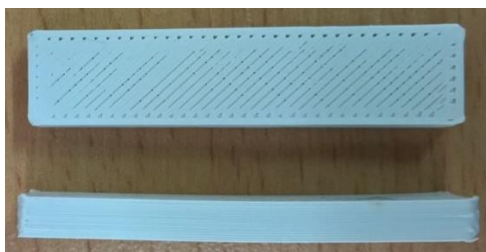
x és y pozícióban nyomtatott próbatetek nyomás diagramjai



49. ábra: X és y pozícióban nyomtatott próbatetek nyomás hatására kialakult diagramjai a rugalmassági modulus meghatározásához

A nyomó rugalmassági modulusok diagramjai (49. ábra) a kezdeti szakaszban hasonló meredekséget mutatnak. Azonban a maximális nyomó modulus értékei már jelentősen eltérnek egymástól. Míg x irányban az átlag értékek 99,7874 MPa-t adtak, addig y irányban 112,1403 MPa volt. Az átlagtól való eltérések is különböztek, x irányban 2,97 MPa, y irányban 17,84 MPa. Ezekből megállapítható, hogy az y pozícióban nyomtatott nyomó próbatetek szórásai lényegesen nagyobbak. Ez feltételezhetően a gyártási paraméterek nem megfelelőségére utal.

A nyomó rugalmassági modulusok értékei jóval elmaradnak a húzó rugalmassági modulusokhoz képest. Ellenben a nyomó próbatetekeken nem látszik terhelés után jelentős maradó alakváltozás. Ez az 50. ábrán látható.



50. ábra: Nyomó próbatest a vizsgálat után

A próbatetek vizsgálat után szinte teljesen visszanyerték eredeti alakjukat. Ez alapján feltételezhető, hogy a próbatetek csak rugalmas deformációt szenvedtek.

Mivel a próbatetek ilyen minimális deformációt szenvedtek vizsgálat után, ezért lehetőségünk adódott a próbateteket újraterhelni és megvizsgálni, hogy milyen jelleget

mutatnak (42. ábra). Újraterhelés hatására a rugalmassági modulus értéke csökkent. Ez szintén utal a rugalmas, képlékeny anyagjellemzőkre. Ennek hatására minimális felkeményedést mutatott a próbatesten, ami a Young-modulus csökkenését eredményezte.

9.5.2 Szilárdság:

A szilárdságnál kapott diagramok (45. ábra) igen eltérő képet mutatnak, de ez látható a próbatesteken (44. ábra) is a mérés után. Ennek következtében az értékek szórása is jelentős mértékű. A diagramokon (45. ábra) látható, hogy jóval a szilárdsági határ felett is folytattuk a vizsgálatot. Egészen addig, míg egyes esetekben a próbatestek meg nem gyűrődtek és el nem kezdtek delaminálódni. A delaminálódás oka, hogy a próbatest rétegekből épül fel, így a nem megfelelő tapadás következtében a próbatest rétegenként szétválhat (46. ábra).

A szilárdság értékei 12,382 MPa értéket adtak, amiből látható, hogy igen alacsony mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik az anyag.

9.6 Összesítés:

A mérésről elmondható, hogy mind húzó-, mind nyomóvizsgálatok során az y-irányban nyomtatott próbatesteknél a szórások lényegesen nagyobbak voltak. Ez feltételezhetően a gyártási paraméterek nem megfelelőségére utal, ezért célszerű lenne az y irányú próbatestek vizsgálatát megismételni.

Az is tapasztalható, hogy mindkét irányban a nyomó rugalmassági modulus értékek lényegesen kisebb eredményeket adtak, mint a húzó rugalmassági modulusoknál. Ez arra utal, hogy az anyag jelentős mértékben porózus, így a tömítésként történő alkalmazása megkérdőjelezhető a beépíthetőséget is.

10. Összefoglalás:

Az additív gyártástechnológia manapság hatalmas fejlődést mutat. Ezt nagyon jól szimbolizálják a sokrétű gyártástechnológiák, valamint az újszerű anyagok. Ezek közé az anyagok közé sorolható a Soft PLA is.

A Soft PLA anyagi jellemzőiről szinte semmilyen információ nem elérhető, ezért céлом volt a méretezéshez szükséges anyagtörvények, anyagjellemzők meghatározása. Céлом részben sikeres volt, egy átható képet kaptam az anyag tulajdonságairól, nyomtatási feltételeiről. Azonban a mérések bebizonyították, hogy a nyomtatási paraméterek nagyban befolyásolják az anyagi jellemzőket. Kutatásom során is arra az eredményre jutottam, hogy érdemes lenne a méréseket újra elvégezni, hogy az eredmények reprodukálhatósága biztosított legyen.

A húzóvizsgálathoz a z pozícióban nyomtatott próbatesteket nem sikerült elkészíteni, mivel a próbatest minden esetben kihajlott. Ezért ez is fontos elemét kell képeznie a további vizsgálatoknak. Ennél a pozíciónál arra a következtetésre jutottunk, hogy jóval kisebb szabványos próbatestet kell alkalmazni a nyomtatáshoz. Ellenben ez magával vonzza azt a tényt is, hogy az összehasonlíthatóság érdekében az x és y irányban nyomtatott próbatesteket is újra ki kell nyomtatni, és újból meg kell vizsgálni már a 3 pozícióban előállított próbatestek anyagi jellemzőit. Ezt fontos célnak tűzöm ki a jövőre nézve.

Kutatásom célkitűzése az időfüggelten anyagi jellemzők vizsgálata volt. Azonban az anyag viselkedésének teljes megismeréséhez és jellemzéséhez szükséges lenne további vizsgálatok készítése is. Fontos lenne vizsgálni még az anyag kúszását és csillapítását is.

11. Hivatkozások:

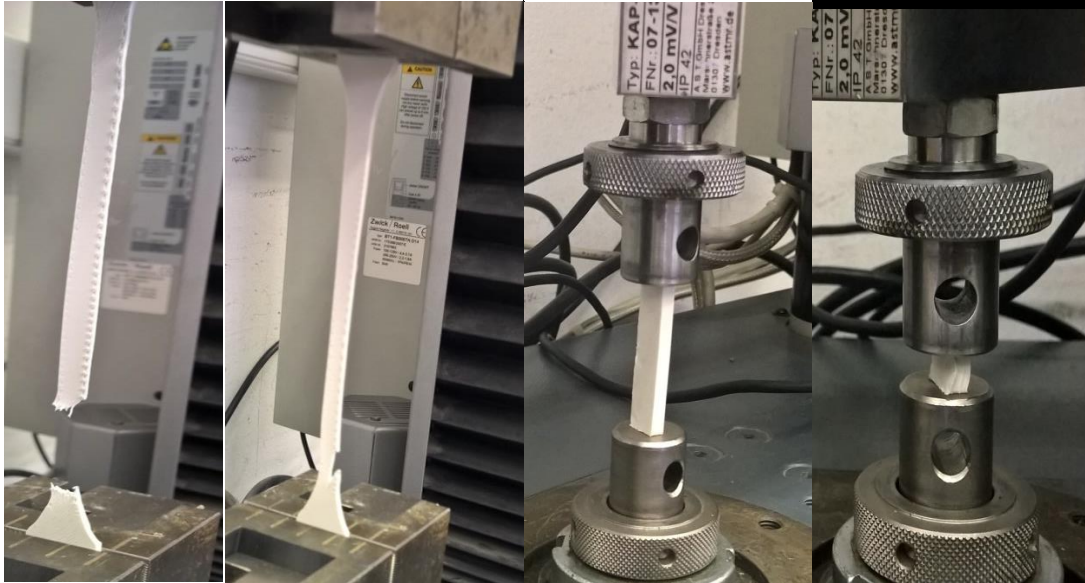
- [1] Takács János: Korszerű technológiák a felületi tulajdonságok alakításában, MűegyetemKiadó, Budapest, ISBN 963-420-789-8, 2004
- [2] Keszte R: Korszerű járműgyártás technológiák OMFB TEP tanulmány, Budapest, 2000
- [3] Takács János: Gyártásautomatizálás, Typotex Kiadó, ISBN 978-963-279-630-7, 2012
- [4] Székely B.: Tehergépjármű sebességváltó alkatrész gyártása acélból precíziós öntéssel
- [5] Herczeg Szabolcs: Gyors prototípusgyártás feltételrendszerének kidolgozása lézeres szinterezéshez és az Fe-Ni-Cu(P) alapú modellek tulajdonságainak vizsgálata, doktori értekezés, Budapest, 2006
- [6] Falk György, Gyors prototípusgyártás lehetőségei. Műanyagipari szimpózium, Budapest, 2000
- [7] Ficzer Péter: Gyors prototípus numerikus és kísérleti szilárdsági analízise, doktori értekezés, Budapest, 2014
- [8] <http://basiliskus.hu/3d-technologia-tortenet/> (2017.08.24.)
- [9] Composites Part B: 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective Xin Wang, Man Jiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou, David Hui, 2016
- [10] http://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Hephestos#Technical_specifications (2017.08. 24.)
- [11] Dr. Tamás, Péter, Bojtos, Attila, Décsei-Paróczy, Annamária, és Dr. Fekete, Róbert Tamás: Végeelem módszerek, BME MOGI, Budapest, ISBN 978-963-313-145-9, 2014
- [12] Devecz János: Járműtervezés és vizsgálat alapjai, BME KJK, TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018, Budapest, 2011
- [13] Sánta Imre: Különleges lézersugaras technológiák, EDUTUS Főiskola, Készült a TAMOP-4.1.2.A/2-10/1 pályázati projekt keretében, 2012
- [14] Szakács Hajnalka: Műanyag kompozitok. A digitális tananyag a Pannon Egyetemen a TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0012 projekt keretében az Európai Szociális Alap támogatásával készült, 2012
- [15] P. Dubois, M. Murariu, The “green” challenge: high-performance PLA (nano) composites, JEC Compos. Mag. 45 (2008) 66–69.
- [16] K. Van de Velde, P. Kiekens Polymer Testing 2002, 21, 433–442
- [17] Marius Murariu, Philippe Dubois: PLA composites: From production to properties Advanced Drug Delivery Reviews 107 (2016) 17–46
- [18] Jeremy Hughes, Ron Thomas, Youngjae Byun, Scott Whiteside Improved flexibility of thermally stable poly-lactic acid (PLA) Carbohydrate Polymers 88 (2012) 165–172
- [19] M.P. Arrieta, J. López, D. López, J.M. Kenny, L. Peponi: Effect of chitosan and catechin addition on the structural, thermal, mechanical and disintegration properties of plasticized electrospun PLA-PHB biocomposites Polymer Degradation and Stability 132 (2016) 145-156
- [20] <https://3dee.hu/> (2017.08.24.)
- [21] https://www.hwsz.hu/hirek/37203/object_alaris_30_3d_polyjet_photopolymer_printer_nyomtato.html 2017.10.22

[22] Szakács Hajnalka, Varga Csilla, Nagy Roland: Polimerek mérés technikája a Pannon Egyetemen a TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0012 projekt keretében az Európai Szociális Alap támogatásával készült, 2012

[23] Kovács Norbert Krisztián: Prototípus fröccsentő szerszámozás technológiájának fejlesztése, doktori értekezés, Budapest, 2014

12. Mellékletek:

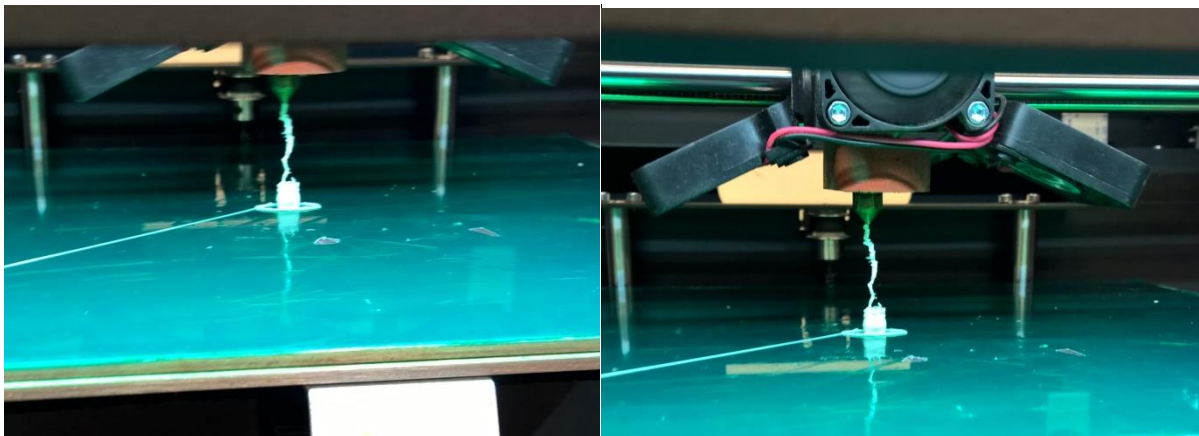
Fogalmak	Meghatározás
Vizsgálati sebesség	A vizsgálat során a vizsgáló berendezés befogópofáinak közeledési, vagy távolodási sebessége, attól függően, hogy nyomó- vagy húzóvizsgálatról beszélünk; mértékegysége: mm/perc
Nyúlás	Húzóvizsgálat során a próbatest kontrahál, keresztmetszete csökken, ezzel egyidejűleg az anyag állandóság következtében a vizsgált terület hossza nő. Ezt a hossz kivonva az eredeti hosszából, majd az egészet leosztva az eredeti hosszal megkapjuk a nyúlás értékét. Megadása történhet dimenzió nélküli viszonzszámként, vagy %-ban.
Húzófeszültség	Egytengelyű húzóerő kifejtése a próbatestre. A húzóerő és az eredeti vizsgált keresztmetszet hányadosa megadja a húzófeszültséget, amit a próbatest bármely adott időpillanatban elvisel. Mértékegysége: MPa.
Folyáshatár	Az a feszültségállapot, aminél a nyúlás a feszültség növekedése nélkül növekszik. Ez kisebb lehet, mint az elérhető legnagyobb feszültség. Mértékegysége: MPa
Húzószilárdság	Az a legnagyobb húzófeszültség, amelyet a próbatest a húzás során elvisel Mértékegysége: MPa
Szakítószilárdság	Az a húzófeszültség érték, ahol a szakítódiagramnak maximuma van. Mértékegysége: MPa
Nyúlás megfolyáskor	A folyáshatárnál mért megnyúlás. Dimenzió nélküli viszonzszámként, vagy %-ban adható meg.
Szakadási nyúlás	A szakítószilárdsághoz tartozó nyúlás. Az a nyúlás érték, ahol a próbatest elszakad. Dimenzió nélküli viszonzszámként, vagy %-ban adható meg.
Húzó rugalmassági modulus	Adott anyagra jellemző arányossági tényező, egy adott anyagnál jól meghatározható konstans érték, melynek mértékegysége MPa.
Nyomófeszültség	Egytengelyű nyomóerő kifejtése a próbatestre. A nyomóerő és az eredeti vizsgált keresztmetszet hányadosa megadja a húzófeszültséget, amelyet a próbatest elvisel; mértékegysége: MPa
Nyomófeszültség megfolyáskor	Az a feszültség, ahol az alakváltozás a feszültség növekedése nélkül nő, ez kisebb lehet, mint az elérhető legnagyobb feszültség
Nyomószilárdság	Az a nyomófeszültség érték, ahol a nyomó diagramnak maximuma van. Mértékegysége: MPa
Nyomófeszültség töréskor	Az a nyomófeszültség, amelynél a próbatest eltörik
Nyomási alakváltozás	A próbatest eredeti hosszára vonatkoztatott hosszúság csökkenés. Dimenzió nélküli viszonzszámként vagy %-os értéke adható meg.
Nyomási modulus	Adott anyagra jellemző arányossági tényező, egy adott anyagnál jól meghatározható konstans érték, melynek mértékegysége MPa.



51. ábra: A vizsgálatok során készült fotók

A bal szélső képen látható, hogy mindkét oldalon elkezdődött a szakadással járó kontrahálás, majd végül alul szakadt el a húzó próbatest.

Balról a harmadik fotón megállapítható, hogy a próbatest a két befogó pofa között ferden áll. A jobb szélső ábrán megfigyelhető, hogy a nyomó próbatest kezd kihajolni.



52. ábra: A z irányú pozícióban nyomtatott próbatest

A képeken láthatók, hogy a z pozícióban nyomtatott próbatest nyomtatása során nem volt képes a réteg az előzőhöz épülni, így a további építkezés meghiúsult.