

DIPLOMAMUNKA

Név: Kecső Sándor
Szak: Gépészmérnök

Gödöllő
2023.



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Gépészmérnök Szak

**Generatív tervezett és topológiai optimalizált alkatrész 3D
nyomtatása során alkalmazott technológiai paraméterek hatása
a kész szerkezetre**

Belső konzulens: Dr. Szakál Zoltán
egyetemi docens

Készítette: **Kecső Sándor**
A0LU11
nappali tagozat

Intézet/Tanszék: **Műszaki Intézet**

Gödöllő
2023.

MŰSZAKI INTÉZET
GÉPÉSZMÉRNÖK MESTERSZAK
Műszaki fejlesztő specializáció

DIPLOMADOLGOZAT
feladatlap

Kecső Sándor (A0LUII)

részére

A diplomadolgozat címe:

**Generatív tervezett és topológiai optimalizált alkatrész 3D nyomtatása során alkalmazott
technológiai paraméterek hatása a kész szerkezetre**

Feladatkiírás:

Bevezetés, szakirodalom feldolgozás, feladatismertetés, generatív tervezés és topológiai optimalizáció, végelem szimuláció, rajzdokumentáció elkészítése, 3D nyomtatás, roncsolásos anyagvizsgálat, anyagvizsgálati eredmények feldolgozása és konklúziók levonása, összefoglalás.

Közreműködő tanszék: Gépszerkezettani Tanszék


Külső konzulens:

Belső konzulens: Dr. Szakál Zoltán egyetemi docens, MATE, Műszaki Intézet

A dolgozat beadási határideje: 2023. év 11. hó 06. nap

Kelt: Gödöllő, 2023. év 10. hó 25. nap

Jóváhagyom

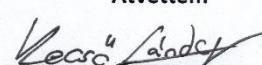


(tanszékvezető)



(szakfelelős)

Átvettem



(hallgató)

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Kelt: Gödöllő, 2023. év 10. hó 25. nap

(külső konzulens)

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés.....	6
2.	Szakirodalom feldolgozás	8
2.1.	Bevezető a 3D nyomtatásról.....	8
2.2.	3D nyomtatási technológiák	9
2.3.	FDM 3D nyomtatási technológia	10
2.3.1.	Cartesian típusú FDM nyomtató	11
2.3.2.	Polárkoordinátás típusú FDM nyomtató	12
2.3.3.	Delta koordináta típusú FDM nyomtató.....	12
2.3.4.	Robotkart használó FDM nyomtató	13
2.3.5.	Futószalagos FDM nyomtató	14
2.3.6.	Kompozit anyagok nyomtatása	15
2.4.	Az additív megmunkálásban alkalmazott alapanyagok.....	16
2.4.1.	Szilárd halmazállapotú alapanyagok.....	17
2.4.2.	Folyékony halmazállapotú alapanyagok	17
2.4.3.	Kompozit alapanyagok.....	20
2.5.	3D nyomtatásban alkalmazott fúvókák hatásai a kész termékre	22
2.5.1.	A fúvóka keresztmetszetének és az alkalmazott rétegvastagság kapcsolata.....	23
2.5.2.	A fúvóka átmérőjének hatása a mechanikai paraméterekre polimer esetén.....	25
2.5.3.	A fúvóka anyagának hatása.....	27
2.5.4.	Fúvóka fűtési zóna hosszának hatása a nyomtatás során	30
2.6.	Generatív tervezés és topológiai optimalizáció	32
2.6.1.	Különbség a generatív tervezés és a topológiai optimalizáció között.....	33
2.6.2.	Generatív tervezés folyamata	34
2.6.3.	Generatív tervezés előnyei és hátrányai	37
2.7.	Konzekvencia	38
3.	Célkitűzés	39

4.	Tervezés-, szimuláció-, kísérlet és megvalósítás	40
4.1.	Tervezés.....	40
4.1.1.	Generatív tervezés – Tartókonzol	40
4.1.2.	Topológiai optimalizáció.....	45
4.1.3.	Végelem szimuláció – a generatív tervezett tartó konzol	49
4.2.3.	Végelem szimuláció – a teljes szerkezet.....	54
4.1.5.	Végelem szimuláció a teljes szerkezetre - végső eredmények kiértékelése és konklúzió... ..	58
4.1.6.	Additív-, és Szubtraktív gyártástechnológiával elérhető eredmény összehasonlítása.....	59
4.2.	Megvalósítás – 3D nyomtatás.....	61
4.2.1.	Slicer szoftver beállítások.....	62
4.2.2	3D nyomtatás – Generatív tartó konzol.....	63
4.2.3.	3D nyomtatás – Topológiai optimalizált lap	65
4.2.4.	3D nyomtatás – Topológiai optimalizált lap	67
4.3.	Mechanikai kísérlet.....	68
4.3.1.	Generatív tervezett konzolon végzett kompressziós vizsgálat folyamatának átfogó bemutatása egy próbatesten keresztül	70
4.3.3.	Topológiai optimalizált tartó lap kompressziós vizsgálata	76
4.4.	A kísérletek alapján levonható konzekvencia	78
5.	Összefoglalás.....	79
6.	Summary	81
7.	Irodalomjegyzék.....	82
8.	Mellékletek jegyzéke.....	86

1. Bevezetés

A diplomamunkám szakirodalom feldolgozásában ismertetem az additív gyártás fő technológiáját, a 3D nyomtatást. Röviden ismertetem a 3D nyomtatás fő elvi alapjait, különböző típusait, azon belül is külön kitérek az FDM – huzalleolvasztásos – nyomtatási technológiára és annak kialakításaira. Mindezek után kifejtem a kompozit 3D nyomtatás technológiáját, szintén FDM technológia esetében. A következő nagyobb fejezet a 3D nyomtatás során alkalmazott különböző halmazállapotú anyagok típusainak és felhasználási lehetőségeiről fog tárgyalni, beleértve a különböző kompozit anyagokat is. A szakirodalom feldolgozás törzsanyaga a különböző technológiai paraméterek – főként az FDM technológia során alkalmazott fúvókák – hatásának vizsgálata és értékelése különböző tanulmányok alapján a mechanikai paraméterekre. A főbb vizsgált állomások:

- Fúvóka keresztmetszetének és az alkalmazott rétegvastagság kapcsolata
- Fúvóka átmérőjének hatása a mechanikai paraméterekre
- Fúvóka anyagának hatása a technológiai és mechanikai paraméterekre
- Fúvóka fűtési zóna hosszának hatása a mechanikai paraméterekre

A szakirodalom kidolgozása során kitértek a 3D nyomtatási technológia előnyeit kihasználó leginnovatívabb tervezési technológiákra, a generatív tervezésre és a topológiai optimalizációra. Ismertetem a generatív tervezés és a topológiai optimalizáció közötti eltéréseket, kapcsolatot, valamint egy példán keresztül bemutatom a generatív tervezés fő tervezési folyamatait, állomásait, előnyeit és hátrányait.

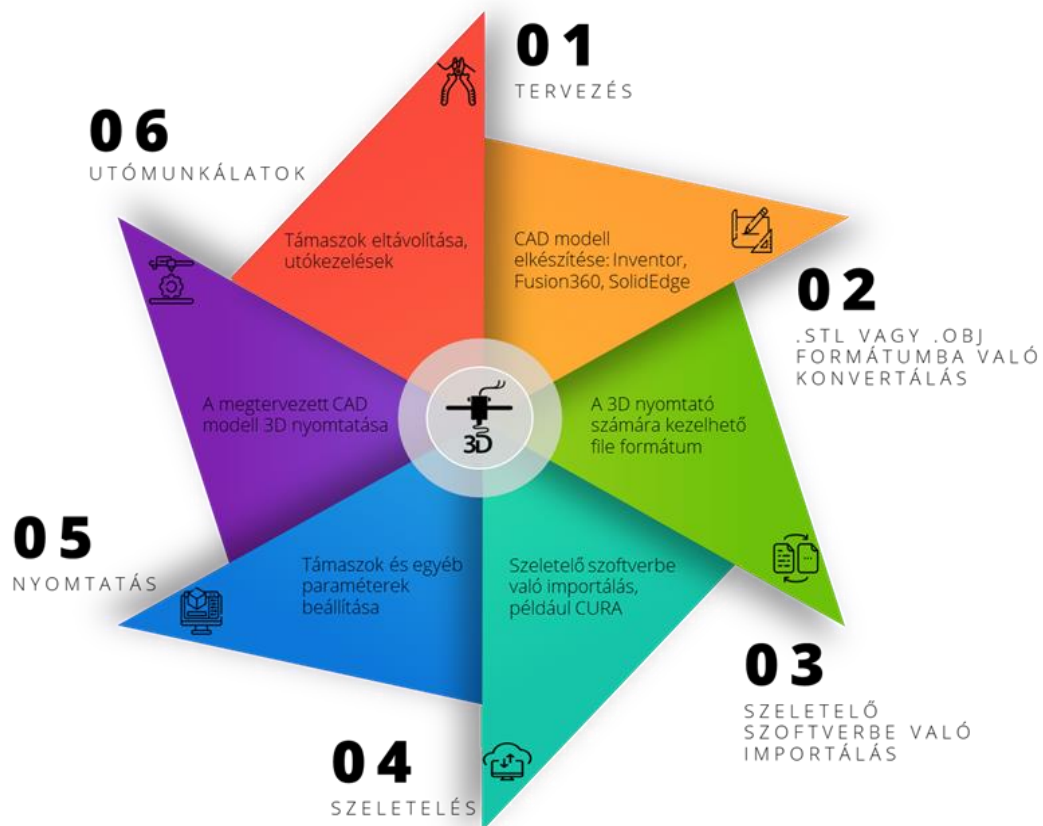
A saját munka során tervezési-, kísérleti és megvalósítási munkákat is fogok végezni. A tervezési fejezetben ismertetem az általam használt tervezőprogramokat és a velük kiaknázható lehetőségeket. Tüzetesen be fogom mutatni a különböző innovatív tervezési technológiákkal (topológiai optimalizáció, generatív tervezés) végzett munkálatok menetét és azok végeselem szimulációs ellenőrzési lehetőségeit. Mindezek után ismertetni fogom, hogy a hagyományos tervezési és gyártástechnológiai eljárásokhoz képest, milyen eredményeket, előnyöket értem el a fent említett eljárások lévén. A megvalósítási részegységben bemutatom az általam tervezett generatív tervezett konzol, illetve topológiai optimalizációval tervezett tartó lap 3D nyomtatása során alkalmazott slicer – szeletelő – szoftverek paramétereinek beállítását, az alkalmazott FDM nyomtatók nyomtatás előtti teendőit és természetesen a nyomtatás munkafolyamatát.

Végezetül, az utolsó fejezetben ismertetem a különböző típusú fűvókákkal nyomtatott generatív tervezett tartó konzol roncsolásos anyagvizsgálatán (kompressziós vizsgálat) keresztül ezek mechanikai jellemzőit, majd ebből megállapítom, hogy a rendelkezésre álló feltételek mellett mely fűvóka átmérő eredményezi a legkedvezőbb szilárdsági paraméterekkel rendelkező tartó konzolt. Ezek mellett elvégzem a topológiai optimalizációval tervezett tartó lap roncsolásos kompresszió vizsgálatát is és ezen tervezési technológia által elérhető eredményeket.

2. Szakirodalom feldolgozás

2.1. Bevezető a 3D nyomtatásról

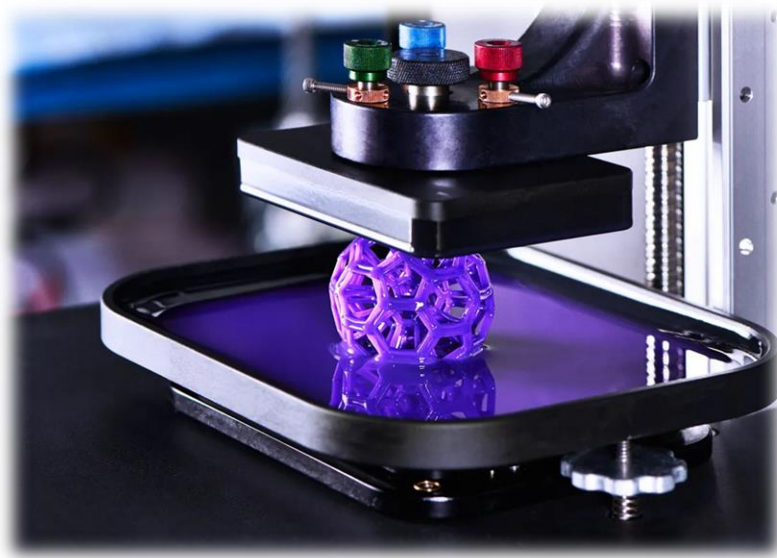
A 3D nyomtatás egy olyan additív gyártástechnológia, mely során egy CAD programban megalkotott modelltől (nagy általánosságban: „.stl” vagy „.obj” kiterjesztésben), számítógép által vezérelve (legtöbb esetben az úgynevezett „G-kód” lévén) a nyomtatásra felhasznált anyagot, vagy anyagokat jellemzően egymásra – rétegről-rétegre – felhelyezve „kinyomtatjuk” a már említett CAD szoftverben megtervezett munkadarabot (En.Wiki1., 2023) (András, 2014). Mindazonáltal, hogy a 3D-s CAD fileből egy kézzel fogható kinyomtatott modell legyen, számos komplex feladatot kell végrehajtani, melynek a menetét a következő ábra [2.1.1. ábra] szemlélteti.



2.1.1. ábra A 3D nyomtatás munkafolyamatai

A 3D nyomtatási technológiának számos előnnyel rendelkezik. Az egyik legkiemelkedőbb tulajdonsága, hogy a hagyományos technológiákkal szemben a prototípusgyártás területén mutatkozott meg leghamarabb. A technológia alkalmazásával jelentős költséget és időt takaríthatunk meg.

Továbbá, olyan összetett geometriák [2.1.2. ábra] elkészítésére vagyunk képesek, melyek a hagyományos szubtraktív gyártási eljárásokkal kifejezetten nehéz, vagy elképzelhetetlen lenne. (András, 2014)



2.1.2. ábra Komplex 3D nyomtatott modell (Bryce, 2015)

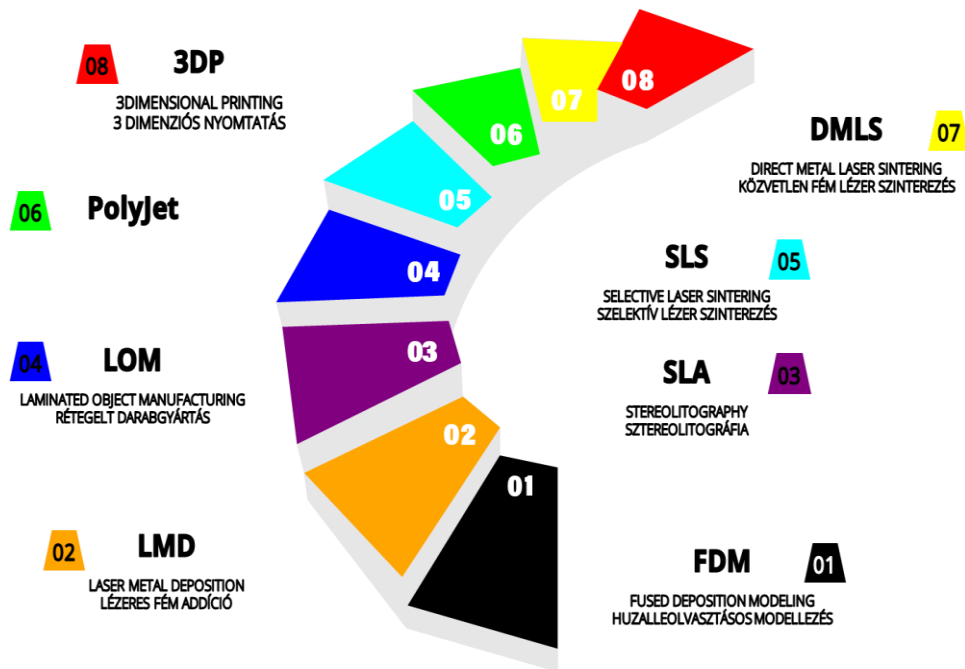
2.2. 3D nyomtatási technológiák

A 3D nyomtatásnak, az idővel számos fajtája alakult ki, melyek közül a legismertebben a következők [1.2.1. ábra]:

- FDM (Fused Deposition Modeling – Huzalleolvastásos modellezés)
- SLA (Stereolithography – Lézeres Sztereolitográfia)
- SLS (Selective Laser Sintering – Szelektív Lézer Szinterezés)
- DMLS (Direct Metal Laser Sintering – Közvetlen Fém Lézer Szinterezés)
- LMD (Laser Metal Deposition – Lézeres Fém Addíció)
- LOM (Laminated Object Manufacturing – Rétegelt Darabgyártás)
- PolyJet
- 3DP (3D Printing – 3D nyomtatás) (Alex, 2022.)

Ezen technológiákat megkülönböztető tulajdonságok a rétegépítés módozatában, illetve a munkadarab megépítéséhez használt anyagokban merül ki. A különböző technológiák a különböző kihívások megugrására hivatottak, ebből a konklúzió, hogy megvannak a maguk előnyei, illetve hátrányai. Fontos szempont egy nyomtatási technológia megválasztása előtt tisztában lenni, hogy az adott esetben mely opciók a mérvadóak.

Ilyenek kérdések lehetnek például a nyomtatási sebesség, megtámasztás, nyomtatott alapanyag fajtája, munkadarab anyagi komplexitása (például egyszerre több anyagfajta alkalmazása a nyomtatás során), nyomtatási pontosság, vagy a munkadarab mérete. (En.Wiki1., 2023) (András, 2014) (Dudek, 2013).



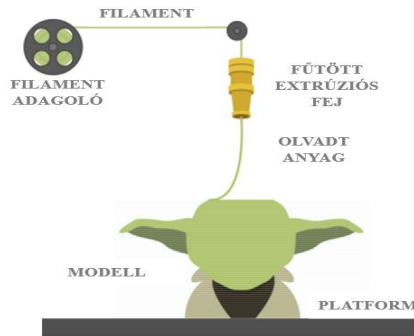
2.2.1. ábra Elterjedtebb alkalmazott 3D nyomtatási technológiák

2.3. FDM 3D nyomtatási technológia

Diplomamunkám során főként az FDM típusú nyomtatási technológiával fogok dolgozni, ezért szeretném most kicsit tüzetesebben is bemutatni ezt a technológiát. Napjainkban kijelenthető, hogy ez az egyik legszélesebb körben alkalmazott 3D nyomtatási technológia. Ennek számos oka van, de főként az egyszerű üzemeltetése és viszonylagos olcsó kialakítása vezette jelenleg is elfoglalt pozíciójába. Ennek eredményeképpen rengeteg cég kutat és fejleszt ebben a témakörben, ezáltal rengeteg kialakítás áll rendelkezésre az FDM nyomtatással foglalkozni vágyó szakemberek számára.

A huzalleolvastásos vagy ömledékrétegezéses módszert 1989-ben Scott Crump szabadalmaztatta. A módszer lényege, hogy az úgynevezett „filament” alapanyag szálal anyag formában kerül a gépbe. Ezt a filamentet egy legördülő platform segítségével egy fűtött extruder fejbe juttatja, ahol a filament szál megolvad és a fűvókát szabályzott térfogatáramú olvadék formájában elhagyja, majd a megkívánt geometriának megfelelően újra szilárdává válik (András, 2014). [2.3.1. ábra]

A nyomtató a már említett „G-kód” vezérlésével így előre meghatározott rétegvastagsággal (mely az FDM nyomtató esetében 0,05mm és 0,4mm közé tehető általános esetben) rétegről-rétegre alakítja ki a CAD szoftverben megtervezett modellt. (András, 2014) (Dudek, 2013) (O'Neill, 2022).

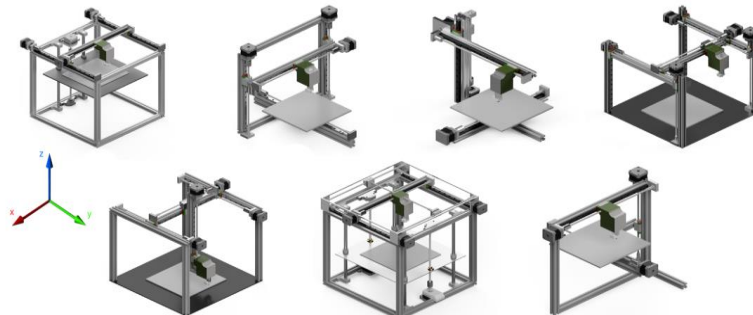


2.3.1. ábra FDM nyomtatás elvi működése (András, 2014)

Az huzalleolvasztásos nyomtatási technológia keretében belül is számos, különböző kialakítással találkozhatunk, melyek különböző eredmények elérését célozzák meg. Ilyen lehet a cartesian-, a polárkoordinátás-, a delta koordinátás-, a hibrid-, illetve a robotkarokat használó FDM nyomtató típusok (András, 2014).

2.3.1. Cartesian típusú FDM nyomtató

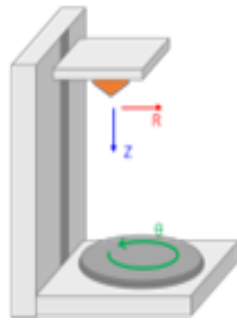
A piacon meglévő legelterjedtebb 3D nyomtató típus. A konstrukció a matematikából is jól ismert derékszögű koordináta-rendszeren alapszik. A nyomtatófej elmozdulása gyártótól függően X és Y tengely mentén történik, míg a Z irányú elmozdulásért a nyomtatóasztal lesz a felelős, habár tapasztalatok alapján a legjobb minőséget akkor érhetjük el, ha az X –, Y –, Z – irányú elmozdulást a nyomtatófej végzi, míg az asztal mozdulatlan (O'Neill, 2022) [2.3.1.1. ábra].



2.3.1.1. ábra Cartesian típusú FDM nyomtató kialakítás (Ekaterina Kopets, 2022)

2.3.2. Polárkoordinátás típusú FDM nyomtató

A polárkoordinátás huzalleolvasztásos nyomtatótípus nevéből eredően, egy polárkoordináta rendszerben dolgozik [2.3.2.1. ábra]. Ez a technológia kör alakú rácson lévő pontokat írnak le, melyeket nem az X -, Y -, Z - tengelyek, hanem a szögek és a hosszúságok határoznak meg. Ennek következtében a működés úgy írható le, hogy a nyomtatóasztal egy időben forog és mozog is, miközben az extruder fej alternáló fel-le mozgást végez a nyomtatás során.

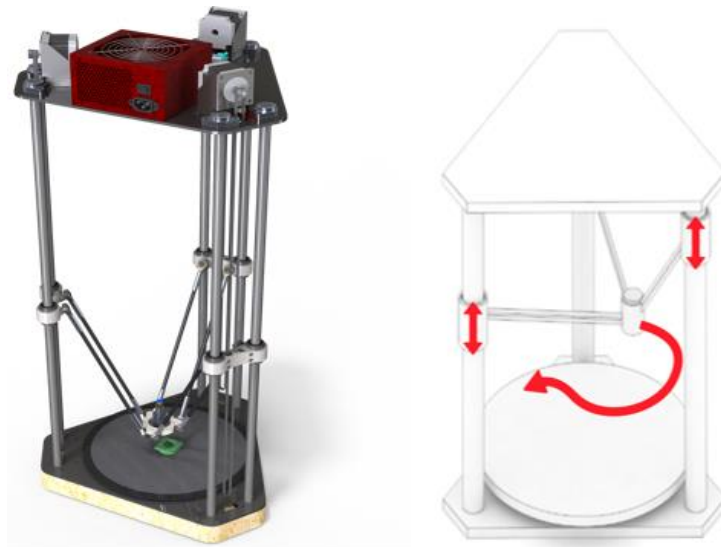


2.3.2.1. ábra Polár-koordinátás FDM nyomtató kinematikája (hpeasystart, 2023)

Előnye a Cartesian típussal szemben, hogy a legalább 3 helyett csak 2 motorra van szükség a nyomtatáshoz. A nagyobb energiahatékonyság mellett nagyobb testek elkészítésére képes, miközben jelentősen kevesebb helyet vesz igénybe. Előnyei mellett azonban jelentős hibája, hogy működési elvéből adódóan a nyomtatási pontossága nem következetes. Ez azt jelenti, hogy miközben körbe forognak sokkal nagyobb a pontosság a középponthoz közelebb eső részekben, mint az attól távolabb esőknél. (hpeasystart, 2023)

2.3.3. Delta koordináta típusú FDM nyomtató

Napjainkban az egyik leggyorsabban terjeszkedő kialakítás. Alapja a Descartes-koordináta rendszer. Kialakítását tekintve, asztallapja fix, kör alakú, míg az extrudert három darab háromszögalakú pontban rögzítenek, mely minden irányba képes így elmozdulni. [2.3.3.1. ábra] A gyártási korlátok egyedül az alaplap méretétől, illetve a karok magasságától függ (magasabb munkaterületet igényel ugyan azon alkatrész elkészítéséhez képest, mint vetélytársai). Egyik nagy előnye, hogy a többi kialakításhoz képest gyorsabb, illetve átméréthezők, miközben a minőséget ez nem befolyásolja. (hpeasystart, 2023) (Tractarus3d, 2023)



2.3.2.2.1. ábra Delta koordinátás FDM nyomtató koncepciója (Tractarus3d, 2023)

2.3.4. Robotkart használó FDM nyomtató

Napjainkban is fejlesztés alatt álló koncepció a robotkarokat használó FDM nyomtatási technológia. Jellemzően ezek nem hobbi felhasználásra hivatottak, hanem ipari célokra. A 3D nyomtatásra használt robotkarok főleg az építészetben lelhetőek fel, ahol különböző épületek úgynevezett „nyomtatására” használják. (Kauppila, 2023) [2.3.4.1. ábra]



2.3.3.1. ábra 3D nyomtatásban alkalmazott robotkar (Kauppila, 2023)

Mindazonáltal olvashatunk bizonyos vállalatok számos olyan törekvéséről, melyek ezen kialakítás hobbi verzióját hivatott elkészíteni. Hatalmas előnye lenne, hogy ezen kialakítás esetében nincs a folyamat nyomólemezzel rögzítve, így sokkal mobilisabb, továbbá a nyomtatófej mobilitásának köszönhetően meglehetősen komplex formák készíthetőek el, habár a végleges nyomtatási minőség még mindig messze elmarad a már említett koncepciókéhoz képest. (Kauppila, 2023)

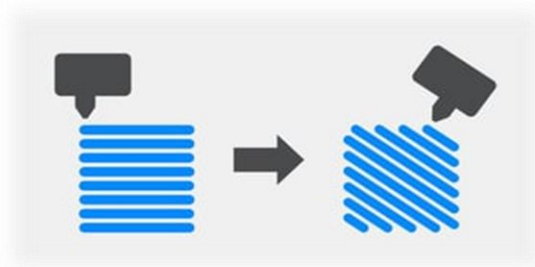
2.3.5. Futószalagos FDM nyomtató

Napjainkhoz mérten friss technológiai vívmánya az FDM nyomtatók között az úgynevezett „Belt FDM Printer”, másnéven „futószalagos” huzalleolvasztásos 3D nyomtató. [2.3.5.1. ábra].



2.3.5.1. ábra Futószalagos FDM nyomtató kialakítása (O'Connell, 2022.)

Első generációja 2017-ben jelent meg. Érdekessége, hogy megfelelő helyzeteket biztosítva, vízszintes irányzatban akár a „végtelenségig” is nyomtathatunk. Kialakítása két jellemzőben is eltér a már általunk megszokott FDM nyomtatókétól. Egyrészt a fűvóka szögben helyezkedik el [2.3.5.2. ábra], továbbá az ágyazat helyén egy futószalag foglal helyet. Mindazonáltal elméletben a fűvóka bármilyen helyzetet felvehet, de az eddig általánosan elterjedt kivitelekben derékszög koordinátás XY mozgásrendszert alkalmaznak, míg a futószalag Z irányban mozog. (O'Connell, 2022.)



2.3.5.2. ábra A szokványos 3D nyomtatás technológiája (balra) a futószalagos nyomtatási technológiához (jobbra) képest (O'Connell, 2022.)

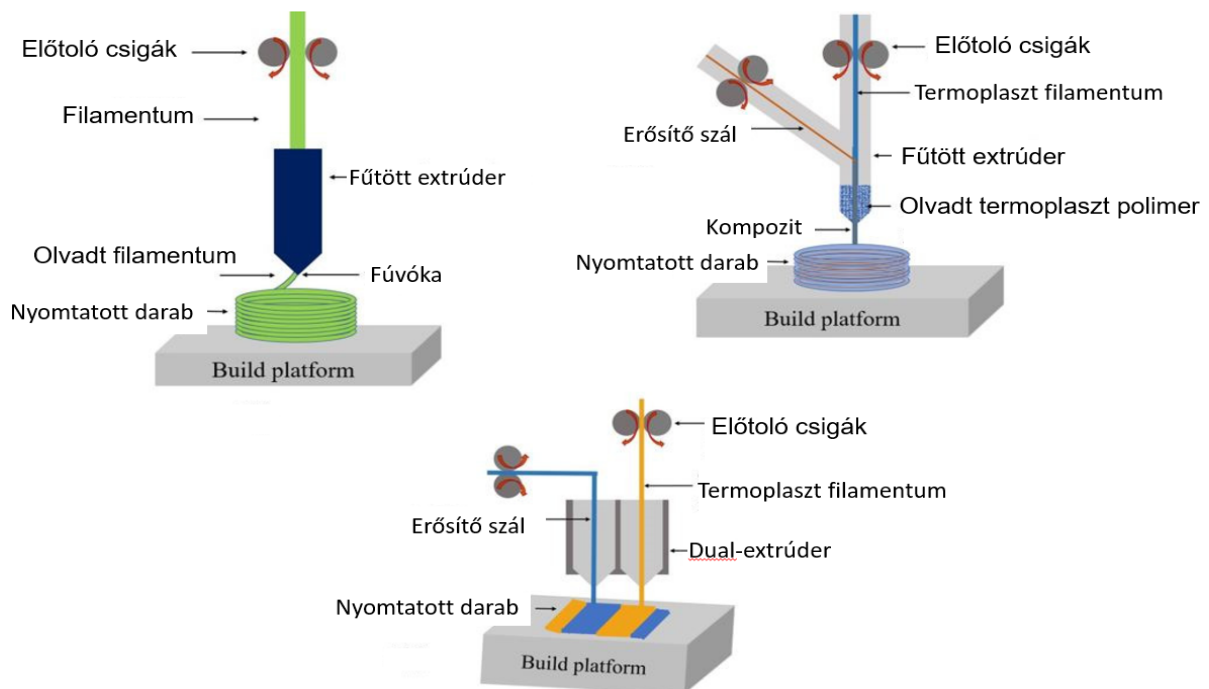
A technológia előnye, hogy a nyomtatási terébe beleférő alkatrészek tömeggyártására képesek, míg a nyomtatás során a futószalagról lekerülnek a lenyomatok. Erre két lehetőség van: Automatikusan eltávolítjuk az alkalmazott módszer során, vagy természetesen leválnak az adott alkatrész nyomtatási periódusa végén. Hátránya, hogy jelenleg a teljes ágyazat fűtése megoldatlan, illetve a nagy nyomtatási sebesség nem fenntartható. (O'Connell, 2022.)

2.3.6. Kompozit anyagok nyomtatása

A kompozitok legáltalánosabb nyomtatási eljárásai közé tartozik a már ismertetett FDM additív gyártási technológia. Mint már tudjuk, az FDM technológia alapanyaga általános filament formájában alkalmazott. Jelen fejezet a FDM kompozit nyomtatási technológiára fókuszál.

Az FDM kompozit nyomtatási technológiák között 3 típust különböztetünk meg [2.3.6.1. ábra], melyek alap koncepcióban nem, csak az extrúder típusban különböznek. Ezen típusok angol megnevezése a következő:

- Single/Standard Extrusion head
- Co – Extrusion head
- Dual – Extrusion head (Sachini Wickramasinghe, 2020)



2.3.6.1. ábra Különböző FDM extrúder kialakítások kompozit anyagok nyomtatására (Sachini Wickramasinghe, 2020)

Co – Extrusion head technológia:

A technológia lényege, hogy az erősítő szál és a termoplaszt filamentum külön úton érkezik a nyomtatófejhez [2.3.6.1. ábra]. A polimer a fűtött extrúderen keresztül menve megolvad, majd, amikor az erősítő szál áthalad a fúvókán, akkor ebbe a megolvadt termoplaszt polimerbe impregnálódik. Miután ez a kompozit a fúvókán keresztül kiáramlik és a nyomtató asztalra érkezik, az előző réteghez tapad és megszilárdul. (Sachini Wickramasinghe, 2020)

Dual – Extrusion head technológia:

Az egyik leggyakrabban alkalmazott FDM kompozit nyomtatási koncepció, az úgynevezett folytonos szálakkal kombinált alapanyagból készült kompozitok dual-extrusion head típusú nyomtatási technológia. Ennek a kialakításnak a lényege, hogy a nyomtatás közben hőre lágyuló mátrixokká fűzhetőek-, szőhetőek a nyomtatás folyamata közben.

Ezen kompozit nyomtatásához 2 fűvókára van szükség, melyek közül az egyik a termoplaszt műanyagot adagolja, míg a másik fűvóka a folytonos szálakat osztja el. [2.3.6.1. ábra]. (Ye, 2021.) (Hui Mei, 2019.)

2.4. Az additív megmunkálásban alkalmazott alapanyagok

A 3D nyomtatás során alkalmazott alapanyagok palettája kifejezetten széleskörűnek mondható. Gyakorlatilag minden anyag a 3D nyomtatás alapanyagaként szolgálhat, mely a nyomtatási technológia lefolyása alatt egymáshoz képes kötődni és képes az általunk elvárt forma biztonságos és elvárt tűréshatáron belüli méretmegtartására. (En.Wiki1., 2023) (András, 2014)

Az anyagok csoportosítása több szempontból is vizsgálható. Az alábbi fejezetben, különböző csoportosítási terminológiák szerint bemutatom az additív gyártás során alkalmazott anyagféleségeket. Halmazállapot szerint megkülönböztetünk:

- Szilárd: huzal, pellet, por
- Folyékony: gyanta, olvadék

A megfelelő anyag kiválasztása a nyomtató technológia megválasztása mellett az egyik legfontosabb jellemzője a 3D nyomtatásnak, mivel kihatással van a kész termék különböző technológiai (forgácsolhatóság, hegeszthetőség, ragaszthatóság stb.) és mechanikai tulajdonságaira (szakítószilárdság, kopásállóság, hővel-, illetve maró közeggel szembeni ellenállóság stb.). (András, 2014)

2.4.1. Szilárd halmazállapotú alapanyagok

Szilárd halmazállapotú félkész termékek esetében tisztázni kell, hogy gyakorlatilag minden anyag nyomtatható, amely por állapotú félkésztermékké alakítható. Ilyen szilárd halmazállapotú félkésztermék alapanyag lehet [2.4.1.1. ábra]:

- **Polimer** – ABS, PLA, PETG, TPU, PA, TPE, PP
- **Fém** – Szerszám és martenzites acélok, Alumínium ötvözetek, Rézötvözetek, Titán ötvözetek, Arany, Platina, Palládium, Ezüst, Rozsdamentes acélok
- **Kompozit** – Szénszálas-, Üvegszálas-, Kevlár- erősítéses kompozitok
- **Kerámia** – Üveg, Gyémánt, Alumínium-oxid (Alumina), Cirkónium-oxid (Cirkónia), Szilikon-karbid, Szilikon-nitrid
- **Élelmiszer** – Por félkésztermékállapot
- **Szerves anyag** – Csont, (Emberi) bőr, Fa (Formlabs, 2023) (Toure, 2021) (Carolo, 2023)



2.4.1.1. ábra Szilárd halmazállapotú alapanyagok

2.4.2. Folyékony halmazállapotú alapanyagok

Folyékony halmazállapotú félkésztermék esetében fő alapanyagcsoportjaként az úgynevezett „gyanta” vagy más néven folyékony fotopolimer szolgál [2.4.2.2. ábra]. A gyanta késztermékké való szilárdulásához az oligomerek sugárzással iniciált térhálós polimerizációjára van szükség. Számos típus létezik a fotopolimer gyanták családjában, melyek közül a kiemelkedőbb fajtákat ismertetem az alábbiakban:

- Általános gyanta:

Leggyakrabban alkalmazott típus. Ennek fő okai: a használatával elérhető kiváló minőség, a magas részletgazdagság, illetve a megfizethetőség. Jellemzője, hogy funkcionális alkatrészek gyártására alkalmatlan, minimális ütésállósággal rendelkezik és kis erőfeszítéssel törik. A piac rendkívül tág színpalettával rendelkezik. [2.4.2.1. ábra] (Dwamena, 2021)

- Tiszta gyanta:

Szintén kedvelt gyanta típus. Igazából az általános gyanta fajtájába lehetne sorolni, de színvilága egy külön besorolást érdemel. Jellemzői a kiváló felületkezelés, a vízállóság és a kiváló felületi minőség. Negatívuma, hogy a tisztasága a munkadarabnak idővel romolhat, ha tartó UV-sugárzásnak van kitéve. [2.4.2.1. ábra] (Dwamena, 2021)

- Kemény gyanta:

Ezt a típusú gyantát leginkább az ABS-hoz lehetne hasonlítani. Kiváló ütés és törésállósággal rendelkezik, miközben rendkívül tartós. Magas kopással szembeni ellenállással rendelkezik. Kifejezetten ajánlott – nem vékony falú – mechanikus alkatrészek alapanyagaként. [2.4.2.1. ábra] (Dwamena, 2021)

- Rugalmas gyanta:

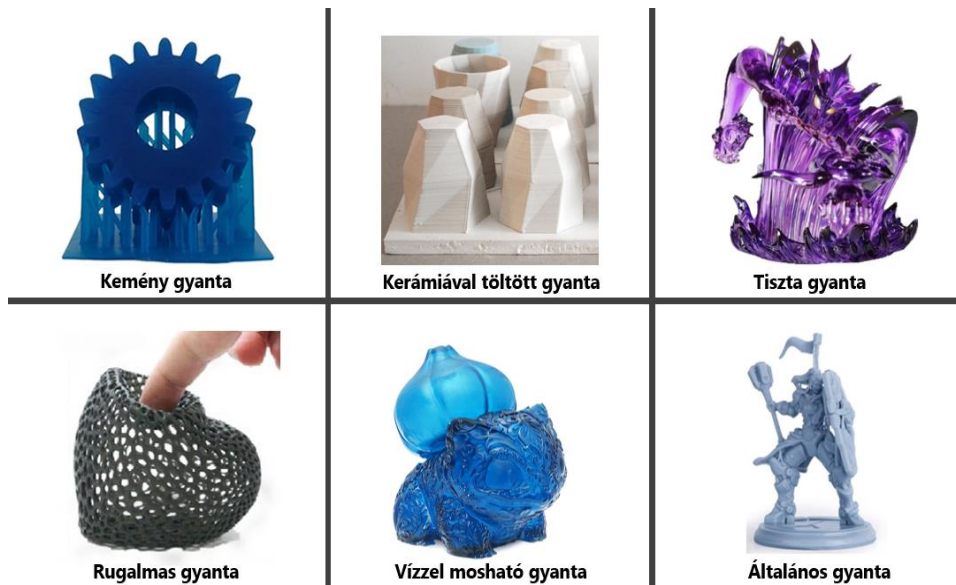
Gumiszerű tulajdonságokkal rendelkezik. Képes olyan alkatrészek anyagaként szolgálni, melyeknek követelménye a nagyfokú rugalmasság, a magas szilárdság mellett. Ütésállósága magas, viszont kerülendő a vékony falvastagságú modellek nyomtatása vele. A nyomtatás viszonylag körülményesebb vele, mint a társaival, illetve jól megtervezett tartószerkezetet igényel. [2.4.2.1. ábra] (Dwamena, 2021)

- Vízrel mosható gyanta:

Ezen típus különlegessége – nevéből fakadóan – hogy vízzel mosható. Előnye, hogy a bonyolult izopropil-alkoholos utókezelés helyett vizes utókezelést is használhatunk. Az általános típusnál magasabb szilárdsággal rendelkezik. Mindazonáltal, még mindig óvatosan érdemes dolgozni vele, mivel eléggé törekeny a vizes utókezelés közbeni víz abszorpciója miatt. Előnye még, hogy könnyen festhető, megfízethető és rövid a szilárdulási ideje. [2.4.2.1. ábra] (Dwamena, 2021)

- Kerámiával töltött gyanta

A már említett kemény típusú gyantákhoz képest hatalmas előrelépésnek számít. Nevéből adódóan a gyanta kerámiával erősített, így rendkívül merev, szívós és sima felületű munkadarab készíthető belőle. Hőállósága és hőstabilitása jóval magasabb (egy átlagosan most a piacon megtalálható gyanta ~ 350 °C – on képes folyamatos munkavégzésre) a társaihoz képest. Hátránya az átlag alatti ütésállóság és törekenység. Kiválóan alkalmazhatóak finomszerkezetű alkatrészek alapanyagaként. [2.4.2.1. ábra] (Dwamena, 2021)



2.4.2.1. ábra Folyékony fotopolimerek főbb típusai

Ezen alapanyaggal karöltve a már említett SLA és DLP nyomtatási eljárással olyan prototípusokat és munkadarabokat hozhatunk létre, melyek esetében kifejezetten fontos a finom rétegvastagság (orvoslás, fogorvoslás, ékszerészet). (András, 2014)



2.4.2.2. ábra Folyékony halmazállapotú alapanyagok

Mindazonáltal, a fentebb ismertetett folyékony fotopolimerek mellett a következő (részben) folyékony anyagok is nyomtathatóak, a megfelelő nyomtatási technológia megválasztásával:

- **Fém** – Galliumötvözetek (elektromos áramkörök)
- **Élelmiszer** – Paszta, vagy félig folyékony állapotú élelmiszer (Carolo, 2023) (V. Sukhotskiy, 2023)

2.4.3. Kompozit alapanyagok

Kompozitoknak azokat az anyagtársításokat, többkomponensű anyagokat nevezzük, melyek legalább egy befoglaló anyagból és egy-, vagy több erősítő anyagból állnak, az alkotóik fázishatárokkal elválasztva egymástól élesen elkülönülnek. Célja ennek a típusú anyagtársításnak, hogy az alkotók hasznos tulajdonságát kiemelje, míg a káros tulajdonságokat a lehető legnagyobb mértékben redukálja. (En.Wiki2., 2023.)

A 3D nyomtatáson belül az alkalmazott kompozitok felépítése a következő módon tevődik össze: mátrix (alapanyag), illetve egy-, vagy több erősítő elem, ami lehet például a karbonszál, üvegszál, kevlár kombinációja. Fontos megjegyezni, hogy a termoplasztikus (hőre lágyuló) polimerek anyagtársítását keveréknek, nem pedig kompozitnak nevezzük. Ipari felhasználásban általában az egyedül is kiemelkedő mechanikai tulajdonságokkal rendelkező anyagokat alkalmaznak alapanyagként [2.4.3.1. táblázat]. Erre jó példák a HPM (High Performance Materials) polimerek, mint például a PEEK (poliéter-éter-keton) [2.4.3.1. ábra] (Ye, 2021.). A következőkben bemutatom a kompozit nyomtatásban leggyakrabban alkalmazott mátrix és erősítő anyagokat.



2.4.3.1. ábra 3D nyomtatásban alkalmazott erősítő és mátrix anyagok

Kompozitok mátrix anyagai:

- PA (Poliamid)
- PC (Polikarbonát)
- PEEK (Poliéter-éter-keton)
- PLA (Politejsav)
- ABS (Akrilnitril-butadién-sztirol)
- PPS (Polifenilén-szilfid) (Ye, 2021.)

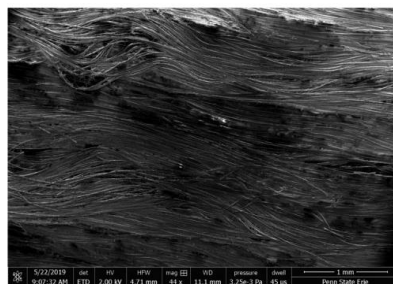
Kompozitok erősítő anyagai:

- Szénszál
- Üvegszál
- Kevlár
- Grafén
- Egyéb fémek (Ye, 2021.)

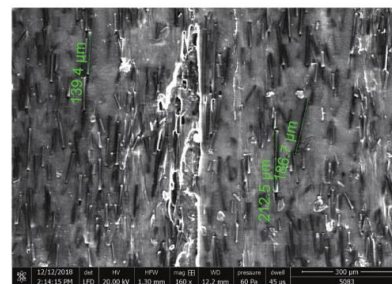
2.4.3.1. táblázat Kompozit anyagok alkotóelemeinek főbb mechanikai paramétereit:

Kompozit anyagok alkotóelemeinek főbb mechanikai paramétereit			
Anyagtípus	Megnevezés	Sűrűség [kg/m ³]	Szakítószilárdság [MPa]
Mátrix	PLA	1250	60
	ABS	1000 – 1050	29,8 – 43
	PA	1100	55 – 90
	PC	1200	66
	PEEK	1260	100
	PPS	1350 - 1800	65 – 86
Erősítés	Szénszál	1400	54
	Kevlár	1200	27
	Üvegszál	1500	21
	Grafén	2267	130

A kompozit nyomtatásban megkülönböztetünk az erősítő anyagok terén a folyamatos szálak mellett úgynevezett aprított/darabolt szálakat [2.4.3.2. ábra]. Az utóbbi esetén egy milliméternél rövidebb hosszúságú szálakat építenek be a polimer anyagba. Ezen polimer anyagnak a százalékos aránya határozza meg a végső alkatrész mechanikai paramétereit. (amfg.ai, 2020)



Folyamatos szálú szénzálerősítéses kompozit



Aprított szálú szénzálerősítéses kompozit

2.4.3.2. ábra Különböző szálhosszúságú szénzálerősítéses kompozitok mikroszkópos felvételei (Seyed Hamid Reza Sanei, 2020)

2.5. 3D nyomtatásban alkalmazott fűvókák hatásai a kész termékre

A 3D nyomtatás megkezdése előtt számos technológiai paramétert vagyunk kötelesek figyelembe venni, hogy a lehető legjobb minőségű készterméket adhassuk ki a nyomtatónkból.

Mindazonáltal, gyakran nem esik szó a fűvókákról [2.5.1. ábra], mely az utolsó olyan részegysége a nyomtatónak, amely – az FDM nyomtató esetében – érintkezik a töltőanyaggal. Ebből következőleg, jelentős hatással van a nyomtatás minőségére, sebességére. A fűvóka a nyomtató olyan mechanikus része, mely a filament szálát extrudálja. A megolvasztáshoz szükséges hőenergiát a fűtőkazetta szolgáltatja, mely energiát a fűtőszál vezet a szálanyaghoz, megolvasztva azt. A fűvóka 3 fő jellemzője a:

- mérete
- anyaga
- belső átmérője
- fűtési hossza (Lucas Carolo, 2023)



2.5.1. ábra 3D nyomtató fűvókák (Lucas Carolo, 2023)

A fűvóka mérete meghatározó a hőátadási folyamatoknál. Minél nagyobb, tömeg és felület áll rendelkezésre a hőátadása folyamat során, a nyomtatás lefolyása annál hatékonyabb lesz (nagyobb extrudálási sebességet eredményez). (Lucas Carolo, 2023)

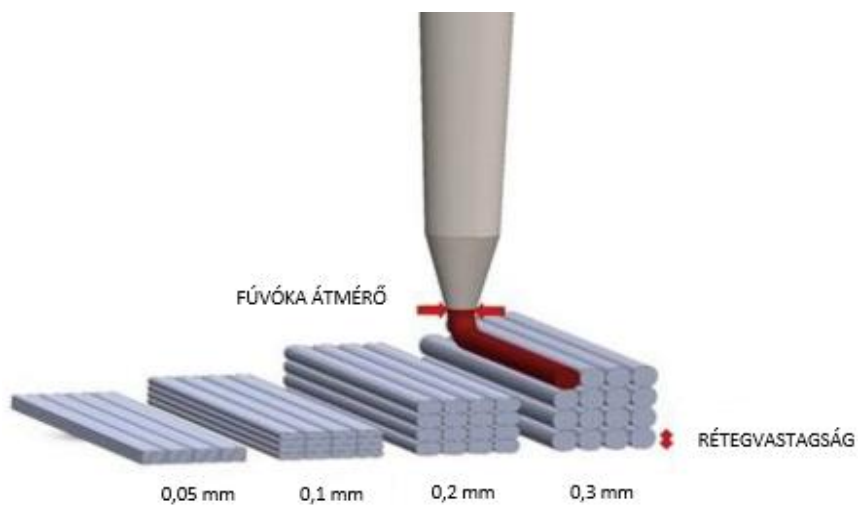
A fűvóka belső mérete is jelentős szempont, hiszen nagyban befolyásolja az áramlási tulajdonságokat, ami szintén az extrudálási sebesség egy fontos tényezője. Továbbá, említésre méltó, hogy jelentős kapcsolat áll fenn a belső átmérő és a rétegvastagság [2.5.2. ábra] között. Minél kisebb a hotend keresztmetszet, annál finomabb felbontású nyomtatott rétegvastagság érhető el, a nyomtatási idő rovására. (Lucas Carolo, 2023)

Kisebb átmérőjű fűvókák jellemzői általánosságban ($d < 0,4$ [mm]):

- Nagyobb felbontás
- Könnyebb támaszték eltávolítás és kezelés
- Magasabb minőségű túlnyúlások
- Hosszabb nyomtatási idő [(Lucas Carolo, 2023) (Ayrilmis, 2018)

Nagyobb átmérőjű fűvókák jellemzői általánosságban ($d > 0,4$ [mm]):

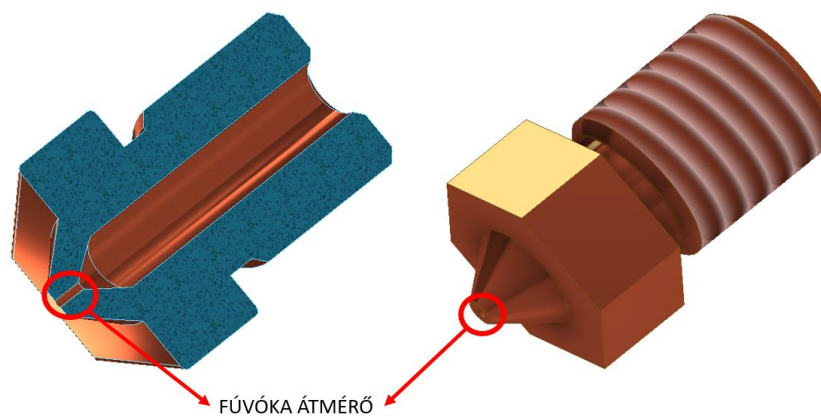
- Abrázív anyagokhoz javasolt (nem hajlamos az eltömődésre)
- Rövidebb nyomtatási idő (Lucas Carolo, 2023) (Ayrilmis, 2018)



2.5.2. ábra 3D nyomtatott rétegvastagságok összehasonlítása (Ayrilmis, 2018)

2.5.1. A fűvóka keresztmetszetének és az alkalmazott rétegvastagság kapcsolata

A fűvóka átmérője [2.5.1.1. ábra] – mint már a korábbiakban is említettem – rendkívül fontos technológiai szempontból.



2.5.1.1. ábra Fűvóka átmérő

A rétegvastagság és a fűvóka átmérő egymástól függetlenül változtatható, nagy általánosságban az FDM nyomtató típusok 0,4 mm-es átmérővel rendelkeznek, mely egy átlagos hobbi felhasználó számára teljesen optimális a mindennapi használatok során.

Fontos megjegyezni, hogy a választott fűvóka mérete meghatározza a minimális-, maximális rétegvastagságot [2.5.1.1. táblázat], illetve az extrudálás szélességét. (O'Neill, 2022)

2.5.1.1. táblázat Rétegvastagságok alakulása a választott fűvóka függvényében (O'Neill, 2022):

Rétegvastagságok alakulása a fűvóka átmérője függvényében			
Fűvóka átmérő [mm]	Minimum rétegvastagság [mm]	Szabványos rétegvastagság [mm]	Maximális rétegvastagság [mm]
0,25	0,06	0,13	0,2
0,4	0,1	0,2	0,32
0,6	0,15	0,3	0,48
0,8	0,2	0,4	0,64
1	0,25	0,5	0,8

A fűvóka átmérője a nyomtatási irányzat X –, és Y tengelyű felbontását befolyásolja (minél kisebb az átmérő, annál kidogozottabb az eredmény), míg a rétegvastagság a Z tengely felbontására (minél vékonyabb a rétegvastagság, annál kidogozottabb az eredmény) van hatással. (O'Neill, 2022)

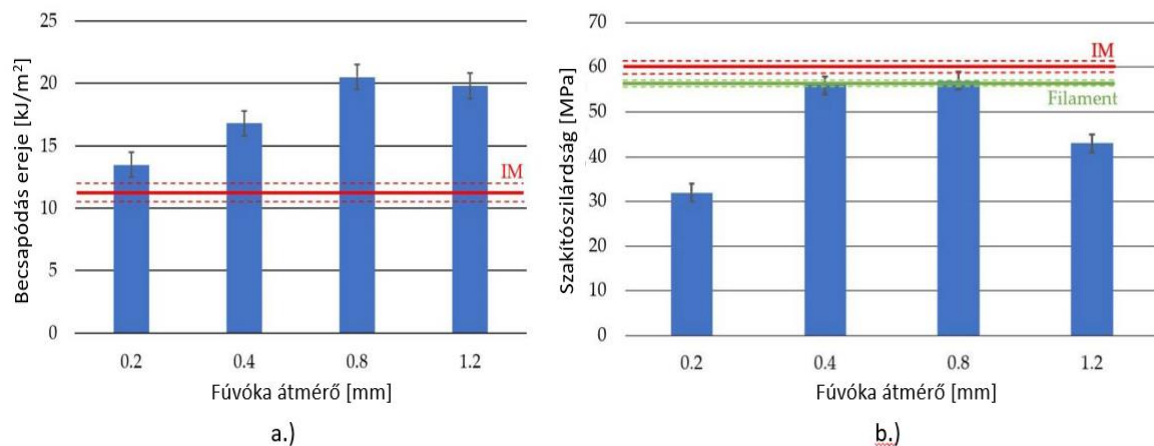
A gyakorlatban alkalmazott ökölszabály, hogy a minimális rétegvastagság, az alkalmazott fűvóka átmérőjének 25%-a, illetve a maximális rétegvastagság a fűvóka átmérőjének 80%-a. A szabványos rétegvastagság a fűvóka átmérőjének 50%-a. (O'Neill, 2022)

Az extrudálás szélessége – más néven vonalszélesség – a már említett X és Y tengelyen mérhető szabályzott olvadt filamentum szélességére utal. Ennek minimális és maximális mérete a fűvóka átmérőjének 60 –, illetve 200%-a közé tehető, habár tapasztalatok és vizsgálatok alapján kiderült, hogy a 100 – 120% közötti tartomány a legoptimálisabb választás. (O'Neill, 2022) Kutatások eredménye kimutatta, hogy a kis fűvóka átmérő alkalmazása, illetve az alacsony rétegvastagság együttes alkalmazása jobb felületi érdességhez és jobb mechanikai tulajdonságokhoz vezet. (Fischer D, 2022)

2.5.2. A fűvóka átmérőjének hatása a mechanikai paraméterekre polimer esetén

(Piotr Czyżewski, 2022) tanulmányát alapul véve megállapítható, hogy a fűvóka átmérőjének kifejezetten jelentős hatása van az elkészült munkadarab mechanikai paramétereire. A tanulmány PLA alapanyagú mindarabok esetén keresztül vizsgálja a különböző mechanikai jellemzők hatásait. Megállapítható, hogy dinamikus – Charpy – anyagvizsgálatának eredményeként [2.5.2.1/a. ábra] megállapítható, hogy 0,4 mm-nél nagyobb fűvóka átmérők esetén a nyomtatási utak között a légüregek aránya megnőtt.

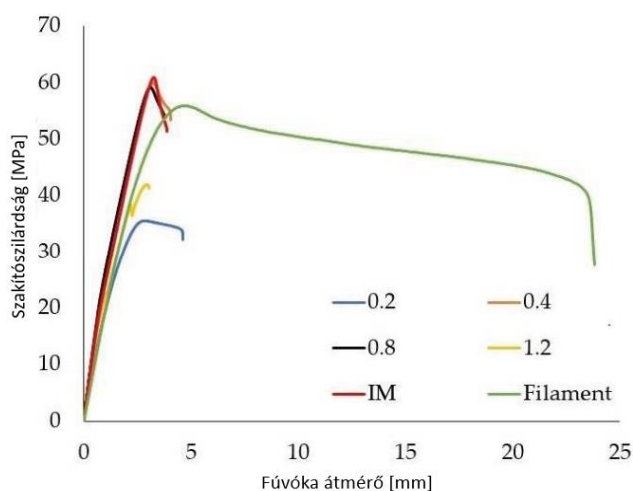
Ezen jelenség valószínűleg hatással van a vizsgált próbatestek ütőmunkájának értékére, mely arra enged következtetni, hogy a már említett fűvóka átmérőnél nagyobb fűvókával való nyomtatás magasabb ütőmunka értékhez vezethet, mivel a szerkezetben kialakult légrések elnyelhetik a vizsgálat során keletkezett energia egy részét. Az ábrán való „IM” jelölés alatt az öntött munkadarabot, míg a „Filament” megjelölés alatt az átlagos nyomtatás előtti filamentum szálát értjük. (Piotr Czyżewski, 2022)



2.5.2.1. ábra Különböző fűvókaátmérőkkel nyomtatott PLA próbatestek ütő-, (a.) és szakítóvizsgálatainak (b.) átlagos szórásának eredményei (Piotr Czyżewski, 2022)

A szakítóvizsgálat esetében szintén – a fenti diagramokon is jól láthatóan leolvasható – a 0,8 mm-es fűvóka alkalmazása esetén jelentkeztek a legnagyobb értékek, míg a legalacsonyabbat a 0,2 mm-es átmérő esetén.

A vizsgálat során megállapították a különböző átmérővel nyomtatott próbatestek, és a filamentum feszültség – nyúlás jelleggörbéjét is, melyet a [2.5.2.2. ábra] -n láthatunk. (Piotr Czyżewski, 2022)



2.5.2.2. ábra Statikus szakítóvizsgálat feszültség-nyúlás jelleggörbéje (Piotr Czyżewski, 2022)

A tanulmány számos mechanikai jellemzőt befolyásolható esetet vizsgált, melyekből csak a diplomamunkám számára releváns információkat mutatok be az alábbi bekezdésben [2.5.2.1. táblázat].

2.5.2.1. táblázat Adott mechanikai tulajdonságokban kiemelkedő értéket mutató fúvóka átmérők: (Piotr Czyżewski, 2022)

	Fajlagos szilárdság	Young-modulus	Szakítószilárdság	Nyúlás	Ütőmunka	Látszólagos sűrűség
Legalacsonyabb értéket elérő fúvóka típus [mm]	0,2	0,2	0,2	1,2	0,2	0,2
Legmagasabb érték elérő fúvóka típus [mm]	0,8	0,4	0,8	0,8	0,8	1,2

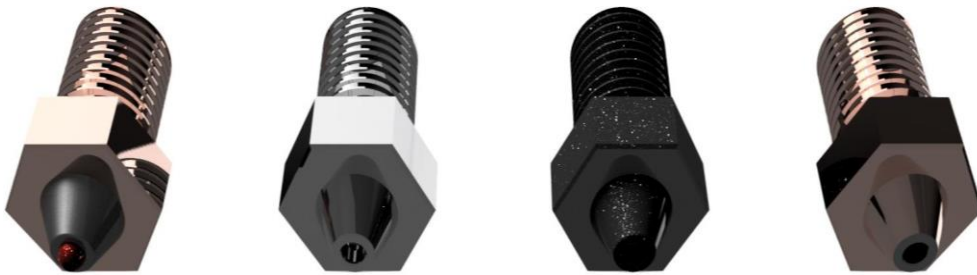
Tanulmányok kimutatták, hogy a fúvóka átmérőjének megváltoztatása pozitív irányzatban, megközelítőleg 4%-os sűrűsnövekményt eredményez a nyomtatás során (Piotr Czyżewski, 2022) (Triyono J., 2020)

Ezen értekezések konzekvenciájaként megállapítható, hogy az általunk elérni kívánt jellemzők elérése érdekében – mint a jelenlegi tömeggyártásban is – jól átgondolt technológiai előtervezés szükséges a megfelelő végeredmény kialakulása érdekében.

A fúvókatípus helyes megválasztása jelentős mértékben befolyásolja a mechanika és felületi jellemzők alakulását a 3D nyomtatott termékek esetében.

2.5.3. A fűvóka anyagának hatása

Az additív gyártásban használt fűvókákról elmondható, hogy nagy általánosságban fém alapanyagból [2.5.3.1. ábra] készülnek. Ennek oka, hogy a magas hővezető képességet igényelnek, illetve szűk tűrésmezővel készülnek. A gyakorlatban alkalmazott fém alapanyagok mindegyikének megállapíthatóak előnyei, illetve hátrányai. Az alábbiakban bemutatom a 3D gyártás során alkalmazott legnépszerűbb fűvóka alapanyagokat. (Lucas Carolo, 2023)



2.5.3.1 ábra Különböző alapanyagból készült fűvókák

2.5.3.1. Rozsdamentes acél fűvókák

Az egyik leggyakrabban alkalmazott alapanyag. Előnye, hogy társaihoz képest magasabb kopásállósággal rendelkezik, illetve adhéziós adottságából adódóan egy bizonyos mértékig megakadályozza, hogy a filamentum olvadék a felületére tapadjon, így rendezettebb nyomtatási minőséget kapunk. (Lucas Carolo, 2023)



2.5.3.1.1. ábra Rozsdamentes acél alapanyagból készült fűvóka

Ellentétben a sárgaréz alapanyagból készült fűvókával, a rozsdamentes acélból készült fűvóka [2.5.3.1.1. ábra] nem szennyezi be a filamentet ólommal, ezért (elméletileg) alkalmas az élelmiszer – minőségű alapanyagok nyomtatására. (Lucas Carolo, 2023)

Mindazonáltal, hogy magasabb kopásállósággal rendelkezik, mint számos társa, még mindig nem ajánlott erősen koptató anyagok intenzív használatához. Hővezető képessége alacsonyabb, mint a sárgarézből készültnek. (Lucas Carolo, 2023)

- Maximális alkalmazási hőfok: 500 [°C]
- Javasolt filamentum alapanyagok:
 - Fluoreszkáló filamentek
 - Fém erősítéses kompozit filamentek
 - Speciális filamentek (fa-, viaszos-, kerámia kompozitok)
 - Szénszálas kompozit
 - NylonX
- Hővezető képesség: 15 [W/mK] (Dwamena, 2019)

2.5.3.2. Sárgaréz fúvókák

A leggyakrabban használt alapanyagtípus. Általános esetben réz-cink ötvözeteket használnak a „sárgaréz fúvókák” [2.5.3.2.1. ábra] alapanyagaként, mely kiváló hőátadást biztosít. Ezen ötvözet nem olyan ellenálló a kopással szemben – mint a már ismertett rozsdamentes acél fúvóka – viszont a kedvező ára és a széles alkalmazási skálája kárpótolhat ezért. (Lucas Carolo, 2023)



2.5.3.2.1. ábra Sárgaréz alapanyagból készült fúvóka

A sárgaréz alapanyagú fúvóka kifejezetten érzékeny a különböző fizikai behatásokra – mint az ütések, karcolások stb. – így lehetőség szerint ez kerülendő. Ebből kifolyólag ez a kivitel nem alkalmas a különböző szénszálas-, üvegszálas-, kompozitok nyomtatására, mivel ezek tönkre tehetik a fúvóka belső felületi minőségét. (Lucas Carolo, 2023)

- Maximális alkalmazási hőfok: 300 [°C]
- Javasolt filamentum alapanyagok:
 - PLA
 - ABS
 - PETG
 - TPE
- Hővezető képesség: 385 [W/mK] (Dwamena, 2019)

2.5.3.3. Edzett acél fűvókák

Az egyik legstrapabíróbb fűvóka alapanyag. [2.5.3.3.1 ábra] Ezen fűvókák megjelenése kifejezetten nagy előrelépésnek számított, mivel akár évekig is használhatóak intenzíven abrazív környezetben is. Hátránya, hogy jóval alacsonyabb hővezető képességgel rendelkeznek, mint a már ismertetett alapanyag típusok és a felfűtési idő is jelentősen magasabb a „vetélytársakéhoz” képest. (Dwamena, 2019) (Lucas Carolo, 2023)



2.5.3.3.1. ábra Edzett acél alapanyagú fűvóka

Gyártási folyamata igen körülményes, hiszen a hőkezelt – edzett – alapanyagokban való furatmegmunkálás rendkívül nehézkes, továbbá a gyártástechnológiájának komplexitása végett költségesebb is egy ilyen típus alkalmazása, mint a rézből, vagy a rozsdamentes acélból készült fűvóka használata. (Lucas Carolo, 2023)

- Maximális alkalmazási hőfok: 500 °C
- Javasolt filamentum anyagok: Minden anyag használható, beleértve az erősen abrazívakat is.
- Hővezető képessége: 10 [W/mK] (Dwamena, 2019)

2.5.3.4. Speciális „összeállított” fűvókák

Ennek a típusnak [2.5.3.4.1. ábra] a jellegzetessége, hogy – általában – két különálló részből kerül összeállításra, mely lévén a két különböző anyag legjobb tulajdonságát aknázzák ki. Ezáltal olyan fűvóka állítható elő, mely a már előzetesen is ismertetett edzett acél kiváló kopásálló tulajdonságát és a réz-cink ötvözet magas hővezető képességével rendelkezik. (Lucas Carolo, 2023)



2.5.3.4.1. ábra Speciális összeállított fűvóka

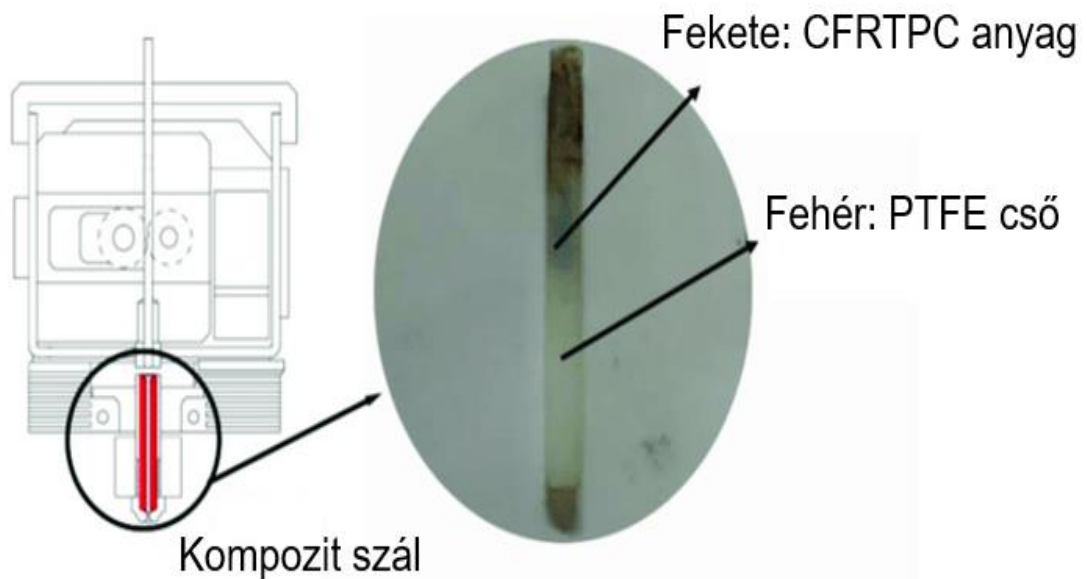
Ezek a típusú fűvókák gyakran tartalmaznak kifejezetten ritka – mint például a rubint – anyagokat. Az eddig leírtakból adódóan ezek a fajták kifejezetten magas áron elérhetők a célközönség számára.

- Javasolt filament anyagok: Minden anyag használható. Kifejezetten alkalmas HPM anyagok nyomtatására. (Lucas Carolo, 2023)

2.5.4. Fűvóka fűtési zóna hosszának hatása a nyomtatás során

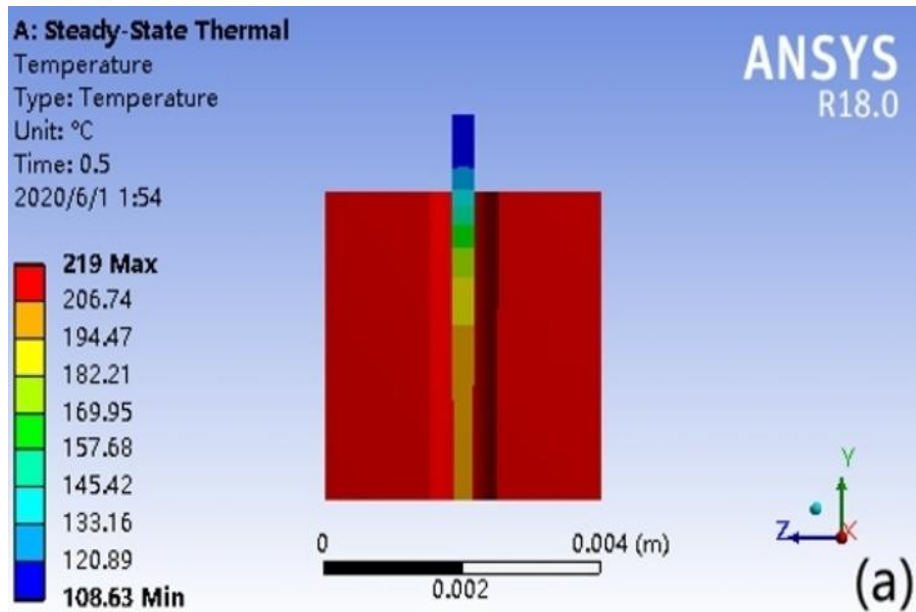
Az említett fűvóka tulajdonságok közül nem maradhat ki az úgynevezett fűtési zóna hosszának vizsgálata sem. A következő (Yesong Wang, 2021) tanulmány folyamatos FDM technológiát és saját készítésű szálerősítésű kompozitot alapul véve vizsgálja a fűtési zóna hosszának hatásait a nyomtatásra.

A tanulmány jelentős technológiai paramétereket vizsgál a „CFRTPC” – Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites – vagy más néven a folyamatos szálerősítésű termoplasztikus kompozitok [2.5.4.1. ábra] nyomtatása kapcsán.



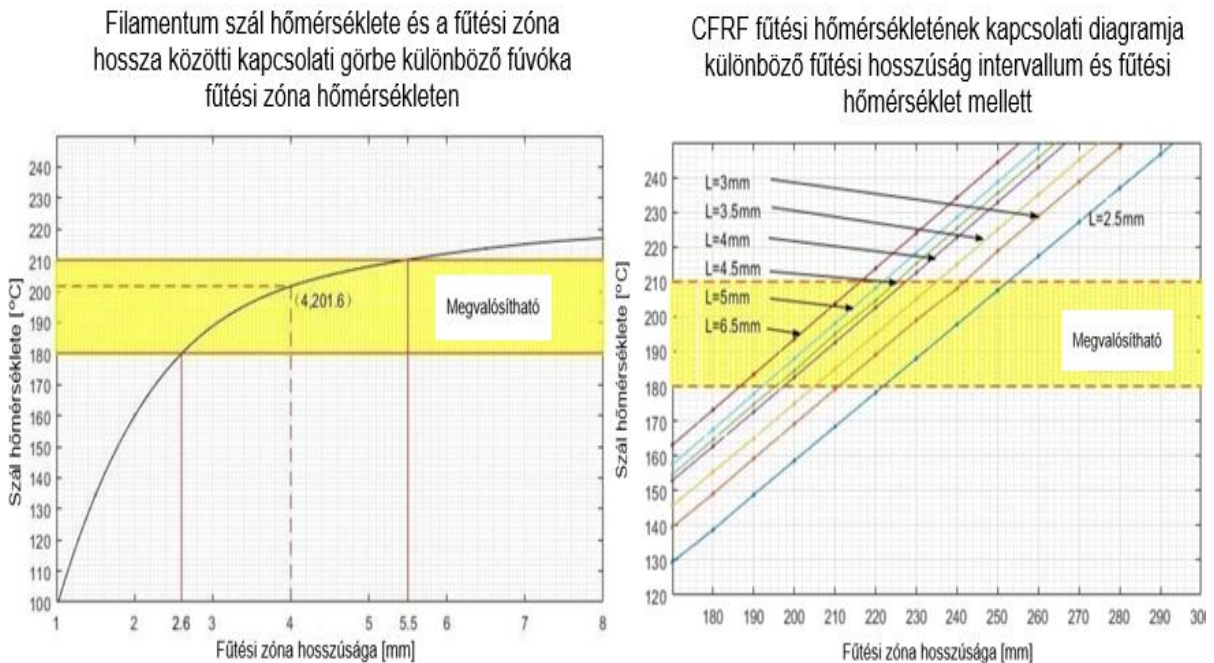
2.5.4.1. ábra CFRTPC „független” nyomtató extrúder metszeti ábrája (balra) és a kompozit alapanyag (jobbra) (Yesong Wang, 2022)

A kompozit nyomtatási technológiák közül az úgynevezett független, vagy standard nyomtatási technológiával vizsgálják a különböző nyomtatást befolyásoló paramétereket. A tanulmány alapjául (Calignano Flaviana, 2020) tanulmánya szolgáltat vizsgálati alapot.



2.5.4.2. ábra Szimulációs eredmények 4mm hosszú fűtési zóna és 219 °C mellett (Yesong Wang, 2021)

A fűtőzóna tanulmányozását szimulációs elemzéssel [2.5.4.2. ábra] végezték, mely eredménye arra enged következtetni CFRF (folyamatos szálerősítésű) alapanyag és 300 mm/perc nyomtatási sebesség mellett, hogy a fűvóka effektív melegítési zónájának hossza 2,62 – 5,45 mm, illetve az effektív hőfok tartomány 204 – 234 °C között van. Átfogó mérlegelés alapján [2.5.4.3. ábra] megállapították, hogy **az optimális fűtési zóna hossza 3,6 mm**, míg **az optimális hőfok 220 °C** ezen paraméterek mellett [2.5.4.1. táblázat].



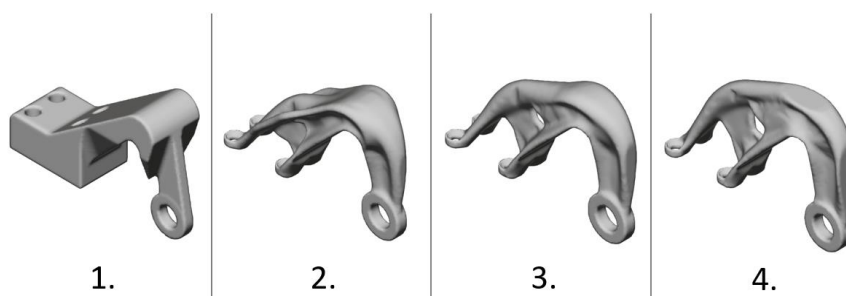
2.5.4.3. ábra Szénszál erősítéses kompozit nyomtatás kapcsolati görbéi a fűvóka fűtési hosszának vizsgálatá során (Yesong Wang, 2021)

2.5.4.1. táblázat A vizsgálat során alkalmazott technológiai paraméterek (Yesong Wang, 2021):

Alapanyag típusa	Átmérő [mm]	Mátrix anyag	Nyomatási hőmérséklet [°C]	Nyomatási rétegvastagság [mm]	Gyártó
PLA	1,75	-	215	0,2	Essen Technology
PA6	1,75	-	260	0,2	Essen Technology
CGFRF-PLA	0,45	PLA	215	0,3	Saját készítésű
CCFRF-PA6	0,45	PA6	260	0,3	Saját készítésű

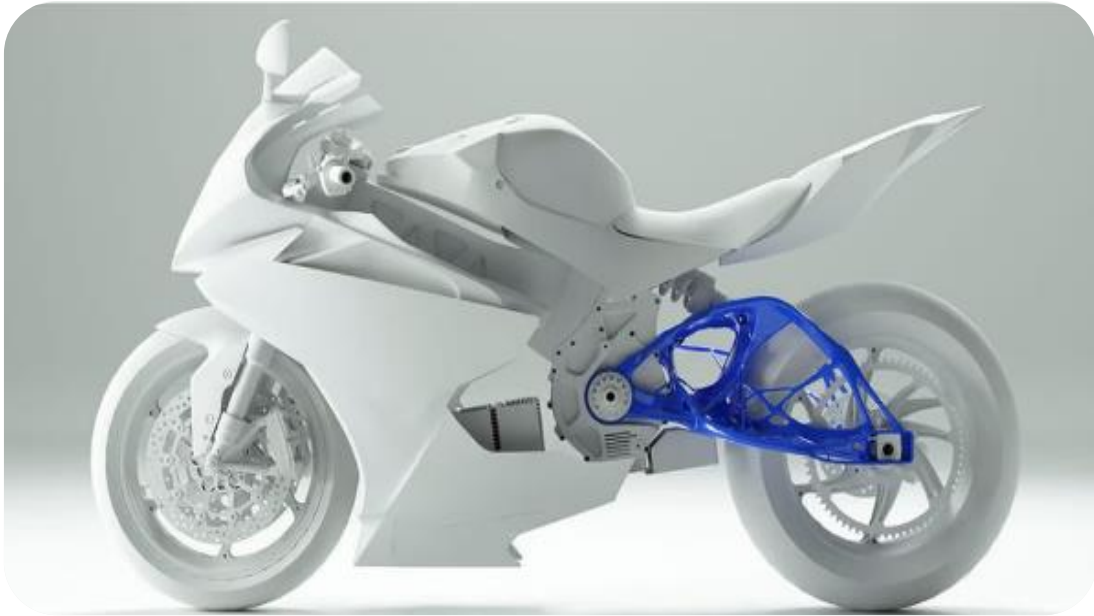
2.6. Generatív tervezés és topológiai optimalizáció

A generatív tervezés egy olyan iteratív tervezési módszer [2.6.1. ábra], mely során különböző algoritmusok és mesterséges intelligencia támogatásával – meghatározott tervezési kritériumok alapján – a tervezők olyan testek, formák, alkatrészek létrehozására képesek, melyek a hagyományos tervezési módszerekkel elképzelhetetlen, vagy kifejezetten nehézkes lenne az additív gyártás – 3D nyomtatás - lévén. [2.6.2. ábra]. (engineeringproductdesign.com, 2023.) (All3DP, 2022)



2.6.1. ábra Iteratív tervezési módszer szemléltetése

A módszer lehetőséget biztosít, hogy a tervezők – egyszerre – több lehetőséget is megvizsgáljanak és értékelhessenek. A generatív tervezés során jelentős szerepet játszik a mechanikai kritériumok betartása mellett az esztétika és a szükségtelen anyagfelesleg redukálása a lehető legnagyobb mértékben. (engineeringproductdesign.com, 2023.) (All3DP, 2022)



2.6.2. ábra Generatív tervezéssel optimalizált motorkerékpár hátsó tengely (All3DP, 2022)

2.6.1. Különbség a generatív tervezés és a topológiai optimalizáció között

Különbség a generatív tervezés és a topológiai optimalizáció között, hogy míg a generatív tervezés mesterséges intelligenciát, gépi tanulást és szimulációt használ, addig a topológiai optimalizálás matematikai algoritmusokat alkalmaz a modell alakjának és szerkezetének optimalizálására, hogy megfeleljen a vele szemben támasztott teljesítménykövetelményeknek. A generatív tervezés magába foglalja a tervezési célok, korlátok és peremfeltételek meghatározását, amik mellett lehetővé teszi a számítógép számára, hogy többféle tervezési lehetőséget generáljon és értékeljen. (All3DP, 2022) (plmgroup, 2023)

A topológiai optimalizálás – mint ahogy a fentebbi bekezdésben említettem – matematikai algoritmusokat használ, hogy teljesítse a felhasználó által megszabott teljesítménykövetelményeket. Ilyen követelmények lehetnek például a szilárdság, súly, rugalmasság, gyártási költségek.

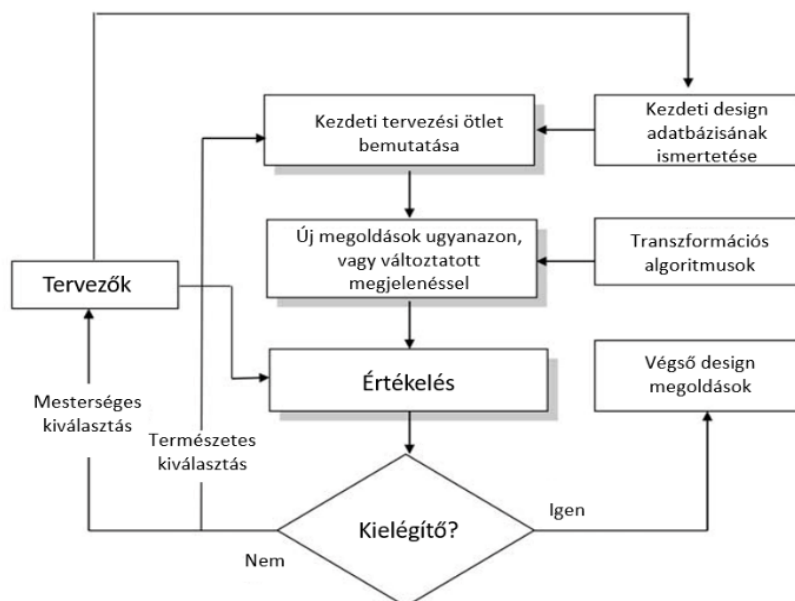
A topológiai optimalizálás magába foglalja a terhelések, peremfeltételek, tervezési kényszerek meghatározását, majd egy optimalizációs algoritmus alkalmazásával elkészíti az alkatrész optimális anyageloszlását. (All3DP, 2022) (plmgroup, 2023)

2.6.2. Generatív tervezés folyamata

A generatív tervezés [2.6.2.1. ábra] megkezdéséhez mindenképpen szükségesek a bemeneti paraméterek meghatározása, mely a folyamat alappillérei. A bemeneti paramétereket körültekintően, jól átgondolva kell betáplálni, mivel, ha itt hibát vét a tervező, akkor az egész folyamatra jelentős kihatással lehet.

A következőkben ismertetem a főbb bemeneti paramétereket:

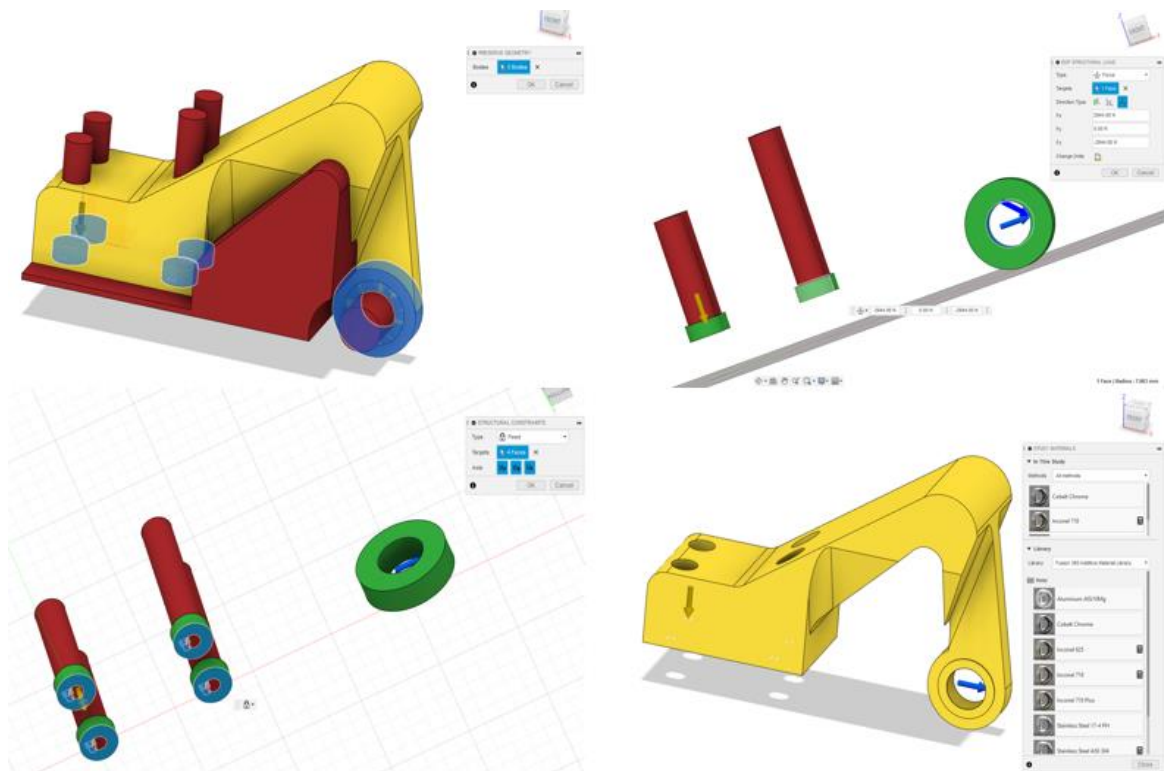
- **Anyagkiválasztás:** Mechanikai és technológiai paraméterek bevitel. Ha a gyártás során egynél több anyag típust alkalmazunk, akkor a különböző mechanikai és technológiai paraméterek végett mindegyik külön-külön történő figyelembevétele
- **Gyártástechnológia:** A termék elkészítéséhez felhasznált gyártási eljárások – például: fúrás, marás, 3D nyomtatás, öntés – technológiai paramétereinek – például: előtolás, rétegvastagság, beállítása.
- **Terhelések:** A termékre ható erők nagysága, típusa és azoknak helyei. Ide tartoznak még az olyan területek meghatározása is, melyeknek megerősítése vagy egyszerűsítése szükséges a működés során fellépő igénybevételek fenntartása érdekében.
- **A tervezési tér fizikai korlátai:** Magába foglalja minden olyan részegységét az új alkatrésznek egy nagyobb összeállításban – például rögzítési furatok, vállak – amik akadályozzák az új alkatrész mozgását bizonyos irányokban. (engineeringproductdesign.com, 2023.) (All3DP, 2022)



2.6.2.1. ábra Generatív tervezés folyamatábrája (Tang M. X., 2017)

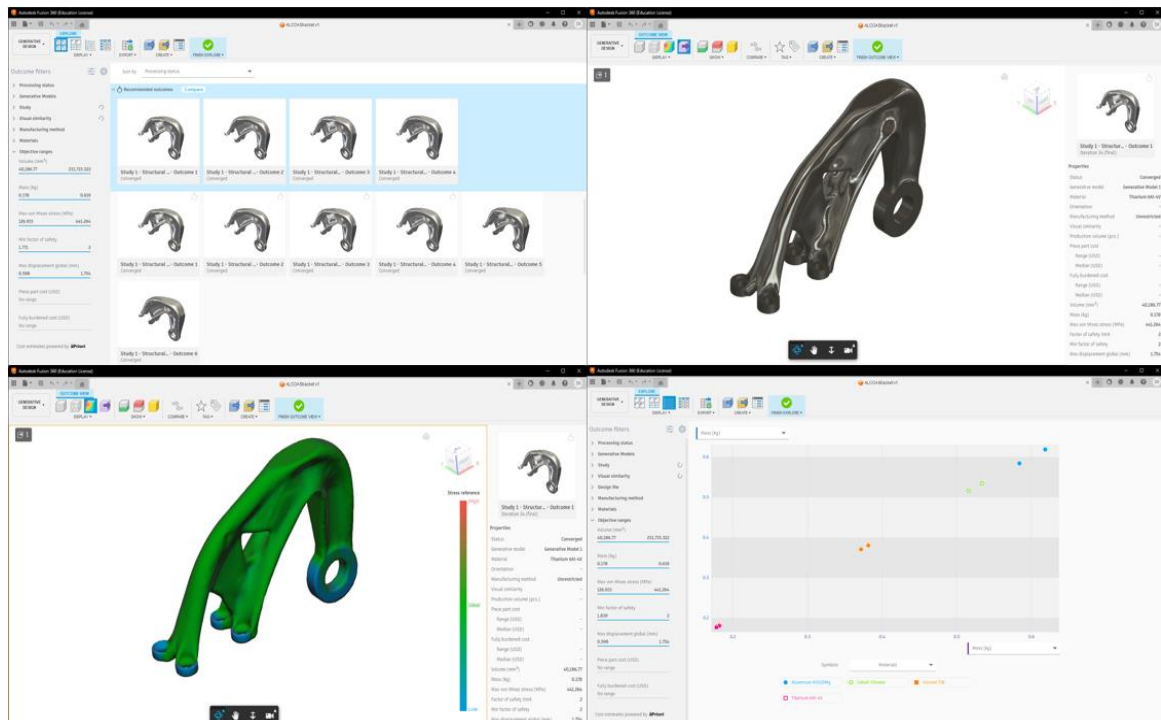
Most, hogy ismertetem a generatív tervezés megkezdéséhez szükséges bemeneti paramétereket, szeretném bemutatni a tervezési folyamatok lépéseit:

- 1) **Tervezési célok meghatározása:** Tervezési célként megfogalmazható például a munkadarab súlyának csökkentése.
- 2) **Bemeneti paraméterek meghatározása:** A már fentebb is ismertetett folyamatok betáplálása a programba. Anyag, gyártástechnológia, terhelések, korlátok. [2.6.2.1. ábra]



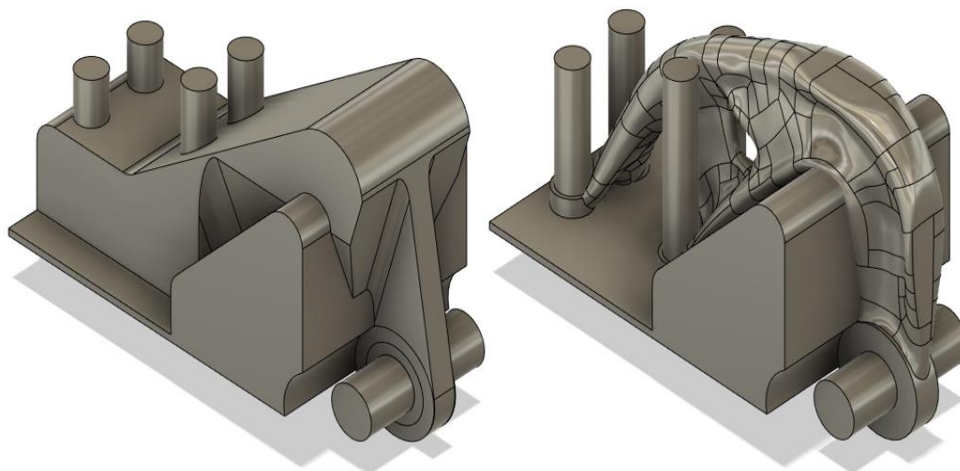
2.6.2.1. ábra Generatív tervezés bemeneti paramétereinek beállítása Autodesk Fusion 360 programban

- 3) **Tervezési lehetőségek generálása:** A tervezőszoftver bemeneti alternatívákat generál a bemeneti paraméterek alapján. [2.6.2.2. ábra]
- 4) **Tervezési lehetőségek értékelése:** Szimulációk és egyéb elemzések segítségével értékelik a generált alternatívákat a lehető legjobb konstrukció megtalálása érdekében. [2.6.2.2. ábra]
- 5) **Legoptimálisabb konstrukció kiválasztása:** A szimulációk és elemzések eredményei alapján kiválasztjuk a felajánlott alternatívákból a legjobb konstrukciót. [2.6.2.2. ábra]



2.6.2.2. ábra Generatív tervezés által generált alternatívák értékelése és kiválasztása Autodesk Fusion 360 programban

- 6) **Prototípusgyártás és tesztelés:** A megtervezett konstrukciót legyártják és tesztelik, hogy megbizonyosodjanak a kialakítás megfelelőségéről.
- 7) **Gyártás:** A megtervezett és tesztelt generatív tervezett alkatrészek egyéni-, vagy sorozatgyártása.
- 8) **Eredmények értékelése:** Az előzetes gyártástechnológia által elkészíthető alkatrész és a generatív gyártás által elkészíthető alkatrészek mechanikai, technológiai [2.6.2.3. ábra] és gazdasági összevetése. [29.] [30.]



2.6.2.3. ábra Generatív tervezés előtti (bal oldal) és utáni (jobb oldal) alkatrészek összevetése

Az [2.6.2.3. ábra] -n bemutatott alkatrészek – az egyszerűség kedvéért minden részegysége – alapanyaga a tervező programban található anyag típus adatbázisból kiválasztott „Titanium 6Al-4V” jelölésű ötvözet.

A hagyományos gyártástechnológiával készített alkatrész súlya megközelítőleg **10 kg**, míg a generatív tervezéssel készült alkatrész súlya – jelentősen kevesebb – **7 kg**.

2.6.3. Generatív tervezés előnyei és hátrányai

A generatív tervezés számos előnyt biztosít a tervezők számára, mindazonáltal bizonyos számú hátránnyal is rendelkezik egy a folyamat. Az alábbiakban bemutatom ezeket a tulajdonságokat.

Előnyei a generatív tervezésnek:

- Fokozott hatékonyság és sebesség
- Jobb optimalizálás és teljesítmény
- Könnyű átméretezhetőség
- Költséghatékony
- Fenntarthatóság
- Kooperáció növelés a tervezők, mérnökök és érdekelt felek között (All3DP, 2022)

Hátrányai a generatív tervezésnek:

- Technológiától való függés
- Korlátozott irányítás
- Elfogultság az algoritmusokban
- Magas bekerülési költség
- Szükséges az emberi beavatkozás a megfelelő eredmény elérése érdekében, nem teljesen automatizált a folyamat (All3DP, 2022)

2.7. Konzekvencia

- A különböző fúvóka átmérők jelentős hatást gyakorolnak a nyomtatott munkadarab különböző paramétereire. Például: felületi felbontás, támaszték eltávolítás és kezelés, túlnyúlások minősége, nyomtatási időszükséglet.
- Gyakorlati ökölszabályként megállapítható, hogy a minimális rétegvastagság a fúvóka átmérőjének 25%-a, illetve a maximális rétegvastagság a fúvóka átmérőjének 80%-a. Továbbá megállapítható, hogy az extrudálás szélességére is hatással van a fúvóka átmérő mérete. Ugyancsak felállítható egy ökölszabály, miszerint az extrudálás szélességének minimális és maximális rátája a fúvóka átmérőjének 60-, és 200%-a közé tehető, habár vizsgálatok alapján a legoptimálisabb érték 100 – 120% közötti tartományban érhető el.
- Mechanikai paramétereket tekintve szintén hatása van a fúvóka átmérőnek. A vizsgált tanulmány alapján megállapítható, hogy a 0,4 mm-nél nagyobb átmérők alkalmazása magasabb ütőmunka értéket eredményez a növekvő nyomtatási utak légüres terének energia elnyelő hatásának következtében.
- A már említett tanulmányból kiderült, hogy az adott paraméterek mellett a 0,8 mm-es fúvóka átmérő bizonyult a legsokoldalúbbnak a mechanikai paraméterek terén. A vizsgált 6 mechanikai paraméterből (fajlagos szilárdság, szakítószilárdság, nyúlás, ütőmunka, látszólagos sűrűség, Young-modulus) 4 alkalommal ért el legkiemelkedőbb értéket a vizsgált átmérők közül.
- A vizsgált tanulmányokból megállapítható, hogy a fúvóka átmérők növelése átlagosan 4%-os sűrűsége-növekményt eredményez a nyomtatás során.
- Megállapítható, hogy a különböző fúvóka anyagok jelentős hatással vannak a polimerek és a kompozitok nyomtatására a különböző anyagtulajdonságok (hővezető képesség, hőállóság, abrazivitás) eltérése okán.
- A fúvóka fűtőzónájának hosszát vizsgálva a tanulmány megállapította, hogy az adott technológiai paraméterek mellett az optimális fűtési zóna hossza 3,6 mm, valamint az optimális alkalmazási hőfok 220 °C a folyamatos szálerősítésű kompozitok alapanyagok használata esetén.

3. Célkitűzés

A diplomamunkám során egy generatív tervezéssel és topológiai optimalizációval megtervezett, valamint additív gyártástechnológiával elkészíthető kéttámaszú tartó elkészítését tűztem ki célul. A tervezés során a kéttámaszú tartó alátámasztásául szolgáló konzol generatív tervezéssel, míg az ezen helyet foglaló lap az előzőekben bemutatott topológiai optimalizációs tervezési módszerrel készül. Fontos megemlíteni a különbséget itt is, hogy a generatív tervezés során csak a fő alkotóelemek – mint például a felfogató elemek, furatok, távtartók stb. – kerülnek lemodellezésre a tervező által, az ezeket összekötő elemek nem. Ezek generálását a szoftver által alkalmazott mesterséges intelligencia végzi, az általunk betáplált peremfeltételek, elvárt eredmények alapján. A topológiai optimalizáció során már rendelkezünk egy úgynevezett „kezdő formával”, melyet a különböző általunk betáplált feltételek és elvárt eredmények alapján a szoftver által alkalmazott matematikai algoritmusok különböző szimulációk során eltávolítják a szükségtelen anyagfelesleget, melyeket még a tervező szaktudása szerint megváltoztathat. Az elkövetkezendő fejezetben számos példán keresztül be fogom mutatni ezen két tervezési eljárás közti különbséget, mert tapasztalatok alapján ezeket gyakran tévesztik össze.

A végleges tartó nyomtatása és összeszerelése előtt a generatív tervezett tartó konzolt mechanikai anyagvizsgálat útján fogom vizsgálni a különböző technológiai paraméterek – főként az FDM nyomtatás során alkalmazott fűvóka – hatásait a mechanikai jellemzőkre. A munka során alkalmazott anyagvizsgálat típusa:

- Kompresszióvizsgálat

A nyomóvizsgálat során olyan adatokat nyerhetünk ki, a különböző technológiai paraméterekkel elkészített próbatestekről és próbadarabról, melyek segítségével nagy biztonsággal kimondhatjuk, hogy esetünkben mely technológiai paraméterek alkalmazása mellett érhetjük el a rendelkezésre álló feltételek mellett a lehető legjobb eredményt.

4. Tervezés-, szimuláció-, kísérlet és megvalósítás

4.1. Tervezés

A tervezés során a már fentebb is említett kéttámaszú tartó tervezésével foglalkozok elsősorban. A tartó befoglaló méreteit tekintve 500 x 150 x 15 mm és az előírt maximális terhelhetőség 50 kg. A munkám során Autodesk Fusion 360 (Generatív tervezés és Topológiai optimalizáció, Szimulációs vizsgálatok), illetve Autodesk Inventor 2024 Professional (3D Összeállítási modellek és Műszaki dokumentáció) tervezőprogramokat használtam [4.1.1. ábra].



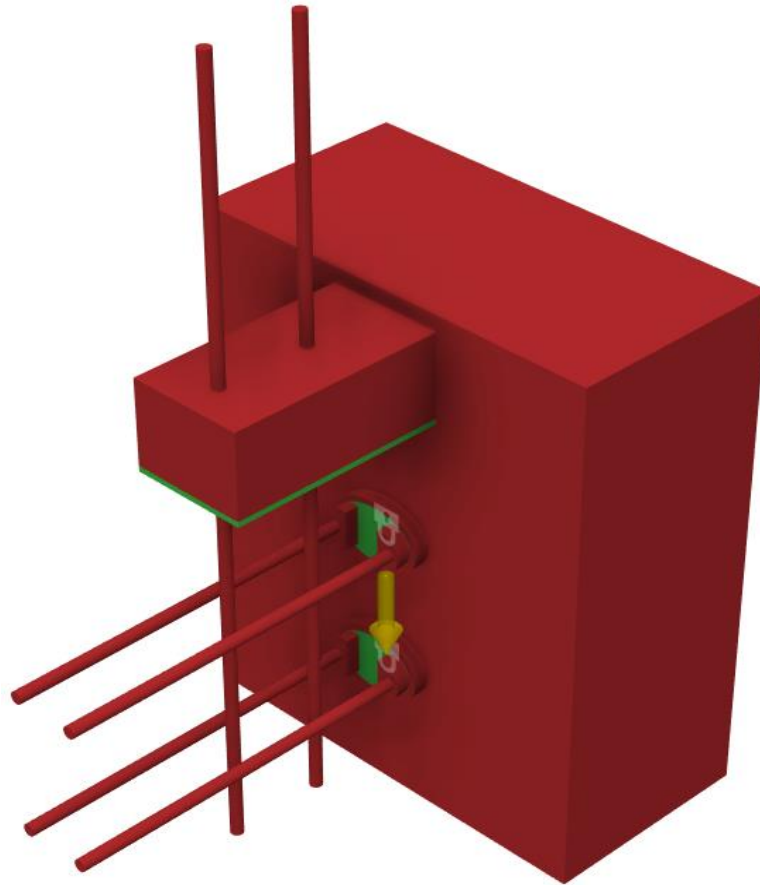
4.1.1. ábra A tervezés során alkalmazott szoftverek

4.1.1. Generatív tervezés – Tartókonzol

A konzol tervezése során Autodesk Fusion360 tervezőprogramot használok, melyben a konzol generatív tervezését, műszaki dokumentációját, illetve a végelem szimulációját is elvégzem. Fontosnak tartom megemlíteni, hogy a generatív tervezés során a Fusion360 nem képes jelenlegi verziójában a 3D nyomtatás során alkalmazott belső térkitöltésének kezelésére. Ennek érdekében a tervezés során a célként meghatározott 35 kg-os terhelés helyett 50 kg-os terhelési beállításokkal végzem a generálást. A generatív tervezett konzol kiinduló adatai a következők:

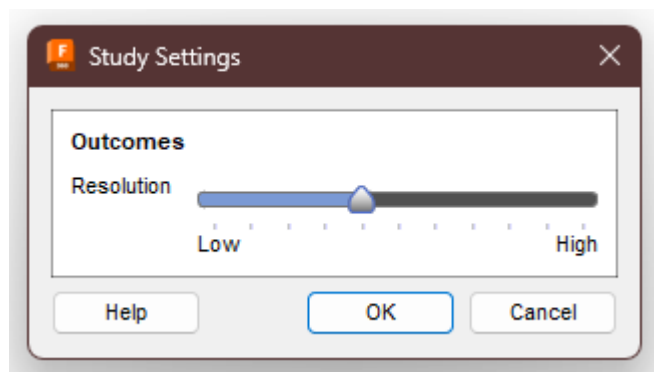
- Alapanyag: PLA
- Maximális terhelés a generálás során: 500 N
- Gyártási eljárás: 3D nyomtatás

A tervezés első fázisa az úgynevezett „**megőrzendő**” geometriai elemek (melyek alakja, mérete, egzisztenciája nem változhat a generatív tervezés folyamán) 3D modelljeinek elkészítése. Ezen modelleket bizonyos tervezési okokból befoglaló „**akadály**” geometriai elemekkel vesszük körbe, melynek célja, hogy például esetünkben a furatokba kerüljön anyag a generatív tervezés iterációi során [4.1.1.1. ábra].



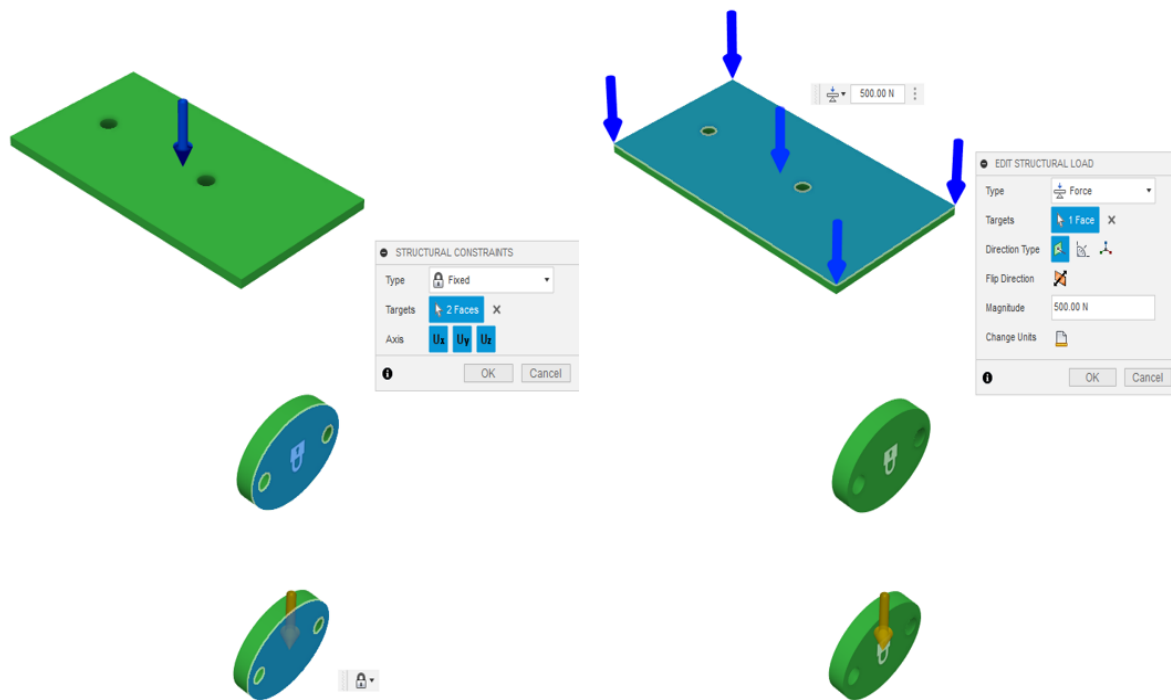
4.1.1.1. ábra Generatív tervezés során beállítandó geometriai peremfeltételek beállítása

A geometriai peremfeltételek beállítása után a következő beállítandó paraméter a generatív tervezés úgynevezett „felbontásának” a beállítása, melynek munka ablakja a [4.1.1.2. ábra]-n látható.



4.1.1.2. ábra Generatív tervezés felbontásának beállítása

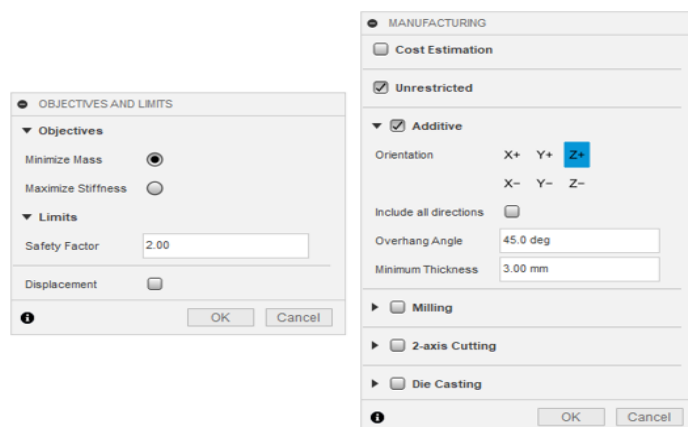
A tervezés következő állomása a konzolt terhelő erő(k) és a konzol strukturális korlátainak beállítása [4.1.1.3. ábra].



4.1.1.3. ábra A konzol terhelő erő és strukturális korlátainak beállítása

Ezt követően a konzol ún. „céljainak – célértékeinek” beállítása, illetve a gyártástechnológia meghatározása lesz a célunk. Az „objectives” fül alatt meghatározhatjuk a tervezés fő céljának a tömeg minimalizációját, vagy a test merevségének maximalizációját egy általunk meghatározott biztonsági tényező érték mellett.

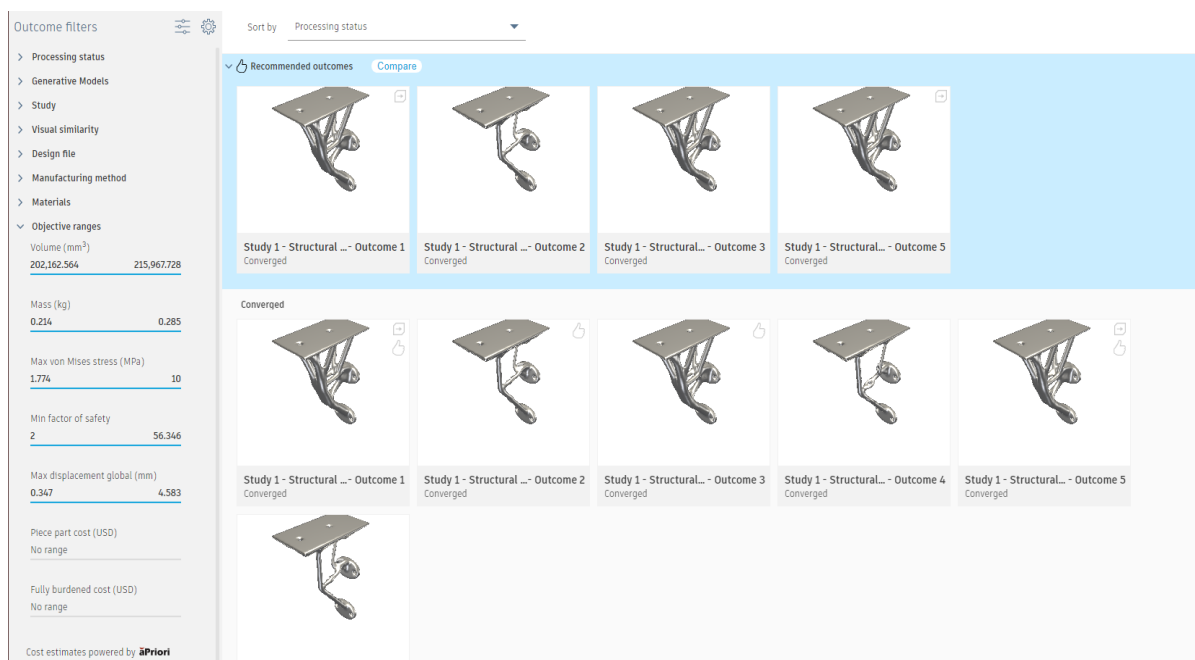
A „manufacturing” fül alatt beállítottam a gyártási eljárás és az azokra jellemző premértéket – mint például a 3D nyomtatása során a test tervezése során megengedett legnagyobb túlnyúlási szöget (overhang angle) -t, hogy elkerüljük a támaszok alkalmazását, ezzel alapanyagot és időt spórolva. [4.1.1.4. ábra]



4.1.1.4. ábra Tervezési kritériumok beállítása

Végezetül legutolsó sorban, az egyik legjelentősebb beállítás következik, az anyagminőség beállítása. A program egy viszonylag nagy anyagminőség adatbázissal rendelkezik, tartalmazva azok legfontosabb mechanikai paramétereit – például: sűrűség, rugalmassági modulus, szakítószilárdság, Poisson tényező stb. – melyből esetemben egy általam betáplált PLA anyagminőséggel végezte a számítást a mesterséges intelligencia, melynek paramétereit a filament gyártó anyag táblázata alapján állítottam be.

A mesterséges intelligencia generálása – iterálási – folyamatai megközelítőleg 15-20 perc alatt befejeződtek, melynek eredményeként 6 db lehetőséget kínált fel, ebből maga által 5 db lehetőséget ajánlottan ítélve. [4.1.1.5. ábra] Az általam használt software nagy előnye, hogy az ilyen nagy igényű számítási folyamatokat egy felhő alapú rendszeren végzi, melynek megoldása lévén egy szerényebb hardwares adottságokkal rendelkező számítógépről is könnyen elvégezhető egy ilyen tervezés.



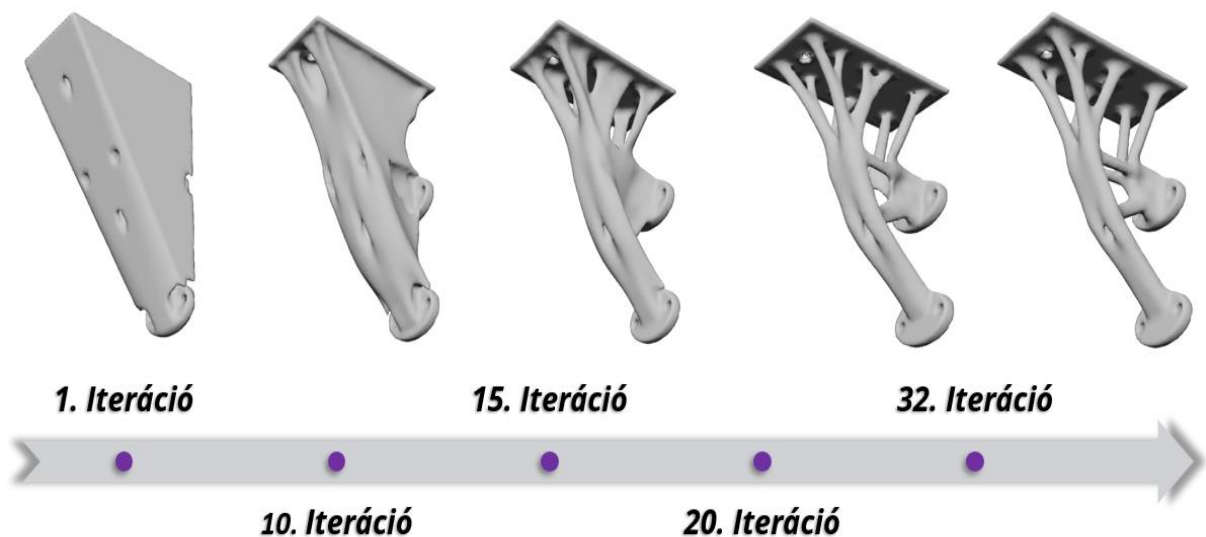
4.1.1.5. ábra A generálás eredményei

A kiválasztás minden esetben a tervező feladata. A kiválasztás során egy kis segítséget adhat egy előzetes – csak tájékoztató jellegű pontatlan – vége selemes feszültség referencia a beállított paraméterek alapján [4.1.1.6. ábra], de erre alapozni nem lehet. Mindenképpen szükséges egy külön nagy pontosságú és jól beállított vége selemszimuláció elvégzése a kiválasztás után.



4.1.1.6. ábra Végeelem referencia a kiválasztás segítése érdekében

A mesterséges intelligencia által végrehajtott generatív tervezés iteratív módszerének különböző állomásait a [4.1.1.7. ábra] tartalmazza.



4.1.1.7. ábra Iteratív generálási folyamatok alakulása

A kiválasztott koncepciót [4.1.1.8. ábra] a programban lehetőségünk van ún. „part” file-á alakítani, mellyel lévén már könnyen végezhetünk rajta apróbb átalakításokat – mint például: furat átmérő módosítást, furat pozíció módosítást – mindazonáltal, meg kell jegyeznem, hogy az ilyen típusú módosításokat célszerű kerülni, vagy újra ellenőrizni, esetleg újra generálni, hiszen a változtatásokkal egyetemben a statikai jellemzők is változnak.



4.1.1.8. ábra A generatív tervezés eredménye

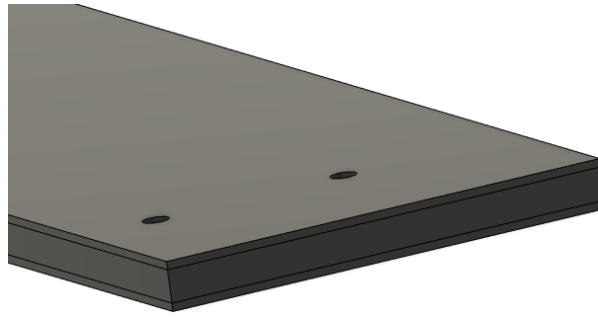
A generatív tervezett alkatrész műszaki dokumentációját a (4.1.1. sz. melléklet) tartalmazza.

4.1.2. Topológiai optimalizáció

Munkám során a kéttámaszú tartó lapját topológiai optimalizációs tervezési eljárással készítem el. A topológiai optimalizáció nagy előnye, hogy a generatív tervezéssel ellentétben magasabb fokú átláthatósággal dolgozik, valamint több lehetőséget ad a tervezés befolyásolására a tervező részéről. A terhelést szintén 35 kg-ban állapítottam meg, hasonlóan a konzol terheléséhez, tehát a számítások során a belső térkitöltés problémájának kompenzálása érdekében 50 kg-os terheléssel végzem a számításokat. A lap kiinduló paraméterei:

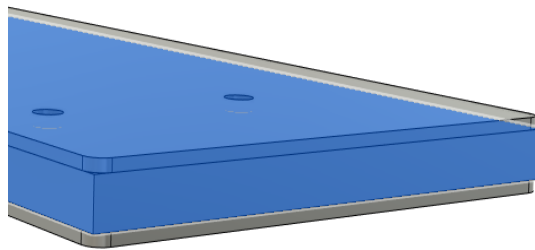
- Befoglaló méretek: 500 x 150 x 15 mm
- Alapanyaga: PLA
- Maximális terhelés a tervezés során: 500 N
- Gyártási eljárás: 3D nyomtatás

A topológiai optimalizáció tervezési sajátosságai miatt a kiinduló keresztmetszet egy 3 felé tagolt 15 mm vastag téglalap lesz, melynek a topológiai optimalizált része 10 mm, míg a befoglaló lapok egyenként 2,5 – 2,5 mm vastagságúak [4.1.2.1. ábra].



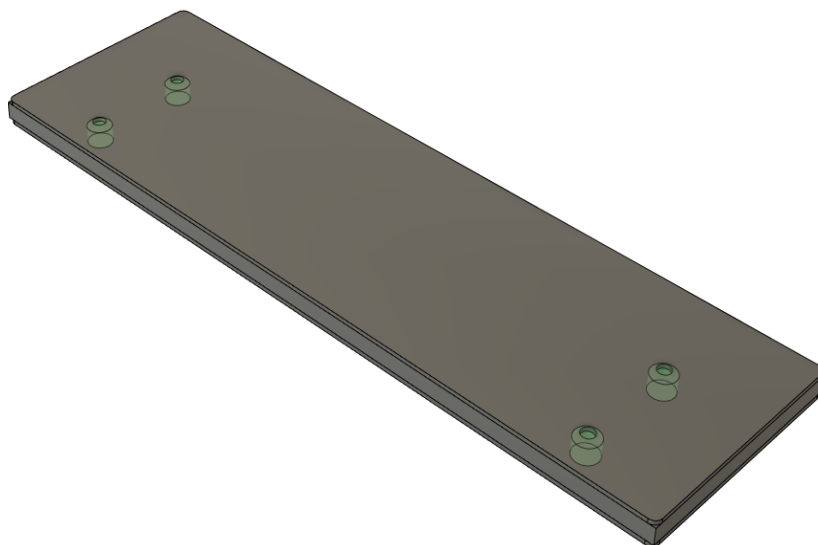
4.1.2.1. ábra Topológiai optimalizáció kiinduló keresztmetszete

Az optimalizáció első lépéseként a feladatomban az úgynevezett cél keresztmetszet megadása, mely a már említett 10 mm-es részegység lesz [4.1.2.2. ábra].



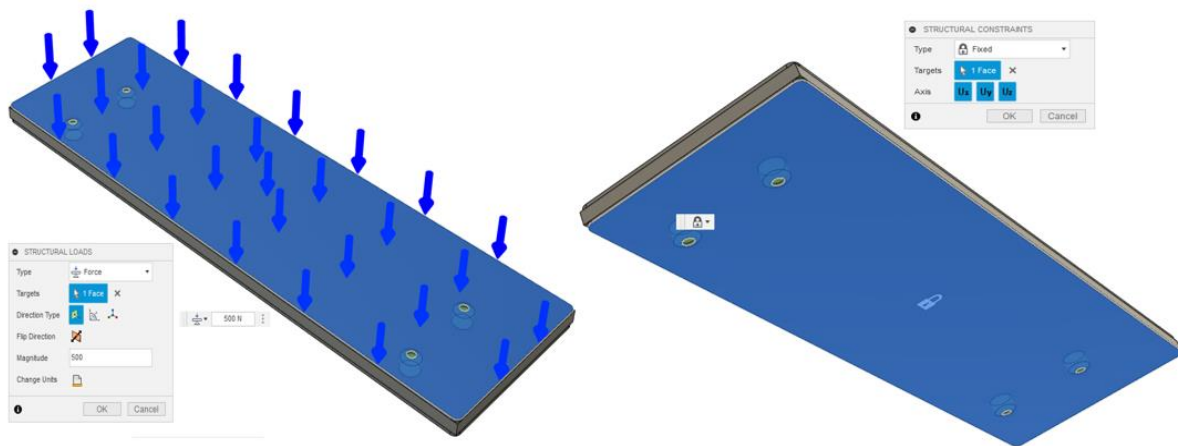
4.1.2.2. ábra Cél keresztmetszet meghatározása

A következő lépés az úgynevezett fenntartott geometriák meghatározása, mely esetemben a lapon lévő furatok. A beállítás során lehetőségünk van egy úgynevezett fenntartott zóna kialakítására, melyre a matematikai algoritmus nem fog tervezni, illetve nem változtatja meg azt [4.1.2.3. ábra].



4.1.2.3. ábra Fenntartott zóna meghatározása

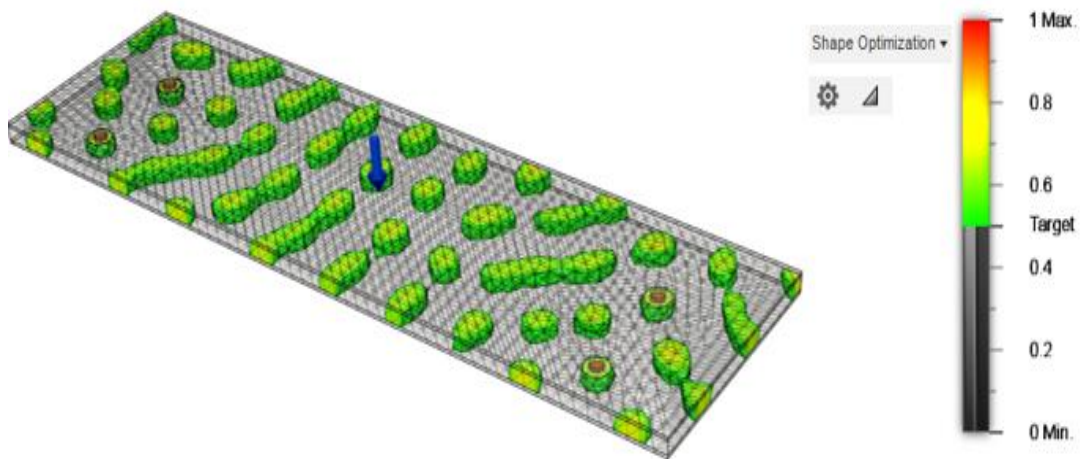
Ezt követően a modell alapanyagát szükséges beállítani, hasonlóan, mint a már említett generatív tervezés során. Az általam beállított lap anyaga PLA, melyet már előzetesen felvittem – a gyártó adatlapja alapján – a tervezőprogram anyag adatbázisába. Ezt követően a lapot terhelő erő és a hozzá tartozó strukturális kényszerreinek beállítása volt a feladat. A beállítás során 500 N-os megoszló terheléssel, illetve „Fixed” típusú kényszerrel oldottam meg ezen alkatrész beállítását [4.1.2.4. ábra].



4.1.2.4. ábra A lapot terhelő erő és strukturális kényszerének beállítása

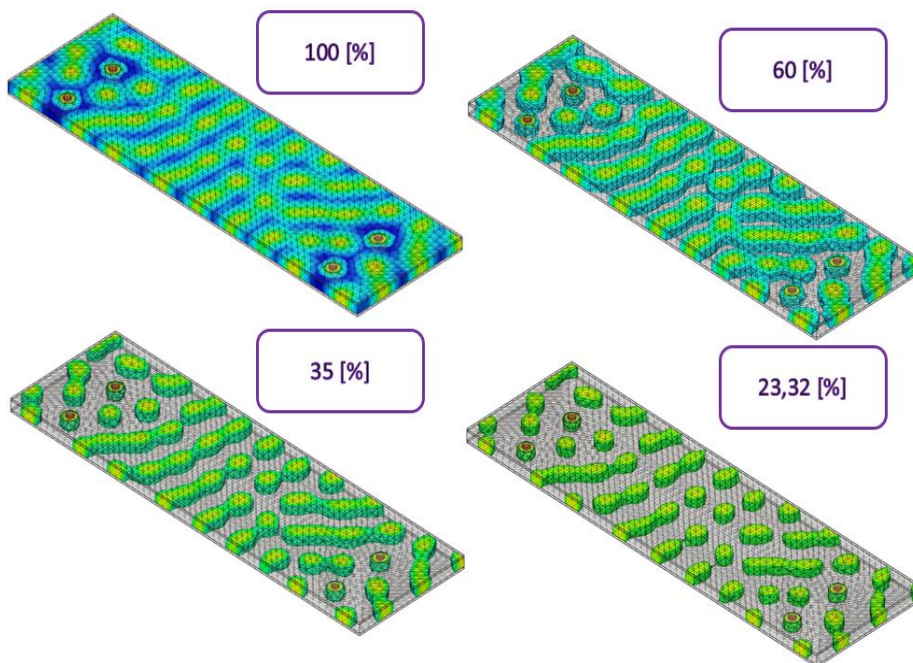
A következő feladat, mivel a lap 3 részegységből állt a modellezés során, ezért a közöttük lévő kapcsolatot szükséges volt beállítani. Ezt „Bonded” típusú kapcsolattal oldottam meg, hiszen ez áll legközelebb a homogén anyaghoz beállítások között található opciók közül. Mindazonáltal, ez az eltérés a valóságtól igazából a nagyobb biztonság felé billenti a tervezési folyamatot, hiszen egy eleve homogén, egy anyagból álló anyag szilárdsága jóval kedvezőbb, mint egy úgynevezett „kötött” kapcsolaté.

Ezen beállítások elvégzése után a topológiai optimalizáció elindítható. A szimulációhoz szükséges hálót a felhő alapú software magának állítja be az optimalizált alkatrész bonyolultsága és összetettsége alapján – hasonlóan a generatív tervezéshez, habár itt nincs beleszólásunk ezen részegységbe az általam használt jelenlegi verzióban. Ennek eredményét az [4.1.2.5. ábra] prezentálja.



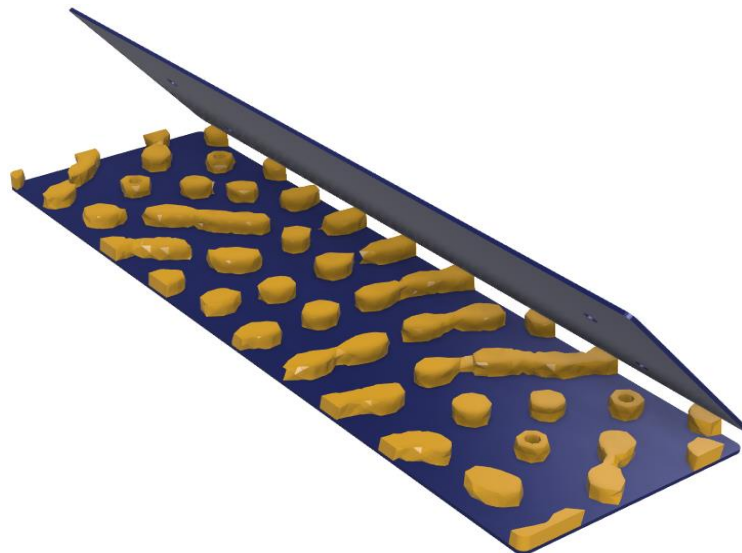
4.1.2.5 ábra A topológiai optimalizált lap

Az eredmény egy az eredetihez képest közel 77 %-kal könnyebb lap [4.1.2.5. ábra], melynek kialakítása esztétikusabb is az emberi szem számára. Az eredmény a tervező által enged felülírást, egy csúszka lévén [4.1.2.6. ábra], ahol az optimalizáció fokát akarunk szerint változtathatjuk a józan ész határain belül.



4.1.2.6. ábra A topológiai optimalizáció állomásai és jellemzői

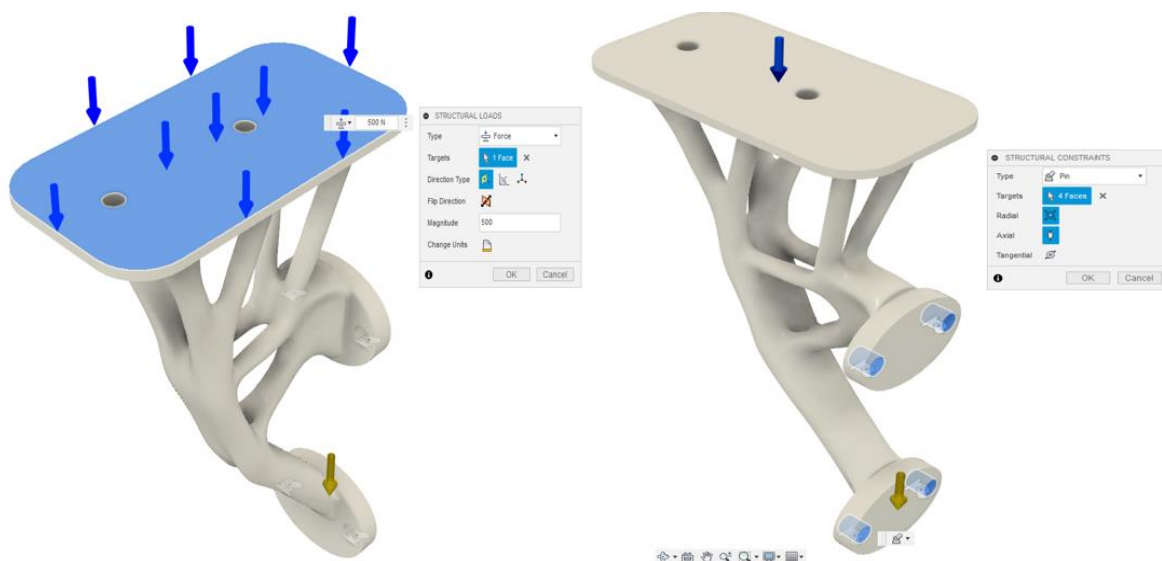
Az eredményt a generatív tervezéshez hasonlóan egy „part” típusú fileá alakíthatjuk, mely már könnyen kezelhető, szerkeszthető egy akár más tervező programban is. A kész eredményt az [4.1.2.7. ábra] reprezentálja, illetve műszaki dokumentációját a (4.1.2.sz. melléklet) tartalmazza.



4.1.2.7. ábra A topológiai optimalizált lap

4.1.3. Végeselem szimuláció – a generatív tervezett tartó konzol

A generatív konzol végeselem szimulációját az előzetesen is alkalmazott Autodesk Fusion360 tervezőprogramban végzem. A szimuláció első feladata az anyagbeállítás, mely a generatív tervezés során általam betáplált PLA alapanyag volt. Ezt követően a feladatom a konzol „pin-típusú” strukturális kényszereinek beállítása, illetve a konzolt terhelő „Z-irányú”, avagy vertikális irányú erő beállítása volt [4.1.3.1. ábra]. Ahogy már említettem, a Fusion360 jelenlegi verziója nem képes a 3D nyomtatás során alkalmazott belső térkitöltés (infill) kezelésére, hanem tömör anyaggal számol, ezért a 350 N-os terhelő erő helyett 500 N-os terheléssel végzem a szimulációt.

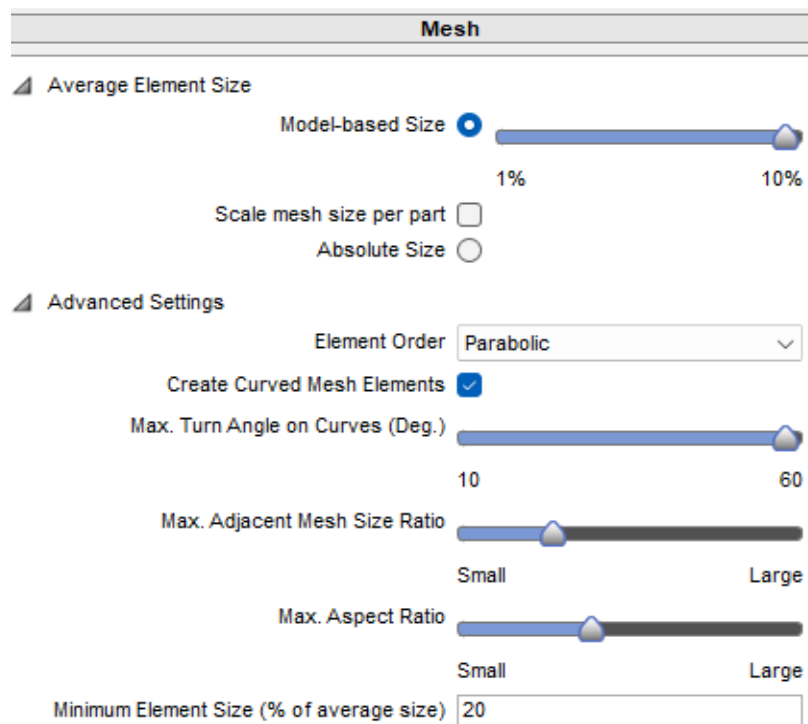


4.1.3.1. ábra A végeselem szimuláció strukturális kényszereinek és terhelő erőinek beállítása

Ezt követően a következő állomás a konzol hálózásának beállítása volt. A hálózás során a software lehetőséget kínál a vizsgált alkatrész geometriájához igazított háló beállítására. A hálózás beállításai a következők voltak:

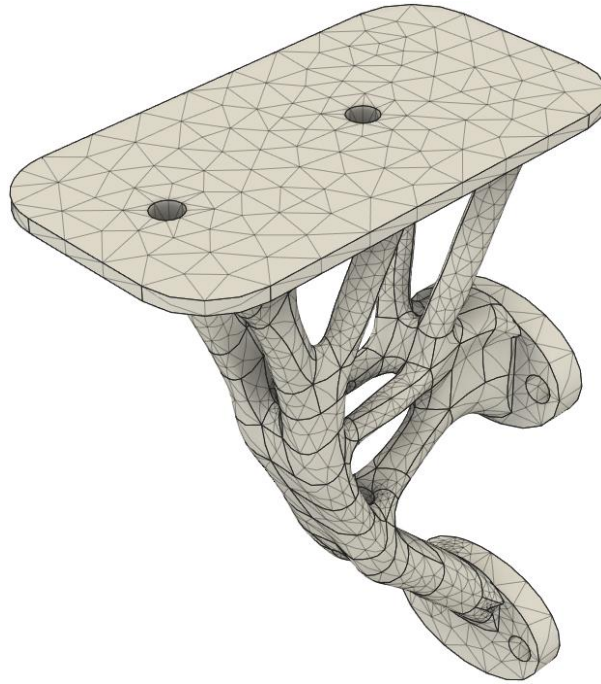
- Hálót alkotó elemek sorrendisége: Parabolikus
- Hálót alkotó elemek mérete a modellhez képest: 10 %
- Minimális elemnagyság (százalékos értéke a test átlagméretének): 20 %
- Íves éleken való maximális elfordulási szög: 60 fok

A hálózási beállításokat a [4.1.3.2. ábra] -n szemléltetem, mivel egyes értékeket szöveges formában nem lehet megadni.



4.1.3.2. ábra Hálózási beállítások

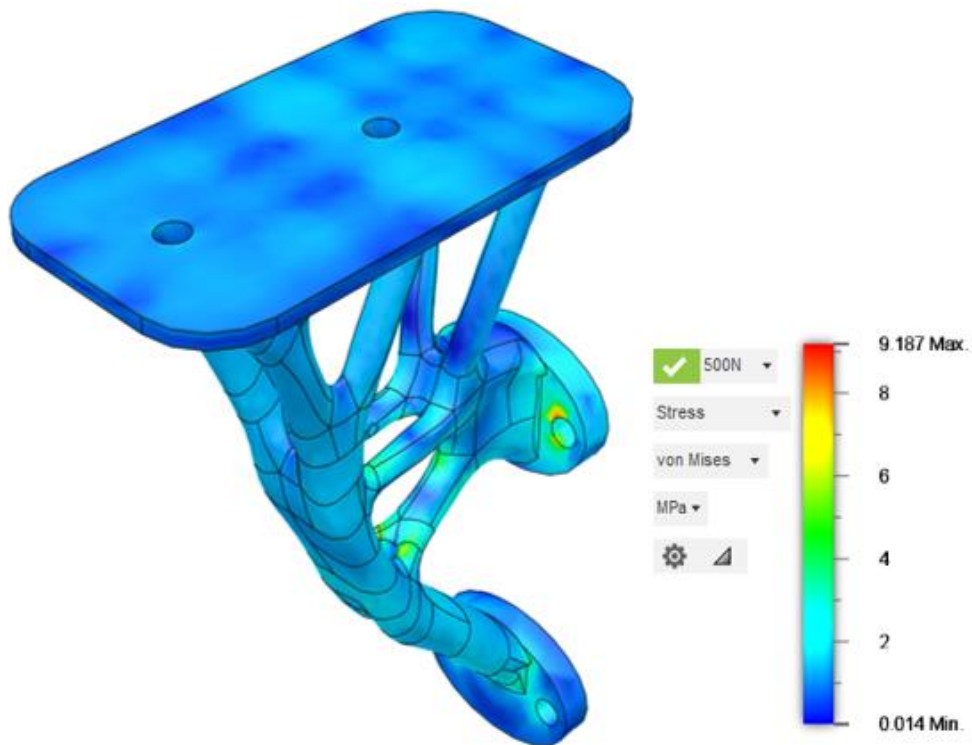
A háló generálás során kapott hálót a [4.1.3.3. ábra] szemlélteti, melyen teljes mértékben látható ennek a típusú hálózási technikának a nagy előnye, mely a nagy, egyszerű felületeket, mint esetemben a konzol lapjának nagyobb elemmérettel, míg a konzol érintkezési felületein, vagy a furatokon kisebb méretű – sűrűbb – hálózást alkalmazott a software.



4.1.3.3. ábra A generált háló

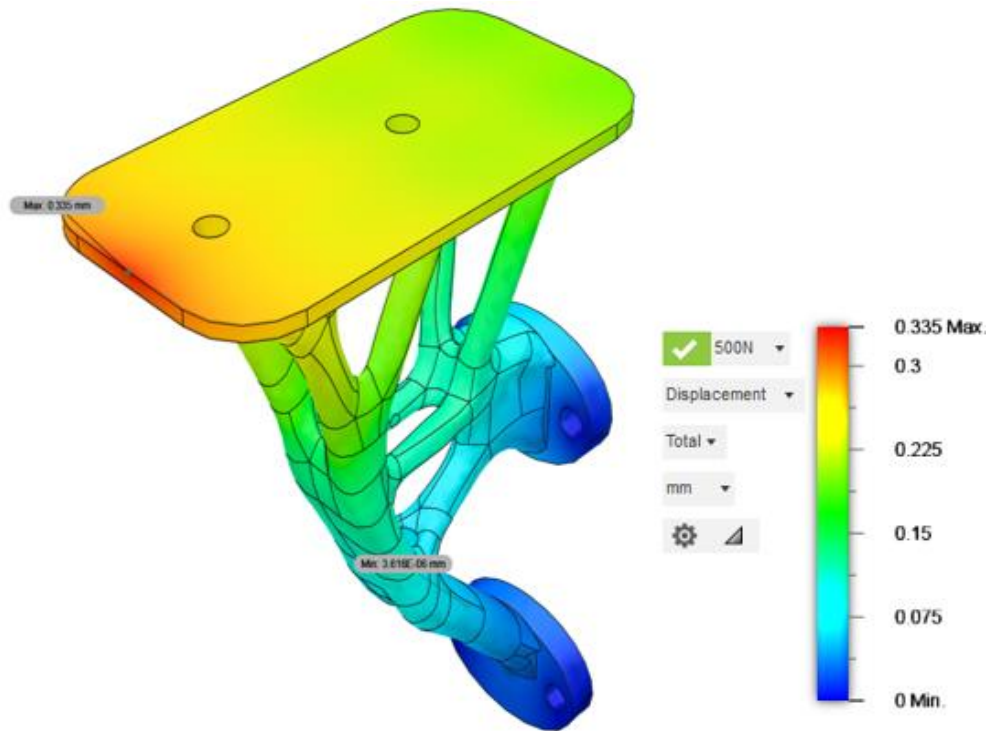
Ezen beállítások után a végelem szimuláció megkezdhető, melyek eredményeit az alábbi [4.1.3.4. ábra], [4.1.3.5. ábra] és [4.1.3.6. ábra] tartalmazza.

- Egyenértékű (von Mises) feszültségeloszlás:



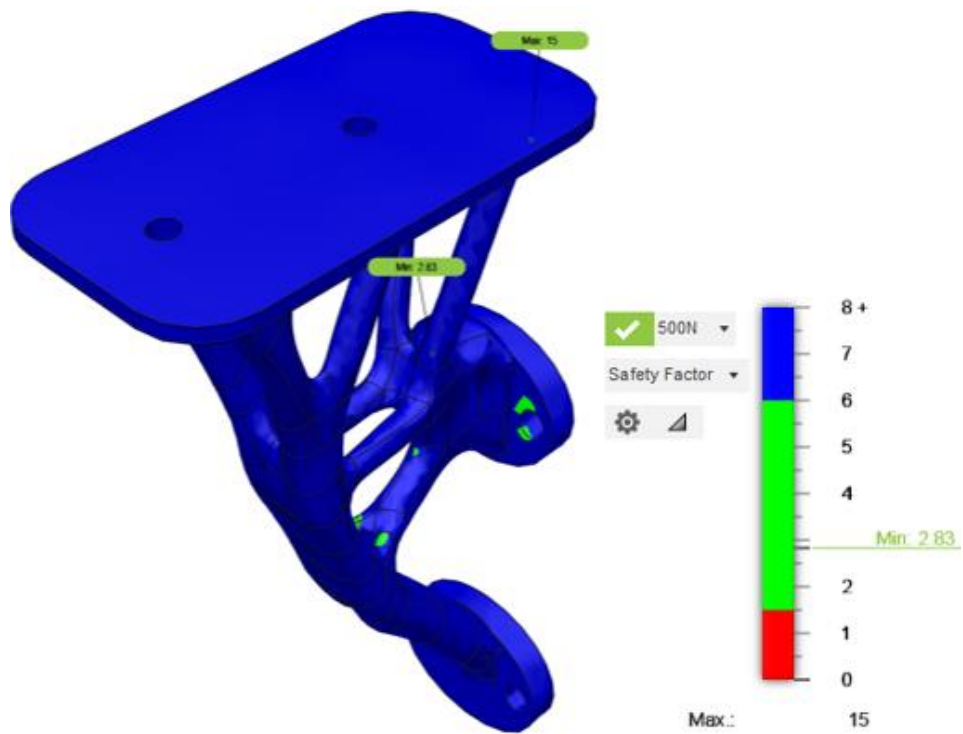
4.1.4.4. ábra Egyenértékű (von Mises) feszültségeloszlás

- Deformáció:



4.1.3.5. ábra Deformáció

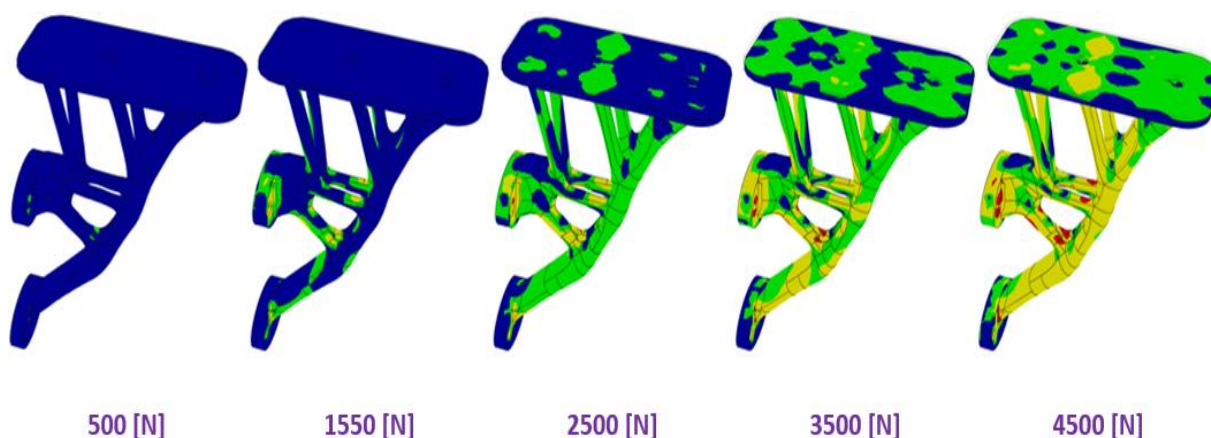
- Biztonsági tényező eloszlás:



4.1.3.6. ábra Biztonsági tényező eloszlás

A végeselem szimuláció alapján 500 N-os terhelés mellett egy tömör belső térkitöltésű konzolban ébredő egyenértékű (von Mises) feszültség nagysága 9,19 MPa, míg az alapanyagban legnagyobb megengedett feszültség – táblázatos értékek alapján – 70 MPa, (3DJake, 2023) tehát ezen paraméter vizsgálata esetében a konzol megfelelt. A deformációs szimuláció alapján a már említett paraméterek mellett a legnagyobb deformációs érték 0,335 mm, mely a tartó 219 mm-es magassága alapján elhanyagolható, tehát ezen paraméter esetén is a konzol megfelelt. A biztonsági tényező eloszlás vizsgálat során a legkisebb biztonsági tényező értéke 2,83, mely túlszárnyalja a generatív tervezés során meghatározott 2x-es biztonsági tényezőt, tehát a tartó ezen téren is megfelelt. Összefoglalva, a tartó konzol megfelel a vele szemben támasztott követelményeknek a végeselem szimuláció alapján.

Ahogy előzetesen már említettem, a tervező program nem veszi figyelembe a 3D nyomtatás során alkalmazott belső térkitöltést. A végeselem szimuláció során 500 – 4500 N közötti terhelési skálát állítottam be, melynek megfigyelése során jól látható a teljes tönkremenetelig tartó kompressziós vizsgálat során felléphető lehetséges gyengepontok [4.1.3.7. ábra] Ezen adatok jó összehasonlítási lehetőséget adhatnak a jövőbeli anyagvizsgálat és a végeselem szimulációról, melyből következtethetünk a szimulációs adatok megadásának valóságosságára. Az alábbi ábrán a várható törésponti helyzetek piros színnel vannak megjelölve.



4.1.1.7. ábra Tartóban kialakuló biztonsági tényező eloszlás szemléltetése Autodesk Fusion360 végeselem szimuláció programban

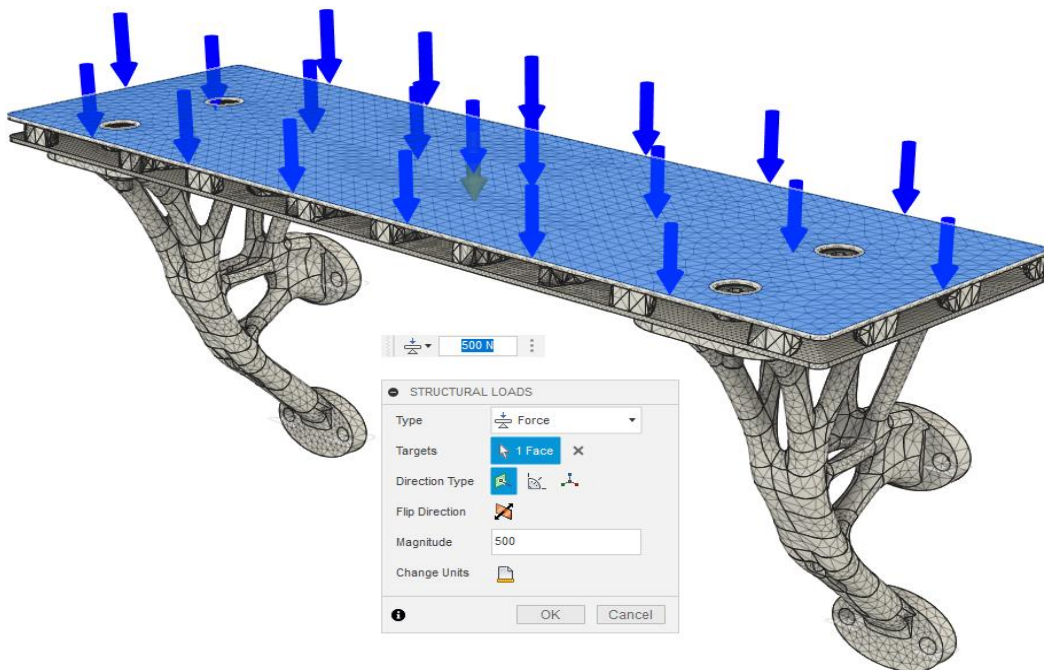
4.2.3. Végelem szimuláció – a teljes szerkezet

A teljes szerkezet vizsgálatát Autodesk Fusion360 tervezőprogramban fogom elvégezni. A teljes szerkezet végelem vizsgálata során a következő paraméterek kerülnek vizsgálat alá:

- A szerkezetben ébredő egyenértékű (von Mises) feszültségek mértéke
- A szerkezetben keletkező deformáció
- A szerkezet biztonsági tényező eloszlását

A vizsgálat során a terhelőerőt – a már előzőekben ismertetett okokból – 500 N-ban határozom meg, melyet magára a teljes polcszerkezet lapjára helyezem, mint megoszló terhelést, ezzel is növelve a szerkezet biztonsági tényezőjét.

A szimuláció első feladataként a szerkezetet terhelő erőt, illetve strukturális kényszereinek megadása szükséges. Ezeknek a megadása a [4.1.4.1 ábra] -n látható.

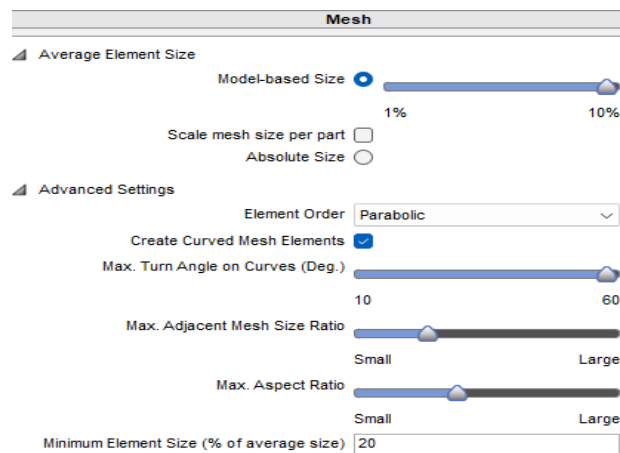


4.1.4.1. ábra A szerkezetet terhelő erő és strukturális kényszerek

Ezt követően az úgynevezett kontaktok beállítása volt a feladat, hiszen a szerkezet több alkatrészből (csavarok, topológiai optimalizált lap, generatív tervezett tartó konzol) áll. Ezeknek a beállítását a software automatikusan végzi az összeállításban beállított strukturális kényszereket alapul véve.

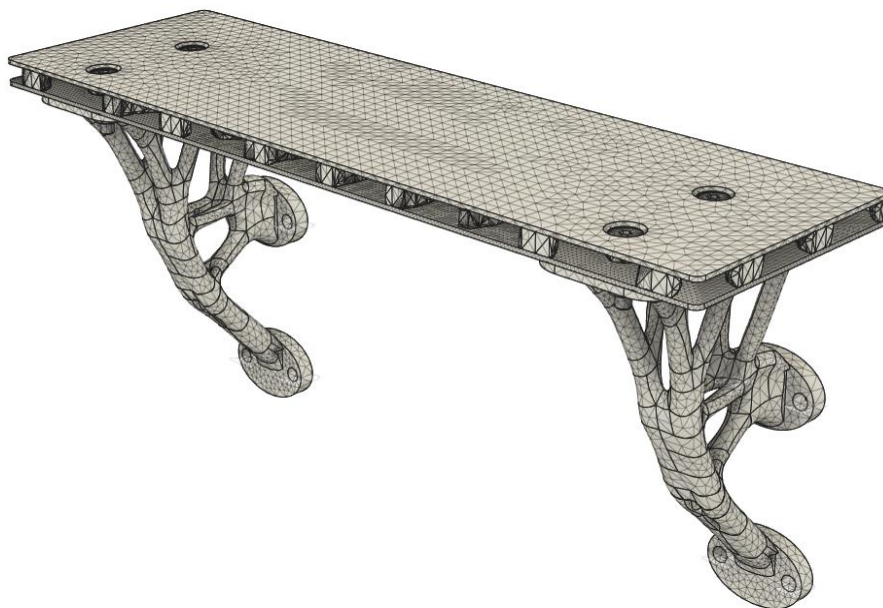
A szimuláció megkezdődése előtt az utolsó feladat a hálózás beállítása volt. A hálózás beállítása a generatív tervezett tartó hálózásának beállításához hasonlóan zajlik. A hálózás során a software lehetőséget kínálja a vizsgált alkatrész geometriájához igazított háló beállítására. A hálózás beállításai a következők voltak [4.1.4.2. ábra]:

- Hálót alkotó elemek sorrendisége: Parabolikus
- Hálót alkotó elemek mérete a modellhez képest: 10 %
- Minimális elemnagyság (százalékos értéke a test átlagméretének): 20 %
- Íves éleken való maximális elfordulási szög: 60 fok



4.1.4.2. ábra A teljes szerkezet hálózásának beállítása

A teljes szerkezet háló generálásának eredményét a [4.1.4.3. ábra] reprezentálja.



4.1.4.3. ábra A szerkezet hálózása

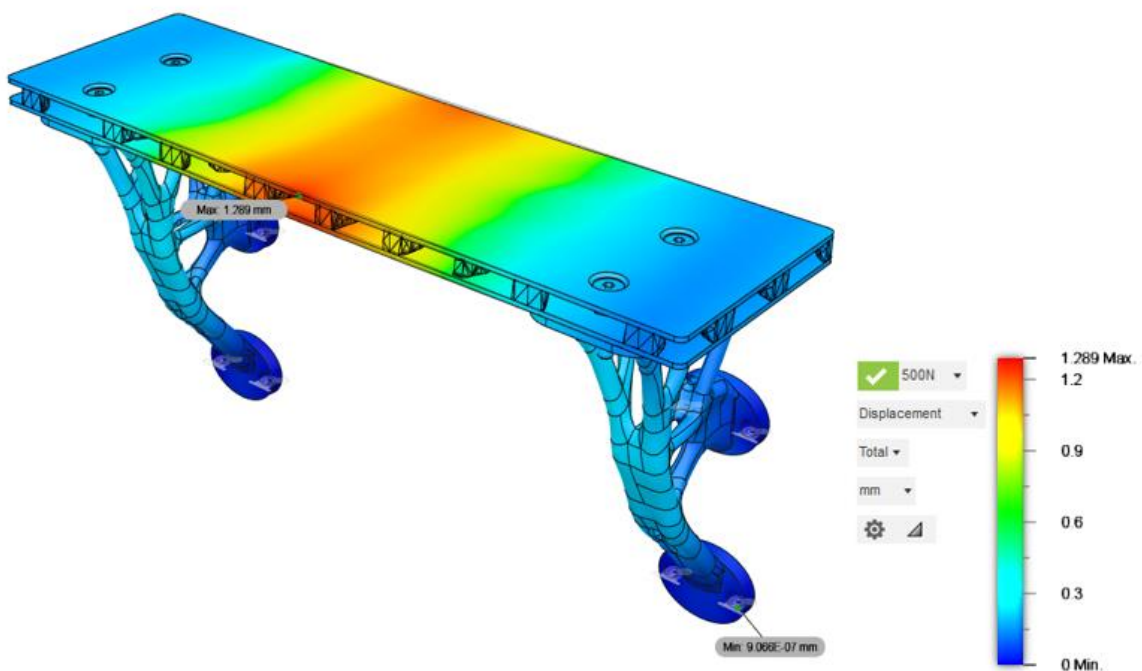
Ezen beállítások megadása után megkezdhető a végelem szimuláció lefuttatása, melynek eredményeit a [4.1.4.4. ábra], [4.1.4.5. ábra] és a [4.1.4.6. ábra] tartalmazza.

- Egyenértékű (von Mises) feszültségeloszlás:



4.1.4.4. ábra A teljes szerkezet egyenértékű (von Mises) feszültségeloszlása

- Deformáció:



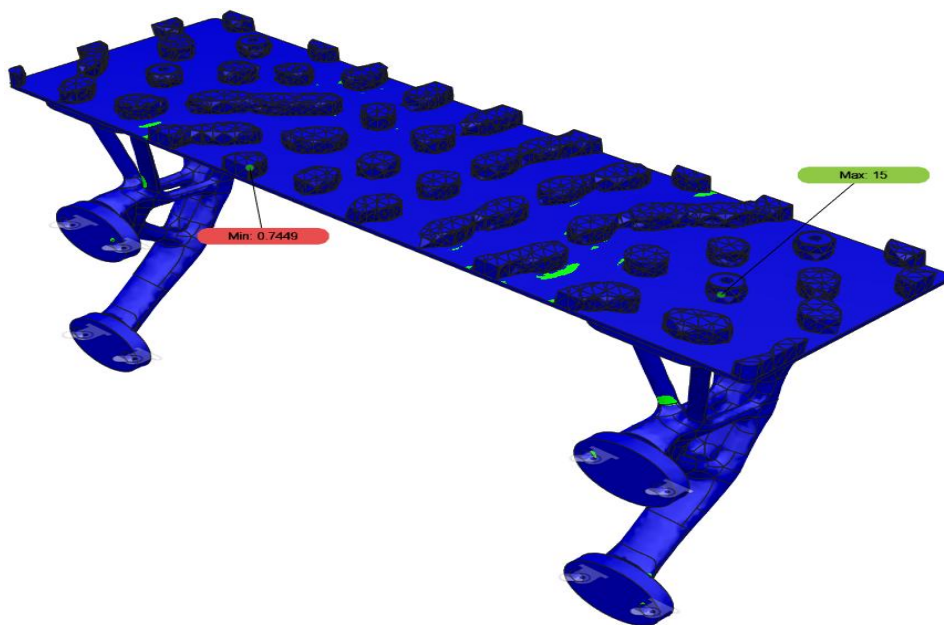
4.1.4.5. ábra A teljes szerkezetre ható deformáció

- Biztonsági tényező eloszlás:



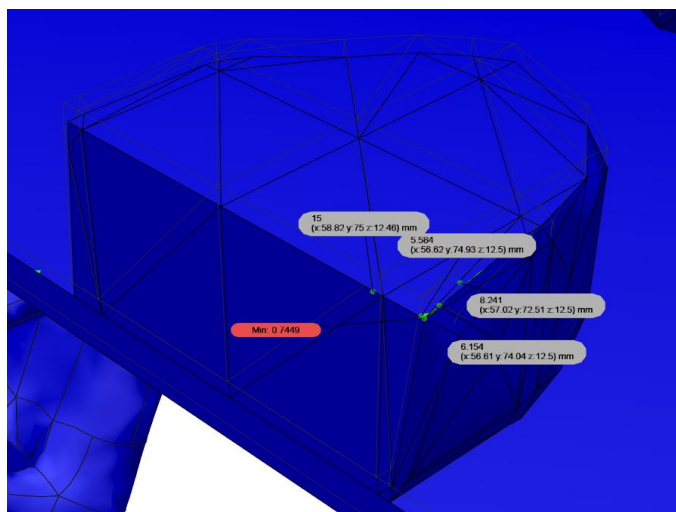
4.1.4.6. ábra A teljes szerkezet biztonsági tényező eloszlása

Jól látható, hogy a [4.1.4.6. ábra] -n a biztonsági tényező jóval alacsonyabb a várható értéknél. Ez a tapasztalatlan szemel téves következtetés levonására sarkallhatja, azonban jobban megvizsgálva a kiemelkedő értéket, rájöhethetünk, hogy ez csak egy elszigetelt, kifejezetten apró rész, mely a teljes szerkezet méreteit figyelembe véve teljes mértékben elhanyagolható [4.1.4.7. ábra].



4.1.4.7. ábra A kiemelkedően alacsony biztonsági tényező érték vizsgálata

Ennek oka, hogy a topológiai optimalizációból való „part file” -ba való importálás során a kialakuló „anyagszigetek” oldalfalai mesh-szerűek. A végeleemes szimuláció során, mint már ismertettem, szükségünk van egy hálózasi beállításra, mely a már mesh-szerű oldalfalakat is úgymond „újra” hálózza. Ennek folyamán, olyan indokolatlanul kis háló egységek keletkeznek, melyek ilyen típusú alacsony biztonsági tényező értékhez vezethetnek. A kiemelkedően alacsony érték vizsgálata során megvizsgáltam több ilyen lehetséges torzításra alkalmas területet is, a software úgynevezett „pontvizsgáló-szonda” opciójával, azonban ehhez hasonló kimagaslóan alacsony értéket egy helyen sem sikerült felfedeznem. [4.1.4.8. ábra]



4.1.4.8. ábra A kimagaslóan alacsony érték pontvizsgáló-szonda opcióval való vizsgálata

4.1.5. Végelelem szimuláció a teljes szerkezetre - végső eredmények kiértékelése és konklúzió

A teljes szerkezeten lefuttatott végelelem szimuláció során a következő eredményeket kaptam:

- A legnagyobb egyenértékű (von Mises) feszültség: 27,28 MPa
- A legnagyobb keletkező deformáció: 1,29 mm

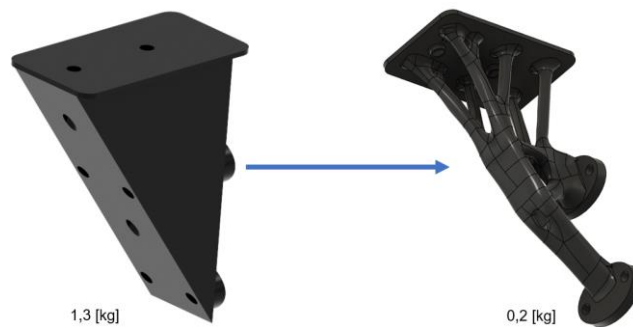
A deformációs érték először jelentősnek tűnhet, azonban, mivel egy polimer alapanyagú topológiai optimalizált tartó lapról van szó, mely kísérletnek a lényege a lehető legtöbb alapanyag csökkentés a megadott 500 N-os terhelés sikeres megtartása mellett, így teljesen reálisnak és életképesnek hat a kapott eredmény. A legnagyobb egyenértékű von Mises feszültségérték teljesen elfogadható tartományon belül található, hiszen a gyártó által megadott legnagyobb 70 MPa-os érték alatt található. A tartót megfeleltnek minősíthető.

4.1.6. Additív-, és Szubtraktív gyártástechnológiával elérhető eredmény összehasonlítása

A fent tárgyalt esetben az additív gyártástechnológia és a generatív tervezés, valamint a topológiai optimalizáció segítségével jelentős anyagmegtakarítást érhattünk el, megegyező szilárdsági paraméterek mellett. Az alábbi fejezetben tüzetesen bemutatom ezen innovatív tervezési folyamatokat és ismertetem a számszerű eredményeket.

- *Generatív tervezéssel elért eredmények*

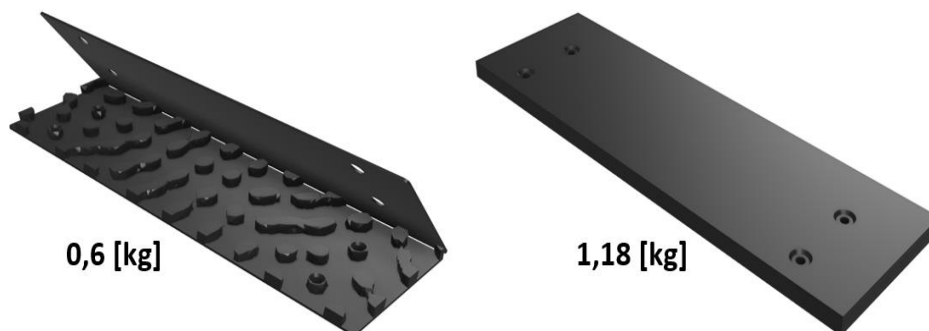
A kéttámaszú tartó konzoljának tervezésére a fentiekben is ismertetett generatív tervezési módszert alkalmaztam. Ezen technológia lévén jelentős: **83,6 %-os súlycsökkenést** értünk el – az eredetivel megegyező mechanikai szilárdság mellett –, továbbá a természetes fa struktúra szerű kialakítás okán esztétikai szempontból is pozitív hatást gyakorol az emberi szem számára. [4.1.6.1. ábra]



4.1.6.1. ábra Szubtraktív technológiával (balra) és additív technológiával (jobbra) elkészíthető konzol

- *Topológiai optimalizációval elért eredmények*

A tartó lapjának tervezését – mint már ismertettem – topológiai optimalizációval végeztem. Az optimalizáció lévén a közbenső részegység tömegét **76,68 %-kal sikerült lecsökkenteni**, miközben a már ismertetett feltételek mellett a szerkezet képes a megadott terhelés elviselésére. [4.1.6.2. ábra]





4.1.6.2. ábra Szubtraktív technológiával (balra) és additív technológiával (jobbra) elkészíthető lap

- *Tervezési munkálatok végeredménye és konklúziója*

Összességében megállapítható, hogy ez a típusú innovatív tervezési folyamat számos előnnyel rendelkezik. Ilyen lehet például a gazdasági (redukált anyagköltség), technológiai (formabontó technológiai megoldások – belső alakos felületek), esztétikai/ergonómiai (természetes formavilág). Fontos megjegyezni, hogy a fentebb tárgyalt fejezetek olyan viszonylag friss technológiai megoldásokat elemeznek és alkalmaznak, amik a jövőben akár a hagyományos, nagyrészt kiforrott gyártástechnológiai és tervezési megoldások helyét is átvehetik majd az ipari mindennapok során. A jelen esetre vonatkozó eredményeket a [4.1.6.1. táblázat] foglalja össze röviden.

4.1.6.1. Táblázat Additív és hagyományos gyártástechnológiai tervezés eredményeinek összehasonlítása:

Additív gyártástechnológiai tervezés eredményei a hagyományozhoz viszonyítva	
Szubtraktív technológia	Additív technológia
	
2,5 kg	0,8 kg
Hagyományosan megmunkálható	Additív megmunkálás szükséges
Hagyományos „szögletes” formavilág	Esztétikus, innovatív formavilág
Átlagos tervezési szaktudást igényel, mivel kiforrott technológia alkalmazása szükséges	Magas tervezési szaktudást igényel, mivel egy friss technológia alkalmazása szükséges
~ 4,8 kg alapanyag	~ 1 kg alapanyag
35 kg terhelhetőség	
Megegyező szilárdsági paraméterek	

Végeredményben az a konklúzió vonható le az elvégzett tervezési munkálatokból, hogy habár ezek az innovatív technológiák jelentős előnyökkel rendelkeznek, azonban a technológia jelenleg is kezdő fázisa miatt jelentős bekerülési költséget, valamint naprakész, nem általános tudásanyagot kíván meg az ezzel foglalkozó cégektől és szakemberektől.

4.2. Megvalósítás – 3D nyomtatás

Az előzetesen ismertetett kéttámaszú tartó tartó részét a saját – Elegoo Neptune 4 Pro– FDM típusú nyomtatómmal [4.2.1. ábra] fogom elkészíteni. A nyomtatás során **Ultimaker Cura 5.4.0** slicer programot fogok alkalmazni. A nyomtató hasznos munkatere $225 \times 225 \times 265 \text{ mm}$. Fontosnak tartom megjegyezni, hogy ez a nyomtató kéztónás fűtött munkaasztallal rendelkezik, valamint a maximális nyomtatási sebessége 500 mm/s , melyet a különböző szerszámmozgások során ki is használ a gyakorlati tapasztalatok alapján és ez hatással lehet majd a kész darab viselkedésére az alkalmazott nyomóvizsgálatok során.



4.2.1. ábra Elegoo Neptune 4 Pro

A kéttámaszú tartó lapjának nyomtatását a konzulensem – Creality CR-30 – FDM Belt Printer típusú 3D nyomtatóján [4.2.2. ábra] fogom elvégezni. Ezen nyomtatót nyomtató elvi működését a „2.3.5. – Futószalagos FDM nyomtató” c. fejezet részben ismertettem. A nyomtatáshoz szükséges technológiai paraméterek beállítását **Creality Slicer 4.8** nevű slicer szoftverben fogom végezni.



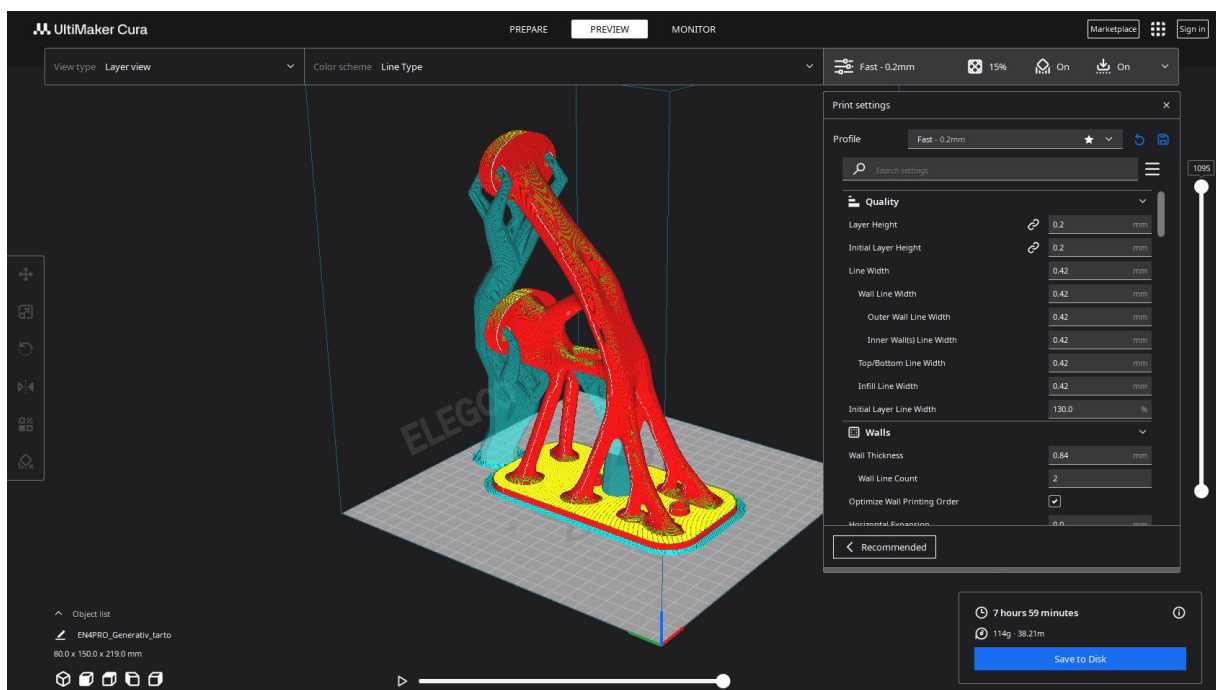
4.2.2. ábra Creality CR-30 Belt Printer [11.]

4.2.1. Slicer szoftver beállítások

A slicer szoftverben számos, a 3D nyomtatás során meghatározandó technológiai paramétert állíthatunk be. A beállítások során a technológiai paraméterek mellett beállíthatjuk még a nyomtatás során a 45°-os kritikus dőlésszöget kiküszöbölő úgynevezett support (támasz) rendszert, valamint végeredményben ezen beállítások alapján a szoftver egy úgynevezett G-kódot generál, melyet a nyomtató értelmezni képes – az iparból is ismert NC/CNC megmunkáló gépekhez hasonlóan.

A generatív tervezett tartó alapvető nyomtatási paramétereit [4.2.1.1. ábra]:

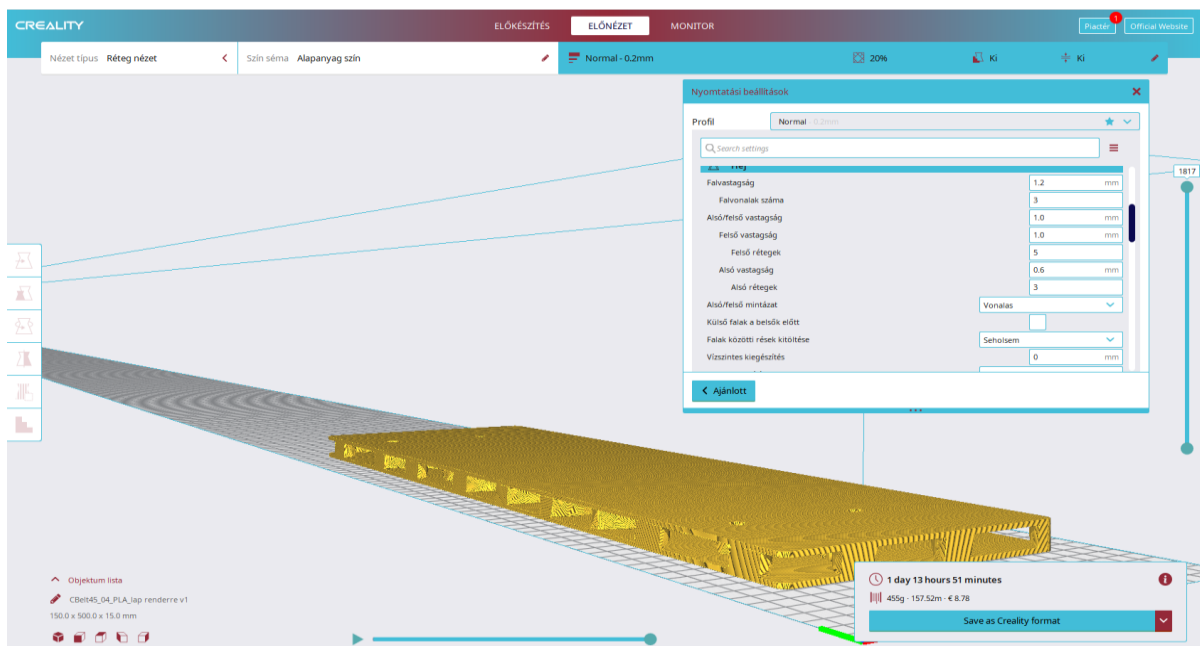
- Nyomtatás során használt alapanyag: PLA
- Nyomtatási sebesség: 250 mm/s
- Nyomtatási hőfokok:
 - Ágy: 60 °C
 - Fúvóka: 210 °C
- Fúvóka átmérő: 0,4 mm
- Rétegvastagság: 0,2 mm
- Infill (kitöltési) sűrűség: 15 %
- Infill minta típus: Gyroid
- Támasz típusa: Tree



4.2.1.1. ábra A tartó nyomtatásához szükséges beállítások Ultimaker Cura slicer szoftverben

A topológiai optimalizált lap alapvető nyomtatási paraméterei [4.2.1.2. ábra]:

- Nyomtatás során használt alapanyag: PLA
- Nyomtatási sebesség: 35 mm/s
- Nyomtatási hőfokok:
 - Fúvóka: 210 °C
 - Szíj: 60 °C
- Fúvóka átmérő: 0,4 mm
- Infill (kitöltési) sűrűség: 15%
- Infill minta típus: Lines



4.2.1.2. ábra A lap nyomtatásához szükséges beállítások Creality Slicer softwareben

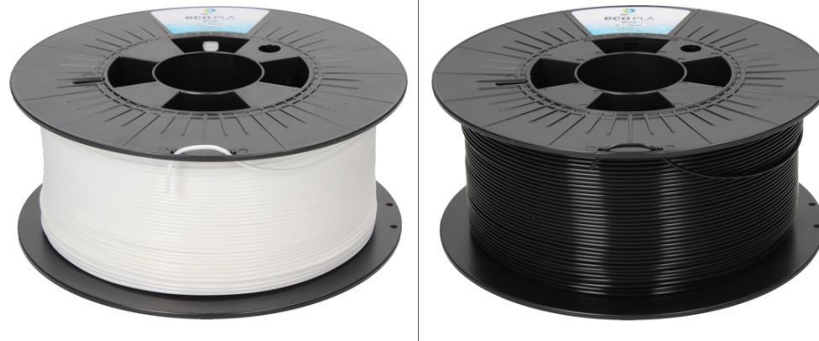
Ezen beállítások elvégzése után a kapott G-kódokat külső adathordozókra mentettem (Pendrive és SD kártya) majd megkezdtem a nyomtatási munkálatokat.

4.2.2 3D nyomtatás – Generatív tartó konzol

A nyomtatás során, a megfelelő eredmény elérése érdekében az ilyenkor szükséges technológiai feltételek ellenőrzése elengedhetetlen. Az említett technológiai paraméterek a következők:

- Megfelelő szíj feszesség
- Megfelelő görgő feszesség
- Asztal szintezési beállításai

Ezen paraméterek beállítása és a filament betöltése után megkezdődhet a nyomtatás. A nyomtatás során a generatív tervezett tartó alapanyagául 2 fajta filamentet [4.2.2.1. ábra] – 3D Jake ecoPLA fehér színű, valamint 3DJake ecoPLA fekete színű – fogok használni. Ezen filamentek mechanikai tulajdonságát tartalmazó táblázatot a (4.2.1. melléklet) tartalmazza.



4.2.2.1. ábra A generatív tervezett polc alapanyagai (3DJake, 2023)

Az előzetes munkálatok eredménye – a generatív tervezett 3D nyomtatott munkadarab – a következő [4.2.2.2. ábra] – n látható:



4.2.2.2. ábra A kinyomtatott generatív tartó

Ezen nyomtatást több alkalommal is el fogom végezni eltérő fűvóka átmérő típusokkal a kísérlet megvalósíthatósága érdekében, mely tartalmát a későbbi fejezetben fogom ismertetni az erről szóló fejezetben.

4.2.3. 3D nyomtatás – Topológiai optimalizált lap

A nyomtatás első feladatáaként a már ismertett technológiai feltételek ellenőrzése ezen nyomtatás megkezdése előtt is elengedhetetlen. A nyomtatás során használt „Belt Printer” típusú 3D nyomtató konstrukciójában különbözik a megszokott Cartesian típusú 3D nyomtatókétól, azonban beállításának elve nem sokban különbözik ezektől. Az ellenőrizendő paraméterek:

- Futószalag feszesség ellenőrzése
- Futószalag esetleges elcsúszásának korrigálása
- 4 ponton való szintezés beállítása
- Görgő feszesség beállítása

A nyomtatás alapanyagaként a 4.2.2. fejezet rész [4.2.2.1. ábra] -án ismertett fekete színű Elegoo PLA-t használtam. A „Belt Printer” -en való nyomtatási munkálatok folyamata a [4.2.3.1. ábra] -n látható.



4.2.3.1. ábra A topológiai optimalizált lap nyomtatásának folyamata nyomtatás közben

A nyomtatást két részre bontva oldottam meg [4.2.3.2. ábra], mivel a topológiai optimalizáció során kialakított sziget-szerű elemek között olyan hidak keletkeztek volna az egyben történő nyomtatás során, melyeket a nyomtató nem lett volna képes áthidalni.



4.2.3.2. ábra A két részből nyomtatott lap

A két rész összefogatását egyrészt a négy darab M8-as süllyesztett fejű, belső kulcsnyílású csavar, illetve Pacer RX-100 jelű Etil-cianoakrilát alapú ipari pillantragasztó alkalmazásával oldottam meg.

A lap nyomtatását a gépszerkezettani tanszéken található nagy munkaterű ipari 3D nyomtatóján (Builder Extreme 2000 Pro) [4.2.3.3. ábra] is kinyomtattam (megegyező paraméterek mellett), mivel a belt printer extruderének pozíciója 45° -os szögben van – mely torzíthatja a későbbi mérési eredményeket – eltérően a generatív tervezett tartó konzol nyomtatása során alkalmazott cartesian típusú nyomtató 90° -os extrúder helyzetéhez képest.



4.2.3.3. ábra Builder Extreme 2000 Pro ipari 3D nyomtató

4.2.4. 3D nyomtatás – Topológiai optimalizált lap

A nyomtatási folyamatok végeztével a következő feladat egyrészt a generatív tervezett, másrészt a topológiai optimalizált alkatrészekből a kéttámaszú tartó szerkezet összeállítása volt. Ezen alkatrészek összefogatására 4db M8-as süllyesztett fejű, belső kulcsnyílású csavarokat, illetve az ehhez való M8-as anyacsavarokat használtam. A kész, összeállított szerkezet a [4.2.4.1. ábra] és [4.2.4.2. ábra] -n látható. Az összeállítási dokumentációkat a (4.2.4.1.sz. melléklet) tartalmazza.



4.2.4.1. ábra A kész szerkezet összeállítása - 1. kép



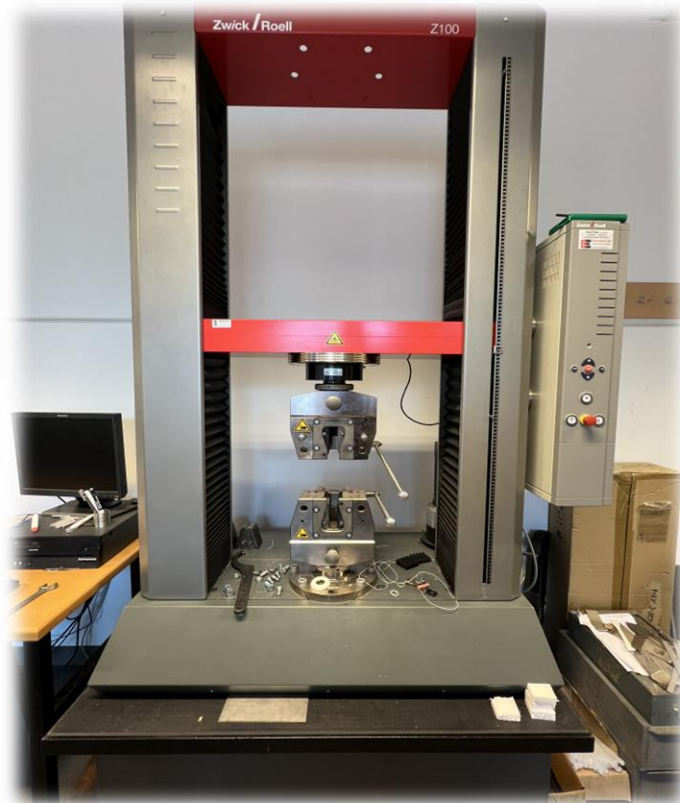
4.2.4.2. ábra A kész szerkezet összeállítása - 2. kép

4.3. Mechanikai kísérlet

A mechanikai kísérletem kutatási témája az előző fejezetben ismertetett generatív tervezett tartó konzol különböző fűvőkákkal való nyomtatása. A fűvőkák közötti eltérés az extrudáló keresztmetszet átmérőjében mutatkozik meg. A kísérlet során alkalmazott és vizsgált fűvőka méretek a következők:

- 0,3 mm
- 0,4 mm
- 0,5 mm
- 0,6 mm
- 0,8 mm

A vizsgálat folyamán a tartót roncsolásos anyagvizsgálatnak – nyomóvizsgálatnak – fogom alávetni. A vizsgálat során egy Zwick/Roell Z100 típusú anyagvizsgáló gépet [4.3.1. ábra] fogok használni a szükséges adatok kinyeréséhez.



4.3.1. ábra Zwick/Roell Z100 anyagvizsgáló gép

A Zwick/Roell Z100 típusú gép főbb meghatározó technológiai paramétereit az alábbi [4.3.1. táblázat] tartalmazza.

4.3.1. táblázat Zwick/Roell Univerzális anyagvizsgáló gép főbb paraméterei:

Zwick/Roell Z100 anyagvizsgáló gép főbb technológiai paraméterei	
Terhelhetőség (húzásra/nyomásra)	100 kN
Keresztfej maximális sebessége	1000 mm/min
Keresztfej minimális sebessége	0,001 mm/min
Keresztfej elmozdulása	1980 mm
Pozícionálási pontosság	0,1 μ m
Súly	660 kg

A mérőgép egy számítógéphez kapcsolódik, melyen egy úgynevezett „TextExpert” software segítségével rögzíti a mérés során kinyerhető adatokat. Ezeket a kinyert adatokat egy Microsoft Excel által is kezelhető .xlsx fájlkiterjesztésbe konvertálja. A tartó konzolt egy erre a célra tervezett univerzális készülékbe [4.3.2. ábra] fogtam be.



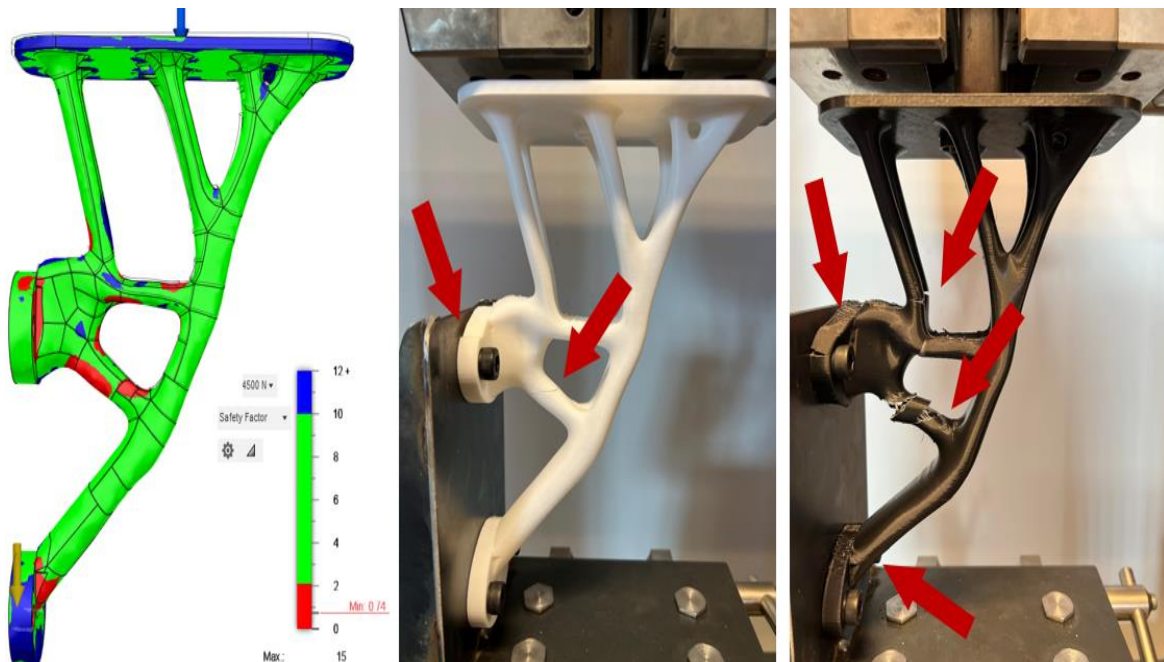
4.3.2. ábra Univerzális befogókészülék ZwickRoell Z100 anyagvizsgáló géphez
[Tervezte: Menyhárt Erik]

4.3.1. Generatív tervezett konzolon végzett kompressziós vizsgálat folyamatainak átfogó bemutatása egy próbatesten keresztül

A nyomóvizsgálat 23 °C-on, illetve 60 %-os páratartalom mellett 5 mm/s-os mérési sebesség történt. A vizsgálatok közül csak a 0,4 mm-es fűvókával nyomtatott próbatest vizsgálatát és nyomtatási paramétereit [4.3.1.1. táblázat] mutatom be tüzetesebben a tézis oldalszám korlátja okán.

4.3.1.1. Táblázat 0,4 mm-es fűvóka által nyomtatott próbatest nyomtatási paramétereit:

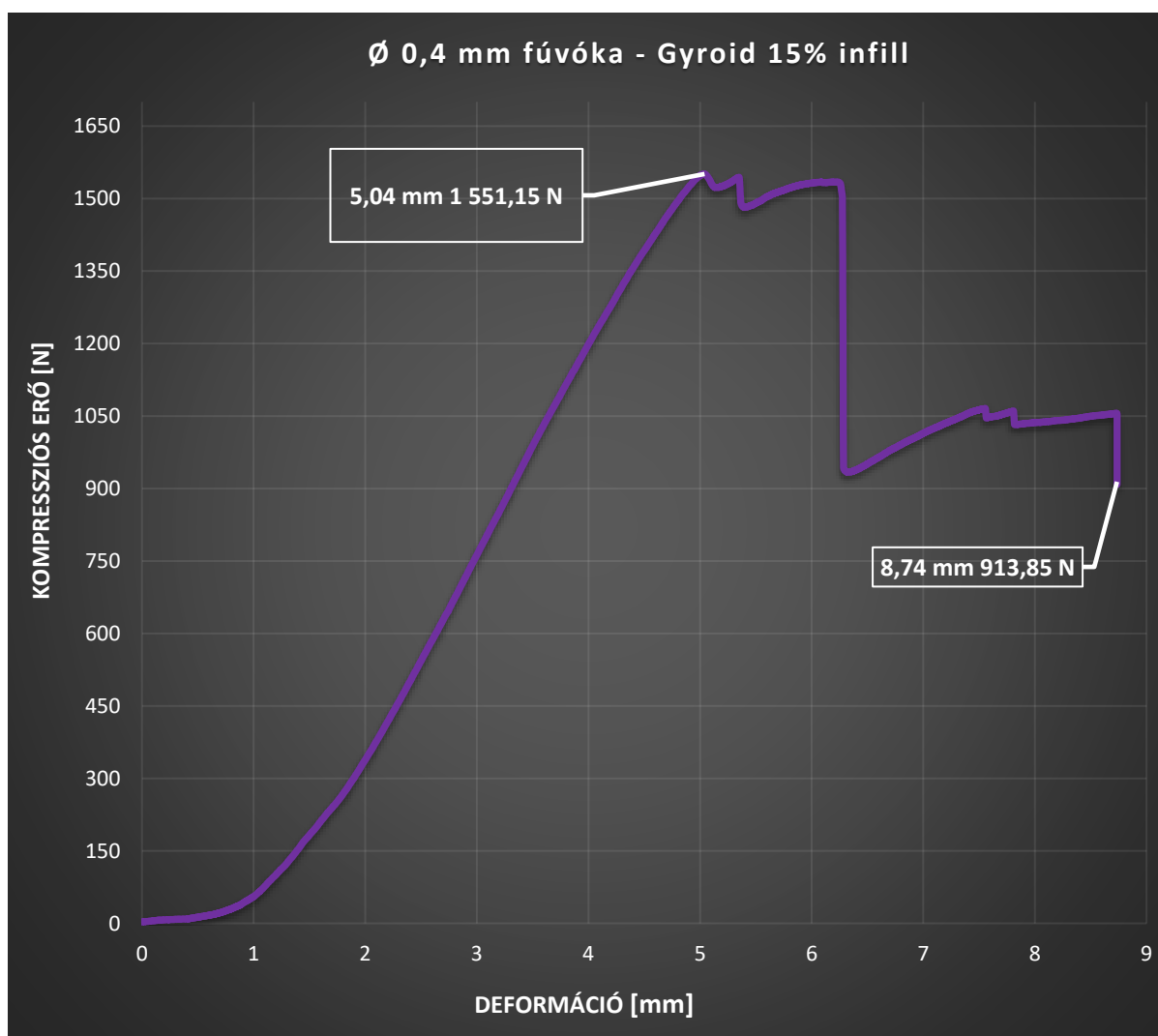
0,4 mm-es fűvóka által nyomtatott próbatest nyomtatási paraméterek		
Paraméter megnevezése	Érték	Mértékegység
Fűvóka átmérő	0,4	mm
Infill	15	%
Infill minta	Gyroid	-
Rétegvastagság	0,2	mm
Filament típus	3DJake ecoPLA - Fehér	-
Teljes tömeg	123	g



4.3.1.1. ábra Az eltört próbatest – a töréspontok piros nyilakkal jelölve – és a szimulációs eredmények összehasonlítása

A 0,4 mm-es fűvókával nyomtatott konzol vizsgálata sikeresen lezajlott, melynek eredményeképpen megállapítható volt a legnagyobb test által kibírt nyomóerő, illetve a vizsgálat során keletkezett legnagyobb deformáció.

Ezen adatok és a vizsgálat jelleggörbéje a [4.3.1.1. diagram] -on látható, melyen kiemelésre kerül a legnagyobb kompressziós erőhöz tartozó legnagyobb deformáció, illetve a legnagyobb deformációs értékhez tartozó kompressziós erő értéke is.



4.3.1.1. diagram 0,4 mm-es átmérőjű fűvókával nyomtatott próbavizsgálat eredményei és jelleggörbéje

A mérésből jól megállapítható, hogy a generatív tervezett tartó konzol 50 kg-os terhelhetőség helyett megközelítőleg 150 kg-nak volt képes ellenállni a mérési körülmények között, tehát háromszoros biztonsági tényezővel rendelkezik, mely a mérnöki gyakorlatban a javasolt kétszeres biztonsági tényező felett teljesít. A [4.3.1.1 ábra] -t megfigyelve jól láthatóak, hogy a 15%-os infill ellenére is egész pontos eredményt szolgáltatott a végeselem szimuláció.

4.3.2. Generatív tervezett konzolon végzett kompressziós vizsgálatok eredményeinek összesítése

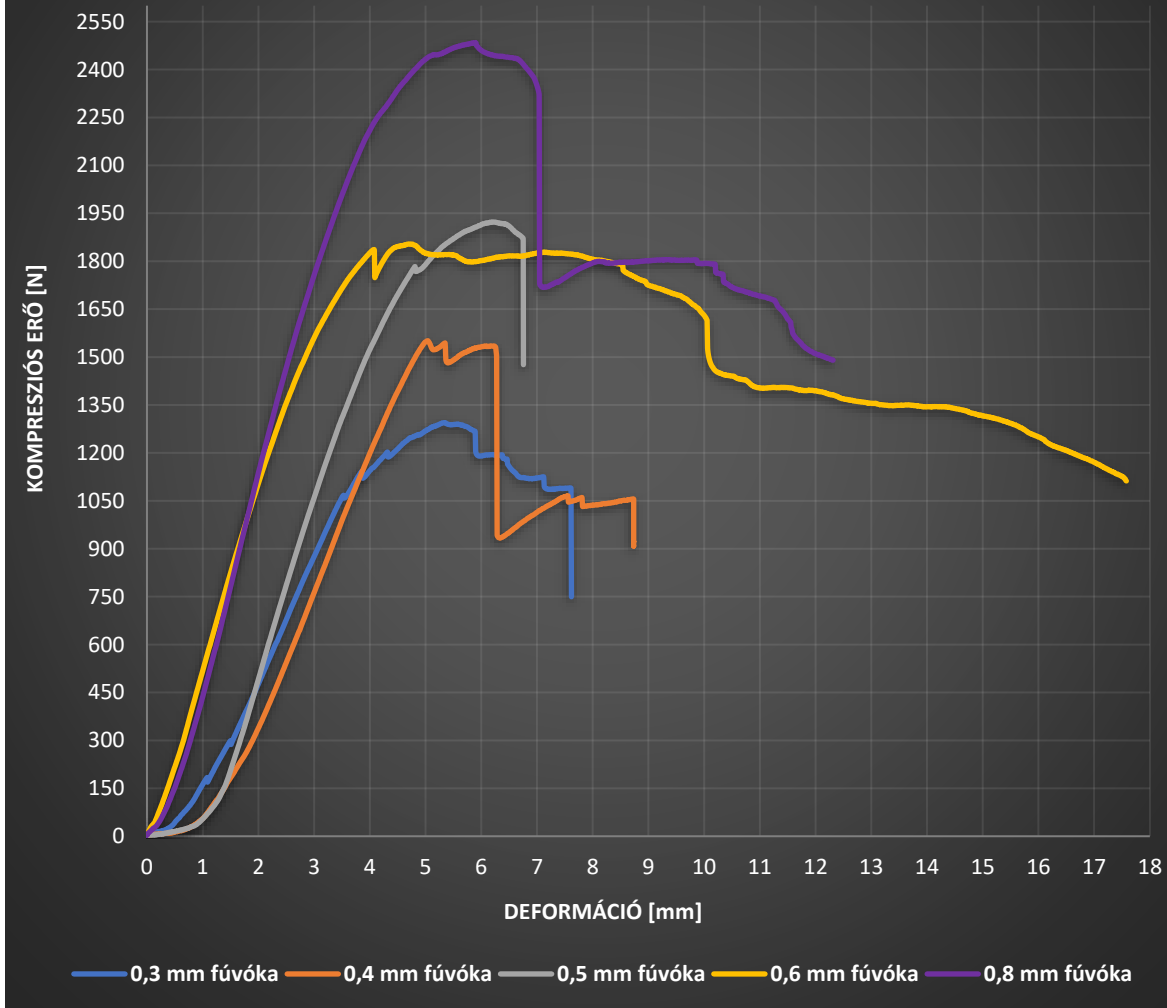
A különböző fúvókákkal nyomtatott próbatestekről [4.3.2.1. ábra] készült vizsgálati eredmények kompressziós jelleggörbéit a [4.3.2.1. diagram] tartalmazza, mely számos fontos adatot tartalmaz a különböző fúvóka átmérőkkel nyomtatott próbatestek kompressziós igénybevétellel szembeni viselkedéséről.



4.3.2.1. ábra Különböző fúvóka átmérőkkel nyomtatott próbatestek

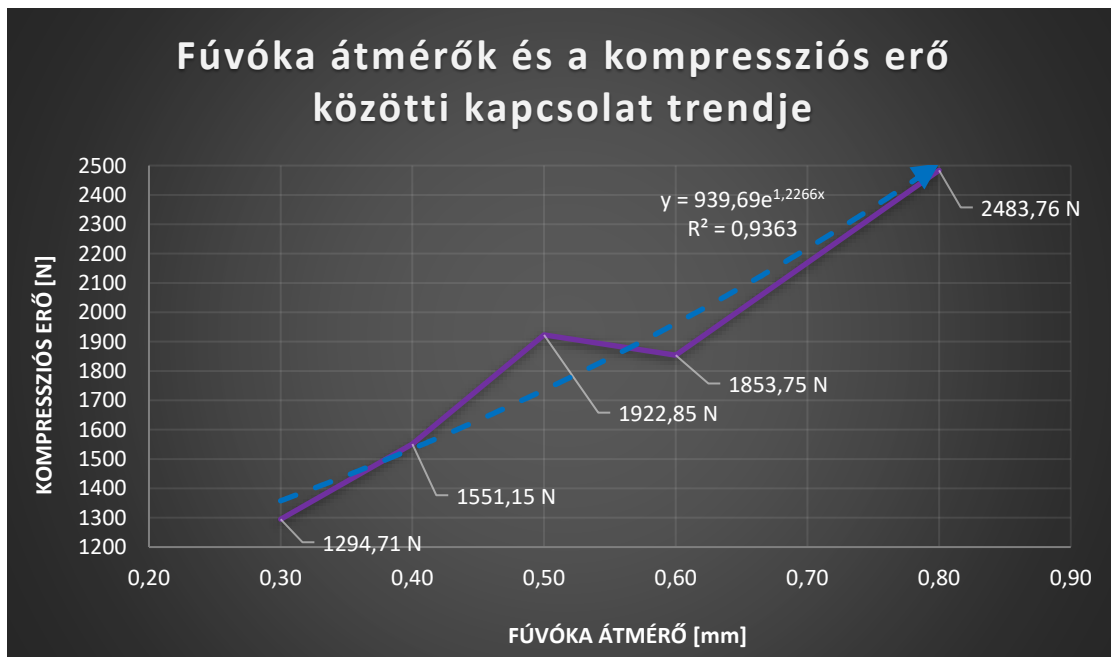
A [4.3.2.1. diagram] mintájára a különböző próbatestek maximum értékeit összegeztem és egy diagramba [4.3.2.2. diagram] gyűjtöttem, mely alapján megállapítható az a tendencia, hogy a jelenlegi körülmények között a nagyobb fúvóka méret magasabb kompressziós értékekkel szemben képes ellenállni. Ennek az eredménynek az oka valószínűsíthetően a nyomtatás során alkalmazott fúvóka átmérő, és a hozzá tartozó technológiai paraméterekben keresendő. A vizsgálat során a deformációs értékeket is megvizsgáltam, azonban ezen jellemzőről nem állapítható meg a rendelkezésre álló adatok alapján semmilyen szabályosság.

Különböző fúvóka átmérőkkel nyomtatott próbatetek kompressziós vizsgálatának eredményei



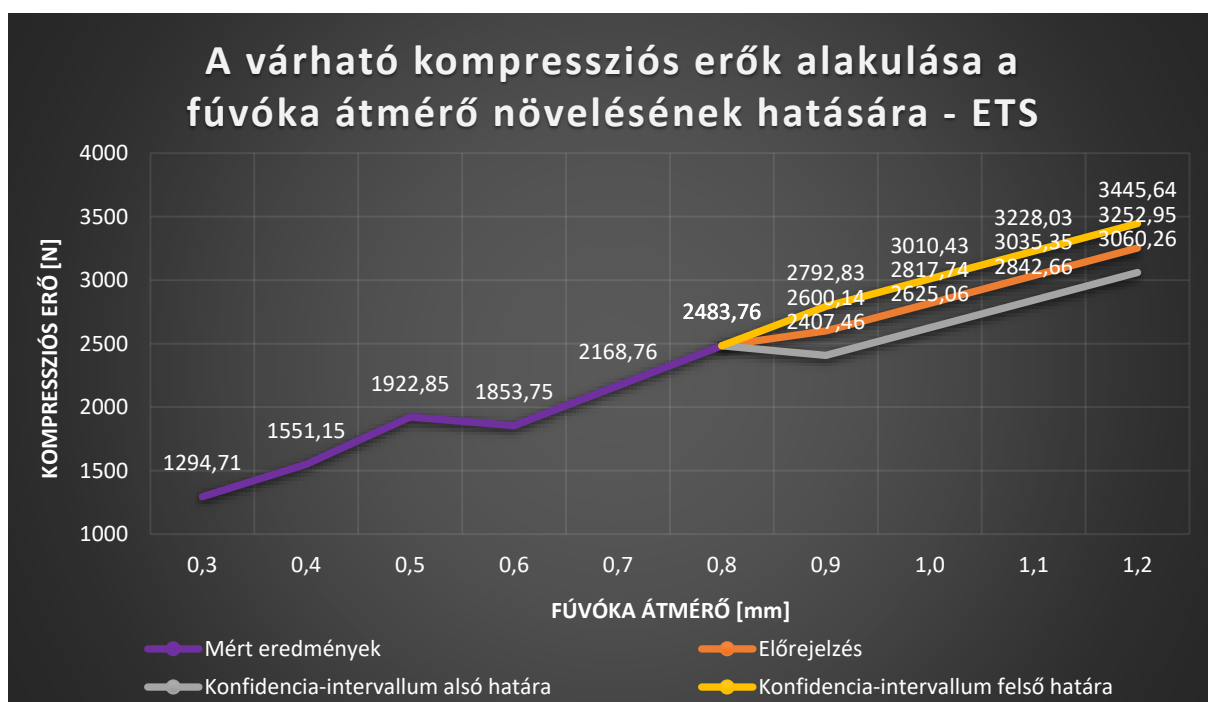
4.3.2.1. diagram Különböző fúvóka átmérőkkel nyomtatott próbatetek kompressziós vizsgálatának jelleggörbéi

A szakirodalom feldolgozás során ismertetésre került, hogy a különböző átmérők sajátos rétegvastagságokkal-, rétegszélességekkel dolgoznak, (a szakirodalom feldolgozásban is már ismertett fúvóka átmérőjének 50%-a, mint ökölszabály) melyek jelentős hatást gyakorolhatnak az extrudálási folyamatokra, ami szintén jelentős mértékben befolyásolja a szilárdsági paramétereket. Feltehetőnek tartom, hogy jelen esetben a fúvóka méret növelésével a felhasznált anyag térfogatnövekedéséhez vezethetett a jobb kompressziós ellenálláshoz. Ezen állítás jól bizonyítható a nyomtatott próbatetek tömegén is, hiszen a fúvóka átmérő növelésével egyetemben a próbatest tömege is növekedett. Ezen tömegnövekedés mértéke a [4.3.2.4. diagram] -on látható.



4.3.2.2. diagram Fúvóka átmérők és a kompressziós erő közötti kapcsolat trendje

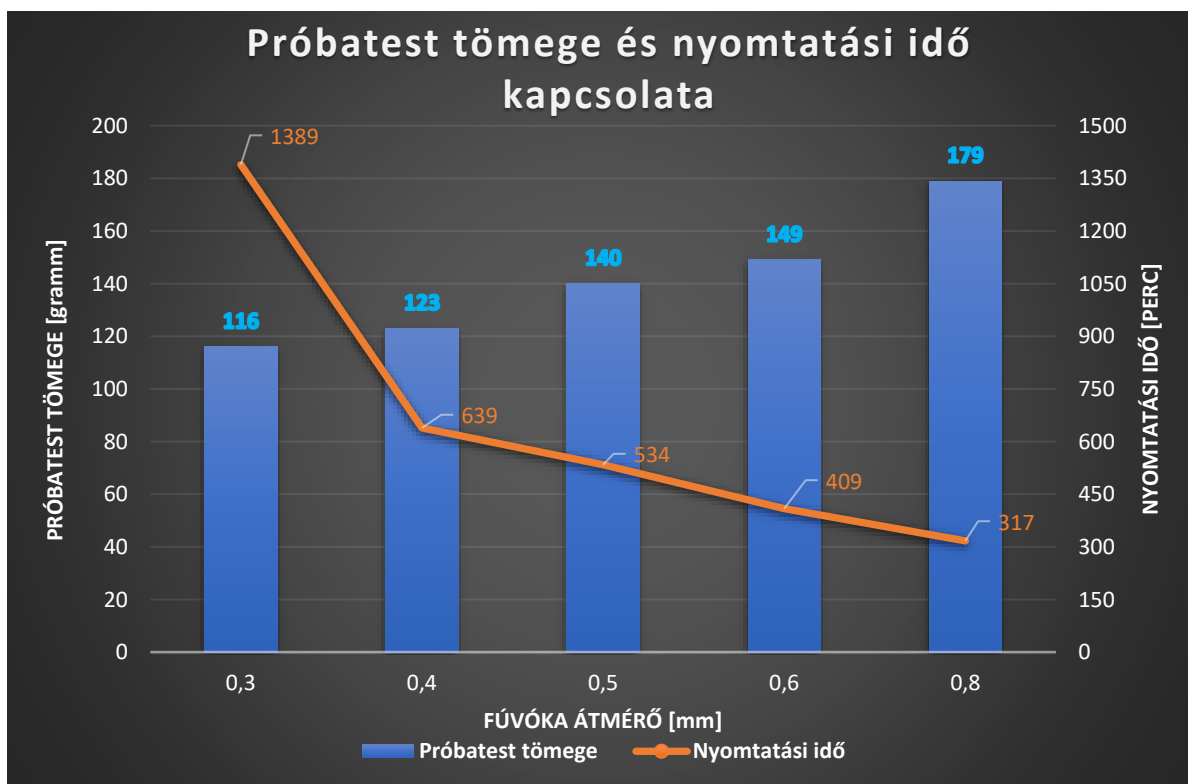
Ezen tendenciát Microsoft Excelben is megvizsgáltam (95%-os konfidencia-intervallum mellett) 1,2 mm-es fúvóka nagyságig egy valószínűségi előrejelzéssel, melynek a neve ETS (Exponencial Triple Smoothing – vagy más néven Exponenciális Háromas Simítás), mivel ezzel a módszerrel nem csak a tendencia jellegét láthatjuk, hanem a várható értékeket is. [4.3.2.3. diagram] A vizsgálat során a hiányzó 0,7 mm-es fúvóka értékét interpolációval határoztam meg.



4.3.2.3. diagram Várható kompressziós erő növekedés trendje valószínűségi számítás útján való meghatározása

Fontos megemlíteni, a nyomtatás során megfigyelhető fűvóka átmérő, a próbatest tömege, illetve a nyomtatási idő közötti kapcsolatot is. Itt is szintén megfigyelhető az a szabályosság, miszerint a fűvóka átmérő növelésével a nyomtatás ideje jelentős mértékben csökkenthető, illetve a nyomtatott próbatest tömege is viszonylagosan nagy mértékben növekszik. Ezt a jelenséget a [4.3.2.4. diagram] -on jól láthatjuk.

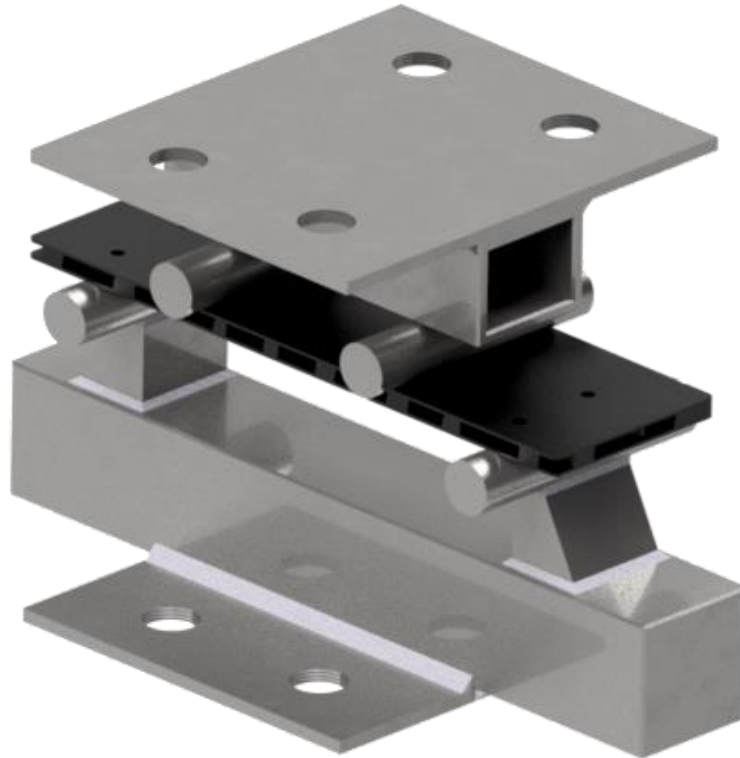
Ennek oka az az evidens indok, amit már előzőleg is ismertettem, miszerint a fűvóka lévén nagyobb rétegmagasságok és rétegszélességek hatására a belső üres terek a belső térkitöltöttség százalékos értékének változatlansága ellenére is csökkenni fognak, hiszen a nyomtatott „hengeres” ömledék [2.5.2. ábra] nagyobb térfogattal rendelkeznek.



4.3.2.4. diagram Próbatest tömege és nyomtatási idő kapcsolata

4.3.3. Topológiai optimalizált tartó lap kompressziós vizsgálata

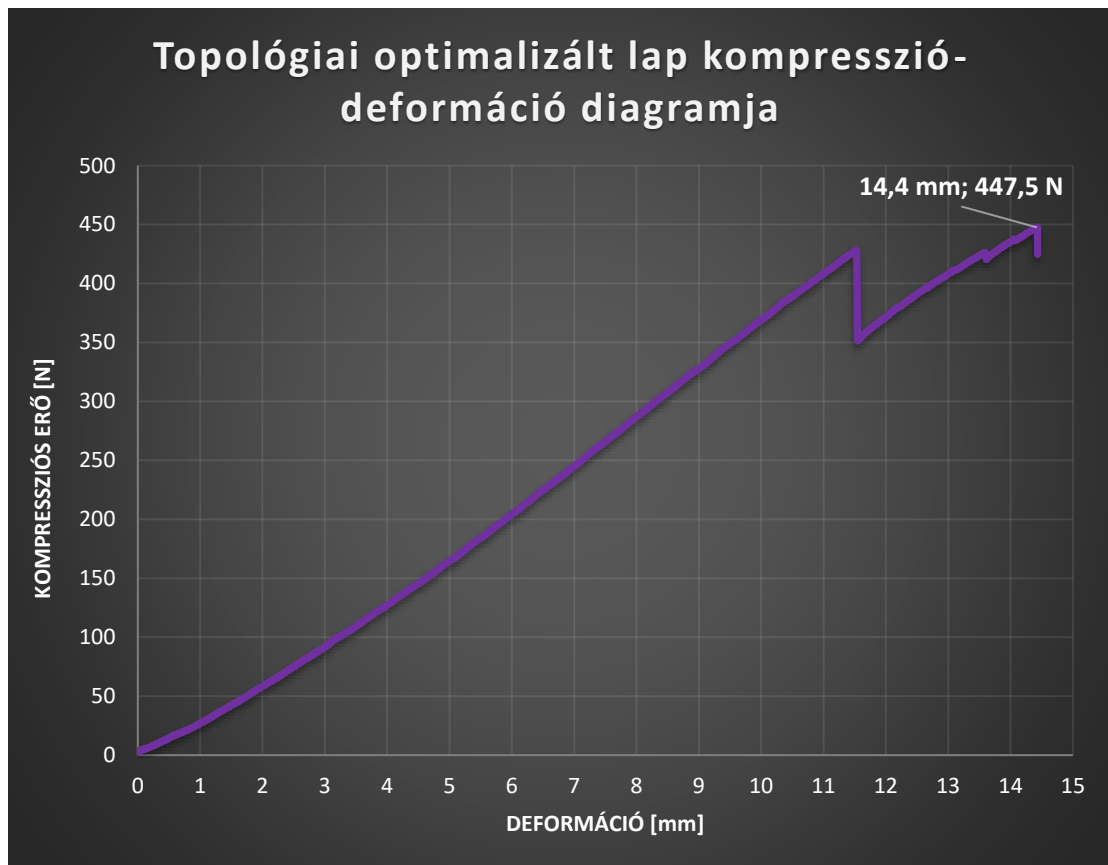
A szerkezet teljes körű vizsgálata érdekében a 3D nyomtatott topológiai optimalizált lapot is hajlító vizsgálatnak tettem ki. Ezen vizsgálat útján megállapítható a lap hajlító szilárdsága, illetve egy teljeskörű képet ad a kéttámaszú tartó valóságban való terhelhetőségéről. A vizsgálat elvégzéséhez – a lap egyedi méreteiből adódóan – egy egyedi készülék megtervezésére és legyártására volt szükség mely [4.3.3.1. ábra]-n látható.



4.3.3.1. ábra Topológiai optimalizált lap során alkalmazott készülék

A topológiai optimalizált lap vizsgálata szobahőmérsékleten 23°C-on, illetve 60%-os páratartalom és 5mm/s-os mérési sebesség mellett történt [4.3.3.2. ábra]. A vizsgálat során megállapítottam a próbatest mérése során elviselt legnagyobb kompressziós erőt, mely 447,5 N, illetve a legnagyobb deformáció a vizsgálat során 14,4 mm volt. [4.3.3.1. diagram]

A mérés során megállapításra került, hogy a tervezés során célként megállapított 350 N-os értéket sikerült elérnie, azonban a topológiai optimalizáció során terhelésként meghatározott 500 N-os biztonsági túlméretezést – a 3D nyomtatás során alkalmazott belső térkitöltöttség és a tervező program tömör testtel kalkulált szimuláció eltérése végett – már nem sikerült elérni. Mindazonáltal, a lap funkcionalitás szempontjából megfelelt, azonban ilyen tervezések esetén érdemes egy nagyobb biztonsági tényezővel számolni az említett software hiányosság végett.



4.3.3.1. ábra Topológiai optimalizált lap kompresszió-deformáció diagramja



4.3.3.2. ábra A topológiai optimalizált lap mérési folyamata

4.4. A kísérletek alapján levonható konzekvencia

- A kísérlet körülményei között, jelen generatív tervezett próbatest vizsgálata során megállapítható, hogy **a fúvóka átmérő változtatása hatással van a próbatest mechanikai paramétereire.**
- A vizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy jelen körülmények között **a generatív tervezett próbatest kompressziós ellenállására jelentős pozitív hatást gyakorolt a fúvóka méretének a növelése.**
- **A legjobb eredményt a 0,8 mm átmérőjű fúvókával nyomtatott próbatest érte el,** 2483,76 N-os kompressziós erővel, míg **a legalacsonyabb értéket a 0,3 mm átmérőjű fúvókával nyomtatott,** a maga 1294,71 N-os kompressziós erejével.
- Az deformáció vizsgálata során kapott eredmények alapján nem állapítható meg egyértelmű szabályosságra utaló jel, ebből pedig arra következtetnek, hogy habár hatással van a fúvóka méretének változtatása, hiszen eltérő elmozdulás értékeket kaptunk, de ebből nem vonható le egyértelmű konzekvencia ezen vizsgálatok alapján.
- A nyomtatás paramétereinek megfigyelése során az a megállapítás nyert bizonyosságot, miszerint **a fúvóka méreteinek növelése egyértelmű tömeg növekedést eredményez,** ezért a nyomtatás tervezése során érdemes erre figyelmet fordítani, ha ezen tulajdonság jelentőséggel bír majd a későbbi felhasználás során.
- A fúvóka átmérőjének változtatása a nyomtatási időre is jelentős hatással bír. **Az átmérő növelésével a próbatest nyomtatási ideje jelentősen redukálódik,** hiszen az extruderből kilépő „ömladék henger” – a diplomamunka készítésekor az FDM nyomtatókra jellemző általános esetben – térfogata evidensen növekedni fog a diplomamunka kidolgozásom során jól ismertett úgynevezett ökölszabálynak hála, ami a fúvóka átmérő és a rétegvastagság, illetve rétegmagasság növekedését okozza. Ebből következik, hogy kevesebb réteget kell a nyomtatónak lehelyezni, hogy elérje a szükséges magasságot, vagy szélességet. Ezen jelenség okolható, a próbatest tömegének növekedéséért is. Mindazonáltal szeretném megjegyezni, hogy ez az ún. „ökölszabály” követése nem kötelező. A rétegvastagság és rétegmagasság softwaresen változtatható a fizikai korlátok keretei között.
- A topológiai optimalizált próbatest tervezése során **indokolt volt a terhelő erő túlméretezése,** mivel a próbatest **a célértékként meghatározott 350 N-os terhelést kibírta,** azonban már a 3D nyomtatás során alkalmazott belső térkitöltöttség okán, már a szimuláció során beállított 500 N-os terhelést nem volt képes elviselni.

5. Összefoglalás

A hazai és nemzetközi szakirodalom áttekintése után a diplomamunkám során egy generatív tervezéssel és topológiai optimalizációval tervezett kéttámaszú tartó 3D nyomtatása során alkalmazott technológiai paramétereinek hatását vizsgáltam a teljes szerkezetre. A szakirodalom feldolgozás során bemutattam a főbb 3D nyomtatási típusokat. A bemutatás során külön kitértem az FDM (Fused Deposition Modeling, vagy más néven Huzalleolvasztásos Modellezés) típusú 3D nyomtatáson belüli konstrukciós megoldásokra, ezek előnyeire, hátrányaira. Ismertettem az additív gyártás során alkalmazott alapanyag típusokat, kitértem a szilárd, folyékony és kompozit alapanyagokra, továbbá ismertettem a főbb mechanikai jellemzőiket. Ezt követően az FDM nyomtatás során alkalmazott fűvókákat mutattam be, mint a 3D nyomtatás egyik legalapvetőbb technológiai paraméterét. A fűvókák ismertetése során kitértem ezek méretére, alapanyagaira, fűtési zónájának hatásaira, illetve a belső átmérő változtatásának technológiai hatásaira. A szakirodalom feldolgozás során kitértem még a generatív tervezésre, illetve a topológiai optimalizációra. Ismertettem ezek folyamatait (egy konkrét példán keresztül), előnyeit – hátrányait, illetve a kettő közti különbséget. A szakirodalom feldolgozást egy konzekvenciával zártam.

Ezt követően ismertettem diplomamunkám célkitűzéseit, mely egy generatív tervezett tartó konzol 3D nyomtatása során változtatott technológiai paraméterek hatását vizsgálta a mechanikai tulajdonságokra kompresszió vizsgálat lévén.

A munkám során bemutattam a már említett generatív tervezett tartó konzol, illetve a topológiai optimalizált tartó lap tervezési lépéseit pontról-pontra. A tervezés után, VEM (végeelem) szimulációval ellenőriztem és állapítottam meg a várható töréspontok mértékét és pozícióit, illetve elvégeztem egy VEM szimulációt a teljes szerkezetre is, majd egy külön fejezetben ismertettem a kapott adatok alapján a tervezésem konklúzióját.

Mindezek után, a megvalósítási munkálatok során bemutattam az általam használt alapanyagokat, 3D nyomtatókat, ezek technológiai adatait, illetve a nyomtatás megkezdése előtt alkalmazott úgynevezett „slicer” – szeletelő – softwareket és azok beállításait. A fejezet végén prezentáltam a nyomtatási eredményeket.

Az előzetesen felsorolt munkálatok eredményeképpen ezek után elvégeztem a diplomamunkám fő célkitűzését, a kompresszióvizsgálatot. A roncsolásos anyagvizsgálatot egy univerzális anyagvizsgáló gépen végeztem el. Ismertettem a vizsgálat során alkalmazott bemeneti paramétereket, az alkalmazott készülékeket. A kompresszióvizsgálatot a generatív tervezett próbatesteken és a topológiai optimalizált lapon is elvégeztem.

A vizsgálatok során a kapott eredményeket feldolgoztam, összesítettem és ismertettem az ezekből adódó konzekvenciákat, illetve ténymegállapításokat. Diplomamunkám kidolgozása során Autodesk Fusion360, Autodesk Inventor tervező és modellező programokat, illetve Microsoft Excel és Microsoft Word programokat használtam.

6. Summary

After reviewing the national and international literature, I investigated the impact of the technological parameters used in the 3D printing of a two-support beam designed by generative design and topological optimization on the overall structure. In the literature review I presented the main types of 3D printing. In the course of the presentation, I specifically presented the advantages and disadvantages of the FDM (Fused Deposition Modeling) type 3D printing solutions. I described the types of materials used in additive manufacturing, solid, liquid and composite materials, and their main mechanical properties. I presented the nozzles used in FDM printing as one of the most fundamental technological parameters of 3D printing. In the description of the nozzles, I presented their size, their materials, the effects of their heating zone and the technological effects of switching the internal diameter. In the literature review, I also discussed generative design and topological optimisation. I described their processes (through a concrete example), their advantages - disadvantages and the difference among them. I closed the literature review with a conclusion.

After this I presented the objectives of my thesis, which investigated the effect of modifying the technological parameters during the 3D printing of a generative designed support bracket on its mechanical properties through compression tests.

In my thesis, I presented the design steps of the previously mentioned generative designed support bracket and the topologically optimized shelf in a point-by-point manner. After the design, I verified and determined the extent and positions of the expected fracture points by FEM (finite element method) simulation, and also performed a FEM simulation for the whole structure, and presented the conclusion of my design based on the obtained data in a separate chapter.

After that, I presented the materials I used, the 3D printers, their technological data and the slicer-software I used before starting the printing processes. At the end of the chapter I presented the printing results.

As a result of the previously mentioned work, I have done the main objective of my thesis, the compression test. The compression testing was done on a universal material testing machine. I presented the input parameters and the equipment I used during the test. I have done the compression testing on the generative designed specimens and the topology optimized board as well.

Finally, I summarized and presented the final results and conclusions of the previously mentioned processes that I have done during my thesis.

7. Irodalomjegyzék

1. 3DJake, 2023. *3DJake ecoPLA*. [Online]
Available at: <https://www.3djake.hu/3djake/ecopla-feher>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
2. Alex, M., 2022.. *The Types Of FDM 3D Printer*. [Online]
Available at: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
3. All3DP, 2022. *What is Generative Design – Simply Explained*. [Online]
Available at: <https://all3dp.com/2/generative-design-simply-explained/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
4. amfg.ai, 2020. *Composite 3D Printing: An Emerging Technology with a Bright Future*. [Online]
Available at: <https://amfg.ai/2020/02/25/composite-3d-printing-an-emerging-technology-with-a-bright-future/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
5. András, M., 2014. *Gyors prototípusgyártás: 3D nyomtatás*. [Online]
Available at: <https://elearning.uni-mate.hu/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
6. Ayrilmis, N., 2018. *Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament*. [Online]
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941818311437>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
7. Bryce, E., 2015. *This ultraviolet printer is 100x faster than ordinary 3D printers*. [Online]
Available at: <https://www.wired.co.uk/article/uv-3d-printer-disrupting-3d-printing>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
8. Calignano Flaviana, L. M. R. I. M. P., 2020. *Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-Reinforced Nylon Filament for 3D Printing*. [Online]
Available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000578204800001?SID=EUW1ED0E56hY9H2Z1yNqi00qwZixu>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
9. Carolo, L., 2023. *3D Printed Food: All You Need to Know*. [Online]
Available at: <https://all3dp.com/2/3d-printed-food-3d-printing-food/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
10. Dudek, P., 2013. *FDM 3D PRINTING TECHNOLOGY IN MANUFACTURING COMPOSITE ELEMENTS*. [Online]
Available at: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-09aa96d2-9dc4-4cae-bd09-e57b2cc16e66/content/partContents/545e2abd-98ef-3f79-8999-4f5bf37c6fdc>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
11. Dwamena, M., 2019. *3D Printer Nozzle – Brass Vs Stainless Steel Vs Hardened Steel*. [Online]
Available at: <https://3dprinterly.com/3d-printer-nozzle-brass-vs-stainless-steel-vs-hardened-steel/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].

12. Dwamena, M., 2021. *What Types of SLA Resin Are There For 3D Printing? Best Brands & Types.* [Online]
Available at: <https://3dprinterly.com/what-types-of-resin-are-there-for-3d-printing-best-brands-types/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
13. Ekaterina Kopets, A. K. L. S. D. B., 2022. *Estimating Natural Frequencies of Cartesian 3D Printer Based on Kinematic Scheme.* [Online]
Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/9/4514>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
14. En.Wiki1., 2023. *3D Printing.* [Online]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
15. En.Wiki2., 2023.. *Composite material.* [Online]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
16. engineeringproductdesign.com, 2023.. *Generative Design.* [Online]
Available at: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/generative-design/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
17. Fischer D, E. C. S. R. D. D. N. D., 2022. *Improving inner structure and properties of additive manufactured amorphous plastic parts: The effects of extrusion nozzle diameter and layer height.* [Online]
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/357640565_Improving_inner_structure_and_properties_of_additive_manufactured_amorphous_plastic_parts_The_effects_of_extrusion_nozzle_diameter_and_layer_height
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
18. Formlabs, 2023. *Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties.* [Online]
Available at: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
19. hpeasystart, 2023. *Types of 3D printing.* [Online]
Available at: <https://print.hpeasystart.com/>
[Hozzáférés dátuma: 17. 10. 2023.].
20. Hui Mei, Z. A. I. A. L. C., 2019.. *Tailoring strength and modulus by 3D printing different continuous fibers and filled structures into composites.* [Online]
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/331634670_Tailoring_strength_and_modulus_by_3D_printing_different_continuous_fibers_and_filled_structures_into_composites
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
21. Kauppila, I., 2023. *Robotic Arm 3D Printing – The Ultimate Guide.* [Online]
Available at: <https://all3dp.com/1/robotic-arm-3d-printing-platforms-software/>
[Hozzáférés dátuma: 11. 05. 2023.].

22. Lucas Carolo, O. C., 2023. *Best 3D Printer Nozzle: Types, Sizes & Materials*. [Online]
Available at: <https://all3dp.com/2/3d-printer-nozzle-size-material-what-to-know-which-to-buy/>
[Hozzáférés dátuma: 17. 05. 2023.].
23. O'Connell, J., 2022.. *Belt 3D Printer: All You Need to Know*. [Online]
Available at: <https://all3dp.com/2/3d-printer-belt-all-you-need-to-know/>
[Hozzáférés dátuma: 12. 05. 2023.].
24. O'Neill, B., 2022. *Nozzle diameter and layer height explained*. [Online]
Available at: <https://www.wevolver.com/article/nozzle-diameter-and-layer-height-explained>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
25. Piotr Czyżewski, D. M. B. N. M. B. a. M. B., 2022. *Influence of Extruder's Nozzle Diameter on the Improvement of Functional Properties of 3D-Printed PLA Products*. [Online]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8779709/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
26. plmgroup, 2023. *How generative design and 3D printing fuels innovation*. [Online]
Available at: <https://plmgroup.eu/articles/how-generative-design-and-3d-printing-fuels-innovation/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
27. Sachini Wickramasinghe, T. D. P. T., 2020. *FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments*. [Online]
Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/7/1529>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
28. Seyed Hamid Reza Sanei, R. D. A. A., 2020. *Open hole tensile testing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composites*. [Online]
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/338797610_Open_hole_tensile_testing_of_3D_printed_continuous_carbon_fiber_reinforced_composites
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
29. Tang M. X., J. C., 2017. *Towards generative systems for supporting product design*. [Online]
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/318615125_Towards_generative_systems_for_supporting_product_design
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
30. Toure, A., 2021. *An overview of metal 3D printing materials*. [Online]
Available at: <https://www.aniwaa.com/insight/am-materials/metal-3d-printing-materials/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
31. Tractarus3d, 2023. *3D printing technology – Delta versus Cartesian*. [Online]
Available at: <https://tractus3d.com/knowledge/customer-support/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].

32. Triyono J., S. H. S. R. S. D., 2020. *The effect of nozzle hole diameter of 3D printing on porosity and tensile strength parts using polylactic acid material*. [Online]
Available at: <https://www.researchgate.net/publication/343703898> The effect of nozzle hole diameter of 3D printing on porosity and tensile strength parts using polylactic acid material
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
33. V. Sukhotskiy, I. H. K. G. G. A. V. M. T. S. V. Z. V. E. P. F., 2023. *Liquid Metal 3D Printing*. [Online]
Available at: <https://www.flow3d.com/liquid-metal-3d-printing/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
34. Ye, R., 2021.. *3D printing composite materials: An introductory guide*. [Online]
Available at: <https://www.3erp.com/blog/3d-printing-composite-materials-an-introductory-guide/>
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
35. Yesong Wang, J. L. Y. Y. Q. Z., 2022. *Research on the Simulation Model of Continuous Fiber-Reinforced Composites Printing Track*. [Online]
Available at: <https://www.researchgate.net/publication/361781171> Research on the Simulation Model of Continuous Fiber-Reinforced Composites Printing Track
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].
36. Yesong Wang, Q. W. D. K. J. L., 2021. *Research on Heating Zone Length of Continuous Fiber Reinforced Composites 3D Printing Nozzle*. [Online]
Available at: https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/slct.202103230?saml_referrer
[Hozzáférés dátuma: 15. 05. 2023.].

8. Mellékletek jegyzéke

1.sz. melléklet: Hallgatói nyilatkozat a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

2.sz. melléklet: Konzulensi nyilatkozat

4.1.1.sz. melléklet: Generatív tervezett tartó konzol műszaki dokumentációja

4.1.2.sz. melléklet: Topológiai optimalizált lap műszaki dokumentációja

4.2.1.sz. melléklet: 3DJake ecoPLA filament adattáblája

4.2.4.1.sz. melléklet: A teljes szerkezet összeállításának műszaki dokumentációja

1.sz. melléklet: Hallgatói nyilatkozat a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

NYILATKOZAT

a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Kecő Sándor
A Hallgató Neptun kódja: AOLUII
A dolgozat címe: Generatív tervezett és topológiai optimalizált alkatrész 3D nyomtatása során alkalmazott technológiai paraméterek hatása a kész szerkezetre
A megjelenés éve: 2023.
A konzulens intézetének neve: Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

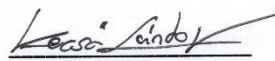
A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelté után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: Gödöllő, 2023. év 10. hó 25. nap


Hallgató aláírása

2.sz. melléklet: Konzulensi nyilatkozat

NYILATKOZAT

Kecső Sándor (hallgató Neptun azonosítója: A0LU11) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

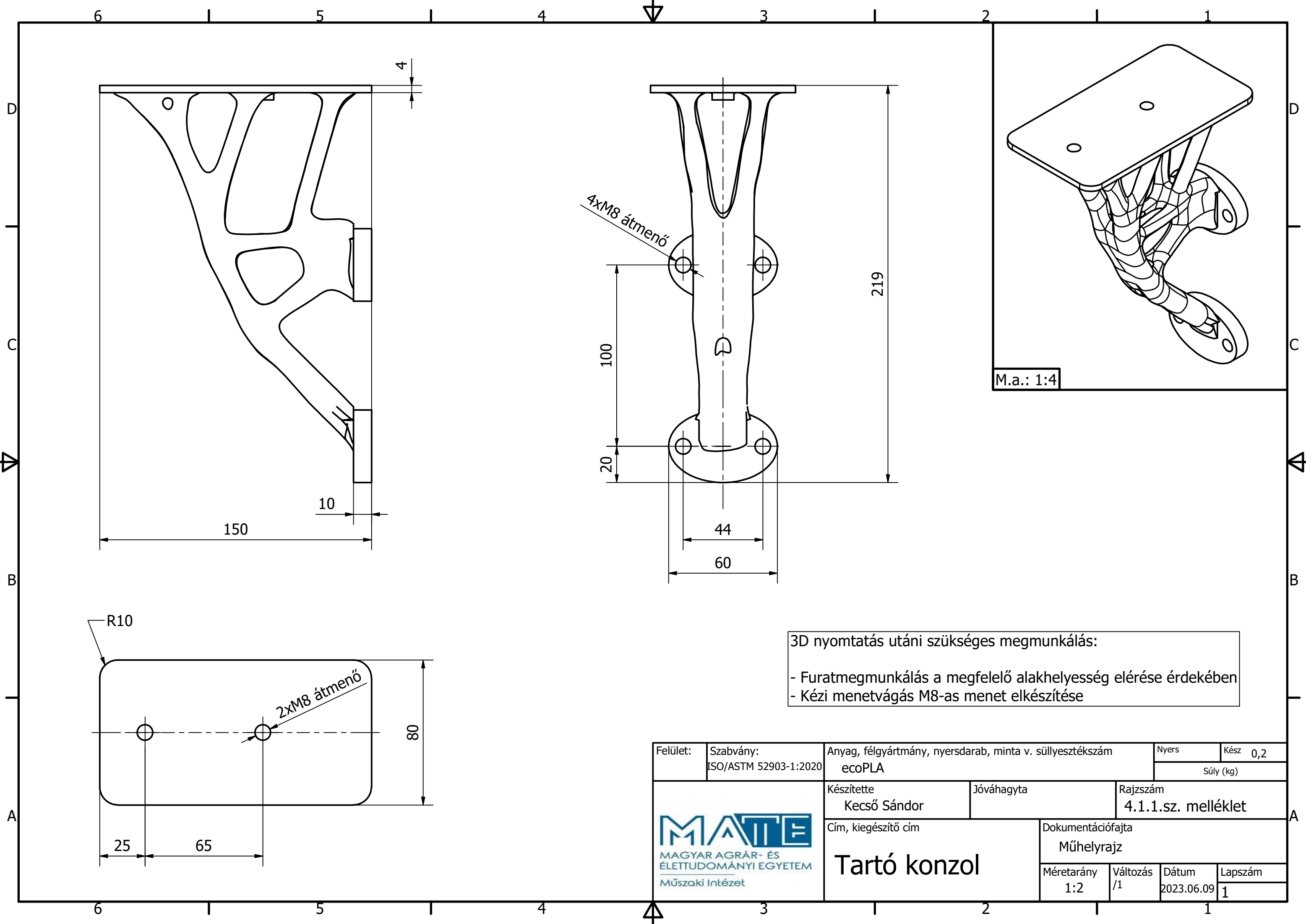
A záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót a záróvizsgán történő védésre javaslom / nem javaslom

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem

Kelt: Gödöllő, 2023. év 10. hó 25. nap




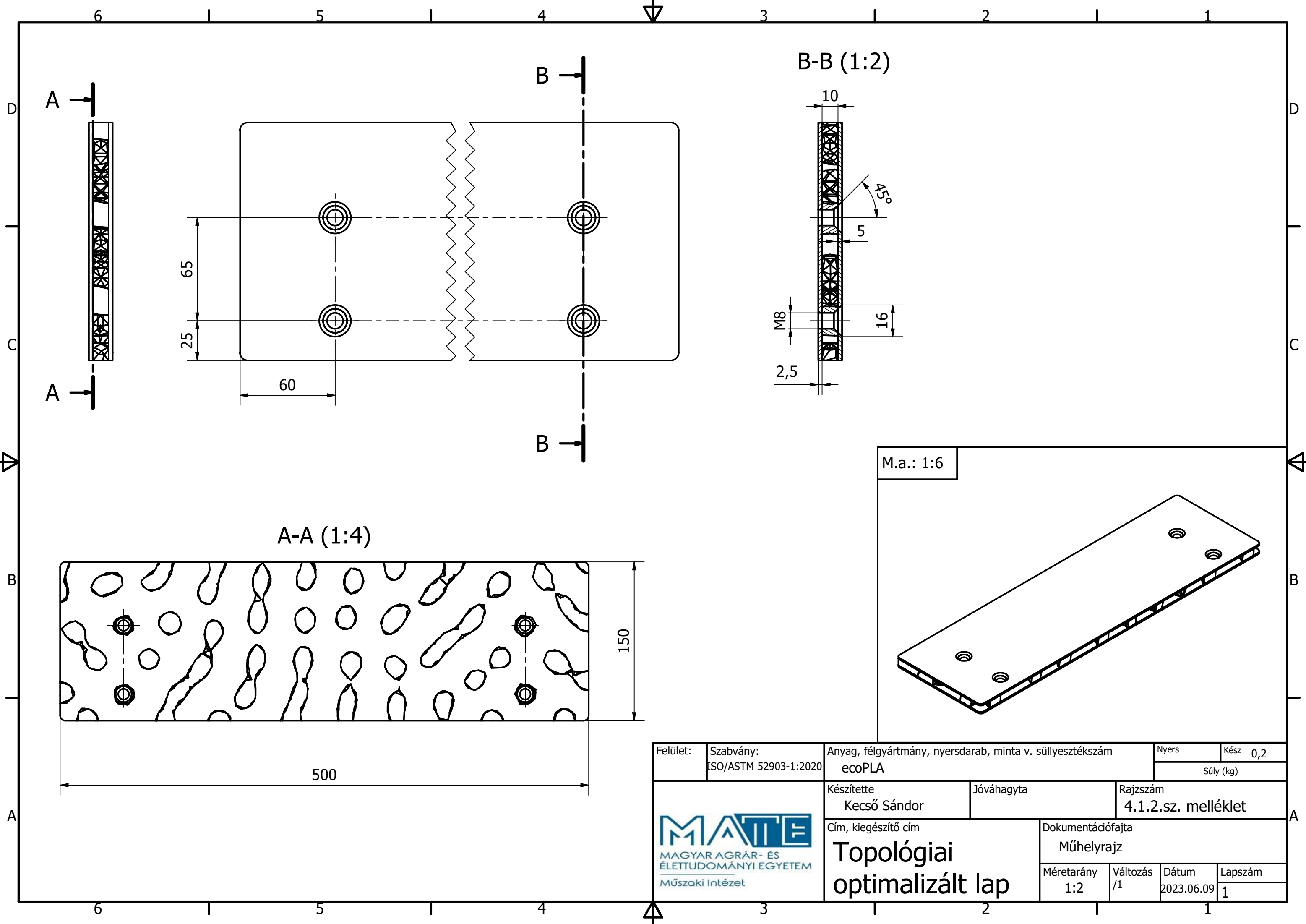
belső konzulens




3D nyomtatás utáni szükséges megmunkálás:

- Furatmegmunkálás a megfelelő alakhelyesség elérése érdekében
- Kézi menetvágás M8-as menet elkészítése

Felület:	Szabvány: ISO/ASTM 52903-1:2020	Anyag, félgyártmány, nyersdarab, minta v. süllyesztékszám ecoPLA	Nyers	Kész 0,2
			Súly (kg)	
 MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM Műszaki Intézet		Készítette Kecső Sándor	Jóváhagyta	Rajzszám 4.1.1.sz. melléklet
		Cím, kiegészítő cím		Dokumentációfajta Műhelyrajz
		Méretarány 1:2		Változás /1
		Dátum 2023.06.09		Lapszám 1
Tartó konzol				



Felület:	Szabvány:	Anyag, félgyártmány, nyersdarab, minta v. süllyesztékszám		Nyers	Kész
	ISO/ASTM 52903-1:2020	ecoPLA			0,2
					Súly (kg)
		Készítette	Jóváhagyta	Rajzszám	
		Kecső Sándor		4.1.2.sz. melléklet	
Cím, kiegészítő cím		Dokumentációfajta			
		Műhelyrajz			
Topológiai optimalizált lap		Méretarány	Változás	Dátum	Lapszám
		1:2	/1	2023.06.09	1

Technical Data Sheet



Product name: **3DJAKE ecoPLA**

Version: 1.1

Date: 01.09.2018

Dimensions

Size	Ø tolerance	Roundness
1,75 mm	± 0,05 mm	≥ 95%
2,85 mm	± 0,10 mm	≥ 95%

Physical properties

Description	Typical value	Test method
Specific gravity	1,24 g/cc	ISO 1183
MFR 210 °C/2,16kg	9,56 g/10 min	ISO 1133
Tensile strength at Yield	70 MPa	ISO 527
Strain at yield	5%	ISO 527
Strain at break	20%	ISO 527
E-Modulus	3120 MPa	ISO 527
Impact strength	3,4kJ/ m ²	ISO 179
Moisture absorption	1968 ppm	ISO 62

Thermal properties

Description	Typical value	Test method
Printing temperature	195 – 215 °C	-
Melting temperature	115 °C ± 35 °C	ISO 11357
Vicat softening temp.	60 °C	ISO 306
Glass transition temp.	57 °C	ISO 11357

Packaging:

All spools are sealed and packed with silica gel to avoid humidity.

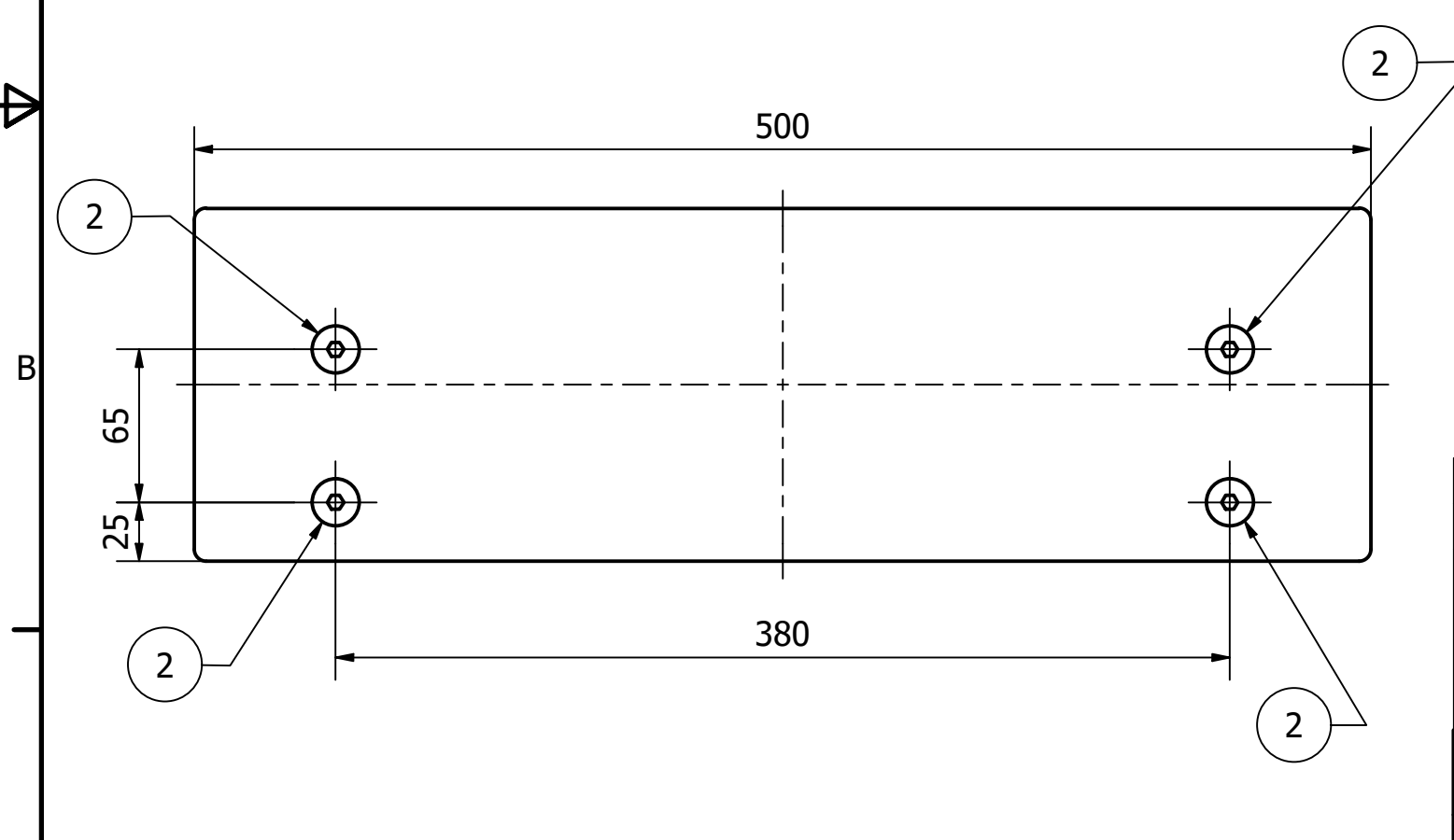
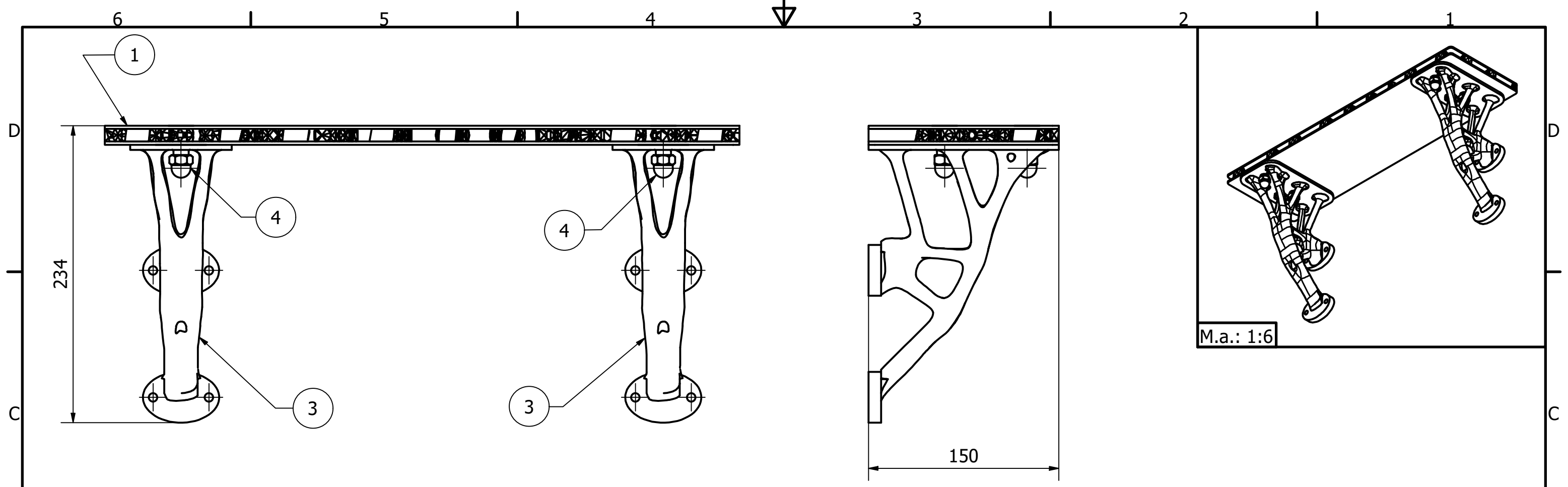
Additional info:

Due to its low tendency to warp 3DJAKE ecoPLA can also be printed without a heated bed.

If you have a heated bed the recommended temperature is ± 35-60°C.

PLA can be used on all common desktop FDM or FFF technology 3D printers.

Storage: Cool and dry (15-25°C) and away from UV light. This enhances the shelf life significantly.



Szerelés előtti szükséges megmunkálások:

- Furatmegmunkálás a megfelelő alakhelyesség elérése érdekében
- Kézi menetvágás

Tételjegyzék				
Tételszám	Mennyiség	Megnevezés	Anyag	Szabvány
1	1	Tartó lap	ecoPLA	ISO/ASTM 52903-1:2020
2	4	M8x35 belső kulcsnyílású csavar	S235	ISO 10642
3	2	Tartó konzol	ecoPLA	ISO/ASTM 52903-1:2020
4	4	M8 zárt magas anyacsavar	S235	DIN 1587

Felület:	Szabvány: ISO/ASTM 52903-1:2020	Anyag, félgyártmány, nyersdarab, minta v. süllyesztékszám	Nyers	Kész 1
			Súly (kg)	
		Készítette Kecső Sándor	Jóváhagyta	Rajzszám 4.2.4.1.sz. melléklet
3D nyomtatott kéttámaszú tartó			Dokumentációfajta Összeállítási rajz	
Méretarány 1:2	Változás /1	Dátum 2023.06.09	Lapszám 1	