

# **DIPLOMADOLGOZAT**

**Bondor Csaba**  
**Gépészmérnök szak**

**Gödöllő**  
**2023**



**Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem  
Szent István Campus  
Gépészmérnök Szak**

**Ipari alkatrész rekonstrukciós  
tervezése, végelelemes ellenőrzése, 3D  
nyomtatásra optimalizálása**

<b>Belső konzulens:</b>	<b>Dr. Szakál Zoltán Egyetemi Docens</b>
<b>Belső konzulens intézete/tanszéke:</b>	<b>Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszék</b>
<b>Külső konzulens:</b>	<b>Vers Botond Additív Gyártástechnológiai Mérnök</b>
<b>Készítette:</b>	<b>Bondor Csaba</b>

Gödöllő

2023

MŰSZAKI INTÉZET  
MESTERSZAK  
Műszaki fejlesztő specializáció

DIPLOMADOLGOZAT  
feladatlap

Bondor Csaba (GV SXUB)

részére

A diplomadolgozat címe:

Ipari alkatrész rekonstrukciós tervezése, végeसेlemes ellenőrzése, 3D nyomtatásra optimalizálása

**Feladatkiírás:**

A feladat egy 3 fázisú aszinkron motor lapátkerekének rekonstrukciós tervezése, anyagának kiváltása, rekonstruált modell végeसेlemes analízise és a termék 3D nyomtatásra optimalizálása.

Elvégzendő feladatok:

- Felhasznált technológiák és eszközök átfogó bemutatása.
- Lapátkerek geometriájának rekonstrukciója.
- Rekonstruált modell gyárthatóságának, geometriájának és mechanikai megfelelésének ellenőrzése, lehetséges koncepciók gyártási folyamatának bemutatása.

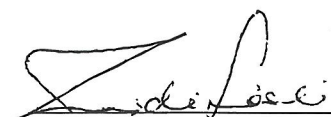
**Közreműködő tanszék:** Anyagtudományi és Gépípari Folyamatok Tanszék

**Külső konzulens:** *Vers Botond Additív Gyártástechnológiai Mérnök, FreeDee Kft*

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

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


Kelt: Budapest, 2023. év 10. hó 27. nap

  
(tanszékvezető)

Jóváhagyom

  
(szakfelelős)

Átvettem

  
(hallgató)

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

Kelt: Budapest, 2023. év 10. hó 27. nap

  
(külső konzulens)

## 1. Bevezetés, célkitűzés

Diplomamunkám témája egy alkatrész rekonstrukciós tervezése, anyagának és ebből adódóan gyártási eljárásának kiváltásával, korunk vívmányinak és lehetőségeinek kihasználásával, a Magyar Agrár és Élettudományi Egyetemen szerzett ismereteim, korábbi tapasztalataim és a fellelhető irodalom felhasználásával.

Kitérek dolgozatom keretében a felhasznált és alkalmazott technológiák, valamint eszközök hátterére, azok fontosságára, szerepére. Definiálom a megoldandó problémát, majd részletesen kitérek annak megoldási menetére a kifejlesztett technológiák és megoldási lehetőségek közül, lehetőségeimhez mérten, a számomra leoptimálisabbat felhasználva.

Diplomamunkám célja:

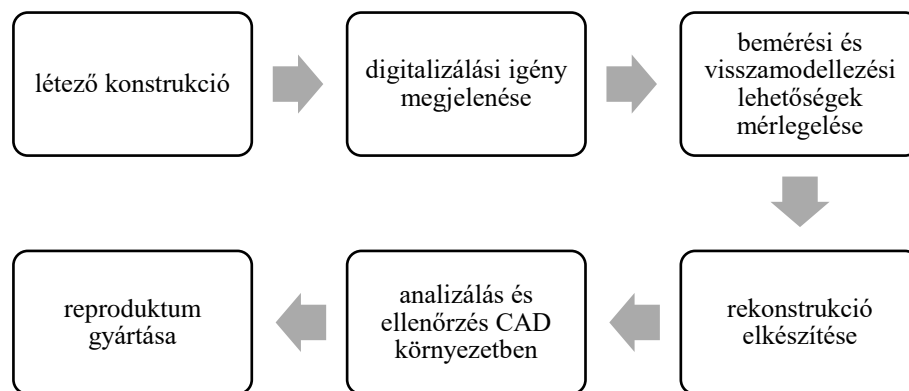
- Kifejezni a rekonstrukció jelentőségét.
- Ismertetni a 3D nyomtatást mint technológiát, hiszen forradalmasította a tárgyak előállításának módját, az egyszerű prototípusoktól a végfelhasználásra szánt alkatrészekig. Ezeknek a tárgyaknak a nyomtatása azonban számos kihívással jár, például a pontosság, a szerkezeti integritás és a felhasznált anyagokkal való kompatibilitás fenntartásával.
- Bemutatni a végelem analízist (VEM), mely a tervezők és mérnökök hatékony eszközévé vált. A végelem analízis koncepcióját vizsgáltam a 3D nyomtatásban, és azt állítom, hogy a VEM javíthatja a 3D-nyomtatott tárgyak tervezését és méretezését és elősegíti azok szélesebb körben való felhasználhatóságát.
- A leírt eszközök felhasználásával kívánok megoldani egy valós problémát, a tervezéstől, az optimalizáláson át, a kiváltó alkatrész gyártásának tervezéséig.

## 2. Reverse Engineering, digitális iker készítés

A „fordított tervezés” olyan folyamat, amelyben egy már használatban lévő termék vagy műtárgy rekonstruálódik, oly módon, hogy annak részleteire a lehetőség szerinti legnagyobb mértékben fény derüljön.

Nagy mértékben hasonlítható a természeti jelenségeket vizsgáló kutatásokhoz, azzal a különbséggel, hogy a természeti és tudományos kutatások során nem vagyunk biztosak abban, hogy a természetet valaha kitalálták-e avagy sem.

A gépészet világában a reverse engineering megkísérli egy létező konstrukció vagy termék, műszaki és geometriai paramétereinek visszamodellezését, az eredeti tervdokumentáció ismerete nélkül. [1]



1. ábra. Reverse Engineering folyamatábrája

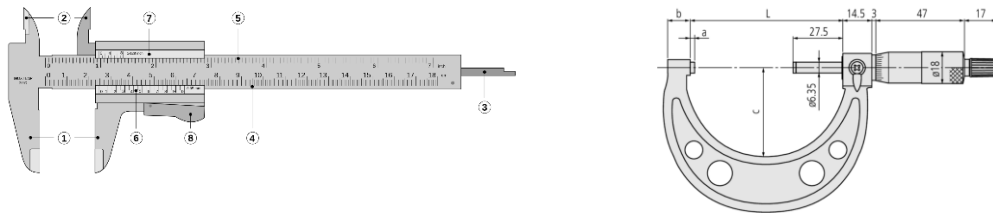
A visszamodellezési folyamat indokai a következők lehetnek:

- Sokszor a szabadformájú felületeket csak digitalizálással tudjuk előállítani.
- Termék vagy működési elv elemzése tervdokumentáció hiányában.
- Költségcsökkentés.
- Összehasonlítás a versenytársak termékeivel.
- Már nem beszerezhető termék pótlása.
- Értékmentés vagy archiválás.

Egy termék vagy eszköz értéke a digitalizálást követően megnő, hiszen az objektum funkciókkal bővül. Keresési és szerkeszthetőségi lehetőségek nyílnak, melyek másolhatóvá, fejleszthetővé és gyárthatóvá teszik azt. [2]

## 2.1 Bemérés és digitalizálás lehetőségei

Egy alkatrész digitalizálási igényének megjelenését követően szükséges megvizsgálni annak méreteit. Az alkatrész szemrevételezését követően befoglaló méretei általában meghatározhatók valamely egyszerű, kézi mérőeszköz segítségével. Hagyományos mérőeszközök, mint például a tolómérő és a mikrométer használatával csak egyszerűbb geometriai adottságokkal rendelkező munkadarabok szélesség, hosszúság és esetleges furatmélység mérést lehet elvégezni. [3]



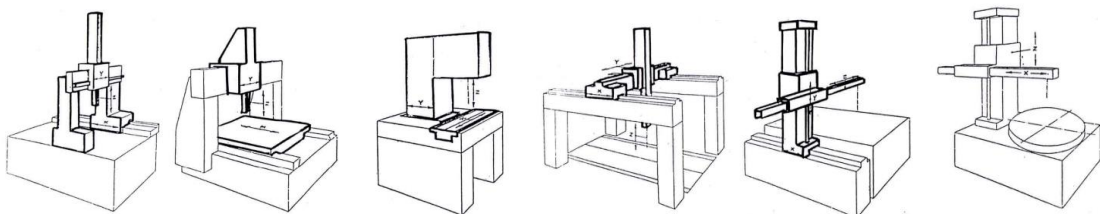
2. ábra. Tolómérő és mikrométer [4] [5]

Amennyiben a mérendő alkatrész bonyolult geometriával rendelkezik, úgy koordináta mérőgép vagy 3D szkennerek használata szükséges.

Koordináta mérőtechnika főként az alkatrészek ellenőrzését és minősítését szolgálja. [3]

Használata széleskörű, három fő területen alkalmazható:

- Beszállítói követelések alapján, hitelesítési jegyzőkönyvek készítéséhez.
- Egyedi és nagy értékű célgépek gyártásához.
- Visszamodellezéshez.



3. ábra. Koordináta mérőgépek [6]

A koordináta mérés technika és a 3D szkennelés célja azonos, azonban működési elvük eltérő. Amíg a koordináta mérőgépek letapogatással állapítják meg a geometriai paramétereket, addig a 3D szkennerek a vetített lézerefény használatával képesek meghatározni a tárgytól való távolságot, ezzel lehetővé téve olyan geometriák bemérését, melyre más technológia nem alkalmas.

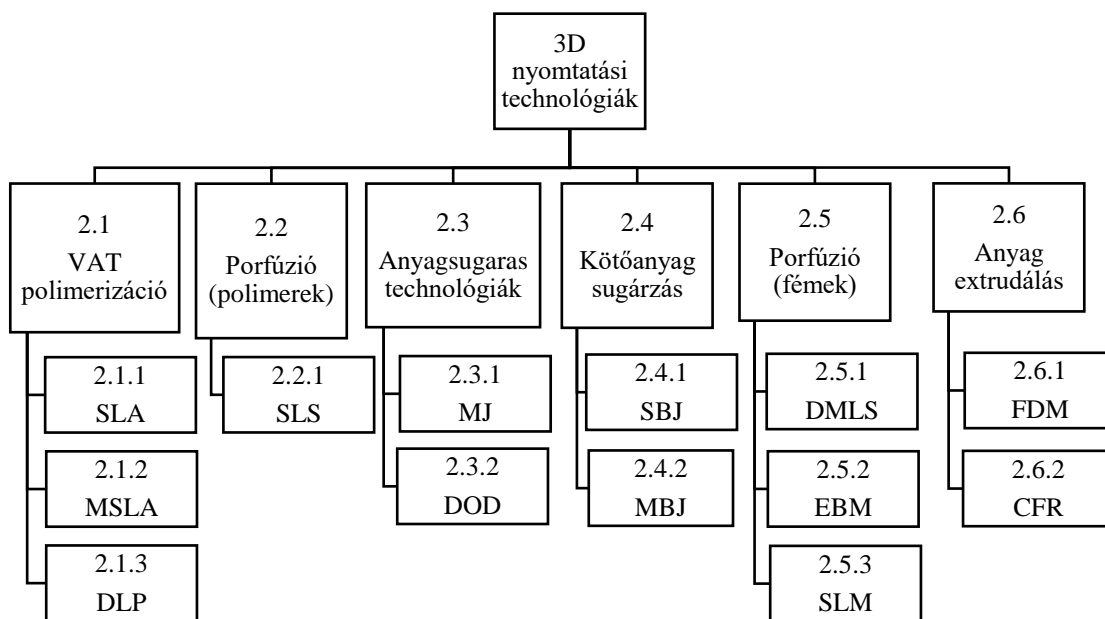


4. ábra. 3D szkennerek [7]

A koordináta mérőgépek tapintófej alkalmazásából adódóan korlátozottan alkalmazhatóak, hiszen a fej keresztmetszettel rendelkezik, mely gátat szabhat a sikeres és teljeskörű mérésnek. Ezzel szemben a 3D szkennerek használatánál ilyen problémával nem szembesülhetünk. További előnye a szkennelési folyamat alkalmazásának, hogy a szkennelendő alkatrész nem helyhez kötött és nincsenek méretbeli gátjai.

### 3. 3D nyomtatási technológiák áttekintése

A 3D nyomtatási technológiák rendkívül sokoldalú és dinamikusan fejlődő területet alkotnak a gyártás és tervezés világában. Ezek a technológiák lehetővé teszik az alkatrészek és termékek rétegről rétegre történő előállítását digitális modellek alapján. Ezen technológiák közös vonása, hogy lehetővé teszik a részletes testreszabást, gyors prototípuskészítést és alacsony szériagyarapodást. Ezek a technológiák már most is számos területen alkalmazhatók, és folyamatosan bővülnek a lehetséges felhasználási területeik. Az egészségügytől az űrkutatásig, az autóiipartól az építészetig, a 3D nyomtatás komoly hatással van a modern társadalomra és gazdaságra, és további izgalmas fejlesztésekre számíthatunk a jövőben. [8]



5. ábra. 3D nyomtatási eljárások kategorizálása



### **3.1 VAT polimerizáció**

A VAT (Vertical Axis Top-Down) polimerizációs eljárás egy olyan 3D nyomtatási technika, amellyel a tárgyakat rétegről rétegre hozzák létre folyékony fotopolimer gyantával, amely fény hatására megkeményedik. [8] [9]

#### **3.1.1 SLA (Stereolithography- sztereolitográfia)**

Az eljárás galvók néven ismert tükröket használ (egyet az x-tengelyen és egyet az y-tengelyen), hogy gyorsan irányítsák a lézersugarat a nyomtatási területre, miközben a gyanta megszilárdul. Ez a folyamat rétegről rétegre pontok sorozatára, illetve vonalakra bontja a mintát, amelyeket a galvók koordináták formájában kapnak meg. A legtöbb SLA gép szilárdtest lézert használ az alkatrészek kikeményítéséhez [8].

#### **3.1.2 MSLA (Masked Stereolithography- maszkolós sztereolitográfia)**

Az MSLA egy olyan 3D nyomtatási technológia, amely hasonló elvet alkalmaz az SLA nyomtatáshoz, de néhány fontos különbséggel. Az MSLA a fénykeményedésen alapul, ahogyan az SLA is, de van egy különleges maszk réteg, amely segíti a fény irányítását és a rétegek felépítését. Az MSLA-nyomtatók egy LCD-képernyő alatt elhelyezett UV LED-tömböt használnak. A képernyő szelektíven be- és kikapcsolja a pixeleket, így az UV-fény lehetővé teszi a fotopolimer gyanta kikeményítését a tartályban. Amikor a réteg megszilárdult, az építőlemez felemelkedik, elválasztva a nyomatót a tartályban lévő FEP [10] vagy PFA-fóliától. A lemez tovább emelkedik a felhasználó által meghatározott szintig, majd visszahúzódik lefelé a következő réteg megkezdéséhez. [11]

#### **3.1.3 DLP (Digital Light Processing- digitális fényfeldolgozás)**

Míg az SLA nyomtatók galvanométerrel kombinált lézert használnak a gyanta kikeményítéséhez, addig a DLP 3D nyomtató esetében a fényforrás egy speciálisan kifejlesztett digitális képernyő. Ennek a képernyőnek köszönhetően a DLP általában gyorsabbnak tekinthető, mint az SLA, amikor kis Z tengelymagasságú tárgyakat nyomtatunk. A DLP projektor képernyője egyszerre villantja fel egy réteg képét, így egy réteg minden pontja egyszerre keményíthető. [8] [12]

## **3.2 Porfúzió (polimerek)**

A porfúziós technológiák egy hőforrást használnak a porszemcsék közötti fúzió kiváltására egy adott pozícióban, az építési terület egy meghatározott pontján, hogy szilárd alkatrész jöjjön létre. A legtöbb porágyas fúziós technológia olyan mechanizmusokat alkalmaz, amelyek során a por felhordását, a por simítását és a modell szinterezését követően az elkészült alkatrészt por tömbbe “csomagolja”, amelyet az utókezelés során kell eltávolítanunk. Megfelelő mennyiségű friss por hozzáadásával (átlagosan minimum 30%) a használt alapanyag újra szinterezhető. [8]

### **3.2.1 SLS (Selective Laser Sintering- Szelektív lézeres szinterezés)**

Az SLS 3D nyomtatás során egy lézer szelektíven szinterezi a polimerpor részecskéit, azaz energiája felmelegíti a port a közlő alkatrész kontúrjánál, ami aztán összetapad és rögzül. Ezt követően a platform lejjebb mozog, és az eljárás megismétlődik egy újabb réteggel, amíg az egész objektum kialakul. Az SLS-ben használt anyagok hőre lágyuló polimerek, amelyek por formájában kaphatók. Az SLS sokoldalú megoldás, különösen akkor, ha gazdaságosabb megoldást keresünk a fröccsöntés és annak túlzott induló kiadásainak kiváltására. Az említett technológiával gyártott alkatrészek jó, izotróp mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, így ideálisak funkcionális alkatrészek és prototípusok készítéséhez. Az SLS nem igényel alátámasztást, így az összetett geometriájú tervek könnyen előállíthatók. Az SLS 3D-nyomtatási technológia izgalmas lehetőségeket kínál az ipar és a kutatás számára, és folyamatos fejlődés alatt áll. A technológia további kutatásra és innovációra szorul annak érdekében, hogy teljes mértékben kihasználhassuk az előnyeit és minimalizáljuk a kihívásait. [13]

### **3.3 Anyagsugaras technológiák**

Az anyagsugaras nyomtatás olyan nagy nyomtatási sebességet és pontosságot biztosít a több színből és anyagból készült alkatrészek esetében, mint egyetlen más 3D nyomtatási technológia sem. Egyesíti az SLA 3D nyomtatás (sztereolitográfia) kiemelkedő részletességét a szálás 3D nyomtatásnál jobb sebességgel, így élethű színű és textúrájú alkatrészek és prototípusok készíthetők. A legújabb anyagfejlesztések kiterjesztették az anyagsugárzás alkalmazását a biokompatibilis fogászati formákra, a gyors gyári szerszámkészítésre és az ipari szerkezetekre és szerelvényekre egyaránt. [8]

#### **3.3.1 MJ (Material Jetting- anyagsugaras technológia)**

Az MJ az egyik leggyorsabb és legpontosabb 3D nyomtatási technológia. Mivel a nyomtatók a gyantát apró cseppekben permetezik, az M-Jet eljárást gyakran a 2D-s tintasugaras eljáráshoz hasonlítják, csak hogy ez több rétegben építi fel a háromdimenziós tárgyakat.

Az M-Jet nyomtatási folyamat megkezdéséhez a nyomtató felmelegíti a gyantákat (a nyomtatótól függően akár nyolcféle gyantát is egyszerre), hogy elérje a megfelelő viszkozitást. Amint az X-tengelyű hordozó elkezd haladni az építési platformon, a nyomtatófejek szelektíven több ezer cseppet szórnak ki. Az UV-fényforrások követik a nyomtatófejeket, és azonnal kikeményítik a kifújtt gyantát. Miután egy teljes réteg elkészült, a build platform egy réteg magasságával lejjebb süllyed. A folyamat ezután addig ismétlődik, amíg az alkatrész el nem készül. [8]

#### **3.3.2 DOD (Drop on Demand)**

A Drop On Demand nyomtatók 2 nyomtatófűvókával rendelkeznek; az egyik a nyomtatandó építőanyagot (jellemzően viaszszerű anyagot) tárolja, a másik pedig a nyomtatáshoz szükséges oldható támaszanyagot. Hasonlóan más additív gyártási technológiához, a DOD nyomtatók egyetlen sugárban mozgó, meghatározott útvonalat követnek, hogy létrehozzák az alkatrész keresztmetszeti területét. A DOD-nyomtatók minden egyes réteg előállítását után olyan mechanizmust is alkalmaznak, amely az építési területet sűrolja, hogy tökéletesen sík felületet biztosítson, mielőtt a következő réteg nyomtatódna. A DOD-technológiát jellemzően öntvények, mesterminták előállítására használják. [8]

### **3.4 Kötőanyag sugárzás**

A Binder Jetting sokoldalú 3D nyomtatási technológia, amely számos alkalmazáshoz használható. A nyomtatási folyamat során a gép kötőanyagot rak le a porágyra rétegről-rétegre, így építi fel az alkatrészt. A rétegek egymáshoz kötődnek, kialakítva a szilárd alkatrészt. A Binder Jetting az SLS-hez hasonlóan nyomtat, azzal a követelménnyel, hogy egy kezdeti porréteget kell felvinni az építőplatformra, majd egy nyomtatófejet mozgat át a porfelületen, amely kötőanyagcseppeket (jellemzően 80 mikron átmérőben), amelyek összekötik a porszemcséket az egyes alkatrészek előállításához. Miután egy réteget kinyomtat és egy új porréteget terít el a frissen nyomtatott részre. [8]

#### **3.4.1 SBJ (Sand Binder Jetting - Homok kötőanyag sugárzás)**

A homok kötőanyag sugárzás egy alacsony költségű módszer, amelyet gyakran homoköntvények létrehozására használnak, például öntvények, öntőformák és más öntvényalkatrészek készítéséhez. Az alapanyagot (finom homok), speciális kötőanyaggal (műgyanta). kevernek össze. A folyamat során a homok-kötőanyag keveréket rétegenként szórják egy nyomtató fej, fúvóka segítségével. Az alapanyagot pontosan a kívánt helyre szórja, és létrehozza az objektum rétegét. Miután az alapanyag elhelyezkedett a rétegen, a kötőanyagot egy másik folyamat során megszilárdítják. Ez általában UV-fény vagy hő segítségével történik. [8]

#### **3.4.2 MBJ (Metal Binder Jetting - Fém kötőanyag sugárzás)**

Az MBJ olyan nyomtatási technológia, melyet fém alkatrészek létrehozására használnak. Ennek a technológiának a működési elve hasonló az SBJ technológiához, a különbséget az alapanyag és a kötőanyag anyaga képezi, hisz itt fémport használnak melyhez kötőanyagként szerves polimert vagy műgyantát kevernek. [8]

### **3.5 Porfúzió (fémek)**

A porfúzió, vagy más néven porlasztási sinterelés (Powder Fusion), egy olyan 3D-nyomtatási eljárás, mely lehetővé teszi különböző fémek, például acél, alumínium, titán vagy nikkel porok felhasználásával a funkcionális, részletes alkatrészek gyártását. [8]

#### **3.5.1 DMLS (Direct Metal Laser Sintering - Közvetlen fém lézersugaras szinterezés)**

Az DMLS technológia az SLS technológia fémipari változata, de az egyik fő különbség, hogy a fém porhoz hozzáadnak egy kötőanyagot, amely segít az alkatrész létrehozásában. Az DMLS folyamat működése során a kötőanyag - amely általában organikus vagy szerves anyag - szorosan keveredik a fém porral. Amikor a lézernyaláb vagy az elektronnyaláb hat az alapanyagra, a kötőanyag olvadni kezd és körülveszi a fém por részecskéit. Ennek eredményeként a fém por részecskéi összetapadnak és szilárd alkatrészt képeznek. [8]

#### **3.5.2 EBM (Electron Beam Melting - Elektronnyaláb olvasztása)**

Az eljárás során finomra őrölt fém porból készített réteget helyeznek egy síkra, és egy nagy energiájú elektronnyalábot irányítanak a rétegre. Az elektronnyaláb nagyon magas hőmérsékletet hoz létre a rétegen belül, ami felolvasztja a fém port. A fém port gyorsan lehűtik, ami lehetővé teszi a szilárd alkatrész kialakulását. Ez a folyamat rétegenként ismétlődik, miközben az elektronnyaláb halad és a következő réteget hozza létre. [8]

#### **3.5.3 SLM (Selective Laser Melting - Szelektív lézersugaras szinterezés)**

Az eljárás során finomra őrölt fémport használnak alapanyagként, amelyet egy rétegben egy síkra terítenek el. Ezen réteget egy nagy teljesítményű lézersugárral pontosan levilágítják. A lézersugár nagyon magas hőmérsékletet hoz létre a fém por területén, mellyel felolvasztja és folyékony állapotba hozza. Amikor a fém folyékony állapotban van, a kívánt geometriának megfelelő területein a fémet hirtelen lehűtik, ami lehetővé teszi a szilárd alkatrész kialakulását. Az alkatrész rétegenként épül fel, mivel a lézersugár halad és az újabb rétegeket hoz létre. [8]

## **3.6 Anyag extrudálás**

### **3.6.1 FDM Fused Deposition Modeling**

Az FDM (Fused Deposition Modeling=3D extrudálás, huzalfelrakás) technológia hatékony, a Stratasys által szabadalmaztatott, additív gyártási módszer. A nyomtatáskor alkalmazott anyag hőre lágyuló (plasztomer) műanyag. A hotend ezeket a hőre lágyuló műanyagot melegíti fel olvadási hőmérséklet fölé, majd rétegenként egymásra olvasztja egy fúvókán keresztül. A kiinduló hozaganyag tekercselve, szál formájában áll rendelkezésre. Amennyiben nem megfelelő az összeolvadás, hézag is kialakulhat a rétegek között. Fontos megemlíteni, hogy a hozaganyag olvadékának viszkozitása (belső súrlódása) magasnak kell legyen, annak érdekében, hogy támaszt nyújtson a felépíteni kívánt szerkezetnek, de elég alacsonynak ahhoz, hogy lehetővé tegye az extrudálást. [8] [9]

### **3.6.2 CFR (Continuous Fiber Reinforcement)**

A CFR olyan folyamat vagy technológia, ahol hosszú, folyamatos rostszálakat (általában üvegszálakat, kevlárszálakat vagy szénrostokat) használnak a műanyag vagy kompozit alkatrészek megerősítésére. Folyamatos szálerősítést alkalmaznak több 3D nyomtatási eljárásnál, például SLS és SLA, de a legszorosabban az FDM technológiához kapcsolható. Használatával jelentősen javíthatóak a késztermék mechanikai tulajdonságai és csökkenthető a felhasználandó anyag mennyisége is.

#### **4. Műanyagok versenyben a fémekkel**

A fémek műanyagokkal való helyettesítésekor nem egyszerű anyag váltásról beszélünk. Figyelembe kell venni az adalékokat, a módosult mechanikai viselkedést, a változó egyéb tulajdonságokat, valamint a tervezési és feldolgozási módszerek kihívásait. A fémek általában nagy sűrűséggel rendelkeznek, és a végtermékek előállításához sok energia szükséges. Általánosságban elmondható, hogy minél nagyobb egy tárgy tömege, annál több energiát használ fel élettartama során. Amikor a fémeket műanyaggal helyettesítjük, és könnyebb termékeket gyártunk, az energetikai szempontból előnyös mind a gyártás, mind a felhasználás szempontjából. A műanyagok általában ellenállóbbak a korrózióval szemben, mint a fémek, így hosszabb ideig tart, mire a műanyag alkatrészeket ki kell cserélni, ami hosszú távon további energiamegtakarítást eredményez. Bár a műanyagok mechanikailag általában nem érik el a fémek teljesítményét, a tervezés szabadsága kárpótolja vagy akár meghaladja ezt a hátrányt. A szabad tervezés olyan geometriát eredményezhet, amely jobban megfelel a célnak és alkalmazkodik a helyi adottságokhoz, ami javítja a funkcionalitást és a térkihasználást. Azoknak a műanyagoknak, amelyek versenyezni kívánnak a fémekkel, számos fontos tulajdonsággal kell rendelkezniük: méretstabilitás, magas modulus és szilárdság, hőállóság. Emellett kiemelten fontos a tartósság, a csökkentett éghetőség és például gépkocsik esetében a kis áteresztőképesség, különösen üzemanyagokkal szemben. Az utóbbi időben egyre fontosabb kérdéssé vált, hogy az adott anyag előállítható-e megújuló nyersanyagforrásokból. [14]

## 5. Végeelem analízis (VEM) áttekintése

A gyártási folyamat szimulálása lassan a 3D nyomtatási munkafolyamat részévé válik. A 3D nyomtatás szimulációi segítenek megérteni és vizualizálni a gyártás során lejátszódó összetett termomechanikai jelenségeket, ami kiváló minőségű, nagy pontosságú alkatrészek előállítását eredményezi. [15]

Ez különösen fontos a legmodernebb 3D nyomtatási eljárással gyártott nagy értékű alkatrészek esetében, ahol a tervezési iterációk (a hibás nyomat elvetése) mind az anyagköltségek, mind a gyártási idő szempontjából nagyon költségesek. [15]

Ahhoz, hogy a 3D nyomtatást gyártási szintre lehessen emelni és szélesebb körben lehessen használni, az anyagok, a gyártás és az alkatrészek teljesítményére vonatkozó modellező szoftverek elengedhetetlenek. Az anyagok viselkedését szimuláló szoftverek megkönnyítik a 3D nyomtatást a végfelhasználók számára. Bizalmat ébresztenek a felhasználókban a tervezett alkatrészeket/termékeket érintően, hiszen adnak egy előzetes képet és kalkulációt a tervezett darab terhelhetőségét és felhasználhatóságát illetően.

Az iparban található trendek azt mutatják, hogy az additív szimulációs szoftverek körül ugyanolyan élénk érdeklődés van, mint a mesterséges intelligencia (AI) körül. Mintha mindez mindent meg tudna változtatni. Amiben ezek a szoftverek segítenek, az az anyag, és az alkalmazás, valamint az additív gyártástechnológiai folyamat (AM-folyamat) kombinációjának optimalizálása. Olyan eszközkészlettel segítik a vállalatokat, amellyel meg tudják hozni a megfelelő döntéseket a gyártandó termékeket illetően.

A 3D nyomtatási folyamat szimulációi nem tévesztendőek össze az elterjedtebb általános mechanikai VEM-szimulációkkal: Az utóbbi segít értékelni egy alkatrész mechanikai teljesítményét bizonyos, a funkciójával kapcsolatos körülmények között (terhelés, deformáció, hőmérséklet stb.), míg az előbbi segít megjósolni a 3D nyomtatási gyártási folyamat eredményét, rétegenként és bizonyos folyamatparaméterek mellett. [15] [15] [9]



## **5.1 A szimuláció haszna 3D nyomtatási eljárásoknál**

A 3D nyomtatási folyamatok szimulálása nagyon értékes találmány, mert segít elkerülni a nyomtatási hibák és geometriai problémák miatt „selejtes” alkatrészeket, mellyel rengeteg idő és pénz takarítható meg. Segítségével a gyártási kockázat kiértékelhető, támpontot ad a hiba valószínűségének felmérésére, illetve hozzájárul annak kiküszöböléséhez. Hozzájárul a gyártási folyamat megértéséhez, előre jelzi a végtermék mikroszerkezeti jellemzőit. Nem utolsó sorban optimalizálhatóvá teszi a gyártást, azaz a gyártási sebesség növelhető, az utófeldolgozási munkálatok, valamint az alkatrész és a támasz deformációja is csökkenthetővé válik.

Szimuláció készíthető a támasz (support) generálás előtt és után is.

A szimulációk mindkét esetben segítenek a nagy értékű gyártással kapcsolatos kockázatok csökkentésében, valamint a nagy volumenű 3D nyomtatás termelékenységének javításában, hetekig tartó gyártási időt és akár több ezer forintnyi fejlesztési és gyártási költséget megtakarítva. [8] [15]

### **5.1.1 Szimuláció készítés a támasz generálása előtt.**

A szimulációs eredmények segítenek azonosítani a gyártás során jelentős deformációval vagy belső feszültséggel járó kritikus területeket. A tervező ezután a deformáció minimalizálása érdekében adaptált tartószerkezeteket adhat hozzá, megváltoztathatja a nyomtatási tájolást a hőfelhalmozódási területek megváltoztatása érdekében, vagy módosíthatja a 3D modell geometriáját a végeredmény minőségének javítása érdekében. [15]

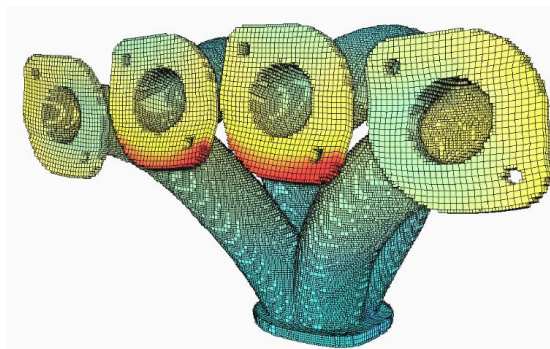
### **5.1.2 Szimuláció készítés a támasz generálása után.**

A támaszgenerálás után a szimulációk segítenek minimalizálni a gyártási hiba kockázatát, biztosítják, hogy a végleges alkatrész méretei egy meghatározott tűréshatáron belül maradjanak, és értékelik a különböző nyomtatási paraméterek hatását (például a gyártásra optimalizált paraméterek és a pontosságra optimalizált paraméterek összehasonlításával). [15]

## 5.2 Szimulációs kimenetek és eredmények

### 5.2.1 Hőmérsékelt eloszlás

Hőmérsékleti gradiens a hőmérséklet változás és az izotermák normálisában vett távolság hányadosa. A hőmérséklet gradiens olyan vektor melynek iránya az izotermikus felület normálisának irányával egyezik meg. Megmutatja, hogy milyen gyorsan változik a hőmérséklet egy adott irányban. A hőmérsékleti gradiens kiszámítása során figyelembe kell venni a hőmérséklet és a térbeli pozíció változását egy adott területen vagy közegben.



6. ábra. Hőmérsékleti eloszlás [15]

A hőmérsékleti gradienst általában a következő képlet segítségével számoljuk ki:

$$\text{Hőmérsékleti gradiens} = \frac{\Delta T}{\Delta d}$$

Ahol:

$\Delta T$  [°C] a hőmérséklet változása két pont között.

$\Delta d$  [m vagy km] a két pont közötti távolság, amelyen belül a hőmérséklet változását mérjük.

Például, ha egy adott területen a hőmérséklet 20°C-ról 10°C-ra csökken 100 méter távolság alatt, akkor a hőmérsékleti gradiens számítása a következőképpen történik:

$$\text{Hőmérsékleti gradiens} = (20^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) / 100 \text{ m} = 10^\circ\text{C} / 100 \text{ m} = 0,1^\circ\text{C/m}$$

Ez azt jelenti, hogy a hőmérséklet 0,1°C-kal csökken minden egyes méterrel lefelé a területen.

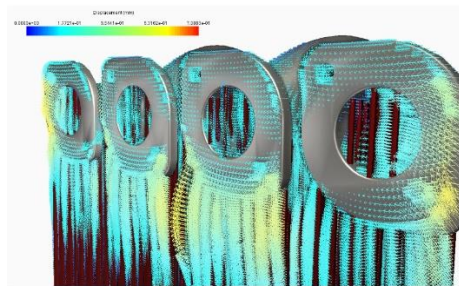
A hőmérsékleti gradiens néha önmagában, mechanikai alakváltozás nélkül is kiszámítható. Ez általában gyorsabb, mint egy teljes szimuláció, és a hófelhalmozódási problémák megoldása egyúttal a mechanikai alakváltozási problémákat is megoldhatja.

[16]

## 5.2.2 Deformáció

Feltételezve, hogy az anyag valódi mechanikai tulajdonságai ismertek, kiszámítható az alkatrész gyártás közbeni deformációja. A deformáció iránya általában ismert, függetlenül attól, hogy milyen szimulációs paramétereket használunk, de a deformáció amplitúdója szorosan függ a szimulációs háló méretétől, azaz finomabb háló használata pontosabb eredményeket ad, de több időt igényel a futtatás.

A deformáció azt jelenti, hogy egy test mérete, alakja vagy szerkezete megváltozik egy külső erő vagy terhelés hatására. A deformáció amplitúdója a deformáció mértékét mutatja be egy adott test vagy anyag esetében, valamint azonosítja a deformáció maximális mértékét egy adott terhelési vagy stressz-szint mellett.



7. ábra. Deformáció vektorok [15]

A deformáció amplitúdója általában az alábbi képlet segítségével számolható ki:

$$\text{Deformáció amplitúdója} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Ahol:

$\Delta L$  a test hosszának változása a deformáció hatására.

$L_0$  a kezdeti hossz vagy referenciahossz a deformáció előtt.

A deformáció amplitúdója dimenzió nélküli, mivel egy arányt fejez ki a kezdeti hosszhoz viszonyítva. Ezért nincs mértékegysége.

Például, ha egy 10mm hosszú próbadarabot ( $L_0$ ), terhelés hatására a 11mm-re nyújtunk ( $\Delta L = 1 \text{ mm}$ ), akkor a deformáció amplitúdója:

$$\text{Deformáció amplitúdója} = (1 \text{ mm} / 10\text{mm}) = 0,1 \text{ vagy } 10\%$$

Ez azt jelenti, hogy a próbadarab 10% -kal megnyúlt a terhelés hatására. A deformáció amplitúdója segít meghatározni, hogy mennyire változott a test mérete vagy alakja egy adott terhelés hatására, és fontos információt nyújt az anyag mechanikai tulajdonságairól és viselkedéséről. [16]

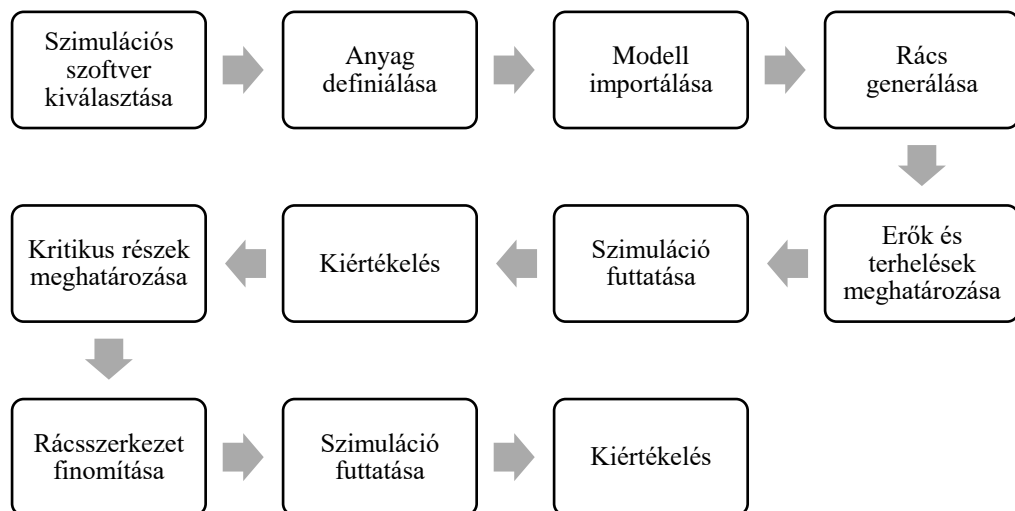
### 5.3 A sikeres szimuláció legfontosabb lépései

Fontos, hogy szimulációt futtasson a felhasználó a támaszgenerálás előtt és után is. Előtte, hogy javítsa az alkatrészgeometriát és segítse a támaszok tervezését. Utána, hogy a gyártási hiba kockázata minimalizálható legyen, illetve, hogy az alkatrészek a megadott tűréshatáron belül maradhassanak.

Szimuláció elvégzésekor mindig nagy méretű rácsozást kell alkalmazni első körben, hogy a nagyobb deformációjú, kényesebb részek azonosításra kerüljenek. Azonosítás után a rácsszerkezet specifikusan finomítható a pontosabb elemzés érdekében.

Idő takarítható meg, ha első szimulációkor a mechanikai paramétereket kihagyjuk és a hőfelhalmozódásra koncentrálunk, hiszen a hőfelhalmozódási problémák megoldása nagy százalékban megoldja a mechanikai deformációs problémákat is.

A gyorsabb szimuláció érdekében érdemes előnyben részesíteni valamely felhő alapú szoftvert, amennyiben ez nem ütközik a titoktartási irányelvekkel.



8. ábra. Szimulációs folyamat bemutatása

## **5.4 Szoftverfelhasználás területekre bontása**

A Véges elemes analízisre alapuló szoftvereket céljukat tekintve 3 fő csoportra bontanám, melyeket a következő pontokban szemléltetek.

### **5.4.1 Anyagfejlesztők számára**

A specifikus VEM szoftver segítségével optimalizálhatják alapanyagaikat, mielőtt azok gyártásba kerülnének. [9]

### **5.4.2 3D nyomtató gyártók számára**

Lehetőséget kínál a 3D nyomtató berendezéseket gyártó cégek számára is, hiszen ezen szoftverek segítségével gyorsan optimalizálhatják a nyomtatóik paramétereit a kívánt/választott anyagokhoz. [9]

### **5.4.3 Végfelhasználók számára**

A végfelhasználók számára az additív gyártástechnológia ezen szegmensét ellenőrizhető technológiává teszi. Segítséget ad a mérnököknek, hogy időt megtakarítva, szinte azonnal megfelelő alkatrészeket hozhassanak létre. Alkatrésztől függően javaslatot tesz a szoftver az anyagkiválasztásra, azaz összehasonlítja a nyomtatást különböző anyagokkal szimulálva, esetleges módosítási javaslatokat is tesz az alkatrész geometriájának optimalizálására a megfelelő terhelések parametrizálását követően.

Erre a folyamatra és ezen technológia felhasználására Virtuál Printingként fogok hivatkozni a következőkben.

A virtuál printing szimulálja az anyag viselkedését nyomtatás közben, technológiától függően képes akár a vetemedést is figyelembe venni (ABS, PA11). A virtuál printing segítségével maximalizálhatók a munkadarab tulajdonságai a nyomtatóágyon elfoglalt pozíció és a nyomtatási paraméterekkel történő változtatás révén, melyeket ezáltal nem a felhasználó mérnököknek kell manuálisan végrehajtaniuk csak lektorálniuk kell azt. [9]

## 6. A probléma bemutatása

Egy ipari létesítményben az egyik, már nem kapható típusú 3 fázisú aszinkron motor lapátkereke, használhatatlanná vált. A tönkremenetel oka a karbantartás hiánya és a többszörös helytelen felszabályozási kísérlet volt. Egy ilyen motor kiváltása, rendszer szinten, hatalmas átalakítással járt volna, ezért alternatív megoldásra volt szükség a költségek csökkentése érdekében.

Mindazonáltal, hogy megfogalmaztak egy helyettesítő termékre vonatkozó igényt, szerették volna az eredeti konstrukció paramétereit módosítani is.

Módosítandó paraméterek:

- természetesen a helytelen felszabályozás által okozott deformációkat kérték korrigálni,
- a lapátkerék agymagasságát kérték növelni 22 mm-ről 27 mm-re,
- az eredeti alkatrészben található két menetes furatot, melyekkel plusz rögzítési lehetőséget kívántak biztosítani, kérték megszüntetni.



9. ábra. 3 fázisú aszinkron motor járókereke

A felvázolt problémára vonatkozó megoldási igény a FreeDee Kft-hez érkezett be, jelen diplomadolgozat keretében a saját megoldási javaslatomat mutatom be.



10. ábra. Közreműködő cég [17]

Megoldási javaslataimat arra alapozom, hogy a FreeDee Kft profiljába tartozó 3D nyomtatási eljárásokkal elkészíthető legyen [17]. Ezáltal az eredetileg alumínium öntvényből készült lapátkereket valamely additív technológiával készült egyedi termékre szerettem volna kiváltani, vagy szerettem volna felhasználni valamely 3D nyomtatási eljárást az új alumínium öntvény gyártásához szükséges mesterdarab elkészítéséhez.

### **6.1 Rendelkezésemre álló információk és működéshez szükséges peremfeltételek**

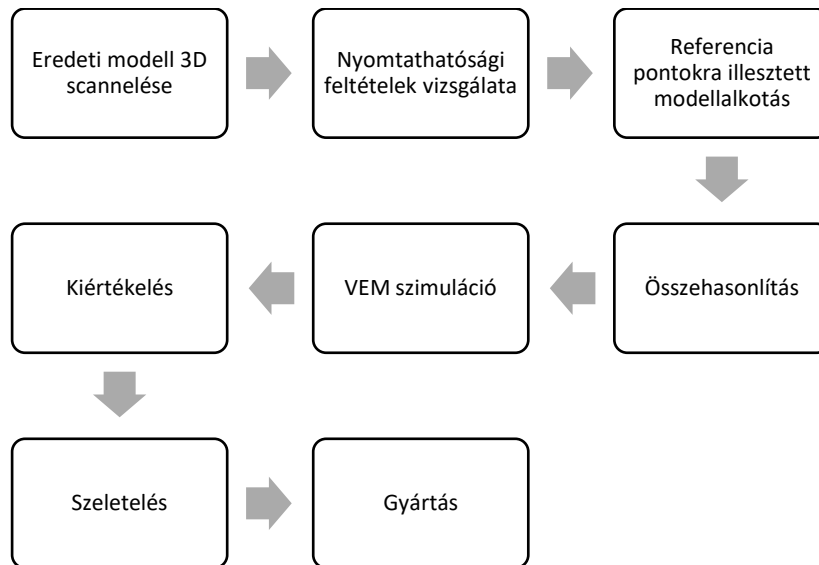
A lapátkerék illeszkedő tűrése H7, melyet 3D nyomtatással előállítani nem lehet, ezért a tengelyfurat méretét ráhagyással szükséges modellezni és gyártani, hogy az illeszkedő felületet dörzsárazással ki lehessen alakítani. A meghatározott ráhagyás mértéke 0,4 mm.

Anyagválasztásnál szükséges figyelembe venni, hogy a lapátkerék állandósult üzemi fordulatszáma 2400 fordulat/perc. Ezen értékből adódó mechanikai igénybevételt a járókeréknek el kell viselnie.

A járókereket a tengelyen vállig ütköztetik, tengelyhez rögzítését alakzáró kötéssel, reteszkötéssel oldják meg, mely egy axiális kötéssel, seeger gyűrű formájában egészül ki.

## 7. Megoldás menete

A korábbiakban, a 6. bekezdésben bemutatott problémára, általam alkalmazni kívánt megoldási menetet a következő folyamatábrában szeretném szemléltetni.

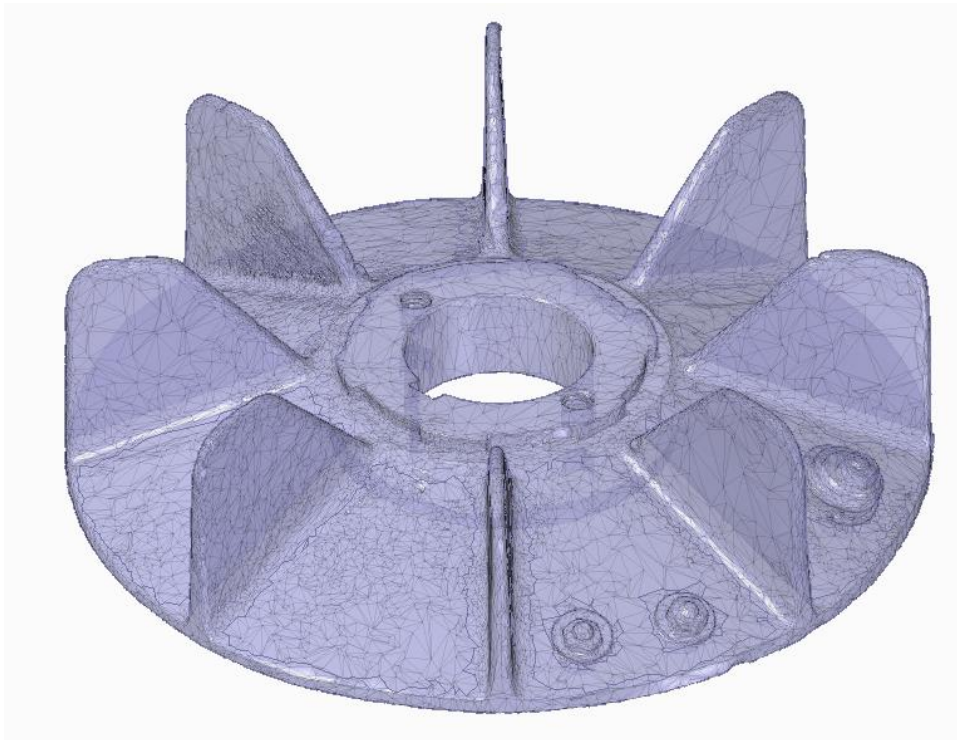


11. ábra. Megoldás elvi menete



## 7.1 Szkennelés

A scanneléshez a SHINING 3D FreeScan Combo scannerét alkalmaztam. Ez az eszköz 0,02mm pontosságra képes. Első lépésként elő kellett készíteni a háttérrel a háttérzaj minimalizálása érdekében. Következő lépésként magának a scannelendő alkatrésznek a felületét kellett előkészíteni, megtisztítani, majd egy digitalizáló spray (AESUB) segítségével egy scannelésre alkalmas tükröződésmentes felületet kellett létrehoznom. Az eszköz saját szoftveréhez kapcsolódása után a scanner kalibrálására volt szükség. A beállítások véglegesítését követően az eredeti lapátkereket a forgóasztalra helyeztem és kellő odafigyeléssel bescanneltem, mind a két oldalát külön-külön. A FreeScan lehetőséget biztosít arra, természetesen zajok kiszűrése után, hogy a két modell azonos referenciapontjainak felhasználásával legenerálja az egyesített pontfelhőt. Referencia ponthalmazként a reteszhornyot használtam. Az elkészült pontfelhőt, a pontok irányvektorait felhasználva, háló modellé alakítottam. Az elkészült mesh modellt egy egyszerű konvertálás segítségével .stl formátumban el tudtam menteni, 96686 felület keletkezett.



12. ábra. Scannelt modell .stl formátumban

## 7.2 Modellalkotás

Ahogy azt korábban is említettem, az eredeti modell deformálódott volt, valamint tartalmazta a felszabályozáshoz használt csavarokat és alátéteket. A scanner szoftvere lehetőséget biztosít az e fajta zajok korrigálására, de én az általam ismert eljárást alkalmaztam. CAD környezetbe, Solid Edge-be emeltem.

Az ASTM 902 és az ISO/ASTM5910:2018 figyelembevételével, a modellezés első lépéseként az xyz koordináta síkot a koncentrikus felület középpontjához rendeltem, majd a referencia pontokat felhasználva, parametrikusan visszamodelleztem az alkatrészt.

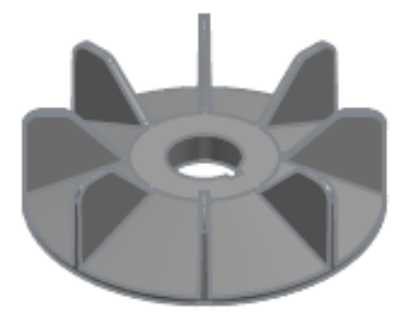
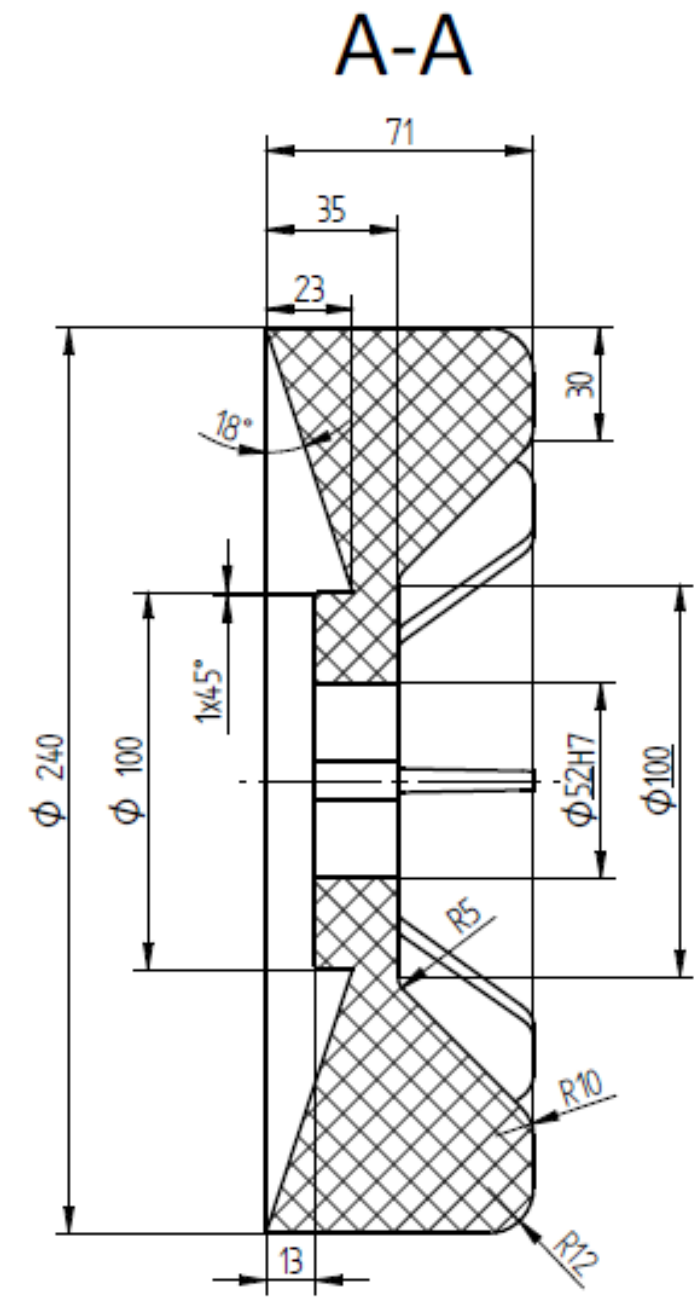
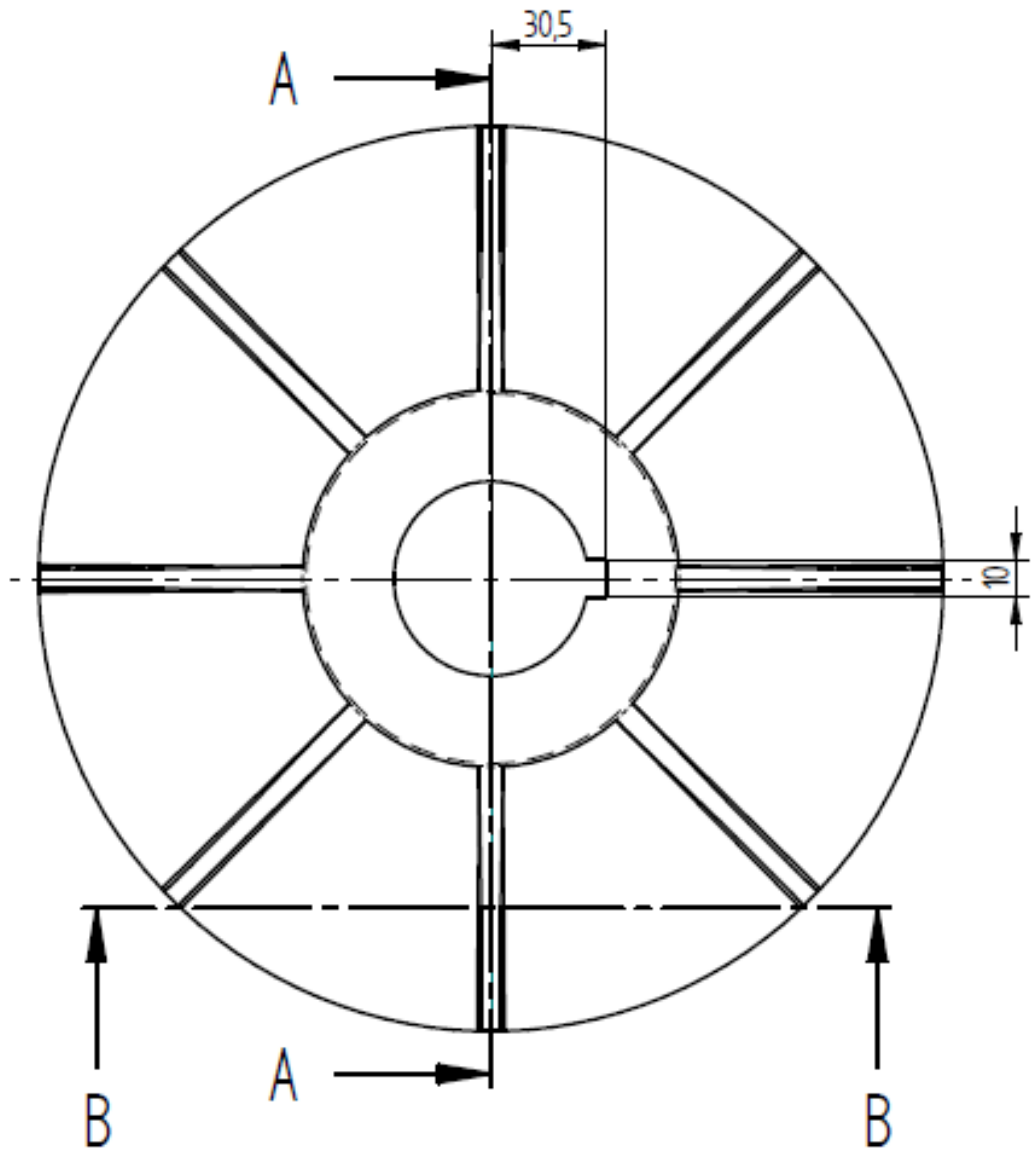
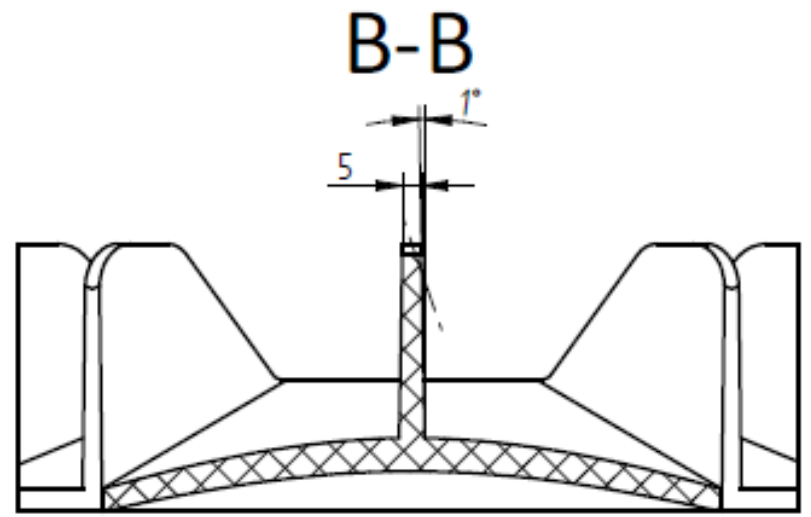
Már a tervezési fázisban tisztában kellett lennem az alkatrész nyomtatáskori orientációjával, az illeszkedő méretekkel, az esetlegesen túlnyúló felületekkel és az élek kialakításával is, annak érdekében, hogy a tervezett alkatrész nyomtatható legyen, amellett, hogy kielégíti a rendeltetési helyének követelményeit.

### 7.2.1 Nyomtathatósági feltételek

Fontos volt, hogy az alkatrésznek nem egy, hanem három különböző technológiára kellett optimalizálnak lennie, ezért a figyelembe vett szempontokat az alábbi táblázatban szeretném szemléltetni: [18] [19] [20]

1. táblázat. Nyomtathatósági feltételek

Ábra	Leírás	Érték	Technológia
	Minimális falvastagság	0,2 mm.	SLA
		0,2 mm	SLS
		4 mm	FDM (CFR)
	Maximális nem alátámasztott túlnyúlás hossza :	5 mm.	SLA
		1,6 mm	FDM (CFR)
	Minimális nem alátámasztott túlnyúlási szög :	10°.	SLA
		40°.	SLS
		45°.	FDM (CFR)
	Minimális furatátmérő :	0,5 mm.	SLA
		1,5 mm	SLS
		2 mm	FDM (CFR)

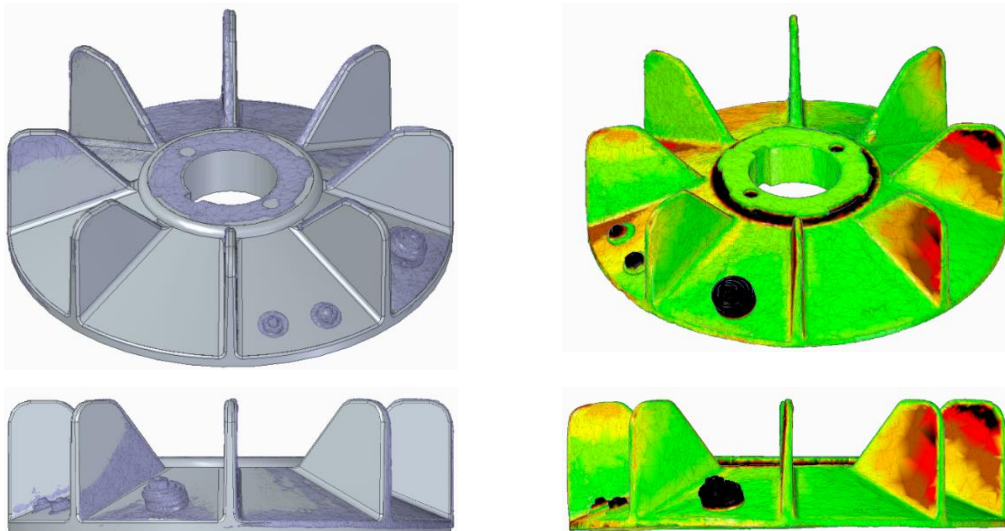


Vetítési mód: 	Méretarány: M2:1	Megnevezés:	
Anyag: PA12	<b>MATE</b>	<h1>Lapátkerék</h1>	
Rajzoló: Bondor Csaba	Név, Neptun kód: Bondor Csaba, GVSXUB	Rajzszám: BCS2023R001	
Dátum: 2023.05.18.			

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

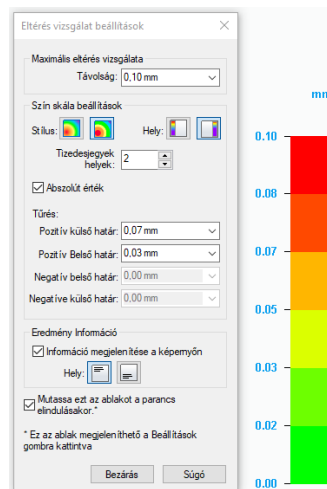
### 7.3 Összehasonlítás

A modellezést követően az elkészült modelleket összehasonlítottam a scannelés eredményével. Az eltéréseket az esetleges modellezési hibák kiküszöbölése érdekében ütközésvizsgálat futtatásával kiértékeltem.



13. ábra. Eredeti és tervezett modell összehasonlítása

Az értékeléshez az alábbi skálázást használtam:



14. ábra. Színtérkép skálázása

A megrendelő a 6 pontban bemutatott módosításokat kérte, ebből kifolyólag azokat a módosításokat is eltérésként lehet látni a modellek között.

Figyelembe véve, hogy az alkatrészen végzett módosítások csak forgásszimmetrikussá tették azt, valamint a referencia síkok kiegyenlítésre kerültek, ezért kijelenthetem, hogy a tervezett alkatrész geometriai szempontból funkcióját teljes mértékben képes betölteni.

#### **7.4 Mintadarab végeelem analízise**

A szálolvasztásos 3D nyomtatási technológiában már rendelkezésre állnak olyan műszaki alapanyagok, például szénszállal és üvegszállal megerősített kompozitok, ultrapolimerek és fémek, amelyek alkalmasak szerkezeti alkatrészek előállítására, és képesek jelentős mechanikai terhelést elviselni. Ugyanakkor a gyakorlatban, megfelelő ellenőrző és tervezőeszközök hiányában, az ilyen alkatrészek tervezését a mérnökként túlméretezéssel kellett elvégeznünk annak érdekében, hogy biztonságosan elő tudjuk állítani ezeket az alkatrészeket. Ennek következtében feleslegesen hosszú nyomtatási időket és túlzott alapanyagfelhasználást generáltunk. A piaci igény egyre növekszik arra, hogy hatékonyan tudjuk ellenőrizni, méretezni és tervezni a 3D nyomtatási technológiával készülő alkatrészeinket az adott terhelési igényekre való tekintettel. [21]

Korábban a nyomtatott anyag technikai és szilárdságtani jellemzői ismeretében sem lehetett pontos következtetéseket levonni a végtermék ugyanezen tulajdonságait illetően. Ezen jelenség magyarázata, hogy a felhasznált alapanyag homogén és izotróp, míg a végtermék külső falvastagságából és kitöltési mintájából adódóan erősen anizotróp. [21]

A specifikusan 3D nyomtatott alkatrészekre optimalizált végeelem szoftverek hozzáférhetőségéhez számomra anyagi okok miatt nem volt lehetőségem. Igyekeztem azonban ennek ellenére megvizsgálni ezen szoftverek működését, az általuk biztosított lehetőségeket.

### 7.4.1 Markforged Eiger

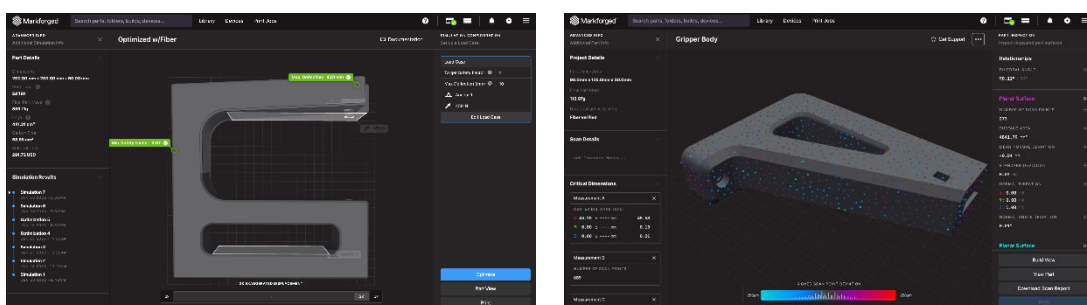
Az Eiger szoftver általánosságban lehetővé teszi a szálerősítés bevezetését a 3D nyomtatott alkatrészek tervezésébe. Ezen előnyös tulajdonság segítségével a terhelés és tartósság kezelhető szempontokká válnak, különösen azokban az alkalmazásokban, ahol a mechanikai szilárdság kritikus tényező. [22] [23]

A szoftver felhasználóbarát kezelőfelülete kifinomultan egyszerű és átlátható, így a felhasználók könnyedén és hatékonyan felkészülhetnek a nyomtatási munkafolyamatra. Ezen tulajdonsága kiemelten fontos, különösen azoknak a felhasználóknak, akik speciális követelményeket támasztanak vagy egyedi nyomtatási paraméterek alkalmazását igénylik. [22] [23]

Az Eiger felhőalapú szoftver, ami azt eredményezi, hogy bármely eszközről és böngészőből hozzáférhető. Ezen tulajdonsága lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy bárhol és bármikor elérjék a szükséges szolgáltatásokat és adatokat. [22] [23]

A szoftvert úgy tervezték, hogy alkalmazkodjon az egyedi igényekhez és szervezeti méretű vállalkozásokhoz. Legyen szó egy egyszerűbb Markforged nyomtatóval rendelkező kisvállalkozásról vagy egy óriási vállalatról, a szoftver biztosítja az átláthatóságot és kezelhetőséget. [22] [23]

Az Eiger szoftver tehát egy rugalmas és fejlett eszköz, amely megkönnyíti a 3D nyomtatási folyamatot, és lehetővé teszi a felhasználók számára a speciális igények kielégítését és az alkalmazás egyszerűsítését. [22] [23]

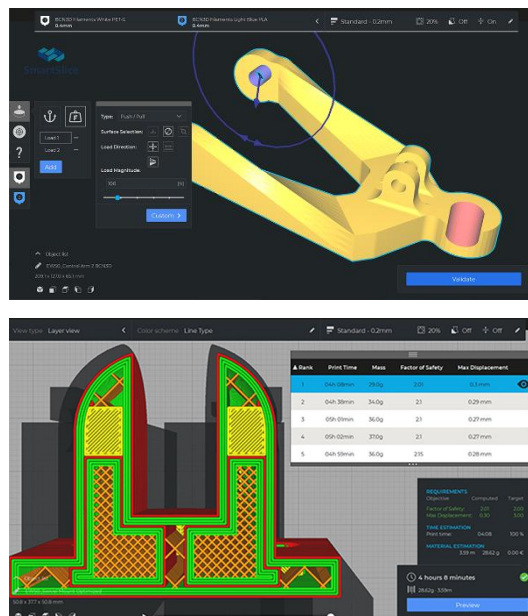


15. ábra. Markforged Eiger [23]

## 7.4.2 SmartSlice

A SmartSlice plugin forradalmi lehetőséget teremt minden mérnök számára, mivel lehetővé teszi a 3D nyomtatott szerkezeti elemek testreszabását.

A SmartSlice plugin lehetőséget nyújt arra, hogy kényszereket definiáljunk az elkészítendő alkatrészünk számára. A szoftver ezután az adott nyomtatási paraméterek és alapanyagok alapján ellenőrzi a tervezett alkatrészt, és képes rögzíteni az esetleges alakváltozásokat is, mindezt végeelem-számításokkal támogatva. [21]



16. ábra. Teton Smart Slice [24]

Ezen felül a szoftver nem csak ellenőríz, hanem optimalizálja is a nyomtatási paramétereket, hogy a végeredmény olyan legyen, hogy biztonságosan megfeleljen a mechanikai követelményeknek. Ez az innováció különösen fontos a szálolvasztásos 3D nyomtatás területén, amely a legelterjedtebb 3D nyomtatási technológia. A SmartSlice plugin a Cura szoftverkörnyezetben működött, amely a világ legnépszerűbb, ingyenes és nyílt forráskódú 3D nyomtatási előkészítő szoftvere. Sajnos ezt a beágyazható modult felvásárolták, így már ingyenes formában nem elérhető. [21]



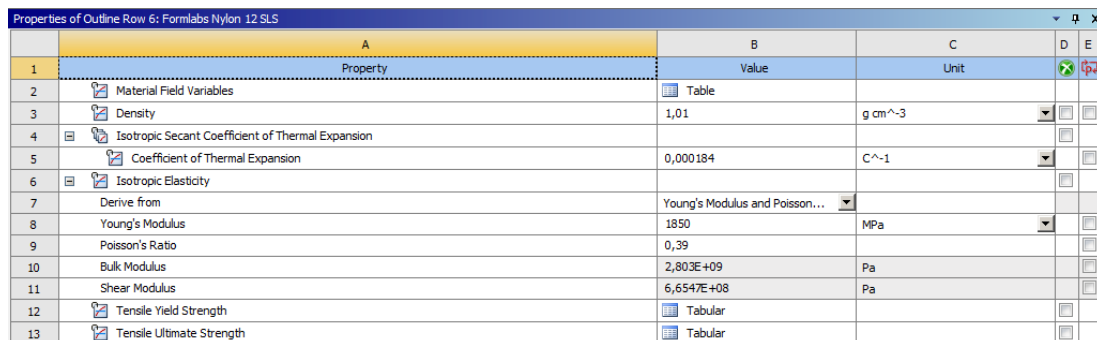
### 7.4.3 Ansys

A saját szimulációm a korábbiakban említett okok miatt én ANSYS-ban végeztem. A végeelem szoftver közelítő függvényeken alapul, melyek leírják a generált háló elemeinek viselkedését. A megoldások összessége adja az egész szerkezetre vetített megoldást. Alapvetően a szoftver a virtuális munka tétel elvén alapul, mely kimondja, hogy a külső erők hatásából számított virtuális munka egyenlő a belső erők alakváltozási energiájával. A módszer hátránya, hogy az elemen belül alkalmazott lineáris közelítés hibákhoz vezethet.

#### 7.4.3.1 Anyagok definiálása

Figyelembe véve, hogy az eredeti alkatrész kiváltását additív gyártási technológiával szerettem volna megoldani, ezért három különböző technológiához alkalmazott három különböző anyagot választottam, melyeket a jelen dolgozat mellékletét képező, anyagtulajdonságokat tartalmazó, adatlapok alapján legeneráltam anyagmodellként.

A három választott anyagom:



Property	Value	Unit		
Material Field Variables	Table			
Density	1,01	g cm <sup>-3</sup>		
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
Coefficient of Thermal Expansion	0,000184	C <sup>-1</sup>		
Isotropic Elasticity				
Derive from	Young's Modulus and Poisson...			
Young's Modulus	1850	MPa		
Poisson's Ratio	0,39			
Bulk Modulus	2,803E+09	Pa		
Shear Modulus	6,6547E+08	Pa		
Tensile Yield Strength	Tabular			
Tensile Ultimate Strength	Tabular			

17. ábra. Formlabs Nylon 12

Az SLS technológiához választott por alapanyagból készülő modellt jelen körülmények között homogénnek minősíthetem, ezért isotróp rugalmassági anyagjellemzőket adtam meg.



Properties of Outline Row 5: Formlabs Castable Wax				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1,01	g cm <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	0,000184	C <sup>-1</sup>	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
8	Young's Modulus	220	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,4		
10	Bulk Modulus	3,6667E+08	Pa	
11	Shear Modulus	7,8571E+07	Pa	
12	Tensile Yield Strength	Tabular		
13	Tensile Ultimate Strength	Tabular		

18. ábra. Formlabs Castable Wax

Az SLA technológiához választott gyanta alapanyagból készült modellt szintén homogénnek tekintem, így szintén izotróp tulajdonságokkal jellemeztem. [25]

Properties of Outline Row 4: Filamentum ABS Extrafill - Ortotróp				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1,04	g cm <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	0,000184	C <sup>-1</sup>	
6	Isotropic Elasticity			
12	Orthotropic Elasticity			
13	Young's Modulus X direction	2203	MPa	
14	Young's Modulus Y direction	2312	MPa	
15	Young's Modulus Z direction	2000	MPa	
16	Poisson's Ratio XY	0,4		
17	Poisson's Ratio YZ	0,4		
18	Poisson's Ratio XZ	0,4		
19	Shear Modulus XY	786,79	MPa	
20	Shear Modulus YZ	825,71	MPa	
21	Shear Modulus XZ	714,29	MPa	
22	Orthotropic Stress Limits			
23	Tensile X direction	33,3	MPa	
24	Tensile Y direction	34	MPa	
25	Tensile Z direction	13,1	MPa	
26	Compressive X direction	0	MPa	
27	Compressive Y direction	0	MPa	
28	Compressive Z direction	0	MPa	
29	Shear XY	19,23	MPa	
30	Shear YZ	19,63	MPa	

19. ábra. Filamentum ABS Extrafill

Az FDM technológiához alkalmazott filament szálanyagból készülő modellt, annak ellenére, hogy nyomtatáskori teljes kitöltést feltételeztem, ortotróp anyagként adtam meg. Így kívántam megközelíteni, hogy a technológia sajátosságaként a modellem rétegenként fog felépülni.

A modell elhelyezésétől és rétegekialakításától függően mások az anyagtulajdonságok. Az ortotróp anyag definiálásához több paraméterre volt szükségem, mint amennyi az anyag adatlapján fel volt tüntetve. [26]

A nem megadott tulajdonságokat és jellemzőket a következő módon határoztam meg:

$$E = 2G(1 + \mu)$$

$$\text{Shear modulus } XY = G_1 = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{2203}{2 \cdot (1 + 0,4)} = 786,79 \text{ MPa}$$

$$\text{Shear modulus } YZ = G_2 = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{2312}{2 \cdot (1 + 0,4)} = 825,71 \text{ MPa}$$

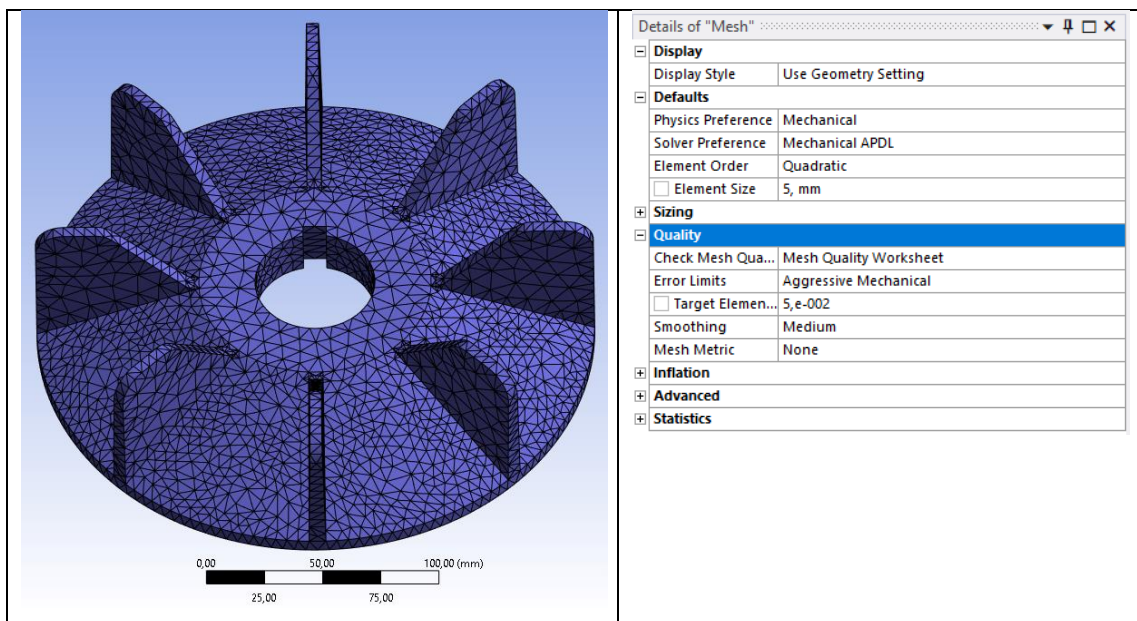
$$\text{Shear modulus } XZ = G_3 = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{2203}{2 \cdot (1 + 0,4)} = 714,29 \text{ MPa}$$

$$\text{Shear } XZ = \tau_1 = \frac{\sigma_{egy}^{HMH}}{\sqrt{3}} = \frac{33,3}{\sqrt{3}} = 19,23 \text{ MPa}$$

$$\text{Shear } YZ = \tau_2 = \frac{\sigma_{egy}^{HMH}}{\sqrt{3}} = \frac{34}{\sqrt{3}} = 19,63 \text{ MPa}$$

#### 7.4.3.2 Rács generálás

A lehető legpontosabb szimuláció érdekében a rácselemeket kvadratikusra állítottam. Az elemméretet számos próba szimuláció után határoztam meg véglegesen és egységesen 5mm-ben. Tapasztalati úton azt mondhatom, hogy jelen feladatnál a kisebb elemméret nem ad pontosabb eredményt, viszont jelentősen megnöveli a szimulációs időt.

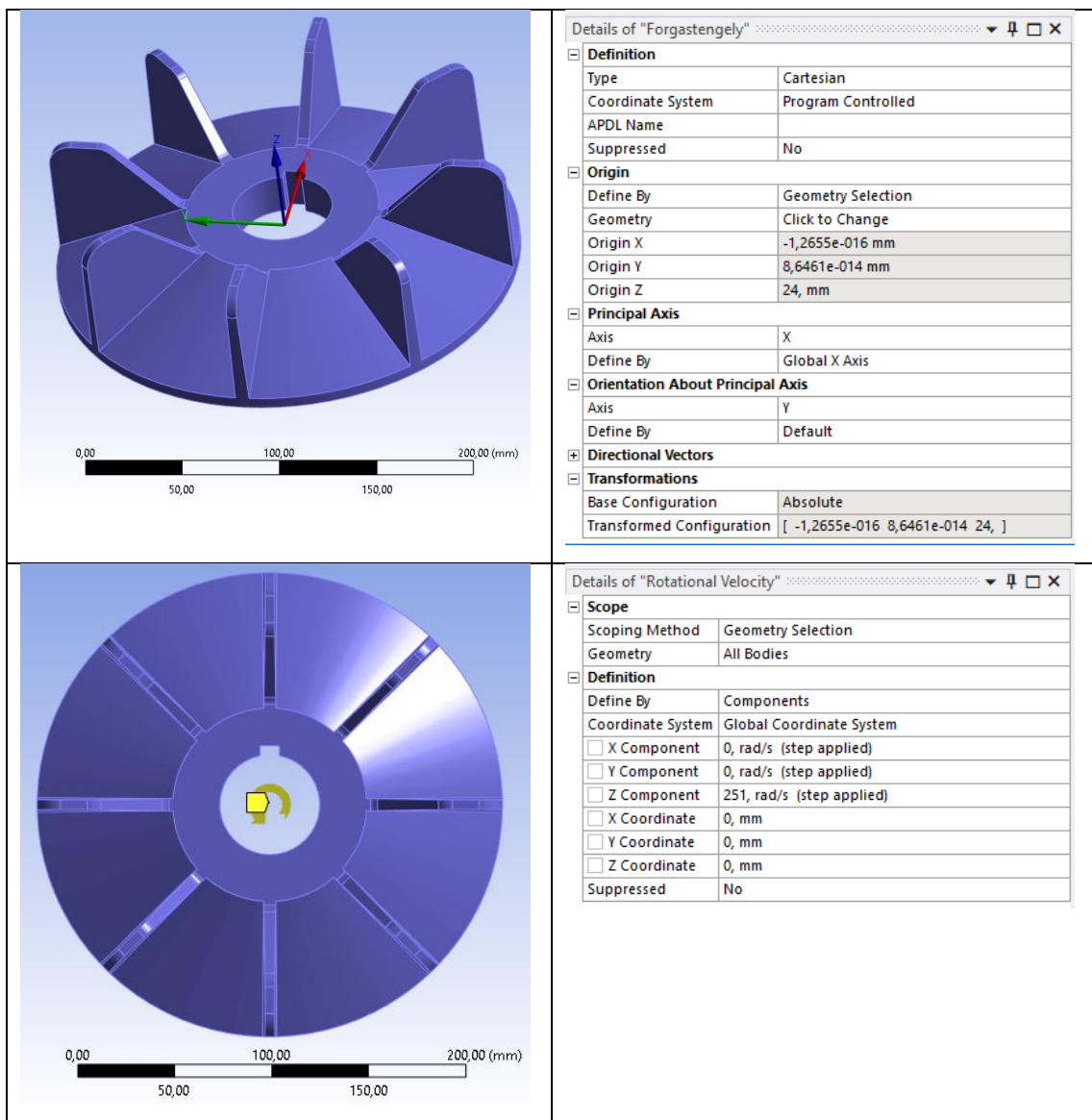


20. ábra. Rács generálása

### 7.4.3.3 Forgási sebesség

Első lépésként elhelyeztem egy egyedi koordináta rendszert a forgástest belső palástját referenciaként használva, ezáltal létrehoztam a forgástengelyemet. Következő lépésként felhasználva a forgástengelyt definiáltam a forgási sebességet. A forgási sebességet a megrendelőtől begyűjtött információ alapján az állandósult üzemi állapot (2400 fordulat/perc) alapján határoztam meg.

$$\text{Forgási sebesség} = \frac{2400}{60} \cdot 2\pi = 251 \text{ rad/s}$$

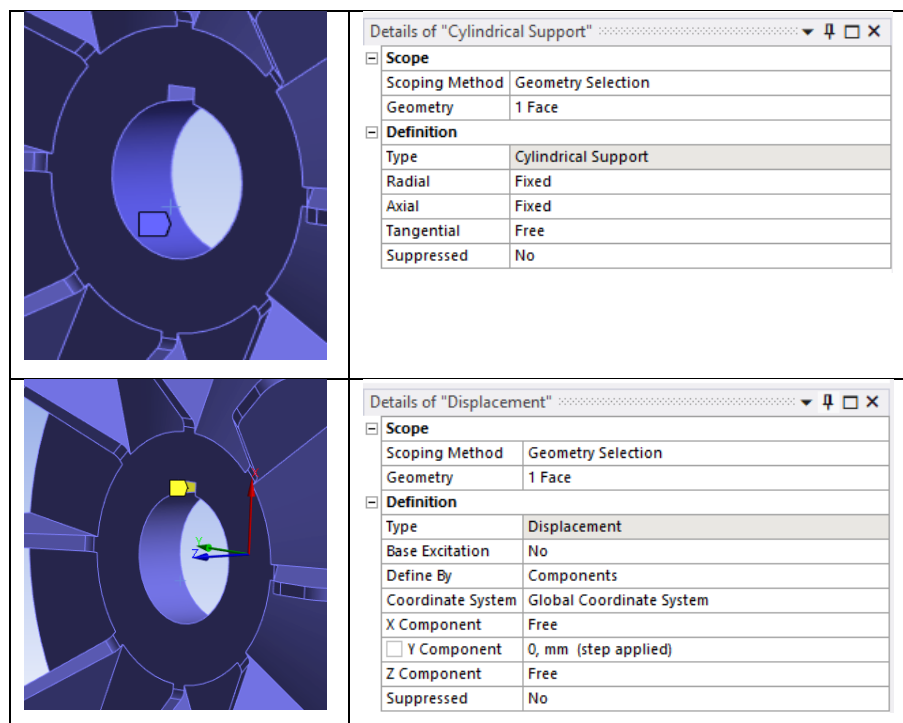


21. ábra. Forgási sebesség definiálása

#### 7.4.3.4 Támaszok hozzárendelése

Radiális, azaz sugárirányú és axiális, azaz tengely irányú elmozdulás ellen rögzítettem a modelletem egy hengeres támasz segítségével. A tangenciális mozgást, azaz a hengerfelületen történő elmozdulást engedélyeztem. Továbbá egy displacementet definiáltam komponensei által a reteszhorony nyomott oldalára, melyet csak „y”, azaz tengelyirányra merőlegesen, vízszintesen rögzítettem. A „z” komponens szabadon hagyásával engedélyeztem a lapátkerék tengelyirányú elmozdulását, az „x” komponens szabadon hagyásával pedig a centripetális erő szétfeszítő hatását kívántam engedélyezni. A retesznek állandósult állapotban, mikor a lapátkerék  $\omega$  szögsebességgel forog, csak azt a nyomatókot kell átvennie, ami a légellenállásból adódik.

A való életben a tárcsa a tengelyről le tudna válni, viszont mivel nem szorító kötással viszi át a nyomatókot, ezért jelen esetben elhanyagolható.



22. ábra. Támaszok hozzárendelése

### 7.4.3.5 Erők definiálása

Légellenállási egyenletet felhasználva a lapátokra közelítő légellenállást számoltam. [27]

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_D \cdot A$$

Ahol:

„ $\rho$ ” a levegő sűrűsége, ami  $1,293 \text{ kg/m}^3$ .

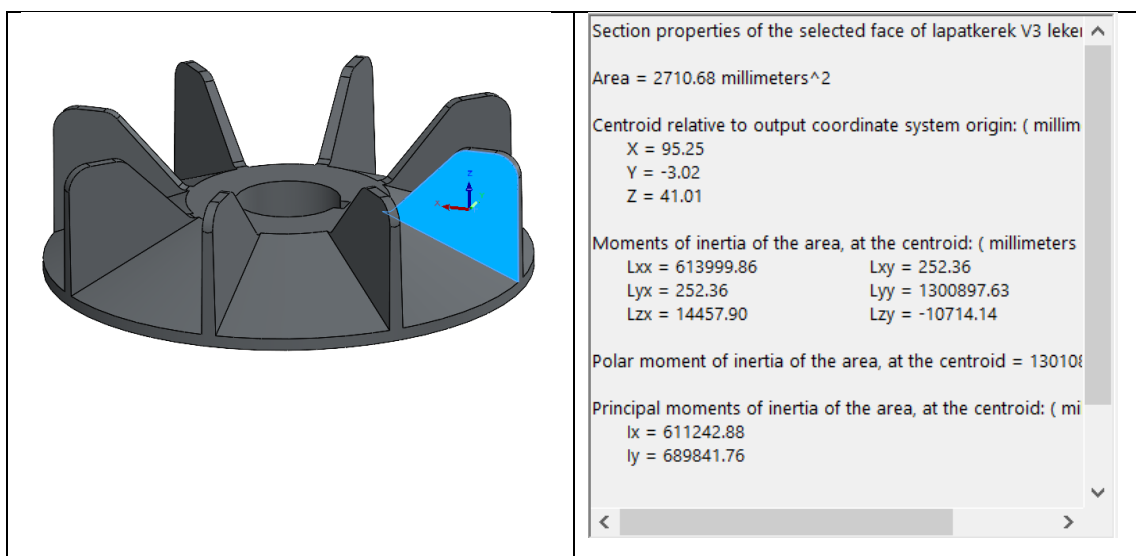
„ $v$ ” az áramlási sebesség a tárgyhoz képest.

A kerületi sebességet a lapát felületi súlypontjában számoltam.

$$v = R \cdot \omega = R \cdot 2\pi n = 95,25 \text{ mm} \cdot 251 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 23,91 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

„ $R$ ” a lapát súlypontjának rádiusza, ami a modellből kinyert információ alapján  $95,25 \text{ mm}$ .

„ $A$ ” a referencia felület, ami a modellből kinyert információ alapján  $2710,68 \text{ mm}^2$ .



23. ábra. Lapát súlypontja és területe

$C_D$  a légellenállási együttható, melyet a formai adottságok miatt a táblázatból 1,98-ra választottam, mint lapos test légellenállási együtthatója.

	0.38		1.16
	0.42		1.17
	0.47		1.20
	0.50		1.55
	0.59		1.55
	0.80		1.60
	1.05		1.98
	1.17		2.00
	1.17		2.05
	1.38		2.20
	1.42		2.30

24. ábra. Légellenállási együttható [28]

A szükséges adatok kiszámolása és kigyűjtése után az egyenlet behelyettesíthető.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_D \cdot A =$$

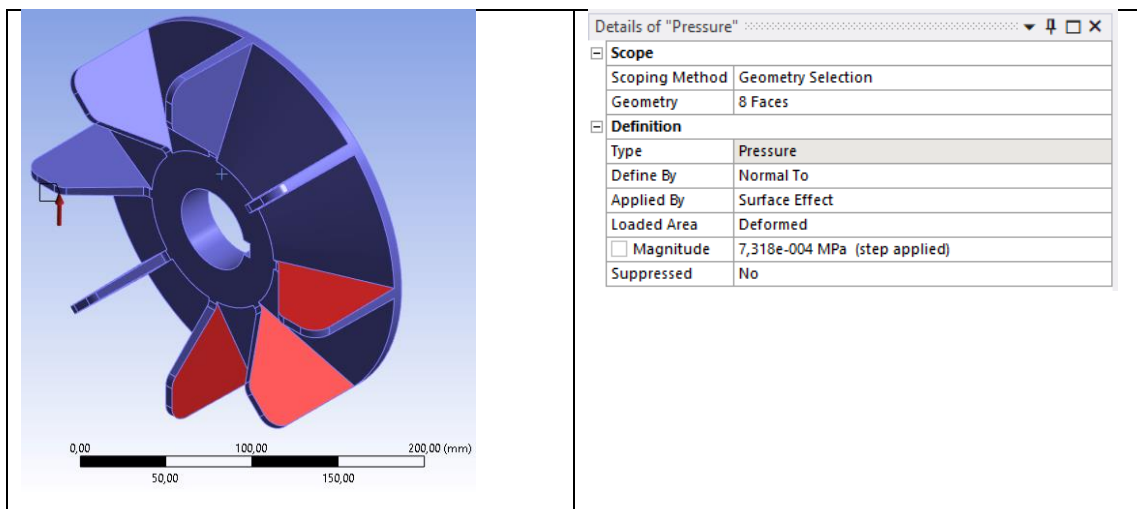
$$= \frac{1}{2} \cdot 1,293 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(23,91 \frac{m}{s}\right)^2 \cdot 1,98 \cdot 2710,68 mm^2 = 1,9837N$$

Egy lapátra eső légellenállási erő, jó megközelítéssel 1,9837 N.

Azonban felületi nyomásként szeretném definiálni, ezért az így kapott erőt elosztottam egy lapát felületével.

$$P = \frac{F_D}{A} = \frac{1,9837N}{2710,68 mm^2} = 0,0007318 MPa$$

Ezt a felületi nyomás értéket elhelyeztem minden lapát forgásiránnyal ellentétes felületére.

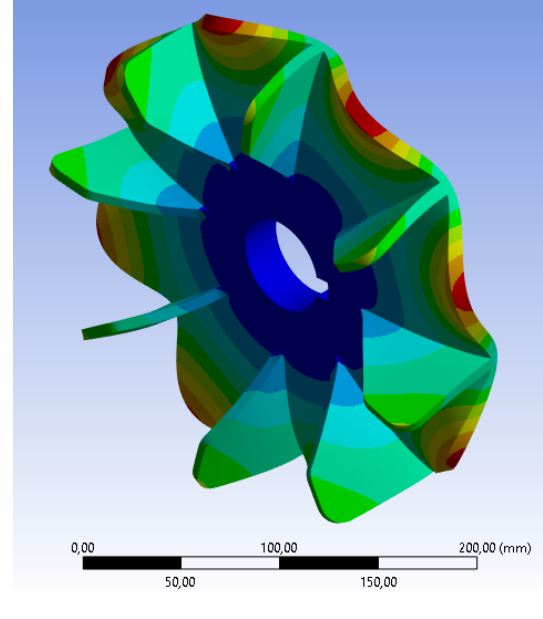
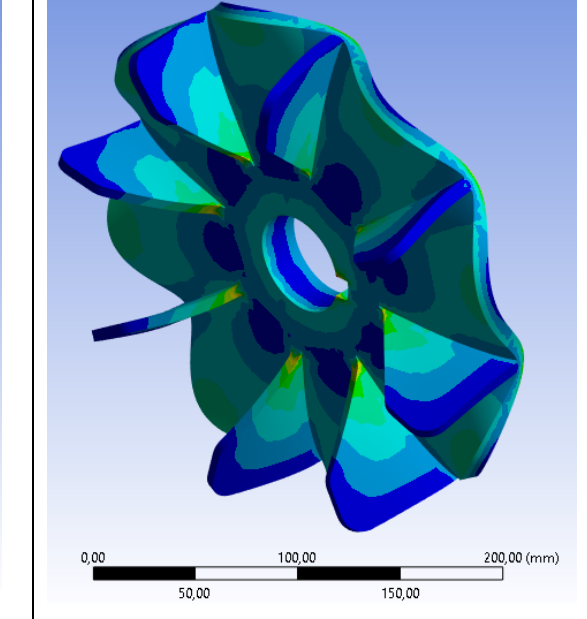


25. ábra. Felületi nyomás elhelyezése

### 7.4.3.6 Szimulációs kimenetek és értékelésük

A korábbiakban felsorolt, legenerált anyagmodellekre, illetve a programba integrált, az eredeti alkatrész anyagához hasonló alumíniumra lefuttattam a szimulációkat.

2. táblázat. Szimulációs eredmények

			
Formlabs Nylon 12	Formlabs Castable Wax	Filamentum ABS Extrafill	Alumínium
Legnagyobb deformáció			
0,53778 mm	0,43811 mm	0,045935 mm	0,003584 mm
Legnagyobb ébredő feszültség			
1,2971 MPa	1,2916 MPa	1,2823 MPa	3,5325 MPa

Az eredményekből látható, hogy a választott műanyagok hasonlóan viselkednek. A szimulációk szerint, a legnagyobb feszültség minden esetben a reteszhorony és a retesz találkozásánál ébred. Második kritikus pont a lapátok tengelyhez közelebbi, szögben álló szárának és az agynak a találkozásánál van. Megállapítható azonban, hogy nem érdemes finomabb rácsszerkezetet alkalmazni ezen pontok vizsgálatához, mivel nincsenek kiugróan magas, vizsgálandó értékek. A háló finomításával csúcspeszültség problémába ütköznénk. Minél finomabb a háló, annál nagyobb feszültséget ír a szoftver.

Megfigyelhető, hogy az alumínium használatakor ébred a legnagyobb feszültség. Közelítéssel elég könnyen megmagyarázható ez a jelenség. Szilárdságtanban a mechanikai feszültség egyszerű esetben, tiszta húzásra vagy nyomásra megadható az erő és a rá merőleges keresztmetszet hányadosaként. Jelen esetben az erő a centripetális erő. A centripetális gyorsulás felírható a szögsebesség négyzetének és a helyi simulókör sugarának szorzataként. A centripetális erő felírható a tömeg és a centripetális gyorsulás szorzataként. A tömeg felírható a modell térfogatának és sűrűségének szorzataként.

$$F_{CP} = m \cdot a_{CP} = (V \cdot \rho) \cdot (\omega^2 \cdot R)$$

A felvázolt összefüggések ismeretében kijelenthető, hogy az anyag sűrűségbeli különbsége okozza a nagyobb ébredő feszültséget.

A szimulációs eredmények azt mutatják, hogy minthárom anyag megfelel a kritériumoknak.

Figyelembe véve azonban, hogy a szálhúzásos technológiához alkalmazott alapanyagra készített szimuláció nem parametrizálható teljes mértékben, hiszen az izotróp anyagból készített anizotróp végtermék belső geometriája és rétegeinek kialakítása nem modellezhető, így ezen alapanyag szimulációját csak kísérleti jelleggel készítettem el. A szimuláció végeredményét nem minősítem teljes mértékben hitelesnek, így ezen anyag használatát, kizárólag a szimuláció függvényében, nem javaslom.

Fontosnak tartom továbbá kiemelni, hogy a Castable Wax alapanyag vizsgálatát is csak információ gyűjtési céllal hajtottam végre, hiszen ezen alapanyagból készítendő, alumínium öntéshez használt mesterdarabnak, csak és kizárólag geometriai szempontból kell megfelelnie az elvárásoknak.

A leírtak ismeretében direkt kiváltásra és funkcionális, mechanikai hatásoknak kitett alkatrész előállítására a Nylon 12 alapanyag használatát javaslom.



## 7.5 Gyártási eljárások bemutatása.

A szimulációs eredmények kiértékelésének eredményeképp meghatároztam a 7.4.3.6 pont keretében, hogy mely anyag használatát javaslom, azonban szeretném bemutatni mindhárom különböző alanyagból készíthető alkatrész gyártási eljárásának lehetséges menetét.

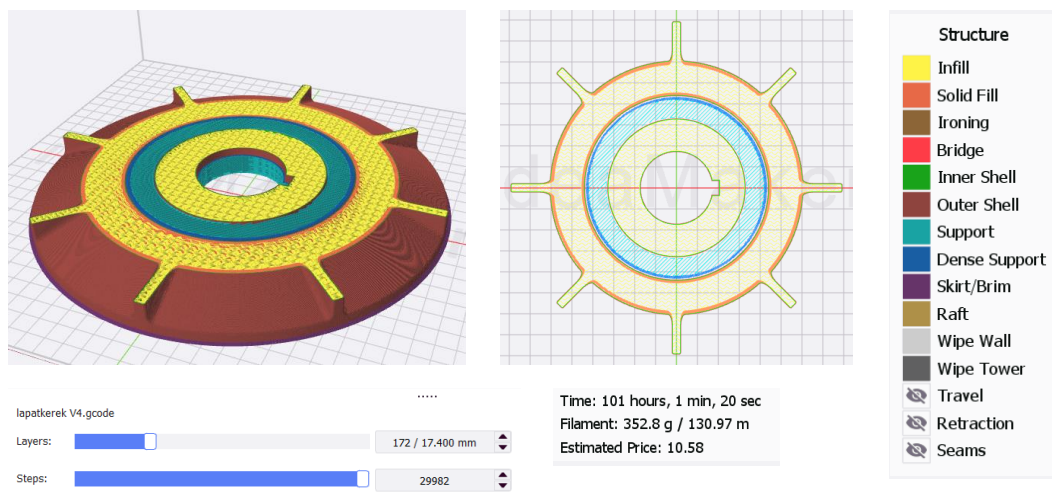
### 7.5.1 Szeletelés FDM technológiára

A modell szeletelésére Idea Maker 4.3.3 szoftvert használtam [29]. A szoftverbe importált .stl formátumú modelltől G-kódot generáltam a bekerülési paraméterek megadása után.

Bekerülési paraméterek:

- nyomtató típusa (Raise3D Pro3 [30]),
- filament típusa és vastagsága (Filamentum ABS Extrafill, 1,75mm),
- használt extrúderek darabszáma (1db),
- rétegvastagság (0,1mm),
- kitöltési sűrűség (20%),
- nyomtatási sebesség (70mm/s).

Következő lépésként definiáltam a szükséges támaszok helyét és kialakításuk struktúráját, majd elindítottam a szeletelést. A szeletelés eredménye a következő képen látható.



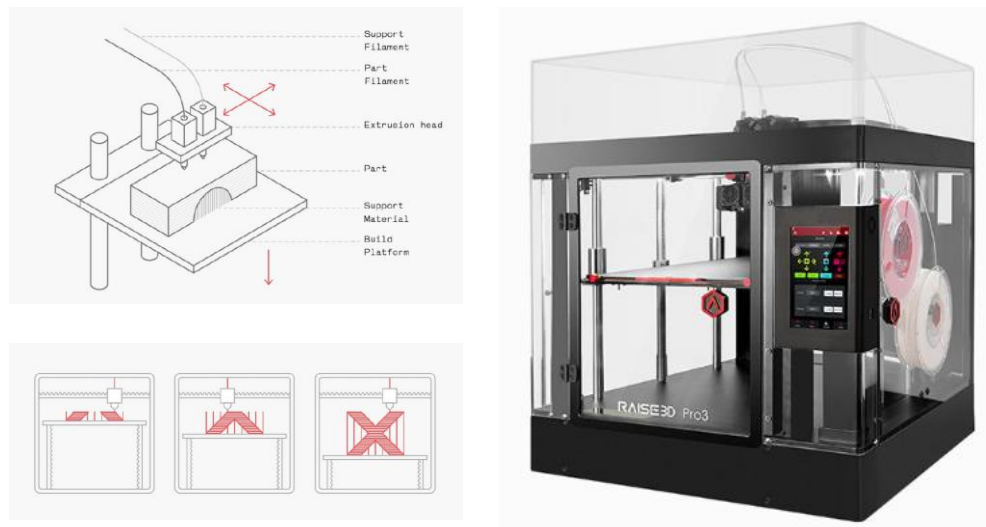
26. ábra. Szeletelt ABS modell

A szoftver a modellelmet 704 rétegre bontotta. Ahogyan az a 26. ábra is látható, a kalkulált nyomtatási idő jelentős, 101 óra. A szükséges szálanyag mennyiségét 352.8 gramm-ra becsültem jó közelítéssel.

## 7.5.2 Gyártás FDM technológiával

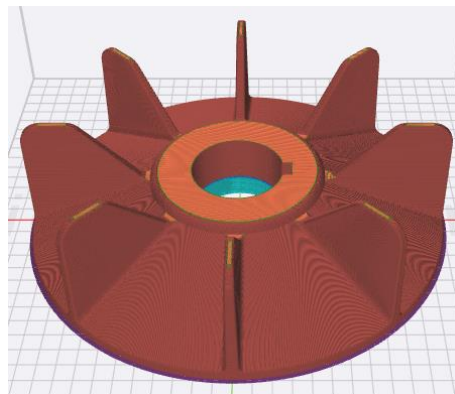
A gyártási folyamat a gép rendelkezésére állását követően felettebb egyszerű. A generált G-kódot egy adathordozón keresztül importáljuk, mivel a tárgyasztal automatikus szintezéssel rendelkezik, ezért csak a kalibrálást kell elindítani és megkezdhetjük a nyomtatást. Az általam választott és alkalmasnak ítélt berendezés a Raise3D Pro3.

A nyomtató a korábbiakban, a 3.6.1-es pontban bemutatott technológia szerint működik.



27. ábra. Választott FDM berendezés és működési elve [8] [31]

Az alkatrész elkészülte után a berendezés lehűti tárgyasztalát, így a modellünk rövid időn belül eltávolítható lesz. A következő lépésként, nyomtatási orientációból adódóan, a generált szupportokat szükséges eltávolítanunk. Minimális utómunkával a modell felhasználható és beépíthető rendeltetési helyére.



28. ábra. Nyomtatási orientáció

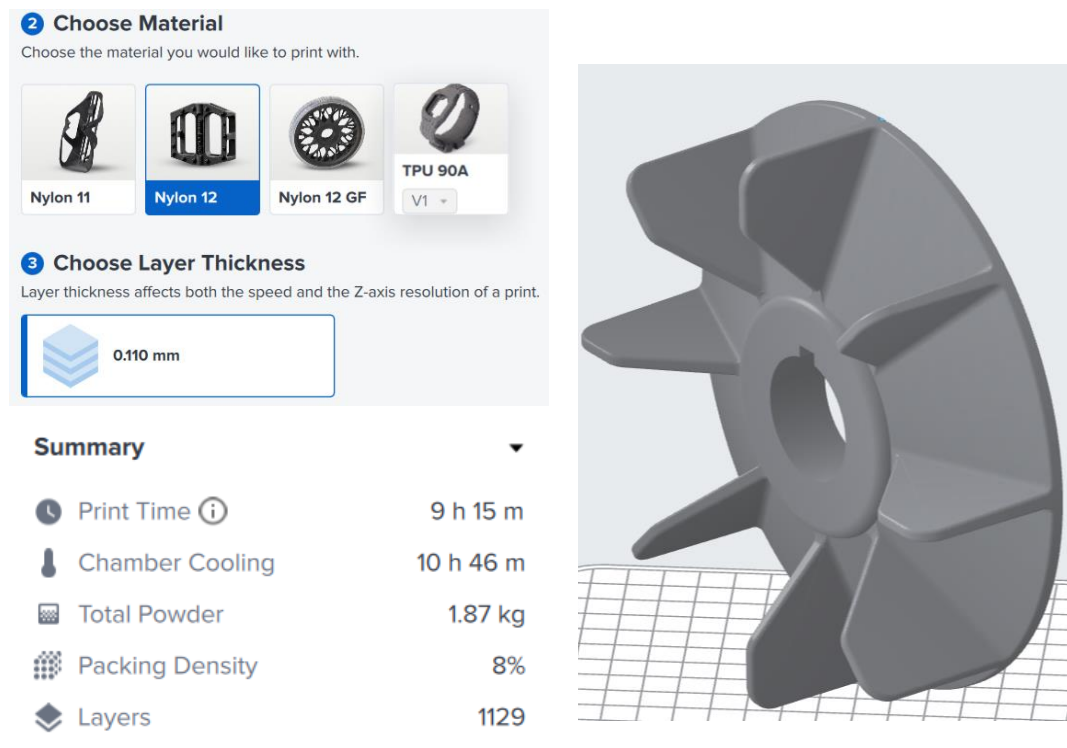
### 7.5.3 Szeletelés SLS technológiára

Ezen technológiára gyártott alkatrészek szeleteléskor lényegesen kevesebb parametrizálási lehetőséget biztosított a használt PreForm [32] szoftver technológia sajátosságaiból adódóan. A szoftverbe importáltam modelletem, melyből G-kódot generáltam a bekerülési paraméterek megadása után.

Bekerülési paraméterek:

- nyomtató típusa (EOS P 396)
- alapanyag típusa (Nylon 12 PA),
- rétegvastagság (0,110mm),

A szeletelés eredményét a következő képen szeretném szemléltetni.



**2 Choose Material**  
Choose the material you would like to print with.

Nylon 11 | **Nylon 12** | Nylon 12 GF | TPU 90A V1

**3 Choose Layer Thickness**  
Layer thickness affects both the speed and the Z-axis resolution of a print.

0.110 mm

**Summary**

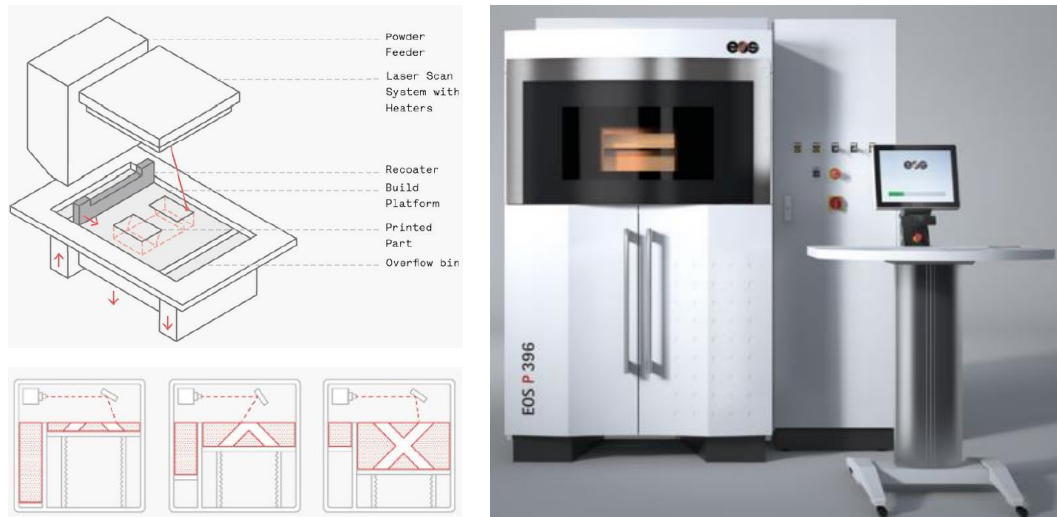
Print Time ⓘ	9 h 15 m
Chamber Cooling	10 h 46 m
Total Powder	1.87 kg
Packing Density	8%
Layers	1129

29. ábra. Szeletelt SLS modell

Szeletelés eredményeképp 1129 réteg generálódott. Jelen esetben a nyomtatási idő 9 órára tehető, fontos azonban, hogy a modellt a nyomtatást követően csak a kamra lehűlése után távolítható el, mely további 11 órát igényel. A szükséges alapanyag mennyisége hozzávetőlegesen 1,9 kg.

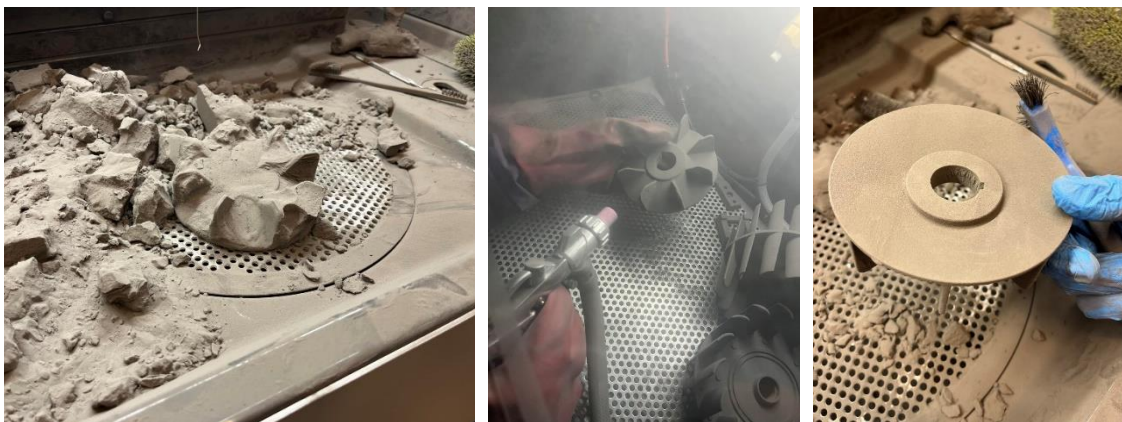
#### 7.5.4 Gyártás SLS technológiával

Az SLS technológiához választott berendezésem egy ipari és nagy teljesítményű 3D nyomtató, az EOS P 396. Választásomat a berendezés építőterének 340 x 340 x 600-as mérete és a gyártó által vállalt százados nyomtatási pontosság indokolja. [33]



30. ábra. Választott SLS berendezés és működési elve [8] [33]

Miután a berendezés, mely működési elvét a 3.2.1-es pontban bemutatam, végez az elvárt geometriával, és az elkészült alkatrészünk lehűlt, a platformot átemeljük egy utókezelő állomásba. Itt az alkatrészünket szétválasztjuk mechanikus úton, esetleg sűrített levegő segítségével a támaszként alkalmazott portól. A fennmaradó por szitálás után nagy százalékban újra felhasználható. Az elkészült és szétválasztott munkadarabunk tisztítás után készen áll a rendeltetési helyére történő integrálásra.



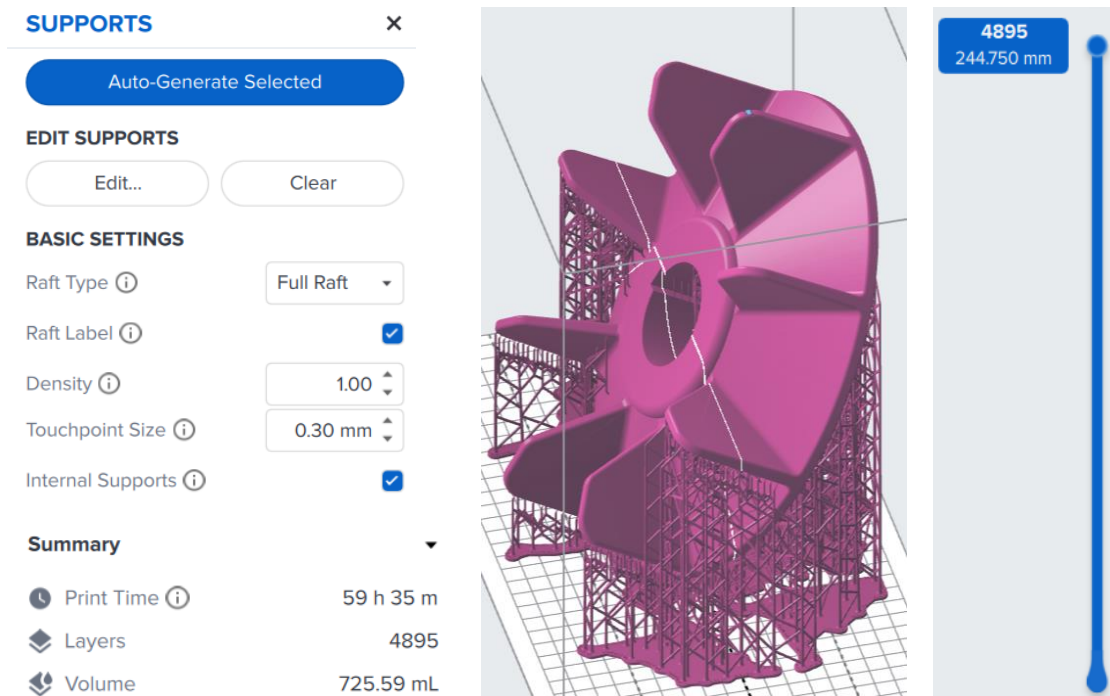
31. ábra. Végtermék és támasz por szétválasztása

### 7.5.5 Szeletelés SLA technológiára

Szeleteléskor a korábbiakban említett PreForm [32] szoftvert alkalmaztam. Szintén megadtam a szükséges adatokat és paramétereket, majd legénárlattam a G-kódot a szoftverrel.

Bekerülési paraméterek:

- nyomtató típusa (Form3L)
- alapanyag típusa (Castable Wax v1),
- Támasz érintkezési felülete (0,3mm),

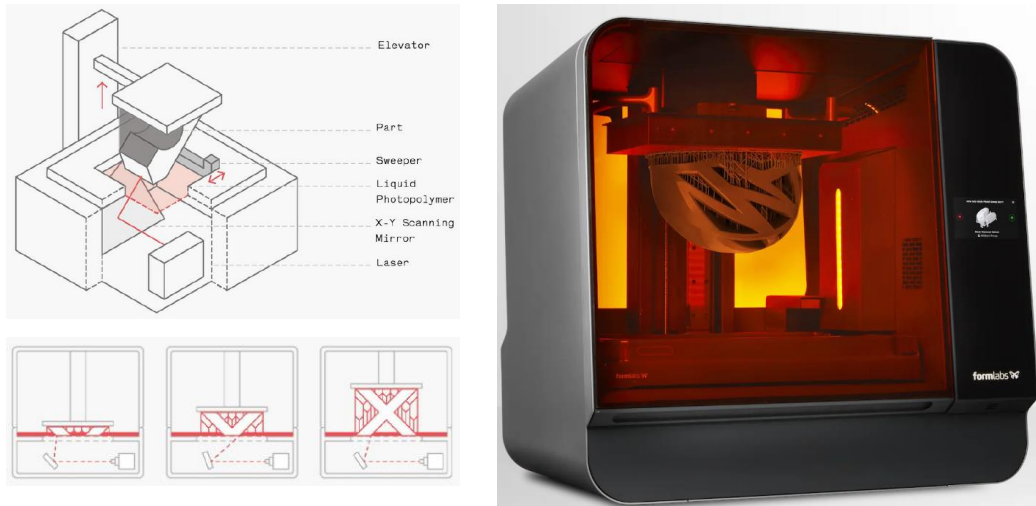


A modell készítését a kalkuláció szerint a nyomtató 4895 réteg kialakításával tudja megvalósítani. Ezen technológiánál a nyomtatási idő 60 órára tehető. A szükséges gyanta mennyisége hozzávetőlegesen 726 milliliter.



### 7.5.6 Gyártás SLA technológiával

Az alumínium kiváltó termék gyártáshoz szükséges 3D nyomtatott mesterdarab gyártásához a Form3L berendezést választottam, mely a 3.1.1 pontban bemutatott elven működik. Miután a generált G-kódot importáljuk és a berendezés tartályát gyantával megtöltjük a nyomtatás megkezdhető.



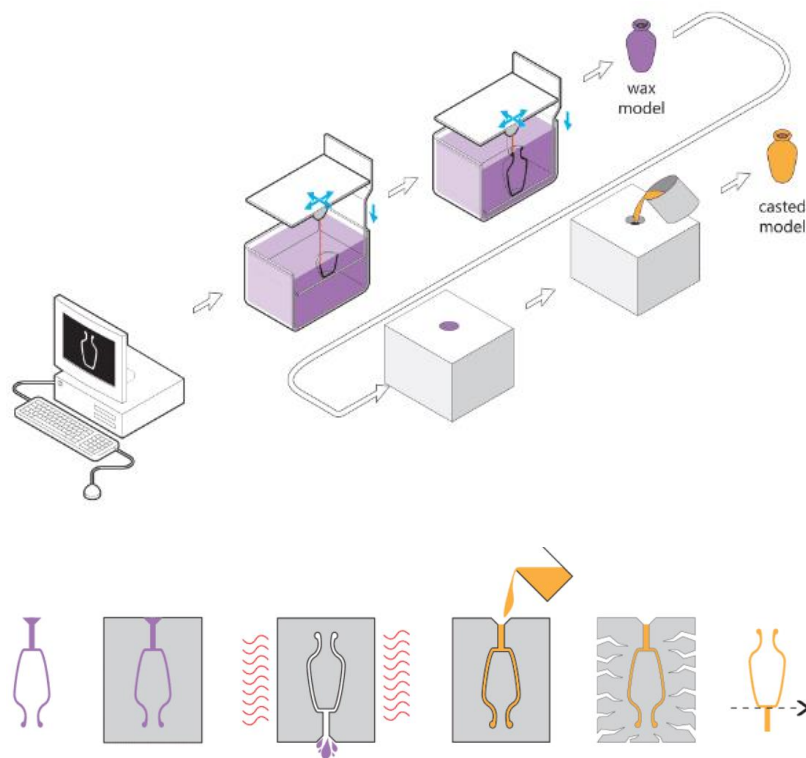
32. ábra. Választott SLA berendezés és működési elve [8] [34]

A nyomtatás után az alkatrész nem lesz teljesen kikeményedett állapotban. További utókezelésre van szüksége UV fény segítségével, az elvárt mechanikai tulajdonságok elérésének érdekében.

A fotopolimerizáció egy irreverzibilis folyamat, nincs mód az SLA alkatrészek újra folyékony formába alakítására. SLA alkatrészek melegítése olvadás helyett égést okoz, mert az ilyen technológiával előállított anyagok hőre keményedő polimerekből készülnek.

Ahhoz, hogy a legyártott műanyag alkatrészből alumínium helyettesítő termék lehessen a következő lépéseket kellene megtenni [35]:

- A végleges alkatrész pozitívjaként elkészült Castable Wax mintát egy úgynevezett lombikba helyezni és gipsszel bevonni.
- Miután a gipsz megszilárdult az öntőformából kiégetni a műanyagot.
- Olvadt fémet beleönteni a formába, hogy kitöltse a műanyag modell helyét.
- A fém kihűlése után a gipszformát feltörni.
- Az elkészült alkatrészt csiszolással, polírozással vagy homokszórással utókezelní az előírt minőség eléréséig.



33. ábra. SLA-ból alumínium gyártási folyamat

## 8. Költség kalkuláció

A költségek meghatározásához felhasználtam a szeletelő szoftverek által kalkulált szükséges alapanyagok mennyiségét, valamint a nyomtatási időből adódóan a gép amortizációs költségét, melyet külső konzulensem iránymutatásai alapján egységesen 1500 Ft/órában határoztam meg.

3. táblázat. Költségvetés

Alapanyag	Formlabs Nylon 12	Formlabs Castable Wax	Filamentum ABS Extrafill
Alapanyag egységára	Br. 392 900 Ft/6kg	Br. 149 901 Ft/liter	Br. 9 900 Ft/1kg
Szükséges mennyiség	1,87 kg	725,59 ml	325,8 g
Alapanyag költsége	122 455 Ft	108 770 Ft	3225 Ft
Nyomtatási idő	9 óra 15 perc	59 óra 35 perc	101 óra 1 perc
Géphasználati költség	1500 Ft/óra	1500 Ft/óra	1500 Ft/óra
Összes költség	136 180 Ft	197 795 Ft	154 725 Ft




A kalkulációt követően a legdrágább megoldás a gyanta használata, mely ezen technológiánál a nyomtatók építési terére vezethető vissza. Fontos kiemelnem, hogy ez a költség csak a végleges alumínium alkatrész pozitívjaként szolgáló, gyanta nyomatot tartalmazza.

Meglepő lehet, hogy az ABS-ből készült alkatrész költsége is jelentősen magas. Ezen technológia sebességéből adódóan ipari használata nem jellemző.

Egyértelműen kijelenthető, hogy a drága alapanyag ellenére az SLS technológia használata javasolt költségek tekintetében.



A kalkulációt ellenőriztem, egy Belgiumi székhellyel rendelkező. 3D nyomtatással foglalkozó cég, a Materialise HQ online kalkulátora segítségével. Az eredményeket a következő képen mutatom be.

<p>1 lapatkerek V4.stp</p>  <p>Dim: 240.00 x 240.00 x 70.62 mm Vol: 605.54 cm<sup>3</sup></p>	<p>Select technology <b>Laser Sintering</b></p> <p>Select material <b>PA 12</b></p> <p>Select finishing <b>Normal</b></p> <p><input type="checkbox"/> Print this part faster</p>	<p>Quantity 1</p>	<p>Unit Price: 386.39 EUR Subtotal Price: 386.39 EUR</p>
<p>1 lapatkerek V4.stp</p>  <p>Dim: 240.00 x 240.00 x 70.62 mm Vol: 605.54 cm<sup>3</sup></p>	<p>Select technology <b>Stereolithography</b></p> <p>Select material <b>Any resin - no preference</b></p> <p>Select finishing <b>Basic Finish</b></p> <p><input type="checkbox"/> Print this part faster</p>	<p>Quantity 1</p>	<p>Unit Price: 794.79 EUR Subtotal Price: 794.79 EUR</p>
<p>1 lapatkerek V4.stp</p>  <p>Dim: 240.00 x 240.00 x 70.62 mm Vol: 605.54 cm<sup>3</sup></p>	<p>Select technology <b>FDM</b></p> <p>Select material <b>ABS - black</b></p> <p>Select finishing <b>Normal</b></p> <p><input type="checkbox"/> Print this part faster</p>	<p>Quantity 1</p>	<p>Unit Price: 756.00 EUR Subtotal Price: 756.00 EUR</p>

34. ábra. Költségkalkuláció ellenőrzése [36]

A Materialise árait alapul véve a kalkulált áraimat reálisnak minősítem.

## 9. Használati előírások

Az általam javasolt Nylon 12 poliamid alapanyagból készült alkatrész, egy nagy keménységgel, jó kopásállósági és csúszási tulajdonsággal rendelkező termék.

Az alapanyag tulajdonságai alapul vehetők, de változhatnak a végleges geometria függvényében.

A poliamid 12-ről általánosságban elmondható:

- Szilárdsága : 75 – 115 MPa.
- Keménysége Rockwell keménység szerint : M98
- Felhasználhatóság hőmérsékleti tartománya: -35 °C-tól +175 °C

Az ilyen alapanyagból készült végterméket javaslok párától és nedvességtől óvni, mivel vízfelszívási tulajdonsága ASTM570 szerint 0,66%.

A PA12 alapanyagú lapátkereket nem érheti nagyobb külső behatás, mint 32N, ezért javaslok a védő burkolat használatát.

Mivel az alkatrészt a megadott 2400 fordulat/perc állandósult üzemi állapotra ellenőriztem, ezért ettől az értéktől maximum 10%-ban lehet eltérni.

## 10.Összegzés

Diplomamunkám célkitűzésében meghatározott elvárásoknak megfelelően dolgozatom keretében bemutattam a 3D nyomtatási technológiákat az alkalmazható szimulációs lehetőségeket, azok szerepét és előnyét kiemelve. Hoztam egy ipari példát rekonstrukciós tervezési igényre, melyre a probléma megjelenését követően saját megoldási módszert dolgoztam ki.

Egy háromfázisú aszinkronmotor roncsolódott és deformálódott járókerekeit beszkeneltem. A kapott pontfelhőt referenciaként használva újra modelleztem az alkatrészt, integrálva a módosítási igényeket. Ütközésvizsgálat segítségével összehasonlítottam a generált és az eredeti modell geometriai adottságait és kiértékeltem modellem megfelelőségét. Sajnos ipari, 3D nyomtatás specifikus végeeselemes szoftver használatát nem tudtam megoldani, helyettesítésként Ansysban végeztem a szimulációm. A vizsgálathoz kiválasztottam a lehetséges anyagokat és műszaki paramétereik szerint definiáltam azokat a programban. Meghatároztam a légellenállásból adódó, lapátokra ható felületi nyomást, melyet integráltam szimulációm. A vizsgálatom eredményeit kiértékeltem és megállapítottam, hogy kizárólag a szimuláció ismeretében mindegyik anyag kielégíti rendeltetési helyének követelményeit. Azonban a resign alapanyagot csak kutatási céllal vizsgáltam, ezen alapanyag használata csak egy, az eredeti alkatrész öntéséhez használható pozitív elkészítésére használatos. Kiemeltem, hogy szálhúzásos technológia alapanyaga és ezen technológiával gyártott végtermék közegének tulajdonsága nem azonos és nem szimulálható. Ezen információk ismeretében javasoltam a Nylon 12 alapanyag használatát. Bemutattam a különböző szeletelési és gyártási eljárásokat, majd végeztem egy költségkalkulációt is.

A kitűzött céljaimat megvalósítottam, a felmerült és bemutatott problémára tettem részletes és alapos megoldási javaslatot.

## **11.Summary**

In line with the expectations set out in the objective of my thesis, I have presented 3D printing technologies, highlighting the simulation possibilities, their role and benefits. I have given an industrial example of a reconstruction design requirement, for which I have developed my own solution method after the problem was identified.

I scanned the wreckage and deformed impeller of a three-phase asynchronous motor. Using the resulting point cloud as a reference, I re-modelled the component, integrating the modification requirements. I compared the geometries of the generated and the original model using impact analysis and evaluated the adequacy of my model. Unfortunately, I could not use industrial, 3D printing specific finite element software, so as a substitute I performed my simulation in Ansys. I selected possible materials for the test and defined them in the software according to their technical parameters. I determined the surface pressure on the blades due to air resistance and integrated it into my simulation. I have evaluated the results of my tests and concluded that, knowing only the simulation, each of the materials satisfies the requirements of its destination. However, the resin material was only tested for research purposes, the use of this material is only used to make a positive that can be used to cast the original part. I emphasized that the properties of the raw material of a fiber drawing technology and the medium of the final product manufactured by this technology are not identical and cannot be simulated. In the light of this information, I have proposed the use of Nylon 12. I have presented the different slicing and manufacturing processes and have made a cost calculation.

I have achieved my objectives and proposed a detailed and thorough solution to the problem that has been identified and presented.

## 12. Irodalomjegyzék

- [1] E. Eilam, Reversing, 10475 Crosspoint Boulevard: Wiley Publishing, Inc., 2005.
- [2] D. Z. László, Szerző, *Modellkészítés Digitalizálással*. [Performance]. 2023.
- [3] Z. László, Integrált Gyártórendszerek, Gödöllő: Fenyves Dent Kft., 2016.
- [4] „Tolómérce - Wikipédia,” [Online]. Available: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Tol%C3%B3m%C3%A9rce>. [Hozzáférés dátuma: 29 10 2023].
- [5] „Mitutoyo Külső mikrométer,” [Online]. Available: <https://pentaszerszam.hu/termekek/kulso-mikrometer-0-25-mm-001-mm-103-137-p1217571.html>. [Hozzáférés dátuma: 29 10 2023].
- [6] „MMT1,” [Online]. Available: <http://jm.karrer.free.fr/documents/MMT1.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 29 10 2023].
- [7] „FreeScan UE Pro 3D Laser Scanner,” [Online]. Available: <https://umax.com/products/freescan-ue-pro-laser-handheld-3d-scanner.html>. [Hozzáférés dátuma: 29 10 2023].
- [8] F. S. B. G. Ben Redwood, *The 3D Printing Handbook Technologies, design and applications*, Amsterdam: Coers & Roest, 2016.
- [9] R. Assaker, Interviewee, *Magazine Archieven - 3D Print Magazine*. [Interjú]. 27 09 2019.
- [10] „azurefilm.com,” [Online]. Available: <https://azurefilm.hu/hu/ld002r-s-ld002h-fep-flia-200x140x0-15mm>. [Hozzáférés dátuma: 01 10 2023].
- [11] „Resin 3D Prining - What is MSLA?,” [Online]. Available: <https://4dfiltration.com/resources/3d/what-is-msla.html>. [Hozzáférés dátuma: 09 09 2023].
- [12] G. Boyd, „What is a DLP 3D Printer? - Simply Explained,” 2023. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/dlp-3d-printer-digital-light-processing-explained/>. [Hozzáférés dátuma: 10 05 2023].
- [13] „What is SLS 3D Printing? | Hubs,” [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>. [Hozzáférés dátuma: 15 09 2023].

- [14] D. B. György, „ÁLTALÁNOS ÉS IRÁNYÍTÁSI KÉRDÉSEK,” 11 05 2011. [Online]. Available: <https://quattroplast.hu/muanyagipariszemle/2011/06/muanyagok-versenyben-a-femekkel-05.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 29 10 2023].
- [15] „Simulations in 3D printing,” [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/simulations-3d-printing/>. [Hozzáférés dátuma: 20 06 2023].
- [16] C. Tari, Szanyi János és Kovács Balázs, „Geoterm1\_hotan,” [Online]. Available: [https://eta.bibl.u-szeged.hu/1497/4/162-1-geoterm1\\_hotan.pdf](https://eta.bibl.u-szeged.hu/1497/4/162-1-geoterm1_hotan.pdf). [Hozzáférés dátuma: 08 10 2023].
- [17] „FreeDee 3D nyomtató és szkener specialista - FREEDEE,” [Online]. Available: <https://www.freedee.hu/>. [Hozzáférés dátuma: 1 10 2023].
- [18] „Design specifications for 3D models (Form 3/Form3B),” 17 06 2020. [Online]. Available: [https://support.formlabs.com/s/article/Design-specifications-for-3D-models-form-3?language=en\\_US](https://support.formlabs.com/s/article/Design-specifications-for-3D-models-form-3?language=en_US). [Hozzáférés dátuma: 23 10 2023].
- [19] „Design specifications for 3D models (Fuse1),” 2 6 2023. [Online]. Available: [https://support.formlabs.com/s/article/Design-specifications-for-3D-models-Fuse-1?language=en\\_US](https://support.formlabs.com/s/article/Design-specifications-for-3D-models-Fuse-1?language=en_US). [Hozzáférés dátuma: 23 10 2023].
- [20] „CompositesDesignGuide.pdf,” [Online]. Available: <https://static.markforged.com/downloads/CompositesDesignGuide.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 23 10 2023].
- [21] „Teton SmartSlice - FREEDEE,” [Online]. Available: <https://www.freedee.hu/szoftverek/teton-smartslice/>. [Hozzáférés dátuma: 07 10 2023].
- [22] „Eiger Szoftver - FREEDEE,” [Online]. Available: <https://www.freedee.hu/3d-nyomtatok/markforged/eiger-szoftver/>. [Hozzáférés dátuma: 4 10 2023].
- [23] „Eiger 3D Printing Software,” [Online]. Available: <https://markforged.com/software>. [Hozzáférés dátuma: 19 09 2023].
- [24] „Crea3D,” [Online]. Available: <https://www.crea3d.com/en/blog/crea3d-and-teton-signed-the-smartslice-software-distribution-agreement-b59>. [Hozzáférés dátuma: 27 10 2023].

- [25] „formlabs-materials-library.pdf,” [Online]. Available: [https://formlabs-media.formlabs.com/filer\\_public/ac/89/ac8963db-f54a-4cac-8fe9-fb740a7b06f1/formlabs-materials-library.pdf](https://formlabs-media.formlabs.com/filer_public/ac/89/ac8963db-f54a-4cac-8fe9-fb740a7b06f1/formlabs-materials-library.pdf). [Hozzáférés dátuma: 19 08 2023].
- [26] „Filamentum ABS Extrafill - 3D Print Material Database,” [Online]. Available: <https://3dprintmaterials.unideb.hu/listing/filamentum-abs-extrafill/>. [Hozzáférés dátuma: 07 09 2023].
- [27] D. S. F. Hoerner, „Hoerner.pdf,” 1965. [Online]. Available: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/Hoerner.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 14 10 2023].
- [28] „Drag equation - Wikipedia,” 12 03 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Drag\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_equation). [Hozzáférés dátuma: 23 10 2023].
- [29] „Support Center I Raise3D Technologies Inc,” [Online]. Available: <https://support.raise3d.com/ideaMaker/1-1-what-is-ideamaker-15-405.html>. [Hozzáférés dátuma: 25 10 2023].
- [30] „Raise3D-Pro3 Series-Technical-Specifications COM,” [Online]. Available: <https://s1.raise3d.com/2021/10/Raise3D-Pro3-Series-Technical-Specifications-211029.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 25 10 2023].
- [31] „Dual Extruder 3D Printer I Raise3D Pro2,” [Online]. Available: <https://www.raise3d.com/products/pro2-3d-printer/>. [Hozzáférés dátuma: 27 10 2023].
- [32] „Preform +D Printing Software\_ Prepare your Models for Printing,” [Online]. Available: <https://formlabs.com/software/preform/>. [Hozzáférés dátuma: 09 10 2023].
- [33] „eos\_system\_data\_sheet\_eos\_p\_396\_e,” [Online]. Available: [https://www.eos.info/03\\_system-related-assets/system-related-contents/\\_pdf\\_system-data-sheets/eos\\_system\\_data\\_sheet\\_eos\\_p\\_396\\_en.pdf](https://www.eos.info/03_system-related-assets/system-related-contents/_pdf_system-data-sheets/eos_system_data_sheet_eos_p_396_en.pdf). [Hozzáférés dátuma: 20 10 2023].
- [34] Formlabs, „SLV vs. DLP: Guide to resin 3D printers,” 2022. [Online]. Available: <https://formlabs.com/eu/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>. [Hozzáférés dátuma: 06 05 2023].
- [35] „Lost Wax printing & Casting,” [Online]. Available: <https://i.materialise.com/fr/3d-printing-technologies/lost-wax-printing-casting>. [Hozzáférés dátuma: 27 10 2023].

- [36] „Materialise I 3D Printing Innovators,” [Online]. Available: <https://www.materialise.com/en>. [Hozzáférés dátuma: 07 10 2023].
- [37] Formlabs, „Grey\_Pro\_Technical.pdf,” [Online]. Available: [https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Grey\\_Pro\\_Technical.pdf?fbclid=IwAR1jxl4sMZvXcDrjrSUz-CCQTodXfluFBsISf0eMqKx1uakcw-Bgzj\\_1WLs](https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Grey_Pro_Technical.pdf?fbclid=IwAR1jxl4sMZvXcDrjrSUz-CCQTodXfluFBsISf0eMqKx1uakcw-Bgzj_1WLs). [Hozzáférés dátuma: 23 04 2023].
- [38] Luxcreo, „What is DLP 3D printing? - Luxcreo,” 2020. [Online]. Available: <https://luxcreo.com/what-is-dlp-3d-printing-1c/>. [Hozzáférés dátuma: 08 05 2023].



## 13.Ábra-jegyzék

1. ábra. Reverse Engineering folyamatábrája .....	2
2. ábra. Tolómérő és mikrométer [4] [5] .....	3
3. ábra. Koordináta mérőgépek [6] .....	3
4. ábra. 3D szkennerek [7].....	4
5. ábra. 3D nyomtatási eljárások kategorizálása.....	5
6. ábra. Hőmérsékleti eloszlás [15].....	15
7. ábra. Deformáció vektorok [15].....	16
8. ábra. Szimulációs folyamat bemutatása.....	17
9. ábra. 3 fázisú aszinkron motor járókereke .....	19
10. ábra. Közreműködő cég [17] .....	20
11. ábra. Megoldás elvi menete .....	21
12. ábra. Scannelt modell .stl formátumban .....	22
13. ábra. Eredeti és tervezett modell összehasonlítása .....	25
14. ábra. Színtérkép skálázása .....	25
15. ábra. Markforged Eiger [23] .....	27
16. ábra. Teton Smart Slice [24] .....	28
17. ábra. Formlabs Nylon 12 .....	29
18. ábra. Formlabs Castable Wax .....	30
19. ábra. Filamentum ABS Extrafill .....	30
20. ábra. Rács generálása.....	31
21. ábra. Forgási sebesség definiálása .....	32
22. ábra. Támaszok hozzárendelése.....	33
23. ábra. Lapát súlypontja és területe .....	34
24. ábra. Légellenállási együttható [28].....	35
25. ábra. Felületi nyomás elhelyezése .....	35
26. ábra. Szeletelt ABS modell.....	38
27. ábra. Választott FDM berendezés és működési elve [8] [31].....	39
28. ábra. Nyomtatási orientáció .....	39
29. ábra. Szeletelt SLS modell.....	40
30. ábra. Választott SLS berendezés és működési elve [8] [33].....	41

31. ábra. Végtermék és támasz por szétválasztása.....	41
32. ábra. Választott SLA berendezés és működési elve [8] [34] .....	43
33. ábra. SLA-ból alumínium gyártási folyamat .....	44
34. ábra. Költségekalkuláció ellenőrzése [36].....	46

## 14. Táblázat jegyzék

1. táblázat. Nyomtathatósági feltételek.....	23
2. táblázat. Szimulációs eredmények.....	36
3. táblázat. Költségvetés .....	45

## **15.Mellékletek**

1. sz. melléklet: Formlabs Castable Wax adatlap
2. sz. melléklet: Formlabs Nylon 12 adatlap
3. sz. melléklet: Filamentum ABS Extrafill adatlap

1. sz. melléklet: Castable Wax adatlap

**MATERIAL PROPERTIES DATA**

**Castable Wax Resin**

	METRIC <sup>1</sup>	IMPERIAL <sup>1</sup>	METHOD
	Green <sup>2</sup>	Green <sup>2</sup>	
<b>Tensile Properties</b>			
Ultimate Tensile Strength	12 MPa	1680 psi	ASTM D 638-10
Tensile Modulus	220 MPa	32 ksi	ASTM D 638-10
Elongation at Break	13%	13%	ASTM D 638-10
<b>Burnout Properties</b>			
Temp @ 5% Mass Loss	249 °C	480 °C	ASTM E 1131
Ash Content (TGA)	0.0 - 0.1%	0.0 - 0.1%	ASTM E 1131

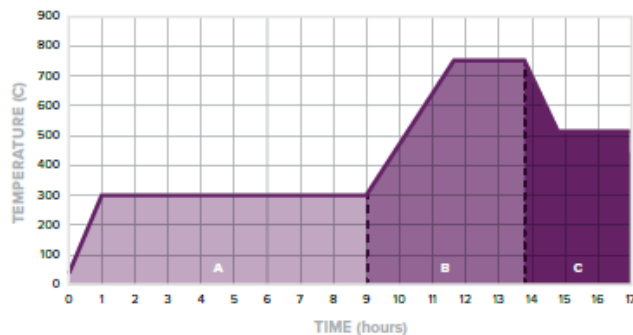
<sup>1</sup> Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

<sup>2</sup> Data was obtained from parts printed using Form 2, Castable 50 µm Fine Detail settings and washed without post-cure.

**STANDARD BURNOUT SCHEDULE**

The Standard Burnout Schedule is designed to provide the maximum possible investment strength and complete burnout of the finest details using Certus Prestige Optima or similar investment materials. Use this schedule as a starting point and make adjustments as needed.

	PHASE	TIME	SCHEDULE °C	SCHEDULE °F
A	Insert Flasks	0 min	21 °C	70 °F
	Ramp	60 min	4.7 °C / min	8.4 °F / min
	Hold	480 min	300 °C	572 °F
B	Ramp	100 min	4.5 °C / min	8.1 °F / min
	Hold	180 min	750 °C	1382 °F
C	Ramp	60 min	- 4.0 °C / min	- 7.1 °F / min
	Casting Window	Up to 2 hours	512 °C (or desired casting temp)	954 °F (or desired casting temp)



**Post-Curing Info:**

No post-cure required.

## 2. sz. melléklet: Formlabs Nylon 12 adatlap

### MATERIAL PROPERTIES DATA

### Nylon 12 Powder

	METRIC <sup>1</sup>	IMPERIAL <sup>1</sup>	METHOD
<b>Mechanical Properties</b>			
Ultimate Tensile Strength	50 MPa	7252 psi	ASTM D638 Type 1
Tensile Modulus	1850 MPa	268 ksi	ASTM D638 Type 1
Elongation at Break (X/Y)	11%	11%	ASTM D638 Type 1
Elongation at Break (Z)	6%	6%	ASTM D638 Type 1
<b>Flexural Properties</b>			
Flexural Strength	66 MPa	9572 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	1600 MPa	232 ksi	ASTM D 790-15
<b>Impact Properties</b>			
Notched Izod	32 J/m	0.60 ft-lb/in	ASTM D256-10
<b>Thermal Properties</b>			
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	87 °C	189 °F	ASTM D648
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	171 °C	340 °F	ASTM D648
Vicat Softening Temperature	175 °C	347 °F	ASTM D1525
<b>Other Properties</b>			
Moisture Content (powder)	0.25%	0.25%	ISO 15512 Method D
Water Absorption (printed part)	0.66%	0.66%	ASTM D570

Samples printed with Nylon 12 Powder have been evaluated in accordance with ISO 10993-1:2018, and has passed the requirements for the following biocompatibility risks:

ISO Standard	Description <sup>2,4</sup>
ISO 10993-5:2009	Not cytotoxic
ISO 10993-10:2010/(R)2014	Not an irritant
ISO 10993-10:2010/(R)2014	Not a sensitizer

#### Flammability Properties

Testing Standard	Rating
UL 94 Section 7	HB *

\* Thickness of the sample tested = 3.00mm

<sup>1</sup> Material properties may vary with part geometry, print orientation and temperature.

<sup>2</sup> Parts were printed using Fuse 1 with Nylon 12 Powder. Parts were conditioned at 50% relative humidity and 23 °C for 7 days before testing.

<sup>3</sup> Material properties may vary based on part design and manufacturing practices. It is the manufacturer's responsibility to validate the suitability of the printed parts for the intended use.

<sup>4</sup> Nylon 12 was tested at NAMSA World Headquarters, OH, USA.

### SOLVENT COMPATIBILITY

Percent weight gain over 24 hours for a printed 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 hr weight gain, %	Solvent	24 hr weight gain, %
Acetic Acid 5%	0.1	Mineral oil (Heavy)	0.7
Acetone	0.1	Mineral oil (Light)	0.5
Bleach ~5% NaOCl	0.2	Salt Water (3.5% NaCl)	0.2
Butyl Acetate	0.2	Skydrol 5	0.6
Diesel Fuel	0.4	Sodium Hydroxide solution (0.025% PH 10)	0.2
Diethyl glycol Monomethyl Ether	0.5	Strong Acid (HCl conc)	0.8
Hydraulic Oil	0.6	Tripropylene glycol monomethyl ether	0.3
Hydrogen peroxide (3%)	0.2	Water	0.1
Isooctane (aka gasoline)	<0.1	Xylene	0.1
Isopropyl Alcohol	0.2		

### 3. sz. melléklet: Filamentum ABS Extrafill adatlap



## 3D printing guide Filamentum ABS Extrafill

(acrylonitrile butadiene styrene )

Printing temperature: 220–250 °C

Heated bed temperature: 80–105 °C

Speed: 30–50 mm/s

Part cooling fan: 0–20 % (5 % is good start)

Heated bed surface: PEI, mirror/glass

Adhesive: Dimafix, PVA glue, 3Dlac, Magigoo

Raft/skirt/brim: Brim 5–10 mm

Heated chamber/enclosure: recommended

**Cooling** - It is not recommended to use more than 20 % of fan speed, as too much cooling could lead to improper layer bonding and warping. We recommend using no cooling for standard objects, which leads to stronger parts. For bridges and big overhangs, it is possible to go up to 30–40 % for the desired layer.

**Adhesion** - Brim 5–10 mm. The best adhesion was achieved with Dimafix on clean glass or mirror. On the PEI we recommend using wider brim for large objects.

**Printing speed** – ABS is better to print little bit slower. Material has more time to bond properly preventing the layer separation and cracks between layers.

**Overhangs** - for the overhangs higher than 45° we recommend using lower layer heights and also enough time to cool, otherwise, overhangs could slightly warp.

Producer: Filamentum Manufacturing Czech s.r.o.  
nam. Míru 1217, 768 24 Hulín  
Czech Republic

tel.: (+420) 702 236 177  
e-mail: [helpdesk@filamentum.com](mailto:helpdesk@filamentum.com)  
web: [www.filamentum.com](http://www.filamentum.com)

## NYILATKOZAT

### a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Bondor Csaba  
A Hallgató Neptun kódja: GVSXUB  
A dolgozat címe: Ipari alkatrész rekonstrukciós tervezése, végeeselemes ellenőrzése, 3D nyomtatásra optimalizálása  
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 eltelte után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: Budapest, 2023 év 10 hó 28 nap



Hallgató aláírása



## NYILATKOZAT

Bondor Csaba (név) (hallgató Neptun azonosítója: GVSXUB) 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: 2023 év november hó 02 nap



---

belső konzulens