

TDK dolgozat

**Veterán autóalkatrészek gyártása additív
technológiával**

Hidas Bálint

GDJL8K

Gépészmérnöki MSc szak

Győr 2024

Kivonat

Az elmúlt években az additív technológiák területén végbement rohamos fejlődésnek köszönhetően számos iparág meglátta a technológiában rejlő lehetőségeket. Ez magyarázható a 3D nyomtatók beruházási költségének csökkenésével, valamint az ipari alapanyagok megjelenésével egyaránt. A jövőben számos további iparág profitálhat a területen végbemenő fejlődésből. Elegendő csak a veterán gépjármű alkatrész piacra gondolni, ahol az alkatrészhiány sokszor okoz problémát egy-egy jármű felújítása során. Egy gyors és kézenfekvő megoldást nyújthat erre a problémára a 3D nyomtatás

Dolgozatomban egy 1960-as években gyártott Mercedes-Benz W113-as modell fűtőventilátor járókerékének 3D nyomtatással történő gyártását mutatom be. Céлом annak vizsgálata, hogy a jelenleg rendelkezésre álló technológia alkalmas-e olyan alkatrészek gyártására, amelyek kiemelkedő mechanikai és termikus terheléseknek vannak kitéve, miközben a gyártási költségeket minimalizáljuk.

A dolgozat első fele széleskörű áttekintést nyújt a témával kapcsolatos szakirodalomról. A második fele pedig részletesen bemutatja a gyártási folyamat egészét. A technológiával együtt kiválasztásra kerül az alkalmazásra megfelelő alapanyag. Beszámolok az eredeti alkatrész digitalizálásáról, a parametrikus CAD modell létrehozásáról, a nyomtatásról, valamint a járókerék kiegyensúlyozásáról egyaránt. A dolgozatomat egy költség kalkulációval és egy összegzéssel zárom, melyben mérlegelem az elért eredményeket.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
1.1. Az additív technológia nyújtotta előnyök	1
1.2. Additív technológia alkalmazása a veterán autó piacon	2
2. Irodalomkutatás	5
2.1. Felületdigitalizálás	5
2.1.1. Strukturált fény alapú felületdigitalizálási technológia.....	5
2.1.2. Rögzített adatok értelmezése.....	6
2.1.3. Einscan SP V2	7
2.2. Reverse Engineeren ismertetése	9
2.2.1. Háló modellezés	10
2.2.2. Parametrikus visszamodellezés	10
2.2.3. Visszamodellezés felület illesztéssel.....	11
2.2.4. Hibrid visszamodellezés.....	13
2.3. SLS 3D nyomtatás alapjai	13
2.3.1. Nyomtatók felépítése	14
2.3.2. Nyomtatási paraméterek.....	16
2.3.3. Formlabs Fuse 1+ 30W és Fuse Sift bemutatása.....	18
2.3.4. SLS technológia helye az iparban	19
3. Járókerék visszamodellezése és gyártása	21
3.1. Probléma ismertetése.....	21
3.2. Technológia és anyagválasztás	22
3.3. Szkennelés	23
3.4. CAD modell létrehozása	26
3.4.1. Visszamodellezés bemutatása	26
3.4.2. Modell módosítása	31
3.5. Járókerék szilárdságtani vizsgálata	32
3.6. Gyártás	35
3.6.1. Alkatrész nyomtatása	35
3.6.2. Felületkezelés	37
3.7. Összeszerelés.....	38
3.8. Kiegyensúlyozás.....	39
3.9. Költségkalkuláció.....	44

3.9.1. Nyomtatási költségek meghatározása	44
3.9.2. Teljes gyártási költség meghatározása	46
4. Összefoglalás.....	47
5. Irodalomjegyzék.....	49
6. Mellékletek.....	53

1. Bevezetés

Az elmúlt években az additív technológiák területén végbe ment rohamos fejlődésnek köszönhetően számos iparág meglátta a technológiában rejlő lehetőségeket. Ez elsősorban köszönhető a felület digitalizációs eszközök, valamint a 3D nyomtatók beruházási költségének csökkenésének, valamint az ipari alapanyagok megjelenésének. [1]

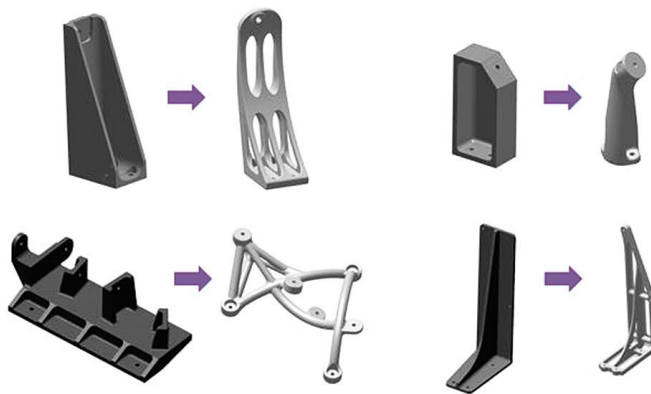
1.1. Az additív technológia nyújtotta előnyök

Az additív technológiák alkalmazása a vállalkozások számára számos előnyt jelent, úgy, mint az alkatrész prototipizálás iterációs folyamatának meggyorsítása, esetleges pótalkatrészek házban belüli legyártása, a gyártási folyamathoz, részfolyamatokhoz szükséges szerszámok elkészítése. [1]

További előnyként lehet megemlíteni, hogy ezzel a gyártás technológiával olyan bonyolult geometriák is kialakíthatóak, melyek hagyományos gyártási eljárásokkal nem, vagy csak nagyon magas gyártási költségek mellett lehetne megvalósítható. Ezt az aspektust ismerték fel azok az iparágak, melyeknél a tömegcsökkentés kulcskérdés, így az űripar, repülőgépgyártás, valamint a versenysport. [2]

Jó példa erre a Boeing, akik 2017-ben kapták meg az engedélyt FAA-tól az első olyan titán alkatrész beszerelésére egy kereskedelmi repülőgépbe, mely teljes egészében 3D nyomtatással lett előállítva. A modern CAD rendszerekbe beépülő generatív tervezési eszközöknek köszönhetően sikerült az alkatrészek tömegét jelentősen csökkenteniük a szilárdsági jellemzők romlása nélkül. A tömegcsökkentés, valamint az additív technológiával történő gyártás az alkatrész bekerülési értékének csökkenését eredményezte. Ennek a mértéke a gyár becslései alapján 2-3 millió amerikai dollár közé tehető, mely egy olyan repülőgép esetén, melynek előállítási költsége körülbelül 265 millió amerikai dollár, számottevő csökkenés. Továbbá a repülőgép fogyasztására is pozitív hatással van, ami nagyban befolyásolja a károsanyag kibocsátás mértékét. [3]

Generatív modellezéssel optimalizált geometriák figyelhetők meg az 1. ábrán.



1. ábra Generatív modellezéssel létrehozott geometriák [3]

1.2. Additív technológia alkalmazása a veterán autó piacon

Ezzel párhuzamosan egy másik iparág is elkezdte felismerni a technológiában rejlő lehetőségeket, még pedig a veteránautó piac, melynek globális mérete felmérések alapján 2024-ben elérheti 43,4 milliárd amerikai dollárt. [4]

Egy adott gépjármű típushoz a sorozatgyártás befejezését követő 10 évig a hatályban lévő előírások értelmében a gyártó köteles alkatrészeket biztosítani. Ezt követően az alkatrészellátás minőségét elsősorban a piaci igények befolyásolják. Mivel bizonyos alkatrészek iránti kereslet viszonylag alacsony, azok gyártása nem jövedelmező a gyártók számára, így ezekből az alkatrészekből hiány alakulhat ki a piacon. Erre a problémára adhat megoldást direkt vagy indirekt módon a 3D nyomtatás. Amennyiben az alkatrész legyártásához szükséges szerszám vagy eszköz 3D nyomtatással lett elkészítve indirekt, míg ha az alkatrész maga 3D nyomtatott direkt eljárásról beszélhetünk. [5] [6]

Ezeket a lehetőségeket ismerte fel több nagy gyártó is, akik az elmúlt pár évben elkezdtek 3D nyomtatással alkatrészeket gyártani már kifutott, neves típusokhoz. Ezek között az alkatrészek között fellelhető fém 3D nyomtatással gyártott alkatrészek, valamint műanyag 3D nyomtatott alkatrészek egyaránt. [6]

A Porsche hivatalos weboldalán már elérhető a híres 959-es típushoz tartozó kuplung kinyomóvilla, melyet a cég SLM fém 3D nyomtatási technológiával gyártott. Az alkatrész szilárdságtani tulajdonságai, valamint felületi minősége a gyártó leírása alapján jobb, mint az eredeti alkatrészé. A gyártó kínálatában számos ehhez hasonló alkatrész megtalálható. [7]

Ez figyelhető meg a 2. ábrán.



2. ábra Porsche 959-es modellhez nyomtatott kuplung kinyomóvilla [7] [8]

További példaként lehet felhozni a Mercedes-Benz, aki az egyik leghíresebb modelljéhez a 300SL-hez közismertebb nevén a „sirály szárnyú” Mercedes-hez alkotott újra alkatrészeket additív technológia alkalmazásával. A típus belső visszapillantó tükkrét az eredetihez hasonló alumínium ötvözetből nyomtatták, melyet krómozás követett. Az alkatrész szinte azonos az eredetivel, csak a hosszán változtattak, annak érdekében, hogy a jobb kilátás garantálva legyen hátrafelé, ezzel biztosítva a biztonságosabb közlekedést. Másik alkatrész melyet érdemes megemlíteni, szintén ehhez a típushoz tartozó gyújtógyertya tartó, mely a szerelést hivatott megkönnyíteni. Az alkatrészt poliamid 12 hőre lágyuló műanyagból alkották újra. [9]

A Mercedes-Benz álltál gyártott alkatrészek a 3. ábrán láthatók.



3. ábra Mercedes-Benz 300SL típushoz 3D nyomtatott alkatrészek. [6]

A bemutatott példákban látható, hogy az additív technológiák már megvetették lábukat a pótalkatrész gyártás területén, azonban jellemzően csak ritka és értékes típusokhoz nyújtanak a gyártók ilyen szolgáltatásokat. Amennyiben megvizsgáljuk az aktuális piaci trendeket, az additív technológiák rohamos fejlődését, valamint a veterán autók iránt egyre növekvő keresletet, feltételezhető, hogy az olcsóbb típusok alkatrészei között is megjelennek idővel ilyen

technológiával gyártott alkatrészek, ahogyan arra már most is vannak példák.

Célom az adott alkatrész visszamodellezése és annak 3D nyomtatással történő gyártási folyamatának kidolgozása, a költségek figyelembevétele mellett. A folyamatot úgy tervezem meg, hogy az később más alkatrészek gyártására is könnyen alkalmazható legyen, optimalizálva ezzel a gyártási folyamatok hatékonyságát.

Végezetül, pedig célom megvizsgálni, hogy a jelenleg elérhető 3D nyomtatási alapanyagok közül elérhető-e olyan, mely alkalmas egy termikus és mechanikus igénybevételnek kitett alkatrész legyártására.

Ezt egy valós alkatrész additív technológiával történő legyártásán keresztül kívánom ismertetni. A munkámban kitérek az alkatrész digitalizálására, az alapanyag választásra és a gyártásra egyaránt. Végezetül egy gyártási költség kalkuláció segítségével fogom mérlegelni az elért eredményeket.

2. Irodalomkutatás

A munkám első fele az irodalomkutatás, melyben minden olyan témakört körbejárok, melyek a későbbiekben fontos szerepet játszottak az alkatrész tervezése és gyártása során. Bemutatásra kerül a tervezési folyamat során alkalmazott felületdigitalizálási eljárás, a különböző visszamodelllezési eljárások, valamint a gyártáshoz alkalmazott 3D nyomtatási technológia. Az irodalomkutatás a saját rész tervezési folyamatának kronológiai sorrendjét követve épül fel.

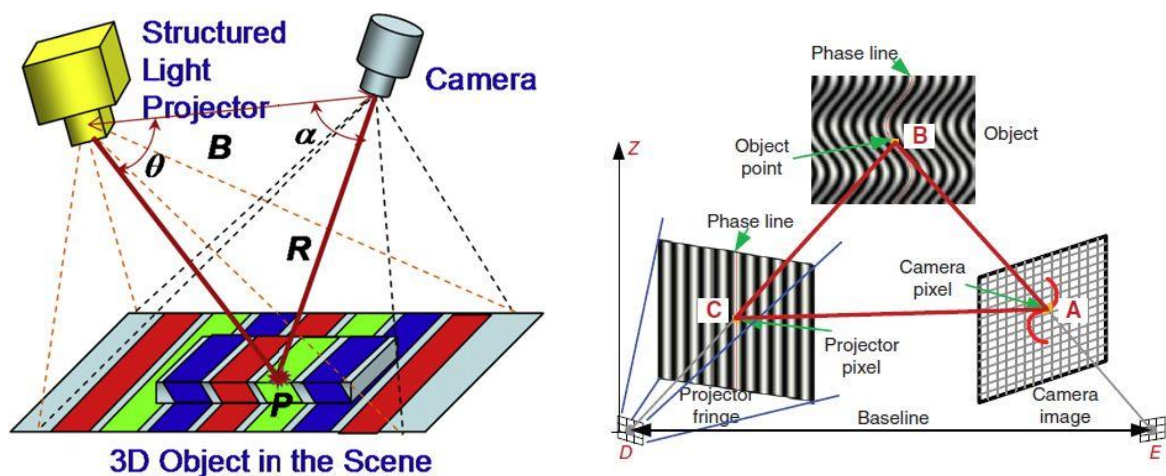
2.1. Felületdigitalizálás

A következő fejezetekben bemutatásra került a strukturált fény alapú felületdigitalizálási eljárás, valamint az ehhez kapcsolódó adatfeldolgozás. A fejezet kiterjed továbbá a tervezési folyamat során alkalmazott asztali szkennerre ismertetésére.

2.1.1. Strukturált fény alapú felületdigitalizálási technológia

A technológia alapja, hogy a digitalizálandó felületre egy projektor segítségével egy speciális előre definiált minta került vetítésre, ez a minta lehet 1 vagy 2 dimenziós. Amennyiben a vetített minta 1 dimenziós, a vetített elem egy vonal, míg, ha 2 dimenziós, akkor a projektor egy speciális vonal vagy rácsmintát vetít felületre. Ez a vetített minta a felület alakjától függően deformálódik. Ezt deformálódott mintát egy vagy több darab kamera rögzíti, melyek projektorhoz viszonyított pozíciója ismert. [10]

A szkenneléshez szükséges eszközök, valamint a vetített minta s annak deformálódás a 4. ábrán látható.



4. ábra Strukturált fény alapú felületdigitalizációs eljárás alapjai [11] [12]

A kamerák által rögzített képeket feldolgozva információ nyerhető a felület pontjainak elhelyezkedéséről a térben. Ezen információk kinyerésére számos algoritmus létezik, melyek alapja a trianguláció. Ennek a képlete: [12]

$$R = B * \frac{\sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)} \quad (1)$$

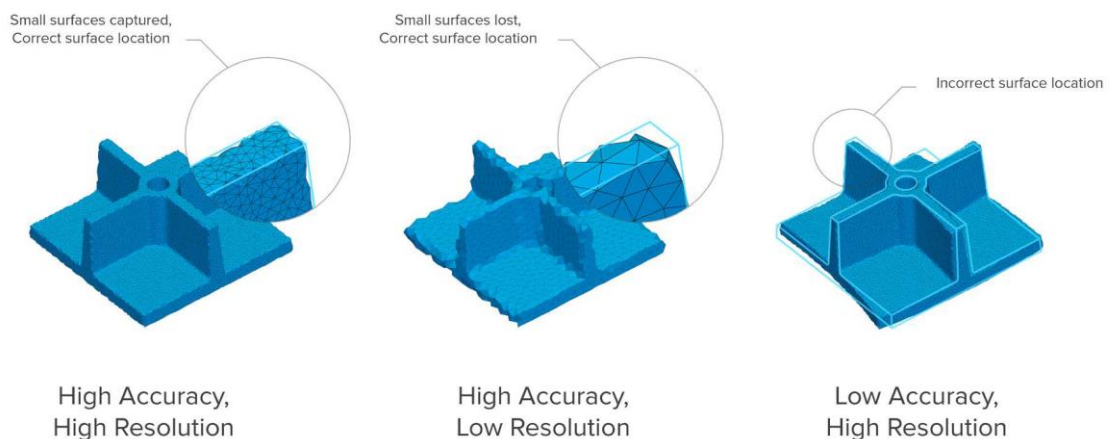
Ahol R a kamera és a pont közötti távolságot, B a kamera és a projektor közötti távolságot. A θ a pont és a projektort összekötő egyenes, valamint a kamerát és a projektort összekötő egyenes által bezárt szöget jelöli. Az α pedig pont és a kamerát összekötő egyenes, valamint a kamerát és a projektort összekötő egyenes által bezárt szöget jelöli. [12]

2.1.2. Rögzített adatok értelmezése

A szkennelés során rögzített pontok mindegyike rendelkezik a pozícióját egyértelműen meghatározó x, y, z koordinátával, valamint ezekhez opcionálisan tartozhatnak további információk, úgy mint a pont normálisa, vagy az adott pont színét leíró R;G;B kód. Ezek az adatok a pontokra generált háló, és az esetleges textúra létrehozásánál nyújtanak alapot. [13]

A szkennelt pontok esetén beszélhetünk a felvett pontok számáról, ezt a digitalizálásra használt készülék felbontóképessége határozza meg. Másképpen megfogalmazva a felbontóképesség a felvett pontok közötti távolságot írja le. Ebből adódik, hogy amennyiben egy tárgy felületén olyan részleteket szeretnénk rögzíteni, melynek kiterjedése a szkennerek felbontóképessége alatt van, akkor azok az részletek nem fognak tisztán kivehetően megjelenni a pontfelhőn. Egy szkennerek további sajátossága a pontosság, mely a pontok pozíció helyességéről nyújt információt. [14]

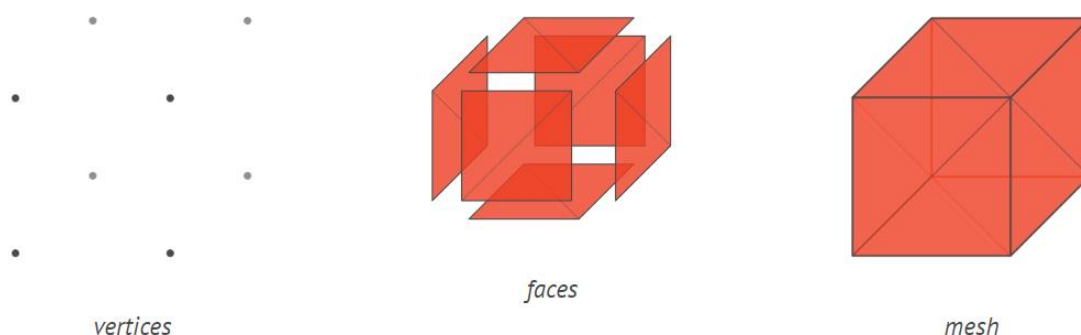
A pontosság és a felbontóképesség közötti különbséget az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra A felbontóképesség és a pontosság értelmezése [14]

Ahhoz, hogy a pontfelhőn további műveleteket legyenek végrehajthatók, a pontokat össze kell kötni, ezt nevezzük háromszögelésnek. A folyamat során a pontok közé élek kerülnek behúzásra, melyek legtöbbször háromszöget alkotnak, innen ered az elnevezés. Ezt sokszor a szkennerek saját szoftvere elvégzi, de léteznek külön erre a célra szánt célszoftverek is. A végeredmény egy hálómodell, mely a szkennelt testet hivatott reprezentálni. [13]

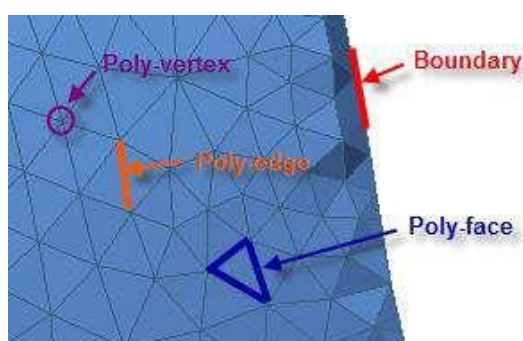
A háló generálás folyamata 6. ábrán figyelhető meg.



6. ábra A hálógenerálás lépései [15]

A létrehozott hálón számos nevezetes sajátosság figyelhető meg. A legszembetűnőbbek az úgynevezett „poly-face”-ek. Ezek a háromszögek, melyek meghatározzák a test térfogatát. Ezeket a háromszögeket definiálják a „poly-edge” -ek, melyek összekötik a csomópontokat, másnéven „vertex”-eket. Ezeknek a pozíciója azonos a fent már bemutatott pontokéval. Megfigyelhető még a háló határa, mely általában a háló szakadását határolja körbe. [13]

Ezek a fogalmak a 7. ábrán láthatók.



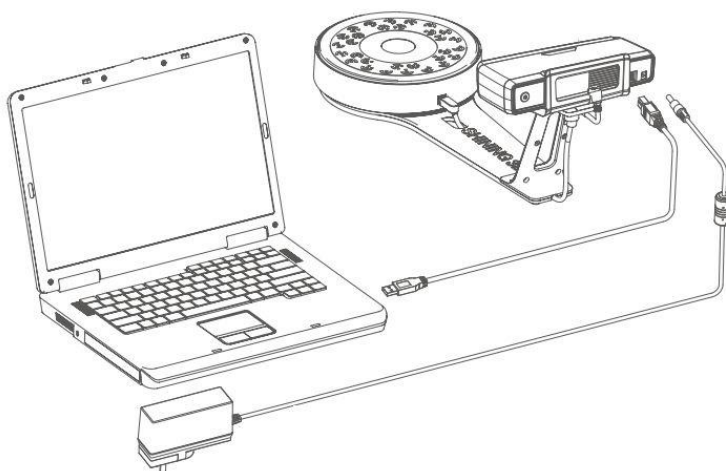
7. ábra Háló sajátosságai [13]

2.1.3. Einscan SP V2

Az alkatrész digitalizálása egy asztali szkennerek segítségével lett elvégezve, mely az Einscan Sp V2 gyártói névre hallgat. A szkennerek a kínai székhelyű Shining 3D Tech Co., Ltd. vállalat saját fejlesztésű terméke. A készülék nagy előnye kedvező ára érték arányában,

valamint a kompakt felépítésében rejlik. [16]

A 8. ábrán megfigyelhető a digitalizáláshoz használt szkennер



8. ábra Einscan SP V2 [17]

Maga a szkennер a már ismertetett strukturált fény projektálás elvén működik, ebben az esetben a fényforrás egy fehér fényű LED projektor. A projektor 2 oldalán található 2 darab egyenként 1,3MP felbontású kamera, melyek a képfeldolgozásért felelnek. A projektor, valamint a kamerák tulajdonságaiból adódóan a szkennер pontossága eléri a 0,05mm – t, míg a felbontóképessége a 0,2 mm-t. [17]

A szkennер paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.

Einscan SP V2 paraméterek	
Pontosság	akár 0,05mm
Minimálisan szkennelhető méret	30mm x 30mm x 30mm
Maximálisan szkennelhető méret forgóasztallal	200mm x 200mm x 200mm
Maximálisan szkennelhető méret forgóasztal nélkül	1200mm x 1200mm x 1200mm
Egyszeri felvétel látótere	200mm x 150mm
Pont távolság	0,17mm ~ 0,2mm
Kamera felbontása	1,3 MP
Fényforrás	Fehér LED
Ideális távolság a készülék és a tárgy között	290mm ~ 480mm
Forgóasztal terhelhetőség	5 kg

1. táblázat Einscan SP V2 paraméterei [17]

A készülékkel úgynevezett rögzített szkennelést lehet megvalósítani, melynek értelmében a szkennер rögzítési folyamat közben nem mozgatható. A digitalizálható térfogat így 30mm x 30mm x 30mm, valamint 1200mm x 1200mm x 1200mm között változhat. A folyamatot hivatott megkönnyíteni a mellékelt automata forgóasztal, melynek segítségével a tárgy forgatása összhangba hozható a szkennер rögzítési lépéseivel. [17]

A rögzített pontokat szkennelést követően össze kell illeszteni, erre a gyártói szoftver különböző lehetőségeket biztosít. A módszert legtöbbször már a szkennelés megkezdése előtt ki kell választani. Ezek a lehetőségek a következők: [17]

- Manuális összeillesztés
- Forgóasztal összeillesztés
- Összeillesztés „marker”-ek segítségével
- Összeillesztés a forgóasztalon kódolt jelölők segítségével
- Előre definiált „marker” térkép segítségével
- „Feature alignment”

A felsorolt összeillesztési módok megválasztásánál figyelembe kell venni a digitalizálandó tárgy méretét és az alak sajátosságait egyaránt. [17]

A pontfelhő legenerálását követően a szoftver automatikusan ráilleszti a hálót a pontokra, mely a továbbiakban tetszés szerint módosítható. A háló modellen elvégezhetőek egyszerűbb műveletek a szoftveren belül, így a háló megtisztítása, simítása, szakadások javítása, geometriai referenciák felvétele is lehetséges. A geometriai referenciák, elsősorban síkok és tengelyek, a CAD szoftverbe történő importáláskor nyújtanak segítséget a hálómoddell pozicionálásához. [17]

2.2. Reverse Engineering ismertetése

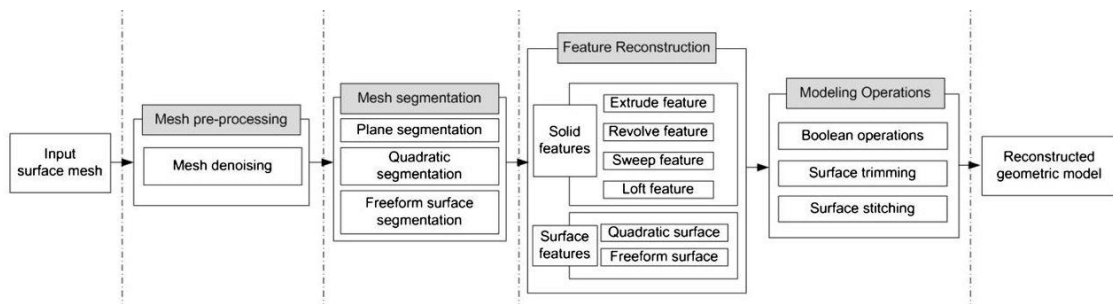
Visszamodellezés alatt az a folyamat értendő, mely során egy fizikai objektumnak létrehozunk digitális modelljét. Ez elvégezhető hagyományos mérőeszközök segítségével vagy történhet egy pontfelhő alapján, mely pontfelhő felület digitalizálásra alkalmas eszközzel lett rögzítve. [18]

A pontfelhőn alapuló visszamodellezésre számos eljárás létezik, ezekre nincsen egzakt csoportosítás, ezért egy a szakirodalomban fellelhető felosztás lett kiválasztva. [13]

- Háló modellezés
- Parametrikus visszamodellezés
- Visszamodellezés felület illesztéssel
- Hibrid visszamodellezés

A felsorolt eljárások között nem húzható éles határvonal, az átjárás könnyedén megvalósítható. Ez sokszor célszerű is, hiszen a folyamatot nagyban megkönnyítheti és felgyorsíthatja. [13]

Az eljárás általános folyamatábrája látható a 10. ábrán.



9. ábra Visszamodellezés folyamatábrája [19]

2.2.1. Háló modellezés

Háló modellezés során a módosításokat közvetlenül a szkennelt állományon hajtjuk végre egyszerű szerkesztő parancsokkal. A folyamat nagy előnye a gyorsaság és az egyszerűség, azonban, ahogyan az látható lesz, a hátránya is ebből származik. [13]

A háló módosítás első lépése szinte minden esetben a háló megtisztítása. Ekkor kerülnek eltávolításra a háló azon szegmensei, melyekre a későbbiekben nem lesz szükség. Ezek a nem szükséges háló elemek lehetnek duplikált felületek és többlett adatok a szkennelés környezetéből. Ezt követi a háló szerkesztése, mely magába foglalja a háló szakadások betöltését, valamint amennyiben szükséges a háló simítása is elvégezhető. [13]

A háló modellen további módosítások hajthatók végre, úgy, mint kivonás, tükrözés, metszés, egyesítés, valamint különböző alaksajátosságok előírása. A folyamat utolsó lépése, a háló topológiájának optimalizálása. Sok esetben ezzel a módszerrel kielégítő eredményt lehet elérni, amennyiben azonban a felhasználás megköveteli a pontos visszamodellezést, a lenti módszereket kell alkalmazni. [13]

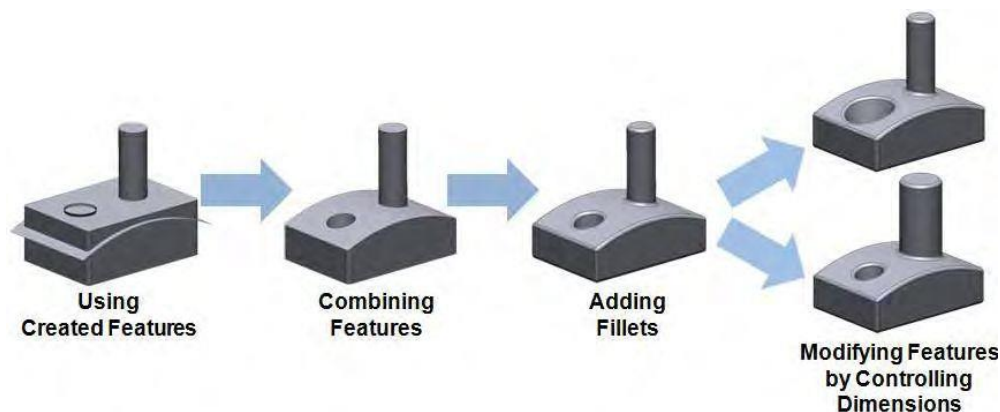
2.2.2. Parametrikus visszamodellezés

Ezt az eljárást sokszor olyan esetben alkalmazzák amikor a munkadarab CAD modellje és gyártási dokumentációja nem elérhető, azonban alkatrészt újra kell gyártani és esetleges módosításokat kell végre hajtani rajta. A folyamat ahogy az előző esetben, itt is különböző rész folyamatokra bontható. [13]

A folyamat első lépése a test főbb méreteit meghatározó vázlatok létrehozása. Ehhez nyújt segítséget sok CAD szoftverben már megtalálható „mesh section” parancs. Ezzel a paranccsal adott sík mentén elmeteshető a hálómodell. A kapott metsző görbe pedig alapot ad a vázlat megrajzolásához. A vázlat beméretezését célszerű a munkadarabról levett méretek alapján elvégezni, amennyiben ez lehetséges. [13]

A vázlatok megrajzolását követően elkészíthetők a testet leíró felületek, melyeken elvégezve a szükséges műveleteket megkapjuk a test parametrikusan felépített CAD modelljét.

A későbbiekben ezen a modellen tetszőlegesen további módosító műveletek hajthatók végre. Ennek a folyamatnak az utolsó lépései figyelhetők meg a 11. ábrán. [13]



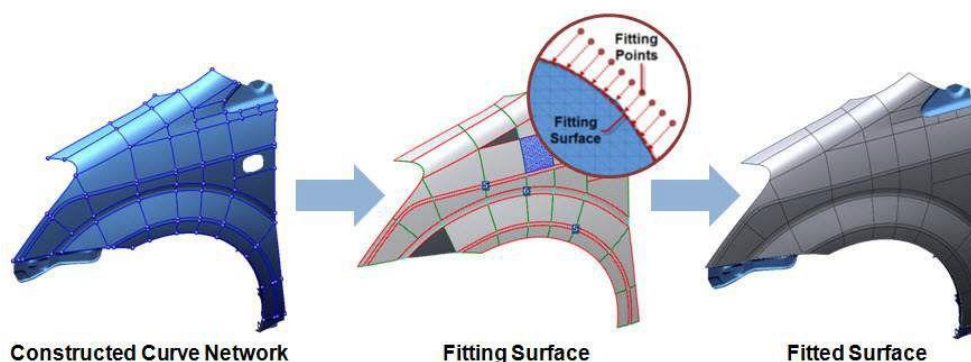
10. ábra Parametrikus visszamodellezés lépései [13]

2.2.3. Visszamodellezés felület illesztéssel

Bonyolultabb szabad formájú felületeknél sok esetben célszerű különböző felület illesztési eljárásokkal elvégezni a visszamodellezést, ezzel nagy mértékben csökkenthető a folyamatra szánt idő. A hálóra simuló felület illesztésére számos eljárás létezik ezek a következők: [13]

- Felület illesztés görbe sereggel
- Felület illesztés szegmentált hálóra
- Automatikus felület generálás

Görbe sereggel történő felület létrehozás során az első lépés minden esetben a vezérgörbék létrehozása a hálóból. Ezt követi a görbéken átmenő felületek létrehozása. Ezzel a módszerrel hatékonyan lehet visszamodellezni szabad formájú felületeket ahogyan a 12. ábra is szemlélteti. [13]

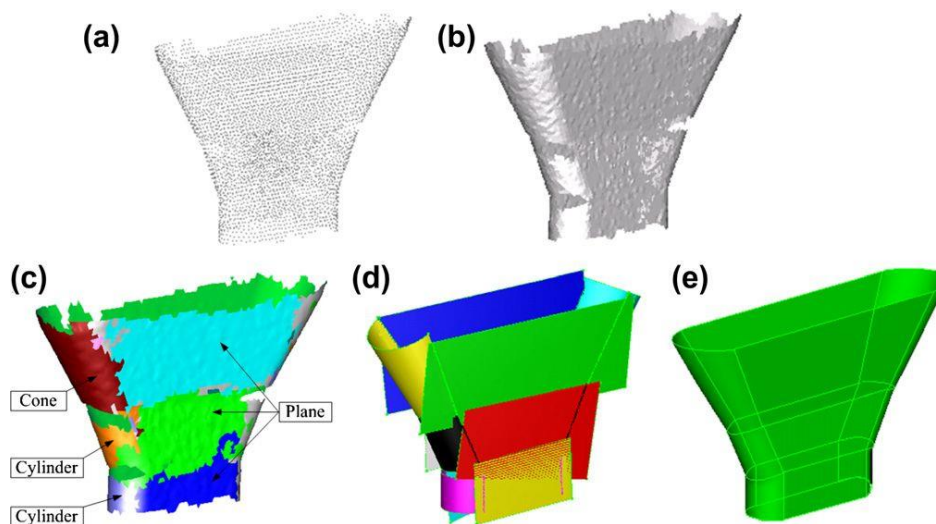


11. ábra Felület létrehozása görbesereg segítségével [13]

A háló szegmentálással történő felület létrehozás első lépése a háló modellen kialakítani a különböző régiókat. Ezekhez a régiókhoz a szoftver alap alakajátosságokat rendel hozzá,

melyek lehetnek gömb, sík, kúp vagy henger. A felületek létrehozásakor a szoftver létrehozza az ezekre a régiókra legjobban illeszkedő felületet. Ezeknek a felületeknek az egyesítésével, metszésével létrehozható a végleges CAD modell. [13] [19]

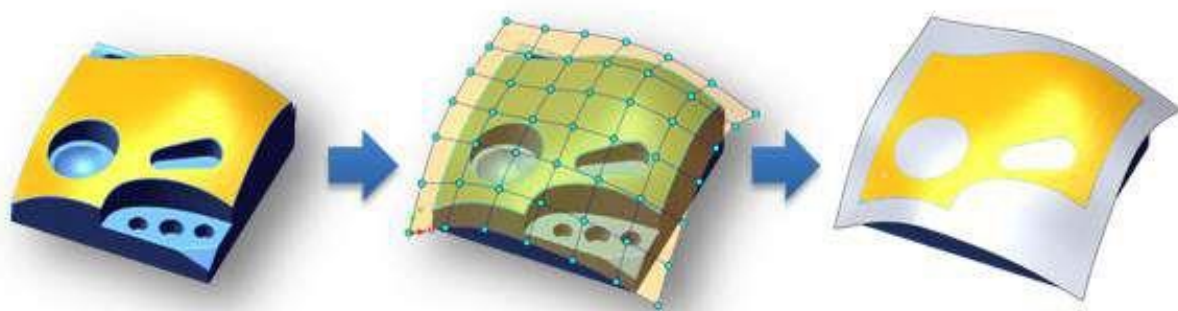
Ezzel az eljárással elvégzett visszamodellezést mutatja be a 12. ábra.



12. ábra Hálószegmentálással történő visszamodellezés [19]

Az alap geometriai alakzatokon túl az ilyen célra fejlesztett szoftverek képesek szabad formájú felületeket is létrehozni hálószegmensek alapján. A szegmens kijelölését követően meg kell adni a kontrol pontok számát a létrehozni kívánt felület élei mentén. Ezeknek a pontoknak a száma nagyban befolyásolja a görbe illeszkedésének pontosságát. A folyamat kimenetele egy B-Spline felület, mely illeszkedik a kijelölt háló régióra. [13]

B-Spline generálás folyamata látható a 14. ábrán.



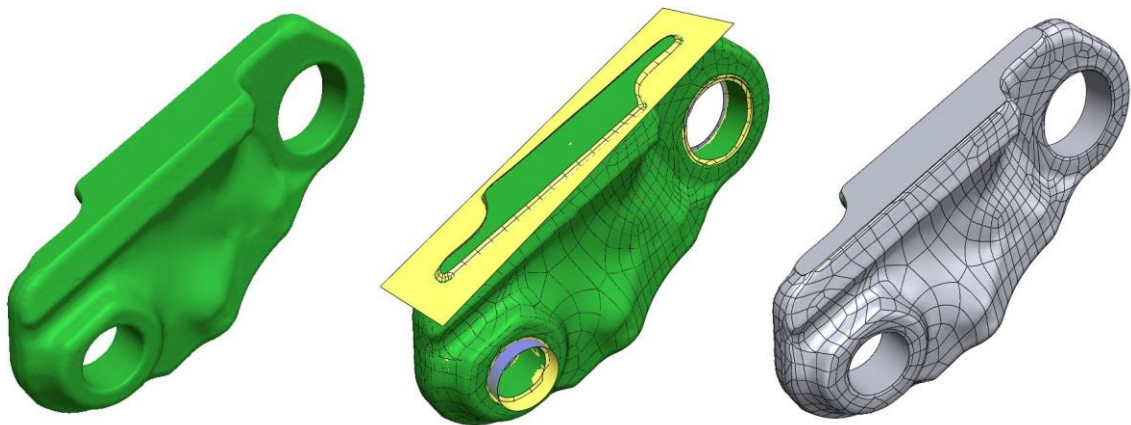
13. ábra Szabadformájú felület hálószegmensre történő illesztése [13]

A felületillesztési eljárások közül az utolsó az automatikus felületillesztés, melynek értelmében a szoftver egy algoritmus alapján automatikusan létrehozza a hálómodellre illeszkedő felületeket. A folyamat végeredménye egy felületmodell. [13]

2.2.4. Hibrid visszamodellezés

Amennyiben az adott alkalmazás megkívánja, lehetőség van a fent felsorolt eljárások egy modellen történő alkalmazására. Ezt nevezzük hibrid visszamodellezésnek. Ennek értelmében a visszamodellezés során lehetőség a fent bemutatott eljárások tetszés szerinti vegyítésére. Ez nagyban meggyorsíthatja a visszamodellezés folyamatát. [13]

Ezt a módszert szemlélteti a 15. ábra. Látható, hogy a szkennelt állomány szoftverbe történő importálását egy automatikus felület generálás lépés követte. Ez követően a furatok, valamint ábrán látható lapolás külön elhelyezésre kerültek a modellen. [20]



14. ábra Hibrid modellezés folyamata [20]

2.3. SLS 3D nyomtatás alapjai

Az ASTM International a 3D nyomtatási technológiákat az ISO/ASTM 52900-as szabványban hét egymástól jól elkülöníthető kategóriába sorolta. A különböző elvek alapján működő eljárások mindegyike rendelkezik előnyökkel és hátrányokkal, ezek részletezése azonban túl mutatna ezen dolgozat keretein, ezért csak az SLS technológia sajátosságai kerülnek bemutatásra. [21]

A nemzetközileg elfogadott csoportosítás a következő:

- Fotó polimerizációs eljárások
- Kötőanyag kibocsájtáson alapuló eljárások (binder jetting)
- Anyagkibocsájtáson alapuló eljárások (material jetting)
- Közvetlen energiával történő rétegzés (direct energy deposition)
- Lemezanyag rétegzésen alapuló eljárás (sheet lamination)
- Anyag extrudálás elvén alapuló eljárás (material extrusion)
- Porágyas eljárások (powder bed fusion)

Ez a hét csoportot további alcsoportokra lehet bontani. A porágyas technológiák egy ilyen

alcsoportja a szelektív lézer szinterézés, az SLS technológia. A technológiát számos iparág alkalmazza prototipizálásra, vagy akár kis szériás sorozatgyártásra is. Fellelhető a járműiparban, repülőgépiparban, hadiiparban és gyógyszeriparban egyaránt. [22]

A technológia alapja, hogy a finom szemcsés formába lévő alapanyagot, mely az esetek nagyrésztében valamilyen hőre lágyuló polimer, egy lézer olvasztja össze rétegről rétegre. Ezzel kialakítva a létrehozni kívánt geometriát. [22]

Ezekre a gépekre elérhető alapanyag választék igen szélesnek tekinthető, a gyártók kínálatában számos ipari alapanyag megtalálható. Ezek között vannak részben kristályos és amorf hőre lágyuló polimerek egyaránt. [23]

A technológiával kompatibilis alapanyagokat és azok felhasználását a 2. táblázat foglalja magába a teljesség igénye nélkül.

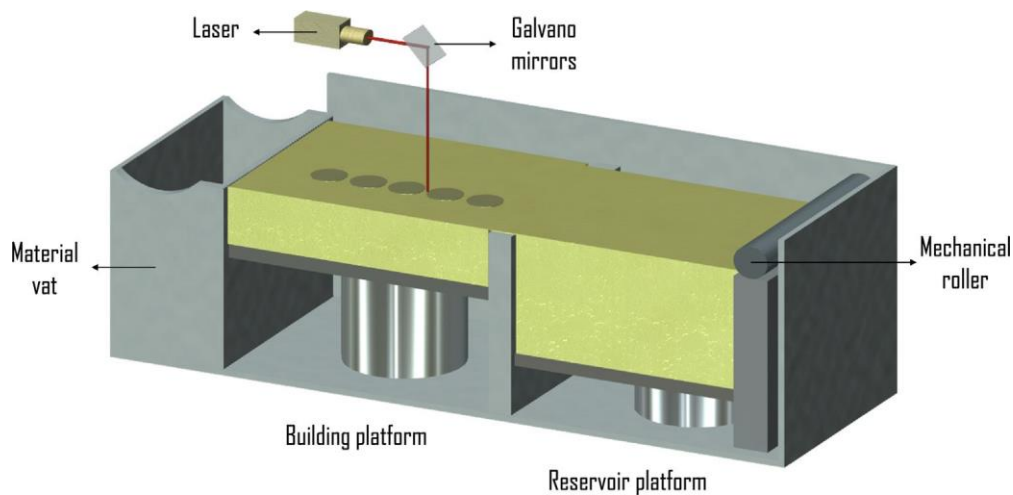
Rövidítés	Megnevezés	Felhasználási példák
PA 12	Poliamid 12	prototipizálás, kisszeriás sorozatgyártás
PA 12 GF	Poliamid 12 hozzáadott üvegszállal	Tartós mechanikai/ termikus terhelésnek kitett alkatrészek
PA 11	Poliamid 11	protézisek,
PA 11 CF	Poliamid 11 hozzáadott karbonszállal	Fém alkatrészek kiváltása, tömegcsökkentés
PP	Polipropilén	vízálló borítások, protézisek
PBT	Polibutilén tereftalát	elektronikai alkatrészek
TPU	Termoplasztikus poliuretán	tömítések, szíjjak, dugók, csövek
PA 12 AF	Poliamid 12 hozzáadott alumíniummal	Tartós mechanikai/ termikus terhelésnek kitett alkatrészek
PA 12 GSL	Poliamid 12 hozzáadott üveggyönggyel és karbonszállal	Repülőgép ipar, motorsport

2. táblázat Néhány SLS alapanyag [24] [25] [26]

2.3.1. Nyomtatók felépítése

Ezen gépek felépítése egységesnek tekinthető. Általánosságban elmondható, hogy a nyomtatás szabályozott fűtési körülmények között zajlik. A nyomtató tér felfűtéséért, valamint hőn tartásáért a fűtőelemek felelnek. A nyomtatás a nyomtatási területen történik, ahol az adott keresztmetszetet egy lézer pásztázza végig x, y tengely mentén, ezzel összeolvasztva az alapanyagot. A pásztázás egy, erre a célra elhelyezett, vetítő mechanizmus segítségével történik. Az adott réteg összeolvasztását követően az építőplatform lejjebb ereszkedik, a porterítő mechanizmus pedig kiteríti a következő réteg port a nyomtatási területre. Ez a folyamat egészen addig ismétlődik, amíg a vékony rétegekből fel nem épül a kész alkatrész. [22]

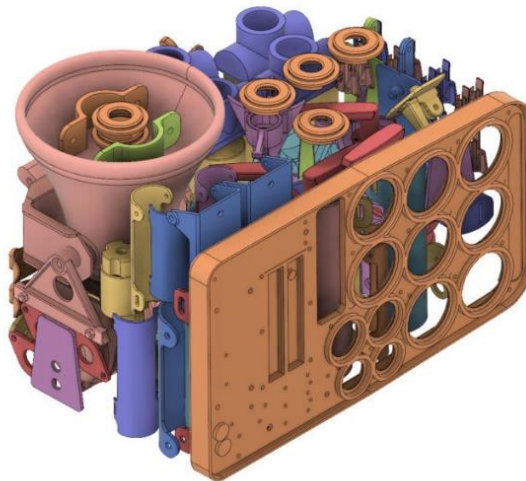
A 17. ábrán megfigyelhető egy hagyományos SLS nyomtató sematikus ábrája.



15. ábra SLS nyomtatók felépítése [22]

A por réteges terítéséből adódik az eljárás egyik nagy előnye. Nyomtatás során nincsen szükség támaszanyagra, hiszen a már kiterített por látja el annak szerepét. Így akár a teljes nyomtatási terület kihasználható, a modellek egymásfölé helyezhetők. További előnye a támaszanyag nélküli nyomtatásnak, hogy akár bonyolult geometriák is kinyomtathatók az utómunkára szánt idő drasztikus megnövekedése nélkül. Ilyen bonyolult geometriák lehetnek különféle belső furatok vagy alakos felületek. [1] [22]

A munkatérben elrendezett alkatrészeket szemlélteti a 18. ábra.



16. ábra Munkadarabok térkihasználása a munkatérben [27]

Nyomtatást követően a fel nem használt por eltávolításra kerül a munkatérből, valamint az alkatrészekről. Ez a por a későbbiekben újra felhasználható bizonyos mennyiségű friss por hozzákeverésével. A friss pornak a százalékos aránya függ az alapanyag milyenségétől, esetleges védőgáztól, valamint az elérni kívánt mechanikai tulajdonságoktól. [1]

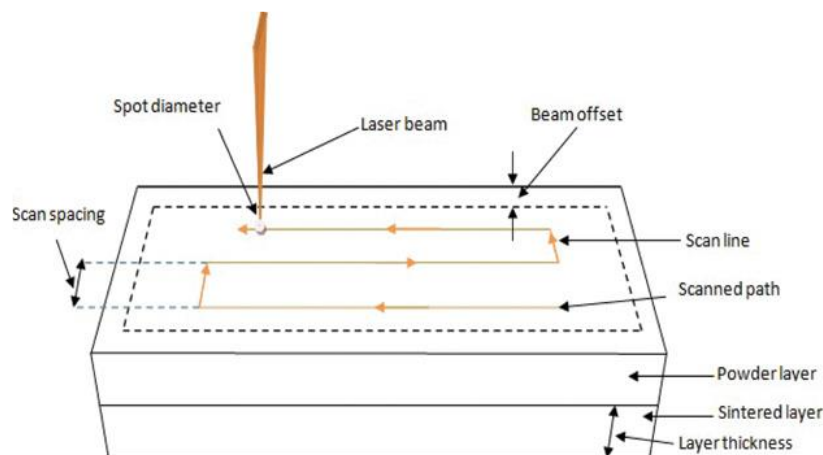
2.3.2. Nyomtatási paraméterek

Mint a legtöbb gyártástechnológiában, ebben az esetben is számos paraméter van kihatással a késztermék tulajdonságaira, így annak a mechanikai jellemzőire és felületi minőségére egyaránt. Az anyagok mindegyike eltérő paraméterek mellett nyomtatható, ezért fontos ismerni a végeredményt befolyásoló tényezőket és a köztük lévő összefüggéseket.[22]

Ezek a fő paraméterek a következők:[22]

- Nyomtatási hőmérséklet
- Lézer sugár tulajdonságai
- Lézer pásztázási sebessége
- Pásztázási sorok közötti eltolás mértéke
- Alapanyag mérete és formája
- Rétegmagasság

A fent bemutatott paraméterek a 19. ábrán figyelhetők meg.



17. ábra A nyomtatási paraméterek szemléltetése [28]

A nyomtatás az SLS berendezéseken szabályozott fűtési körülmények között zajlik. A nyomtató tér és a nyomtató asztal egyaránt rendelkezik szabályozható fűtőelemekkel. Nyomtatás során a hőmérséklet olvadáspont közeli értéket vesz fel részben kristályos polimerek esetén, míg amorf polimerek esetén a hőmérséklet eléri az üvegesedési átmeneti hőmérsékletet (T_g). Ezzel csökkenhet a szinterezésért felelős lézer teljesítménye, valamint csökkenthető a hőmérséklet gradiens értéke, ami hatással van a nyomat nem kívánatos vetemedésre. További előnye, hogy a portterítési ciklusokban a finom alapanyag szemcsék enyhén összetapadnak a magas hőmérséklet hatására, ezzel megakadályozva azok levegőbe jutását. Ez hozzájárul az ideális terített réteg kialakításához. [23]

Fontos vizsgálni a lézer, valamint az alapanyag kölcsönhatását nyomtatás során.

Kulcstényező az alapanyagban abszorbált energia. Ennek mértéke függ a lézersugár hullámhosszától, az alapanyagtól, az alapanyagrészecskék formájától, a kamrát kitöltő gáz tulajdonságaitól, valamint a hőmérsélettől. Polimerek esetében az anyag abszorpciós képessége növekszik a lézer hullámhosszának növekedésével. Az alkalmazható lézerek: Nd:YAG, Fiber, Dióda, CO₂. [22]

A lézer esetén fontos paraméter továbbá annak pásztázási sebessége. Ez tulajdonképpen megmutatja, hogy a lézer az adott összeolvasztandó keresztmetszetet milyen gyorsan járja végig. Az érték nagyban függ a lézer energia sűrűségétől az alapanyag felszínén. E között az összefüggés között teremt kapcsolatot a 2. egyenlet, ahol az E_v a lézer energia sűrűsége, P a lézer teljesítménye, V_s a lézer pásztázási sebessége, míg az S_d a lézer kontakt felülete az anyag felszínén. [22]

$$E_v = \frac{P}{S_d * V_s} \quad (2)$$

Általánosságban elmondható, hogy a pásztázási sebesség csökkentésével növekszik a lézer energiasűrűsége, melynek eredménye a jobb összeolvadás. A sebesség csökkentése a nyomtatási idő növekedését okozza. Ezzel szemben a megnövekedett pásztázási sebesség kedvező irányban befolyásolja a nyomtatáshoz szükséges időmennyiséget, azonban az alapanyag összeolvadására negatív hatással van. [22]

A pásztázási sebességhez hasonló hatással bír a lézer által bejárt útvonalak közötti távolság. Amennyiben ez a távolság túl nagy, úgy kialakulhatnak össze nem olvasztott régiók a nyomat belsejében. Ez drasztikusan lecsökkentheti a nyomat mechanikai tulajdonságait, mely idő előtti tönkremenetelhez vezethet. Az útvonalak közötti távolság csökkentése megoldást nyújt a fent leírt problémára, azonban megnöveli a nyomtatás időszükségletét. [22]

Fontos tényező továbbá a felhasznált por szemcsemérete, valamint a szemcsék alakja. Ezek a tényezők nagyban befolyásolják az alapanyag terítési tulajdonságait és az összeolvasztáshoz szükséges energia mennyiséget egyaránt. Általánosságban elmondható, hogy az ideális alakja a porrészecskéknél gömb, melynek átmérője 58 és 180 μm között változik. [22]

Mint a legtöbb additív technológia esetében, itt is fontos szerepe van a rétegek vastagságának. SLS technológia esetén ezt az értéket a kiterített por réteg vastagsága határozza meg, ennek értéke 0,07 és 0,5 mm között mozoghat géptől és beállítástól függően. Ez a paraméter nagyban befolyásolja a nyomat felbontását és a nyomtatási időt egyaránt. Minél kisebb a rétegvastagság annál részletesebb a kinyomtatott munkadarab felszíne, azonban a kinyomtatáshoz szükséges idő is növekszik. Ezzel szemben a rétegvastagság emelésével a

részletesség csökken, de az időszükséglet is csökken. A rétegvastagság és a szemcseméret között összefüggés áll fent, melynek értelmében a rétegvastagságot nem ajánlott a por szemcsemérete alá vinni, mivel ez negatívan hat a nyomtatási méretezésre. [22]

2.3.3. Formlabs Fuse 1+ 30W és Fuse Sift bevezetése

A dolgozatban bemutatott alkatrész, egy Formlabs Fuse 1+30W megnevezésű SLS 3D nyomtatón lett legyártva, ezért ennek bemutatása is indokolt.

A Fuse 1+30W a Formlabs saját fejlesztésű és gyártású, belépő kategóriás SLS nyomtatója. Nagy előnye az ipari nyomtatókhoz viszonyított alacsony bekerülési költség, valamint az egyszerű kezelés. A nyomtató összehasonlítva az ipari SLS gépekkel, viszonylag kis nyomtatási térrel rendelkezik, melynek mérete 165mm x 165mm x 300mm. Azonban a nyomtatási tért egészét kihasználva ez a méret számos alkalmazásra megfelelő. [1]

A nyomtató csak a cég által kiadott anyagok nyomtatására képes. Ezekhez az anyagokhoz a gyártó saját anyagprofilokat kínál, melyben előre meghatározásra kerültek a nyomtatási paraméterek, azok módosítására lehetőség nincsen. A por összeolvasztásáért egy 30W névleges teljesítményű itterbium lézer felel. A nyomtató lehetővé teszi további védőgáz bevezetését a nyomtatási térbe, mely bizonyos alapanyagok esetén lassítja annak öregedését, valamint javítja a nyomtatási mechanikai tulajdonságait. [1]

A nyomtató mellé a cég kínálatában elérhető egy utómegmunkáló állomás, mellyel a nyomtatás utáni tisztítási munkákat lehet elvégezni. Az állomás alkalmas a használt és az új por tárolására, valamint azok előre meghatározott arányban történő összekeverésére. [1]

A nyomtató főbb paraméterei a 3. táblázatban láthatók.

Fuse 1+30W paraméterek	
Nyomtatási térfogat	165mm x 165mm x 300mm
Rétegvastagság	110 µm
Nyomtatási sebesség (20%-os kitöltés mellett)	0,5 l/h
Lézer	30W itterbium
Lézerpont mérete	247 µm
Nyomtatási fűtési hőmérséklet	200°C-ig
Nyomtatható anyagok	PA11, PA11CF, PA12, PA12GF, TPU, PP

3. táblázat Formlabs Fuse 1+30W paraméterek [29]

A 20. ábrán látható a Formlabs Fuse 1+ 30W típusú nyomtatója, valamint a hozzá tartozó Fuse Sift elnevezésű utómegmunkáló állomás.



18. ábra Formlabs Fuse 1+30W, Fuse Sift [1]

2.3.4. SLS technológia helye az iparban

A technológia hordozta előnyöknek köszönhetően számos iparág alkalmazza az SLS technológiát prototipizálásra, valamint végtermék felhasználásra egyaránt. Ezek között az előnyök között lehet megemlíteni a formai megkötések nélküli tervezést, a magas termelékenységet, az alacsony darabköltséget, valamint a ipari alapanyagok alkalmazhatóságát. [30]

A technológia további előnye, hogy az elkészült alkatrészek mechanikai tulajdonsága megközelíti a fröccsöntéssel gyártott alkatrészek mechanikai tulajdonságait. Bizonyos alkalmazások során célszerű lehet mérlegelni az SLS technológiával történő gyártást fröccsöntés helyett. Ezt szemlélteti a 19. ábra. [30]



19. ábra SLS nyomtatás és fröccsöntés költségeinek összehasonlítása [30]

A képen a Formlabs saját nyomtatójába gyártott fogaskerék árának alakulása figyelhető meg. Látható, hogy a konkrét alkatrész gyártási költségei hogyan alakulnak SLS 3D nyomtatás (SLS), illetve fröccsöntés esetén (IM). [30]

Fröccsöntés esetén a szerszámozási költség körülbelül a 10000 USD -re adódott volna, az alkatrészenkénti darab ár pedig 2,2 USD-re. Ezzel szemben SLS technológiával történő gyártás során a szerszámozási költség 0 USD a darabonkénti ár, pedig 3,5 USD-re adódik. Megvizsgálva az ábrát látható, hogy egészen 8000 db alkatrészig a SLS technológia egy olcsóbb alternatívát jelentett a cég számára ezen alkatrész esetén. [30]

További előny lehet, hogy a fröccsöntés esetén fenálló formai megkötésektől SLS technológia alkalmazása esetén el lehet térni. Így az adott alkalmazásra optimális geometriák is létrehozhatók a gyártási költségek növekedése nélkül. [30]

3. Járókerék visszamodellezése és gyártása

Dolgozat második felében bemutatom a teljes tervezési folyamatot. Az alkatrész ismertetését követően kitérek a szkennelésre, valamint az erre alapuló visszamodellezésre egyaránt. A tervezést követően a gyártási folyamat is bemutatásra kerül, melyet egy költségkalkuláció követ. A dolgozat egy összefoglalással zárul, melyben összefoglalom és mérlegelem az elért eredményeket.

3.1. Probléma ismertetése

A dolgozatban legyártott alkatrész egy 1963 és 1971 között gyártott W113-as típusú Mercedes-Benz ventilátor járókereke, mely a levegő utastérbe jutásáért felel. Az alkatrészből utángyártott nem elérhető jelenleg, valamint a használtak sokszor sérültek. Amennyiben elérhető a használtpiacon egy ép állapotban lévő annak az ára sokszor kifejezetten magas.

A 20. ábrán megfigyelhető egy W113-as típusú Mercedes-Benz, valamint a fentebb említett járókerék.



20. ábra Mercedes-Benz W113, valamint a beltéri levegő befűtésére szolgáló járókerék. [31] [32]

A bemutatott ventilátorkerekből kettő darab helyezkedik el a műszerfal alatt, ezek felelnek a levegő utastérbe való befűtéséért. A rendszer felépítése egyszerűnek tekinthető. A levegő a gépjármű motorház teteje felett található légbeömlőn keresztül áramlik a fűtőradiátor a torlónyomás következtében. Itt, amennyiben a radiátoron elhelyezkedő csap nyitott állapotban van, az átáramlott levegő felmelegszik s így jut a járókerekekre. Zárt állapot esetén hőátadás nem történik a levegő és a radiátor között, ebben az esetben a radiátor túloldalán a levegő hőmérséklete megegyezik a környezeti levegő hőmérsékletével. Ezt a levegőt továbbítják az utastérbe a ventilátor járókerekek.

Látható, hogy a kerekeknek a magas fordulatszámból adódó mechanikus igénybevételen túl, a meleg levegő által kifejtett termikus igénybevételnek is ellent kell állniuk. A járókerekek fordulatszáma két lépcsőben szabályozható. Az első állás esetén a fordulatszám 1600 ford./perc, míg a második esetén az érték 2000 ford./perc. Ismert továbbá ezekbe a típusokba szerelt termosztátok nyitási hőmérséklete. Ennek az értéke 80°C, ez a hőmérsékletű folyadék áramlik keresztül a fűtőradiátoron. [32]

3.2. Technológia és anyagválasztás

A tervezés első lépése a beépítési körülmények, valamint a járókerekeket terhelő igénybevételek felmérése és elemzése volt. Ezek alapján pedig az anyaggal szemben támasztott elvárások lefektetése.

A járókereket ért mechanikus terhelés a kerekek magas fordulatszámából adódik, melynek maximális értéke 2000 ford/perc, tervezés során ez az érték volt mérvadó. További terhelés a hőmérsékletből adódó termikus igénybevétel. A járókerékre jutó hőmérséklet értékét normál üzemi körülmények között 80°C-ra választottam. Ezzel azt feltételezve, hogy tökéletes hőátadás megy végbe a hőcserélő és a levegő között. Ezzel a lépéssel hibát nem vétek, hiszen így az alkatrész biztonsági tényezőjét növelem. [32]

A fentiek alapján az anyaggal kapcsolatban a következő elvárások lettek lefektetve.

- Viszonylagosan magas hőállóság
- Kellő merevség
- Relatív alacsony ár.

A fentiek alapján öt különböző anyag került összehasonlításra. Ezek mindegyikét alkalmazza a járműipar, továbbá gyártói leírások alapján kiváltképpen alkalmasak magas hőmérsékletű alkalmazásokra. Ezeket az anyagokat és tulajdonságaikat a 4. táblázat foglalja magába.

Figyelembe véve a magas anyagköltséget és az FDM technológia korlátait, a táblázatban szereplő első két anyag elvetésre került. További ellenérv, hogy a járókerék kialakítása miatt nyomtatás során nagymennyiségű támaszanyagra lett volna szükség, melynek következménye az egyik oldalon kialakuló rosszabb minőségű felület. Nem elhanyagolandó, hogy a technológia ismétlési pontossága megkérdőjelezhető több ilyen nagyméretű alkatrész gyártása esetén. Ezzel szemben az SLS technológia számos előnnyel rendelkezik, melyeket egy ilyen jellegű alkatrész esetén előnyként lehet említeni.

	ULTEM 1010	PEEK	PA12 GF	PA 11 CF		
Gyártó	Intamsys	Intamsys	Formlabs	Formlabs		
Gyártás technológia	FDM	FDM	SLS	SLS		
Ár (Ft/kg)	113 800 Ft	27 9000 Ft	41 500 Ft	63 166 Ft		
Szakítószilárdság	90 MPa	99,9 MPa	38 MPa	x	y	z
				69MPa	52MPa	38MPa
Hajlítószilárdság	126 MPa	147 MPa	56 MPa	110 MPa		
Rugalmassági modulus	3,4GPa	3,7 GPa	2,8 GPa	x	y	z
				5,3GPa	2,8GPa	1,6GPa
Sűrűség	1,27 g/cm ³	1,3g/cm ³	Na	Na		
Terhelés alatti deformáció hőmérsékelt (ASTM D648 0,45MPa)	207 °C	Na	170 °C	188°C		
Terhelés alatti deformáció hőmérsékelt (ASTM D648 1,8MPa)	Na	152	113 °C	178°C		

4. táblázat A választott anyagok és tulajdonságaik [33] [26]

Alapanyagként a Formlabs álltál gyártott PA11CF elnevezésű anyag került kiválasztásra. Egy kompozit anyag, aminek az alapja Nylon 11 hőre lágyuló polimer por, melybe szénszálat kevertek erősítő anyagként, ezzel elérve a magas merevséget és hőállóságot. Az anyag a gyártói leírás alapján kifejezetten alkalmas olyan végfelhasználásra szánt alkatrészek gyártására, melyekkel szemben elvárás a merevség magas hőmérsékletű üzem közben is. Mivel a Formlabs ezeket az anyagokat a saját nyomtatóihoz gyártja, így a kiválasztott alapanyag határozta meg a gyártáshoz használt 3D nyomtatót, melynek pontos típusa Formlabs Fuse 1 + 30W. [26]

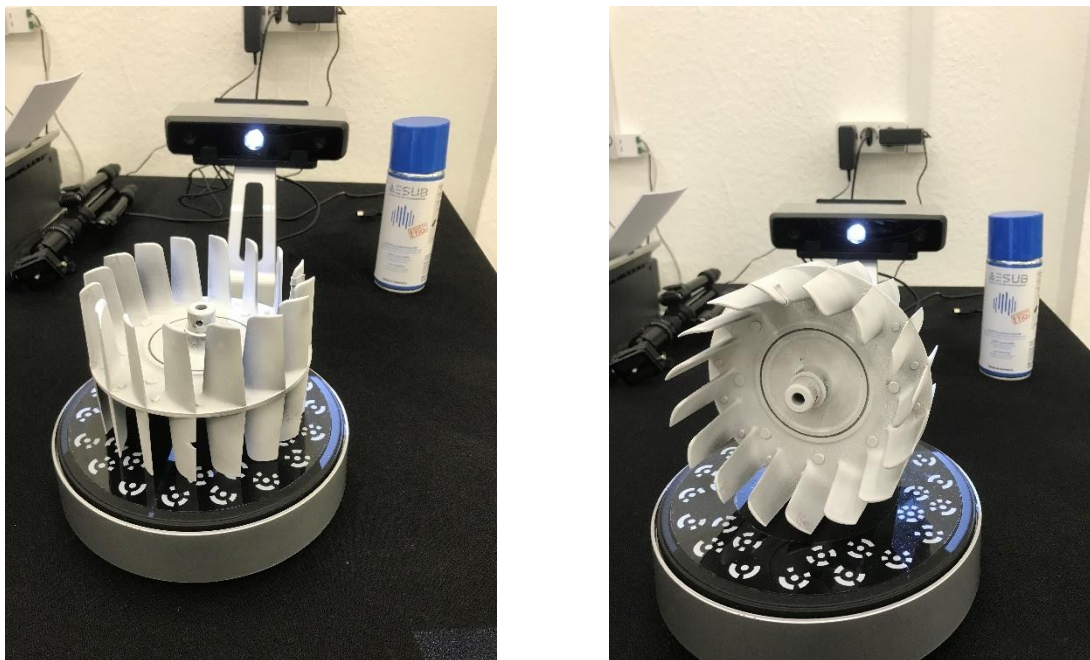
3.3. Szkennelés

Az első lépés a járókerék szkennelése volt, későbbiekben a szkennelés során felvett pontok adtak alapot a parametrikus CAD modell létrehozásához. A szkennelés a már bemutatott Einscan SP V2 típusú asztali szkennellett lett elvégezve.

Az alkatrész színe fekete, így az nem ver vissza elegendő mennyiségű fényt a szkennel számára, ezért a szkennelés nem volt megvalósítható a felületre felvitt segédanyag nélkül. Számos erre a célra kifejlesztett anyag elérhető a piacon. Ebből a nagy kínálatból az AESUB-blue elnevezésű spray formában kapható segédanyag lett kiválasztva. A termék nagy előnye, hogy használatával egy vékony homogén fehér réteg vihető fel a szkennelendő alkatrész felületére. Az anyag a felhordást követően pár órán belül elpárolog a felületről, így utólagos tisztításra nincs szükség. Felhordás előtt a felületről minden szennyeződés el lett távolítva, ezzel biztosítva a valós alkatrészt minél jobban reprezentáló szkennelt állomány létrehozását. [34]

Az előkészítést a szkennerek kalibrálása követte, mely a gyári leírás alapján lett elvégezve. Ezt követően megkezdődött a járókerék szkennelése. Az alkatrész geometriájából adódóan két eltérő pozícióban lett elvégezve a digitalizálás. Első esetben a járókerék állítva lett elhelyezve a forgóasztalon, míg a második lépésben az oldalára lett forgatva. Mindkettő esetben biztosítva volt az alkatrész stabil pozíciója. A forgóasztal 36 db lépésben fordult körbe a szkennelési fázisok során.

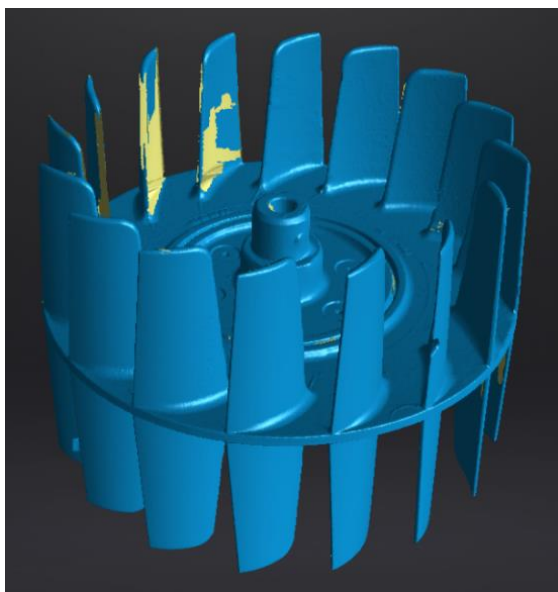
Az alkatrész szkennelési helyzetei láthatóak a 21. ábrán.



21. ábra Forgóasztalon elhelyezett alkatrész

A szkennelés eredményeképpen közel 20 millió pont került rögzítésre, ezek közel 39 millió elemet határoztak meg. A pontthalmaz megtisztítása során minden feleslegesnek tekinthető pont el lett távolítva a szkennerek szoftvere segítségével. A háló a megtisztítást követően 2 486 173 db háromszögből épült fel. A létrehozott hálón a szakadások nem lettek befoltozva, ennek elsődleges oka, hogy az alkatrész forgásszimmetrikus, valamint egy tükör szimmetriasíkkal is rendelkezik, ezért visszamodellezés során elegendő a háló egy kisebb szakadás mentes szegmensét felhasználni. Továbbá a szakadások javítása az utómunkára szánt időt is nagyban megnövelte volna.

A létrehozott háló a 22. ábrán látható



22. ábra A járókerék hálómódelleje

A szkennelés utolsó lépése a méretek ellenőrzése volt. Az alkatrész kettő, viszonylagosan jól mérhető mérettel rendelkezik ez a két méret a lapátok csúcsai közötti távolság, ami egyben a járókerék teljes magasságát is meghatározza, valamint az alkatrész alapjának tekinthető középső tárcsa átmérője. Ezek a méretek a szkennelt háló modellen és a fizikai alkatrészen is le lettek mérve, majd össze lettek hasonlítva.

A hálón felvett mérési pontok és velük együtt a mérési eredmények a 23. ábrán láthatók.



23. ábra Hálómódelről lemerő méretek

	Átmérő	Magasság
Hálón mért érték	145,722 mm	105,724 mm
Fizikai alkatrészen mért érték	145,6 mm	105,55 mm
Abszolút eltérés mm-ben	0,122 mm	0,174 mm
Abszolút százalékos eltérés	0,083 %	0,165 %

5. táblázat Mérések összehasonlítása

Az 5. táblázatban látható, hogy a szkennelt állomány, valamint a valós alkatrész közötti eltérés mértéke több nagyságrenddel kisebb, mint az alkatrész kiterjedése, így a szkennelést követően létrehozott háló modell alkalmas a további munkálatokra. Az állomány STL fájl formátumban lett exportálva a szkennelő szoftveréből.

3.4. CAD modell létrehozása

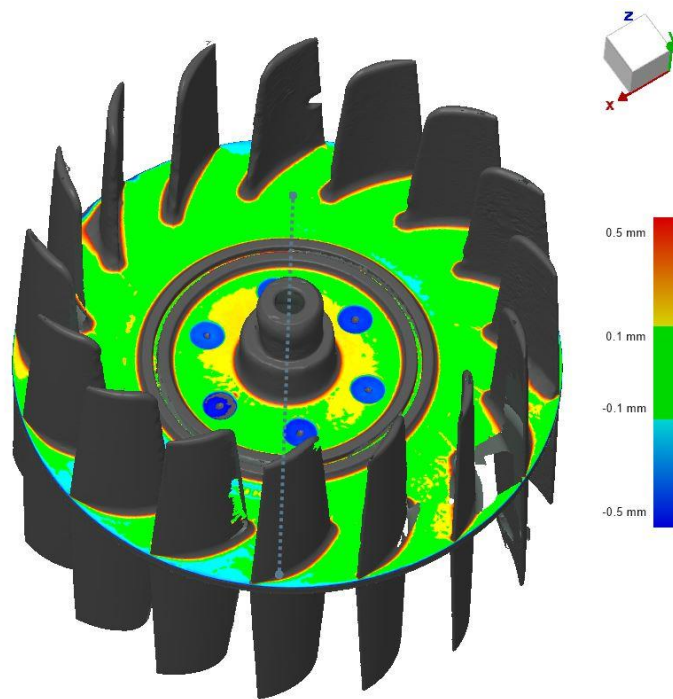
A visszamodellezési munka nagy része a QuickSurface nevezetű célszoftverben történt, míg a tervezési munka további része Autodesk Inventorban. A program számos olyan eszközt biztosít a felhasználó számára, mellyel gyorsan és hatékonyan elvégezhető a hálómoddellre épülő CAD modell felépítése. Az elkészült modell könnyedén exportálható a modelltörténettel együtt az Autodesk Inventor, illetve a SolidWorks programokba, ahol szükség esetén további módosítások eszközölhetők.

3.4.1. Visszamodellezés bemutatása

A modellterbe történő importálás után az első lépés a háló origóba illesztése volt, ezzel biztosítva a későbbiekben a könnyebb modellezést. Ehhez az illesztéshez geometriai referenciák lettek felvéve a hálómoddellen. Elsőként az járókerék alapját képző középső tárcsa egyik homlokfelületére lett sík illesztve a megfelelő hálórégiók kijelölését követően.

A sík és a homlokfelület illeszkedésének minősége kiemelt fontosságú. A későbbiekben ebből az alapsíkból lett származtatva további kettő darab geometriai referencia, így az esetlegesen fennálló pontatlanság azok esetén is megjelent volna. Az illeszkedés pontossága ellenőrizhető a szoftverbe beépülő eszköz segítségével.

A 24. ábrát megvizsgálva látható, hogy az illesztett sík, valamint a háló közötti eltérés tized milliméteren belül mozog, így a sík megfelelőnek tekinthető.

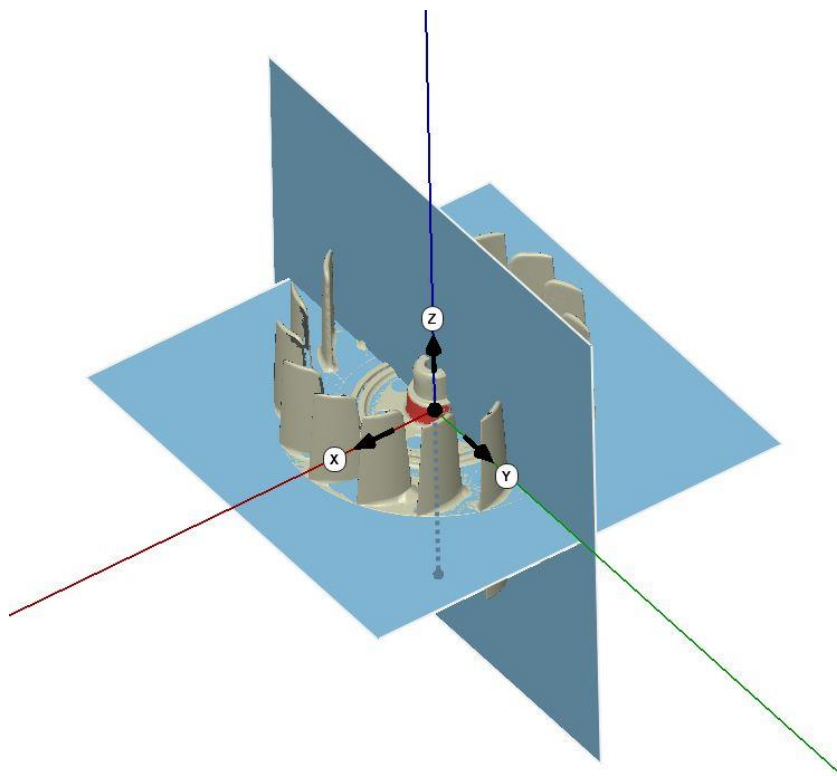


24. ábra Hálószegekre illesztett sík illesztési minősége

Ezt követte a forgástengely definiálása, mely esetén a járókerék forgástengelyét egyértelműen meghatározó tengely külső palástjára lett hengeres elem illesztve. Ennek a hengeres elemnek a középtengelye megegyezik a járókerék forgástengelyével. Az előírt kényszerek értelmében a létrehozott tengely az alapsík normálisa. Ahhoz, hogy a modell minden szabadságfoka le legyen kötve, egy a már létrehozott referenciákból származtatott sík létrehozására volt szükséges, mely merőleges az alapsíkra és egybeeső a középtengellyel.

A létrehozott geometriai referenciák segítségével a háló könnyedén eltolható volt a modell tér origójába. Kényszerként lett előírva a forgástengely és a Z tengely egytengelyűsége, az XY sík, valamint az alapsík egybeesése. Végezetül szintén egybeesőként lett definiálva az YZ sík és a származtatott sík. Ezzel a három kényszerrel a háló modell összes szabadságfoka lekötésre került, pozíciója egyértelműen meg lett határozva a térben.

Az origóba illesztett hálómodell, valamint a felvett geometriai referenciák a 25. ábrán figyelhetők meg.

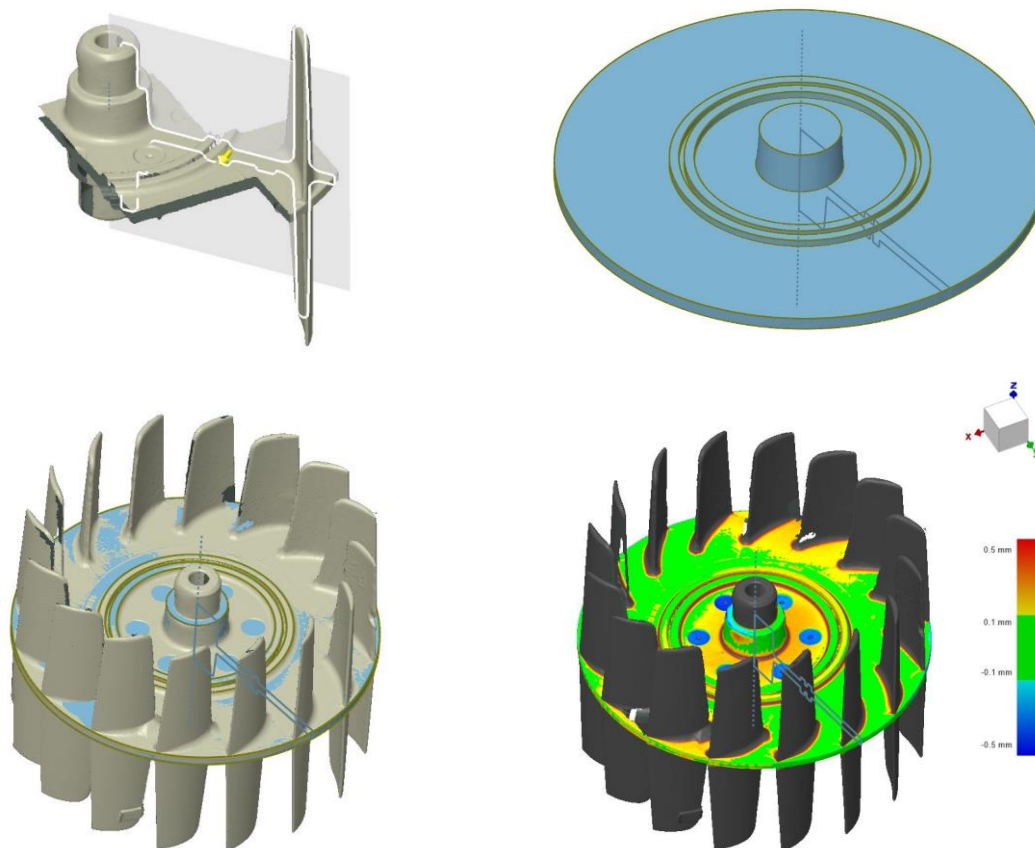


25. ábra Origóba illesztett hálómodell

Az alkatrész kialakítását, valamint a funkcióját figyelembevéve feltételezhető, hogy az alkatrész forgásszimmetrikus, továbbá, hogy van szimmetriasíkja. Ezen két állítás értelmében a lapátok geometriája és kiosztása, mindkettő lapátsor esetén, megegyezőnek feltételezhető. Ebből adódóan a visszamodellezéshez elegendő volt a háló egy bizonyos szegmensének felhasználása. A további hálóelemek el lettek tüntetve, csak az ellenőrzési fázisokban lettek megjelenítve. Ennek a lépésnek előnye, a megjelenítéshez szükséges kisebb grafikus hardver igény, valamint az átláthatóbb modelltér.

Elsőként az alaptárcsa lett létrehozva. A körbeforgatott profil a kiemelt hálószegmens elmozdításával létrehozott pontthalmaz alapján lett megrajzolva. A méretek egy része a fizikai alkatrésztől lett lemérve, míg a többi a hálómodellen alapszik. A megrajzolt profil a Z tengely körül lett körbeforgatva, ezzel létrehozva az alaptárcsát.

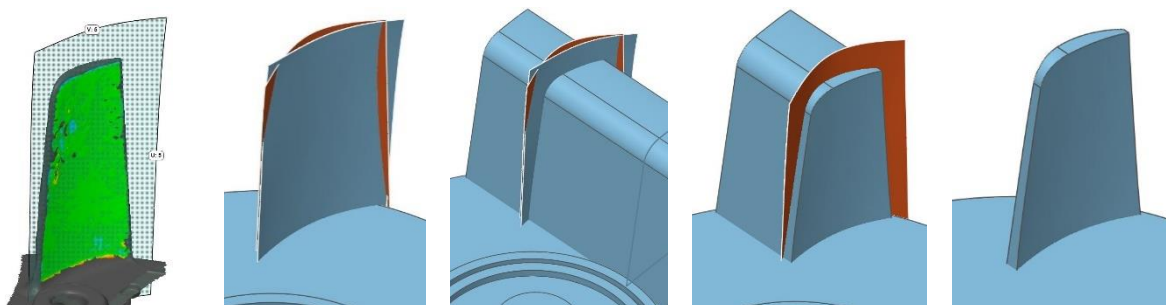
A tárcsa létrehozásának folyamata, valamint az eltérés vizsgálat eredménye figyelhető meg a 26. ábrán.



26. ábra Az alaptárcsa létrehozásának lépései

Ezt követte a lapátok létrehozása. Tekintettel a lapátok alakjára, visszamodellezésük hálószegmensre történő felület illesztéssel lett elvégezve. A lapát belső és külső felületére külön lettek illesztve a felületek, ezek eltérése a hálóhoz képes átlagosan $\pm 0,05\text{mm}$. Mindkét felület létrehozása során öt-öt darab kontrolpont lett felvéve a felületek élei mentén. Ezt követően egy a lapát kontúrját lekövető hasáb lett létrehozva, melyet elmetszve a felületekkel kialakult a lapát közel végleges geometriája. A lapát tövébe, valamint élei mentén az eredetivel megegyező lekerekítések lettek alkalmazva.

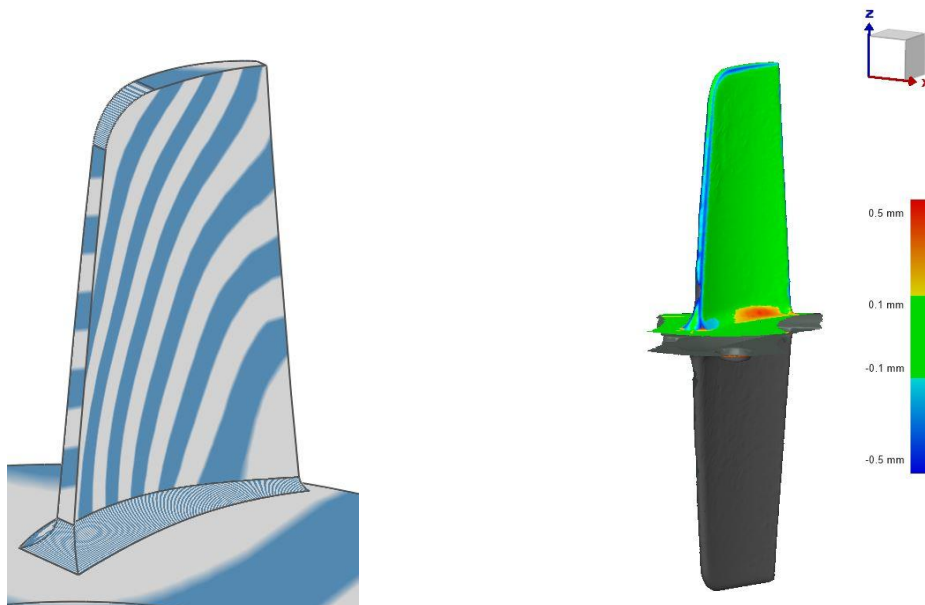
A lapát kialakításának folyamata figyelhető meg a 27. ábrán.



27. ábra Lapát létrehozásának folyamata

A lapátok elkészítése során az utolsó lépés az ellenőrzés volt, mely magába foglalta a felület folytonosságának vizsgálatát, valamint az illeszkedés minőségét egyaránt. A zebra csíkos megjelenítés alkalmazásával, megállapítható volt, hogy a lapátok külső és belső felületén felület folytonossági hiba, nem jelentkezik. Az eltérés vizsgálat eredményei alapján pedig a kialakított geometria elfogadható.

A lapáton elvégzett felületfolytonossági vizsgálat, valamint az eltérés vizsgálat eredményeit a 28. ábra szemlélteti.

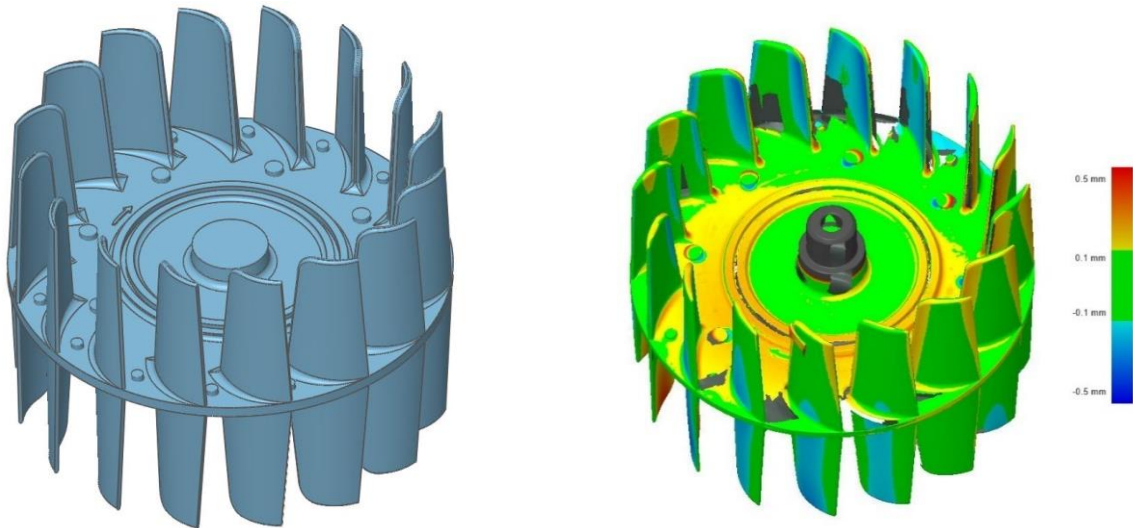


28. ábra Lapát geometria ellenőrzése

Ezt követően a lapát körkörösén kiosztásra került az alaptárcsára, majd az így létrehozott lapátsor tükrözésre a tárcsa másik oldalára. Az alkatrészen további részletek lettek kidolgozva, melyek megtalálhatók az eredeti alkatrészen is. Mivel a tengely a későbbiekben került megtervezésre, így annak furata a járókeréken a CAD szoftverben lett kialakítva.

A visszamodellezés utolsó lépése az elkészült modell és a háló közötti eltérési értékek vizsgálata volt. Az eltérési értékek mértéke elfogadhatónak tekinthetők. Ezek elsősorban az eredeti alkatrész gyártástechnológiájából adódó pontatlanságokra vezethetők vissza és az üzem során esetlegesen beálló maradandó alakváltozásokra. Az elkészült CAD modell modelltörténettel együtt exportálásra került Autodesk Inventor-ba, ahol további munkálatok lettek elvégezve, ami magába foglalja a tengely megtervezését, valamint a járókeréken lévő tengelyfurat kialakítását.

A nyers CAD modell, valamint az eltérésvizsgálat eredménye a 29. ábrán látható.

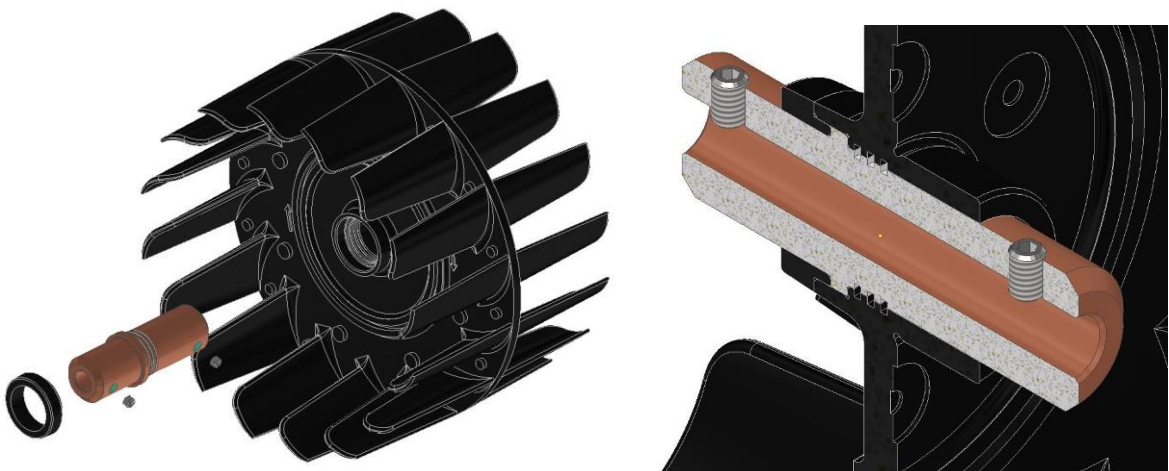


29. ábra A kész CAD modell, valamint annak illeszkedése a hálómódellre

3.4.2. Modell módosítása

Az alkatrészen a CAD szoftverben elhelyezésre került a központi furat, mellyel párhuzamosan meg lett tervezve a tengely. Az eredeti járókeréken két oldalról 1-1 darab persely volt elhelyezve az alkatrészen, az egytengelyűségi problémák elkerülése érdekében ez a két persely egy darab tengellyel lett kiváltva. A tengely esetében fontos követelmény a levegő nedvességtartalmával szembeni korrózióállóság. E szempont figyelembevételével, valamint az anyag kedvező árát is szem előtt tartva, a CuZn39Pb3, azaz a 18 mm átmérőjű sárgaréz kör rúd került kiválasztásra. A tengely és a járókerék furatába ragasztással került rögzítésre. A furatban, valamint a tengelyen barázdák lettek elhelyezve, melyekkel növelhető a ragasztott kötés szilárdsága.

A járókerék robbantott ábrája, valamint a tengely elhelyezkedése a 30. ábrán látható.



30. ábra A járókerék összeállítása

Már a tervezés során egyértelmű volt, hogy ez a technológia a modell orientációjától függetlenül alkalmatlan erre az alkalmazásra megfelelő furatot nyomtatni. A modellben a furat anyagráhagyással lett elkészítve, így a nyomtatást követően a furat méretre lett esztergálva.

3.5. Járókerék szilárdságtani vizsgálata

A visszamodellezett geometria szilárdságtani ellenőrzése szükséges volt, hiszen az eredeti alkatrész pontos anyaga és annak mechanikai tulajdonságai nem ismertek. Ezért a két anyag összehasonlítása nem volt lehetséges. Kiemelendő továbbá, hogy a tervezett alkatrész geometriája közel megegyező az eredeti alkatrészével, ezért áramlástani szimuláció nem lett végezve a járókeréken.

Az alkatrészen statikus vizsgálat lett elvégezve. Egy lineáris ortotróp anyagmodell lett felvéve. Mivel az alkalmazott anyagmodell az anyag viselkedését csak 23°C-on írja le, ezért a vizsgálat ezen a hőmérsékleten lett elvégezve. Nem találtam olyan modellt mely megfelelően leírta volna az anyag viselkedését ettől eltérő hőmérsékleten. Éppen ezért az emelt hőfokon történő üzem szimulációját tesztekkel kívánom helyettesíteni, mellyel teljesebb képet kaphatunk arról, hogy a geometria hogyan viselkedik magas hőmérsékletű üzem közben. A bemutatott szimuláció jól reprezentálja a terhelés hatására kialakult deformációját, valamint a fellépő feszültségi értékeket, olyan esetekben amikor a jármű fűtése kikapcsolt állapotban van.

A szimulációs környezet Ansys Workbench 2023 R1-ben lett felépítve, míg a vizsgálandó geometria Autodesk Inventor CAD programból került importálva. A geometrián több egyszerűsítés is eszközölve lett, ezzel megkönnyítve a hálózás folyamatát, ezek az egyszerűsítések a CAD program segítségével lettek elvégezve.

Tekintettel az alkatrész geometriájában fellelhető körkörös ciklikusságra a szimuláció két darab lapátot tartalmazó szelvényen lett elvégezve. Ez a lépés nagyban megkönnyítette a hálózás folyamatát, valamint a szimuláció időszükségletét is drasztikusan csökkentette. Ehhez a lépéshez az importált geometria megfelelően elő lett készítve. A szelvény elkészítésénél fontos volt, hogy az megfelelő szögtartományt fedjen le, valamint, hogy a metszés által keletkezett oldalsó felületek területe azonos legyen. Amennyiben ezek a kritériumok nem teljesülnek a szimulációs program hibába ütközhet megoldás során.

Importálást követően egy hengeres koordináta rendszer lett felvéve, melynek „Z” tengelye egybeeső az alkatrész forgástengelyével. Ezt követően ciklikusság lett előírva a geometriára, mely a felvett hengeres koordináta tengely felhasználásával, valamint a két határfelület megadásával történt.

A hálózás automatikus háló generálással lett elvégezve. A fellépő maximális deformáció

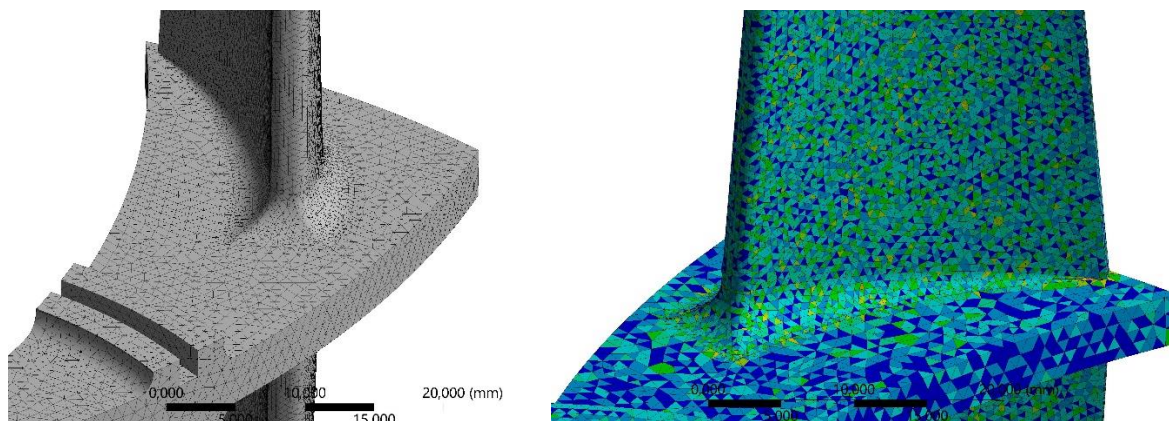
várhatóan a lapátok csúcsain, míg a maximális feszültségi értékek a lapátok töveiben lépnek fel, ezért ezeken a helyeken lokális hálósűrítés lett alkalmazva. Finomításra került a háló továbbá a lapát környezetében is, ezzel elkerülve a torzult hálóelemek létrejöttét. A hálózást követően a háló minősége ellenőrizve lett az Ansys-ban megtalálható vizsgáló eszköz segítségével. Megállapításra került, hogy a háló torzult elemeket nem tartalmaz.

A háló adatai a 6. táblázatban láthatók.

Háló adatai	
Hálózás típusa	Automatic
Csomópontok száma	239784 db
Elemek szám	139301

6. táblázat Végeselem háló paraméterei

A háló, valamint a minőség vizsgálata a 31. ábrán látható.



31. ábra Háló és annak vizsgálata

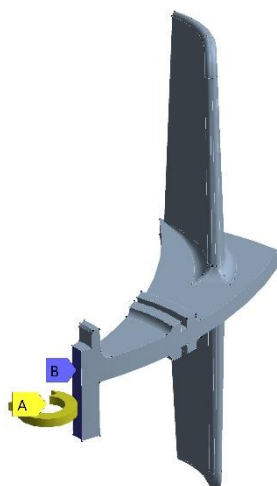
Peremfeltételként lett megadva a járókerék üzem közbeni maximális szögsebessége. Ez az érték az ismert 2000 ford/perc-es fordulatszámából közvetlenül meghatározható volt a 3. egyenlet alapján. Ahol a ω a szögsebességet míg az n a fordulatszámot jelöli. [35]

$$\omega = n * \frac{2 * \pi}{60} \quad (3)$$

$$\omega = 2000 * \frac{2 * \pi}{60} = 209,5 \frac{rad}{sec}$$

A forgás tengelyeként a felvett hengeres koordináta-rendszer „Z” tengelye lett meghatározva, iránya pedig megegyezik az alkatrészben feltüntetett forgásiránnyal. Megfogás a tengelyfurat palástján lett elhelyezve.

A felvett peremfeltételeket a 31. ábra szemlélteti

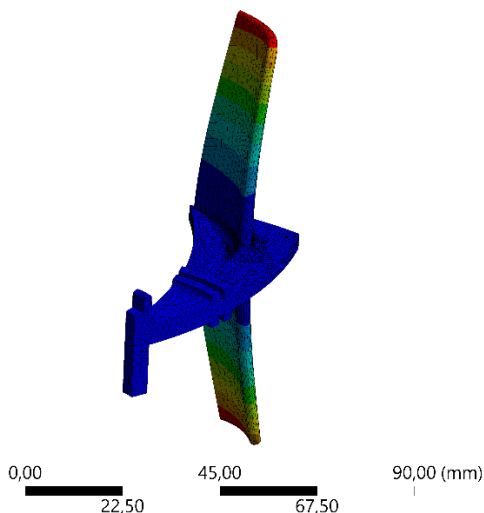
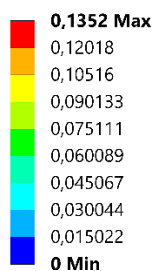


32. ábra Felvett peremfeltételek

A szimuláció lefutását követően lekérdezésre kerültek az elmozdulás, valamint a feszültségi értékek. Az eredmények kiértékelése $n=3$ -as biztonsági tényező figyelembevételével történt. Az eredményeket megvizsgálva megállapítható, hogy a kialakult deformáció a nincsen negatív hatással az alkatrész működésére, továbbá, a kialakult feszültségi értékek is elfogadhatóak. Látható, hogy a legnagyobb deformáció az elvárásoknak megfelelően a lapátok csúcsain lépett fel, míg a legnagyobb feszültség a lapátok tövében.

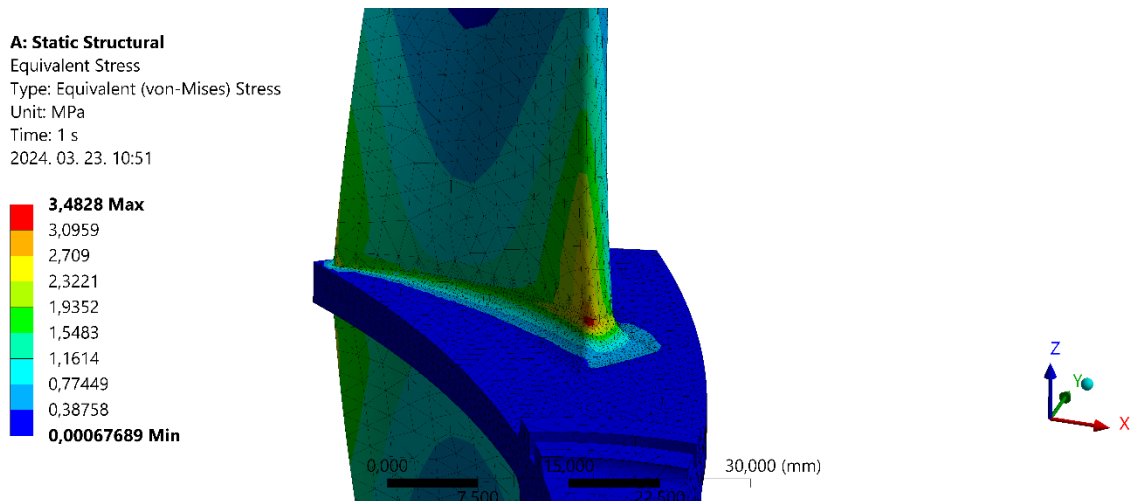
A fellépő deformáció a 33. ábrán figyelhető meg.

A: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1 s
 2024. 03. 23. 10:50



33. ábra Lekérdezett deformációs értékek

A lapát tövében kialakult feszültségmező a 34. ábra szemlélteti



34. ábra Feszültség eloszlás a lapát tövében

A szimulációs eredményeket figyelembe véve úgy döntöttem, hogy a lapát geometria módosítására nem volt szükség, további merevítések nem lettek tervezve a járókerékre.

3.6. Gyártás

A tervezési folyamatot követte a gyártás, mely magába foglalta az alkatrészek nyomtatását, a járókerekek készre szerelését, a felület kezelési lehetősége vizsgálatát, valamint a kerekek kiegyensúlyozását egyaránt.

3.6.1. Alkatrész nyomtatása

A CAD szoftverből STL formátumban exportált fájlt a Formlabs saját szoftverébe a PreFormba lett importálva. Figyelembe véve, hogy az alkatrészből egy autóba kettő darabra van szükség, ezért ennyi került kinyomtatásra. Az alkatrész kialakításából adódóan azok, könnyedén összeforgathatók. Ezzel csökkenthető a nyomtatási helyszükséglet, mely magával hozza az össze nem olvasztott por mennyiségének csökkenését, melyet minden esetben célszerű minimalizálni. Az alkatrészek a nyomtató kamra közepére lettek pozícionálva, úgy, hogy a forgástengely a Z tengellyel párhuzamos. Ezzel a két lépéssel biztosítható, volt a nyomtatás utáni egyenletes hűlés, valamint az alkatrész forgásszimmetriájának megtartása.

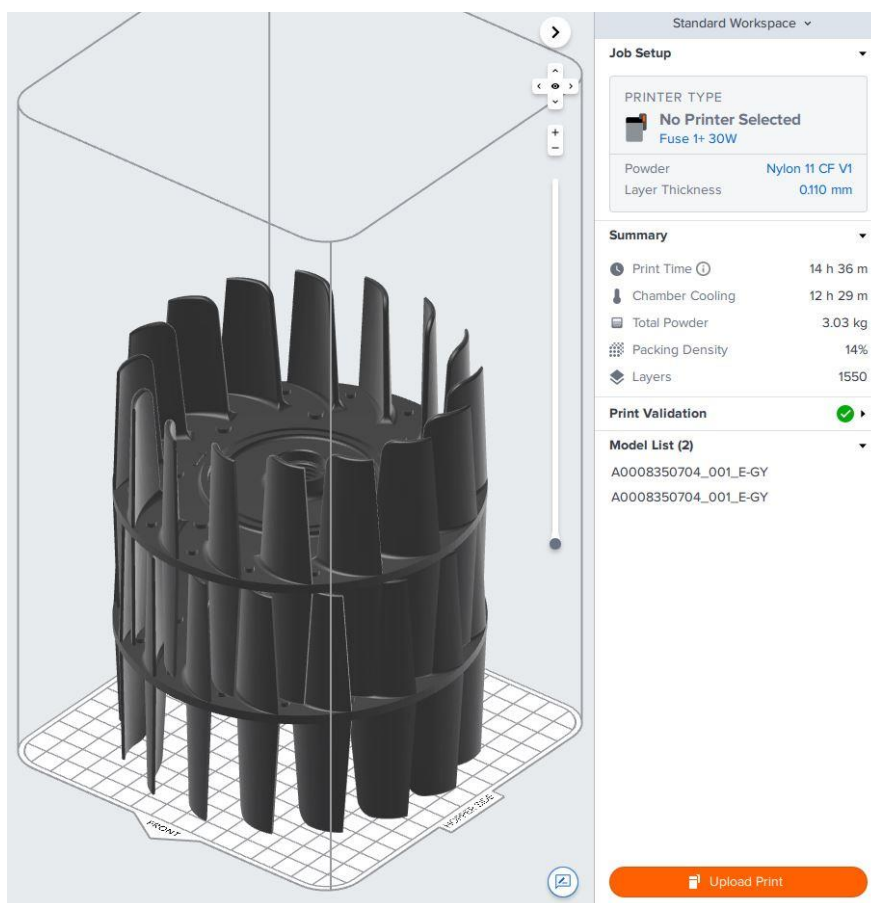
Az alkatrészek elhelyezését követően a programon belül lehetőség van a nyomtató, valamint a nyomtatott anyag kiválasztására. Ebben az esetben a gép Fuse 1+30W, míg az anyag Nylon11CF-nek lett választva. Ezek után a gyári szoftver automatikusan beállította a géphez és anyaghoz megfelelő paramétereket, azok módosítására nem volt lehetőség.

Ezt követően a szoftver meghatározta a nyomtatáshoz szükséges időt, amely 14 óra és 36 percre adódott. Ezt követte egy 12 óra 29 perces hűlési folyamat, melynek szerepe

kiemelkedően fontos, amennyiben az egyenletes hűlés nincs biztosítva a nyomat elvetemedhet. A programból megállapítható továbbá, hogy összesen 3,03 kg por került felhasználásra nyomtatás során, ennek 14%-a került összeolvasztásra, vagyis közel 0,43 kg. Látható továbbá, hogy 1550 réteg került kiterítésre a por 0,11mm-es rétegvastagságban.

A géppel végzett minden nyomtatás előtt az előírt tisztítási műveleteket kell elvégezni. Az első ilyen lépés a nyomtató kamra hőmérsékletét monitorozó IR szenzor megtisztítása. A tisztítást 99%-os etanollal és szösmentes mikroszálas kendővel lett elvégezve. Ez a lépés kiemelten fontos, hiszen az IR szenzor felelős a nyomtató tér hőmérséklet szabályozásáért. Esetleges rendellenes működése hibás nyomathoz vezethet. További fontos lépés a nyomtató tér, valamint kamra megtisztítása, valamint a portartály feltöltése kellő mennyiségű porral

A nyomtatótérben elhelyezett alkatrészek, valamint a nyomtatás adatai a 35. ábrán láthatóak.



35. ábra Alkatrészek elhelyezkedése a nyomtatótérben

A nyomtatást követően az alkatrészek a nyomtatóhoz tartozó utómegmunkáló állomáson lettek letakarítva. Ezt követően a felületen marad kis mennyiségű por üveggyöngy szórásával lett eltávolítva.

3.6.2. Felületkezelés

A nyomtatott felületet porozitás jellemzi, mely hátrányos lehet olyan alkalmazásoknál, ahol a felület nedvesség lepergető hatása kifejezetten fontos. Továbbá bizonyos dőlésszögben álló felületek esetén a rétegvonalak tisztán kivehetőek, ezek esztétikai oldalról jelenthetnek problémát. Egy esetleges felületkezelés számos további előnnyel járhat, úgy, mint a környezeti hatásokkal szembeni ellenállóképesség növelése. Éppen ezért két lehetséges eljárás is kipróbálásra került.

Ezekre a problémákra nyújthat megoldás az úgynevezett „vapor smoothing” eljárás, mely során kontrollált körülmények között oldószert permeteznek a nyomtatott alkatrész felületére. Ez kismértékben megoldja a felszínt ezzel kiegyenlítve a felületen található egyenletlenségeket. Az eljárás előnye a felületi érdesség csökkentésén túl, hogy az így kialakult felület hidrofób, továbbá az alkatrész mechanikai tulajdonságai is javulnak. [36]

Ezzel az eljárással kezelt járókerekek felületi minőségében érezhető volt a javulás. A lapátok tövében a rétegvonalak eltűntek, javult továbbá az alkatrész minőségérzete is. Az alkatrészek méretpontosságára nem volt negatív hatással a kezelés.

Az előnyök mellett hátrányok is jelentkeztek. Az első az eljárás magas költsége, mely megközelítette az alkatrész teljes gyártási költségét. Ezen túl a felületkezelést követően a lapátok tövében a felület felhólyagosodott és hártýásan levált egy vékony rétegben. Ez a jelenség több helyen is megfigyelhető volt elsősorban az éles sarkok és élek mentén.

A felhólyagosodott és hártýásan levált felület figyelhető meg a 36. ábrán.



36. ábra Felületkezelés utáni felhólyagosodott felület

Az eljárás magas ára, valamint a konzisztens eredmény megkérdőjelezhetősége miatt, a

végleges alkatrészekeken nem lett alkalmazva ilyesfajta felületkezelés. Azonban mindenképpen kiemelendő, hogy a beállítások finom hangolásával feltételezhetően kiküszöbölhető lett volna a hiba. Fontos továbbá, hogy a felületkezelést a járókerék összeszerelését megelőzően kell elvégezni.

Ezzel szemben olcsóbb alternatívát kínál a Cerakote elnevezésű kerámia alapú festék, mely vékony rétegbe felhordva a felületre kemény és ellenálló réteget képez. A képződött felület kopás, karc, hő és UV álló, továbbá hidrofób tulajdonságokkal is rendelkezik. [37]

A felületet festés előtt megfelelően elő kell készíteni. Ahhoz, hogy a felvitt festék és a felület közötti adhézió megfelelő legyen a felületet érdesíteni kell. Ez történhet abrazív tulajdonságú szemcsével történő szemcseszórással, vagy csiszolópapírral. Ebben az esetben a járókerék felületének érdesítése szemcseszórással lett elvégezve. A megfelelő érdesség elérése után az alkatrészeket úgy kell elhelyezni, hogy szórás során az alkatrészfelületére közel egységesen rétegvastagságban lehessen feljuttatni az anyagot. Ezt követően az előkészített felületre felhordható a megfelelő arányban kikevert festék. A felvitt réteg a végleges tulajdonságait magas hőmérséklet hatására éri el. A járókerék festést követően kemencébe lett elhelyezve, ahol a felvitt réteg 80°C - on keményedett ki. A felületkezelést ebben az esetben a járókerék összeszerelése és kiegyensúlyozását követően kell elvégezni a tengely megfelelő kimaszkolását követően. Ez azért fontos, mert a kiegyensúlyozás során anyag kerül eltávolításra a járókerékről, és ez megsértené a bevonatot is.

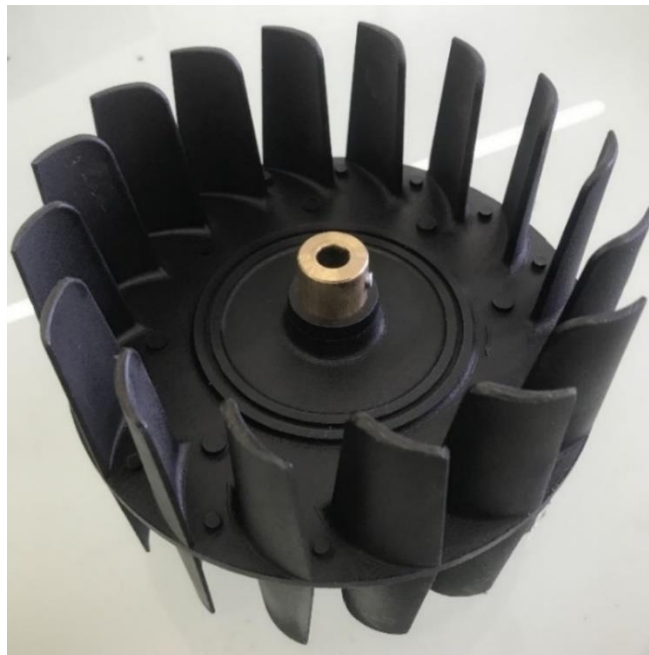
3.7. Összeszerelés

Az összeszerelést megelőzően a járókerék központi furata méretre lett esztergálva, ezzel ellensúlyozva a gyártásból adódó pontatlanságakat. Ez követően a tengely beragasztásra került a furatba. Ehhez a Loctite univerzális felhasználásra szánt HY4090-es kétkomponensű epoxi alapú ragasztója került kiválasztásra. A gyártói honlapon található ajánlás alapján a ragasztó alkalmas eltérő anyagok egymáshoz rögzítésére is, ezek lehetnek fémek, műanyagok, fa, vagy akár különféle kompozit anyagok. A ragasztó megkötés után, jó rezgés és ütésállósággal rendelkezik, valamint magas hőmérsékletet is elvisel a mechanikai tulajdonságok drasztikus romlása nélkül. A gyártó által ajánlott maximális üzemi hőmérséklet értéke 150°C. Amennyiben megvizsgáljuk a járókerék üzeme közben fellépő hőmérsékletét látható, hogy a ragasztó megfelelőnek tekinthető az adott alkalmazásra. További előnye, hogy jó réskitöltési tulajdonságokkal rendelkezik, ennek értéke eléri az 5 mm-t. [38]

Ragasztás előtt a furat, valamint a tengely palástja csiszolópapírral fel lett érdesítve, ezzel elősegítve a megfelelő szilárdságú kötés kialakulását. A felületek zsírtalanítása a szintén Loctite

gyártmányú SF 7063 általános célra szánt alkatrésztisztítóval lett elvégezve. Ezt követően a ragasztóanyag felhordásra került a tengelyre. Az anyag keverési aránya 1:1. A megfelelő minőségű összekeverés a felhelyezhető keverőszár segítségével történt meg. A tengely behelyezése után, kellő mennyiségű száradási idő lett biztosítva a ragasztó kikeményedésére. Ennek értéke gyártói ajánlás alapján szobahőmérsékleten körülbelül 24 óra. A tengellyel együtt ragasztásra került a tengely vállát elfedő takaró kupak is. [38] [39]

Ragasztást követően a tengely furataiban elhelyezésre kerültek a rögzítésre szolgáló hernyócsavarok. A járókerék az 1. számú mellékletben látható összeállítási rajz alapján lett összeszerelve. Az összeszerelt járókerék a 37. ábrán figyelhető meg.

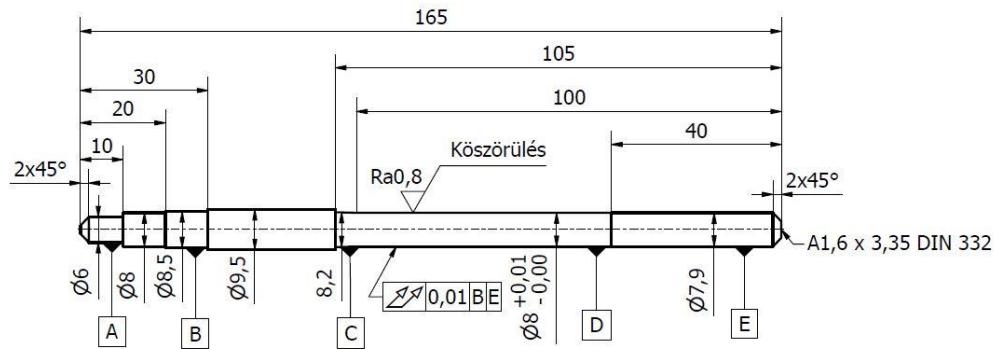


37. ábra Az összeszerelt járókerék

3.8. Kiegyensúlyozás

A járókerék üzem közbeni maximális fordulatszáma 2000 ford./perc. Összeszerelést követően nyilvánvalóvá vált, hogy a járókerék ezen a fordulaton történő járatása jelentős rezgéseket idéz elő a motor tengelyén. Ez egyértelműen visszavezethető a gyártás technológiából adódó pontatlanságokra. Ezekből a gyártási pontatlanságokból adódó rezgések megfelelő mértékűre csökkenthetők a járókerék kiegyensúlyozásával.

Ahhoz, hogy a járókerék a kiegyensúlyozó gépre felhelyezhető legyen, szükséges volt egy úgynevezett vendégtengelyt készíteni. Ennek a tengelynek a feladata a járókerék felfekvését biztosítani a gépen. A tengely rajza látható a 38. ábrán. A tengely teljes gyártásirajzát a 2. számú melléklet tartalmazza.



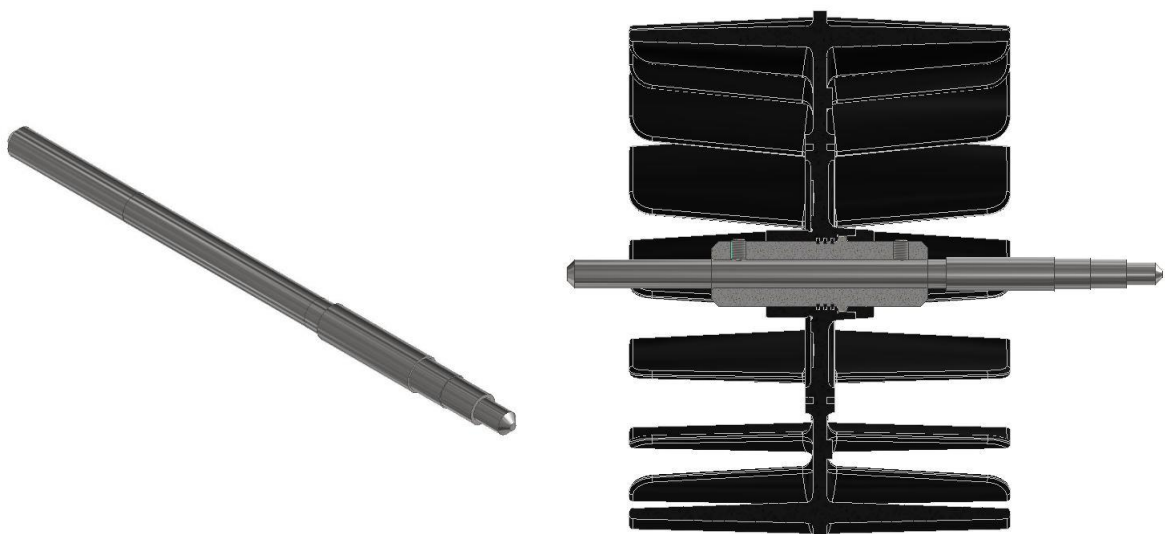
38. ábra Vendégtengely rajza

A rúdanyag gyártás során a felületen került megfogásra, a túl végén pedig forgócsúccsal lett megtámasztva. Ezzel biztosítva, hogy a tengely egy befogásból megmunkálható legyen.

A tengely a kiegyensúlyozó gépen B illetve E felületen fekszik fel, fontos ezeken a felületeken a minél kisebb felületi érdesség elérése. Ennek oka a csap, valamint a felfekvést biztosító prizma vagy görgő közötti súrlódás minimalizálása, illetve az egyenetlen felületi minőségből adódó rezgések elkerülése.

Fontos továbbá, hogy a járókerék D felfekvési felület ütése minimális legyen az A illetve E bázisok által meghatározott vonatkoztatási tengelyre nézve. Ennek értelmében a D felületre egy 0,01 mm-es tűréskeret lett előírva, az A és E bázisra vonatkoztatva. Ezzel a lépéssel minimalizálhatók az egytengelyűségi hibákból adódó pontatlanságok. A járókerék egyoldali axiális irányú megtámasztására szolgál a C kúpos felület.

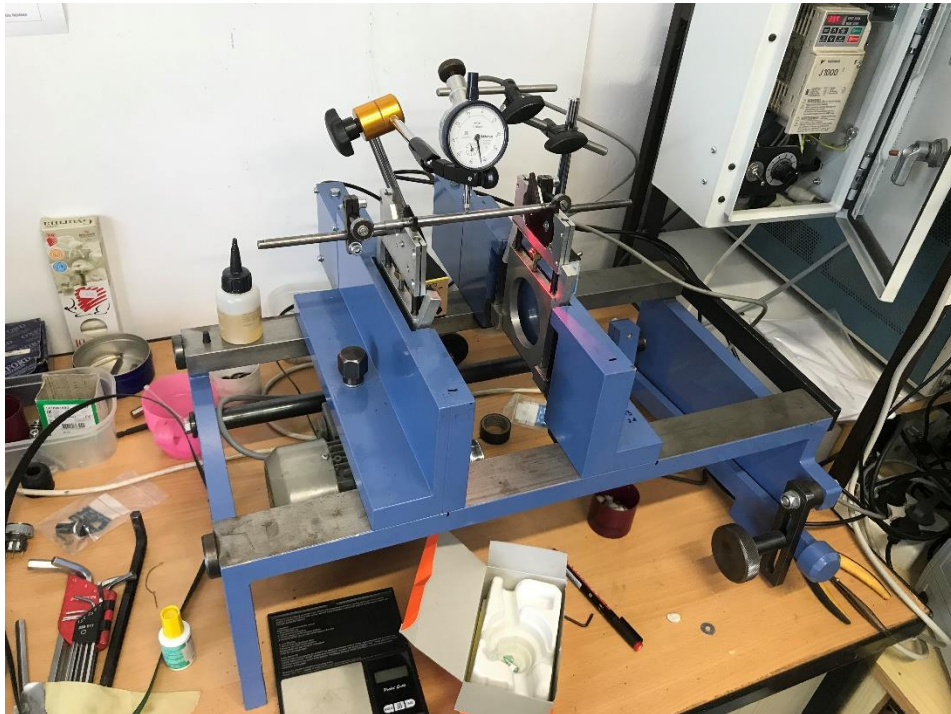
A vendégtengely, valamint a járókerék pozíciója a tengelyen a 39. ábrán látható.



39. ábra A vendégtengely és annak elhelyezkedése a járókerék furatában

A kiegyensúlyozás egy lágyrendszerű kiegyensúlyozó gépen történt. A gépágyon helyezkedik 2 db mérőbak, melyek távolsága bizonyos határok között állítható. Ezeken található a tengely felfekvését biztosító alátámasztások, melyek szabadon mozoghatnak a folyamat közben. Az alátámasztás történhet görgőkkel vagy pontosabb alátámasztást biztosító prizmákkal. Az alátámasztásnál ébredő rezgéseket szenzorok figyelik és továbbítják a kiértékelő szoftver felé. Mérés során célszerű a tengely axiális irányban megtámasztani, ezzel megelőzve a mérés közben esetlegesen fellépő tengelyirányú elmozdulásokat. A munkadarab meghajtását, egy a gépágy aljában található villanymotor biztosítja, melynek fordulatszáma egy frekvenciaváltó segítségével szabályozható.

A kiegyensúlyozásra használt gép a 40. ábrán látható.

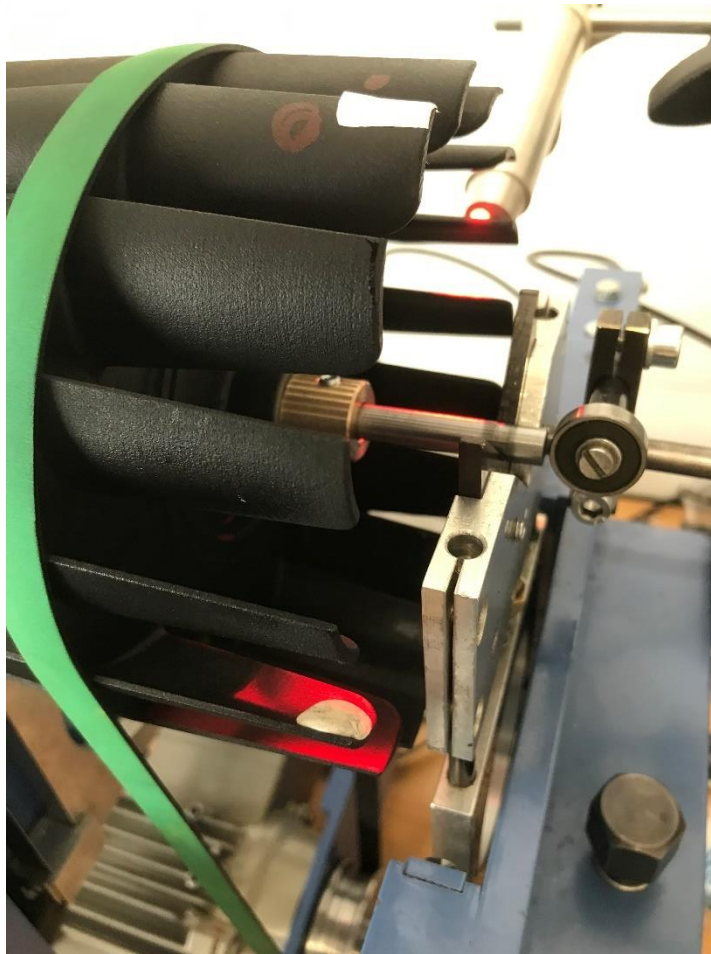


40. ábra Kiegyensúlyozásra használt gép

A 40. ábrán megfigyelhető tovább a kiegyensúlyozási folyamat első lépése, mely a vendégtengely D felület ütésének ellenőrzése volt. Az indikátor órával történt ellenőrzés során a tengely ütése a tűréshatáron belül mozgott, így az kiegyensúlyozásra alkalmasnak találtatott.

A járókerék felhelyezésre került a tengelyre, melynek rögzítését az előzetesen elhelyezett 2 darab hernyócsavar biztosította. A prizmás alátámasztásba helyezett két végén megtámasztásra került axiális irányú elmozdulás ellen. Továbbá a tengely és a prizma érintkezési felületén kenőanyag lett alkalmazva a súrlódás minimalizálása érdekében. A felhelyezett járókerék egy szíj segítségével lett meghajtva.

A gépen elhelyezett járókerék a 41. ábrán látható.



41. ábra A kiegyensúlyozó gépre felhelyezett járókerék

A 41. ábrát megvizsgálva látható továbbá a lapát külső felén elhelyezett fényes jelölőszalag, valamint ennek az érzékelésére szolgáló optikai szenzor. A mérés során a felhelyezett szalag pozíciója határozza meg a mérési referencia pontot.

A járókerék dinamikusan két síkban lett kiegyensúlyozva. A kiegyensúlyozás próbasúlyos módszerrel történt. A folyamat Gyarmati Károly segítségével lett elvégezve az általa fejlesztett G-Balance elnevezésű célszoftver felhasználásával. A kiegyensúlyozás első lépése a referencia pont definiálása, valamint az osztások számának megadása volt. Az osztások száma ebben az esetben megegyezett az egy oldalon található lapátok számával. Fontos kiemelni, hogy a kiegyensúlyozási fordulatszám a rendszer rezonanciafrekvenciája felett lett meghatározva.

Ezt követően mérés lett végezve próbasúlyok nélkül. Az itt kapott eredmények nyújtottak viszonyítási alapot a további mérések során. Megállapítható volt továbbá, hogy a járókerék kiegyensúlyozatlansága dinamikus jellegű.

Ezek után próbasúlyok lettek felhelyezve az A majd a B oldalra. A próbasúly tömege a szoftverben megadásra került, ennek értéke mindkettő esetben 0,5 gramm volt. Mindkét oldalon külön mérés lett végezve a felhelyezett súlyokkal. Ezek a súlyok jelölték ki a kiegyensúlyozási síkot, valamint a sugarat.

A program a próbasúly nélküli mérés eredményéből, valamint a súlyok keltette eltérésekből meghatározta a kiegyensúlyozatlanság mértékét, valamint azt, hogy a plusz tömeg a referenciához képest milyen szögben helyezkedik el. Ezt követően a szoftver a kétoldali kiegyensúlyozatlanságot grammban jelenítette meg. Ennek a mértéke A oldalon 0,327 gramm, míg B oldalon 0,207 gramm volt.

A szoftver az ISO1940-es szabvány szerint meghatározta a limitet, ehhez szükség volt a járókerék tömegére a maximális fordulatszámára, valamint a választott kiegyensúlyozatlansági osztályra. Figyelembe véve a szabványban található ajánlást G6.3-as osztály lett választva, mely tartalmazza a ventilátor kerekre előírt kiegyensúlyozatlansági értékeket. Ezek az értékek oldalanként, 0,0602 gramm-ra adottak.

A limit meghatározás látható a 42. ábrán.

42. ábra Limit meghatározása

A program lehetőséget nyújt arra, hogy a kiegyensúlyozást tetszőlegesen tömeg elvételével, vagy hozzáadásával végezzük el. Tekintettel az oldalanként fellépő kis tömegértékekre ebben az esetben anyagelvétel lett választva. A megfelelő mennyiségű

tömeg a lapátok végéből lett eltávolítva. Annak érdekében, hogy a lapátok magassága viszonylag egyenletes maradjon az elvett tömeg több lapát között lett elosztatva.

A 43. ábrán megfigyelhető a kiegyensúlyozás eredménye. Látható, hogy a két oldali tömeg a határérték alá lett szorítva. Megfigyelhető továbbá, hogy a referencia ponthoz képest milyen pozícióban helyezkedik el az elvett tömeg.



43. ábra Kiegyensúlyozás eredménye

A fenti eredmények tükrében kijelenthető, hogy a gyártástechnológiából adódó gyártási pontatlanságok megfelelően elvégzett kiegyensúlyozással ellensúlyozhatók.

3.9. Költségkalkuláció

A gyártást egy teljeskörű költségkalkuláció követte, melynek célja az alkatrészek gyártása során felmerülő költségek összesítése és ezekből a szükséges következtetések levonása volt. A kalkuláció magába foglalja a járókerék nyomtatási költségeit, a tengely gyártási költségeit, valamint a felületkezelési és kiegyensúlyozási költségeket egyaránt.

3.9.1. Nyomtatási költségek meghatározása

A nyomtatási költségek meghatározásához a 4. képlet lett alkalmazva. Ahol a K_t a darabra vonatkoztatott összes költséget jelöli, míg a K_{el} az előkészület költségét, a K_{ny} a nyomtatási költségeket, míg a K_{ut} a szükséges utómunka költségét. [40]

$$K_t = \frac{1}{N} * (K_{el} + K_{ny} + K_{ut}) \quad (4)$$

Az alkatrészből két darab lett legyártva, tekintettel arra, hogy egy járműbe ennyi szükséges.

A nyomtatási előkészület magába foglalja a modell előkészítését a szeletelőprogramban, valamint a nyomtató előkészítését a nyomtatásra. Ennek a folyamatnak az időszükséglete csekély volt, hiszen csak kettő darab modell lett elhelyezve a nyomtató térben, továbbá a nyomtató előkészítése gyorsan elvégezhető. Az előkészületek költsége a 5. számú képlet alapján lett meghatározva. Ahol R a rezsiorádját T a folyamathoz szükséges időt, a K_j pedig a folyamat során esetlegesen felmerülő többletköltségeket jelöli. Az R értéke 15 000 Forint/óra értékűre lett választva, míg a folyamatra 0,5 óra lett szánva. Az esetlegesen felmerülő k_j többletköltségek nem lettek figyelembe véve a számítás során.

Az 5. képlet alapján az előkészületek költsége: [40]

$$K_{el} = R * T + k_j \quad (5)$$

$$K_{el} = 15000 \frac{Ft}{óra} * 0,5 \text{ óra} = 7500 \text{ Ft}$$

A nyomtatási folyamat kiszámítása a 6.képlet felhasználásával történt. Ahol a k_a az anyag költséget, k_g a gépköltséget, a k_m a munkadíjat, a k_e a felhasznált energia árát, a k_{fm} a folyamat figyelés munkaköltségét, míg a k_j a felmerülő többletköltségeket jelöli. [40]

$$K_{el} = 15000 \frac{Ft}{óra} * 0,5 \text{ óra} = 7500 \text{ Ft} \quad (6)$$

Optimális esetben a nyomtatás során a folyamat nem igényel emberi felügyeletet. Ezért a k_{fm} , valamint a k_m költségek nem lettek figyelembe véve. A számításban nem szerepel továbbá a k_j többlet költség, mivel ilyen jellegű költség nem keletkezett a nyomtatás során.

A könnyebb átláthatóság érdekében a K_{ny} költségek 7. táblázatban lettek feltüntetve.

Nyomtatási költségkalkuláció				
Képlet	Érték	Jelölések		
$k_a = m * k_p$	27 161 Ft	megnevezés	rövidítés	mennyiség
$k_g = t * k_{am}$	21 750 Ft	felhasznált alapanyag	m	0,43kg
$k_e = t * P * k_{áram}$	31 32 Ft	alapanyag költség	k_p	63 166 Ft/kg
$K_{ny} = k_a + k_g + k_e$	52 043 Ft	nyomtatási idő	t	14,5 óra
		Gép névleges teljesítménye	P	1,5kW
		Áram ár	$k_{áram}$	144 Ft/kWh
		Gép amortizáció	k_{am}	1500 Ft/óra

7. táblázat Nyomtatási költségkalkuláció

Az utómunka költségek az előkészületi költségek meghatározásához használt képlettel lettek kiszámítva. Az utómunka során nem merültek fel többlet költségek, így képletben az erre vonatkozó tag figyelmen kívül lett hagyva. Az utómunka magába foglalta az alkatrészek kivételét a gépből, valamint a takarításukat először az utómegmunkáló állomáson, melyet egy szemcseszórás követett. Ennek a folyamatnak az időszükséglete szintén 0,5 óra volt. [40]

$$K_{ut} = R * T + k_j \quad (7)$$

$$K_{ut} = 15000 \frac{Ft}{óra} * 0,5 = 7500 Forint$$

A három tag összegzésével majd a darabszámmal történő osztást követően megkapható az egy darabra vonatkoztatott teljesnyomtatási költség.

$$K_t = \frac{1}{2} * (7500 Ft + 52\,043 Ft + 7500 Ft) = 33\,522 Ft$$

Ennek értelmében egy járókerék teljes nyomtatási költsége 33 522 Forintra adódott.

3.9.2. Teljes gyártási költség meghatározása

A teljes gyártási költség meghatározásánál figyelembe lett véve a nyomtatáson túl a tengely gyártási költsége, a ragasztási költség, mely magába foglalja az összeszerelésre szánt munka költséget is. Tartalmazza továbbá a kiegyensúlyozást és a hozzá szükséges vendégtengely gyártását, valamint a felületkezelés költségét. Ezek összesítésével adódott ki a teljes gyártási költség, amely a 8. táblázatban látható.

Teljes gyártási költség	
Nyomtatás	33 522 Ft
Tengely + hernyócsavar	~15 000 Ft
Ragasztás	7500 Ft
Kiegyensúlyozás	~13 000 Ft
Felületkezelés	30 000 Ft
Összesen:	~99 022 Ft

8. táblázat Tételesen lebontott teljes gyártási költség

Látható, hogy egy darab járókerék legyártása hozzávetőlegesen 99 000 Ft-ba került. Ez az összeg azonban nem tartalmazza a tervezésre szánt mérnöki órák számát, mely tovább emeli a költségeket. Az eljárás azonban mindenképpen mérlegelendő egy olyan jármű esetén, ahol a restaurálási költségek nagyságrendekkel nagyobbak, mint a fenti összeg, valamint a szükséges alkatrész egyáltalán nem beszerezhető. Éppen ezért a gyártást megelőzően mindenképpen célszerű alapos piackutatást végezni, mellyel felmérhető a hiányzó alkatrész elérhetősége. A tervezést megelőzően, pedig előzetes költségkalkulációt célszerű készíteni.

4. Összefoglalás

A dolgozat célja egy olyan veterán autó alkatrész legyártása volt 3D nyomtatás segítségével, melynek beszerzése komoly problémákat okoz a típus restaurálásával foglalkozó szakembereknek. Cél volt továbbá egy olyan folyamat bemutatása, mely a későbbiekben átemelhető más ilyen jellegű alkatrészek gyártása esetén.

A dolgozat keretein belül legyártásra került egy veterán autó utastéri levegő befűvéseért felelős ventilátor járókerék. Első lépés a gyártástechnológia s ezzel együtt az alkalmazásra megfelelő anyag kiválasztása volt. Ezt követte az alkatrész szkennelése. A dolgozat kitért továbbá az alkatrész célszoftverrel történő visszamodellezésére, mely bemutatta a hálómódellet alapul vevő CAD modell létrehozását, valamint a további alkatrészek megtervezését. A létrehozott CAD modellt felhasználva a geometrián szilárdságtani vizsgálat lett végezve. Ezt követően az alkatrész legyártásra került. Gyártást követően a járókerék két síkban dinamikusan ki lett egyensúlyozva, ezzel biztosítva annak üzembiztonságát. A kiegyensúlyozást pedig egy felületkezelés követte, melynek köszönhetően a felületen egy vékony hidrofób réteg keletkezett. Utolsó lépésben pedig egy gyártási költségkalkuláció lett végezve.

A dolgozatban bemutatott folyamatból látható, hogy az alkatrészek megtervezése minden esetben komoly körültekintést igényelnek. Ahhoz, hogy az alkatrész üzembiztosan üzemeljen tervezést megelőzően meg kell vizsgálni az alkatrész funkcióját, beépítési körülményeit, valamint az üzem közben fellépő terheléseket egyaránt. Amennyiben a technológia alkalmas az alkatrész legyártására, a felsorolt szempontok figyelembevétele mellett kell elvégezni a tervezést. Látható továbbá, hogy bonyolultabb alkatrészek esetén a gyártási költségeket nagyban megnöveli a tervezésre szánt mérnöki munka díja. Azoknak a restaurálással foglalkozó vállalkozásoknak, akik ezzel a módszerrel kívánnak alkatrészeket gyártani, a gyorsabb megtérülés érdekében célszerű lehet ezeket az alkatrészeket értékesíteni.

Cél a továbbiakban a járókerék legyártását követően az üzemi körülmények között történő tesztek elvégzése, melyből pontosabb kép kapható, a kiválasztott anyag alkalmasságáról. Amennyiben az anyag, valamint a geometria megfelelő, cél egy tartós teszt elvégzése az alkatrész gyári beépítési környezetében. Ezen tesztek elvégzése mindenképpen szükséges, ahhoz, hogy megbizonyosodhassunk az alkatrész üzembiztonságáról.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a "SZE - Hallgatói versenycsapatok, technikai sport aktivitások támogatása" program keretében, a "Széchenyi István Egyetemért Alapítvány KFI Programtámogatási Rendszere" támogatásával valósult meg.

5. Irodalomjegyzék

- [1] „Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing”, Formlabs. Elérés: 2024. január 31. [Online]. Elérhető: <https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [2] „SLS 3D Printing – The Ultimate Guide | All3DP Pro”. Elérés: 2024. január 31. [Online]. Elérhető: <https://all3dp.com/1/sls-3d-printing-the-ultimate-guide/>
- [3] „Boeing: Additive Manufacturing Adding Enough?”, Technology and Operations Management. Elérés: 2024. január 31. [Online]. Elérhető: <https://d3.harvard.edu/platform-rectom/submission/boeing-additive-manufacturing-adding-enough/>
- [4] „Projected size of the global classic car market between 2020 and 2024”. Statista [Online]. Elérés: 2024. január 31. Elérhető: <https://www.statista.com/statistics/1139775/global-classic-car-market-size/>
- [5] Molnár Domonkos, „Veterán autó polimer alkatrészének újraalkotása Reverse Engineering eljárással”, Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2023.
- [6] E. Dalpadulo, A. Petruccioli, F. Gherardini, és F. Leali, „A Review of Automotive Spare-Part Reconstruction Based on Additive Manufacturing”, *J. Manuf. Mater. Process.*, köt. 6, sz. 6, o. 133, okt. 2022, doi: 10.3390/jmmp6060133.
- [7] „Porsche Classic Parts Explorer - Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG”. Porsche AG, Elérés: 2024. január 31. [Online]. Elérhető: <http://content.us.porsche.com/prod/pag/classic/ClassicExplorer.nsf/ClassicPartsExplorer?ReadForm&country=usa>
- [8] „The Porsche story 7”, Porsche Newsroom. Elérés: 2024. január 31. [Online]. Elérhető: <https://newsroom.porsche.com/en/history/porsche-history-959-iaa-cut-away-model-12386.html>
- [9] „Mercedes-Benz Media”, Mercedes-Benz Media. Elérés: 2024. január 31. [Online]. Elérhető: <https://media.mercedes-benz.com/>
- [10] E. Mostafa Abdel-Bary, „3D Laser Scanners’ Techniques Overview”, *Int. J. Sci. Res.*, köt. 10, sz. 4, o. 332–331, okt. 2015.
- [11] T. Bell, B. Li, és S. Zhang, „Structured Light Techniques and Applications”, in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1. kiad., J. G. Webster, Szerk., Wiley, 2016, o. 1–24. doi: 10.1002/047134608X.W8298.

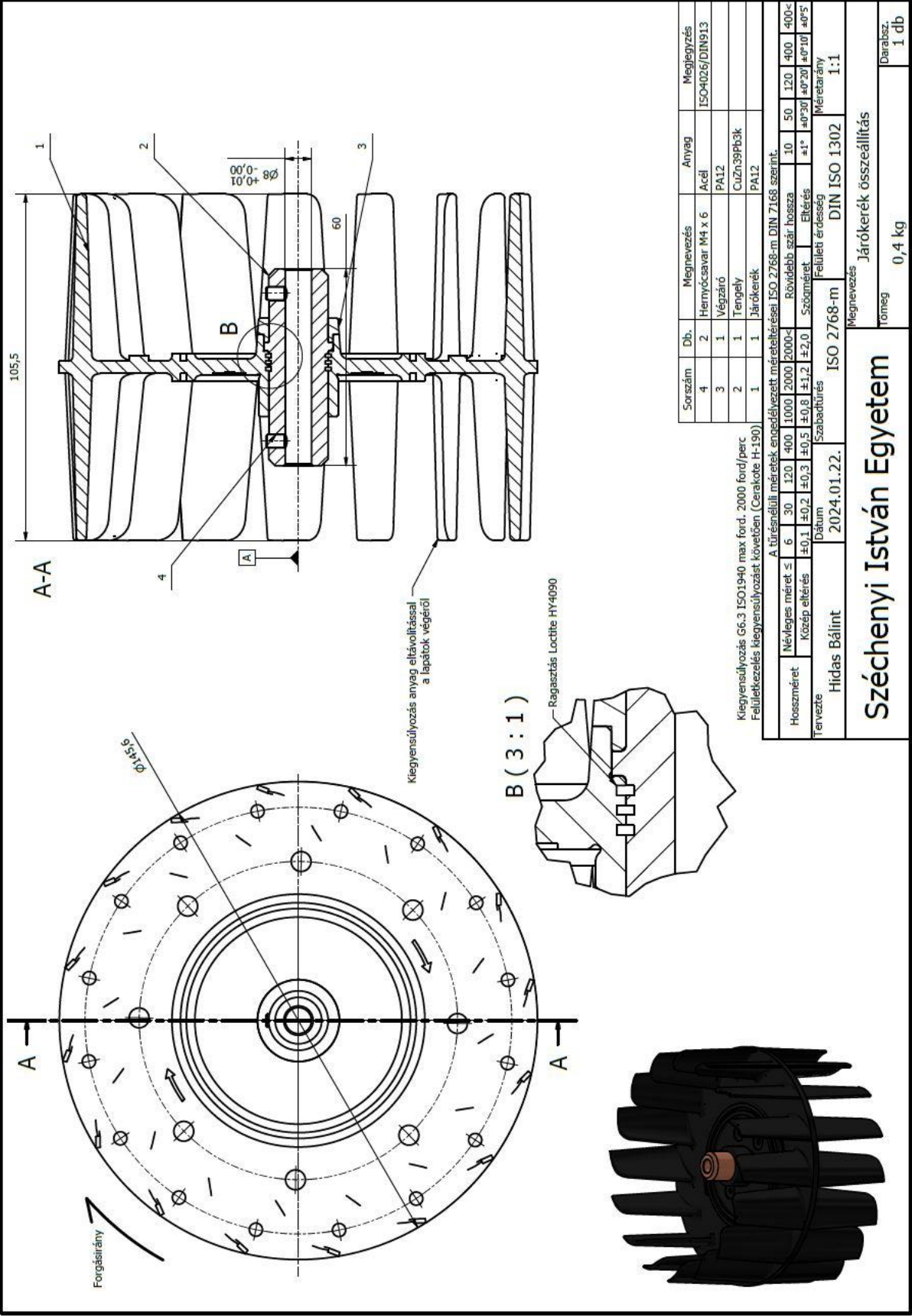
- [12] J. Geng, „Structured-light 3D surface imaging: a tutorial”, *Adv. Opt. Photonics*, köt. 3, sz. 2, o. 128, jún. 2011, doi: 10.1364/AOP.3.000128.
- [13] 3D Systems, Inc., „User Guide”, 2013.
- [14] Formlabs, „3D Scanning and 3D Printing for Reverse Engineering and Other Applications”. 2022.
- [15] „What is 3D scanning? Discover more about this technology”. Elérés: 2024. február 02. [Online]. Elérhető: <https://www.artec3d.com/learning-center/3d-scanning-technology>
- [16] „EinScan-SP - Higher Accuracy Desktop 3D Scanner”, EinScan. Elérés: 2024. február 03. [Online]. Elérhető: <https://www.einscan.com/einscan-sp/>
- [17] SHINING 3D Tech. Co., Ltd., „EinScan SE & SP User Manual V3.1.3”.
- [18] D. Page, A. Koschan, és M. Abidi, „Methodologies and Techniques for Reverse Engineering–The Potential for Automation with 3-D Laser Scanners”, in *Reverse Engineering*, V. Raja és K. J. Fernandes, Szerk., in Springer Series in Advanced Manufacturing. , London: Springer London, 2008, o. 11–32. doi: 10.1007/978-1-84628-856-2_2.
- [19] J. Wang, D. Gu, Z. Yu, C. Tan, és L. Zhou, „A framework for 3D model reconstruction in reverse engineering”, *Comput. Ind. Eng.*, köt. 63, sz. 4, o. 1189–1200, dec. 2012, doi: 10.1016/j.cie.2012.07.009.
- [20] „3D Systems announces two new versions of its Geomagic reverse engineering software”, 3D Printing Industry. Elérés: 2024. február 05. [Online]. Elérhető: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-systems-announces-two-new-versions-of-its-geomagic-reverse-engineering-software-171836/>
- [21] M. Pérez, D. Carou, E. M. Rubio, és R. Teti, „Current advances in additive manufacturing”, *Procedia CIRP*, köt. 88, o. 439–444, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.076.
- [22] A. Awad, F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, és A. W. Basit, „3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering”, *Int. J. Pharm.*, köt. 586, o. 119594, aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijpharm.2020.119594.
- [23] A. Kafle, E. Luis, R. Silwal, H. M. Pan, P. L. Shrestha, és A. K. Bastola, „3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA)”, *Polymers*, köt. 13, sz. 18, o. 3101, szept. 2021, doi: 10.3390/polym13183101.
- [24] „Materials”, Sinterit – Manufacturer of compact and industrial SLS 3D printers. Elérés: 2024. február 15. [Online]. Elérhető: <https://sinterit.com>

- [25] „Multipurpose PA 12 for industrial 3D Printing | EOS”, EOS GmbH. Elérés: 2024. február 15. [Online]. Elérhető: <https://www.eos.info/en-us/polymer-solutions/polymer-materials/multipurpose>
- [26] „SLS Powders: 3D Printing Materials for the Fuse Series”, Formlabs. Elérés: 2024. február 15. [Online]. Elérhető: <https://formlabs.com/materials/sls-powders/>
- [27] „Pack density in SLS 3D printing”, Sinterit – Manufacturer of compact and industrial SLS 3D printers. Elérés: 2024. február 17. [Online]. Elérhető: <https://sinterit.com>
- [28] S. Negi, R. K. Sharma, és S. Dhiman, „Experimental Investigation of SLS Process for Flexural Strength Improvement of PA-3200GF Parts”, *Mater. Manuf. Process.*, köt. 30, sz. 5, o. 644–653, máj. 2015, doi: 10.1080/10426914.2014.994750.
- [29] Formlabs, „Manual Fuse 1+30W”. 2023. február.
- [30] Formlabs, „SLS 3D Printing vs. Injection Molding: When to Replace Molded Parts With 3D Printing?” 2022. március.
- [31] „Vehicle Details”, Lux Classics. Elérés: 2024. február 31. [Online]. Elérhető: <https://www.luxclassics.com/vehicle-details/used-mercedes-benz-280sl-roadster-w113-for-sale-u144/>
- [32] PAGODA SL GROUP, Elérés: 2024. február 31. [Online]. Elérhető: <https://www.sl113.org/forums/index.php?action=search2>
- [33] „INTAMSYS I Discover our Filaments”, INTAMSYS. Elérés: 2024. február 31. [Online]. Elérhető: <https://www.intamsys.com/materials/>
- [34] „AESUB blue: Vanishing state of the art scanning spray”, Aesub. Elérés: 2024. március 01. [Online]. Elérhető: <https://aesub.com/en/prod/aesub-blue-2/>
- [35] Magyar Elektronikus Referenciamű Szolgáltatás, Akadémia Kiadó Zrt., Elérés: 2024.március. 10. [Online]. Elérhető. <https://mersz.hu/holics-fizika>
- [36] Formlabs, „Enhancing the Surface Quality of SLS 3D Printed Parts With Vapor Smoothing: A Collaborative Study by Formlabs and AMT”.
- [37] „TESTING ON FORMLABS”. Cerakote
- [38] „LOCTITE® HY 4090”. Loctite, Elérés: 2024. március 20. [Online]. Elérhető: https://www.henkel-adhesives.com/hu/hu/term%C3%A9k/structural-adhesives/loctite_hy_40900.html
- [39] „LOCTITE® SF 7063”. Loctite, Elérés: 2024. március 20. [Online]. Elérhető: https://www.henkel-adhesives.com/hu/hu/term%C3%A9k/industrial-degreasers/loctite_sf_70630.html

- [40] L. Zohrer, „A COMPREHENSIVE COST ESTIMATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING”, szakdolgozat, Qazvin Azad University, Qazvin, 2014.

6. Mellékletek

1. sz. melléklet: Járókerék összeállítási rajza



2. sz. melléklet: Vendégtengely gyártási rajza

