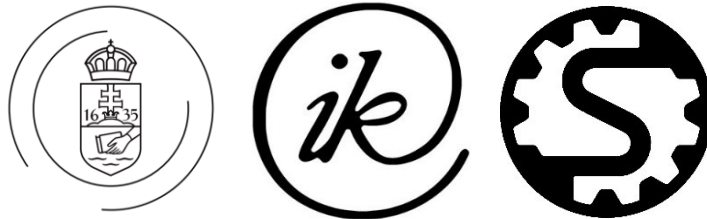


BODNÁR BENCE
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
INFORMATIKAI KAR
SAVARIA MŰSZAKI INTÉZET



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZATOK



Eötvös Loránd Tudományegyetem
Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

5-tengelyes 3D-nyomtató tovább fejlesztése

Szerző: **Bodnár Bence**
Duális gépészmérnöki szak, BSc IV. évf.

Témavezető(k): **Dr. habil. Andó Mátyás, PhD**, egyetemi docens
Birosz Márton Tamás, egyetemi tanársegéd

NYILATKOZAT

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Bodnár Bence* (N2YLK0), az Eötvös Loránd Tudományegyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és saját kezű aláírással igazolom, hogy ezt a tudományos diákköri dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a tudományos diákköri dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Ennek a tudományos diákköri dolgozatnak önálló, eredeti szerzője vagyok, ez az önálló szellemi alkotás jogtisztaság szempontjából megfelel az „Eötvös Loránd Tudományegyetem Szervezeti és Működési Szabályzata, II. kötet, Hallgatói Követelményrendszer. Módosításokkal egybeszerkesztett változat [2017. szeptember 1.]” c. szabályzat 74/A–74/C. §-aiban foglalt rendelkezéseknek.

Szombathely, 2024, november 26.



hallgató aláírása

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	vii
1. Szakirodalmi áttekintés	1
1.1. Általános áttekintés	1
1.2. Az additív gyártástechnológia folyamata	2
1.3. Az additív gyártástechnológia típusai	3
1.4. Anyagextrudálás	3
1.5. FDM nyomtatók típusainak áttekintése	4
1.6. Delta nyomtatók:	5
1.7. Cartesian nyomtatók	5
1.8. Core XY nyomtatók	6
1.9. Az eltérő kialakítások összehasonlítása	6
1.10. 3D nyomtatott alkatrészek tulajdonságai	8
1.11. 5 tengelyes nyomtatás robotkarral	11
1.12. Fejlett szeletelési megoldások és előnyeik	12
1.13. Összegzés és célkitűzések:	15
2. 5-tengelyes nyomtató tervezése:	17
2.1. Tervezés menete	17
2.2. Mechanikai tervezés	18
2.2.1. A váz kialakítása	18
2.2.2. X-tengely	19
2.2.3. Z-tengely	21
2.2.4. Y-tengely	21
2.2.5. Kiegészítő tengelyek	23
2.2.6. B-tengely:	24
2.2.7. C-tengely	26
2.2.8. Extruder	29
2.2.9. Nyomtatófej	30
2.3. Elektromos tervezés és programozás	31
2.3.1. Alaplap	31
2.3.2. Léptetőmotor és vezérlő	32
2.3.3. Végálláskapcsolók	33
2.3.4. Fűtés	33

2.3.5. Firmware	33
2.4. Beállítás és tesztelés	36
3. Összefoglalás.....	45
3.1. Eredmények.....	45
4. Felhasznált irodalom	47
5. Summary	50

ELŐSZÓ

A TDK dolgozatom témájaként az 5-tengelyes 3D-nyomtatást választottam, mivel ez a technológia újszerű megközelítést kínál az FDM-nyomtatás területén, és jelentős lehetőségeket rejt magában az ipari alkalmazások terén. Kutatásom során arra törekedtem, hogy feltárjam a technológia gyakorlati előnyeit és lehetséges alkalmazásait egy erre alkalmas gyártóberendezés létrehozása által.

* * *

Köszönetnyilvánítás

Szeretném kifejezni hálámat Andó Máttyás és Birosz Márton Tamás iránt, akik szakmai iránymutatásaikkal és értékes tanácsaikkal segítettek a dolgozat elkészítésében. Köszönettel tartozom kollégáimnak is, akik a gyártási folyamatokban nyújtott támogatásukkal és tapasztalataikkal nagyban hozzájárultak a munkámhoz. Az ő közreműködésük nélkül ez a dolgozat nem valósulhatott volna meg.

Szombathely, 2024, november 26.

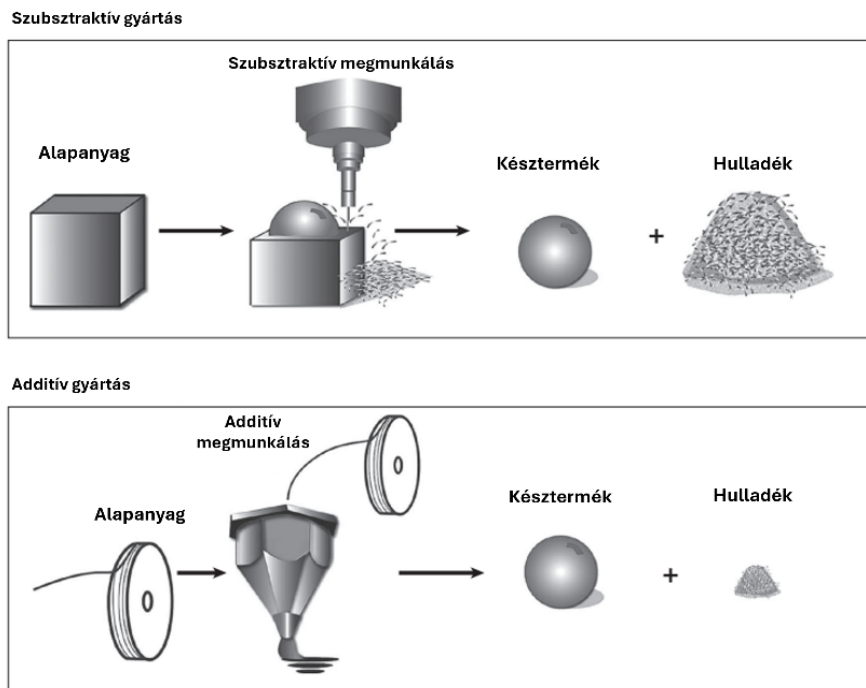
Bodnár Bence

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

1.1. Általános áttekintés

Az additív gyártás olyan technológiák csoportjára utal, ahol az anyag fokozatos, rétegről rétegre történő hozzáadásával hozzuk létre a tárgyat. Ezzel szemben a hagyományos gyártási folyamatok során vagy anyagfelesleget távolítunk el a kívánt forma eléréséig, vagy formázó gyártás esetén mechanikus vagy termikus erőt alkalmazunk olyan eljárásokkal, mint a mélyhúzás, öntés, kovácsolás vagy a fröccsöntés. Az additív gyártás számos előnye miatt nagyon széles körű felhasználást tesz lehetővé az ipar legtöbb területén, az űrtechnikától kezdve, az építőiparon át az egészségügyig, szinte bárhol. [1]

A hagyományos szubsztraktív gyártási folyamatokkal ellentétben, a gyártási folyamat kevésbé befolyásolja a formatervezést. Így olyan szabadságfokot adva a tervezőknek, hogy akár nagy bonyolultságú geometriával vagy belső szerkezettel ellátott alkatrészek is elkészíthetők, amik más gyártási eljárással nehezen vagy egyáltalán nem is gyárthatók. Általánosságban elmondható, hogy nagyon kevés hulladékkal jár, mivel annyi alapanyag kerül felhasználásra, amennyit az alkatrész megkövetel, ahogy az 1. ábrán is látható. Ez alól kivételt képeznek például az olyan alkatrészek, ahol alátámasztás használata indokolt, itt az ehhez felhasznált anyag minimális veszteségként jelenik meg. [2]



1. ábra. Additív és szubsztraktív gyártás összehasonlítása [3]

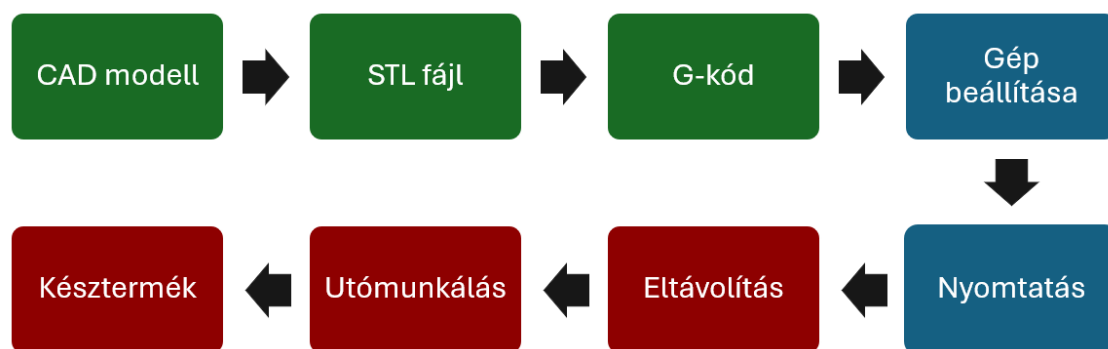
A felhasznált anyagok lehetnek különböző polimerek, fémek, kerámiák, de akár biológiai anyagok is. A technológia gazdaságosságát tovább növeli a felhasznált szerszámok univerzális mivolta is. Hagyományos gyártási eljárások során a szerszám és a szerszámgép geometriája korlátozza a kialakítható formákat, ezért ritka, hogy egy szerszámmal az egész folyamat végrehajtható. Ellenben additív gyártás esetén a rétegről rétegre történő kialakítás miatt a gép paraméterei minimálisan limitálják csak a kialakítható geometriákat. [4], [5]

Az eljárást a kezdetben főként prototípusgyártásra alkalmazták, de a technológia rohamos fejlődése mellett az egyre több, korszerű anyag megjelenésével ma már késztermékgyártásra is alkalmas. A 3D-nyomatás ilyen ütemű fejlődésével a mérnökök nem tudják tartani a lépést, de mindenképpen olyan új lehetőségeket és irányelveket vonultat fel a tervezés és a gyártás területén is, amelyek a jövőben az ipar egyik meghatározó gyártási technológiájává fogják tenni. [6]

1.2. Az additív gyártástechnológia folyamata

Annak ellenére, hogy sokszor hivatkoznak az eljárásra „egy lépéses folyamat”-ként, valójában több lépésből áll. A 2. ábra szerint a folyamat nyolc lépése három csoportra osztható. Az első az előfeldolgozási szakasz, ez magában foglal minden olyan műveletet, amit a nyomtatás megkezdése előtt hajtunk végre. Ide soroljuk a tervezés folyamatát, amelyben az ötlettől eljutunk a végleges CAD modellig. Ezt konvertáljuk egy olyan univerzális formátumúvá, mint például az STL. A STL szabvány csak a tárgy külső geometriáját tartalmazza. Lényege, hogy a tárgy felületét a felbontásnak megfelelően háromszögekkel közelíti. Minél kisebbek a háromszögek annál pontosabb lesz a kapott modell. Ennél kifinomultabb típus az OBJ és 3MF, mert ezek már többletinformációt is szolgáltathatnak, mint például színek, textúrák vagy anyagok. A geometriai modellt egy erre alkalmas szoftver segítségével felszeleteljük. A rétegek vastagságát a gyártási technológia határozza meg az adott gép esetén. Itt külön kezelhetjük még az alkatrész kitöltését, az alátámasztásait és a kiegészítő beállításokat is. A programból közvetlenül generálhatjuk a G-kódot, ami alapján a nyomtató dolgozik. [7]

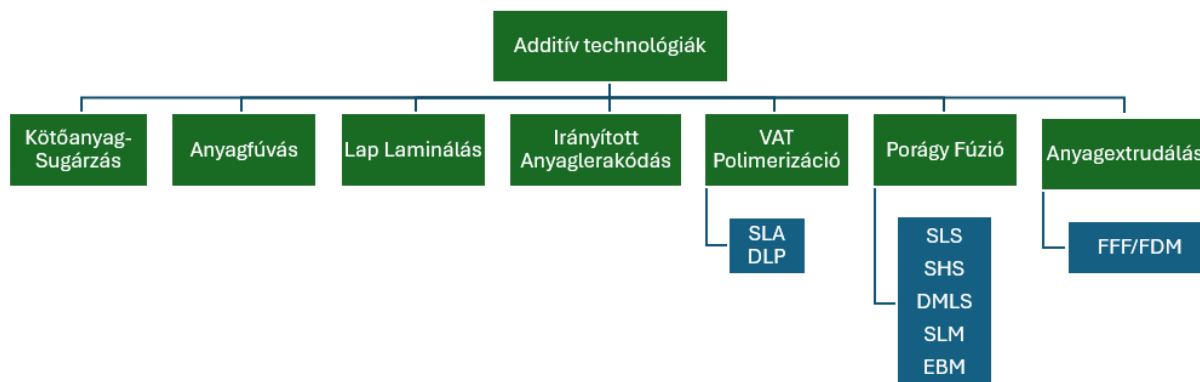
A következő csoport maga a gyártás, ez a nyomtatás folyamatát foglalja magában. A gyártás befejeztével nem minden esetben kapunk készterméket. Az utolsó csoportba tartozik minden olyan eljárás, ami a gépből történő eltávolítástól kezdve végrehajtunk a kész tárgy előállításáig. A legyártott tárgy mikro- és makro-geometriáit vagy az anyagjellemzőit sok esetben végleges állapotba kell hozni. Miután elvégeztünk minden szükséges lépést, a tárgy beszerelhető, kész a rendeltetésszerű használatra. [8], [9]



2. ábra Additív gyártás folyamata

1.3. Az additív gyártástechnológia típusai

A folyamat fejlődése során több irányzat is kialakult, hogy a technológia előnyeit az igényeknek megfelelően, a lehető legjobban kiaknázhassák. A kialakult fő irányzatokat csoportosíthatjuk a felhasznált alapanyagok halmazállapota, típusa, a lerakás és a rétegek megszilárdításának módja szerint is. Folyamat termelékenységére alapján besorolhatjuk az eljárásokat a sorozatgyártásra vagy inkább csak prototípusgyártásra alkalmas megoldások közé. Ezeket az elveket követve az ISO/ASTM 52900:2021 szabvány 7 kategóriát határoz meg (3. ábra), ezek a következők: kötőanyag-sugárzás (BJT), anyagfűvés (MJT), lap laminálás (SHL), irányított energialeakódás (DED), VAT polimerizáció (VPP), porágy fúzió (PBF), anyagextrudálás (MEX). [10], [11]

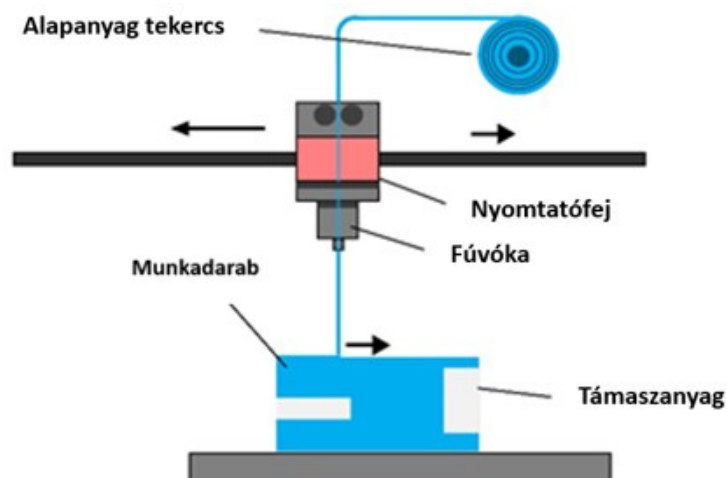


3. ábra. Additív technológiák

1.4. Anyagextrudálás

Az egyik legegyszerűbb és legelterjedtebb additív eljárásnak tekinthető. A 90-es évek óta alkalmazzák, főként műanyag tárgyak nyomtatására. Az eljárás lényege, hogy egy nyomtatófej lehelyezi az anyagrétegeket, amik megszilárdulva egymásra épülve alkotják a tárgyat (4. ábra). A legtöbb esetben az alapanyag hőre lágyuló és huzal formájában érhető el. Ilyen alkalmazás

esetén a gép részét képezi egy anyagtovábbító rendszer, amely gondoskodik az alapanyag áramlásának szabályozásáról és a fűthető fejbe juttatásáról is. Az anyag teljes vagy részleges megolvasztása után a nyomtatófejet elhagyva, minden esetben megszilárdul. Mivel az anyagok a nyomtatófejből kilépve bizonyos mértékű képlékenységgel rendelkeznek, a hosszan kinyúló részeknél alátámasztás alkalmazása szükséges lehet. Az eljárás során felhasználható anyagok lehetnek kerámiák, műanyagok, gyanták, fémek, élelmiszerek, de akár beton is. A legtöbb esetben a tárgyak minimális utómunkálást igényelnek. De akad olyan felhasználás is, ahol a kötőanyagba kevert magas olvadáspontú anyagrészek összeolvasztása a magas hőigény miatt utólag lehetséges, itt csak az előmunkálás és alakadás történik. A legelterjedtebb változata viszont mégis a műanyagnyomtatásra épülő FDM (Fused Deposit Modelling). [12], [13]



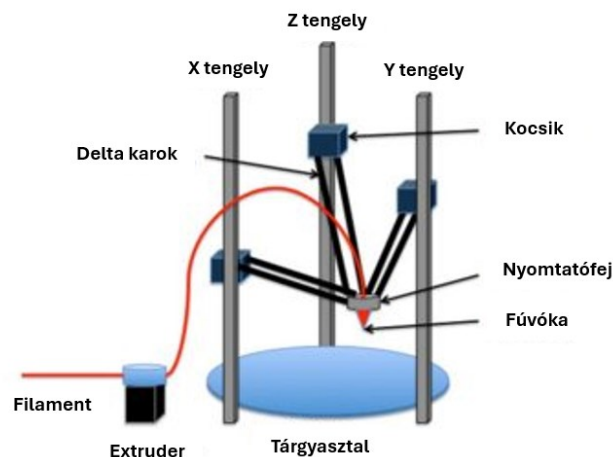
4. ábra. Anyagextrudálás folyamata [14]

1.5. FDM nyomtatók típusainak áttekintése

Az FDM típusú nyomtatók manapság óriási népszerűségnek örvendenek. Ezt egyszerűségüknek és hozzáférhetőségüknek köszönhetik, ezért a TDK dolgozatomban is ezen nyomtatók köré épül. A nyomtatókat csoportosíthatjuk a firmware által használt koordináta-rendszer vagy a gép szerkezete és mozgásrendszere szerint. A legelterjedtebb firmware-ek a Descartes-féle derékszögű koordináta-rendszert használják. Az ilyen fajta megkülönböztetés félrevezető is lehet. Például a Delta nyomtatókat is derékszögű koordináta-rendszer szerint pozícionáljuk, miközben ez nem következik közvetlenül a mozgásrendszerükből. Mivel az általam tervezett nyomtató is Descartes féle koordináta-rendszert használ, ezért továbbiakban ezen kategória főbb változatait ismertetem. [15]

1.6. Delta nyomtatók:

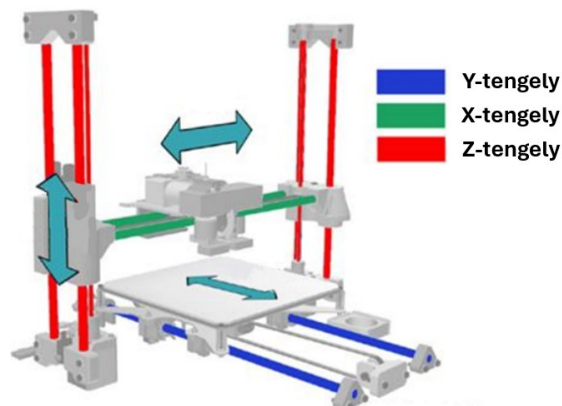
A Delta nyomtatók váza jellemzően három sínből épül fel, melyek háromszög alakban helyezkednek el, és mindegyik egy mozgatható kocsival rendelkezik. A kocsikat és a nyomtatófejet egy merev rúd köti össze (5. ábra). A nyomtatáshoz szükséges mozgásokat a kocsi sínek mentén történő le-fel mozgásával valósítjuk meg. A nyomtatók ezen köre nem a szokásos értelemben vett koordináták menti lineáris mozgásokra épül, mint a legtöbb CNC-gép vagy más típusú nyomtatók. Itt ráadásul a tárgyasztal kör alakú. A mozgások matematikai leírása ebből adódóan bonyolultabb, és egy fokkal fejlettebb szoftveres háttérrel és erőforrásokat igényelnek. [16]



5. ábra. Delta nyomtatók felépítése [17]

1.7. Cartesian nyomtatók

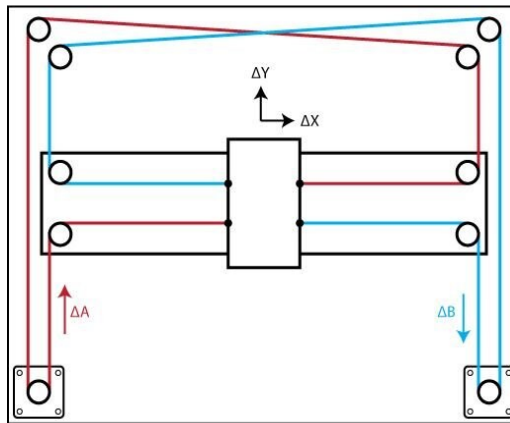
A nyomtatók legelterjedtebb és legegyszerűbb változata. A lineáris mozgások a Descartes koordináta-rendszer szerint meghatározott irányokban történnek. Általában a nyomtatófej X és Z, a tárgyasztal Y irányú mozgásra képes, és négyzet alakú tárgyasztallal vannak felszerelve (6. ábra). Ez egyszerűbb megvalósítást tesz lehetővé szoftveresen és hardveresen is. [16]



6. ábra. Cartesian nyomtatók felépítése [17]

1.8. Core XY nyomtatók

A mozgások iránya megegyezik a Cartesian nyomtatókéval. A legszembevetőbb eltérés, hogy az X és Y tengelyek menti mozgás nem egymástól függetlenül történik. A tengelyekhez két szíj tartozik, amik közösen kapcsolódnak a nyomtatófejhez, és a mozgás a hozzájuk tartozó léptetőmotorok összehangolt munkája által valósul meg (7. ábra). Egy léptetőmotor hajtása esetén a nyomtatófej átlós mozgást végez, a tengelyekkel párhuzamos mozgáshoz pedig két motor szinkron működtetése szükséges. [18]



7. ábra. Core XY nyomtatók speciális kialakítása [19]

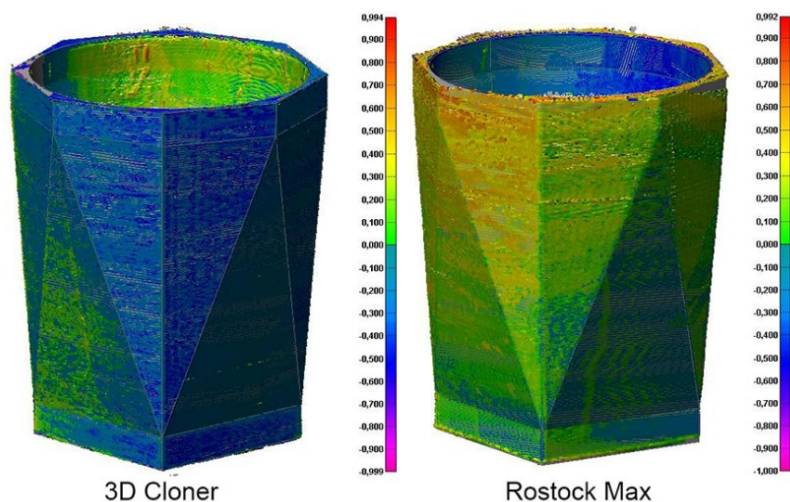
1.9. Az eltérő kialakítások összehasonlítása

Az eltérő kialakítások közötti különbségeket számos aspektus szerint vizsgálhatjuk. A szerkezeti felépítés szempontjából a Cartesian nyomtatók a legegyszerűbbek. A tengelyek menti elmozdulások ennél a típusnál egymástól függetlenül történnek, ezért egyszerűbb kalibrálás és szerkezeti felépítés jellemzi őket. Mivel nincsenek speciális mozgásigényei a legegyszerűbben tervezhető és kivitelezhető nyomtatók közé sorolható, ami költségben és a nyomtató szerelhetőségében is megmutatkozik. Hasonlóképpen a Delta nyomtatókat is egyszerű felépítés jellemzi. Kevés mozgó alkatrészt tartalmaznak, ezért a meghibásodások esélye is ezekre korlátozódik, és összeszerelése is egyszerű. Mozgásviszonyai viszont egy bonyolultabb metódus szerint valósulnak meg, ezért kalibrálása bonyolultabb. A Core XY nyomtatók bonyolultabb felépítéssel rendelkeznek. Több mozgó alkatrész szükséges az egyedi XY mozgások létrehozásához, ezért ezek szerelése és kalibrálása is nagyobb hozzáértést igényel. Nagyobb a meghibásodások lehetősége is, és ezek egy magasabb árkategóriába sorolhatóak. Egy további fontos jellemző a gép térfogatának minél nagyobb kihasználhatósága. Ebből a szempontból a Core XY nyomtatók járnak az élen, a hasznos nyomtatási térfogat ebben az esetben az egyik legnagyobb.

A Delta nyomtatóknál a kör tárgyasztal és a karos mechanizmus miatt kisebb mértékben vagyunk képesek kihasználni a gép térfogatát. Hasonlóképpen a Cartesian nyomtatók is kisebb nyomtatási térfogattal rendelkeznek, ebben az esetben az asztal mozgatásához szükséges helyigény korlátoz minket. Ha a nyomtatási sebességet vesszük alapul, akkor a Delta és a Core XY nyomtatók szerepelnek a legjobban. Mindkét esetben a nyomtatófej mozgása határozza meg a nyomtatás sebességét, ezért ezeknél jellemző, hogy ezeket a komponenseket a lehető legkönnyebbre tervezik. Ezzel, hogy a mozgatni kívánt alkatrészek tömegét csökkentjük, a tehetetlenségük kisebb lesz, nagyobb gyorsulás érhető el velük ugyanakkora erő mellett. Továbbá a Core XY gépeknél a speciális szíjhajtással, a lehető legkönnyebb nyomtatófejjel és stabil gépváz biztosításával a hajtásból származó rezgések csökkenthetőek, ami nagyobb pontosságot és nyomtatási minőséget eredményez nagyobb sebesség mellett is. [20], [21]

Számos tanulmány és publikáció is foglalkozott már a témával, ahol is összevetették a különböző nyomtatókat valamilyen szempont szerint. Ezek közül amelyiket ismertetni szeretném, a Cartesian és Delta nyomtatókkal gyártott tárgyakat hasonlítja össze. A vizsgálat során mindkét típusból kiválasztottak egy-egy nyomtatót, és egy előre definiált tárgyat nyomtattak ki velük. A kísérlethez egy 3D Coloner DH Cartesien és egy Rostock Max V2 Delta nyomtatót használtak. A nyomtatáshoz mindkét esetben azonos alapanyagot, szürke PLA-t használtak, és a nyomtatók azonos méretű fűvókával és beállításokkal rendelkeztek, hogy az eltérések kizárólag az eltérő kialakításból származzanak. A kiértékelés során nem csak a nyomtatási időt mérték, hanem vizsgálták a két nyomtatóval elkészített tárgyak felületének minőségét és a méretbeli eltéréseket is a kiindulási CAD-modellhez képest. [22]

A kiértékelést egy 7 tengelyes Romer Absolute Arm SI mérőkarra szerelt RS2 LASER 3D szkennelrel végezték el. Az 8. ábrán a színek jól mutatják a CAD-modellhez képest az eltéréseket. Egyértelműen megállapítható, hogy a 3D Coloner-rel készített tárgy közelebb állt a CAD-modellhez, de a nyomtatás felületi minősége rosszabb volt. Továbbá az elkészült alkatrészek tömege között 5 % eltérés volt mérhető. A vizsgálatot megismételték több konfiguráció alkalmazásával, és egyedül a nyomtatási idő volt az, ahol nem kaptak egyértelmű eredményt, hol az egyik, hol a másik konstrukció bizonyult eredményesebbnek. [22]

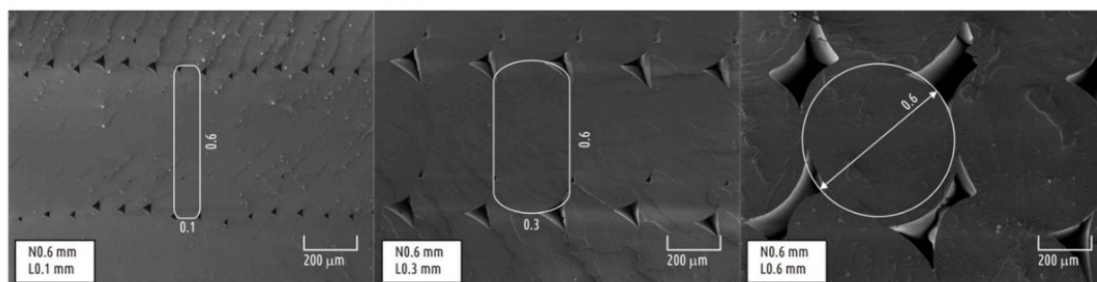


8. ábra. Nyomtatott alkatrészek összevetése a CAD modellel [22]

1.10. 3D nyomtatott alkatrészek tulajdonságai

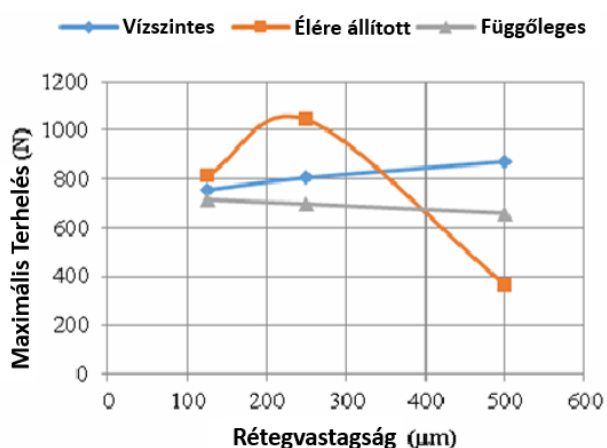
Az additív technológiával készülő tárgyakat minden esetben egymásra épülő rétegek összesége alkotja, ez alól az FDM sem kivétel. A technológiát elsősorban prototípusok gyártására szánták, hogy a tervezőasztalon elkészült modell, minél előbb kézzel fogható formában is rendelkezésre álljon. A tömeggyártás többnyire valamilyen más eljárással valósult meg, ezért az elkészült prototípus mechanikai tulajdonságai háttérbe szorultak. A technológia fejlődése során felismerték, hogy az újabb változatok a kész munkadarabok gyártására is alkalmasak, ezért a fejlődés iránya a mechanikai tulajdonságok és a felületi érdesség optimalizálására helyeződött. Általánosságban elmondható, hogy az FDM-mel készült szerkezetek viselkedése anizotróp, a mechanikai tulajdonságai eltérőek lehetnek a különböző irányokban a rétegek orientációjának és a rétegek vastagságának függvényében. Volkan és munkatársai a rétegvastagság és a nyomtatási irány változásának hatását vizsgálták. A kísérlet során három különböző rétegvastagságot alkalmaztak, három eltérő orientációjú próbatesten. Könnyedén megállapítható, hogy minél kisebb rétegvastagsággal készült az alkatrész, annál finomabb felületet kaptak, viszont ezzel arányosan a nyomtatás időtartama is megnövekedik. [23]

A vizsgálat eredményeként megállapították azt is, hogy a nyomtatás közben használt rétegvastagságnak és a nyomtatási orientációnak meghatározó szerepe van az alkatrészek mechanikai tulajdonságainak kialakulásában. A szerkezet optikai képelemzése során az is kiderült, hogy a rétegek közötti légrések csökkentésével a rétegek közötti adhézió is növekszik, ez a 9. ábrán jól látható.



9. ábra. Az eltérő rétegek térkitöltése [24]

Az elkészült minták szilárdsági vizsgálata során megállapították, hogy a hosszanti éle mentén nyomtatott próbatestnél javultak a mechanikai tulajdonságok, kisebb rétegvastagság használata esetén (10. ábra). Hasonlóképp a vízszintesen nyomtatott minta is így viselkedett, egyedül a függőleges elrendezésnél voltak jobbák a szilárdsági mutatók nagyobb rétegvastagság mellett. [23]



10. ábra. Nyomtatás irányának a szilárdságra gyakorolt hatása [23]

Amennyiben funkcionális tárgyat szeretnénk gyártani, nem elég a terhelések szempontjából megvizsgálni az optimális orientációt. Sok esetben ez támaszanyag (support) felhasználása nélkül nem lehetséges. Ebben az esetben mérlegelni kell, hogy megéri-e vállalni az ezzel járó következményeket, vagy érdemesebb-e áldozni a könnyebb nyomtathatóság érdekében. A 3D nyomtatás határai a geometria felől megközelítve az alábbiak lehetnek. Nagyon sok olyan speciális geometria készíthető, ami hagyományos gyártástechnológiákkal elképzelhetetlen, de vannak olyan egyszerűnek tűnő alakok, amik megvalósítása problémát jelenthet. Tipikusan ilyenek például a magas, karcsú elemek, az áthidalások, a vízszintes furatok/bemetszések és a legtöbb olyan kinyúlás, amelynek a bázissal bezárt szöge kisebb, mint 45° . [24]

A technológia sajátossága, hogy a munkadarabot folyamatosan anyag hozzáadásával építjük fel. Az alapanyagot az adagoláskor képlékeny állapotba hozzuk, így alakul ki a rétegek között a megfelelő kötés. Ez azonban azzal is jár, hogy a levegőben nem tudunk nyomtatni, hiszen, ha nincs mire lehelyezni a rétegeket a megszilárdulásig szabadon deformálódhatnak. Bizonyos mértékig, nagyon lassú nyomtatási sebesség mellett lehetséges ez, de méretpontatlan és gyenge kötésű alkatrészeket eredményez. A megoldás, hogy ilyen esetekben alátámasztást alkalmazunk (11. ábra). Alacsony kitöltésű tartószerkezetet nyomtatunk az alátámasztani kívánt részek alá, melyeket erre helyezve stabilan nyomtathatunk. Viszont számolni kell azzal, hogy ezekhez a support-okhoz felhasznált anyag mind hulladékként jelentkezik, megnövekedik a nyomtatási idő és az eltávolításuk is időt vesz igénybe, amelyet plusz lépésként kell beilleszteni a folyamatba. [24] [25]



11. ábra. Néhány példa, ahol alátámasztás használata szükséges [24]

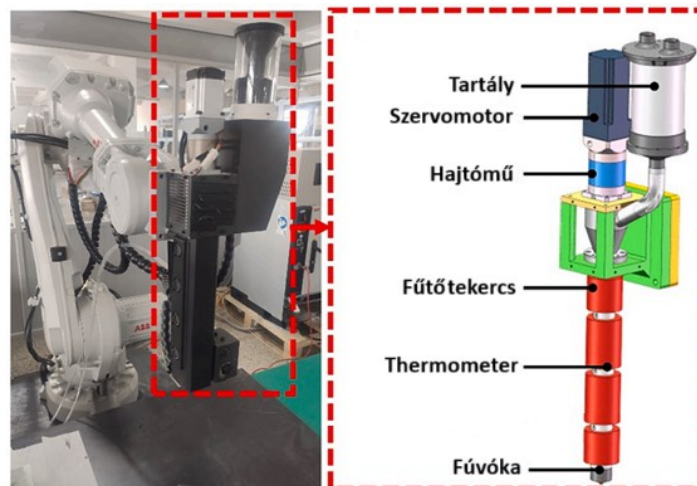
A 12. ábrán jól láthatók a különböző felületek közötti eltérések. Az alátámasztással érintkező felület rosszabb minőségű, és optimális beállítások mellett is méretbeli eltérésekkel kell számolni. Ferde felületek minősége jobb, de a rétegek miatt jelentkező lépcsőzetes struktúra is hibákhoz vezethet.



12. ábra. 3D nyomtatásra jellemző felületek

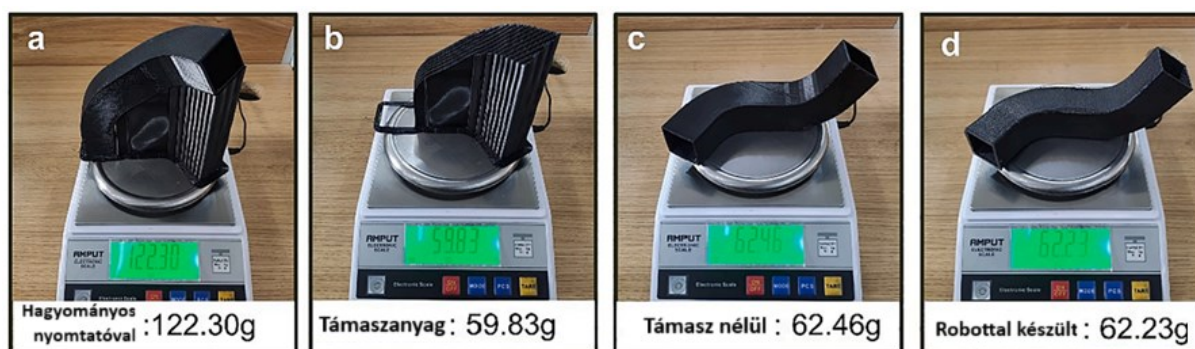
1.11. 5 tengelyes nyomtatás robotkarral

Láthatjuk, hogy a 3D nyomtatás az előnyei ellenére eléggé korlátozott bizonyos területeken. Számos kutató felismerte ezt a problémát, és elkezdtek olyan új sémákat keresni, amelyek megoldást kínálnak ezekre a hiányosságokra. Xiping Li és munkatársai is felismerték ezt, és egy, a hagyományostól eltérő módszert határoztak meg a nyomtatás folyamatára. A vizsgálatuk célja olyan vékonyfalú, alátámasztás nélkül felépülő tárgyak készítése, amelyek gyártása nem párhuzamos síkok mentén történik. A kísérlethez egy robotkart használtak, amelyet egy nyomtatófejjel szereltek fel (13. ábra). A nyomtatófejen egy csavaros extruder kapott helyett, lehetővé téve a legtöbb hőre lágyuló műanyag használatát, jelentősen nagyobb lerakási sebességet eredményezve. [26]



13. ábra. Robotkarrá szerelt nyomtatófej kialakítása [26]

Több munkadarabot is készítettek. Ezek közül, amit kiemelnék, az egy négyzet keresztmetszetű cső, amelyet úgy terveztek meg, hogy hagyományos 3-tengelyes megmunkálással is elkészíthető legyen. Az eredmény tökéletesen reprezentálja többtengelyes nyomtatók előnyeit a hagyományos kivitelekhez képest. A 14. ábrán az elkészült alkatrészek összevetése látható. A robot és a hagyományos nyomtató által készített cső tömegei között az eltérés minimális, viszont a három tengely mentén készített alkatrész kb. a saját tömegével megegyező mennyiségű alátámasztást is igényelt. [26]

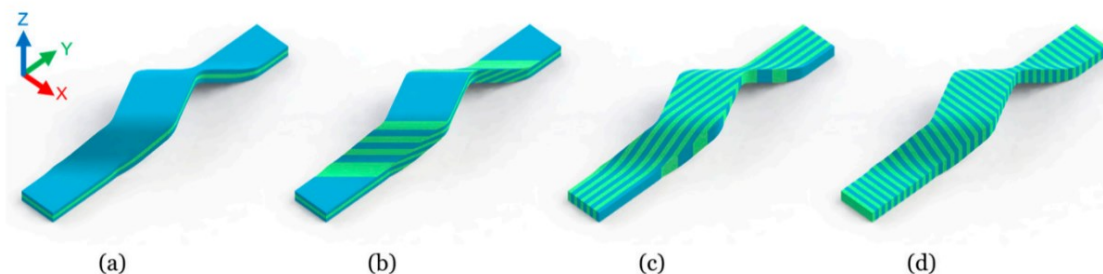


14. ábra. Munkadarabok súlyának összehasonlítása [26]

1.12. Fejlett szeletelési megoldások és előnyeik

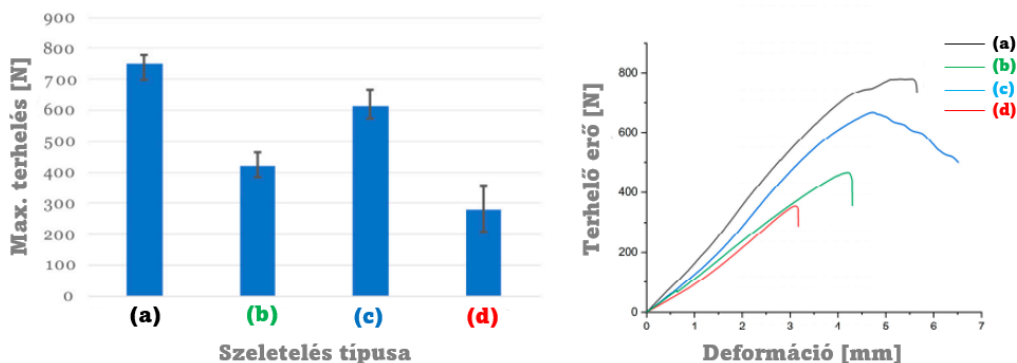
A gazdaságosabb gyártás mellett érdemes megvizsgálni, hogy a háromnál több tengely mentén történő nyomtatás milyen lehetőségeket kínál a mechanikai szilárdság javítására. Az additív eljárásokkal készült tárgyak szinte kivétel nélkül lineáris rétegekből épülnek fel, ezek szilárdságra gyakorolt hatását korábban már bemutattam. Yuan Yao és munkatársai szakítóvizsgálatokat végeztek és hasonlítottak össze, hogy a görbe felület mentén szeletelt és nyomtatott próbatest szakítószilárdsága mennyiben tér el a hagyományos eljárással készültekhez képest. [27]

A vizsgálathoz a 15. ábrán látható próbatesteket használták. Mint már említettem a *b*, *c* és *d* esetben síkok mentén történt a szeletelés, eltérő orientációval. Az *a* esetben ezt egy görbe felületre cserélték. Ezen fajta megmunkálás előkészítése és a gyártás is nagyobb erőforrásokat igényel, mivel több szabadságfok mentén történik, és komplex, több tengely menti szinkronmozgást igényel. Hogy biztosítani tudják ezt, a nyomtatófejet ők is egy robotkarra szerelték. A minták PLA-ból készültek, 100%-os kitöltés és 0,2 mm rétegvastagsággal. A szakítóvizsgálatok elvégzése után kapott eredmények a 16. ábrán láthatóak. [27]



15. ábra. Szakító próbatestek [27]

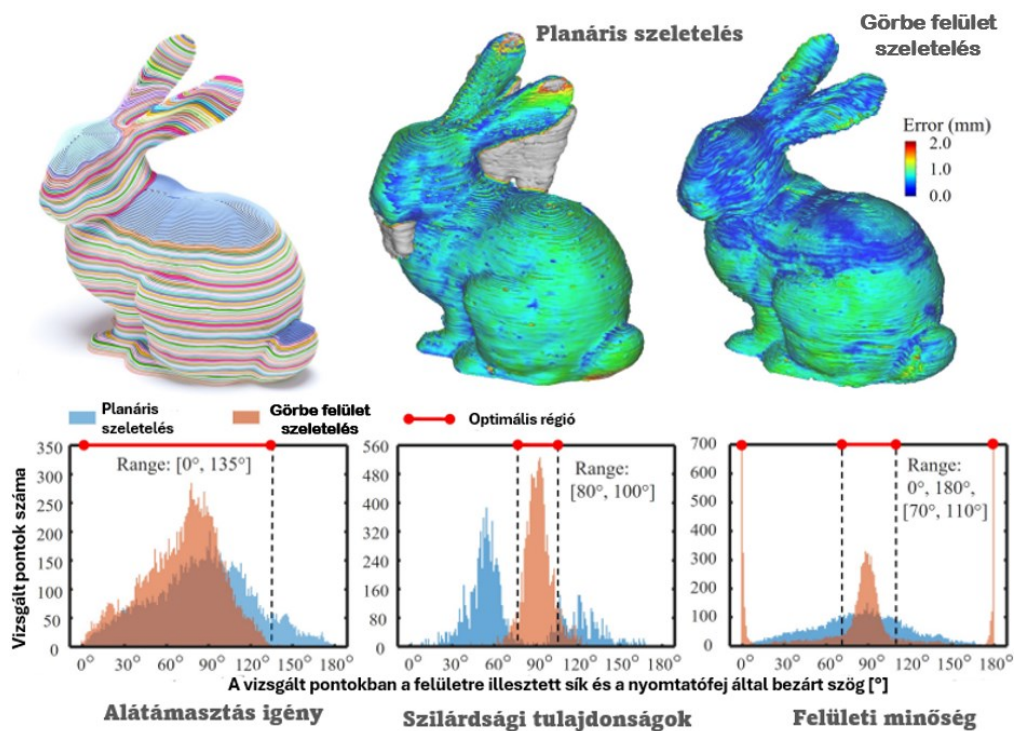
Szeletelés típusa	Max. terhelés [N]	Max. deformáció [mm]
Curve slicing	750.47	4.934
Z-direction	420.66	3.905
X-direction	614.61	4.594
Y-direction	280.89	2.552



16. ábra. A vizsgálat eredményei [27]

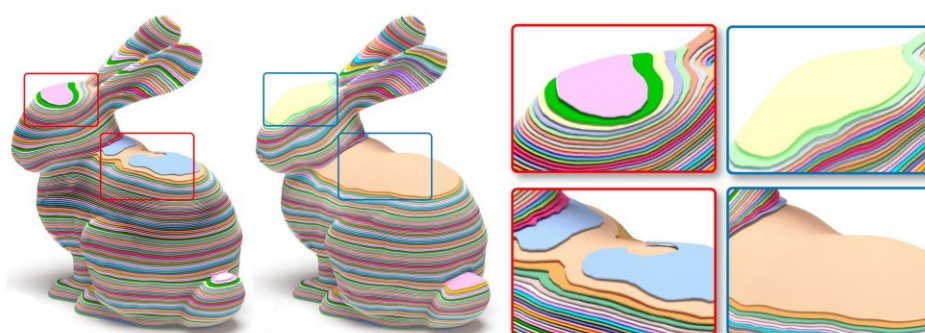
Az eredmények igazolták a feltételezést, hogy ha több szabadságfok mentén is képesek vagyunk nyomtatni, azzal a hagyományos additív eljárások jelentette korlátok egy részétől képesek vagyunk megszabadulni. Az így készült alkatrészek mechanikai szilárdsága 22-167 %kal is növelhető. A hasonló vizsgálatok elvégzéséhez nem elegendő a gépünk mozgástartományát kiszélesíteni, létre kell hozni egy olyan szeletelő szoftvert is, amely alkalmas az igényeknek megfelelő szeletelés elvégzésére és az ennek megfelelő G-kód elkészítésére. Egyszerűbb esetben a görbe felületek meghatározása az ébredő erők és az alkatrész geometriájából akár következtetéssel is lehetséges. Bonyolultabb alkatrésznél komoly kihívást jelent a megfelelő irány kiválasztása, amely a gyárthatóság, a merevség és gazdaságosság szempontjából is optimális számunkra. Tianyu Zhang és társai egy olyan szeletelő megoldást dolgoztak ki, amely az előbbi szempontokat figyelembe véve hajtja végre ezt a műveletet. [27], [28]

A modellt egy nyúlról mintázták, nem kimondottan funkcionális rendeltetésű, de gyártása során felmerül minden olyan probléma, amely ezt a megoldást indokoltá teszi. Jól látszik a 17. ábrán, hogy a párhuzamos síkokkal szeletelt tárgy gyártása alátámasztást igényel, és a mechanikai szilárdság szempontjából sem ideális. Ezzel szemben a görbe felületek mentén történő szeletelés ezeket kiküszöbölve dolgozza ki a szerszámpályát. További nagy előny, hogy a felületi érdességre is kedvező hatást gyakorol. [28]



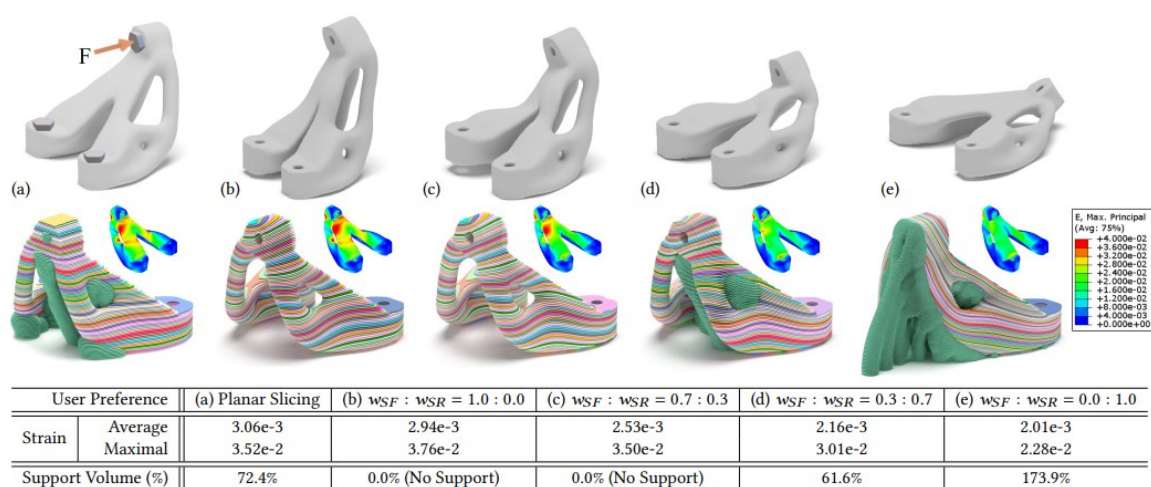
17. ábra. A szeletelés eredményei [28]

Amint a 18-as ábra is jól szemlélteti, képesek vagyunk a felső rétegeket a modell határolófelületeihez illeszteni. Ezzel a hagyományos nyomtatásnál keletkező lépcsőzetes struktúra nem jelentkezik, ami főként görbe felületeknél eredményez rossz felületi érdességet. Alapesetben a jelenség káros hatásait a rétegvastagság csökkentésével kompenzálhatjuk, de ezzel együtt a nyomtatási idő nő, és akkor sem leszünk képesek tökéletes felbontású görbe felületeket nyomtatni. [28]



18. ábra. Felületi érdesség javulásának szemléltetése [28]

A 19. ábrán egy érdekes összevetés látható, hogy a különböző szeletelési megoldások használatával miként változik az alkatrész szilárdsága és az alátámasztás igénye. Nagyon jól reprezentálja, hogy az 5-tengelyes nyomtatásnak és a non-planáris szeletelésnek nem feltétlenül a support-használat csökkenése a legnagyobb előnye, hanem hogy ezeket kombinálva képesek vagyunk azonos anyagmennyiség felhasználásával, sokkal szilárdabb alkatrészek készítésére, csupán a szeletelés módjának megváltoztatásával. További érdekesség, hogy az alátámasztás mennyiségének maximalizálásával érhető el a legszilárdabb szerkezet. Ezek a megoldások és újítások azok, amelyek eljuttathatnak a technológia határaihoz és a felhasználási területek kibővítéséhez. [28]



19. ábra. Szilárdságorientált szeletelési megoldások összehasonlítása [28]

1.13. Összegzés és célkitűzések:

A korábbiakban ismertettem a 3D nyomtatás alapjait, különös figyelmet fordítva az FDM technológia működésére, bemutatva annak lépéseit, a legelterjedtebb nyomtatók felépítését, valamint ezek előnyeit és hátrányait. Az ezután elemzett tudományos publikációk alátámasztják TDK dolgozatom jelentőségét. Részleteztem, hogy egy egyszerű alkatrész nyomtatása során mennyi hulladék keletkezhet, valamint a több tengely menti nyomtatás hogyan befolyásolja a szilárdságot, és milyen új lehetőségek adódnak a szeletelési technikák terén, ha több, mint három tengely mentén nyomtatunk.

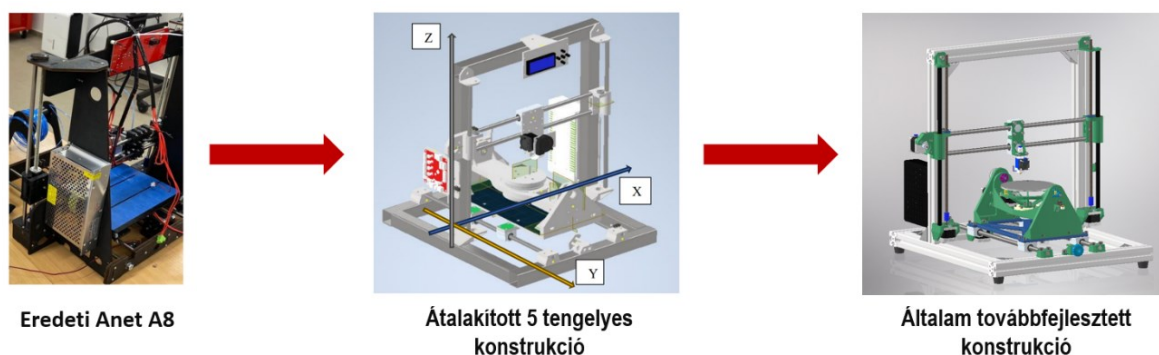
Ezek a megoldások azonban bonyolultabb gépfelépítést igényelnek, hogy öt tengely mentén is biztosítsák a minőséget és pontosságot. A kalibrálás és a gép beállítása új módszereket követel, mivel a hagyományos nullpontfelvétel már nem elegendő. A legnagyobb kihívás a

szeletelezés területén merül fel, kivéve, ha a kiegészítő tengelyek csak pozícióvezérelten működnek. Például egy henger palástjára való nyomtatás összetett, többtengelyes, szinkronizált mozgást igényel, ami növeli a gép, a szoftverrel és az operátorral szemben támasztott követelményeket. Ezért a mindennapi alkalmazás ritka, néhány projekt létezik, amelyek célja főként a technológia előnyeinek bemutatása és a további fejlesztések alapjainak megteremtése.

Munkám célja egy 5-tengelyes nyomtató tervezése, amely stabil és pontos nyomtatásra képes, a kiegészítő tengelyeket pozícióvezérelten használva. Korábbi projekt biztosította a kiindulási alapot, amelyet megvizsgáltam, és ezek alapján összegyűjtöttem a szükséges módosításokat; a nyomtató megfelelő működése érdekében. A főbb tervezett módosítások közé tartozik a tengelyek mozgatórendszerének átalakítása a maximális stabilitás érdekében, valamint a kiegészítő tengelyek integrálása a vezérlőszoftverbe. A szinkronvezérlés kezdetben nem képezi részét a projektnek, de a jövőbeli fejlesztési irányok egyike lehet.

2. 5-TENGELYES NYOMTATÓ TERVEZÉSE:

A koncepció bemutatását a nyomtató fejlesztésének három fő mérföldkövének ismertetésével kezdem (20. ábra). A nyomtató kiindulási alapját egy Cartesian elrendezésű nyomtató adta, ennek az előnyeit az erről szóló bekezdésben már kifejtettem, és javarészt ezek voltak azok, ami miatt kitartottam ezen kialakítás mellett. Az X, Y, Z tengelyek elrendezése tehát maradt a régi, a kiegészítő tengelyek, a tárgyasztal helyén elhelyezett billenő és forgó asztal által valósultak meg. Ezek a X és Y tengelyek mentén, mint B és C tengelyek hozzák létre a forgómozgást. A munkám során az elrendezésen számottevő módosítást nem hajtottam végre, csupán módosítottam azokat a komponenseket, amelyeknél szükség volt arra, hogy az elkészült gép nyomtatásra is alkalmas legyen.

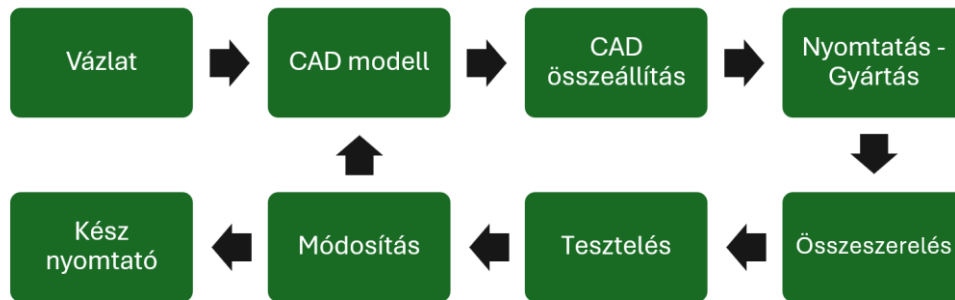


20.ábra. A nyomtató fejlődésének főbb mérföldkövei

2.1. Tervezés menete

Kezdeti lépésként megvizsgáltam a nyomtató korábban már (másik hallgató által) módosított szerkezetét és begyűjtöttem a vele kapcsolatos tapasztalatokat. Mivel a nyomtató korábbi átalakítása során a nyomtatás fázisáig nem jutott el, ezért csak az elvégzett tesztelés és összeszerelés során megszerzett információk álltak a rendelkezésemre. Mivel a nyomtató már ezek alatt is rengeteg hibát produkált és hiányosságra is fény derült, az tűnt a legcélszerűbb megoldásnak, ha a nyomtató összes elemét egyesével megvizsgálom és végrehajtom a szükséges módosításokat, valamint pótlom a hiányzó alkatrészeket. Ez közel 80 darab, különböző alkatrészt jelentett, melyek tervezését és gyártását is én hajtottam végre. A folyamat főbb állomásai a 21. ábrán láthatók. Első lépésként vázlatot készítettem, összegyűjtöttem a legfőbb paramétereket és funkciókat, amelyeknek az adott alkatrésznek meg kell felelnie. Ezek alapján készítettem el a CAD modellt. A kész vagy félkész modelleket egy CAD összeállításban szereltem össze, így a gyártás vagy akár a tervezés során is megbizonyosodhattam róla, hogy az alkatrész megfelelő lesz-e, illetve megfelelően illeszkedik-e a helyére.

Az komponensek többsége 3D nyomtatással készült, PLA vagy PETG anyagból. Néhány alkatrésznél, ahol a magas hőmérséklet vagy az egyéb tényezők nem tették lehetővé a műanyag használatát, ott CNC-megmunkálást alkalmaztam, réz vagy alumínium alapanyagokon. Ezt követte az összeszerelés fázisa, amikor az éppen elkészült alkatrész fizikailag is a végleges helyére került. Nem sok esetben fordult elő, de megesett, hogy valamilyen apró hiba miatt az alkatrész nem töltötte be a kívánt funkciót, ilyen esetben a CAD modell módosításával indult újra a folyamat.

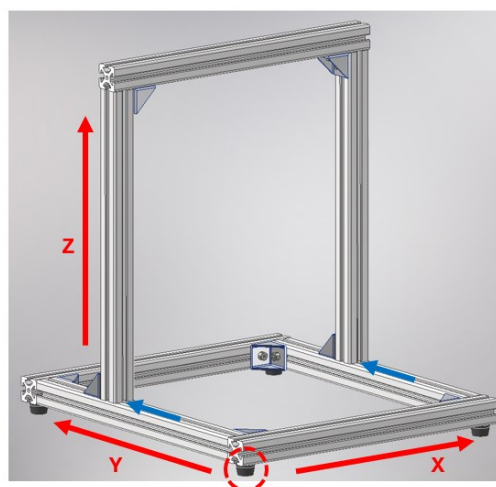


21.ábra. A tervezés lépésekre bontva

2.2. Mechanikai tervezés

2.2.1. A váz kialakítása

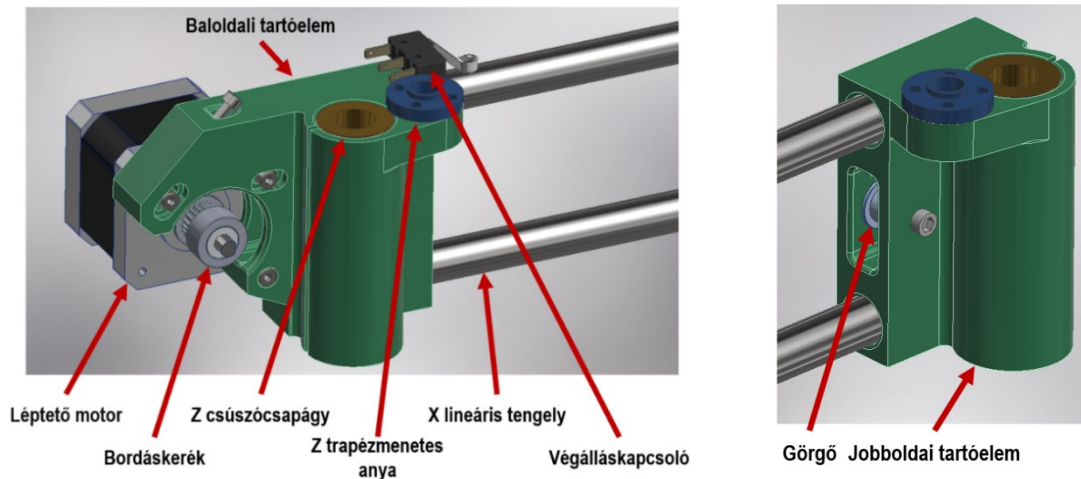
A nyomtató vázszerkezete már az előző változatban is alumínium profilokból épült fel. Számtalvó módosítást nem eszközöltem, mivel ez a fajta kialakítás elegendő merevséget biztosít, és elég nagy, hogy a kiegészítő tengelyek is kényelmesen elférjenek. Továbbá az alumínium profil moduláris kialakításának köszönhetően, minden egyéb módosítás könnyedén eszközölhető. A nyomtató stabil alátámasztása érdekében a négy sarokban gumitalpakat helyeztem el, egyet piros körrel ki is emeltem a 22. ábrán.



22.ábra. A váz szerkezete

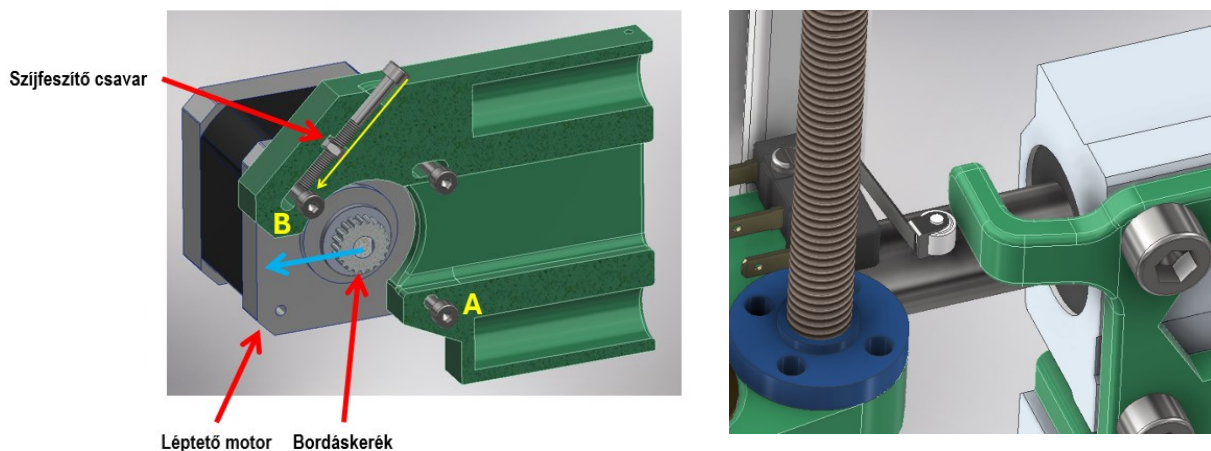
2.2.2. X-tengely

Tulajdonképpen egy híd, amely összeköti a nyomtató két oldalán elhelyezett Z-irányú mozgatóelemeket, és lehetővé teszi a nyomtatófej mozgását ezen a szakaszon. A hajtásért egy léptetőmotor felel, mely bordáskeréken és bordásszíjon keresztül csatlakozik a nyomtatófejhez.



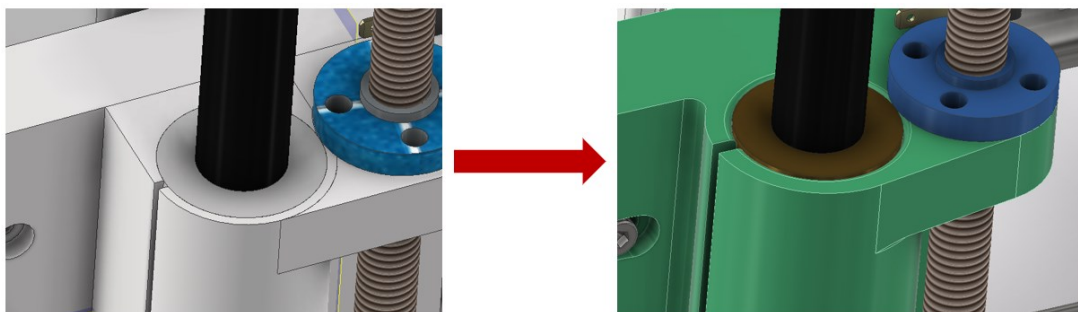
23.ábra. X-tengely elemei

A két tartóelem, amely a híd két végén található, számos újítást hordoz magában. Az előző változatban a szíj feszítésére nem volt lehetőség. Ez egy óriási probléma hiszen, ha nem elég feszes a szíj akkor a pontos pozicionálás lehetetlenné válik, továbbá olyan nemkívánatos rezgések keletkezhetnek, amelyek tovább csökkentik a nyomtatás pontosságát és a felületi minőségre is káros hatással vannak. A probléma megoldására elhelyeztem egy plusz szíjfeszítő csavart a motort rögzítő B-vel jelölt csavarra merőlegesen. A csavar ki-, illetve betekerése által a motor elfordul az A-val jelölt csavar körül. A pozicionálásra egy végálláskapcsolót helyeztem el a baloldali tartóelem tetején, melyet a nyomtatófejen kialakított kar képes aktiválni.



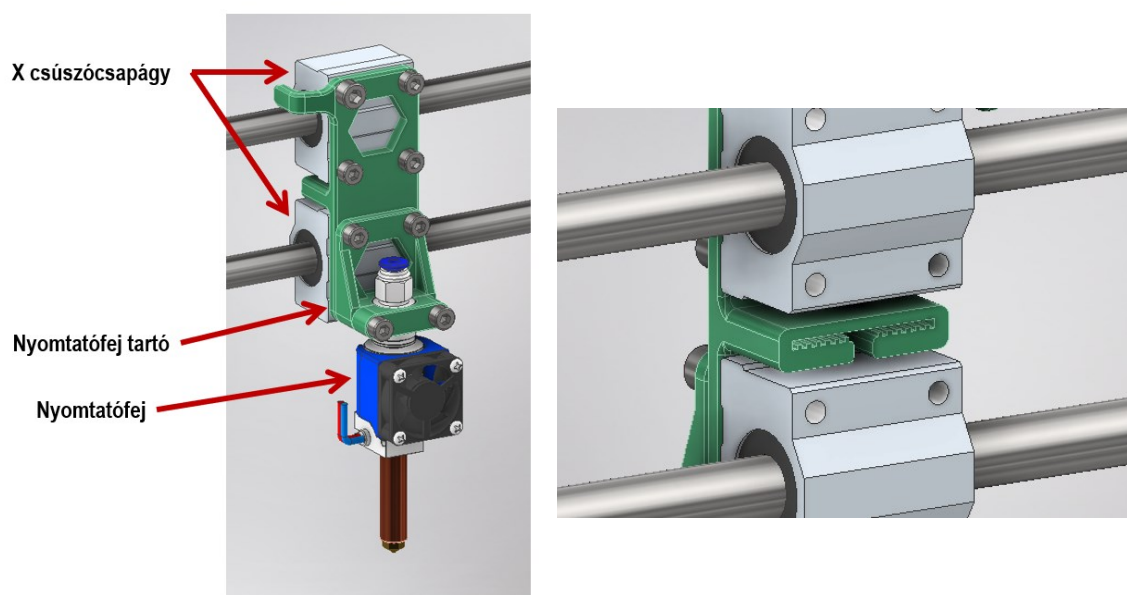
24.ábra. Szíjfeszítő mechanizmus és az X-tengely nullpontfelvétele

Az elrendezés nem változott, csak a geometriát tekintve létrehoztam egy optimálisabb kialakítást. Többek között megerősítettem a Z-menti csúszócsapágy rögzítését, az erőzáró kialakítást kiegészítettem kettő, a csapágy hornyaiba illeszkedő vállal.



25.ábra. Megerősített csapágyfészkek

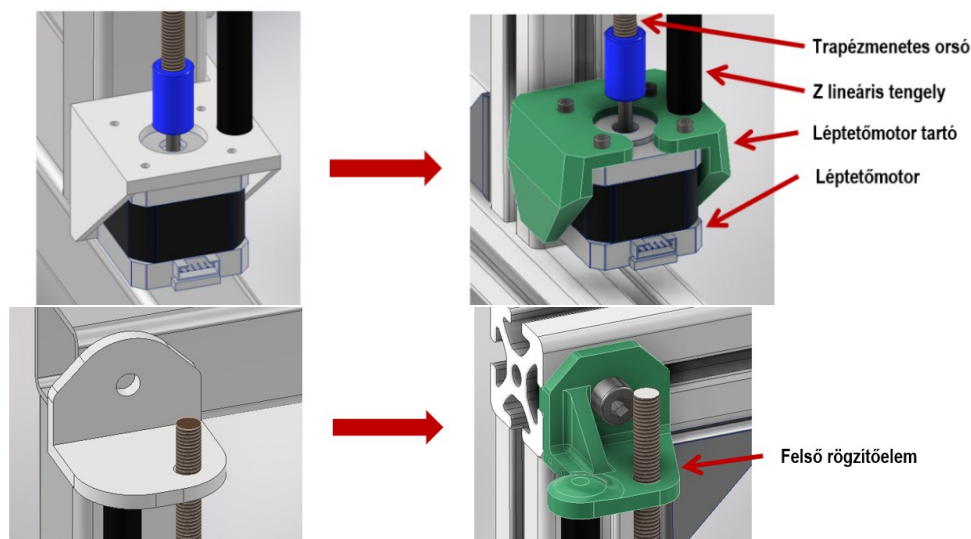
A nyomtatófej és az X-tengely közötti kapcsolódást egy három alkatrészből álló egység biztosítja, melynek részegységei a 26. ábrán láthatóak. Mivel ez egy mozgó alkatrész, és a kialakítástól függően elég nagy sebesség és gyorsulás is elérhető, szempont volt a súlycsökkentés. A csúszócsapágyak és a nyomtatófej komponensei adottak voltak, ezért az egyéb tartóelemek tervezésénél próbáltam ezt szem előtt tartani. Többek között ezért az extruder sem itt kapott helyet. A szíj csatlakozási pontjainak kialakítása is hasonló elvek szerint zajlott, de itt még közrejátszott, hogy meglehetősen kis hely áll rendelkezésre. Itt egy egyszerű alakzáró kialakítás mellett döntöttem.



26.ábra. Nyomtatófej komponensei és a szíj rögzítése

2.2.3. Z-tengely

Kialakítását tekintve páros elrendezésű, ami azt jelenti, hogy a nyomtató két oldalán egy-egy léptetőmotor, menetesorsó és lineáris megvezetés található, amelyek az X híd Z-irányú mozgását biztosítják. A kétoldali meghajtás előnyösebb, mivel csökkenti a nyomtatófej himbálódzását és megdőlését, különösen nagyobb modellek nyomtatásánál. Javítja a nyomtatás pontosságát, mivel a nyomtatófej egyenletesen tud fel és le mozogni. Az erőátvitelről ebben az esetben trapézmenetes orsók gondoskodnak, ez több szempontból is előnyösebb a szíjhajtáshoz képest. A munkám közben a Z léptetőmotor-tartó volt az első alkatrész, amelyet újraterveztem. Ez egy nagyon fontos elem, az X és Z-tengely szempontjából is meghatározó, mivel a két tengely súlyát is ez a két alkatrész tartja. Az új változat meglehetősen masszívabb, de az X-tengely leírásában említett súlycsökkentő törekvések részben e azért is történtek, hogy a tartóelemek minél kisebb erőhatásnak legyenek kitéve. A felső rögzítőelemek újratervezésénél is a merevség növelése volt a cél. Ezt a 27. ábrán látható módon hajtottam végre.

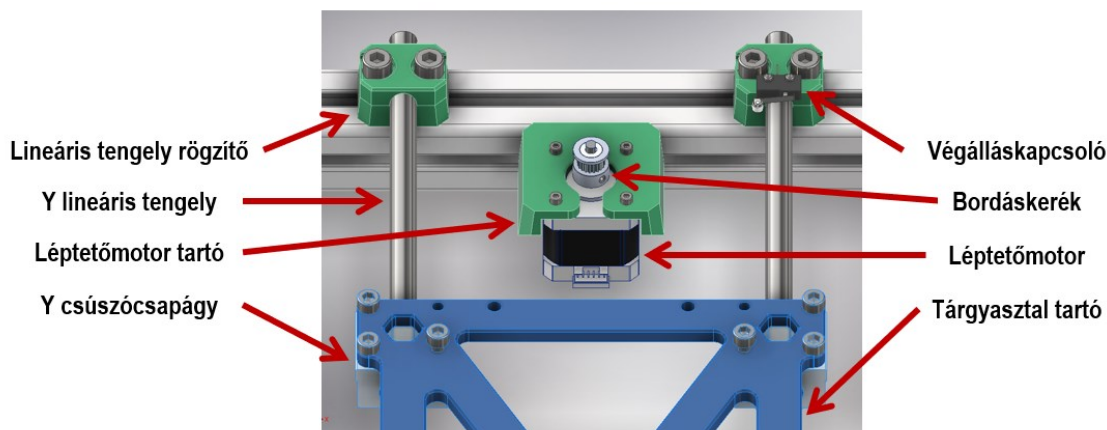


27.ábra. Z tengely elemei

2.2.4. Y-tengely

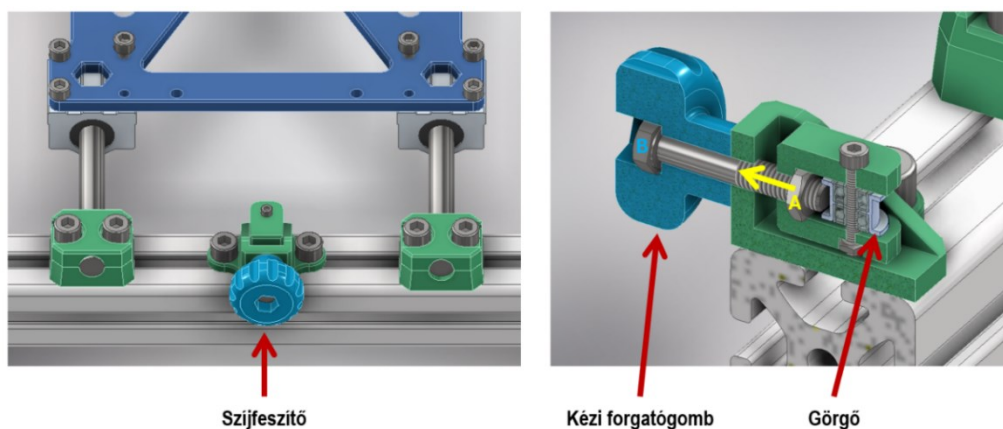
Az Y-tengely menti mozgások a Cartesian kialakítású nyomtatóknál az asztal mozgásával valósulnak meg egy léptetőmotoron, és a hozzá kapcsolódó szíjhajtáson keresztül. Mivel ezekre az elemekre épül rá a két kiegészítő tengelyhez szükséges felépítmény, kimondottan fontos a stabilitás és a lehető legnagyobb merevség mellett a kis súly biztosítása. Első lépésként a léptetőmotor és a szíjhajtás elrendezését változtattam meg. Erre a léptetőmotor könnyebb elhelyezése és a rögzítés merevségének biztosítása miatt volt szükség. Az eredeti változatban a motor az alsó keret felett helyezkedett el, és nem volt elég merev ahhoz, hogy a nagy súlyú nyomtató

asztalt pontosan pozícionálni tudja. Ezért én elfordítottam azt az Y-tengely körül 90° -kal, és lejjebb toltam azt.



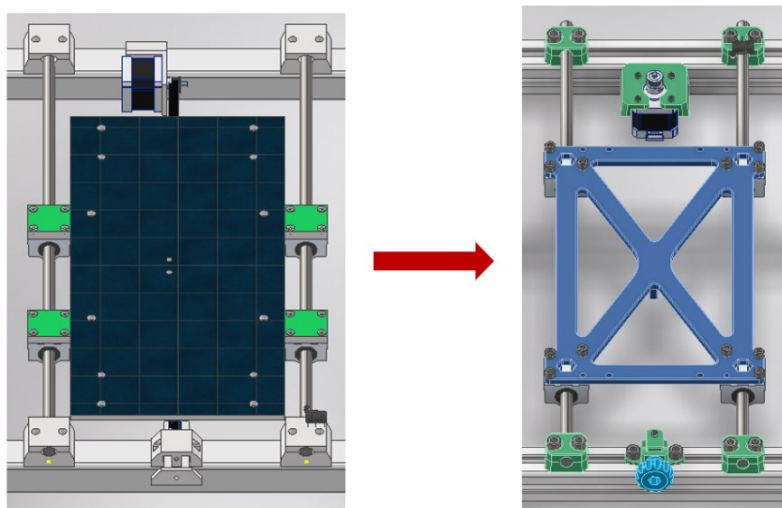
28.ábra. Y-tengely alkotóelemei

Az eszközölt változtatások megkövetelték az új szíjfeszítő rendszer tervezését, melynek felépítése az 29. ábrán látható. A feszítés egy szabványos hatlapfejű csavaron és anyán keresztül valósul meg. A B-jelű csavar pozíciója fix, de forgatásával az A-jelű anyá a menetemelkedés értelmében elmozdul, ezzel növelve vagy csökkentve a görgő és bordáskerék közötti távolságot.



29.ábra. Szíjfeszítő mechanizmus

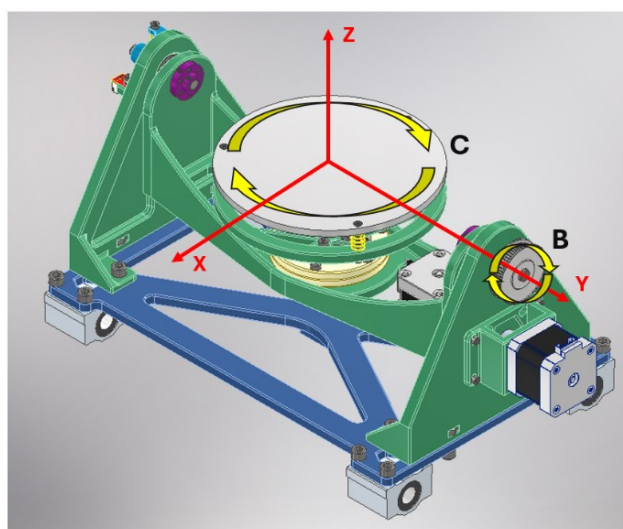
A legszámottevőbb változás mégis a tárgyasztal tartóelemében történt. Az előző változat esetében ezt a feladatot egy hatalmas alumínium lemez látta el. Könnyen belátható, hogy egy ekkora alumínium alkatrész, melynek tömege 1,88 kg, hatalmas tehetetlenséggel rendelkezik és főlegesen terheli a hajtásláncot. Az új változatban ezt egy műanyag alkatrésszel helyettesítettem, melynek tömege az alumínium asztalénak töredéke. A tervezésnél külön figyeltem rá, hogy a ráépülő alkatrészek mind a csúszócsapágók felett terheljék azt, hogy a motortól származó nyomatékon kívül más terhelés ne érje, mivel a méretezésnél csak ezeket az igénybevételeket vettem figyelembe.



30.ábra. Továbbfejlesztett asztalkialakítás

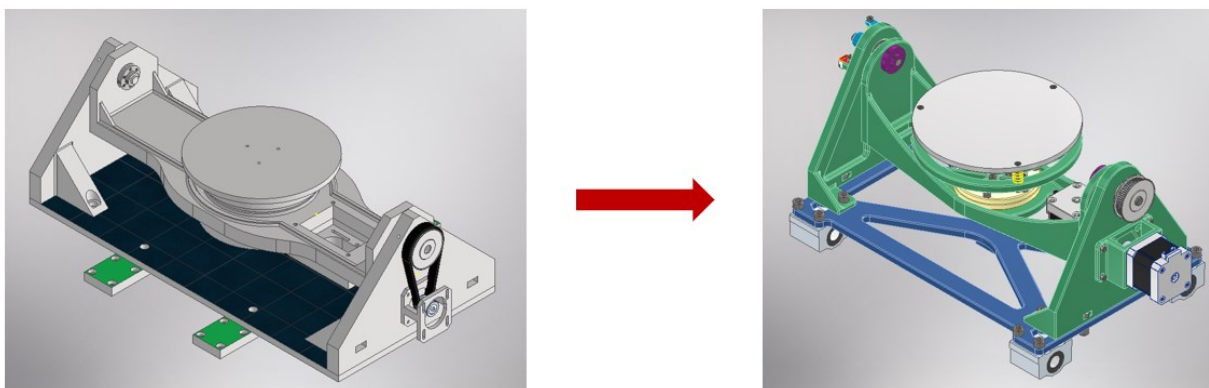
2.2.5. Kiegészítő tengelyek

A kialakítást tekintve egy az 5-tengelyes CNC gépeknél is gyakran használt megoldást alkalmaztam. Rendelkezik egy az Y-tengely körül billenthető és Z-tengely körül forgatható asztalkialakítással.



31.ábra. Kiegészítő tengelyek elrendezése

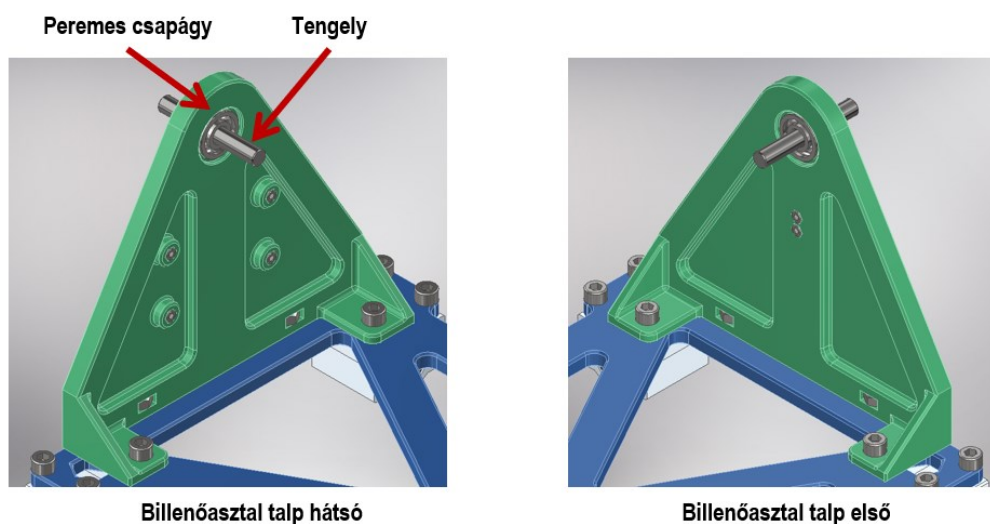
Annak, hogy megtarthassuk az alapot biztosító háromtengelyes nyomtató elrendezését is, az volt az egyik legegyszerűbb módja, hogy kialakítsuk a B és C tengelyeket. Már az előző változat is ezt az elrendezést használta. Az általam eszközölt módosításokkal is inkább a teljesítménybéli javulást céloztam meg, kiegészítve néhány funkcionális hiba vagy hiányosság orvosolásával. Az átalakított változat az 32. ábrán látható.



32.ábra. Továbbfejlesztett kialakítás összevetése a korábbival

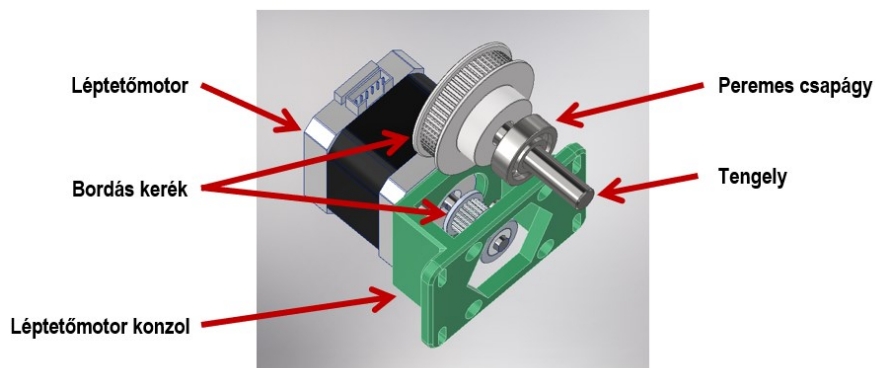
2.2.6. B-tengely:

A billenőasztal két tartóelemmel kapcsolódik az Y-tengelyhez. Itt kaptak helyet a szabad billenést biztosító peremes csapágyak, a tengelyek és az egyéb komponensek rögzítőelemei.



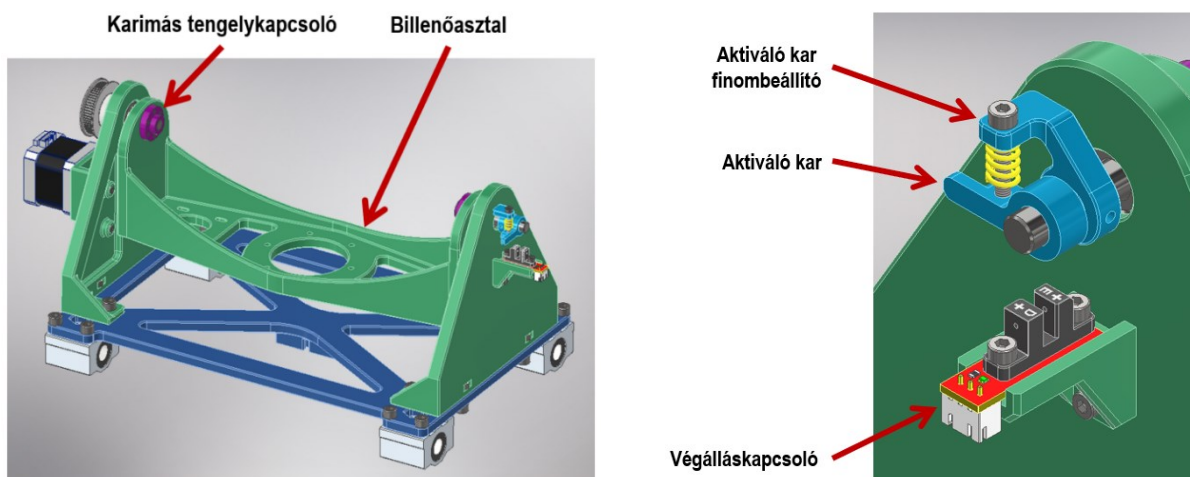
33.ábra. Billenőasztal tartószerkezete

A hátsó talpon lett elhelyezve a B tengely mozgatórendszere. A hajtásáról egy léptető motor, a nyomatékátvitelről két bordáskerék és egy bordásszíj gondoskodik. A nagyobb kerék a tengelyhez van rögzítve, amely biztosítja az összeköttetést a billenőasztal és a hajtásrendszer között. A motortartó konzol úgy lett kialakítva, hogy a rögzítő csavarjai egy horonyban helyezkednek el, ez teszi lehetővé, hogy a két kerék távolsága változtatható a megfelelő szíjfeszesség érdekében. Ez a megoldás nehezebb beállítást tesz lehetővé, de mivel nem igényel plusz alkatrészeket ezért az asztal súlyát nem növeli.



34.ábra. Billenőasztal hajtásrendszere

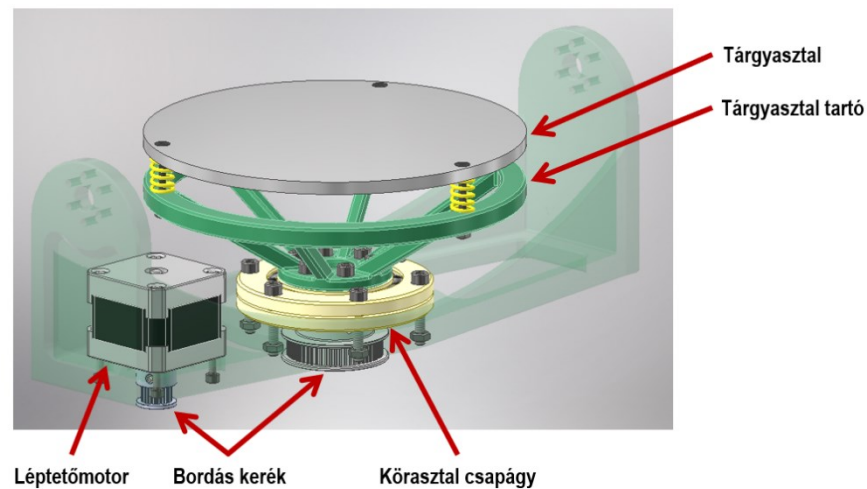
A két talp között helyezkedik el a billenőasztal, amely közvetlenül kapcsolatot teremt a tengelyek között, kétoldalt egy-egy karimás tengelykapcsoló gondoskodik a megfelelő nyomatékátvitelről. A billenő mechanizmus pontos pozicionálására kidolgoztam egy optimalizált megoldást. Az új kialakításban a billenőasztal első talpán egy optikai véghelyzetkapcsolót, míg a tengelyen egy aktiváló kart helyeztem el. Az optikai érzékelő választása azért indokolt, mert lehetővé teszi a nullpontfelvételt fizikai érintkezés nélkül. A kiegészítő tengelyek mentén a kísérleti eszközök esetében megnövekedett ütközési kockázat miatt különösen fontos volt az érintkezés elkerülése. Ez optikai véghelyzetkapcsoló használatával oldottam meg, hogy a billenőasztal túlfordulása esetén ne károsodjon a mérőeszköz, mivel nincs fizikai kontakt. Az aktiváló kar speciális kialakítású, a tengelyre nincs fixen rögzítve, hanem egy előfeszített rugóval kapcsolódik a finombeállító karhoz, amelyet egy hernyócsavar rögzít a tengelyen. Ez a mechanizmus lehetőséget nyújt a nullpontfelvétel finomhangolására az előre meghatározott pozícióhoz képest, biztosítva a nagyfokú precizitást és beállíthatóságot. A billenő mechanizmus nullpontját az asztal 90°-os döntött állapotában határoztam meg, de ha az alkalmazás nagyobb billenést igényel ez a későbbiekben könnyedén módosítható.



35.ábra. Billenőasztal és a nullpont felvétele

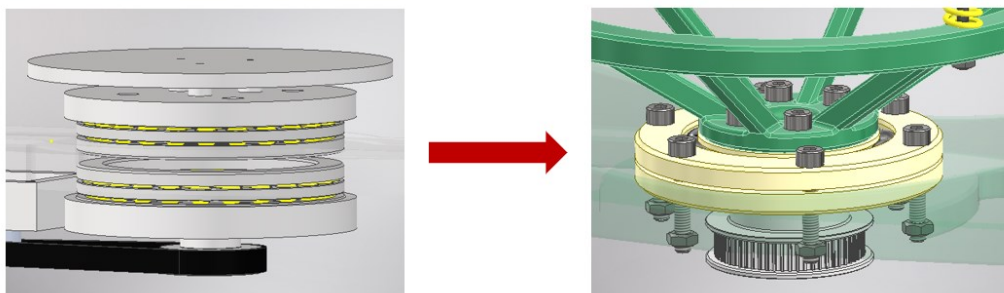
2.2.7. C-tengely

A körasztal és a billenőasztal tervezése párhuzamosan történt, mivel a körasztal súlya a billenőasztal hajtásrendszerét terheli. Ez azt jelenti, hogy törekednem kellett a súlynak és a rendszer tehetetlenségi nyomatékának csökkentésére. Mivel az egység súlypontja tökéletesen nem illeszthető rá a B-forgástengelyre, ezért olyan közel próbáltam hozni a súlypontot, amennyire csak lehetett. Ez különösen nehéz volt, mivel az előző változathoz képest a billenőasztal is lerövidült, így a léptetőmotor bekerült a tárgyasztal alá. A nyomatékvitelért a billenőasztalhoz hasonló elrendezés felel, a szíjfeszítés is az ott bemutatottak szerint történik.



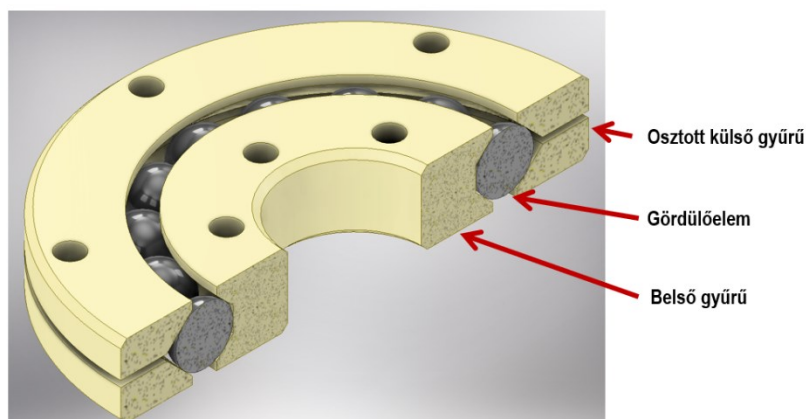
36.ábra. A körasztal komponensei

Az asztal forgását az előző változatban két axiális csapággal biztosították. Ezeknek a csapágyaknak a tömege a katalógus szerint 413 g, csak a két csapágy eltávolításával 826 g tömeget szabadítottam fel. Az első tervek szerint ezek helyére egy ipari műanyag körasztalcsapágy került volna. A gyártóval folytatott konzultáció során kiderült, hogy a modell, amely méretben megfelelő lett volna, túl nagy játékot tesz lehetővé radiális irányban. Egy olyan modell, amely előfeszítéssel rendelkezik, a súly, méret és a költségek tekintetében túl nagy ráfordítást igényelt volna, ezért döntöttem a saját csapágy tervezése mellett. Az első változatban használt csapágyak és az általam használt változat összehasonlítása látható az 37. ábrán.



37.ábra. Továbbfejlesztett csapágykialakítás

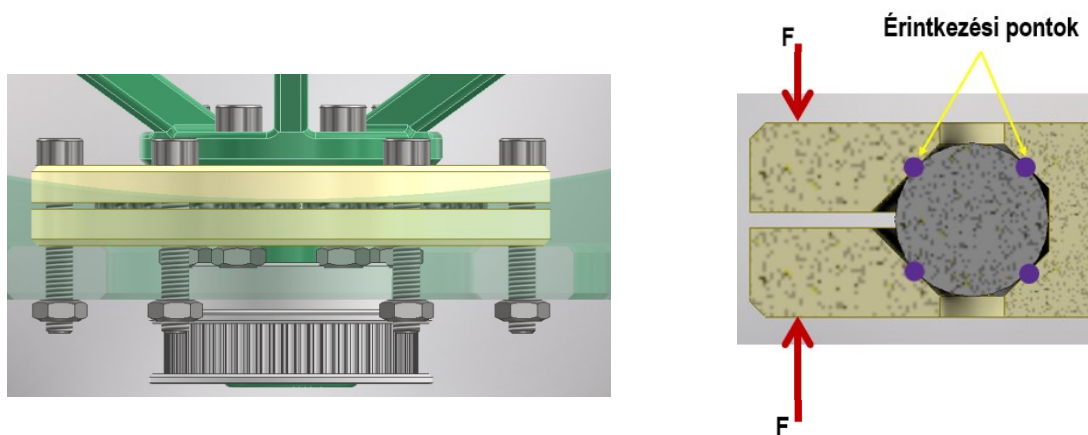
Mivel itt a csapágyat érő erőhatások, egyértelműen nem meghatározhatók, olyan csapágykialakításokat kellett keresnem, amik egyaránt képesek radiális, illetve axiális terheléseket is felvenni. Ezek alapján két csapágytípus jelentette a kiindulási alapot, amik eleget tesznek ezeknek a követelményeknek, a keresztgörgős, illetve ferde hatásvonalú csapágy. A ferde hatásvonalú csapágyak kiválóan kezelik a kombinált axiális és radiális terheléseket, magas merevséget és pontosságot biztosítanak, miközben minimális holtjátékkal működnek. A keresztgörgős csapágyak egyedi görgőelrendezése nagy teherbírást nyújt mindkét irányban, és kompakt kialakításuknak köszönhetően helytakarékosak, miközben stabil pozicionálást és kiváló dinamikai teljesítményt biztosítanak. Mindkét csapágytípus alkalmas lenne a feladat elvégzésére, de a körasztal súlyát tekintve nem jelentenének olyan mértékű előrelépést, mint egy műanyagházas változat. A csapágyam gördülőelemeit az előző változatban használt csapágyból nyertem ki, összesen 16 db 9,5 mm átmérőjű csapágygolyót használtam. A csapágy gyűrű kialakítása a keresztgörgős csapágy mintájára történt. Fontos volt, hogy játégmentes és összeszerelhető legyen, erre a legegyszerűbb megoldás, ha a külső gyűrű osztott, ezzel biztosítva a szerelhetőséget és a megfelelő előfeszítéssel a játégmentes gördülést.



38.ábra. Csapágy 3D-metszete

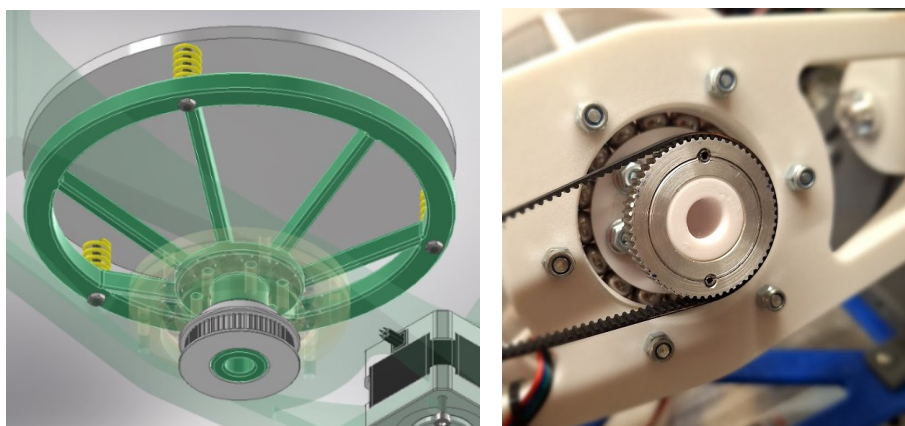
Mivel a keresztgörgős csapágy nem golyókat használ gördülőelemként, így a golyók és a 45°-os döntött felületek lila pontokkal jelölt érintkezésének helyén pontszerű terhelés ébred (39. ábra). Mivel a csapágy szögmerev és terhelése minimális, ezért egyetlen csapágyat alkalmaztam a szokásos kettő helyett. Az első prototípus PETG-ből készült, de az anyag túl rugalmas és nem elég kemény, hogy biztosítsa a hosszútávú működést. PLA már egy fokkal jobb választás, mert megfelelően kemény és rideg, de a kopásállósága és a gördülési ellenállása még mindig nem elegendő. A választásom végül az Igus iglidur® i150-re esett, amely egy speciálisan tribológiai szempontból optimalizált műanyag, kiváló kopásállósággal, alacsony súrlódási

együttműködővel, kellő merevséggel és ütésállósággal rendelkeznek. A csapágy előfeszítése hat darab csavaron keresztül történik, továbbá ezek biztosítják a körszital rögzítését a billenőasztalon. Megjegyzem, hogy felmerült a tányér vagy spirálrugós kialakítás is, melyek a kopás mértékétől függetlenül szolgáltatják az állandó szorítóerőt. Ezt a bonyolult kialakítást elvetettem, mivel olyan tervezési szempontokat is figyelembe kellene venni, amire ennél a megoldásnál nem volt szükség. A csapágy élettartamára vonatkozóan következtetéseket csakis hosszútávú használat után lesz lehetőség levonni.



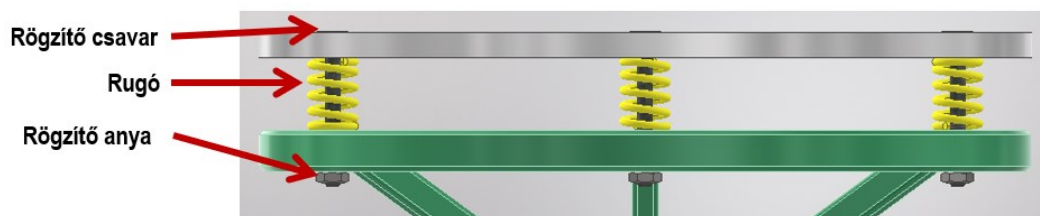
39.ábra. Csapágy beszerelve és a terhelése

A csapágy belső gyűrűjéhez a tárgyasztal tartóeleme csatlakozik. A súly minimalizálása érdekében egy egyszerűbb küllős kialakítást hoztam létre. A körszital hajtására szolgáló tengelyszerű túlnyúlás furatos kialakítású, hogy a tárgyasztal fűtésére szolgáló elemek vezetői itt távozhassanak, ezzel kevésbé akadályozva a forgómozgást. Ehhez a bordás kereket is módosítani kellett, hogy a nagyobb átmérőjű tengelyt fogadni tudja. Ezért kibővítettem a kerék furatát, és elhelyeztem benne egy perselyt két rögzítőcsavarral.



40.ábra. Körszital hajtásrendszere

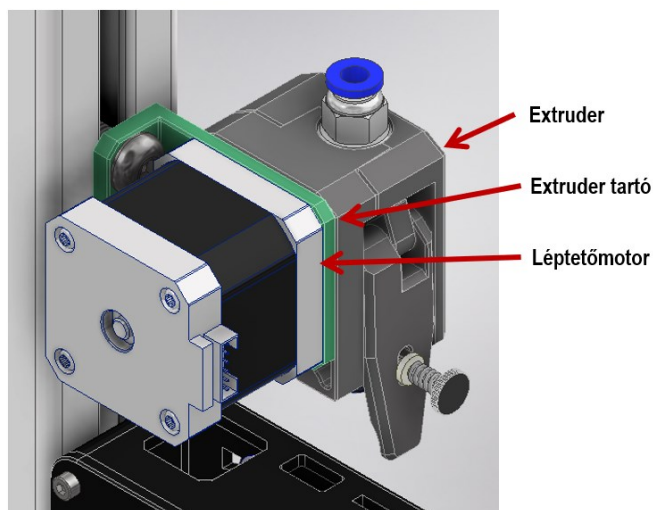
A tárgyasztal egy 5 mm vastag 150 mm átmérőjű alumínium lemez. Az előző változaton ez egy hasonló méretű acéllemez volt, de az alumínium a súly szempontjából ideálisabb választás, és ilyen méretek mellett a deformációtól sem kell tartani. Három ponton kapcsolódik a körasztalhoz, ehhez egy, a nyomtatóknál elterjedt, rugós felfüggesztést alkalmaztam, ezzel a csapágyból, a tartóból, illetve az egyéb alkatrészekből származó pontatlanságok könnyedén kompenzálhatóak a csavar végén elhelyezett szárnyasanyával. Ha indokolt, az asztal fűtése is megoldható, úgy terveztem az alkatrészeket, hogy a fűtőpanel a tárgyasztal alján könnyedén elhelyezhető legyen. A pontos pozicionálás ebben az esetben nem okoz gondot, mivel az asztal az indításnál felvett helyzetét tekinti nullpontnak, referenciapontként szolgáló végálláskapcsolóval nem rendelkezik.



41.ábra. A tárgyasztal rögzítése

2.2.8. Extruder

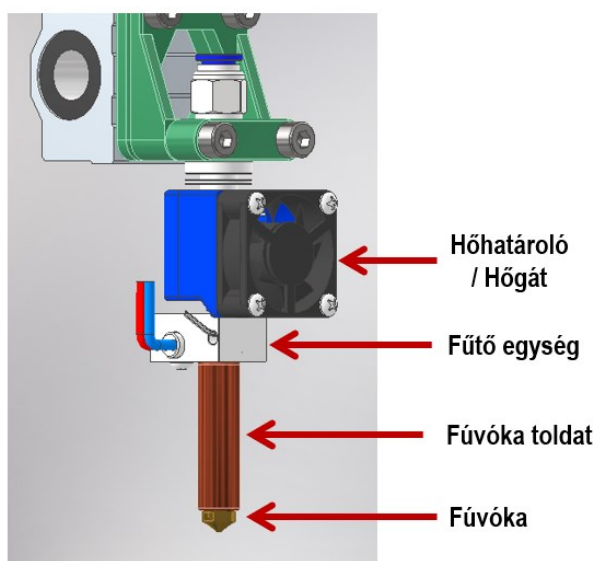
A nyomtatási alapanyag továbbítására két elterjedt megoldás létezik. A direct-drive extruder, ahol az egység közvetlenül a fűtőegység előtt helyezkedik el és a bowdenes extruder, ahol ugyanez valahol a nyomtó vázán van rögzítve, a kettő összeköttetéséről pedig PTFE cső gondoskodik. Mint már korábban is említettem, a tervezés során áttértem a bowdenes megoldásra. Legnagyobb előnye ennek, hogy a nyomtatófej könnyebb lesz, és a szerelés is egyszerűbb. Míg a direct-drive kialakítás pontosabb anyagtovábbítást tesz lehetővé, ennél ez pontosabb beállítást igényel a plusz PTFE cső miatt, és nagyobb bizonytalanságot eredményez. Az új extruder dual gear kialakítású, ami annyit jelent, hogy a filament mozgását két hajtott kerék végzi, míg az előző változatnál ezért egy hajtott kerék és egy szabadonfutó görgő felelt.



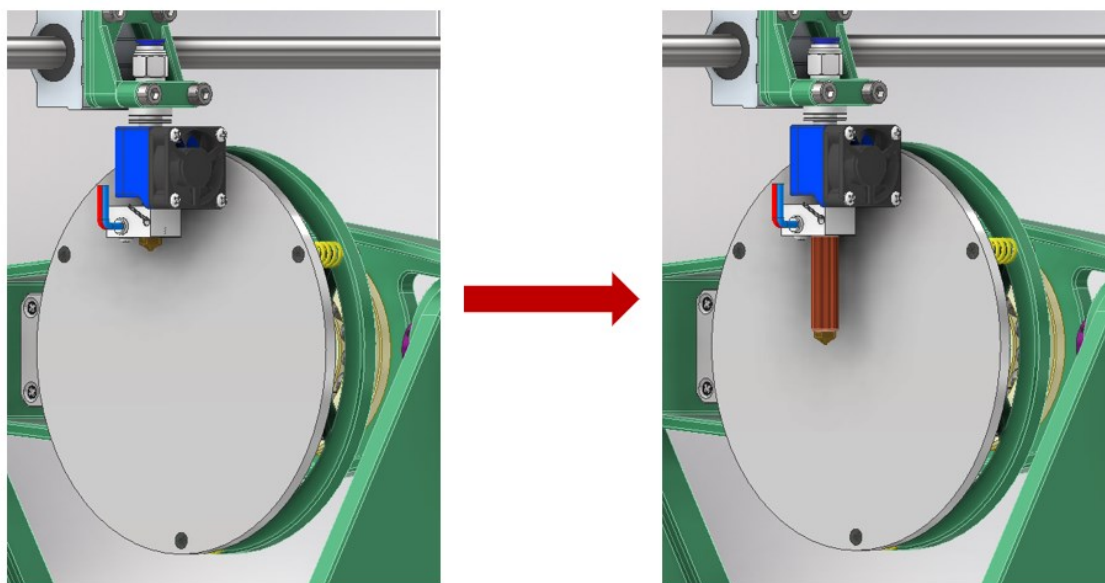
42.ábra. Extruder kialakítása

2.2.9. Nyomtatófej

A nyomtatófej kidolgozása az előző változatban nem készült el, ezért erre egy teljesen új megoldást hoztam létre. Mivel a hőgát, a fűtőegység és a fűvóka alapesetben nem elég hosszú, hogy elérje az asztal közepét teljesen elfordított állapotban (43. és 44. ábra), ezért itt egy közdarabot helyeztem el. Azáltal, hogy a fűvóka nem közvetlenül csatlakozik a fűtőegységhez, annak a toldaton keresztül kell felmelegítenie azt. Hogy a megfelelő hővezetés biztosítva legyen, a toldat vörösrézből készült, esztergálással. Továbbá, hogy a tárgyasztal és annak tartóelemiből származó pontatlanságokra is tekintettel legyek, a fűvóka méretét is növeltem.



43.ábra. Nyomtatófej részegységei

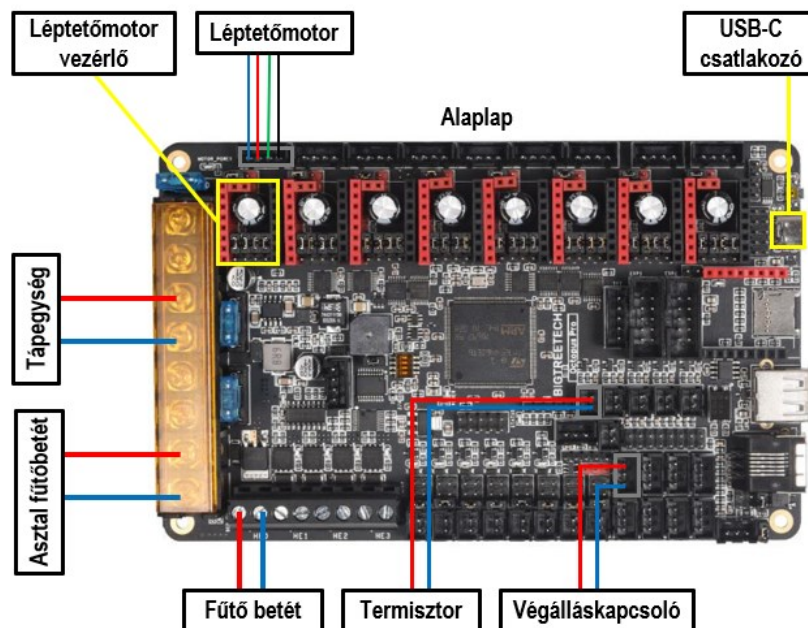


44.ábra. Meghosszabbított fűvóka szemléltetése

2.3. Elektromos tervezés és programozás

2.3.1. Alaplap

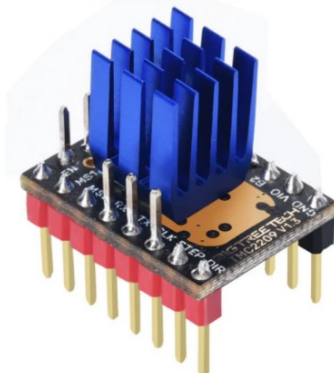
A nyomtató elektromos tervezése során számos szempontot figyelembe kellett vennem. Az előző kialakítás nem tette lehetővé az egy alaplapról történő vezérlést, mivel az nem rendelkezett 7 léptetőmotor-kimenettel. Hogy ezt a problémát megoldjam, keresnem kellett egy olyan alaplapot, amely eleget tesz ennek a kritériumnak. Választásom a BIGTREETECH Octopus Pro alaplpra esett. Azon kívül, hogy támogatja 8 független léptetőmotor vezérlését, kapható olyan konfigurációval, amely az összes ismert Firmware-t támogatja. Nem mellesleg nagy teljesítményű processzorral van szerelve, ami pontosabb pozicionálást tesz lehetővé az akár öt tengely mentén történő szinkronmozgásoknál is. A léptetőmotor-vezérlők is cserélhetőek, és számos olyan funkciót támogat, amelyek a későbbiekben lehetővé teszik a teljesen automatizált működést, például az asztalbemérést és -kompenzálást. Egy egyszerűsített bekötési ábra látható az 45. ábrán.



45.ábra. Az alaplap és a hozzá kapcsolódó elemek

2.3.2. Léptetőmotor és vezérlő

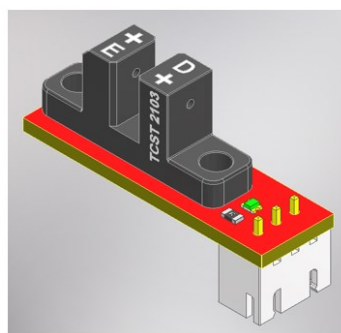
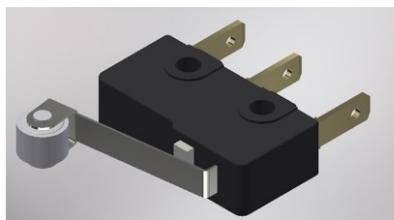
Az alaplaphoz a TMC2209 korszerű vezérlőt választottam, amely egy csendes és hatékony léptetőmotor-meghajtó, és számos fejlett funkcióval rendelkezik. Az alacsony zajszint, a dinamikus áramvezérlés, az érzékelő nélküli homing és a könnyű integrálhatóság miatt az egyik legjobb választás volt erre a célra. A léptetőmotorokon nem módosítottam, az előző változatból kisserelt NEMA 17 típusú motorokat használtam. Ez a léptetőmotor-család széles körben elérhető, sokoldalú, megbízható és könnyen használható motorokból áll, amelyek ideálisak különféle mozgásvezérlési feladatokhoz, ezért 3D nyomtatókban is előszeretettel alkalmazzák.



46.ábra. TMC2209 léptetőmotor vezérlő

2.3.3. Végálláskapcsolók

A pontos pozicionálás biztosítására kétféle megközelítést alkalmaztam. Az alaptengelyek mentén a megszokott görgős karral szerelt mikrokapcsolót használtam. Az X, Y és Z-tengely mentén semmi sem indokolta, hogy ettől eltérő megoldást válasszak, hiszen ezek a mikrokapcsolók nagy ismétlési pontossággal dolgoznak, így hosszú időn keresztül képesek biztosítani a precíz működést. Viszont az érzékelés fizikai kapcsolat alapján valósul meg, ezért keresnem kellett egy olyan megoldást, ami lehetővé teszi az e nélküli működést. Ekkor döntöttem el, hogy a B-tengely mentén optikai végálláskapcsolót fogok alkalmazni. Mivel ez egy forgó tengely, és nem rendelkezik kimondott fizikai határolóval, ezért nem szerettem volna, hogy egy esetleges ütközés során a végálláskapcsolóban is kárt tegyen.



47. ábra. Mechanikus és optikai végálláskapcsolók

2.3.4. Fűtés

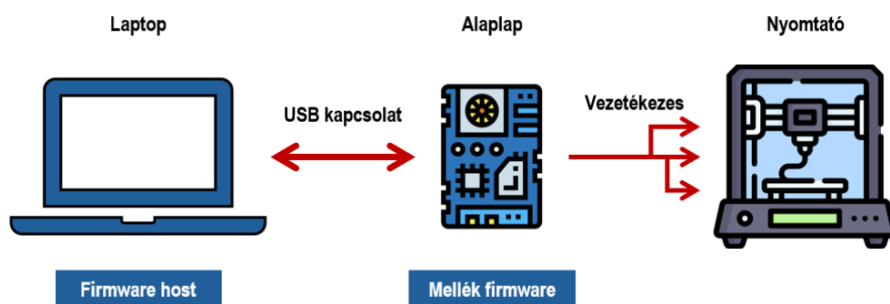
Az nyomtatófej fűtőbetétjét is cserélni kellett. Az új változat már az alaplap által is használt 24 V-os tápfeszültséggel tud üzemelni, és az előző változatban alkalmazottnál nagyobb teljesítményű kerámiaegységet választottam. Az asztal fűtése az előzőekben nem volt megoldva, egyelőre az én változatomba sem építettem be. Ha az alkalmazás igényli, az asztal alsó részére egy nagy teljesítményű fűtőelem ragasztható. Mindkét fűtőelem esetében a hőfok szabályozás termisztorokon keresztül történik.

2.3.5. Firmware

A nyomtató firmware fontos szerepet játszik a nyomtató működésében és hatékonyságában. Ez a beépített szoftver irányítja a nyomtató hardveres komponenseit, valamint kommunikál a csatlakoztatott eszközökkel, mint például a számítógépekkel vagy hálózati rendszerekkel. Esetemben még fontosabb, mivel nem egy hagyományos nyomtató, és a megfelelő firmware kiválasztásával garantálható, hogy az összes beszerelt komponens az elvárásoknak megfelelően működjön. Az alaplap három különböző típust támogat, ezek név szerint a RepRap, a Marlin és a

Klipper. A felsoroltak közül számomra a Klipper jelentette az optimális megoldást. Fejlettebb mozgásvezérlést tesz lehetővé, és számos beépített diagnosztikai eszközt is tartalmaz. A Klipper konfigurációja fájlalapú, így a beállítások gyorsan és könnyen módosíthatók. A nyomtató újraindítása nélkül is képes vagyok változtatásokat eszközölni, például módosíthatom a nyomtatási sebességet vagy a hőmérséklet-beállításokat. A Klipper integrálható olyan webes interfészekkel, mint az OctoPrint vagy a Mainsail, amelyek segítségével távolról figyelhetem a nyomtatási folyamatot, és valós időben módosíthatom a beállításokat. Ezek a funkciók részben megtalálhatók a másik két típusban is, de nem engednek ekkora mozgásteret, mint a Klipper esetében.

A Klipper sajátossága, hogy a firmware nem az alaplapon fut, minden esetben szükséges hozzá egy külső mikrokontroller, amely futtatja a vezérlőszoftver fő részét, és felelős a számítások elvégzéséért, mint például a szerszámpálya számítása és a G-kód feldolgozása. Ezzel megkönnyíti a vezérlőpanel működését, mert az csak a parancsok végrehajtásáért felel. Erre a célra az alapértelmezett egy Raspberry-Pi, esetemben ezt egy régi Linux operációsrendszert futtató laptop helyettesíti, amely virtuális mikrokontrollerként funkcionál. Ez lehetővé teszi, hogy közvetlenül hozzáférjek a vezérlőszoftver fájljaihoz is, így mélyrehatóbb módosításokat is könnyedén végrehajthatok. A két eszköz között USB-összeköttetés gondoskodik a zavartalan, valós idejű adattovábbításról. A rendszer elvi felépítése az 48. ábrán látható.



48.ábra. Vezérlés részei és bekötése

A Klipper vizuális kezelőfelülete webes alkalmazáson keresztül érhető el. Erre is számos lehetőséget kínál, ilyenek például az OctoPrint, Mainsail és a Fluidt is. Ezek felépítésüket tekintve nagyon hasonlóak, megtalálható a kézi mozgatásra szolgáló felület, a különböző diagnosztikai és hibakeresési funkciók, lehetőséget biztosít a G-kód feltöltésére és kezelésére, valamint a beállítások, konfigurációk kezelésére is. Ahhoz, hogy az 5-tengelyes nyomtatót vezérelni tudjam, több módosítást is eszközölnöm kellett. A nyomtató vezérléséhez alapvető szükséglet a nyomtató konfigurációs fájl megléte. Ez tartalmazza a kinematikához rendelt léptetőmotorok és hajtásrendszer minden olyan paraméterét, amelyek elengedhetetlenek a mozgások

számításához. Itt létrehozhatunk, kisebb G-kód makrókat is, amelyekkel előre definiált mozgásokat hívhatunk be egy parancs segítségével. A vezérlő szoftver a könyvtárában külön szekciót biztosít a nyomtató kinematikájának leírására. Itt alapértelmezetten megtalálható számos típus, de saját konfigurációt is létrehozhatunk a Python programozási nyelv ismeretében. Én a Cartesian nyomtatók kinematikai leírását használtam, és két plusz manuális léptetőmotort definiáltam a konfigurációs fájlban. Ezzel elértem, hogy egy egyedi paranccsal akár G-kódot beillesztve is pozícióvezérelten működtethető a B és C-tengely. Az X és B tengelyek meghatározása és a szükséges paraméterek láthatóak az 49. ábrán a konfigurációs fájlból.

```
[stepper_x]
step_pin: PF13
dir_pin: !PF12
enable_pin: !PF14
microsteps: 16
rotation_distance: 40
endstop_pin: !PG6
position_endstop: 0
position_max: 378
homing_speed: 50

[manual_stepper b]
step_pin: PG4
dir_pin: PC1
enable_pin: !PA0
microsteps: 16
rotation_distance: 120
endstop_pin: PG11
```

49.ábra. Konfigurációs fájl részlet

Mivel az alapértelmezett homing-metódus csak az alap három tengelyre vonatkozik, ezért egy makrót hoztam létre, amely már mind az öt tengely bemérését végrehajtja (50. ábra). Ez a kódrészlet a G-kódban homing_xyz paranccsal könnyedén behívható, és végrehajtja az összes lépést, amit a konfigurációs fájlban meghatároztam. A nullpontfelvétel az X, Y és Z-tengelyekkel kezdődik. Ezután leáll a végállaskapcsolókról, és mivel ebben a pontban biztonságosan felvehető a billenőasztal referenciapontja, nem volt szükség ehhez további mozgásokra. Miután ez megtörténik, a kódból kiolvasható, hogy a körasztal is végez mozgást. Erre azért van szükség, mert a tengelyek az első mozgásparancsig szabadon futnak, és habár bemérést nem igényel, a szükségtelen elmozdulások elkerülése végett ez elengedhetetlen.

```
[gcode_macro homing_xyz]
gcode:
  G90
  G28 X0 Y0
  G28 Z0
  G1 X10 Y10 Z10
  MANUAL_STEPPER STEPPER=b MOVE=-150 SPEED=5 stop_on_endstop=1
  MANUAL_STEPPER STEPPER=b set_position=-90
  MANUAL_STEPPER STEPPER=b MOVE=0 SPEED=10
  MANUAL_STEPPER STEPPER=c MOVE=90 SPEED=20
  G1 Z10
  G1 X177 Y90
```

50.ábra. Nullpontfelvétel makró

2.4. Beállítás és tesztelés

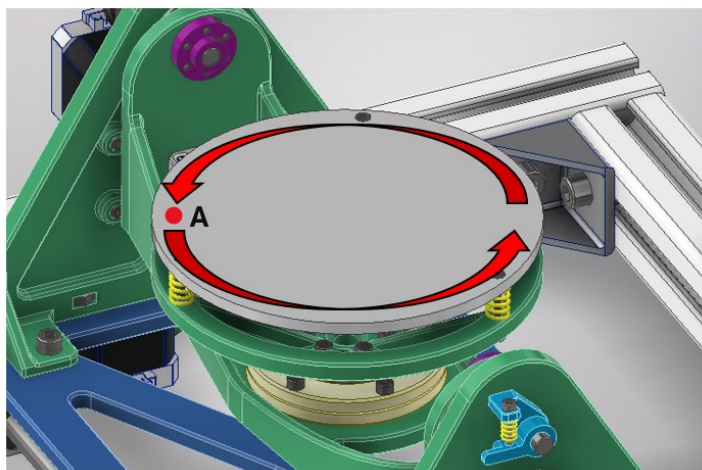
A munkám akkor tekinthető sikeresnek, ha a tervezési, a szerelési és a programozási folyamatok után a nyomtatás is sikeres lesz. Ehhez elengedhetetlen tesztelni, és megfelelően beállítani a berendezést, a megfelelő nyomtatási minőség elérésének céljából. A folyamat részben meg-
egyezik a hagyományos gépeknél megszokottal, de szükség van mérésekre és tesztekre, a speciális kialakítás miatt. A folyamat bonyolultságát az okozza, hogy az egyes paraméterek, fő-
ként, ha az egyes tengelyek mozgását vizsgáljuk, nehezen elkülöníthetők egymástól.

A folyamatot két fázisra bontottam. Első körben meggyőződtem minden olyan funkció működéséről, amelyeket nyomtatás nélkül is van lehetőség vizsgálni. Korlátozottak voltak a lehetőségeim, hiszen bizonyos paraméterekről csakis a nyomtatás közben vagy az elkészült tárgy kiértékelésével vonhatunk le megfelelő következtetéseket. A tárgyasztal beállításával kezdtem a folyamatot. Ehhez, ahogy az 51. ábra is szemlélteti, egy mérőórát szereltem fel a nyomtatófej helyére, egy közdarab segítségével. A mérőóra századmilliméter pontosságú, ami erre a felhasználásra bőven elegendő, mivel a nyomtató vezérlőszoftvere maximum 1-0,5 tizedmilliméter pontos pozicionálást biztosít a tengelyek mentén.



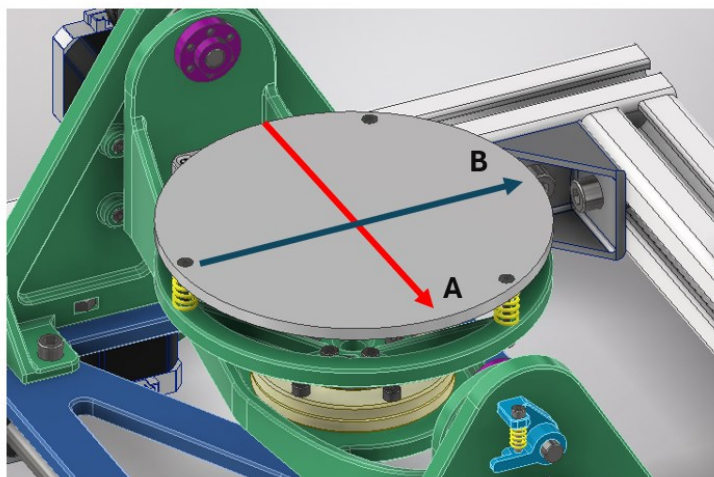
51.ábra. Beméréshez használt mérőóra

Első lépésként kimértem és beállítottam az asztal axiális ütését. A méréshez az A pontban megérintettem az asztalt és a C-tengelyt forgatva, a csavarokat állítottam, amíg tizedmilliméter alá sikerült csökkenteni ezt az értéket. Ez a hiba a csapágy és a sok egyéb nyomtatott alkatrészről származó pontatlanságoknak az eredménye.



52.ábra. Axiális ütés kompenzálása

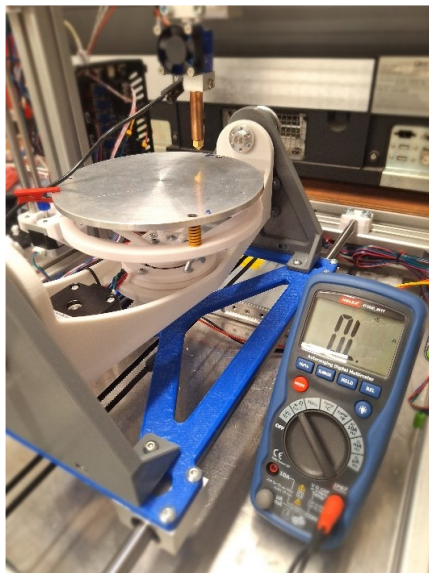
Következő lépésként az asztal keresztirányú eltéréseit mértem. Ehhez a mérőórával letapogattam az A és B-nyilak mentén az asztalt. Az A-nyíl menti eltérések javarészt az alkatrészek és az összeszerelés pontatlanságából származnak, kis mértékben van lehetőség utánállításra, az Y lineáris tengely szögének változtatásával. Viszont a mérés eredményei nem indokoltak különösebb beavatkozást, mivel itt is 0,1 mm körüli értékeket mértem. A B-nyíl menti eltérések ezzel szemben már pontosan beállíthatók a B-tengely optikai végálláskapcsolójának állításával. Ebben az esetben addig ismételtam a nullpontfelvételt, és állítottam a szenzor karjához csatlakozó csavaron, amíg elfogadható értéket nem kaptam.



53.ábra. X és Y irányú szögeltérés mérése

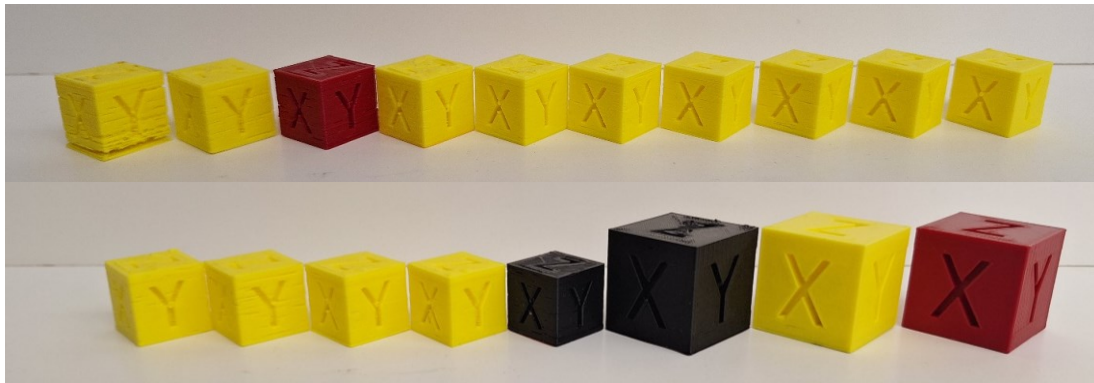
A nyomtatás megkezdése előtt még elengedhetetlen a fúvóka magasságának meghatározása az asztalhoz viszonyítva. Ehhez egy, az eddigiektől eltérő megoldást alkalmaztam. Mivel a nyomtatófej nem rendelkezik saját tapintóval, ezt egy multiméterrel helyettesítettem. A mérőeszközt szakadásvizsgálatra beállítottam, és csatlakoztattam a két pólusát a tárgyasztalhoz

és a nyomtatófej vezető részéhez. Ezáltal elértem, hogy a két komponens érintkezésekor a multiméter hangjelzést ad visszacsatolásként. Az asztal magasságának meghatározásához, megérintettem az asztal több pontját, és a kapott eredményeket kiolvasva és átlagolva megkaptam az asztal Z-irányú pozícióját.



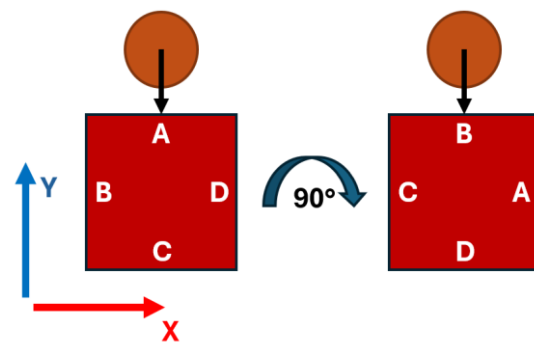
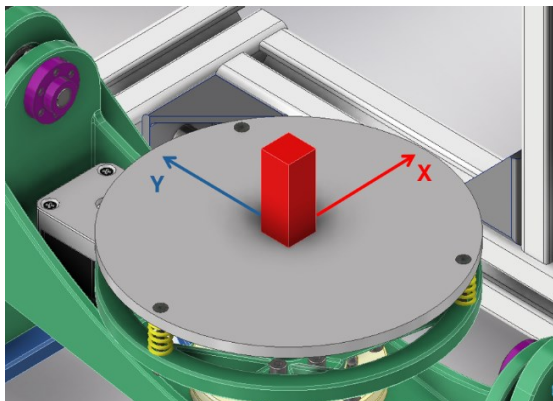
54.ábra. Az asztal Z-irányú bemérése

Az előző bekezdésekben foglaltak szerint elvégeztem minden olyan mérést és beállítást, amelyek megvalósítása nyomtatás nélkül lehetséges. Viszont a fennmaradó kalibrációk és tesztek elvégzéséhez tesztdarabokat kell készíteni, amelyek nyomtatása közben vagy után azokat kiértékelve eszközölhetők a szükséges beállításváltoztatások. Ezek a munkadarabok nem igényeltek speciális G-kódot, mivel három tengely mentén készültek. Első körben az alapértékek beállítása történt, ami megegyezik bármilyen hagyományos nyomtatóéval. Az első pár teszt-kocka során finomhangoltam a megfelelő anyagáramlás értékét, mivel a túl sok, illetve túl kevés extrudált anyag is problémákat okoz. Ezután az egyes tengelyek elmozdulásait kalibráltam, hogy méretpontos alkatrészeket kapjunk. Ezt a folyamatot elvégeztem a forgó tengelyek esetén is, hogy a pozicionálás ebben az esetben is precíz legyen. A végeredmény az 55. ábrán látható, 18 próbálkozás után szinte tökéletes XYZ kockákat kaptam kézhez.



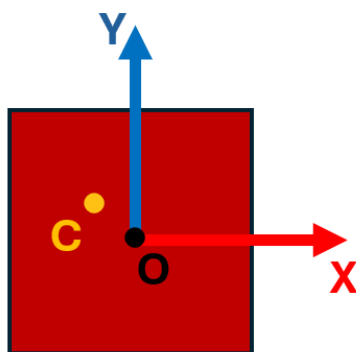
55. ábra. Nyomtatási paraméterek beállításának fázisai

A következő lépésben meghatároztam a B és C-tengelyek pozícióját, amely már nyomtatóspezifikus folyamat. Ehhez az alábbi tesztornyot nyomtattam, oly módon, hogy felvettem egy nullpontot az asztal egy tetszőleges pontján, lehetőleg minél közelebb a középpontjához, és a G-kód is úgy készült, hogy a tárgy alsó felületének középpontja is erre a pontra essen. Az elkészült tárgy segítségével a C-tengely pozícióját az alábbi módon határoztam meg. Először is a hasáb hátsó oldalára álltam a nyomtatófejjel, majd Y-irányban megérintettem azt, és feljegyeztem az érintési pont Y-koordinátájának értékét. Ezután távolabb jártam, majd elfordítottam az asztalt 90° -kal, majd ezen az oldalon is megérintettem a munkadarabot.



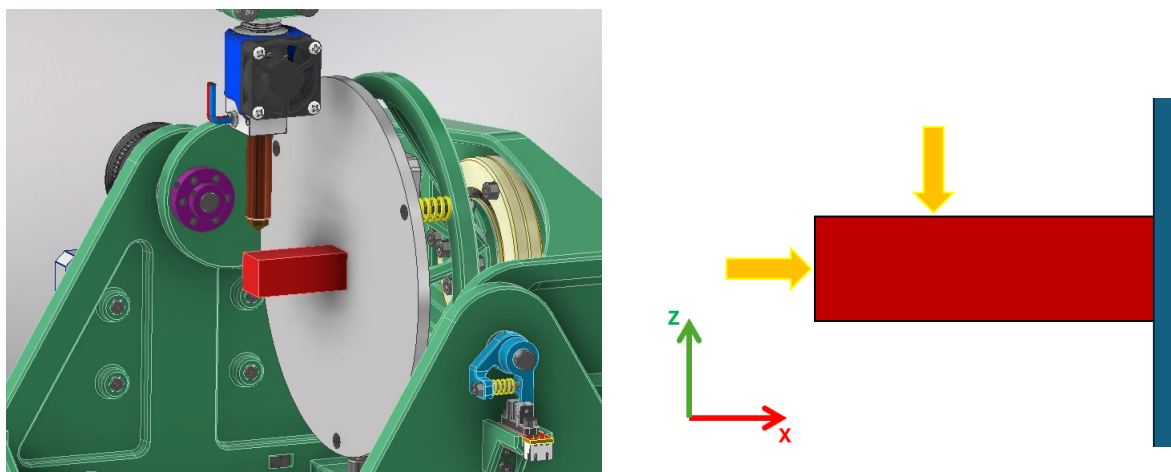
56. ábra. C-tengely bemérése

Miután mind a négy oldalon végrehajtottam ezt, a kapott koordinátákból könnyedén kiszámítható, hogy a nullpontként felvett O pont, hol helyezkedik el a C-tengelyhez képest, amelyet a 57. ábrán a C pont jelöl. Ha helyesek voltak a számításaim, akkor megismételve a nyomtatást, a kompenzált O-pont koordinátákkal, a torony tökéletesen illeszkedik a C-forgástengelyre és mind a négy oldalon mért Y-koordináta azonos.



57.ábra. C tengely kompenzációja

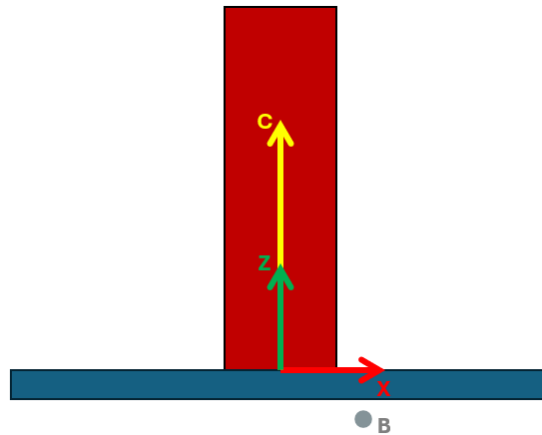
B-tengely meghatározása hasonlóképpen történt. A már ismert C-tengelyre illesztettem a munkadarab nullpontját, és kinyomtattam az eddig is használt darabot. A mérés ebben az esetben szigorúan a B-tengely használatával történt, hogy a C-tengely jelentette bizonytalanságot kiküszöböljem. A nyomtatás befejeztével elfordítottam az asztalt 90° -kal és a nyomtatófejjel megérintettem a munkadarab felületét X és Z-irányban egyaránt, ahogy a 58. ábrán is látható. Az érintések után feljegyeztem az érintési pontokat, vagyis az érintés irányának megfelelő koordinátákat.



58.ábra. B tengely bemérése

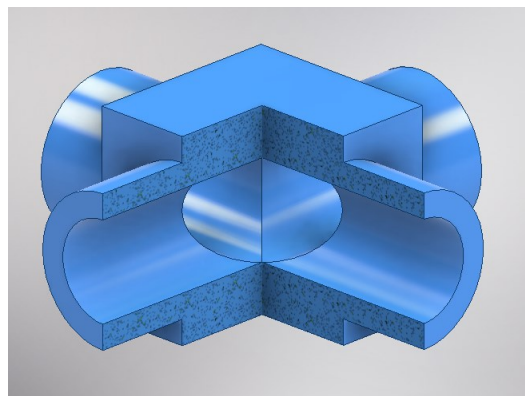
Ezt megismételtam az asztal -90° -kal történő billentése esetén is. A kapott koordinátákból kiszámítható, hogy a B-tengely, amely az Y-tengely körüli forgatást biztosítja, hol helyezkedik el a C-tengelyhez és az asztal síkjához viszonyítva. Ez látható az 59. ábrán. A mérések során kapott X-koordináták a Z-irányú eltérés, a mért Z-értékek a B-tengely X-irányú eltérésére vezethetők vissza. A globális koordináták szerint Z-irányú eltérés nem volt mérhető, tehát a tengely az asztal síkjára esik, X-irányban viszont mérhető volt, közel 0,4 mm eltérés.

Erre fizikai beállítás nem létezik, csupán a G-kódban eszközölhetőek különböző kompenzációs lehetőségek.



59.ábra. B tengely kompenzáció

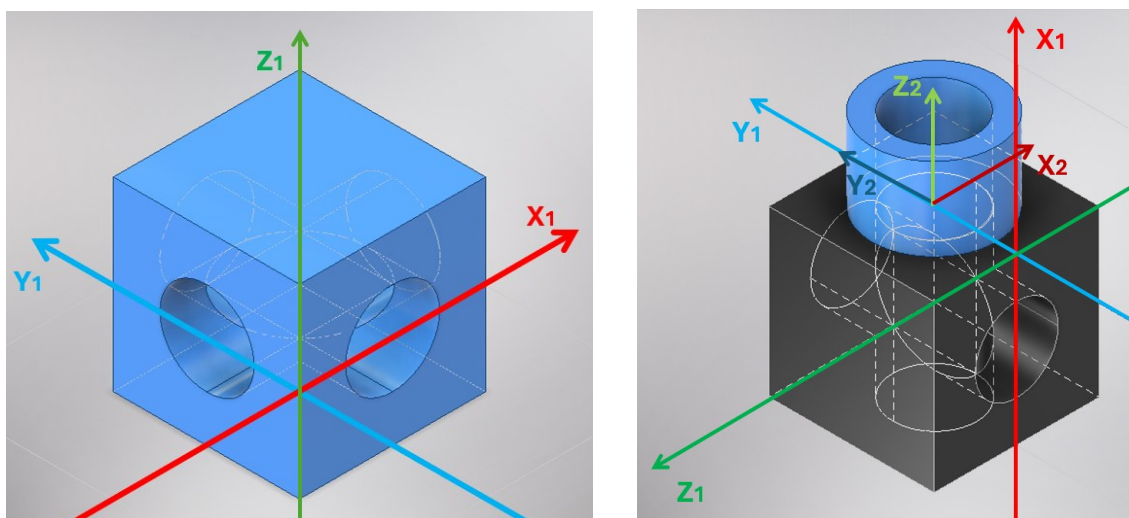
Most, hogy minden szükséges adat rendelkezésemre állt, nyomtatás közben is tesztelhettem az öt tengely működését. A munkadarab kiválasztásánál céлом volt, hogy nem csupán az öt tengely tényleges működését bizonyítsam, hanem a technológia létjogosultságára is rávilágítsak. Ezért választottam egy kockát, amelynek élei 20 mm hosszúak. A kocka négy oldalán található csőcsonkok furatai a kocka alaptesten keresztül is folytatódnak. A könnyebb értelmezhetőség érdekében a tárgy 3D-metszete látható az 60. ábrán.



60.ábrán. Próbatest metszete

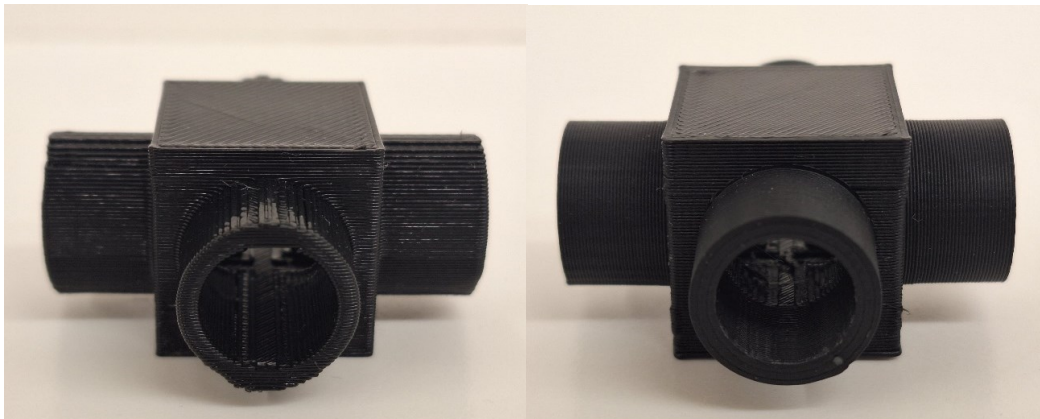
A tárgy elkészítéséhez viszont még egy utolsó dolog elengedhetetlen volt, ez pedig nem más, mint a G-kód. A 3D-nyomtatás során a G-kód tartalmazza a nyomtató számára az összes szükséges utasítást a modell rétegenkénti felépítéséhez. Létrehozásához két dologra van szükség, az alkatrész modelljére és egy szeletelőszoftverre, amely a beállított paraméterek alapján

legenerálja a szerszámpályát. 5-tengelyes nyomtatás esetén ez egy bonyolult folyamat végeredménye. A 61. ábra bal felén az alkatrész alapértelmezett orientációja látható. Ebben a helyzetben kerül kinyomtatásra a furatokkal ellátott alaptest. Ezután megtörténik megfelelő szögbe történő forgatása, ez a jobb oldalon látható. A kocka felső lapjára ebben a helyzetben nyomtatjuk a csőcsontot (jobb oldalon, késsel jelölve), majd ezután újabb forgatásokkal elkészítjük a többit is.



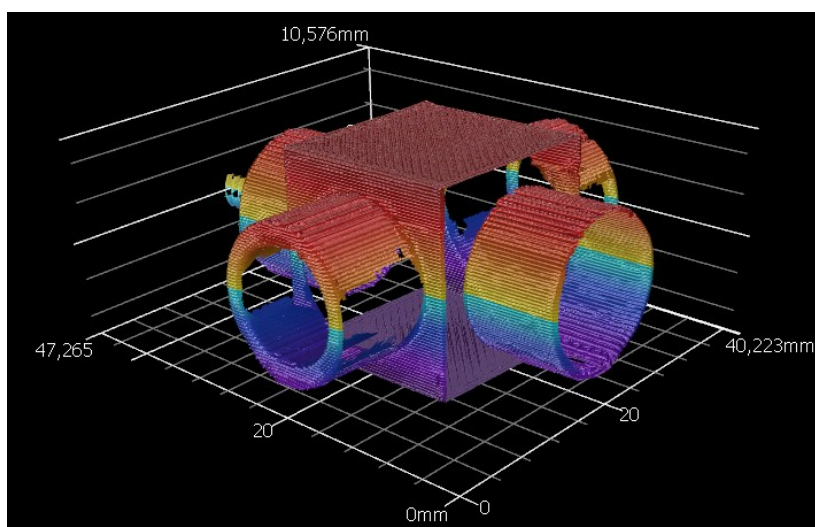
61.ábra. Alapértelmezett és a forgatás utáni orientáció

Ennél az alkatrésznél nem okozott különösebb gondot a G-kód kézzel történő elkészítése, mivel ismerek minden olyan paramétert, amelyek ehhez szükségesek. Elegendő volt meghatározni a síkot, melyre nyomtatni szeretnénk, és a részgeometriát megfelelően pozicionálni azon. Jelen esetben elkészítettem a kocka kódját, ügyelve, hogy utóbbi Z és X-irányban megfelelően legyen elhelyezve. Majd miután megkaptam a kódrészleteket, egymás után fűztem őket és beillesztettem közéjük a forgatásokhoz szükséges parancsokat és a megfelelő mozgási utasításokat, hogy mindez ütközés nélkül végrehajtódjon. Az alkatrészt elkészítettem hagyományos nyomtatással is. A két alkatrész között a különbség szemmel is jól látható. Az öt tengely mentén készült alkatrész alakhelyesebb, support-ot nem igényelt és nem tartalmazza a csőcsontokon a 3D nyomtatásra jellemző lépcsőzetes struktúrát.



62.ábra. 3-tengelyes és 5-tengelyes nyomtatón készült alkatrész

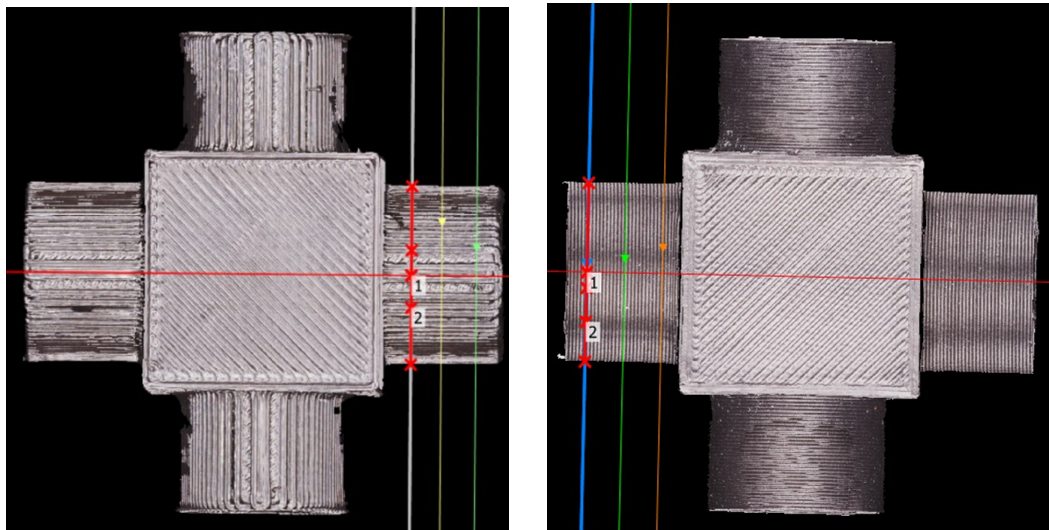
Hogy a különbségek számokkal is kifejezhetőek legyenek, különböző méréseket végeztem az alkatrészeken. Ehhez egy Keyence VR-6000 sorozatú profilmérőgépet használtam. Először a csöcsonkok közötti eltéréseket vizsgáltam, mivel ezek azok a csatlakozó pontok, amelyek kimondottan 5-tengelyes nyomtatással készültek, és itt vártam jelentős javulást. A mérésekhez mindkét alkatrész esetében elkészítettem a nagy felbontású 3D felületmodellt.



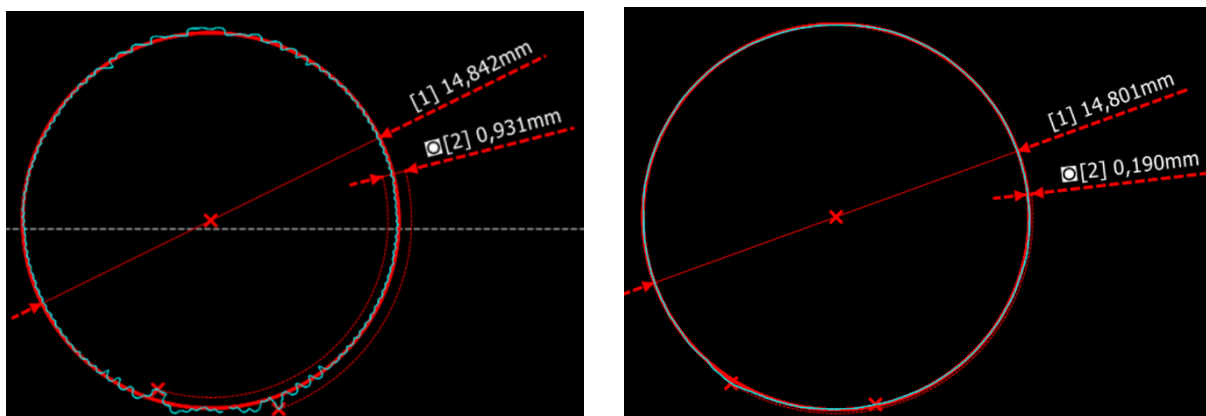
63.ábra. Az egyik alkatrész felületmodellje

Az összevetés során egy alkatrészen belül két csontot ellenőriztem, a kapott eredményekből látszik, hogy az eltérések jelentősek. Az erről készült jegyzőkönyveket az 1. illetve a 2. mellékletek tartalmazzák. A 64. ábra képeit ebből emeltem ki és a mérés helyeit hivatott szemléltetni. A hosszanti piros egyenes a csöcsont tengelyét, a rá merőleges színes vonalak a rá merőlegesen felvett mérési síkok helyeit jelölik. A mérést a síkok és a felület metszetén hajtottam végre. A 64. és a 65. ábrára is érvényes, hogy a bal oldali kép a 3 tengely mentén, a jobb oldali az 5 tengely mentén készült alkatrészt ábrázolja. Az eredmény nagyon jól reprezentálja,

hogy az kísérleti 5-tengelyes alkatrész körkörössége közel 0,2 mm míg a háromtengelyes nyomtatón készülnél ez az érték több min 0,9 mm. Azon túl, hogy a bal oldali alkatrész alakpontosabb, a kedvezőbb felületi minőség előnyösebb.



64.ábra. A mérés helyei

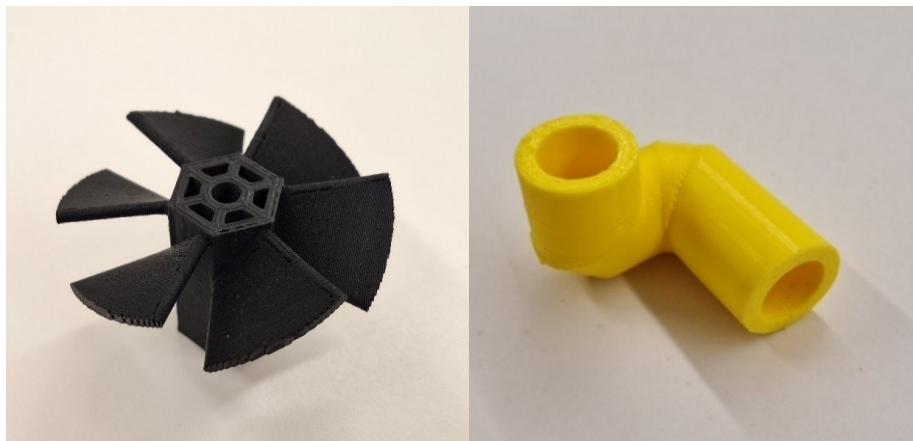


65.ábra. Mérési eredmények

3. ÖSSZEFOGLALÁS

3.1. Eredmények

A nyomtató megépítése óta eddig 91 nyomtatást indítottam, összesen 86 óra aktív nyomtatási idővel és 224 méter filament felhasználásával. Az eddigi nyomtatásokkal főként olyan alkatrészeket készítettem, amelyek segítségével ellenőrizhettem, hogy a nyomtató eleget tesz-e az előzetesen kitűzött követelményeknek, illetve feltérképezhettem a konstrukció esetleges további gyengeségeit, különösen működés közben. Az előző 5-tengelyes gépkonceptió nem volt alkalmas erre, így az új konstrukció jelentős előrelépést biztosított, ezt a bemutatott mérés is alátámasztja. Összességében elmondhatom, hogy az eszközölt módosítások meghozták a várt előrelépést. Alátámasztás nélkül is képes vagyok bonyolultabb alkatrészek előállítására, mint például a 66. ábrán látható turbinakerék vagy a speciális csőalkatrész.



66.ábra. 5-tengelyes nyomtatással készült alkatrészek

A tesztfázis alatt komolyabb meghibásodás nem történt, a nyomtató szinte hiba nélkül teljesíti a nyomtatási feladatokat. A projekt következő lépéseként javasolnám Core XY kialakításra való áttérést. Ez nagyban hozzájárulna a nyomtatás minőségének és sebességének növeléséhez, mivel jelenleg az Y-tengelyre felszerelt tárgyasztal a rossz minőségű csapágyak és magas kialakítás miatt nem előnyös a keletkező rezgések kezelésének szempontjából. Az említett új vonal esetén az asztal mentesülne a nagy dinamikus igénybevételek alól. A szinkron öt tengely megvalósítását is célszerűbbnek tartanám egy optimálisabb vázszerkezettel rendelkező nyomtatón. Nem utolsósorban, a B és C-tengelyek hajtásrendszerének továbbfejlesztését is fontolóra lehet venni a hatékonyabb működés érdekében, ennek tervezése már folyamatban van. További mérések elvégzése is célszerű lehet, amelyek a gép pozicionálásának pontosságát, illetve a non-planáris szeletelés nyújtotta előnyöket vizsgálja.

Szombathely, 2024, november 26.



Bodnár Bence

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] R. K. Gupta, *3D Printing: Fundamentals to Emerging Applications*, 1. kiad. Boca Raton: CRC Press, 2023. doi: 10.1201/9781003296676.
- [2] K. V. Wong és A. Hernandez, „A Review of Additive Manufacturing”, *ISRN Mechanical Engineering*, köt. 2012, o. 1–10, aug. 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [3] J. N. Levesque, A. Shah, S. Ekhtiari, J. R. Yan, P. Thornley, és D. S. Williams, „Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: a scoping review”, *EFORT Open Reviews*, köt. 5, sz. 7, o. 430–441, júl. 2020, doi: 10.1302/2058-5241.5.190024.
- [4] L. Novakova-Marcincinova, J. Novak-Marcincin, J. Barna, és J. Torok, „Special materials used in FDM rapid prototyping technology application”, in *2012 IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, Lisbon, Portugal: IEEE, jún. 2012, o. 73–76. doi: 10.1109/INES.2012.6249805.
- [5] S. Wickramasinghe, T. Do, és P. Tran, „FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments”, *Polymers*, köt. 12, sz. 7, o. 1529, júl. 2020, doi: 10.3390/polym12071529.
- [6] S. T., S. P., és A. M.S., „A review on advancements in applications of fused deposition modelling process”, *RPJ*, köt. 26, sz. 4, o. 669–687, jan. 2020, doi: 10.1108/RPJ-08-2018-0199.
- [7] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, és S. H. Mian, „Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications”, *Advances in Mechanical Engineering*, köt. 11, sz. 2, o. 168781401882288, febr. 2019, doi: 10.1177/1687814018822880.
- [8] C. Klahn, B. Leutenecker, és M. Meboldt, „Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing”, *Procedia CIRP*, köt. 36, o. 230–235, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.01.082.
- [9] A. Dillhoefer, H. Rieder, M. Spies, J. Bamberg, és T. Heß, „Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Using Ultrasound”.
- [10] F. Calignano és mtsai., „Overview on Additive Manufacturing Technologies”, *Proc. IEEE*, köt. 105, sz. 4, o. 593–612, ápr. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2625098.
- [11] N. Guo és M. C. Leu, „Additive manufacturing: technology, applications and research needs”, *Front. Mech. Eng.*, köt. 8, sz. 3, o. 215–243, szept. 2013, doi: 10.1007/s11465-013-0248-8.
- [12] W. Abd-Elaziem és mtsai., „Particle-Reinforced Polymer Matrix Composites (PMC) Fabricated by 3D Printing”, *J Inorg Organomet Polym*, köt. 33, sz. 12, o. 3732–3749, dec. 2023, doi: 10.1007/s10904-023-02819-1.

- [13] S.-I. Park, D. W. Rosen, S. Choi, és C. E. Duty, „Effective mechanical properties of lattice material fabricated by material extrusion additive manufacturing”, *Additive Manufacturing*, köt. 1–4, o. 12–23, okt. 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.07.002.
- [14] „Material Extrusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University”. Elérés: 2024. április 26. [Online]. Elérhető: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>
- [15] I. J. Solomon, P. Sevel, és J. Gunasekaran, „A review on the various processing parameters in FDM”, *Materials Today: Proceedings*, köt. 37, o. 509–514, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.484.
- [16] Y. P. Shaik, J. Schuster, és A. Shaik, „A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes”, *OALib*, köt. 08, sz. 08, o. 1–19, 2021, doi: 10.4236/oalib.1107698.
- [17] L. R. Rodrigues Carneiro és J. J.-P. Z. D. S. Tavares, „Design and implementation of 3D printer for Mechanical Engineering Courses”, *Int J Innov Educ Res*, köt. 9, sz. 3, o. 293–312, márc. 2021, doi: 10.31686/ijer.vol9.iss3.3001.
- [18] M. Yin, Y. Chen, K.-H. Lee, D. K. C. Fu, Z. T. Ho Tse, és K.-W. Kwok, „Dynamic Modeling and Characterization of the Core- XyCartesian Motion System”, in *2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, Kandima, Maldives: IEEE, aug. 2018, o. 206–211. doi: 10.1109/RCAR.2018.8621684.
- [19] „CoreXY | Cartesian Motion Platform”. Elérés: 2024. április 26. [Online]. Elérhető: <https://corexy.com/theory.html>
- [20] R. Zagidullin, T. Mitroshkina, és A. Dmitriev, „Quality Function Deployment and Design Risk Analysis for the Selection and Improvement of FDM 3D Printer”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, köt. 666, sz. 6, o. 062123, márc. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/666/6/062123.
- [21] M. Ratiu, D. M. Anton, és D. C. Negrau, „Experimental study on the settings of Delta and Cartesian 3D printers for samples printing”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, köt. 1169, sz. 1, o. 012026, aug. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1169/1/012026.
- [22] B. M. Schmitt, C. F. Zirbes, C. Bonin, D. Lohmann, D. C. Lencina, és A. D. C. S. Netto, „A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts”, *Mat. Res.*, köt. 20, sz. suppl 2, o. 883–886, febr. 2018, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2016-1039.
- [23] V. Kovan, G. Altan, és E. S. Topal, „Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints”, *J Mech Sci Technol*, köt. 31, sz. 5, o. 2197–2201, máj. 2017, doi: 10.1007/s12206-017-0415-7.

- [24] G. Hsiang Loh, E. Pei, J. Gonzalez-Gutierrez, és M. Monzón, „An Overview of Material Extrusion Troubleshooting”, *Applied Sciences*, köt. 10, sz. 14, o. 4776, júl. 2020, doi: 10.3390/app10144776.
- [25] E. Barnett és C. Gosselin, „Weak support material techniques for alternative additive manufacturing materials”, *Additive Manufacturing*, köt. 8, o. 95–104, okt. 2015, doi: 10.1016/j.addma.2015.06.002.
- [26] X. Li és mtsai., „Supportless 3D-printing of non-planar thin-walled structures with the multi-axis screw-extrusion additive manufacturing system”, *Materials & Design*, köt. 240, o. 112860, ápr. 2024, doi: 10.1016/j.matdes.2024.112860.
- [27] Y. Yao, Y. Zhang, M. Aburaia, és M. Lackner, „3D Printing of Objects with Continuous Spatial Paths by a Multi-Axis Robotic FFF Platform”, *Applied Sciences*, köt. 11, sz. 11, o. 4825, máj. 2021, doi: 10.3390/app11114825.
- [28] T. Zhang és mtsai., „S³-Slicer: A General Slicing Framework for Multi-Axis 3D Printing”, *ACM Trans. Graph.*, köt. 41, sz. 6, o. 1–15, dec. 2022, doi: 10.1145/3550454.3555516.

5. SUMMARY

The design and development of 5-axis 3D-printers is an exceptionally significant and promising scientific endeavor that could lead to substantial advancements in additive manufacturing technology. Traditionally, 3D-printing has primarily relied on layer-by-layer construction using parallel planes, which imposes limitations on manufacturing. While effective for many applications, this method can be restrictive for creating complex parts with intricate geometries or organic shapes, as it depends on a single build plane. In contrast, 5-axis printing transcends these constraints by enabling non-planar slicing, allowing part creation beyond a single orientation.

The primary advantage of a 5-axis 3D-printer lies in its enhanced degrees of freedom. Unlike conventional 3-axis machines that operate along the X, Y, and Z-axes, 5-axis printers add rotation along additional axes, typically called the A, B, and C axes. This capability allows the print head to maneuver optimally around the part, reducing or eliminating the need for support structures. The result is a highly flexible process that lowers material consumption, shortens production cycles by cutting down post-processing, and reduces waste.

A profound benefit of non-planar slicing in 5-axis printing is the enhancement of the mechanical properties of printed parts. In conventional layer-by-layer methods, parts can suffer from anisotropic weaknesses, where bond strength depends on the orientation. A non-planar approach strengthens interlayer bonds by aligning paths with part contours, improving cohesion and structural integrity. This is particularly beneficial for parts needing multi-directional strength or high durability.

My project focused on designing and constructing a 5-axis 3D-printer that embodied these principles. Building on an existing prototype that served as an initial framework, I tackled significant design flaws. The prior model was fundamentally unsound, lacking essential functionality for reliable results. Correcting these issues required comprehensive mechanical and software redesigns, ensuring position-controlled operation that functions effectively and delivers measurable results.

Keywords: *5-axis 3D-printer, Additive manufacturing, Multi-Axis 3D printing,*