

Miskolci Egyetem



GÉPÉSZMÉRNÖKI- ÉS INFORMATIKAI KAR
SZERSZÁMGÉPÉSZETI ÉS MECHATRONIKAI INTÉZET
ROBERT BOSCH MECHATRONIKAI INTÉZETI TANSZÉK

OTDK DOLGOZAT
Több alapanyaggal történő 3D nyomtatás tervezése

KÉSZÍTETTE:
Bene Dániel
Mechatronikai mérnök szakos hallgató

KONZULENS:
Dr. Rónai László
egyetemi adjunktus

Miskolc, 2023.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Elméleti háttér.....	2
2.1. A szálhúzásos technika.....	2
2.2. Nyomtatás több anyaggal és több színnel.....	3
2.3. Megoldások több anyaggal és színnel való nyomtatáshoz	5
3. Automata filament cserélő technika megválasztása	11
3.1. A továbbfejlesztéssel kapcsolatos követelmények	12
3.2. Lehetséges megoldásváltozatok tárgyalása	12
3.3. Megoldásváltozatok kiértékelése.....	15
4. Mechanikai tervezés	17
4.1. Szerszámfejek.....	17
4.2. Szerszámcsereológó kapcsolat	19
5. Elektronikai tervezés	22
5.1. A gép elektronikai rendszerének felépítése	22
5.2. Szerszámfej csatlakozások, CAN busz.....	23
6. Szoftveres beállítások.....	25
6.1. Klipper konfiguráció.....	25
6.2. G-kód makrók.....	26
7. Kalibráció és tesztelés folyamata	28
8. Összefoglalás	30
9. Irodalomjegyzék	31

1. Bevezetés

Napjainkban a 3D nyomtatás egy igen gyorsan fejlődő technológia, melyet széles körben alkalmaznak [1] a teljesség igénye nélkül pl. a mezőgazdaságban, autóiparban, egészségügyben. Számomra is érdekessé vált a terület, mivel így az általam tervezett alkatrészeket viszonylag rövid időn belül és alacsony költségek mellett elő tudtam magamnak állítani. A későbbiekben az érdeklődésem kiterjedt a 3D nyomtatók fejlesztésére és tervezésére is. Véleményem szerint jelenleg a legnagyobb FDM 3D nyomtatást érintő fejlődések az alapanyagok és azok nyomtatás közbeni extrudálásának területén történnek, amelyből adódóan egyre több, különböző tulajdonságú elemeket tudunk előállítani. A 3D nyomtatás sokrétűségét tovább lehet növelni azáltal, ha egy nyomtatás alatt több anyagot vagy színt is használunk, így igazán komplex és kifejezetten adott feladatra optimalizált tárgyak készíthetők el. A [2] forrás a több anyag felhasználásával történő nyomtatási lehetőségeket mutatja be a kihívásokkal egyetemben, kitérve a tervezés és alkalmazás területeire.

TDK dolgozatom során egy meglévő 3D nyomtatót szeretnék egy olyan platformmal kiegészíteni, amely lehetővé teszi a több filament felhasználását egy munkadarabon belül. Elsőnek kutatást végzek a jelenleg rendelkezésre álló technikákról, majd azokat különböző szempontok alapján kiértékelve meghatározom a számomra ideális megoldást. A dolgozat második felében pedig a megválasztott nyomtatási rendszer tervezésének menetét mutatom be. Végezetül röviden kitérek a használat előtt szükséges kalibrációk elvégzésére is.

Az elméleti háttér ismertetése során röviden leírom az FDM 3D nyomtatás menetét, tulajdonságait és népszerű alapanyagait. Továbbá részletesebben jellemzem a jelenleg alkalmazott multimateriális megoldások működését, előnyeit és hátrányait. A következőkben pedig ezt az információt felhasználva fejtem ki a számomra ideális megoldás megválasztásának folyamatát.

A platform tervezéséről szóló fejezetekben a rendszer mechanikai, elektronikai és szoftveres fejlesztéséről számolok be. Itt röviden kiemelem a tervezésnél felhasznált főbb szempontokat és elveket, valamint kitérek egyes felmerülő problémákra és azok megoldásaira is. Az utolsó fejezetben pedig a kialakított rendszer kalibrálásáról és teszteléséről írok.

2. Elméleti háttér

A hétköznapi életben a legtöbb emberhez csak a 2010-es években kezdett eljutni a 3D nyomtatás híre, annak ellenére, hogy maga a technológia ötlete már 1945-ben megfogalmazódott egy sci-fi szerző elképzeléseiben, majd ez az ötlet az 1980-as években valósággá is vált. Napjainkra széles körben hozzáférhető rengeteg kezdő és haladó FDM 3D nyomtató összeszerelve vagy akár darabokban is, a gyártók között kialakult egy piaci verseny és mellettük a nyílt forrású projekt alapú gépek is igen kiforrottak. Ahhoz, hogy egy egészen nagy teljesítményű otthoni 3D nyomtatót építsen magának valaki minden hardveres és szoftveres elem rendelkezésére áll viszonylag alacsony áron vagy akár teljesen ingyen is.

2.1. A szálhúzásos technika

Az átlag felhasználók számára elérhető technológiák közül a Szálhúzásos Technika (Fused Deposition Modelling – FDM, vagy más névvel Fused Filament Fabrication - FFF) vált a legnépszerűbbé. Ennek különböző okai vannak az egyszerűség és megfizethetőség mellett, amikre részletesebben is kitérek.

Az alapanyag tekercselve kapható, általában 1,75 mm vagy ritkábban 2,85 mm átmérőjű hőre lágyuló műanyag szál (filament) formájában. Ezt a tekercset egy extruder motor keresztül nyomja a hot end-en, azaz a nyomtató szerszámfején, amely végén a nozzle, vagyis fúvóka található. Itt a filament megolvad és egy adott átmérőjű furaton vékony szálban távozik, ahol ventilátorok segítségével egyből le is hűl és megszilárdul. A hot end eközben a nyomtatási felülethez képest három tengely mentén elmozdulva rétegről rétegre építi fel a kívánt munkadarabot.

Az FDM nyomtatás előnyei közé tartozik, hogy a nyomtatás technológiája viszonylag egyszerű, általában csak minimális előkészülettel és utómunkával jár, az alapanyag könnyen, hozzáférhető áron és széles választékban elérhető. Ezen filamentek nyomtatás közben nem bocsátanak ki egészségre káros anyagokat. Maga a technológia több iparágban is kamatoztatható pl. gépészet, építészet, egészségügy, díszlettervezés stb. Továbbá szabványos, kereskedelemben kapható alkatrészekből is megfelelő pontosságú gépet lehet építeni [3].

Az FDM nyomtatásnak nemcsak előnyei, hanem hátrányai is vannak: minden esetben meg kell valósítani a munkadarab és a nyomtatófej közötti relatív mozgást, így a mozgó elemek tehetetlensége miatt a nyomtatás sebessége korlátozott. Túl nagy sebesség esetén a munkadarab

felületi minősége romlik, a méretek pontossága csökken. Az alapanyag a technológiából adódóan érzékeny a hőmérsékletváltozásra, így biztosítani kell a megfelelő fűtését és hűtését. A nyomtatás minőségét nagyban befolyásolhatja a filament méretpontossága [3].

Az egyszerűbb filamentek közé tartozik a könnyen nyomtatható, olcsó, egyszerűen színezhető és különböző adalékokkal keverhető PLA, vagy az erős kémiai ellenállósággal rendelkező PET-G. Az alapfelszereltségű, otthoni 3D nyomtatók által is nyomtatható filamentek közül a legjobb hőállósággal általánosságban az ABS bír, továbbá mechanikai tulajdonságai is kedvezőek egyszerűbb funkcionális elemekhez. Hátránya, hogy lehűlése során könnyen zsugorodik, így a sikeres nyomtatáshoz szükséges a zárt, vagy akár szabályozható hőmérsékletű nyomtatótér.

Különlegesebb filamentek közé tartozik a rugalmas TPE/TPU, amely különböző Shore keménységi értékekben kapható, leginkább tömítő elemek vagy rugalmas csővezetékek készítésére használt, de akár pneumatikus soft robot megfogók nyomtatására is alkalmas. Felhasználása kezdetben problémás lehet, de a megfelelő nyomtatási paraméterekkel egy olcsó, belépő kategóriájú géppel is teljes mértékben kivitelezhető [4]. Az Igus által gyártott iglidur tribofilament egy másik speciális filament, amivel a későbbiekben foglalkozni szeretnék. Ez az anyag hasonló funkciókkal bír, mint a gyártó által készített műanyag siklócsapágyak, így felhasználásával egyedi igényekre tervezett, különleges méretű és alakú siklócsapágyakat is el lehet készíteni viszonylag könnyen [5]. Továbbá jelentős előnyökkel járhat a PVA vagy HIPS támaszanyagok használata is, mivel ezek vízben oldódnak így manuálisan könnyen eltávolíthatóak nyomtatás után a modelltől.

2.2. Nyomtatás több anyaggal és több színnel

3D nyomtatás által olyan bonyolult geometriák is képezhetők, amelyek más gyártástechnológiával nehezen vagy egyáltalán nem. Ezeket a lehetőségeket tovább lehet bővíteni, ha egy nyomtatás közben több különböző színű vagy anyagú filament is felhasználható, azaz a nyomtató képes az automatikus filament cserére. Egy ilyen gép jóval komplexebb működésű és költségesebb, mint a szimpla 3D nyomtatók, de az ezáltal megvalósítható funkciók miatt egyes esetekben ez a költség hamar megtérülhet. Ezeket a funkciókat részletezem a következőkben.

Egy automatikus filament cserére képes gép legalapvetőbb funkciója a filament csere kifogyás esetén. Mivel a filament adott mennyiségben tekercselve kapható, így könnyen előfordulhat, hogy egy nagyobb nyomtatáshoz több filamentre van szükség, mint amennyi

egy ilyen tekercsen van. Ebben az esetben a betöltött filament jelenlétét egy szenzor érzékeli, amely kifogyás esetén jelez és valamilyen módszerrel a gép automatikusan egy másik tekercsről folytatja a nyomtatást. Természetesen ezt a funkciót még manuálisan is el lehetne végezni, de az a gép folyamatos felügyeletét jelentené.

Filament cserével megoldható egyező anyagú, de különböző színekből álló modellek nyomtatása is. Ez hobbi környezetben leginkább azt jelenti, hogy színes figurák, díszek, jelmezek és más látványelemek is elkészíthetők, ezzel csökkentve vagy teljesen kiváltva a későbbi festési munkát. Ipari környezetben ez a lehetőség leginkább különböző cserélhető elemek azonosítására szolgálhat. Például egy adott alkatrészhez tartozó 3D nyomtatott befogóra az alapszíntől eltérő színnel bele lehet nyomtatni egy azonosító számot és ha ezt a befogót később cserélni kell, akkor azt az azonosító számok segítségével könnyen meg lehet tenni. Ezt a végeredményt egy felragasztott címkével vagy a befogóra gravírozással is el lehet érni, de ez több színű nyomtatással egy technológia eljárással megoldható és ebben az esetben a legtartósabb a végeredmény.

A legnagyobb potenciállal bíró funkció a több anyaggal való nyomtatás. Természetesen a 3D nyomtatásnak is vannak korlátjai a megvalósítható geometriákat illetően. Ezek közül a legnagyobb az az, hogy a nyomtató asztallal csak egy bizonyos szögig bezárt alakokat lehet megvalósítani. Ha ezt a szöget átlépjük, akkor a modellt alulról meg kell támasztani. Ezt a támasztékot a nyomtatás előkészítéskor az adott program generálja és alapesetben a modellel egyező anyagból kerül kinyomtatásra úgy, hogy a támasz és a modell között kis vastagságban légrés található. Ennek a légrésnek köszönhetően a támasz nem köt teljesen hozzá a munkadarabhoz és később kézzel le lehet azt törölni. Negatívum, hogy ilyenkor a megtámasztott felületek durvák lesznek és veszítenek a pontosságukból. Erre a problémára egy jobb megoldás, ha a támaszt vagy a támasznak csak a modellel érintkező részét PVA vagy HIPS filament felhasználásával nyomtatjuk. Ilyenkor a nyomtatás után a munkadarabot a támaszokkal együtt langyos vízbe helyezve a támaszanyag pár órán belül meglágyul és részben feloldódik. Ennek a módszernek nagy előnye, hogy nincs szükség a korábbi légrésre, mivel a modelltől a vízben leválik a támaszanyag. Így szebbek és pontosabbak lesznek a támasztott felületek, valamint a támaszanyag eltávolítása is könnyebb [6].

Másik alkalmazása a több anyaggal való nyomtatásnak az, ha magába a modellbe olyan elemeket tervezünk bele, amik más anyagból lesznek kinyomtatva, ezzel megváltoztatva azt vagy plusz funkciót adva annak. Például PETG-ből készült modellben TPU felhasználásával

rugalmas összekapcsoló elemeket lehet kialakítani, ezzel egy technológián belül megoldható rugalmas tengelykapcsolók vagy akár soft robot aktuátorok elkészítése is [4].

További opció lehet kis súrlódási együtthatóval, csúszócsapágy anyagból készült tribofilamentek használata. Így egyből a modellben kialakíthatóak a csúszó elemek és nem kell a csapágyak utólagos behelyezése miatt összeállíthatóságra tervezni. Ezen felül egyedi kialakítású csúszócsapágyak gyártása is megoldható.

2.3. Megoldások több anyaggal és színnel való nyomtatáshoz

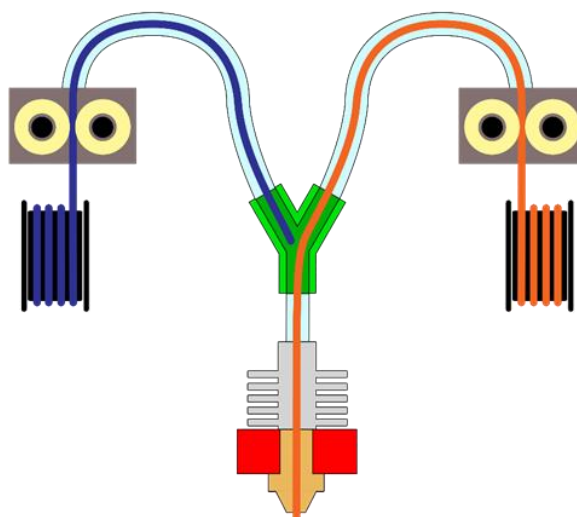
A legtöbb 3D nyomtató alapesetben egyszerre csak egy betöltött filamenttel tud nyomtatni, de a filamentet manuálisan, nyomtatás közben a gépet megállítva ki lehet cserélni és így valamilyen szinten megoldható a több színnel való nyomtatás. Ez a gép folyamatos felügyeletét és kezelését jelentené, ezért egy bizonyos számú filament csere fölött ez a módszer már értelmetlenné válna.

Ennek a folyamatnak az automatizálására a nyomtatás fejlődésével és elterjedésével különböző megoldások jelentek meg az ipari gépeket gyártó cégek és a hobbi szintű felhasználók részéről is. Az utóbbi megoldások természetesen az egyszerűbbek és költséghatékonyabbak, az előbbiek pedig robusztusabbak, de jóval költségesebbek is. A következőkben ezen automata filament cserélő módszerek működését, valamint előnyeit és hátrányait mutatom be a teljesség igénye nélkül.

Passzív elosztó egységek

A legalapvetőbb megoldás a multi filament nyomtatására egy „Y” alakú elágazás beépítése az extruder és hot end közötti bowden cső szakaszba, majd az elágazás szabad bemenő ágába egy második extrudert kapcsolunk (1. ábra). Ezáltal a két extruder képes lesz ugyanazt a hot end-et felváltva használni. Ezekből az elosztókból többet egymással sorosan vagy párhuzamosan kapcsolva, kettőnél több, akár 4-5 külön extrudert is alkalmazhatunk.

Egy ilyen gép működés közben, ahogy az éppen aktuális filamenttel való nyomtatást befejezte az adott rétegen, visszahúzza a hot end-ből a bowden csőbe a filament végét, úgy, hogy az az elosztó mögé kerüljön. Ezek után a következő extruder az elágazáson keresztül ugyanabba a hot end-be adagolja a filamentet.



1. ábra: Y elágazás vázlatos felépítése

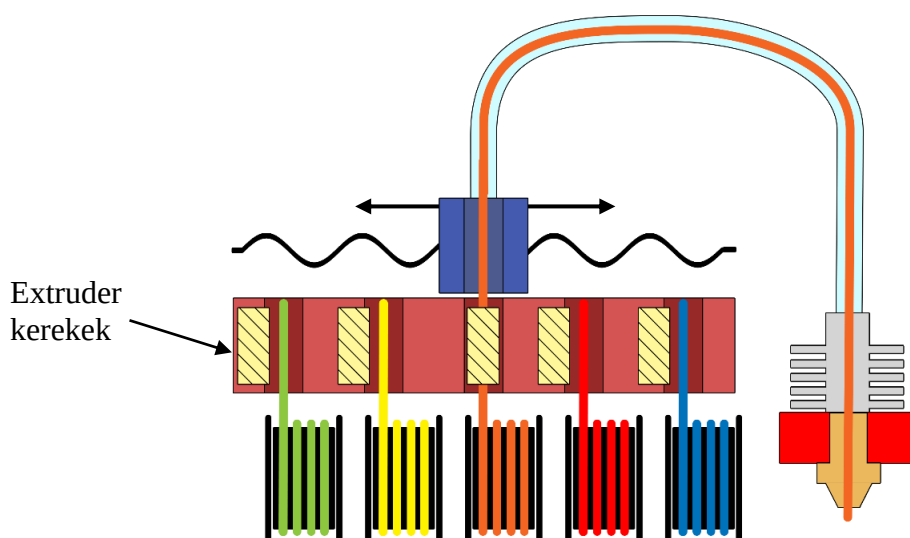
Ezeknél a kialakításoknál, ahol több különböző színű vagy esetleg anyagú filament halad át ugyanazon a hot end-en fontos lépés, hogy a soron következő filament a csere után „átöblítse” az előző filament után a fűvókát. Ha csere után a gép enélkül egyből folytatná a nyomtatást, akkor kezdetben egy darabig még az előző színnel indulna a nyomtatás, mert az előző filament mindig hagy maga után valamennyi olvadékot a fűvókában. Ilyenkor a legtöbb esetben az „átöblítésre” szolgáló anyagmennyiség hulladékként végzi. Ennek a módszernek jelentős előnye, hogy egyszerű a kialakítása és programozása, valamint, hogy egy meglévő bowdenes nyomtatóra könnyen implementálható. Hátránya viszont, hogy sok hulladék műanyag keletkezik, a filament csere viszonylag hosszú időt vesz igénybe, továbbá ez a megoldás csak több színű nyomtatást tesz lehetővé, több anyaggal valót nem. Direct drive típusú rendszert is meg lehet valósítani hasonló elágazásos módszerrel, de ebben az esetben 2 in 1 out hot end-eket (vagy akár 3 in 1 out hot end-eket) kell alkalmaznunk.

Különálló filament kiválasztó és adagoló egységek

A korábbi esetekben ahhoz, hogy eggyel több színnel tudjunk nyomtatni, eggyel több extruderre és eggyel több léptetőmotorra is szükségünk volt. Ez 2 vagy 3 különböző filament esetén még hatékony megoldás lehet, de több esetben már problémákba ütközhetünk. A növekvő számú motorok miatt a nyomtató vezérlése egyre összetettebbé és költségesebbé válik, ehhez pedig hozzáadódik még a motorok és extruderek költsége is. Ennek a kiküszöbölésére szolgálnak a különálló filament kiválasztó és adagoló egységek, amelyek filament multiplexerként viselkednek. Ilyen például a nyílt forrású Prusa MMU [7] és a ERCF [8], a Bambu Lab AMS [9], valamint a Mosaic Palette [10].

Működésükben közös, hogy 4-8 vagy a Bambu Lab AMS esetében akár 16 bemenő filamentből választanak ki a nyomtatón futó program utasítására egyet, amit egy teflon csövön keresztül a nyomtató extruderébe juttatnak, ahol a filament jelenlétét egy szenzor érzékeli. Annak jelenlétekor az extruder elkezd adagolni azt a hot end-be, megtörténik a fűvóka tisztítása és folytatódhat a nyomtatás a következő színnel.

A Prusa MMU (Multimaterial Unit) rendelkezik a legegyszerűbb működéssel: mind az 5 bemenő filament egy közös extruderen halad át, de csak az éppen kiválasztott van az extruder kerekéhez hozzászorítva egy forgós mechanizmuson keresztül. A kimenő teflon cső egy menetes száron mozgó elembe csatlakozik, ami a megfelelő szál adagolása előtt annak kimenetéhez áll és így a szükséges filament tekercs és a hot end között létrejön a kapcsolat. Ezt a szerkezetet szemlélteti a 2. ábra.



2. ábra: Prusa MMU vázlatos felépítése

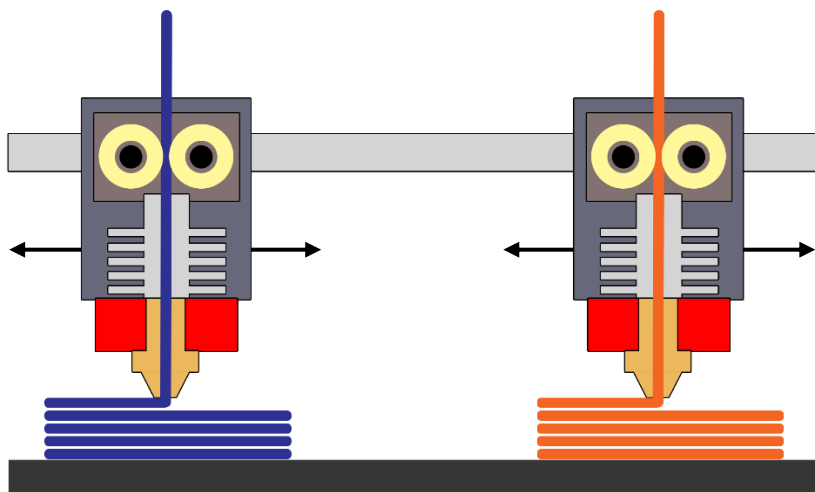
Előnyük ezeknek a megoldásoknak, hogy viszonylag jól kidolgozott termékekről/projektekről van szó, így megbízhatóan működnek. Továbbá a nyomtatótól elkülönülő egységek, így kezelésük, karbantartásuk és javításuk a nyomtatótól függetlenül is végrehajtható. Hátrányuk, hogy költségesek és továbbra sem teszik lehetővé a több anyaggal való nyomtatást.

Dedikált szerszámfejek használata

Abban az esetben, ha nemcsak színében, hanem anyagában is teljesen különböző filamentekkel szeretnénk nyomtatni egy munkadarabon belül, akkor minden filamenthez megfelelően kell megválasztani a nyomtatási paramétereket. Ezt abban az esetben, ha a

különböző anyagok egy közös hot end-et használnak nem lehet megtenni, ezért a tényleges multimateriális nyomtatáshoz több szerszámfejre van szükség, amelyek igazodni tudnak az általuk használt filamentek tulajdonságaihoz.

A gyakorlatban legtöbbször használt ilyen kialakítás az IDEX (Independent Dual Extruders), ahol két külön szerszámfej közös X irányú vezetéken mozog, így a fejek X irányú mozgása egymástól független, viszont Y és Z irányban együtt mozognak. Egy ilyen gép leggyakrabban használt funkciója, hogy az egyik fejével a munkadarabot, a másikkal pedig támaszanyagot nyomtat. Így megvalósíthatóak nyomtatásra kevésbé ideális, komplex geometriák is pontos felületekkel. Ezen felül természetesen két azonos anyagú, de különböző színű modell nyomtatására is alkalmas az IDEX.

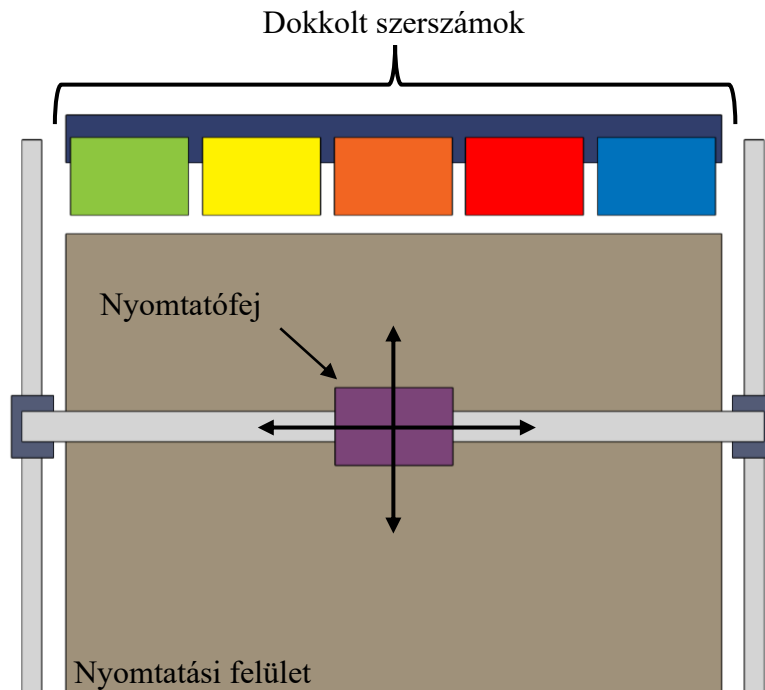


3. ábra: IDEX vázlatos felépítése, duplikált nyomtatás

Az IDEX egy különleges felhasználási módja a duplikált és a tükrözött nyomtatás (3. ábra). Mivel a két szerszámfej a gép kialakításából adódóan Y és Z irányban együtt mozog így, ha a vezérlés X irányban is biztosítja az együttmozgást, akkor a nyomtató két megegyező modellt fog egyszerre elkészíteni. Ha a vezérlés pedig X irányban ellentétes mozgást valósít meg, akkor két egymáshoz képest tükrözött darabot kapunk. Ezekben az esetekben mindkét nyomtatófej egyszerre aktív és a nyomtatási felület hozzájuk tartozó felén belül mozog. Ebből adódóan ilyenkor a felhasználható nyomtatási felület a felére csökken.

Abban az esetben, ha nemcsak kettő, hanem több anyagból álló vagy esetleg más technológiákat is igénylő tárgyat nyomtatnánk, a legalkalmasabb egy szerszámfej cserélő 3D nyomtató. Egy ilyen gépben 4-5 egymástól független szerszám van rögzítve a nyomtatótéren kívül, de a nyomtató fejének mozgásterén belül található dokkolóra (4. ábra). Adott szerszámmal való nyomtatás előtt a gép feje a dokkoló szerszám elé áll, megközelíti

azt, majd egy mechanikus vagy elektromos kapcsolat révén azt magához rögzíti. Ekkor megtörtént a szerszám felvétele, a fej eltávolodik a dokkolótól és megkezdí a nyomtatást. Az adott szerszámmal való nyomtatás után a fej eláll a munkadarabtól, megközelíti a dokkolót, majd arra visszarakja a szerszámot és oldja a kapcsolatot. Ezt követően a cserélés folyamata a munkadarab elkészültéig megismétlődik a következő szerszámokkal.



4. ábra: Szerszámfej cserélő nyomtató vázlatos felépítése

Ez a kialakítás a legrobosztusabb és legsokrétűbb multimateriális megoldás jelenleg. Nemcsak különböző színekkel és anyagokkal teszi lehetővé a nyomtatást, hanem akár más gyártástechnológiát megvalósító szerszámoknak az alkalmazását is biztosítja. Például az E3D ToolChanger platform képes nyomtatás után a munkadarab érdes felületét egy forgácsoló szerszámmal megfelelő méretre és finomságra alakítani [11]. Ezen felül használható lehet nyomtatás közben különböző pick-and-place, lézer jelölő/gravírozó vagy más manipulátor szerszám is. Mivel egy ilyen platform nemcsak filamentet, hanem teljes szerszámot is cserél, így megfelelő szenzorokkal ellátva a kifogyás mellett a hot end eldugulását vagy más meghibásodását is képes érzékelni, majd azt egy másikra kicserélve folytatni a nyomtatást.

A szerszámcserélő nyomtatók jelentős előnye a korábban kifejtett robusztusság és sokszínű alkalmazhatóság, hátránya pedig az ezekből adódó komplexitás. Elengedhetetlen, hogy a fej és a szerszámok egymáshoz való kapcsolódását biztosító elem úgy legyen megtervezve,

hogy több százezer csere után is megfelelően működjön, mivel egy nagyobb és összetettebb nyomtatás során akár 5000 szerszámcseré is előfordulhat. Vezérlést tekintve minden újabb szerszám hozzáadásával nő a rendszer komplexitása és egy idő után akár számítási teljesítmény hiányba is ütközhetünk. Továbbá minden szerszámot kalibrálni kell a nyomtatóhoz és egymáshoz képest is, valamint egy nyomtatási program elkészítése is sokkal körülményesebbé és időigényesebbé válhat. Ezeken felül nyilvánvalóan ez a legköltségesebb megoldás az eddig felsoroltak közül, így csak viszonylag kevés szerszámcserélő 3D nyomtató van forgalomban.

3. Automata filament cserélő technika megválasztása

A 2. fejezetben felsorolt multimateriális nyomtatási módszerek közül a szerszámfej cserélő megoldást szeretném további munkám során megvalósítani. Ennek a projektnek a célja nemcsak egy 3D nyomtató továbbfejlesztése, hanem inkább egy olyan platform kialakítása egy meglévő gép felhasználásával, amely minél több lehetőséget biztosít különböző anyagokkal való nyomtatásra, valamint a későbbiekben egy alapot nyújt saját szerszámfejek tervezésére. Általában egy modern 3D nyomtató esetében a hot end hibásodhat meg a leggyakrabban, valamint a gép képességeit befolyásoló szűk keresztmetszet is a hot end maximális hőmérséklete vagy térfogatárama. Ebben az esetben ahhoz, hogy a nyomtató képességeit javítsuk elég a standard, $12\text{-}16\text{ mm}^3/\text{s}$ -os térfogatáramú hot end-et [12] $60\text{-}70\text{ mm}^3/\text{s}$ -os térfogatáramúra [13] cserélni. Így annak ellenére, hogy a szerszámfej cserélés egy komplex és költséges módszer, a hot end-ek egyszerű cserélhetősége és fejleszthetősége miatt jelentősen megnövelhető a nyomtató élettartama, ezért hosszú távon könnyen megtérülhet a kezdeti befektetés. Ebben a fejezetben a saját szerszámfej cserélő nyomtatóm tervezéséhez szükséges előkészületeket szeretném részletezni.

A platformot egy SecKit SK-Go 3D nyomtatón [14] szeretném kialakítani, amely jelenleg egy $310\text{ mm} \times 310\text{ mm} \times 320\text{ mm}$ munkatérfogató, direct drive extruderes coreXY gép. X és Y tengelye mentén MGN9C, Z tengelye mentén pedig MGN12C lineáris vezetékek és golyóskocsik biztosítják a szerszámfej mozgását. Minden tengelyt 24 V-os NEMA 17 méretosztályú léptető motor hajt, X és Y esetében 6 mm széles fogasszíjakon keresztül, Z esetében pedig orsó-anya hajtással. A gép váza 2020-as és 2040-es item alumínium profilokból épül fel és kívülről 4 mm vastag alumínium szendvicspanel burkolja körbe. A szerszámfej egy E3D V6 hot end 40 W-os fűtőelemmel, amibe egy Bondtech BMG extruder klón adagolja a filamentet. A nyomtató vezérléséért egy Bigtreetech SKR Pro v1.2 és egy Raspberry Pi 4b felel, ezeken a nyílt forráskódú Klipper 3D nyomtató firmware fut [15].

A szerszámfej mozgástere $350\text{ mm} \times 350\text{ mm}$, tehát a nyomtatási területen kívül is képes működni. Továbbá a nyomtatóasztal mögött található egy kb. $350\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ -es üres sáv, amely ideális 4-5 fej dokkolására. A jelenlegi szerszámfej az X szán szemközti oldalára van rögzítve, a hátsó oldalán viszont nincs semmi, így ez az oldal alkalmas a cserélést végrehajtó elemek rögzítésére. Ezekből adódóan fizikailag nincs gátja a platform kialakításának.

3.1. A továbbfejlesztéssel kapcsolatos követelmények

Korábbi tapasztalataim alapján és a kutatómunkám során más szerszámcsereelő gépek működését tanulmányozva külön követelményt állítok a szerszámcsereelő platformnak és a cserét megvalósító mechanikai és elektronikai kapcsolatnak.

A szerszámcsereelő platformmal szemben támasztott követelményeim:

- a nyomtató legyen az átalakítás előtti állapotába bármikor visszahozható,
- ne akadályozza a gép meglévő funkcióit,
- a nyomtatási térfogatból egyáltalán ne, vagy csak kis mértékben vegyen el,
- minden eleme legyen tesztelhető a nyomtatón kívül,
- minden eleme legyen működőképes 70 °C-os hőmérsékletig,
- a rendszer vezetékezése 4-5 szerszámfej esetén se akadályozza a gép mozgó elemeit,
- minden elem férjen el a gép alapterületén belül,
- minden szükséges alkatrész legyen 3D nyomtatható vagy kereskedelemből könnyen beszerezhető.

A szerszámfej csereelő mechanizmussal szemben támasztott követelményeim:

- egyszerre valósítsa meg a villamos és mechanikai kapcsolatot is,
- legyen univerzális elektronikailag és mechanikailag is minden lehetséges szerszámfej esetén,
- álljon minél kevesebb mozgó alkatrészből,
- vezérlése legyen a lehető legegyszerűbb,
- helyigénye legyen a lehető legkevesebb,
- működése több tízezer csere után is legyen megbízható,
- árammentes állapotban is tartsa meg a rajta lévő szerszámfejet,
- a mechanikai kapcsolat bírjon el minimum egy 300 g-os szerszámfejet 300 mm/s-os sebesség és 5000 mm/s²-es gyorsulás mellett,
- az elektronikai kapcsolat biztosítson lehetőséget minimum 4 A áram felvételére 24 V feszültség mellett.

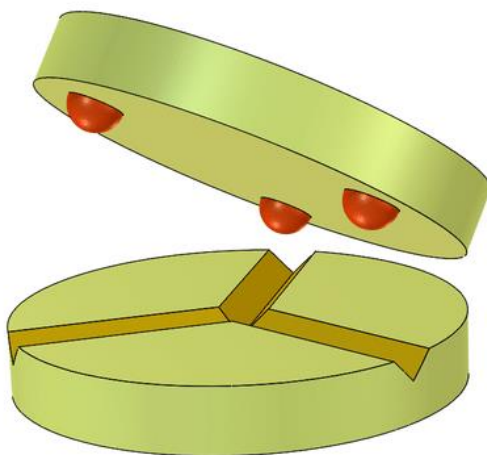
3.2. Lehetséges megoldásváltozatok tárgyalása

A későbbi tervezéshez elengedhetetlen tudni, hogy a szerszámcsere milyen elv alapján fog megvalósulni, mivel minden e döntés köré fog épülni. Ebben az alfejezetben a rendelkezésre

álló különböző kapcsolatokat, azok előnyeit és hátrányait szeretném részletezni, majd ezek után egy kiértékelő módszer segítségével a megfelelőt kiválasztani.

Maxwell kinematikai csatlakozás

A szerszámcsereológó kapcsolat alapja minden esetben a Maxwell kinematikai csatlakozás lesz, amelyet James Clerk Maxwell publikált először 1871-ben [16]. Ez az egyik félen három ugyanazon a körátmérőn egymáshoz képest 120° -kal elforgatott gömbből, a másik félen pedig a gömbökhöz illeszkedő, a kör középpontja felé néző V-hornyokból áll. Így a két fél összeillesztésekor a gömbök felülnek a hornyok oldalaira egy-egy, azaz összesen hat ponton, ezzel a csatlakozó fél hat szabadságfokából ötöt lekötnek (5. ábra). Az utolsó szabadságfok a gömbök síkjára merőleges irányban való elmozdulás, amelynek lekötéséhez a két felet valamilyen megoldással egymáshoz kell szorítani. Ezt a csatlakozást alkalmazzák a már létező szerszámfej cserélő nyomtatók, így a módszer már bizonyította alkalmazhatóságát.



5. ábra: Maxwell csatlakozás [17]

Passzív reteszelő kapcsolat

Ez a módszer nem igényel aktív működtető elemet, mert mechanikus úton, alakzárással valósítja meg a két fél egymáshoz szorítását. A passzív reteszelés egyértelmű előnye, hogy nem igényel külön motort vagy elektromágnest a működtetéséhez, így nincs szükség elektronikai átalakításra, csak a nyomtatófej mozgását kell leprogramozni. További pozitívum, hogy viszonylag nagy a kapcsolat szorítóereje és így komplexebb, nehezebb szerszámfejeket is elbír. Mivel a kapcsolat nem igényel villamos energiát így esetleges áramkimaradás vagy vész-stop lenyomásakor sem old. Hátránya, hogy egy megfelelően működő mechanizmus kialakítása gondos tervezést igényel, valamint viszonylag sok a mozgó elem, amelyek felületei súrlódnak, így kopásnak vannak kitéve. Emiatt a legtöbb

alkatrésze nem 3D nyomtatható. Mindezek ellenére a Prusa XL hasonló megoldást használ eddig sikeresen [18], de mivel még a gép szerszámcsere-lős változata nem régóta kapható kereskedelemben, így annak megbízhatóságáról nincsenek hosszútávú tapasztalatok.

Mágneses kapcsolat

A kapcsolathoz szükséges szorítóerőt permanens mágnesekkel és elektromágnesekkel is lehet biztosítani. A legegyszerűbb verzió gömbcsuklós permanens mágnesekkel megoldható (6. ábra), amelyeket gyakran használnak delta nyomtatók karjainak végein, így könnyen hozzáférhetőek.



6. ábra: Permanens mágneses gömbcsukló

Működtetése nem igényel villamos energiát, a kapcsolat létrehozásához a két fél megközelíti egymást, majd az acél gömbök beleilleszkednek a mágneses csuklópontokba. Ekkor a mágnesek összefogják és egyben pozicionálják is a két felet egymáshoz. A kapcsolat oldásához a gép a szerszámfejet egy dokkolón kialakított kampóra felakasztja, majd a nyomtatófej eltávolodásával a gömböket leválasztja mágneses foglalatukról.

Előnye, hogy egyszerű, passzív a kapcsolat, továbbá minden elem beszerezhető vagy nyomtatható. Hátránya, hogy a többi megoldáshoz képest gyenge a szorítóerő, így csak egyszerűbb szerszámfejeket bír el. Továbbá a mágnesek a nyomtatótér hőmérsékletének emelkedésével veszítenek mágnesességükből, így zárt nyomtatókon belül kevésbé alkalmazható.

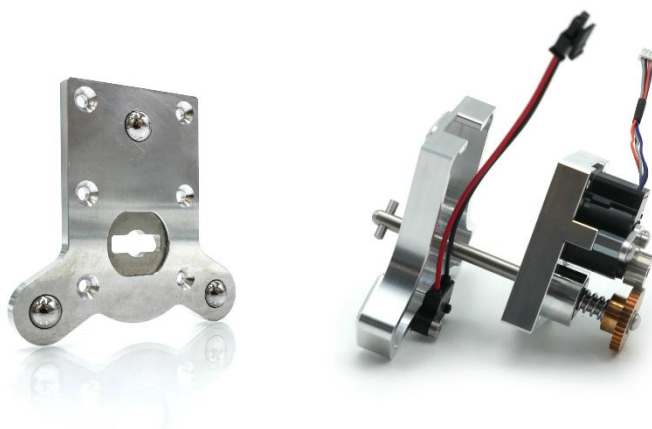
Egy szinttel költségesebb, de biztosabb megoldás az elektromágnes használata. A hagyományos elektromágnes feszültség hatására biztosít szorítóerőt, így a két fél kapcsolása egy kimenet vezérlésével megvalósítható. Lényeges hátránya, hogy a kapcsolat megtartásához a tekercsnek folyamatosan feszültség alatt kell lennie, így az az alaptól fűtött nyomtatótérben tovább melegszik, ezzel csökkentve a saját élettartamát. Továbbá

áramkimaradás vagy vész-stop lenyomása esetén a mágnes elengedi a szerszámfejet, ami így a nyomtatótérbe eshet.

Ezek a problémák a hagyományos elektromágnest permanens mágnessel ellátva kiküszöbölhetőek. Ennél a megoldásnál a készülék alapesetben mágneses és a tekercs gerjesztésével történik a lemágnesezés. A vezérlés logikája így fordított, ezért nyomtatás közben a tekercs nem melegedik és áramkimaradás esetén sem old a kapcsolatot. Egyetlen jelentős hátránya, hogy jóval költségesebb, mint a hagyományos elektromágnes.

Léptetőmotor vagy szervomotor általi kapcsolat

Az összes kapcsolat közül ez biztosítja a legnagyobb szorítóerőt, így összetett nyomtatófejeket, vagy akár kis teljesítményű maró fejeket is elbír. Ezt a megoldást alkalmazza a 7. ábrán látható E3D ToolChanger [11], [19].



7. ábra: E3D ToolChanger [19]

Előnye, hogy robosztus, megbízható működésű, továbbá a motor és a fogaskerekek tehetetlensége miatt áramkimaradás esetén sem engedi el a fejet. Hátránya, hogy nagyon költséges, több mozgó elemből áll, valamint a korábbi kialakításokhoz képest nehéz és nagy a helyigénye. Ezen felül a motor működtetéséhez szükséges egy szabad motorvezérlő a nyomtató elektronikáján.

3.3. Megoldásváltozatok kiértékelése

Az optimális megoldásváltozat kiválasztására rang módszert [20] alkalmazok. Ehhez a változatokat a korábban is vizsgált szempontok szerint rangsorolom, úgy, hogy az adott szempontból kevesebb pontot kapott változat a kedvezőbb. Ezek után a változatok helyezéseit összeadva a legkevesebb ponttal rendelkező megoldásváltozat lesz az ideális számomra. A kiértékelést és annak eredményét foglalja össze az 1. táblázat.

Megoldásváltozat	Szempontok										Összesített pontszám
	Szorító erő	Alkatrészek beszerezhetősége	Tartóelemek nyomtathatósága	Tömeg	Helyigény	Mozgó elemek száma, súrlódás	Vezérlés	Biztonság	Hőállóság	Költséghatékonyság	
Passzív reteszelő	2	4	3	2	2	3	2	1	1	4	24
Permanens mágnes	4	2	2	1	3	1	1	4	3	1	22
Hagyományos elektromágnes	3	1	1	3	1	1	3	5	5	2	25
Permanens elektromágnes	3	2	1	3	1	1	3	3	2	3	22
Léptető- vagy szervomotor	1	3	4	4	4	2	4	2	4	5	33

1. táblázat: Megoldásváltozatok kiértékelése

A kiértékelés alapján a permanens elektromágneses megoldás a megfelelő számomra. Azonos pontszámot kapott a sima permanens mágneses is, de az a korábbi tapasztalataim alapján gyengének bizonyult. Robusztusság szempontjából a motoros változat lenne a megfelelő választás, de ez igazán csak akkor érne meg, ha egy teljesen új 3D nyomtatót terveznék köré, mivel ez a változat a legköltségesebb. A passzív reteszelés helyzete is hasonló, a hagyományos elektromágnes pedig biztonsági szempontok miatt teljesen kizárásra került.

Ezen eredményekből kiindulva a munkám során egy állandó mágnest tartalmazó elektromágneses kapcsolaton alapuló szerszámcsereelő platform tervezésével és megvalósításával fogok foglalkozni.

4. Mechanikai tervezés

Ebben a fejezetben a szerszámcserehez szükséges elektromágneses csatlakozó, nyomtató szerszámfej és szerszámfej dokkolók mechanikai tervezéséről számolok be.

4.1. Szerszámfejek

Egy alap felszereltségű cserélhető szerszámfejnek rendelkeznie kell egy hot end-el, annak hűtő ventilátorával, tárgy hűtő ventilátorral vagy ventilátorokkal, a szerszám működtetéséért felelős vezérlő elektronikával, valamint a cserét biztosító mechanikai rögzítő és elektronikai kapcsolattal. További kiegészítők között szerepelhet extruder és extruder motor, különböző szenzorok (pl. szintezőszenzor, szerszám jelenlétét érzékelő szenzor), valamint tárgyat megvilágító és állapotjelző LED-ek. A cél egy olyan szerszám váz tervezése, amelyhez ezeket az elemeket megfelelően rögzíteni lehet úgy, hogy a kapott összeállítás mérete nem haladja meg az eredeti nyomtatófej méreteit, továbbá egyáltalán nem, vagy csak minimális mértékben vesz el a hasznos nyomtatótérből, valamint tömege 300 g körüli.

A szerszámfej központi eleme a hot end, a vázat első sorban ehhez kell igazítani. Az első prototípushoz az E3D V6-ot választottam, mivel ez egy bevált, könnyen hozzáférhető, egyszerű hot end. További előnye a felfogatása, mivel több más hot end is ezt használja, így a későbbiekben szükség esetén könnyen nagyobb teljesítményűre cserélhető.

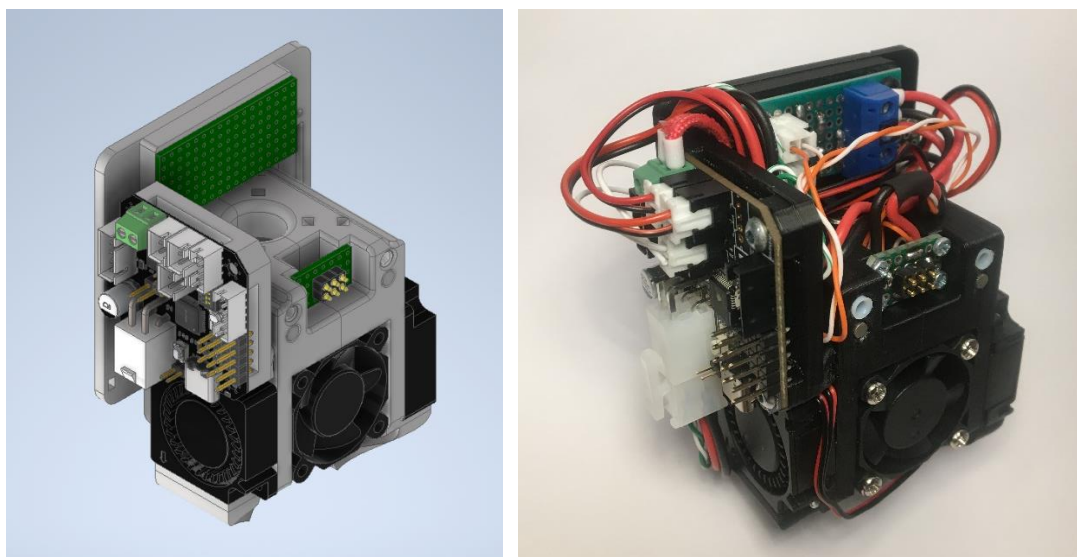
A hot end rögzítésének kialakítását követően lehetőség van a hozzátartozó 3010-es axiális hűtőventilátor rögzítésére is. A megfelelő működéshez a fúvóka környezetét, azaz az olvadási zónát magas hőmérsékleten, míg az afölötti részt pedig alacsony hőmérsékleten kell tartani. Amennyiben a fűtő elemről a hot end-ben tovább terjedne a hő a filament belépése felé, abban az esetben annak korai lágyulása eltömődéseket okozhat, amely selejteket vagy akár a hot end és az extruder tönkremenetelét is eredményezheti. A megfelelő működés érdekében a hot end hűtőbordáit nyomtatás közben a ventilátor aktívan hűti úgy, hogy a szemből érkező levegőáram a bordákon keresztül a rögzítő blokk két oldalán távozik.

Egy nyomtató szerszámfejen a tárgyhűtő ventilátor vagy ventilátorok felelnek a filament megfelelő ütemben való lehűtéséért a fúvókából való kilépése után. Ezeknek a ventilátoroknak a fordulatszáma és így a levegőáram nagysága nyomtatás közben folyamatosan változik az előre megírt G-kód program alapján, aszerint, hogy milyen anyaggal nyomtatunk vagy, hogy éppen egy milyen jellegű elem készül. Például az ABS erős tárgyhűtés esetén repedezik, de PLA-hoz viszont elengedhetetlen.

Annak érdekében, hogy több szerszámfej esetén is egyszerű és problémamentes legyen a vezetékezés, minden szerszámfejnek saját vezérlőlapra van szüksége, amelyek CAN buszon keresztül kommunikálnak a központi vezérléssel. Erről részletesebben az elektronikai tervezésről szóló fejezetben számolok be. A szerszámfej vezérlő rögzítéséhez egy külön adapter szükséges, amelyet a blokkhoz rögzítünk. Ez a megoldás azért célszerű, mert így a jövőben egy másik vezérlőre váltáskor elegendő egy annak megfelelő adaptert nyomtatni, maga a hot end blokk változatlan maradhat.

A kialakítás egyik fő célja, hogy a szerszám készenlétbe helyezése után nemcsak a mechanikai kapcsolat, hanem az elektronikai kapcsolat is megszűnjön a nyomtatófejjel és ezt a szerepet a dokkoló vegye át. A dokkolóval való mechanikai kapcsolat 2 db 2 mm átmérőjű illesztőcsapon keresztül valósul meg, amelyre a nyomtató a csere során a szerszámot ráhúzza. Annak érdekében, hogy ez a művelet akadálymentes legyen, a szerszám furataiba teflon betétek kerülnek, amelyek alacsony súrlódást biztosítanak az acél csapokkal dokkolás során. Továbbá a dokkolóval való biztos kapcsolatot neodímium mágnesek biztosítják. Az oldható elektronikai kapcsolat 3 x 2 db rugós tűskén keresztül történik, melyek kiválasztását az elektronikai tervezésről szóló fejezetben részletezem. A tűskék próbanyákokra forrasztva rögzíthetőek a számukra kialakított helyre.

Mindezek után a szerszámfej készen áll arra, hogy rögzítésre kerüljön a cserét biztosító szerszámlapra. Ez az összeállítás tartalmazza a Maxwell kinematikai kapcsolás és a rugós tűskés elektronikai kapcsolás egyik felét, valamint az itt található elosztó próbanyákba csatlakoznak a vezérlőlap és a dokkoló felőli tűskék kivezetései. A szerszámlap tervezését a szerszámcserélő kapcsolatról szóló fejezetben részletezem. Az így összeállított szerszámfej modellje, valamint a 3D nyomtatott, összeszerelt és bekötött prototípusa látható a 8. ábrán.



8. ábra: A szerszámfej modellje és elkészített prototípusa

4.2. Szerszámcsereelő kapcsolat

A szerszámfejek közötti váltást működtető elem a 3. fejezetben kiválasztott permanens elektromágnes. A nyomtatófej kialakítása mellett ez a következő kulcsfontosságú elem, amely figyelembevételével történik a szerszámcsereelő kapcsolat megtervezése.

A megfelelő elektromágnes kiválasztásához a következő feltételeket határoztam meg:

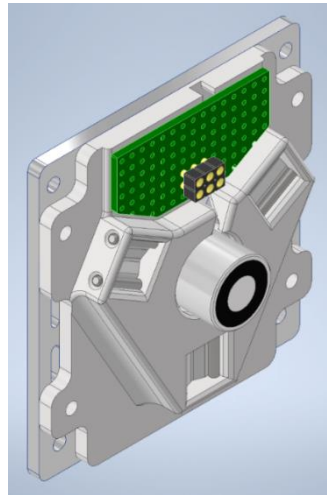
- megbízhatóan működjön 300 – 500 g tömegű szerszámfejekkel,
- hossza ne legyen 20 mm-nél több,
- átmérője ne legyen 30 mm-nél nagyobb,
- lehetőleg 24 V-os tápfeszültségről működjön,
- mágnesessége ne csökkenjen 70 °C-os hőmérséklet mellett.

A szempontok alapján egy ITS-PE-1515-24VDC típusú permanens elektromágnesre esett a választás, amelynek paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.

ITS-PE-1515-24VDC	
Kivitel	áramtalan állapotban mágneses
Névleges feszültség	24 V/DC
Teljesítmény	3.6 W
Tartóerő	25 N
Határhőmérséklet	120 °C
Hossz	15 mm
Átmérő	15 mm

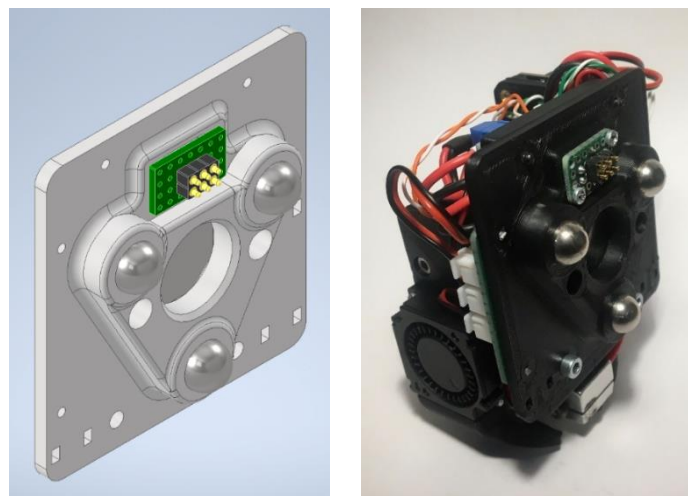
2. táblázat: A kiválasztott elektromágnes fontosabb paramétereit [21]

A szerszámcserélő kapcsoló (9. ábra) középre helyezhető a szerszámfej rögzítéséért felelős elektromágnes, körülötte pedig egymáshoz képest 120 fokban elforgatva található 3 x 2 db illesztőcsap, amely a másik félen lévő acélgolyókat fogadja. Az alkatrészen továbbá helyet kaptak különböző kivágások az elektromágnes vezetékeinek elvezetésére és egy próbanyák rögzítésére, amelyre a rugós tűskék mama párja és az elektronikai kapcsolatot biztosító csatlakozók is forrasztásra kerülnek.



9. ábra: Szerszámcserélő kapcsoló

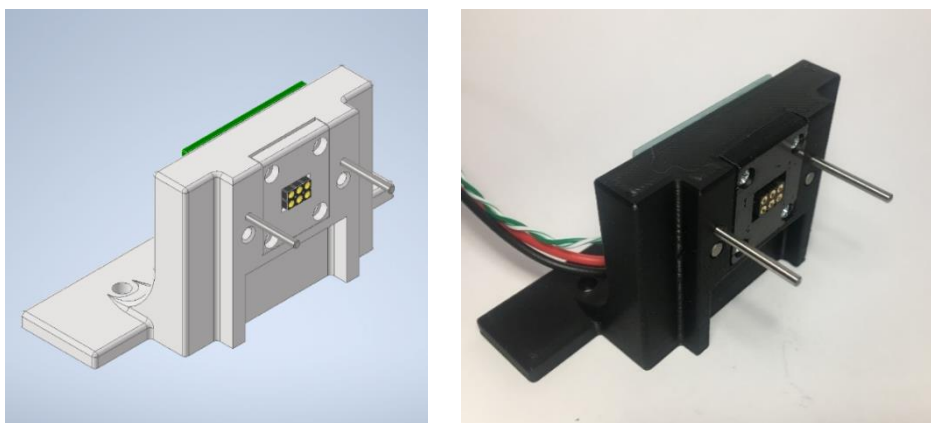
A szerszámcserélő kapcsolat másik fele a szerszámlap (10. ábra), amelyre a nyomtató szerszámfejek kerülnek rögzítésre, valamint ez az elem biztosítja azok mechanikai és elektronikai kapcsolatát a nyomtatófejen lévő szerszámcserélő kapcsolóval. Itt helyezkednek el a másik fél csapjainak megfelelően, azaz egymáshoz képest 120°-kal elforgatva egy 40 mm átmérőjű kör mentén a Maxwell kinematikai kapcsolathoz tartozó acélgolyók.



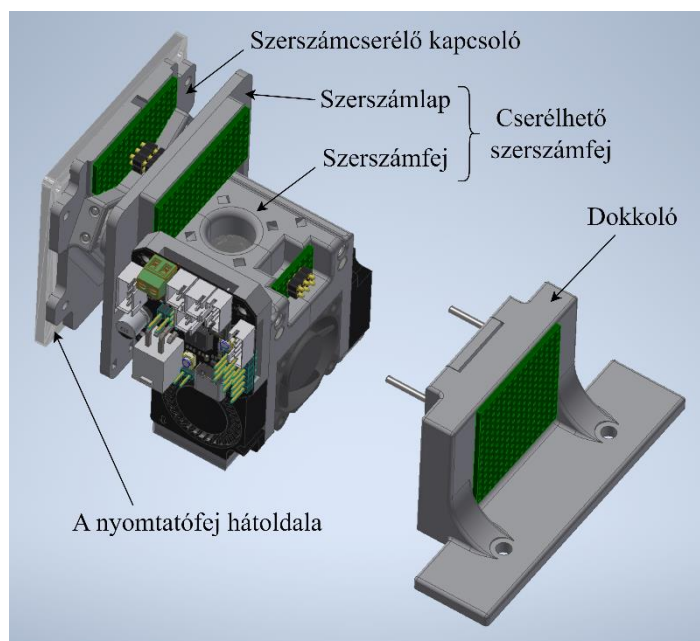
10. ábra: A szerszámlap modellje és az elkészült darab

Ezen kívül még fontos része az elektromos csatlakozást megvalósító rugós tűskék, valamint egy 20 mm x 20 mm x 2 mm-es acéllap, amelyhez hozzátapadva az elektromágnes biztosítani tudja a kapcsolat összetartásához szükséges erőt.

A szerszámcsereológ platform utolsó kulcsfontosságú eleme a dokkoló (11. ábra), amely a szerszámfejeket inaktív és készenléti állapotukban a gép hátuljához rögzíti, majd aktiválásuk során elengedi azokat. Ezen az alkatrészen megtalálhatóak az elektronikai kapcsolat megteremtéséért felelős és az előző összeállításokban is használt rugós tűskék, a szerszámfej felakasztását lehetővé tevő csapok, valamint a szerszám véletlen leesését megakadályozó mágnesek. A dokkoló továbbá lehetővé teszi, hogy CAN busz segítségével egymás után több ilyen dokkolót is sorba lehessen kötni, így jelentősen csökkentve a szükséges vezetékek mennyiségét. A teljes szerszámcsereológ platform elemeit mutatja a 12. ábra.



11. ábra: A dokkoló modellje és elkészült változata



12. ábra: A teljes szerszámcsereológ platform modellje

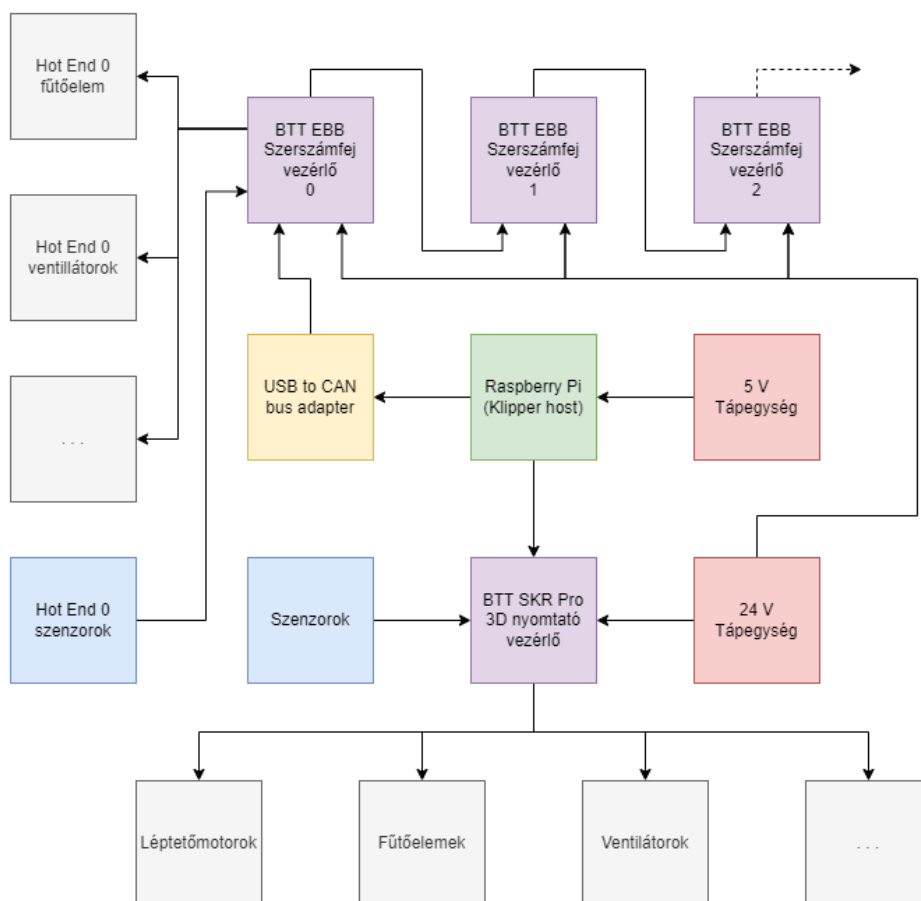
5. Elektronikai tervezés

Mivel egy elsődleges célom, hogy a cserélhető szerszámfejek elektronikailag is függetlenek legyenek és önállóan, a nyomtatón kívül is tesztelhetőek legyenek, így az elektronikai tervezés is sajátos megoldásokat igényel.

5.1. A gép elektronikai rendszerének felépítése

A gép vezérlésének központi eleme egy Raspberry Pi 4b mikroszámítógép, amin a nyílt forráskódú Klipper firmware fut. Ehhez csatlakozik USB-n keresztül egy Bigtreetech SKR Pro 3D nyomtató vezérlő. Ez a felépítés azért előnyös, mert a gép mozgásainak megvalósításához szükséges számításokat a viszonylag nagy teljesítményű Raspberry Pi végzi, nem pedig a kisebb számítási teljesítményű nyomtatóvezérlő. Ezáltal gyorsabb és pontosabb mozgásokat lehet elérni, halkabb motorok és alacsonyabb motoráram mellett is. Továbbá a Klipper firmware lehetővé teszi, hogy egy rendszeren belül több mikrokontroller is működjön és ellásson specifikus feladatokat. Az USB-s kommunikáción felül támogatott a CAN buszos kommunikáció is a megfelelő USB-CAN busz adapterrel. Esetemben egy InnoMaker adapter felhasználásával kommunikál a Raspberry Pi egyelőre 2 db (későbbiekben 5 db a cél) Bigtreetech EBB42 szerszámfej vezérlő lappal. Ezek kifejezetten 3D nyomtató szerszámfejekhez készültek, így dedikált csatlakozási lehetőségek vannak a hot end-hez szükséges fűtőelemnek, termisztornak és hűtő ventilátornak, filament jelenlétet érzékelő és szintező szenzornak, végálláskapcsolóknak és LED-eknek, továbbá tartalmaz léptetőmotor vezérlőt az extruder motorhoz. A CAN busz kommunikáció segítségével megoldható, hogy egymás után sorba lehessen kötni ezeket a vezérlőket, így nem kell mindegyikhez külön vezetékezést biztosítani, ami nagy mértékben növeli a projekt megvalósíthatóságát.

Összefoglalva tehát a rendszer működtetéséért felelős központi elem egy Raspberry Pi, amely USB-n csatlakozik egy BTT SKR Pro 3D nyomtató vezérlővel és egy USB-CAN busz adapterrel. A BTT SKR Pro felel a nyomtatófejet és asztalt mozgató X, Y, és Z léptetőmotorok, valamint az asztal fűtésének működtetéséért. Az adapter segítségével a Raspberry Pi kapcsolatban van több BTT EBB42 szerszámfej vezérlővel, amelyek a hozzájuk tartozó hot end-ek, extruder léptetőmotorok, szenzorok és LED-ek működtetéséért felelnek. A Raspberry Pi tápellátását egy különálló 5 V-os 50 W teljesítményű, míg a rendszer minden más elemét egy 24 V-os 300 W teljesítményű tápegység adja. A rendszer felépítését mutatja a 13. ábra.



13. ábra: A 3D nyomtató elektronikai rendszerének vázlata

5.2. Szerszámfej csatlakozások, CAN busz

Ahhoz, hogy a szerszámfejek elektronikailag egyszerűen csatlakoztathatóak és leválaszthatóak legyenek rugós tűskéket használok a kapcsolathoz. Ezeknek a CAN busz kommunikációhoz szükséges adatkapcsolat mellett a teljes szerszámfej tápellátását is biztosítaniuk kell, így megfelelően megválasztott, jó minőségű tűskékre volt szükségem.

A tűskék megválasztásának főbb szempontjai a maximális megengedett áram, a hőmérséklet állóság és a tűskék egymás közötti távolsága. Mivel az első prototípusok esetében próbanyákokra kerülnek fel kézzel forrasztva ezek a tűskék, így azoknak a kiosztása meg kell egyezzen a nyákok 2,54 mm-es rasztertávolságával. Hőmérséklet szempontjából a korábbi elemektől is elvárt minimum 70 °C-os hőállóság a kritérium. A megengedett maximális áram meghatározásához pedig a szerszámfej elemeinek legnagyobb teljesítmény melletti áramfelvételeinek összegét vettem figyelembe, ezt 3,6 A-re kalkuláltam.

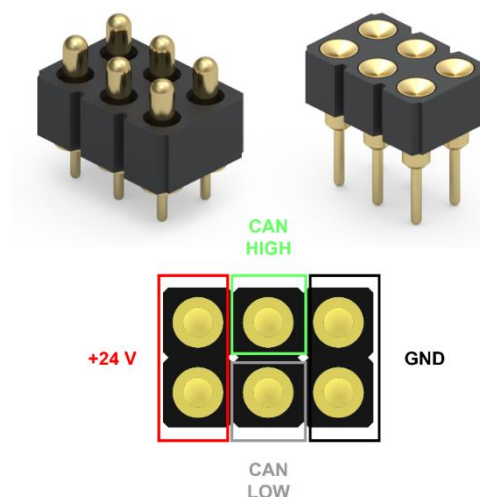
Viszonylag hosszabb kutatás után a Mill-Max által gyártott rugós tűskék ígértek a legjobb minőségű opciónak, amelyek Magyarországon is beszerezhetőek. Innen a

823-22-XXX-10-002101 cikkszámú rugós tűskére esett a választás. A típus lényegesebb paramétereit mutatja a 3. táblázat.

823-22-XXX-10-002101	
Rögzítési mód	furatszerelt
Tüskefej kialakítás	lekerekített
Tüske kiosztás	2,54 mm
Megengedett hőmérséklettartomány	-55 / +125 °C
Élettartam	~1,000,000 ciklus
Megengedett feszültség	100 VRMS / 150 VDC
Megengedett áram	2 A (folyamatos), 3 A (csúcs)
Ellenállás	max. 20 mΩ

3. táblázat: A választott rugós tűske lényegesebb paramétereit [22]

A CAN busz kapcsolathoz minimum 4 db tűskére van szükség: 2 db a tápellátáshoz és 2 db a kommunikációhoz. A korábban kiszámított szerszámfej áramfelvétel 3,6 A, ami meghaladja az egy darab tűskére megengedett 2 A-es értéket, így a tápellátás megfelelő biztosítása érdekében összesen 6 db tűskét kellett alkalmaznom 2 x 3-as elrendezésben. Az így választott kapcsolat apa és anya feleit, illetve annak kiosztását mutatja a 14. ábra.



14. ábra: A választott rugós tűskés kapcsolat és kiosztása [22]

6. Szoftveres beállítások

A 3D nyomtató vezérléséért a már korábban is említett, nyílt forráskódú Klipper firmware felel. Ennek a host-ja egy Raspberry Pi-on fut, amely nemcsak a motorok gyorsabb és precízebb működését biztosítja, hanem a rendszer könnyű és nagy mértékű testreszabhatóságát is.

A legjelentősebb kényelmi funkciója, hogy egy bármely eszköz számára elérhető web-es felületet biztosít a nyomtató saját hálózatán belül (vagy szükség esetén azon kívül is), amely segítségével egy számítógép böngészőjéből vagy akár egy mobil applikációból irányíthatjuk a gépet, adhatunk ki parancsokat, indíthatunk és állíthatunk le nyomtatásokat, kamerán keresztül távolról figyelhetjük a nyomtatás állapotát és akár a rendszer konfigurációját is megváltoztathatjuk. A konfigurációkat könnyen, egy beépített szövegszerkesztővel írhatjuk át, az érvényesítéséhez pedig elég egy újraindítás. Ennek köszönhetően könnyen és rugalmasan tesztre szabható a rendszer, így gyorsan kikísérletezhetőek a megfelelő beállítások és tesztelhetőek a G-kód makrók.

A firmware nyílt jellegéből ered, hogy szabadon hozzá lehet adni különböző, a közösség által fejlesztett bővítményeket is. Egy ilyen bővítmény, a KTCC (Klipper Tool Changer Code) [23] lehetővé teszi az alaptól kevésbé támogatott szerszámcsere-elő rendszer kiépítését.

6.1. Klipper konfiguráció

Klipper-ben a szerszámfej vezérlők mikrokontrollerjeinek hozzáadása után konfigurálni lehet az adott hot endhez tartozó fűtőelemet, szenzorokat, ventilátorokat és extrudert, majd a szerszámfej cserélés specifikus funkciók már a KTCC modul felhasználásával valósíthatóak meg.

A következő lépésben létrehozunk egy szerszám rögzítő objektumot, amelyben megadhatjuk azokat a parancsokat és makrókat, amelyeket a gép a rögzítő mechanizmus aktiválásakor és deaktiválásakor végre kell, hogy hajtsa. Ez lehet egy szervo vagy léptető motor mozgatása, a nyomtatófej mozgatása vagy jelen esetben egyszerűen egy kimenet kapcsolása, amely az elektromágneket vezérli.

Az egyes szerszámfejek cseréjéhez szükséges paramétereit megadhatjuk külön-külön vagy csoportosítva is abban az esetben, ha több azonos vagy hasonló típusút akarunk konfigurálni. A paraméterek közül lényeges adat a zone és park pont koordináta. A park pont az a

koordináta, ahova a nyomtatófejnek kell állnia ahhoz, hogy fel tudja venni az adott szerszámot. A zone pedig az a pont, ameddig a nyomtatófej csere során gyors üresjárat sebességgel közlekedhet. A zone és park pontok között már csak a lassú üresjárat sebesség a megengedett a minél pontosabb szerszámcsere érdekében.

6.2. G-kód makrók

A szerszám felvevő és lerakó G-kód makrók valósítják meg a cseréhez szükséges mozgásokat és a rögzítő mechanizmus kapcsolását. A nyomtatás kezdetekor a makró meghívására a nyomtatófej gyors üresjárat sebességgel megközelíti az első szükséges szerszámfej zone pontját. Ahogy ezt elérte, onnan lassú üresjárat sebességgel áll a park ponthoz, ekkor az elektromágnes helyre szorítja a szerszámot, majd a rendszer aktiválja azt. Ezek után a nyomtatófej lehúzza a dokkolóról az aktív szerszámfejet, majd a gép megkezd a nyomtatást. Ahogy az adott réteg első szerszámfejhez tartozó részei elkészültek, a rendszer elmenti a folyamat állapotát majd megszakítja azt. Ekkor a szerszámfej az elektromágnes lemágnesezésével visszahelyezhető a saját dokkolójára, majd miután a nyomtatófej visszaállt a zone pontra, innen közvetlen megközelítheti a következő zone pontját és felveheti azt. Innentől a nyomtatás befejezéséig ugyanez a lépéssorozat ismétlődik minden csere során, annyi különbséggel, hogy az utolsó szerszám esetében megválasztható, hogy a nyomtatás befejeztével maradjon a szerszámfejen vagy kerüljön vissza a dokkolójára. Ezeket a műveleteket az *1. programkódban* található G-kód makrók valósítják meg.

A KTCC modulnak köszönhetően a szeletelő szoftvernek a szerszám cseréhez elegendő egy szerszámot aktiváló $T_0, T_1, \dots, T_n$ parancsot kiadnia ahhoz, hogy Klipper-ben végig menjen a teljes szerszámcsere folyamat a megfelelő paraméterek átadásával.

A fejezetben részletezett konfiguráció és G-kód makrók csak kezdetleges állapotúak, tehát csak ahhoz elegendőek, hogy egy darab cserélhető szerszámfej alapfunkciói működjenek és a kalibrációkhoz szükséges teszt nyomtatásokat el lehessen végezni. A platform fejlesztésével ezek jelentősen bővülni fognak.

```

[gcode_macro TOOL_DROPOFF]
gcode:
{%set myself = printer['tool '~params.T]%}          #myself változó létrehozása
M568 P{myself.name} A1                                #szerszám készenlétbe helyezése
SET_GCODE_OFFSET X=0 Y=0                             #szerszám eltolások visszaállítása
SAVE_GCODE_STATE NAME=TOOL_CHANGE                   #folyamat állapotának mentése, megszakítása
G91                                                    #relatív mozgás
G0 Z2                                                  #szerszám elemelése ütközések elkerülésére
G90                                                    #abszolút mozgás
G0 X{myself.zone[0]} Y{myself.zone[1]} F18000        #zone pont megközelítése, gyors üresjárat
G0 Y{myself.park[1]} F1800                           #park pont, lassú üresjárat
M400                                                  #várakozás a megkezdett mozgások befejezésére
TOOL_UNLOCK                                           #elektromágnes deaktiválása
G4 P500                                                #0.5 másodperc várakozás
SET_GCODE_OFFSET Z={myself.offset[2]} MOVE=1         #szerszám Z eltolásának beállítása mozgással
G0 Y{myself.zone[1]} F1800                           #zone pontra visszaállás, lassú üresjárat
M400                                                  #várakozás a megkezdett mozgások befejezésére
TOOL_LOCK                                             #elektromágnes aktiválása

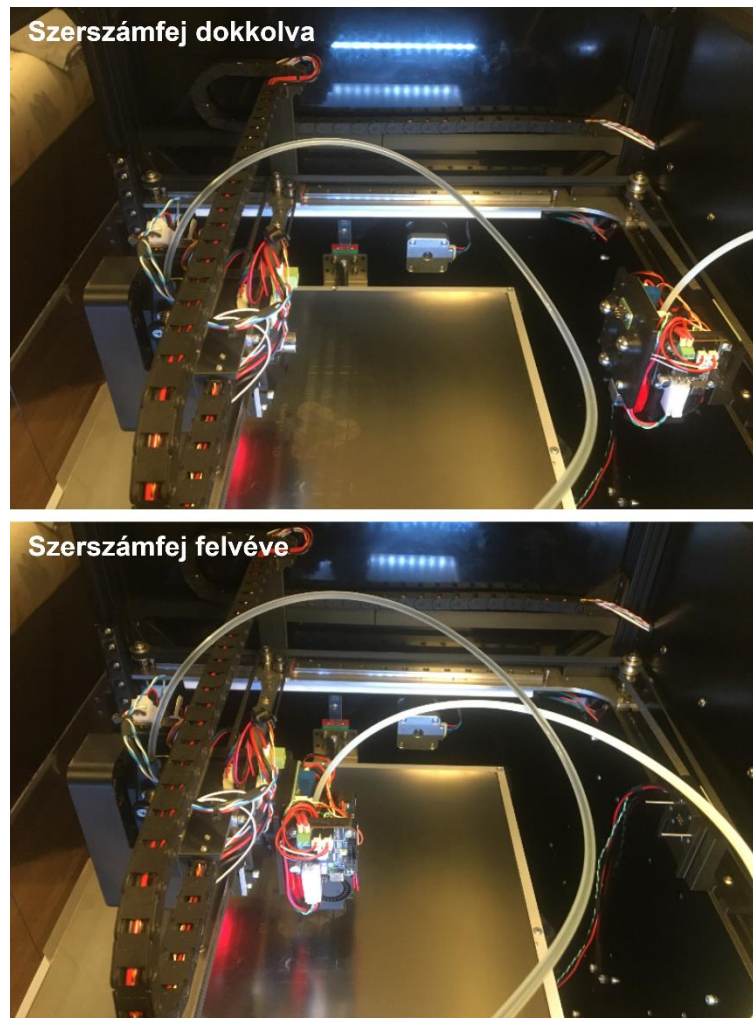
[gcode_macro TOOL_PICKUP]
gcode:
{%set myself = printer['tool '~params.T]%}          #myself változó létrehozása
M568 P{myself.name} A2                                #szerszám aktiválása
G0 X{myself.zone[0]} Y{myself.zone[1]} F18000        #zone pont megközelítése, gyors üresjárat
TOOL_LOCK                                           #elektromágnes aktiválása
G0 Y{myself.park[1]} F1800                           #park pont, szerszám felvétele, lassú üresjárat
M400                                                  #várakozás a megkezdett mozgások befejezésére
G4 P1000                                              #1 másodperc várakozás
SET_GCODE_OFFSET Z={myself.offset[2]} MOVE=1         #szerszám Z eltolásának beállítása mozgással
{% if myself.extruder|default("none")|lower != "none" %} #ha a szerszám egy 3D nyomtató extruder
    TEMPERATURE_WAIT_WITH_TOLERANCE TOOL={myself.name} #nyomtatási hőmérsékletre fűtés
{% endif %}
G0 Y{myself.zone[1]} F1800                           #zone pontra visszaállás, lassú üresjárat
M400                                                  #várakozás a megkezdett mozgások befejezésére
RESTORE_GCODE_STATE NAME=TOOL_CHANGE MOVE=1 MOVE_SPEED=300 #megszakított
                                                         folyamat folytatása
SET_GCODE_OFFSET X={myself.offset[0]} Y={myself.offset[1]} Z={myself.offset[2]} MOVE=0 #eltolások
                                                         beállítása

```

1. Programkód: Szerszámcserélő G-kód makrók

7. Kalibráció és tesztelés folyamata

Annak érdekében, hogy az elkészített szerszámcserező platform (15. ábra) megfelelően működjön, az első használat előtt érdemes különböző tesztek és kalibrációkat végrehajtani.



15. ábra: A tesztelésre felszerelt szerszámcserező platform

Természetesen először érdemes külön-külön minden elemet aktiválni, hogy működnek-e a megfelelő parancsokra. Ezek után a következő lépés a hot end fűtő elemének PID kalibrálása, ahol fontos, hogy a tárgyhűtő ventilátorok is működjenek közben, mivel azok egy részben a fűvókát is hűtik, ami nagyban befolyásolhatja a kapott értékeket.

Ezek után a projekt követelményeinek ellenőrzésére célszerű megvizsgálni, hogy a kapcsolat megtartja-e a szerszámfejeket az elvárt sebességek és gyorsulások mellett. Ennek érdekében készítettem egy G-kód makrót, amely elsőnek beállítja a maximális gyorsulás értéket, majd növekvő sebességgel mozgatja a nyomtatófejet a tengelyekkel párhuzamos és azokra 45°-ot bezáró irányban. A beállított gyorsulás érték 10000 mm/s^2 , a sebesség pedig 50 mm/s -tól

500 mm/s-ig 50 mm/s-os léptékekkel növekszik. Mivel 5000 mm/s²-es gyorsulással és maximum 300 mm/s-os sebességgel nyomtatok, így, ha a teszt végig tud menni úgy, hogy a szerszámfej nem esik le, akkor nagy valószínűséggel elég erős lesz a szerszámcsereelő kapcsolat a megbízható működéshez.

A teszt végig ment probléma nélkül, így a kalibráció folytatódhat a szerszámfejek közötti offszet meghatározásával. Ehhez az állandó, azaz 0. szerszámfej fűvókája lesz a 0, 0, 0 pont, a cserélhető szerszámfejek koordinátái pedig a CAD összeállításból kimérve 3.783, 90.35, 5. A Z irányban mért eltérést meg lehet határozni a szimpla 3D nyomtatók esetében is alkalmazott első réteg nyomtatásának vizsgálatával. Ha ez a réteg megfelelő minőségű, akkor a beállított Z offszet értéke helyes. Az X és Y irányban mért eltéréseket pedig a legegyszerűbben próbanyomtatások elkészítésével lehet meghatározni. Amennyiben a próbatestekről leolvasott méretek túrésen belül vannak és szemmel látható hiba sincsen a testek illeszkedésénél, akkor megfelelőek a távolságok.

Ez egy elég manuális módszer, amivel általában csak több kísérlet után lehet meghatározni a keresett értékeket. A folyamat megkönnyítésére azonban különböző automatizált lehetőségek is elérhetőek, mint például a Prusa XL fűvóka letapogatása vagy az Ember Prototypes optikai kalibrációs eszköze [24].

8. Összefoglalás

TDK dolgozatom első felében a multimateriális 3D nyomtató platform tervezéséhez szükséges elméleti alapokat gyűjtöttem össze. Kutatómunkát végeztem a rendelkezésre álló megoldásokról, összefoglaltam azok előnyeit és hátrányait, majd ezeket az eredményeket összevetve megállapítottam, hogy a meglévő gépemet egy szerszámfej cserélő platformmal szeretném bővíteni. Ez a fejlesztés nemcsak az egy nyomtatáson belüli több különböző szín és anyag használatát tenné lehetővé, hanem a későbbiekben lehetőséget adna más gyártástechnológiákat (pl. pick-and-place, lézerjelölés, lézergravírozás) megvalósító szerszámfejek használatára is.

Ezt követően a szerszámfej cserélést megvalósító megoldásokat vizsgáltam, majd rang módszer segítségével megállapítottam, hogy az általam felállított követelményeknek egy permanens mágnessel működtetett Maxwell kinematikai kapcsolat tesz leginkább eleget.

A szerszámcsereológ kapcsolattal szemben támasztott követelmények felállítása után kiválasztottam a megfelelő elektromágnest, majd ismertettem annak paramétereit. Ezek után minden rendelkezésemre állt ahhoz, hogy a munkát folytassam a platformot alkotó egyes elemek mechanikai tervezésével. Bemutattam a nyomtató elektronikai rendszerének felépítését, azon belül az egyes elemek tápellátásának és a közöttük lévő kommunikációnak kialakítását. Végül röviden kitértem a gép által használt Klipper firmware működésére és előnyeire, valamint annak a szerszámcsereológ platformra történő konfigurációjára.

Mivel az utolsó fejezetben említett kalibrációs nyomtatáson kívül igazi multicolor és multimateriális tárgyak előállítására még nem volt lehetőségem, így a jövőben szeretném minél több ilyen elemmel próbára tenni a platform működését. A bemutatott alkatrészek csak kezdeti prototípusok, így rengeteg lehetőség van még azokat optimalizálni, majd esztétikailag is kiforrottabbá tenni. Miután már mechanikailag véglegesnek mondható a rendszer, az első fejlesztési területnek az elektronikai kapcsolatok kialakítását szeretném kitűzni, mivel ez jelenleg különböző próbapanelre kézzel forrasztott vezetékes összeköttetésből áll. Ezért a későbbiekben ezeket szeretném saját tervezésű NYÁK-okra cserélni.

Összességében a végzett munkámat sikeresnek ítélem, a kezdetekben felállított követelményrendszert megfelelő mértékben kielégíti a tervezett szerszámcsereológ platform.

9. Irodalomjegyzék

- [1] N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan (2019): *An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications*, Procedia Manufacturing
- [2] A. Nazir, O. Gokcekaya, K. Md M. Billah, O. Ertugrul, J. Jiang, J. Sun, S. Hussain (2023): *Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials*, Materials & Design
- [3] L. Carolo (2022): *What Is FDM 3D Printing? – Simply Explained*, All3DP
- [4] Bene D. (2020): *Soft robot megfogó tervezése és 3D nyomtatása*, szakdolgozat, Szegedi Tudományegyetem
- [5] Iglidur tribofilament: <https://www.igus.eu/product/700?artNr=I180-PF-0175-0750> (2023.04.28.)
- [6] H. Kondo (2019): *3D Printer Support Material: Which One to Use for My Project?*, All3DP
- [7] Prusa Multi-Material Unit: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-mm3/> (2023.04.28.)
- [8] Enraged Rabbit Carrot Feeder: <https://github.com/EtteGit/EnragedRabbitProject> (2023.04.28.)
- [9] Bambulab Automatic Material System: <https://eu.store.bambulab.com/products/ams-multicolor-printing> (2023.04.28.)
- [10] Mosaic Palette: <https://www.mosaicmfg.com/products/palette-3-pro> (2023.04.28.)
- [11] E3D Tool Changer: <https://e3d-online.com/blogs/news/asmb1> (2023.05.02.)
- [12] E3D Revo: <https://e3d-online.zendesk.com/hc/en-us/articles/5927310441373-Revo-Voron-Datasheet> (2023.05.07.)
- [13] VZ Goliath: <https://github.com/VzBoT3D/Goliath> (2023.05.07.)
- [14] Sec-Kit SK-Go: <https://seckit3dp.design/price/sk-go> (2023.05.07.)
- [15] Klipper firmware: <https://www.klipper3d.org> (2023.05.07.)
- [16] F. Weigert, R. Hebenstreit, R. Füßl, R. Theska (2021): *Experimental Setup for the Investigation of Reproducibility of Novel Tool Changing Systems in Nanofabrication Machines*, Nanomanuf Metrol 4, pp. 181–189
- [17] J. Huopana, S.-G. Sjöling, M. Taborrelli (2007): *Design of Precision Alignment of Compact Linear Colliders Accelerating Structures*, diplomamunka, University of Oulu, Finnország

- [18] Prusa XL: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-xl-2/> (2023.05.17.)
- [19] E3D Tool Changer szerszámfej: <https://e3d-online.com/products/toolchanger-toolhead> (2023.05.18.)
- [20] Takács Gy., Zsiga Z., Szabóné Makó I., Hegedűs Gy. (2009): *Gyártóeszközök módszeres tervezése*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Miskolci Egyetem
- [21] Permanens elektromágnes: <https://www.conrad.hu/p/elektromagnes-25-n-24-vdc-36-w-intertec-its-pe-1515-24vdc-1218317> (2023.09.20)
- [22] Rugós tűskék: <https://www.mill-max.com/products/spring-loaded/pogo-pin-header-strip/823-xx-xxx-10-002101> (2023.10.16)
- [23] Klipper Tool Changing Code: https://github.com/TypQxQ/Klipper_ToolChanger (2023.10.18)
- [24] Ember Prototypes optikai kalibrálás: <https://www.emberprototypes.com/products/cxc> (2023. 10. 21.)

Eredetiség nyilatkozat

Alulírott Bene Dániel, a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2023. 11. 06.


.....
a hallgató aláírása

A konzulens nyilatkozata

Alulírott, Dr. Rónai László a Miskolci Egyetem Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézetének oktatója a Több alapanyaggal történő 3D-s nyomtatás tervezése című TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Miskolc, 2023. 11. 06.


.....
a konzulens aláírása