



TDK DOLGOZAT

**Egyedi porterítő mechanizmus tervezése és
gyártása fém 3D nyomtató berendezéshez**

**Lakatos Bálint
EI1SXQ**

**Gépészmérnöki MSc szak
Alkalmazott mechanika specializáció**

2. évfolyam

Belső konzulens:

Dr. Kocsis Bence János

Tudományos munkatárs

Győr, 2024

Kivonat

Egyedi porterítő mechanizmus tervezése és gyártása fém 3D nyomtató berendezéshez

A dolgozatomban célja a Széchenyi István Egyetem Lézerszinterező Laboratóriumában található EOSINT M270 fém 3D nyomtatóhoz egy olyan porterítő mechanizmus tervezése és készítése volt, mellyel akár néhány mikrométeres szemcseméretű és eltérő anyagtulajdonságú fémporokat is egyenletesen el lehet teríteni a tárgyasztalon porágyas fúziós (powder bed fusion - PBF) eljárások esetén. A fejlesztésnek két fontos aspektusa van. Egyfelől a kis szemcseméretű fémporból kiinduló nyomtatás más mikroszerkezetet fog eredményezni (pl. Ti6Al4V esetén), másfelől pedig a különböző alapanyagok egyidejű kezelése és terítése lehetővé teszi PBF eljárás esetén a „multi material printing” megvalósítását. Munkám során definiáltam a mechanizmussal szemben támasztott peremfeltételeket, amelyeket a tervezés, fejlesztés során figyelembe kellett venni. A fejlesztést megelőzte egy korábbi prototípus, amely a különböző alapanyagok egyidejű kezelését, terítését már meg tudta valósítani, Ennek bemutattam a felépítését és a működését is. Dolgozatomban ismertetésre kerültek a fejlesztési folyamat eredményeként született különböző rezgő poradagoló koncepciók is. Az alkalmazási feladat és környezet ismeretében kiválasztottam a legalkalmasabbnak vélt kialakítást. A tervek alapján ezután elkészítettem FDM 3D nyomtatási technológiával a prototípusokat, amelyeket szabványos alkatrészekkel és kötőelemekkel építettem össze. Minden prototípust megvizsgáltam, hogy az a terv alapján megvalósítva milyen mértékben működőképes. A működőképes prototípusokat ezután különböző anyagú fémporokkal teszteltem. A tesztek során a mechanizmusok időarányos áteresztő képességét mértem. A mérés eredménye megadta, hogy az adott prototípus egy időegység alatt mekkora tömegű fémport volt képes áteresztetni. Ezenkívül az áteresztés képét figyeltem meg szemrevételezéssel, hogy a fémpor mennyire egyenletes, miután a tárgyasztalra hullott. A mérési eredmények alapján kiválasztottam az optimálisnak vélt prototípust, amely alkalmas lehet a különböző alapanyagok kis szemcseméretű fémporainak terítésére. Ez lehetőséget ad a későbbiekben arra is, hogy a nyomtatás során több különböző alapanyag is felhasználható legyen (multi material printing).

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Szakirodalmi áttekintés	2
2.1. Additív technológia története.....	2
2.2. Additív gyártás általános folyamata.....	4
2.3. FDM technológia	8
2.4. DMLS/SLM/PBF technológia	10
2.5. Multi material DMSL nyomtatás	14
3. Porterítő mechanizmus tervezés.....	18
3.1. Fejlesztési követelmények, peremfeltételek	18
3.2. Előzetesen fejlesztett porterítő mechanizmus	19
3.3. Egyedi rögzítési megoldás a gépre.....	20
3.4. Szitaháló alkalmazása	21
3.5. Vezetékes modell (1. verzió).....	21
3.6. Vezetékes modell (2. verzió).....	23
3.7. Függesztett modell	25
4. Összefoglalás	29
5. Irodalomjegyzék.....	30

1. Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb teret hódít az additív gyártástechnológia az iparban és a hétköznapi életben is. Az eljárást anyagépítő vagy additív eljárásnak is nevezik. Korábban két meghatározó technológiai csoportot tartottak számon, az anyagleválasztó vagy szubsztraktív és az anyagalakító technológiai csoportot. Az anyagleválasztó technológia fő ága a forgácsolás, melynek során az anyag kezdeti térfogatát csökkentjük olyan módon, hogy a kívánt formát érjük el. Az anyagalakító eljáráshoz sorolható a képlékenyalakítás, melynek során az anyag kezdeti térfogatát nem, csak alakját változtatjuk meg. Ezekkel az eljárásokkal szemben az additív gyártás során a művelet közben épül fel a kívánt geometriájú test, tehát a művelet közben egyre nő az alkatrész térfogata.

Az additív technológiát több csoportra lehet bontani a működési elv függvényében. Alapanyaga leggyakrabban műanyag, viszont ipari körülmények között fém és kerámia is felhasználható alapanyagként. A fémek additív gyártásban történő felhasználása mindig bonyolultabb és költségesebb, mint műanyagoké. Az anyagépítő eljárást ipari körülmények között általában gyors prototípus gyártásra alkalmazzák, viszont kisebb szérianagyság esetén akár késztermék is gyártható vele költséghatékonyan. Az additív technológia további előnye, hogy olyan bonyolult geometria is gyártható a segítségével, ami hagyományos eljárással nem valósítható meg.

Dolgozatom célkitűzése egy porterítő mechanizmus tervezése és gyártása a Széchenyi István Egyetemen található DMLS (direct metal laser sintering) technológiájú EOSINT M270-es fém 3D nyomtatóhoz. Eredetileg a nyomtató egyszerre csak egyetlen alapanyaggal képes dolgozni. Kutatások szempontjából viszont hasznos lenne, ha rétegenként lehetne eltérő alapanyagot használni. Jelenleg van egy már meglévő mechanizmus a géphez, amivel megvalósítható a több alapanyagot felhasználó nyomtatás, viszont ez nem minden alapanyag esetén működik megfelelően, ezért szükséges a mechanizmus továbbfejlesztése. A dolgozatomban különböző koncepciókat készítettem el és teszteltem. A tervezett verziókat költséghatékony módon, FDM (fused deposition modeling) 3D nyomtatási technológiával gyártottam le, valamint kereskedelmi forgalomban kapható alkatrészek és kötőelemek segítségével szereltem össze. A cél egy olyan mechanizmus megalkotása volt, amellyel azok a fémporok is egyenletes rétegvastagságban teríthetők, amelyek a jelenlegi eszközzel nem. Ezenfelül szeretném elérni, hogy több beállítási lehetőség segítségével univerzálisan használható legyen a mechanizmus az Egyetem fém DMLS nyomtatóján.

2. Szakirodalmi áttekintés

A dolgozatom első részében feldolgozom a feladat témájához kapcsolódó magyar és angol nyelven publikált szakirodalmat. Ez az elméleti háttér segítséget nyújt a téma mélyebb megértésében. A fő téma a mechanizmustervezés. Mivel additív eljárással lesznek elkészítve az alkatrészek, ezenfelül a dolgozat tárgya egy fém 3D nyomtatóhoz tartozó kiegészítő eszköz tervezése, ezért ebben a részben a szakirodalmi források segítségével a műanyag és fém 3D nyomtatási technológiákról, valamint az ezekhez kapcsolódó gyártáshelyes tervezésről fogok értekezni.

2.1. Additív technológia története

Az első szabadalom az additív technológiához köthetően 1984-ben jelent meg Charles Hull által, aki a 3D Systems társalapítója volt (1. ábra). A 3D Systems első eszköze sztereolitográfia elven működő SLA-1 volt. Ez volt a világ első kereskedelemben kapható 3D nyomtatója. A termék forgalmazását 1987-ben kezdték el. A sztereolitográfiát használó eszköz alapanyaga egy folyadék halmazállapotú fotopolimer volt. Az eljárás során egy lézernyaláb végigpásztázza azt a felületet, ahol a termék CAD modellje alapján éppen szükséges a polimerizáció beindítása és a fotopolimer térhálósítása. A polimerizáció során az anyag molekulaszervezete átalakul, ezáltal szilárd anyag képződik. A fotopolimerben UV-fény hatására megindul a polimerizáció, tehát azon a ponton, ahol a fotopolimer UV-fénynek volt kitéve, megszilárdul. A folyamatot rétegenként megismételve előállítható a kívánt térbeli alkatrész [1, 2, 3].



1. ábra Charles Hull szabadalmaztatott SLA nyomtatója [3]

A Stratasys vállalat 1991-ben szabadalmaztatta az FDM (fused deposition modeling, folytonos szálhúzásos eljárás) technológiát. Ennél az eljárásnál hőre lágyuló polimerszálat olvaszt meg a gép, majd ebből a szálból alakítja ki az adott réteg kontúrját és kitöltését. A Stratasys mellett nemsokkal később a német EOS is megalkotta az első FDM nyomtatóját, a STEREOS 400-at [1].

Az FDM technológián kívül 1991-ben még a LOM (laminated object manufacturing, réteg laminálás technológia) eljárást szabadalmaztatta a Helisys. Alapanyaga lehet egyik oldalán hőre lágyuló polimerrel bevont papírlap, extrudált polimer lap vagy fémlap. A művelet során a réteget alkotó lapokat egymásra helyezik, majd hő bejuttatásával adhéziós kapcsolatot képeznek a jelenlegi és az előző lap között. Polimerlapok esetében ezt lézerrel végzik. A technológiának két ágát különböztetik meg. Az egyikben előre elkészített rétegekkel dolgoznak, míg a másikban a művelet közben kerül a réteg kialakításra. Az előre elkészített réteg esetén a réteg teljes területén hőt sugároznak be. A művelet közbeni verziónál a lézerrel azt a területet pásztázzák, amelyiknek az előző réteggel kapcsolatot kell létesítenie. A befejezést követően azok a részek, amik nem olvadtak össze, eltávolíthatóak, ezáltal előáll a kívánt geometria. Csak prototípus gyártásra lehetséges a használata. A magassági irányú méretpontossága rossz, valamint a rétegek közötti adhézió gyenge, ezért rossz mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik az így gyártott test [1, 4].

Az EOS 1994-ben forgalomba hozta az első additív gyártóeszközt, amellyel fém alapanyagból lehet terméket előállítani, az EOSINT 160-at. A gép a DMLS (direct metal laser sintering, fémpor közvetlen szinterezése) technológiát használ. A folyamat során a tárgyasztalon elterített fémport egy irányított lézersugár végigpásztázza a kívánt rétegnek megfelelően, ahol a bevitt hő miatt a fémpor szemcsék egymáshoz tapadnak [1].

1999-ben megjelent a fém 3D nyomtatásban egy új technológia, a DED (direct energy deposition, közvetlen energia bevezetés). A folyamat során megfelelő mennyiségű olvasztott fémet juttatnak a kívánt pozícióba, amely első réteg esetén a tárgyasztalra, a többi réteg esetén az előző, már megszilárdult fémrétegre kerül. A felhasznált fém alapanyag a gép felépítésétől függően lehet szál vagy por formában. A fémet lézer- vagy elektronsugár olvasztja meg, mielőtt az az előző réteghez ér. Fémszál alapanyag esetén a szál vége kerül megolvasztásra, a szál elötölásával pedig folyamatosan biztosítható az alapanyagutánpótlás. Az olvasztási pont környezetébe inert gázt vezetnek, hogy csökkentsék az olvadt fém oxidációját. Fémpor alapanyag esetén a nagyenergiájú nyaláb fókuszpontjába fúvókán keresztül történik a fémpor bevezetése. Inert gázra ebben az esetben is szükség van, ezt gyakran úgy oldják meg, hogy a fémport az inert gáz szállítja és juttatja a lézer fókuszpontjába [4].

A következő években egyre több gyártó lépett be a 3D nyomtatók piacára. A 2000-es években kezdett az iparban elterjedni az additív technológia. Addig inkább kísérleti, kutatás-fejlesztési célokra alkalmazták a nyomtatókat. Ebben az időszakban kezdett el a gyors prototípusgyártás és a gyors szerszámgyártás egyre szélesebb körben elterjedni. A 3D nyomtatókhöz a következő években egyre kedvezőbb áron lehetett hozzájutni. Emiatt lépett be egy új szegmens a piacra, az otthoni 3D nyomtatás. A 2010-es években kezdtek megjelenni azok a 3D nyomtatók, amelyek már otthoni felhasználásra is alkalmasok voltak. A technika fejlődésével minőségük egyre javult és a vételáruk is csökkent. Emellett meg kell említeni azt is, hogy a működtetésük, üzemeltetésük egyszerűsödött, ami miatt még több felhasználó vásárolta meg a gépeket [5].

Míg ebben az időben az otthoni gépek fő vásárló rétege a technológia iránt érdeklődő hobbisták vagy mérnökhallgatók voltak, addig mára már a szakmailag kevésbé hozzáértők is vásárolják a 3D nyomtatókat. Napjainkban emiatt már megvalósítható a DDM (direct digital manufacturing, közvetlen digitális gyártás) technológiai ágazat. Eszerint teljes mértékben kikerülhetők a hagyományos gyártástechnológiák. Ez a mai 3D nyomtatók minőségének köszönhető. Évek óta terjed a trend, miszerint a 3D nyomtatókat már nem csak kísérleti eszközként vagy prototípus gyártásra lehet alkalmazni, hanem közvetlenül késztermék előállítására is alkalmas. A DDM elve ezt használja ki. A termék CAD (computer-aided design, számítógéppel segített tervezés) szoftverben kerül megtervezésre. Ezután a megfelelő előkészítés után gyárthatóvá válik a 3D nyomtató segítségével. A nyomtató az alapanyagból rétegenként felépíti a testet, így előáll az a termék, ami a CAD programban volt jelen. Mivel a gyártáshoz nem volt szükség anyagalakító vagy anyagleválasztó eljárásra, ezért a folyamat teljesen digitálisnak nevezhető [5].

Ez az eredmény egy új ágat nyit a piacon, az otthoni gyártást. Napjainkban létezik a jelenség, hogy a vásárló nem a terméket vásárolja meg, csak a termék modelljét, amit aztán otthon elkészíthet. A másik példája ennek, hogy a gyártó biztosítja egy termék bizonyos alkatrészeinek modelljét, így meghibásodás esetén otthonról is pótolható az alkatrész. Habár az additív gyártás jelenlegi technológiai sajátosságai nem teszik lehetővé, hogy tömeggyártásban alkalmazható legyen, egyedi vagy kisserős gyártásra megfelelő otthonra és az iparban is [5].

2.2. Additív gyártás általános folyamata

A 3D nyomtatás első lépése, hogy rendelkezünk kell azzal a digitális modellel, amit le szeretnénk gyártani. A termék koncepciója viszont sokszor csak rajzlapon vagy szóbeli magyarázat alapján létezik. A műszaki életben használt digitális modelleket leggyakrabban

valamelyik CAD szoftverben készítik el. A szoftverek hasonló elven működnek, parametrikus modellezési eljárással leggyakrabban szilárd-test modellezéssel, ritkábban felületmodellezéssel készítik el a kívánt geometriát. A 2. ábrán egy csészéről készült parametrikusan felépített CAD modell látható [6].



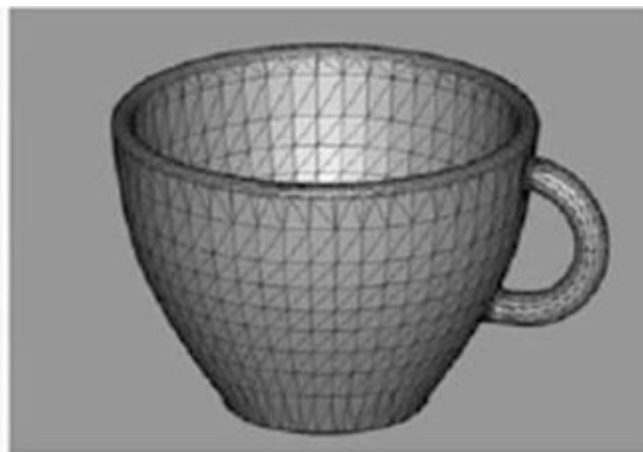
2. ábra Csésze CAD modellje [6]

Előfordulhat olyan helyzet is, amikor már egy meglévő alkatrészről kell másolatot készíteni. Erre akkor van szükség, ha cserealkatrészre van szükség egy adott termékből. A probléma ebben az esetben, hogy nagy általánosságban nem áll rendelkezésre dokumentáció vagy műszaki rajz az alkatrészről. Ilyen esetben az RE (reverse engineering, visszafejtés) módszer alkalmazható. Ez lényegében az alkatrész visszamodellezése. Az, hogy milyen eszköz szükséges ehhez a folyamathoz, a geometria bonyolultsága határozza meg. Egyszerűbb esetben kézi mérőeszközökkel, tolómérővel, mérőszalaggal, szögmérővel, rádiusz sablonnal és menetfésűvel visszafejthető egy adott alkatrész geometriája. Bonyolult tárgy esetén felületdigitalizációs technikával lehet visszanyerni a pontos geometriát. Ezek az eszközök olyan többkamerás rendszerek, amelyek speciális megvilágítás mellett a felületet pontok sokaságaként, pontfelhőként tudják leírni. Ebből a pontfelhőből manuálisan kialakítható a tárgy felületmodellje. Az átalakítás már automatikusan is elvégezhető, de ekkor a digitalizáció során előforduló hibásan mért pontok az átalakított modellen is megjelennek [7].

Napjainkban sok olyan webhely található meg az interneten, ahol különböző modell adatbázisok vannak. Ezáltal elérhetőek bonyolultabb, vagy sok ember által használt modellek is. Az adatbázisok pozitívuma, hogy azok is hozzájuthatnak a különböző alkatrészek modelljéhez, akik nem értenek a CAD szoftverek használatához [6].

Miután megvan a kívánt 3D CAD modell, utána át kell alakítani azt, hogy előkészíthető legyen a nyomtatásra. Előtte még meg kell vizsgálni, hogy a modell nem rendelkezik-e

anyagvastagág nélküli felületekkel, tehát a geometriája teljesen zárt-e. Szilárd test modellezéssel készült modellek általában mindig zártak, felületmodellezéssel készített tárgy esetén előfordulhat, hogy az nyitott marad. A nyomtatáshoz használt univerzális modellformátum az STL (standard tessalation language, szabványos tesszalációs nyelv), mivel a CAD modellek túl sok információt tartalmaznak. Az additív gyártáshoz viszont elegendő a test zárt burkolófelületének az ismerete. A tesszaláció egy olyan eljárás, amely egy síkbeli vagy térbeli felületet primitív geometriai síkidomokkal, általában háromszögekkel vagy négyszögekkel hézagmentesen lefed (3. ábra). Az STL fájlformátum háromszögeket használ a felület lefedésére. A háromszögek pontos és egyértelmű eltárolásához 4 különböző adat szükséges. A háromszög 3 csúcsának koordinátái a térben, valamint a háromszögből kifelé mutató normálvektor. A teret derékszögű koordinátarendszerrel írja le. A háromszögek mérete változó, minél egyszerűbb, simább egy felület, annál kevesebb és nagyobb méretű háromszöggel lehet az lefedni [8].



3. ábra Csésze STL modellje [6]

A következő lépés a modell szeletelése, vagyis rétegekre bontása. A célra különböző programok állnak rendelkezésre, általában mindegyik technológia, de esetenként még nyomtató specifikusak is. A program generálja azt a kódot, amit a nyomtató vezérlője dekódolni tud és ami alapján a különböző mozgáspályákat, paramétereket használni tudja a gyártási folyamat során. A programban egyéb tulajdonságokat is meg lehet határozni még a generálás előtt. Ilyenek például a gyártandó tárgy pozíciója a tárgyasztalon, valamint a tárgy orientációja. Az orientáció optimális meghatározása kulcsfontosságú, mivel ez nagyban befolyásolja a test szilárdságát és a felhasznált támasztékok típusát és mennyiségét [6, 8].

Ezután következik a 3D nyomtató felkészítése. A folyamat általában alapvető tevékenységeket foglal magába. A gép feszültség alá helyezése, alapanyag betöltése, gép pozicionálása, nullpontba állítása... stb. Ez a lépés nagyban technológiaspecifikus. Az otthoni

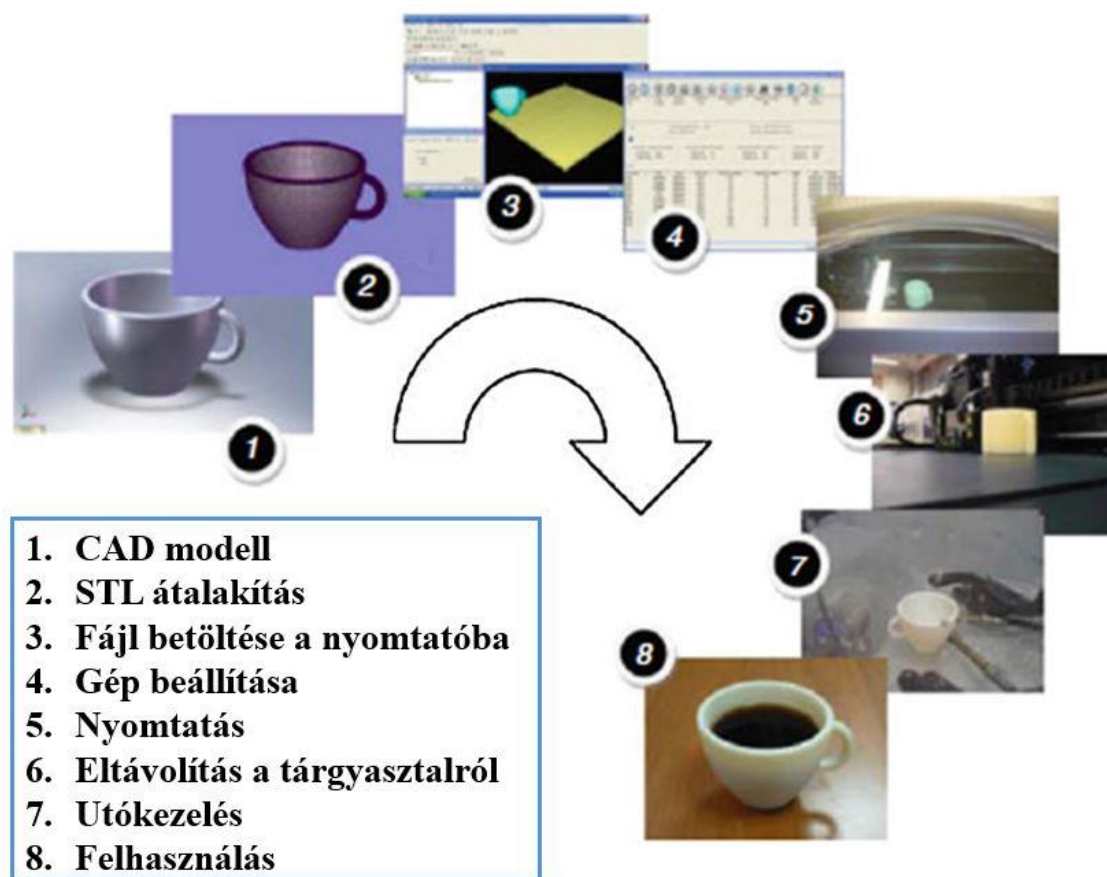
felhasználásra készített nyomtatók esetében arra törekszik a gyártó, hogy a beállítási idő minél rövidebb legyen, valamint a folyamat minél egyszerűbb, lehető legnagyobb mértékben automatizált legyen [8].

Ezután már a folyamat lényegi része, a gyártás következik. Ennek során rétegenként felépül a valóságban a kezdetben digitális modell. A folyamat nagyban eltér attól függően, hogy mely technológia elvén működik a nyomtató. A nyomtatás folyamata a legtöbb esetben automatikus, de előfordulnak olyan speciális folyamatok, amelyek manuális beavatkozást igényelnek. Ilyen lehet például a nyomtatás anyagának vagy színének módosítása. Ezenfelül érdemes figyelni a nyomtatás folyamatát, mivel előfordulhatnak olyan hibák, amely során megakad a gyártás, vagy a nyomtatás további részében elkészített része a testnek használhatatlan lesz. Ilyen esetben a felesleges alapanyag- és energiafelhasználás végett érdemes leállítani a nyomtatást, majd a hiba kiküszöbölése után újraindítani a folyamatot, amennyiben lehetséges [8].

Az befejező lépés a kész tárgy eltávolítása a tárgyasztalról és szükség esetén az utómunkák elvégzése. Az eltávolítás polimer alkatrészek esetén viszonylag egyszerű, kézzel vagy kézi szerszámokkal lehetséges. Fém 3D nyomtatás esetén gyakran csak szikraforgácsolással vagy hagyományos forgácsoló eljárásokkal távolítható el a tárgy az asztalról. A modelleket bonyolultságtól és elhelyezéstől függően támaszanyaggal együtt kell nyomtatni. A támaszanyag eltávolításának nehézsége hasonló a tárgyasztalról való eltávolításával. Hőre lágyuló polimer nyomtatásakor érdemes forró levegővel melegíteni a támasz és a test találkozásának felületét, így könnyebben leválasztható a támaszanyag. Az eltávolítás kezűgyességet igénylő feladat, mivel több technológia esetén sem rendelkezik még a tárgy a végleges mechanikai tulajdonságaival, így eltávolításkor könnyen megsérülhet. A 3D nyomtatott darabok felületi érdessége elmarad a hagyományos úton gyártott termékekétől. Ez javítható a felület marásával, csiszolásával. Azokat a felületeket is érdemes megcsiszolni, ahol a támaszték csatlakozott a tárgyhöz, mivel ott fokozott felületi érdesség tapasztalható [6, 8].

Technológiától függően utókezelésnek is alá kell vetni a tárgyakat. Az utókezelés típusa lehet hő- vagy kémiai kezelés, ennek módja nagyban függ a nyomtatás típusától. FDM nyomtatásnál általában nem szükséges utókezelés, bizonyos anyagoknál alkalmazható hőkezelés. SLA technológiánál először a felesleget eltávolító öblítést, majd UV fénnel történő megvilágítást alkalmaznak, hogy a fotopolimer teljes mértékben polimerizálódjon és megszilárduljon. Fém 3D nyomtatásnál közepes vagy magas hőmérsékletű hőkezelést alkalmaznak, hogy a fémszerkezetbe befagyó maradó feszültséget relaxálják, vagy az esetlegesen kívánt mikroszerkezetet kialakítsák. Az utókezelés utolsó lépése lehet a bevonatolás

vagy festés. Ezt általában a felhasználás módja határozza meg. Ezek után már használatra kész a termék. Fontos itt megemlíteni, hogy az otthoni 3D nyomtatás utómunkálata legtöbbször nem ilyen összetett. A tárgyasztalról egy mozdulattal eltávolítható a gyártott tárgy, ami aztán egyből használatba vehető. A 4. ábrán végig kísérhető az additív gyártás általános, technológiától független folyamata [6, 8].

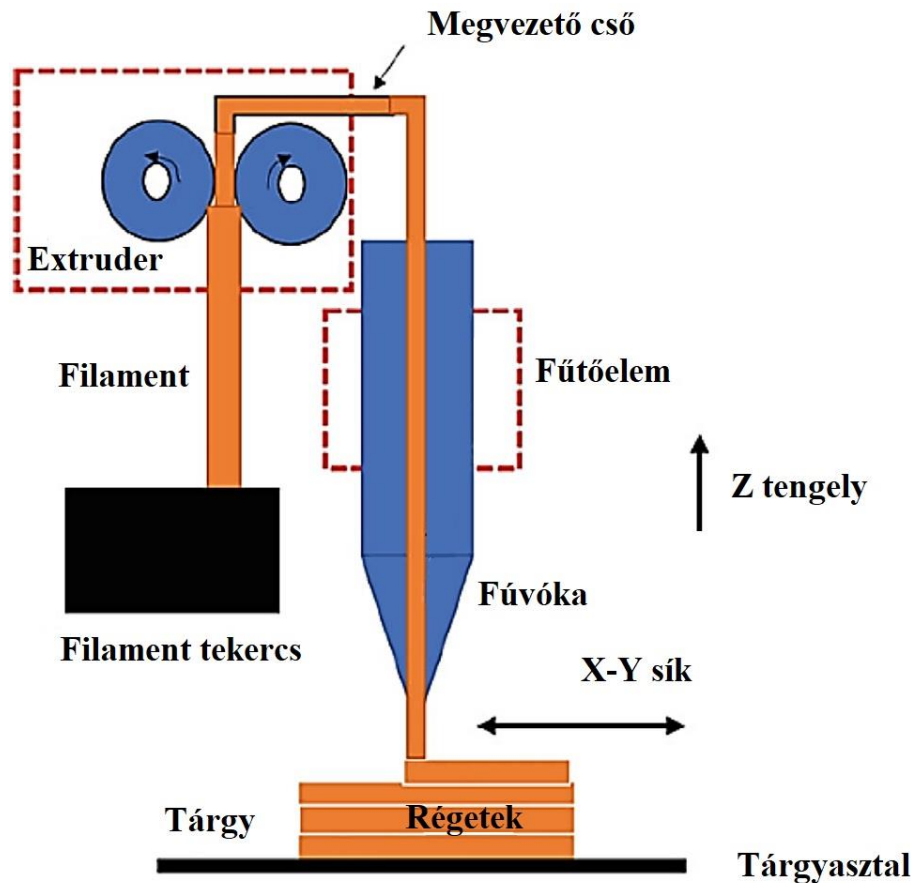


4. ábra Additív gyártás folyamata [6]

2.3. FDM technológia

Az FDM nyomtatás alapanyagául a hőre lágyuló polimerek szolgálnak. Ezek a polimerek extrudált folytonos szál formában egy dobra tekercselve kaphatóak a kereskedelemben, a szaknyelvben filamentnek hívják az alapanyagot. A filamentszálat az extruder továbbítja a fűtött nyomtatófejhez. A nyomtatófejben a polimer megömlik, majd a szál további előtolása miatt a fűvókán kiáramlik az ömledék (5. ábra). A fűvókát egy rétegvastagságnyi magasságban mozgatják az előző réteg felett. Az első réteg a tárgyasztalra, a többi réteg pedig egymásra vagy a támaszanyag rétegre kerül. Az ömledék állapotban lerakott szál az előző réteghez vagy a tárgyasztalra tapad. Ezután az alsóbb réteg hőelvezetése és az aktív ventilátoros hűtés miatt a polimer megszilárdul [9, 10].

A nyomtatókon általában cserélhető fűvóka található, így különböző átmérőjű fűvókára lehet cserélni. Nagyobb fűvókaátmérő esetén gyorsabb lesz a folyamat, viszont romlik a tárgy felületi minősége. Nyomtatáskor a hézag a fűvóka és az előző réteg között általában a fűvókaátmérő fele, így összenyomott, ovális keresztmetszetű réteget kapunk nyomtatáskor. Ez a rétegen belüli és a rétegek közötti adhéziót egyaránt segíti [9, 10].



5. ábra FDM technológia elvi működése [9]

A nyomtatott test a legtöbb esetben nem tömör, hanem bizonyos mértékű kitöltéssel készül el. Ez azt jelenti, hogy a test kontúrja tömören készül el, majd a test belső térfogatában bizonyos mintázat kerül kialakításra. A szeletelő programban meghatározható a kitöltés mértéke térfogatszázalékos formában. Ennek köszönhetően levegős üregek kerülnek a test belsejébe. A mechanikai tulajdonságok a kitöltés mértékével egy bizonyos szintig nőnek, viszont a felhasználás módja nem mindig indokolja csak a jó mechanikai tulajdonságokat. Ezért ilyenkor érdemes a kitöltés mértékét csökkenteni vagy a kitöltési mintázatot megváltoztatni. A kitöltési százalék csökkentésével csökken a felhasznált filament, ezzel együtt a kész test tömege is, valamint csökkenteni lehet a gyártási időt is [11].

Az FDM nyomtatás fontos eleme a támaszték. A támaszték használatával lehetséges a technológia korlátoltságának kompenzálása. Mivel rétegenként épül fel a test, ezért egy olyan geometriai elem, amely alatt nem található másik réteg, nem nyomtatható. Ez alól vannak bizonyos kivételek. Ha a rétegek fokozatosan szélesednek a magasság növelésének irányába, akkor az alsó réteg meg tudja támasztani a felette lévő új réteget. Ezt az esetet túlnyúlásos nyomtatásnak nevezik. A túlnyúlásnak van egy alapanyagtól és nyomtatási paraméterektől függő háttárszöge, amit még lehetséges nyomtatni támaszték nélkül. Ezt az értéket túllépve támasztékot kell alkalmazni, különben a rétegek nagymértékben deformálódnak. A másik eset, amikor a síkon két felületet kell összekötni úgy, hogy azok egy szakaszon nincsenek altámasztva. Ilyen esetben, ha az átkötő szálak húzása egy egyenes mentén történik, akkor megvalósítható az összekötés támaszték nélkül is. Ez azért lehetséges, mert a fúvókából kiáramló polimer szál a nyomtatófej síkban történő mozgása folyamatosan feszesen tartja. A kiáramlott polimer pedig gyorsan megdermed a hűtés miatt, így növekszik a szilárdsága, aminek köszönhetően csak minimálisan fog lehajlani az alátámasztatlan réteg a két felület között [12].

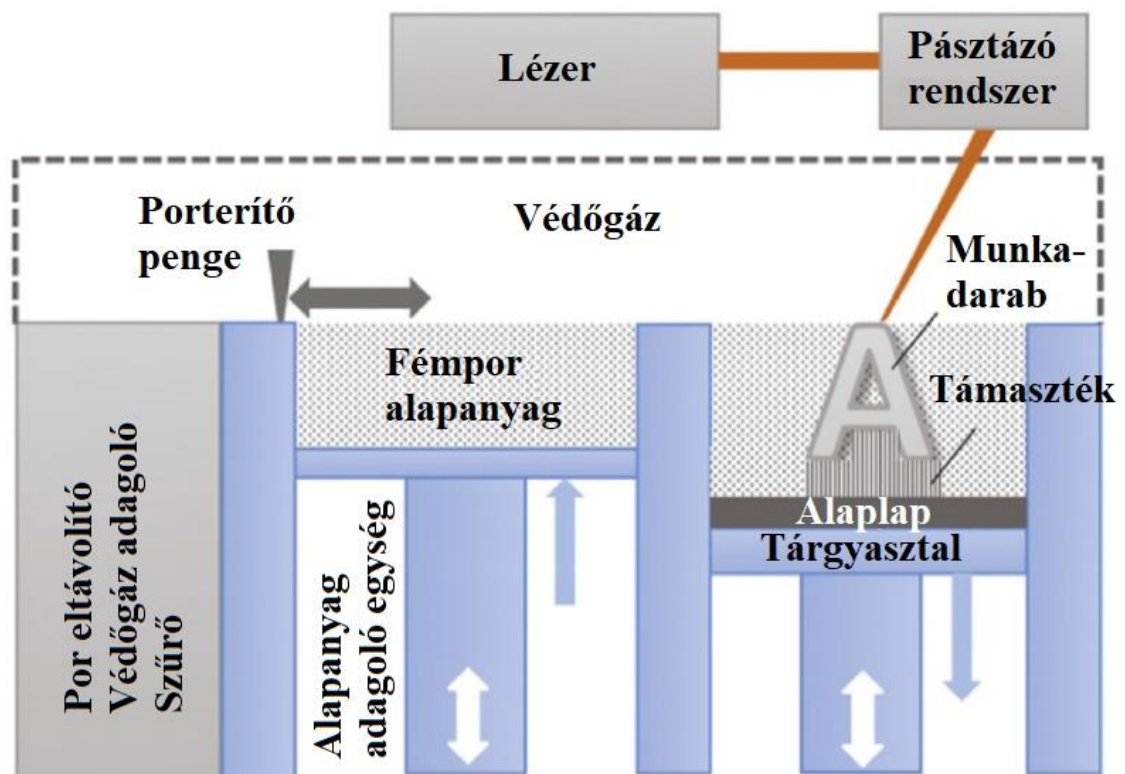
A támaszték egy olyan általában a szeletelő program által generált struktúra, amely alátámasztja a test geometriájának azon elemeit, amelyeknek a test saját alsóbb rétege nem ad kellő megtámasztást. A támasztéknak sok negatív hozadéka is van. Plusz anyaghasználatot, ezáltal megnövekedett gyártási időt jelent. A támasztékot a nyomtatás befejezésével el kell távolítani, ezenfelül támaszték és a test találkozásánál felületi hiba léphet fel, amit csiszolással javítani kell. Ezek növelik a ráfordított munkaórák számát, így a költséget is. A nyomtatás során ezért minimalizálni kell támasztékok mennyiségét [12].

A test megfelelő orientációjának beállítása ezért nagyon fontos a modell előkészítése során. Megfelelő elhelyezéssel csökkenthető a felhasznált támaszanyag mennyisége. Az elhelyezés során viszont arra is ügyelni kell, hogy ez az elkészült test mechanikai tulajdonságait is befolyásolni fogja. FDM nyomtatás során anizotróp szerkezetű alkatrészt lehet előállítani, tehát a különböző irányba ható mechanikai igénybevételekkel szemben eltérően reagál. A legjobb tulajdonsága szálirányban lesz, mivel ilyenkor a lehelyezett polimerszál anyaga is ellenáll a terhelésnek. Ettől eltérő irányban csökken a szilárdsága a tárgynak, mivel ilyenkor a terhelést csak a rétegek közötti és a rétegeken belül a szálak közötti adhézió veszi fel [12, 13].

2.4. DMLS/SLM/PBF technológia

A pontos terminológia használata fontos, de a szabályozás és szabványosítás csak az utóbbi években jelent meg a fém additív eljárásokra. A PBF eljárás vagy ahogy a munkám során

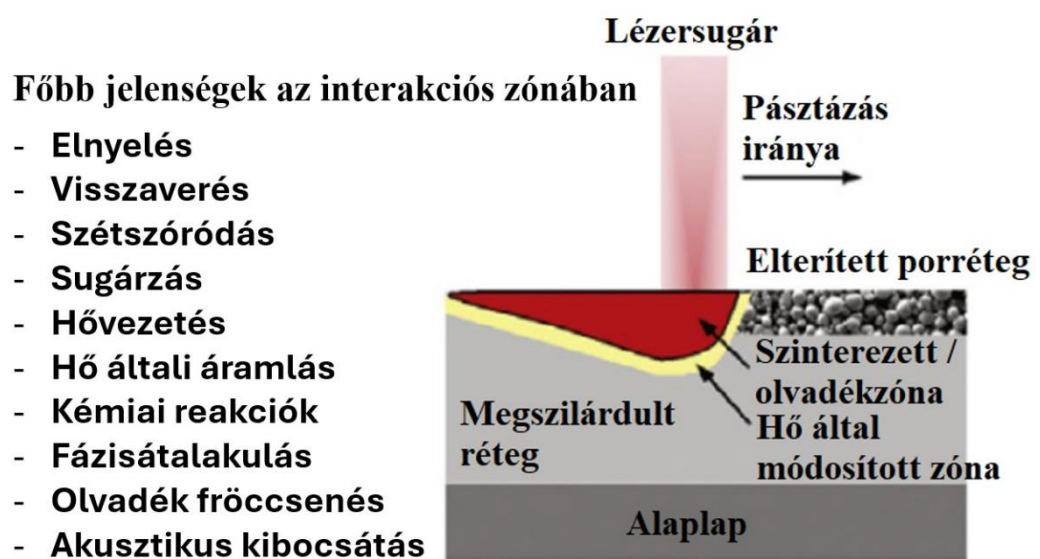
használt EOS berendezés gyártója hivatkozik rá, DMLS technológia a fém additív gyártás egyik legelterjedtebb formája. Szakirodalmi forrásokban sokszor SLM eljárásként hivatkoznak rá. A DMLS eljárás a porágyas eljárások csoportjába tartozik, vagyis az egyenletesen elterített fémpor réteget nagy energiájú, koncentrált nyalábbal, hő bevezetésével szinterezik, így a fémporban lévő kristályok az újrakristályosodás miatt összenőnek. A hőenergiát kis felületre kell koncentrálni, hogy biztosított legyen a pontos geometria és a megfelelő energiasűrűség a rekrisztalizációhoz. Ezt a fókuszált energiát elektronnyalábbal vagy lézerrel lehet létrehozni. Az elterített fémpornak vékony rétegűnek és egyenletesnek kell lennie. A DMSL gépek felépítésének fő összetevői a tárgyasztal, az alaplap, a poradagoló asztal vagy dugattyú, a terítő penge, a lézerforrás és a nyalábot irányító és fókuszáló optikai vagy elektromágneses tekercs-rendszer (6. ábra). A következő réteg elterítéséhez először a poradagoló asztal felemelkedik annyit, hogy egy meghatározott tömegű pormennyiség emelkedjen a terítési síkba. Ezután a terítő penge a felemelt porréteget áttolja az alaplap fölé és egyenletesen elteríti azt. Ekkor az energiaforrás által kibocsátott nyaláb a pásztázó rendszer révén végigjárja azokat a területeket, ahol az elkészítendő tárgy tömör rétege van. Ezután a tárgyasztal lesüllyed egy rétegvastagságnyi, ezáltal helyet biztosítva a következő rétegnek. A porterítés végén visszamaradt por egy gyűjtőkonténerbe kerül, ahonnan vissza lehet majd forgatni a következő gyártásba. A folyamatot minden réteg esetén megismételve kapjuk meg a kívánt alkatrészt [14].



6. ábra DMLS technológia elvi működése [14]

A terítő pengén belül két típust különböztetünk meg, rugalmas és merev pengét. A rugalmas penge általában gumiból készül, így finoman tudja elteríteni a fémport. Ha a készülő tárgy felfelé deformálódik, akkor a rugalmas penge nem fogja károsítani a tárgyat ütközés esetén, ezért folytatható a nyomtatás. Viszont az ütközés miatt nem lesz egyenletes az elterített porréteg, ezért a későbbi rétegekben rétegvastagsági, vagy rétegek közti adhéziós probléma léphet fel. Rugalmas penge használata esetén kevesebb támasz alkalmazása is elégséges lehet. A merev pengés terítő keményfémről vagy kerámiából készül. Merev pengés porterítő alkalmazása esetén nem engedhető meg a munkadarab deformációja, mivel ütközés során a penge elhajlítja vagy eltöri a munkadarabot, illetve a nyomtatandó tárgy is károsíthatja a pengét. Ilyenkor általában a nagymértékű sérülés miatt nem folytatható tovább a nyomtatás. A legtöbb berendezés fűthető tárgyasztallal rendelkezik. A tárgyasztal fűtésével csökkenthető a munkadarabban a belső feszültség, így csökken a tárgy megrepedési hajlama, valamint kisebb mértékű lesz a deformáció a gyártás folyamata során. Betétben edzett acélpor esetén a tárgyasztal 80 °C-ra történő felfűtése 20 %-kal csökkentette a gyártott test deformációját, a 600 °C-ra történő tárgyasztal felfűtés esetén pedig közel teljesen megszűnt a deformáció a munkadarabban [14].

A DMLS technológiában sok gyártási paraméter beállítása szükséges, hogy megfelelő legyen az előállított darab minősége. A 7. ábrán figyelhető meg részletesebben a lézer szinterezés folyamata. A zárt kamrában inert gáz található, hogy minimalizálja a fém por oxidációját. Nikkel és kobalt tartalmú fém porok esetén nitrogénnel töltik fel a kabint, míg alumínium és titán tartalmú porok esetén argont vagy héliumot alkalmaznak [14].



7. ábra Lézer szinterezés folyamata [14]

A legfontosabb paraméterek a lézerhez köthetők. Ilyen paraméter a lézer teljesítménye, a pásztázás sebessége, a lézernyaláb átmérője, tömör rétegnél a pásztázás sűrűsége, a túlfedés mérete, a pásztázási stratégia vagy a pásztázás szélessége. A beállítás célja, hogy kellő adhézió alakuljon ki a rétegen belül, valamint rétegek között is [14].

A fémpor meghatározó tulajdonsága az anyagminőségén kívül a szemcsemérete. Bizonyos anyagoknál (pl. Ti6Al4V) esetén a szemcseméret és az elkészült tárgy szakítószilárdsága között összefüggés figyelhető meg. A Hall-Patch összefüggés ezt a jelenséget írja le matematikailag az anyag szemcsemérete és szakítószilárdsága között:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1.)$$

ahol σ_y a folyáshatár, d a szemcseméret átlagos nagysága, σ_0 és k pedig anyagi állandók. A Hall-Patch összefüggés egy közelítő becslés, hogy az anyag folyáshatárértéke hogyan változik a szemcseméret csökkenésével [15, 16].

A DMLS technológia utókezeléseként általában hőkezelésnek vetik alá az elkészült tárgyat annak ellenére, hogy hőkezelés nélkül is megfelelő mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik. Hőkezelés során újrakristályosodik a munkadarab szerkezete, így az egyenletesebb lesz. Csökken a belső feszültség, valamint egyenletesebb lesz a rétegen belüli és rétegek között adhézió [17].

A technológia hatékonysága javítható, ha a tervezés és a modell előkészítéskor bizonyos tervezési elveket betart a felhasználó. A meg nem olvasztott fémpor nem szolgál támasztékként, ezért anyagtól függő túlnyúlási szög esetén támasztékot kell alkalmazni. Célszerű ezért a ferde felületeket úgy pozicionálni, hogy azok öntartóak legyenek, így elkerülhető a támasz készítése. A nyomtatás síkra merőleges síkon lévő furat kis átmérő esetén nyomtatható támaszanyag nélkül, viszont az átmérő növekedésével az átmérő felső része egyre kevésbé tartja a kör alakot, mert eltorzul és romlik a felületi minősége, így nagyobb átmérőnél érdemes támasztékot használni. Ha a furatnak nem kell a teljes ív mentén körkörösnek lennie, akkor kör alakú furat helyett lehet csepp alakú furatot használni. Ilyenkor a csepp szűkülő részének kell pozitív Z-irányba néznie. A csepp szűkülő szára jobban öntartó, így nem kell támasztékot használni. Alátámasztás nélküli felületek alá mindig támasztékot kell helyezni. Ilyenkor érdemes megvizsgálni a modell orientációját, mert lehetséges egy olyan beállítást találni, amikor a test egyik felülete sem zár be túl nagy szöget a tárgyasztal síkjával, így minimalizálható a felhasznált támaszanyag mennyisége. Merev penge esetén az orientáció beállításakor még egyéb tényezőkre is figyelni kell. Ha a test hosszúkás alakú, akkor a hosszabb mérete ne legyen párhuzamos a terítő pengével. Erre azért van szükség, mivel a pengével párhuzamos orientáció

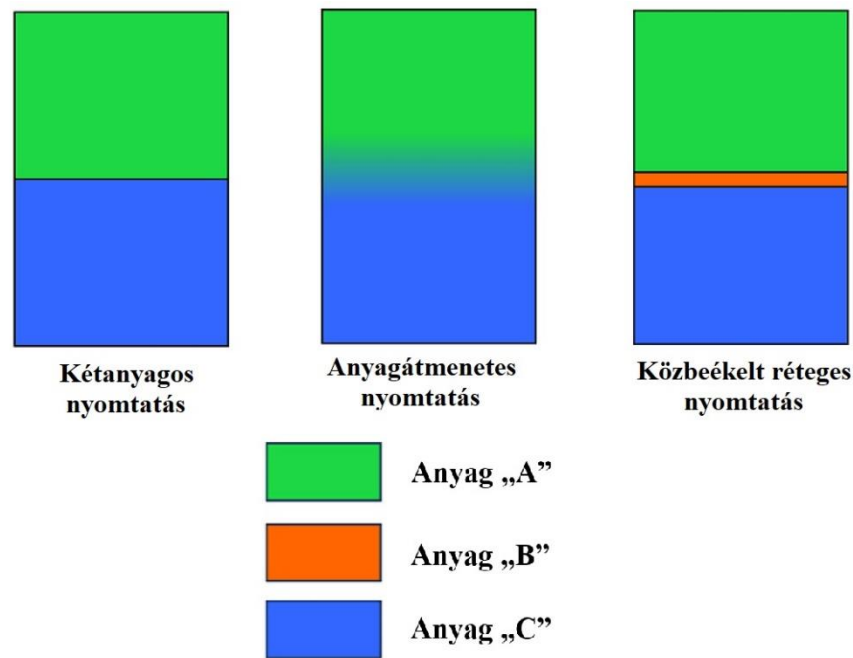
esetén egyszerre halad át a penge a test teljes hosszán, ezért egyszerre kell a következő porréteget a munkadarab fölé teríteni, ami egyenetlen réteget eredményezhet. Előkészítéskor a magas, hosszúkás testeknél is van egy ajánlás. Amikor a test felett elhalad a terítő penge, akkor a kettő közötti szűk részben lévő fémpor miatt erő adódik át a munkadarabra, ami hajlítófeszültséget eredményez rajta. Minél magasabb a test, annál nagyobb lesz a hajlítófeszültség mértéke. Ez a test deformálódásához vagy töréséhez is vezethet. Ezért kerülni kell azoknak a testeknek a függőlegesen orientál nyomtatását, amelyeknek a magassági és keresztmetszeti aránya nagyobb, mint 8:1 [18].

2.5. Multi material DMSL nyomtatás

A hagyományos additív technológiai eljárások kötöttsége, hogy egy nyomtatási folyamat során csak egyetlen alapanyagot tudnak felhasználni. Ez azt jelenti, hogy nem lehet különböző mechanikai jellemzőkkel bíró térfogatrészeket gyártani. Így nincs olyan alkatrész, amelynek az egyik része pl. különösen kopásálló, másik része pedig hőálló vagy korrózióálló, miközben a többi, igénybevétel szempontjából elhanyagolható része költséghatékony, gyengébb minőségi anyagból készül. A fejlődő MMAM (multi material additive manufacturing, több alapanyagot felhasználó additív gyártás) eljárások nemcsak ezeket a problémákat hidalják át, hanem elérhetővé teszik a komplexebb és tágabb feladatkörben alkalmazható 3D nyomtatott alkatrészeket is. A mennyiben egy nyomtató egyszerre legalább két alapanyagot tud felhasználni, úgy azt már MMAM folyamatnak hívjuk [19].

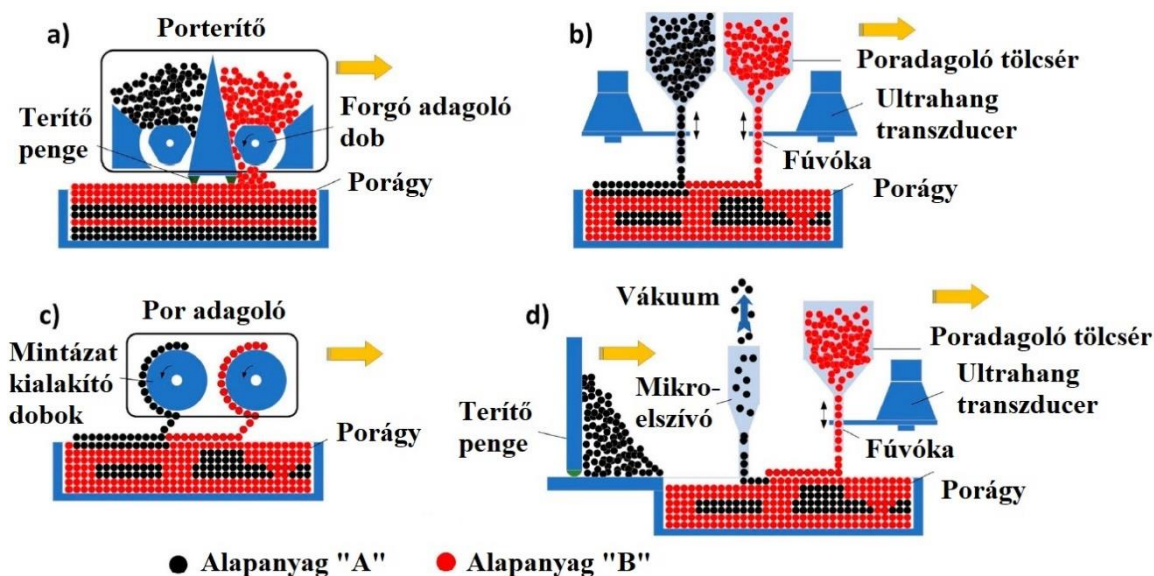
A multi material gyártás során több anyaghelyezési stratégiát különböztetünk meg egymástól. Az alapanyagváltás történhet a rétegek között és rétegen belül is. Amennyiben csak rétegen belül, vagy csak rétegek között történik alapanyagváltás, akkor 2D-s alapanyagcseréről beszélünk, amikor rétegen belül és rétege között is megvalósul az alapanyagcsere a nyomtatás során, úgy abban az esetben már 3D-s alapanyagcsere történik. Rétegenként történő alapanyagváltáson belül három csoportot különböztetünk meg (8. ábra). A kétanyagos terítés során éles határ mutatkozik a két anyag között. A réteg befejezte után következik az anyagváltás, majd a következő réteg elterítése teljes mértékben a második alapanyaggal történik. Ez a stratégia olyan alapanyagok esetén működőképes, amelyek megfelelő adhéziót képesek kialakítani egymással. Az anyagátmenetes multi material nyomtatásnál a két anyag között található több kevert alapanyagú réteg. A keverés aránya rétegről rétegre változik. Az átmenet során az alul lévő anyag rétegen belüli térfogatszázaléka csökken, míg az átmenet felett következő anyag térfogatszázaléka nő. Az átmenet végeztével már teljes mértékben a felső anyag kerül a elterítésre a rétegben. Erre az anyagváltási stratégiára akkor van szükség, ha az

anyagok kevésbé képesek adhézió kialakítására, vagy ha fontos a jó mechanikai tulajdonságok elérése, mivel az átmenetes anyagváltás csökkenti a rétegek között fellépő feszültséget, valamint javítja a mechanikai tulajdonságokat. A harmadik típus a többanyagos nyomtatás közbeékelte anyagréteggel. Ehhez a stratégiához legalább három különböző alapanyag szükséges. Az első réteg befejeztével az elválasztó réteg kerül nyomtatásra. Ez számszerűen nézve nem feltétlenül egyetlen réteg, viszont az elválasztó réteg teljes vastagsága elhanyagolható a nyomtatott tárgy teljes magasságához képest. Az elválasztó réteg után következik a harmadik anyag nyomtatása, amellyel folytatódik a tárgy felépítése. A multi material nyomtatásnak ezt a stratégiáját akkor alkalmazzák, ha a két felhasznált anyag között nem alakítható ki adhézió, ezért szükséges egy plusz anyagréteg beiktatása, amely megfelelő adhéziót mutat mindkét anyaggal. Ezenkívül a közbeékelte réteg szigetelőként is funkcionálhat a két anyag között [20, 21].



8. ábra Anyagváltási stratégiák [20]

A multi material nyomtatás porágyas 3D nyomtatókon még nem kiforrott technológia, így a megvásárolható porágyas nyomtatók gyári állapotban általában nem támogatják a több alapanyagot felhasználó nyomtatást. Így a kísérletek elvégzéséhez egyedi porterítők használata szükséges, amit utólagosan kell a gépre szerelni. Ilyen porterítő már elérhető a piacon, viszont a kísérletekhez általában saját fejlesztést használnak a költségek csökkentése végett. A fejlesztéseknek köszönhetően jelenleg négy különböző alapelven működő berendezéstípus ismert. A porterítő berendezések sematikus bemutatása a 9. ábrán tekinthető meg [19].



9. ábra Két alapanyagú poradagoló berendezések ábrái: a) Penge-alapú porterítő, b) Ultrahang alapú porterítő, c) Elektrofotografikus alapú porterítő, d) Penge és ultrahang alapú hibrid porterítő rendszerek [19]

A két alapanyagú porterítő berendezés áll legközelebb a porágyas elven működő 3D nyomtatók eredetileg alkalmazott porterítési eljárásához. A porterítő mechanizmus két portartállyal rendelkezik, valamint mindegyik portartály alatt található egy poradagoló dob. Amikor forog az adagoló dob, akkor hullik a por a tárgyasztalra. A berendezésen található porterítő penge is, mivel adagoláskor nem lesz egyenletes a porréteg magassága. Alapvetően csak függőleges, vagyis rétegenkénti alapanyagváltásra alkalmazható. Amennyiben a két poradagolót egyszerre működtetik, úgy lehetséges a két alapanyag összekeverése, így megvalósítható az anyagátmenetes nyomtatás. Későbbi fejlesztések során próbálták megoldani, hogy adott rétegen belül, területenként más-más alapanyagot lehessen teríteni. Ez a réteg több lépésben történő elkészítésével valósítható meg. Az első réteget elterítik, majd ezt a lézerrel szinterelik, ezután a felesleges port el kell távolítani a tárgyasztalról. Az eltávolítás történhet vákuum elszívással, valamint a réteg felett eltolt rugalmas portörölő lappal. Ezután a másik ultrahangos poradagoló egység kiadagolja a port a félkész rétegre. A második szinterelés után kialakul a végleges réteg, amely tartalmazza mindkét típusú alapanyagot [19].

Az ultrahang egy olyan hullám, amelynek frekvenciája nagyobb, mint 20 kHz. A magas frekvenciájú rezgés alapján működik az ultrahangos porterítő. Az ultrahang rendkívül jól terjed kis szemcseméretű porokban, valamint folyadékokban, ezért az ilyen magas frekvencia alkalmazható porterítésre. A porterítő két portartállyal rendelkezik, és mindkét tartály alján található egy fúvóka, valamint a transzducer egység, amely az ultrahang frekvenciájú

mechanikus rezgést kelti. A berendezésen nincs porterítő penge, mivel a fúvóka megfelelő mértékben egyenletesen tudja teríteni a ki szemcsenagyságú fémport [19].

Az elektrofotografikus elven működő porterítő berendezés hasonló elven működik, mint a közismert festéktoneres lézernyomtatók. A portartályban közvetlenül a portöltet mellett található a mintázatkialakító dob. A dob elektrosztatikus töltést kap a felületének azon részén, amely megegyezik a tárgyasztalon elvárt réteg mintázatával. Amikor a henger adott felületeleme a tárgyasztal fölé ér, elveszíti töltését, és így a felületelemről lehullik a fémport. A berendezésben két ilyen poradagolót használva megvalósítható a réteg elterítése úgy, hogy a réteg különböző területén különböző típusú fémportok helyezkednek el. A berendezés nem igényel pengével történő porterítést, mivel megfelelő vastagságú és egyenletes réteget tud létrehozni. Az eljárásnak van egy másik változata is, ahol nem elektrosztatikusan, hanem levegő által szabályozva történik a poradagolás. A mintázatkialakító dob külső felülete egy sűrű kialakítású hálós szerkezet. Mikro-légmozgások (vákuum, túlnyomás) segítségével a háló megfelelő celláiba juttatják a fémport. Amikor a felületelem a tárgyasztal fölé ér, akkor a dob belsejéből érkező túlnyomás miatt kihullik a háló celláiból a fémport [19].

A penge és ultrahang alapján működő hibrid berendezés nagyobb mértékben támaszkodik a 3D nyomtató már meglévő mechanikájára. Működés közben használni kell az eredeti alapanyag adagoló egységet és a fémport terítő pengét is. Azt a fémport kell a gyári alapanyag adagolóba tölteni, amelyik a gyártott test nagyobb térfogatát kiteszi, mert a gyári tárolóegység térfogata nagyobb. Egy réteg elkészítése így több lépést vesz igénybe. Először a nyomtató a saját portartályából a penge segítségével elteríti az egyik alapanyagréteget. Ezután a nyomtató szintereli a porréteget a megfelelő területen. A felesleges pormennyiséget egy vákuumos elszívó távolítja el. Ezt követően az ultrahangos adagoló a fúvókán keresztül ráadagolja a másik alapanyagot a gyártandó rétegre. A második szinterelés után elkészül a végleges réteg. Ezzel a módszerrel is megvalósítható egy réteg több alapanyaggal történő felépítése [19].

3. Porterítő mechanizmus tervezés

A dolgozat ezen részében bemutatom az egyedi porterítő mechanizmus tervezési folyamatát. Bemutatom a különböző konstrukciókat, majd elemzem azoknak az előnyeit és a hátrányait. A tervezés során szem előtt tartom, hogy a berendezésnek költséghatékonynak kell lennie, ezért az egyedi alkatrészek prototípusait FMD nyomtatással állítottam elő, amiket pedig a kereskedelemben kapható kötőelemekkel és szabványos alkatrészekkel építettem össze. A működőképes konstrukciókat teszteltem annak érdekében, hogy megbizonyosodjak róla, hogy milyen eredménnyel képesek a fémpor terítésére.

3.1. Fejlesztési követelmények, peremfeltételek

A tervezés során a Széchenyi István Egyetemen található EOSINT M270 DMLS technológia elvén működő fém 3D nyomtatóhoz terveztem egy porterítő mechanizmust, amely segítségével bővíteni lehet a gépen felhasználható porok frakcióit, valamint megvalósítható a több alapanyagot felhasználó nyomtatás is. Ennek következményeképp lehetséges lesz rétegenként eltérő alapanyagot felhasználni a termékek elkészítéséhez.

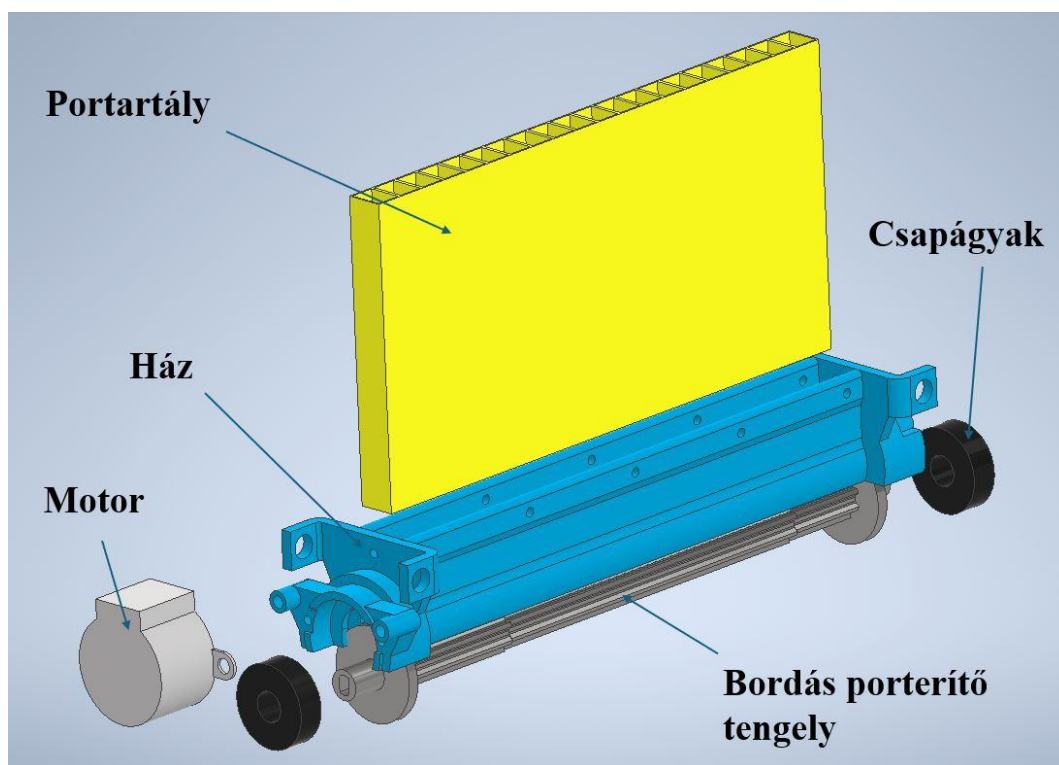
A tervezést úgy kellett megvalósítani, hogy a porterítő mechanizmus egy kiegészítő legyen a géphez, amit igény szerint lehet fel- és leszerelni. Ebből kifolyólag nem lehet a gép konstrukcióján változtatni, mivel annak az eredeti működési elvén továbbra is funkcionálnia kell. Az új mechanizmusnak el kell férnie a gép belső munkatérében, nem ütközhet a gép alkatrészeivel és a nyomtatott tárggyal sem, valamint hasonló méretű területre kell tudni fémport juttatni, mint a gyári porterítő pengének. A terítés után nem maradhat a munkatér felett, nem takarhatja a pásztázó lézert.

A mechanizmusnak szitáló elven kell működnie, egy szitahálón keresztül kell egyenletesen a tárgyasztalra juttatni a fémport. A szitát rezgő- vagy lengőmozgással kell működtetni. A mechanizmus mozgásából a gépre átvihető rezgést minimalizálni kell. A mozgást elektromos áram segítségével működő eszközzel kell létrehozni.

A mechanizmusnak univerzálisan működőképesnek kell lennie, tehát különböző szemcseméretű és anyagú fémport is tudnia kell teríteni. A mechanizmus rögzítését a jelenlegi porterítőre kell megoldani. A sáv menti szitálást az egyedi mechanizmusnak kell végezni, míg a tengely menti mozgást a meglévő porterítő szerkezetének kell ellátnia. Továbbá fontos, hogy az új porterítő mechanizmuson változtatható legyen a szitált terület nagysága, hogy csökkenthető legyen az alapanyagfelhasználás.

3.2. Előzetesen fejlesztett porterítő mechanizmus

A gépre a gyári megoldáson kívül létezik már egy egyedi tervezésű porterítő mechanizmus, amit a konzulensem, Dr. Kocsis Bence János tervezett és készített. A szerkezetben végigfut egy bordás tengely. A tengely a két végén csapággal van támasztva. A tengelyt a berendezés egyik végén lévő villanymotor mozgatja. A bordástengely felett pedig megtalálható a cellás portartály. A cellákkal tűzdelt portartály lehetővé teszi, hogy a felhasználó csak abba a szélességbe töltsön fémport, ahol az szinterezésre kerül, így csökkenthető az anyagfelesleg a gyártás során. Ez rendkívül fontos, hiszen a több alapanyaggal dolgozó nyomtatási folyamat során, sok esetben nincsen mód a későbbiekben a különböző alapanyagtípusok utólagos szétválasztására. Amennyiben a bordástengely nem forog, akkor a fémpor nem hullik a tárgyasztalra. A bordástengely forgatásával pedig adagolhatóvá válik a fémpor. A 10. ábrán látható a berendezés modellje robbantott nézetben.



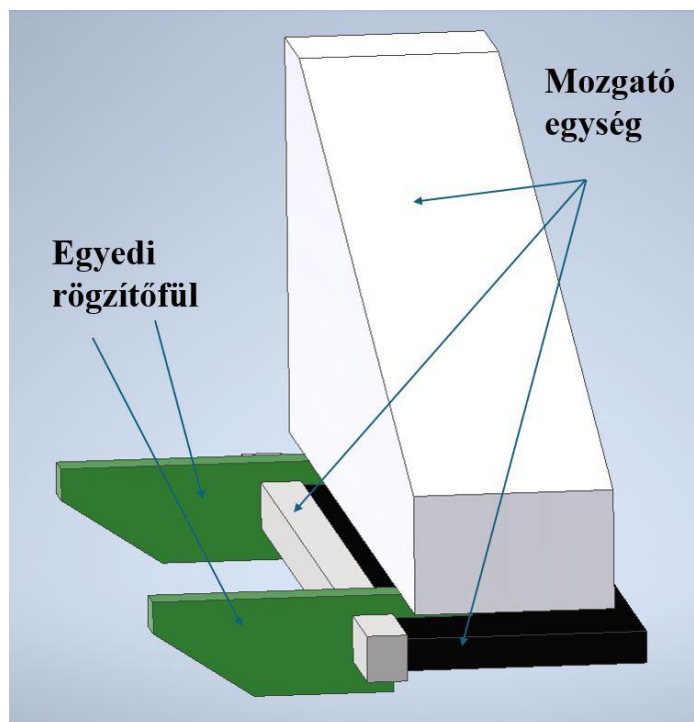
10. ábra Bordás tengelyes porterítő

A szerkezettel több módon is megvalósítható a több alapanyaggal történő nyomtatás. A szerkezetből kettőt felhasználva különböző poradagolási stratégiák valósíthatóak meg. Lehetséges rétegenként változtatni az alapanyagot, vagy egy rétegen belül is lehet működtetni egyszerre mindkét adagolót. A több anyagos nyomtatást egyetlen porterítővel is lehet végezni. Amennyiben a portartály különböző celláiba más és más anyagot helyez a felhasználó, úgy a porterítés irányában lesz eltérő a kijuttatott anyag, mindez egy rétegen belül. A berendezés

működőképes, viszont a porterítési eljárás további finomításra szorul, ezért kezdtem el a feladat kidolgozását.

3.3. Egyedi rögzítési megoldás a gépre

Mivel a gép alkatrészeinek módosítását, átszerelését tiltják a peremfeltételek, ezért a meglévő alkatrészeire kell felszerelni minden lehetséges verziót. Mivel az általam tervezett berendezések csak egy sáv mentén képesek szitálni a fémport, ezért a nyomtatóban lévő terítőléc mozgató mechanizmust továbbra is használni kell. A szita beindítását követően a terítőléc mozgatóval egy lineáris elmozdulás segítségével kell bejárni a tárgyasztal feletti területet, hogy a nyomtatási területre egyenletesen kerüljön a fémportból. A 11. ábrán látható egy lehetséges megoldás az új porterítő mechanizmus rögzítésére.

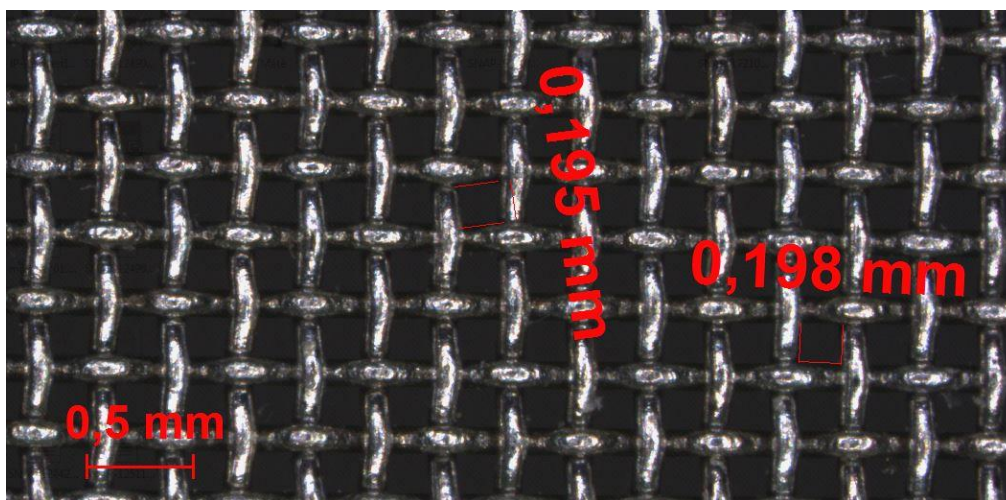


11. ábra Rögzítési lehetőség a gépen

Az ábrán zölddel jelölt fülek szintén FDM eljárással készülnek, ezeket a mozgató egység oldaláról lehet rácsúsztatni az alsó hasábra. A füleken van egy hátra nyúló rész, ami beér egészen a fehér színű egység alá. Ez a munkatérbe történő lebillenést akadályozza meg. A rögzítő fűlre helyezhető beállítócsavar, így a megfelelő pozícióban rögzíteni lehet a füleket. Mivel a fülek pozíciója oldalirányban mozgatható, ezért többféle hosszmeretű prototípust is fogadni képes. A fülek felső lapján ültethető rá a szitáló porterítő mechanizmus. A füleken elhelyezhető átmenő vagy menetbetétes furat, így megfelelő kötés biztosítható a fűl és a mechanizmus külső kerete között.

3.4. Szitaháló alkalmazása

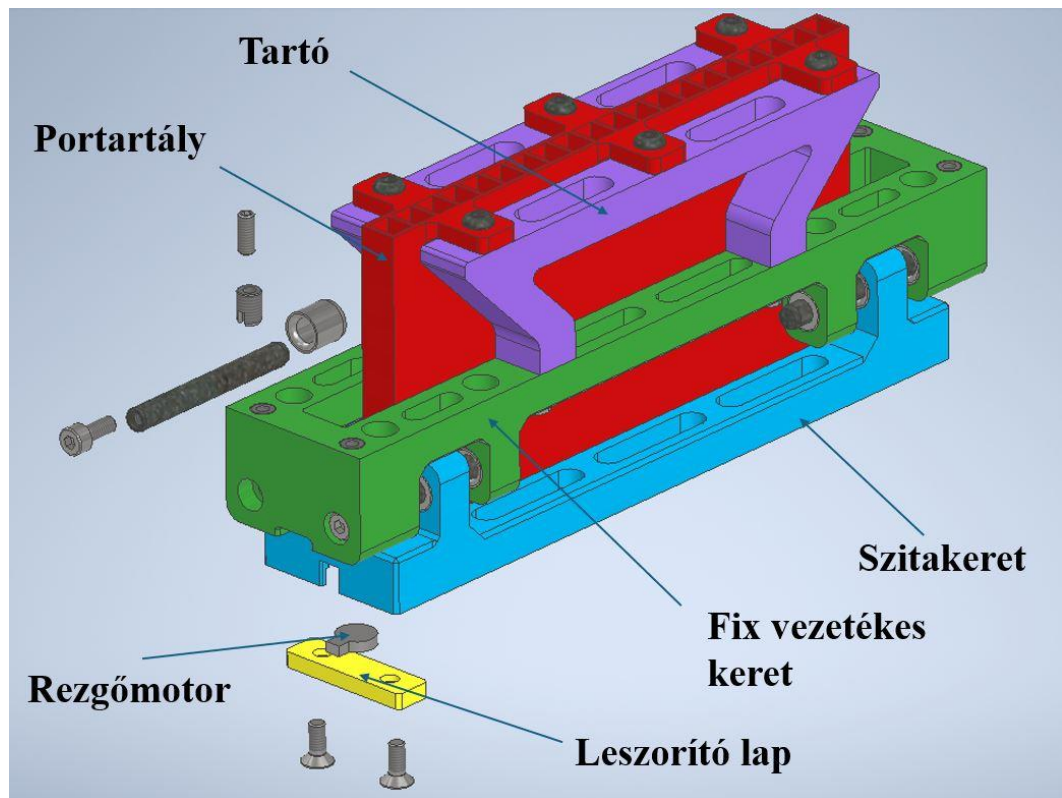
Mindegyik prototípus szitálás elvén működik, így elengedhetetlen valamilyen szitaháló használata. A szitaháló nagyméretű lap formájában áll rendelkezésre, amelyből kivágtam a megfelelő méretű szitát. A szitakeret külső részét FDM nyomtatással készítettem el. A kívánt magasságban szünetelttettem a nyomtatást, majd forrasztópáka segítségével a méretre vágott szitadarabot a keretre nyomtam, melynek hatására a hőbevitel miatt képlékennyé vált a felső réteg, így abba beleragadt a szita. A beolvasztásnak nem kell mélynek lennie, elég, ha a szita szintbe kerül a felső réteggel, így a nyomtató fűvókája nem fog elakadni benne. A felhasznált szita sűrűségét optikai mikroszkóp segítségével mértem meg. A szitanyílás hossz és keresztirányban is kb. 195 μm . A mérés eredménye a 12. ábrán látható.



12. ábra Szita képe mikroszkópos nagyításban

3.5. Vezetékes modell (1. verzió)

A koncepciók felvázolásakor az elsők között szerepelt ez a terv, miszerint rezgőmotorokkal fogom megmozgatni a szitát, ami vezetékeken tud elmozdulni. A peremfeltételek és a konzulensem által készített verzióból kiindulva megtartottam a szekciókból álló portartályt, valamint az adagoló hosszú, keskeny befoglaló méreteit. A hosszat meghatározza a tárgyasztal, mivel annak a teljes szélességére szükséges a porréteg terítése. A szitamechanizmus szélességi kiterjedésének minél kisebbnek kell lennie, mivel több anyagos nyomtatásnál minimum kettőnek kell egymás mellett helyet foglalnia a terítő mechanizmusra felszerelve. Ezenfelül így is biztosítani kell, hogy mindkét poradagoló a tárgyasztal teljes szélessége felett el tudjon haladni. A 13. ábrán szerepel a vezetékes modell robbantott nézete.



13. ábra Vezetékes modell V1

A fix keret csatlakozik a rögzítő fülekhez. Ez a keret a szitálást tekintve nem végez mozgást. A mozgás vezetékeken történik, amiket belső menetes illesztőszegekből és csúszóperselyből raktam össze. A keret négy sarkán dupla fülek találhatóak. A fülekben lévő furatba csúszóperselyt tettem, hogy támasszák és pozícionálják az illesztőszeget. A csúszóperselyek tengelyére merőleges irányban a perselyek középpontjánál furatot helyeztem el, majd menetes betétet láttam el. Ennek segítségével tudtam hernyócsavarral rögzíteni axiális irányban a perselyeket.

A szitakeret négy sarkánál is van egy-egy fül, amikbe szintén csúszóperselyt helyeztem, hernyócsavaros rögzítéssel. Ezek után már az illesztőszeg segítségével össze tudtam rakni a két keretet. Azért belső menetes illesztőszeget választottam, mert így a fix keret külső részéről azt is tudtam axiálisan rögzíteni. Ez a megoldás megköti a szitakeret 5 szabadságfokát, így az csak az illesztőszegek tengelyével párhuzamos irányban tud elmozdulni a két végállás között, amit a fülek határoznak meg. A két keret között mindkét oldalon egy-egy nyomórugót helyeztem el, amik meghatározzák a szitakeret alaphelyzetét. A rezgőmotorok ezen a pálya mentén tudják mozgatni a szitakeretet.

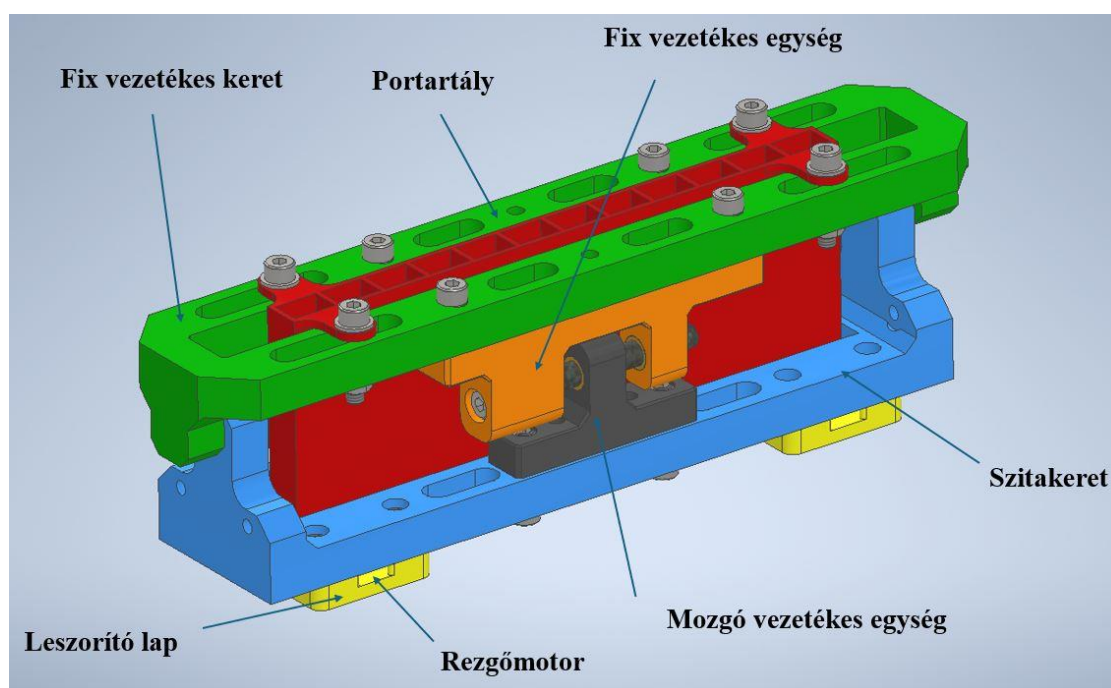
A két rezgőmotornak a szitakeret két végén alakítottam ki egy-egy fészket. A fészkek mélysége 0,2 mm-rel kisebb, mint a motor magassága, így a leszorítólap rögzíteni tudja a

motorokat. Az összeszorításra azért van szükség, hogy a rezgés teljes mértékben átadódjon a keretre. A portartály és az azt tartó kar a fix keretre vannak rögzítve, így azok a nem mozognak szitalás közben.

Ezután az eszköz tesztelés következett. A próba során több probléma is mutatkozott. A fő probléma, hogy FDM nyomtatással nem tudtam olyan pontosságú alkatrészeket előállítani, hogy a két keret fülein lévő furatok egytengelyűek legyenek egymással. Emiatt az összeépítéskor szitakeret szorult, mozgatása még szabadkézzel is nehézkes volt. A két rezgőmotor teljesítménye nem volt elég, hogy megrezgessék a szitakeretet. Ezek miatt áteresztési képesség mérése nem történt, mivel nem nevezhető működőképesnek a prototípus.

3.6. Vezetékes modell (2. verzió)

Az vezetékes modell első verziójának hibáit értékeltem, majd ennek alapján úgy fejlesztettem a második a verziót, hogy az minél kevesebb hibát tartalmazzon. A szitakeret mozgása ebben az esetben is vezetéken történik, az első verzióban látott rögzítési megoldásokkal. A 14. ábra mutatja a vezetékes modell második verzióját.

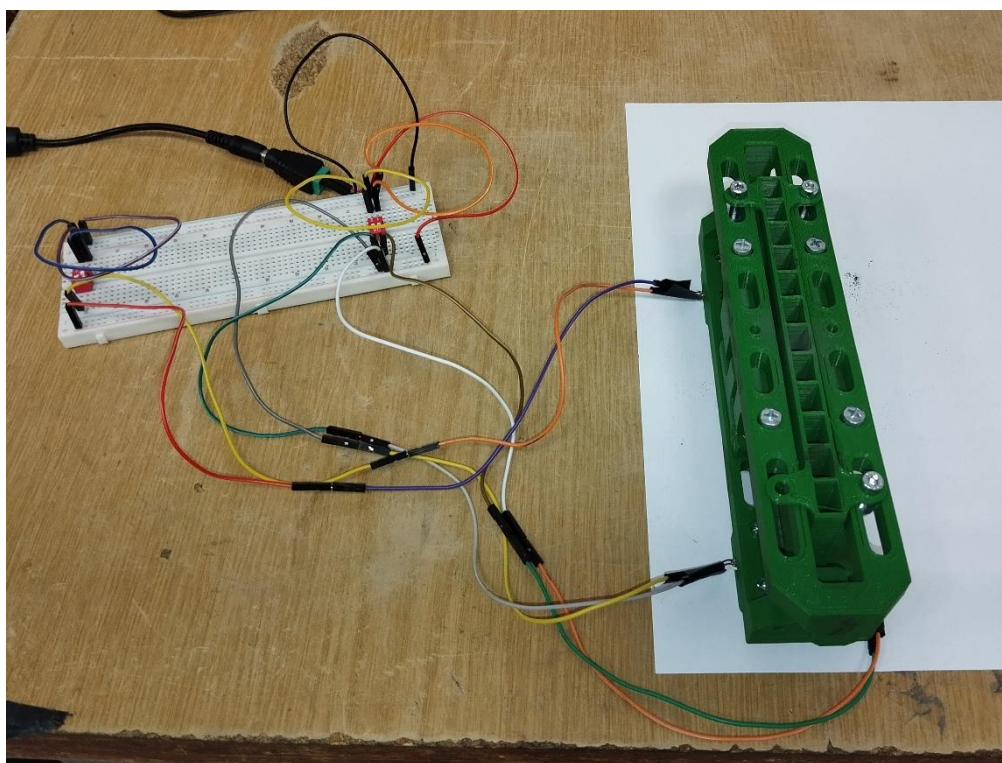


14. ábra Vezetékes modell V2

Itt már nem rögzítettem axiális elmozdulás ellen az illesztőszeget támasztó perselyeket. A nyomtatás során tudtam gyártani olyan átmérőjű furatokat, amelyekbe szorosan tudtam illeszteni a perselyeket. Szereléskor préseléssel toltam a helyükre a perselyeket, amik így felvették a végleges pozíciójukat. A rezgőmotoroknak nem készítettem fészket a szitakeret alsó

résében, hanem a leszorító lapban alakítottam ki azt. így egyszerűbb volt a gyártás folyamata. A fészek mélysége ebben az esetben is kisebb, mint a rezgőmotor magassága, így a csavarok meghúzásakor kellő szilárdsággal rögzíti a motort. Ismét a szitakeret alsó részében található a szitaháló, amit a nyomtatás szüneteltetése közben olvasztottam a rétegek közé.

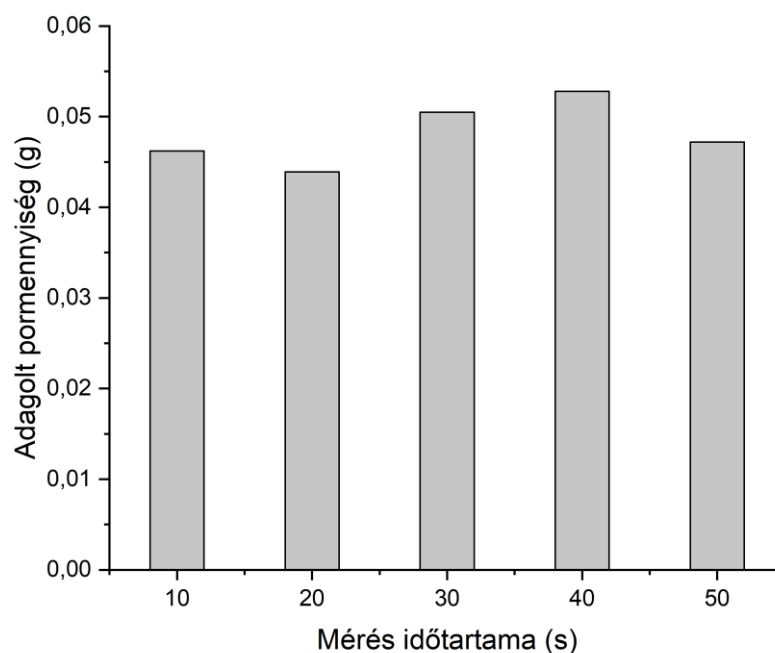
Az előző verzióban 4 illesztőszeg jelentette a vezetéket a két keret között. FDM nyomtatással nem tudom megoldani, hogy mind a 4 illesztőszeg tengelye párhuzamos legyen egymással, ezért lecsökkentettem a számukat 2-re. Ezenfelül a nyomtatás során fellépő alakhibát kiküszöböltem azzal, hogy a vezeték tartó füleket külön nyomtattam (narancssárga, szürke). Mindkét fülön pozíció állítási lehetőség is van. A fix vezetékes egység az illesztőszeg középvonalára merőleges tengely mentén elfordítható. A mozgó vezetékes egység pedig egy lineáris tengely mentén mozdítható el. Ez a tengely merőleges mind az illesztőszeg középvonalára, mind a fix egység forgástengelyére. A két beállítási lehetőséggel majdnem az összes pozícióhiba orvosolható. A szitakeretet ebben az esetben is egy-egy rugó tartja a középpontban. A próba során működőképesnek bizonyult a prototípus, ezért ezt fémporral is teszteltük (15. ábra).



15. ábra Tesztkörülmények, vezetékes V2 prototípus

A teszt során a szitamechanizmus áteresztő képességét vizsgáltuk. Adott intervallumokban mértük, hogy mekkora tömegű por áteresztésére képes a szita. A kísérlet során a felhasznált anyag acél és bór por volt. Az acélpor rendkívül jól szitálható, ezért a konkrét mérésre nem is

volt lehetőség, mivel a mérés kezdetét után pár másodperccel kifogyott a teljesen feltöltött portartály. A mérési intervallum a bór por esetében rendre 10, 20, 30, 40 és 50 másodperc volt. Az adott időegység alatt mértük a szitán áthulló por tömegét. A mérés során egy gyűjtőedény felett történt a szitamechanizmus működtetése. Ezután megmértük az edényben összegyűlt por tömegét. A mérések között a mérleg tárazva lett. A 16. ábra mutatja be a mérés eredményét.

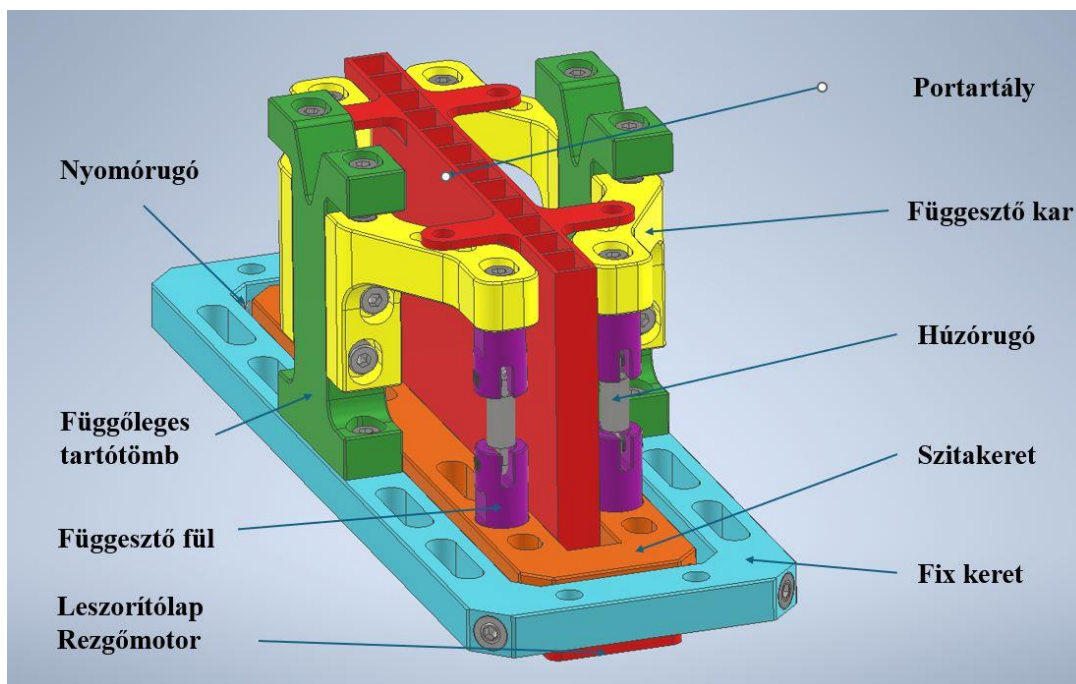


16. ábra Áteresztőképesség mérése

A mérési adatok alapján a poradagolás közel lineáris volt a különböző időhosszok alatt. Tehát a portartályban lévő poroszlop magassága nem befolyásolja az áteresztés mértékét. A prototípus megfelelőnek tekinthető, így alkalmas lehet porterítő mechanizmusként alkalmazni.

3.7. Függesztett modell

A következő koncepciónál az eddigiektől eltérő megoldást alkalmaztam. A vezetéken elmozduló mechanizmusnak csak egyetlen szabadságfoka van. A rezgőmotor viszont egy a forgástengelyére merőleges síkban fejt ki a rezgető hatását a tengelyen excentrikusan elhelyezett tömeg miatt. Így, ha csak egy szabadságfoka van a mechanizmusnak, akkor a rezgés egy része elnyelődik. Ezért a függesztett modellt úgy terveztem, hogy az szabadon mozoghasson, és ne legyen kötött szabadságfoka. Ezt úgy értem el, hogy a szitakeretet rugók tartják és támasztják (17. ábra).

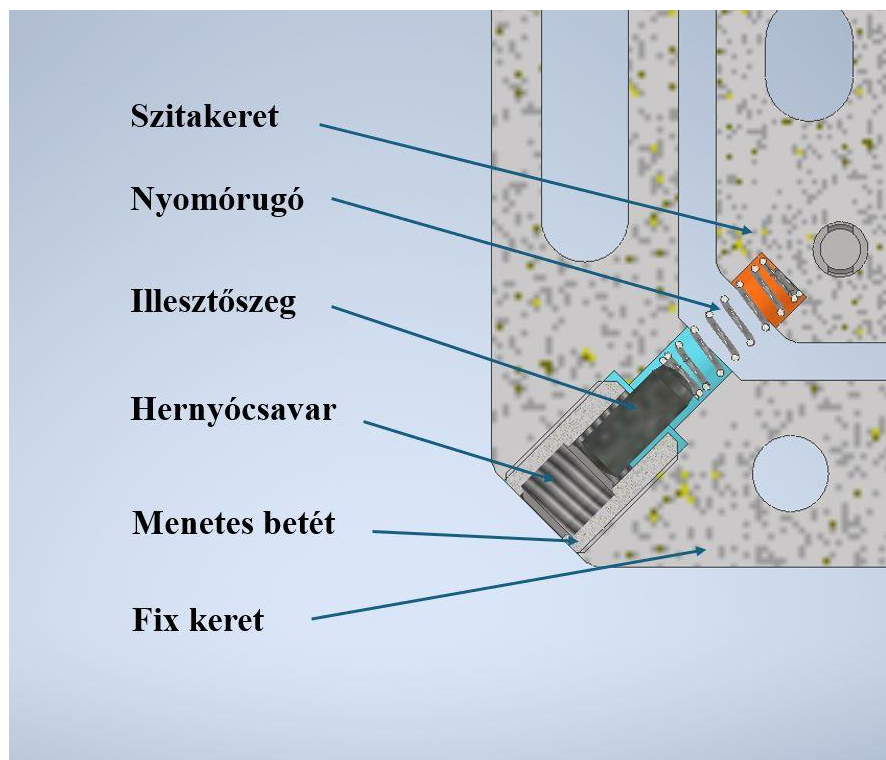


17. ábra Függesztett modell

A szitakeretet továbbra is úgy készítettem el, hogy nyomtatás közben beleolvasztottam a szitahálót. A szitakeret alá van rögzítve a négy darab rezgőmotor. A rögzítési módszer ugyan az, mint a vezetékes prototípus esetében. A szitakereten és a függesztő karon találhatóak a függesztő fülek (lila). Ezekre a húzórugó kialakítása miatt volt szükség. A kereskedelembe kapható húzórugó két végén egy-egy akasztó horog található. Ezek pozíciója egymáshoz képest viszont rugónkként kismértékben eltérő. Amennyiben így fix pozícióba kellene beépíteni a rugót, akkor valamelyik horgon csavarni kellene beépítés közben. Emiatt a későbbiekben ez a rugó csavarónyomatékot fejtene ki a rögzítő fülekre. Mivel a függesztő fülek a rögzítő csavar meghúzása előtt szabadon foroghatnak, ezért szereléskor nem kerül csavarónyomaték a szerkezetbe.

A függesztő karok a tömbön függőleges irányban állíthatóak, így vízszintezhető a szitakeret, valamint beállítható a pontos magassága a fix kerethez képest. A függőleges tartótömböt felülről beállító csavarral láttam el, így finomabban lehet állítani a függesztő karok pozícióját. A portartály a függesztő karok tetején nyugszik, a szitához, vagy a szitakerethez nem ér hozzá, működés közben így ez nyugalmi fix pozícióban marad.

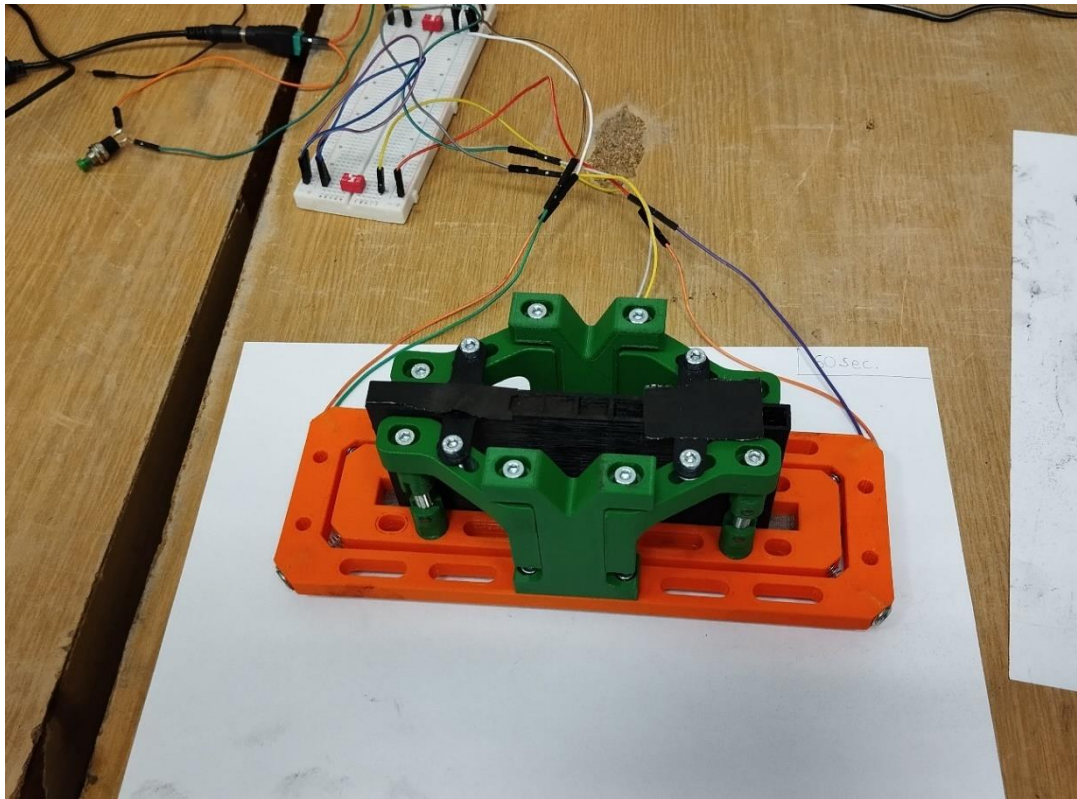
A szitakeretet oldalirányban nyomórugók pozícionálják (18. ábra). Ezek nélkül a szitakeret a húzórugókon függve szabadon tudna lengeni, ami nem elfogadható mozgás a porterítés közben. A nyomórugók a szita- és fix keret 4 sarkában vannak, előfeszítésükkel beállítható a szitakeret pozíciója és a feszességes is oldalirányban.



18. ábra Előfeszíthető rugók működési elve

Ez a megoldás részben azért született, mivel ennél a koncepciónál nincs akkora hely a szitakeret és a fix keret között, hogy a rugót összenyomott állapotban be lehetne helyezni a rugó támasztó furatba. A menetbetét belsejében M6-os menet található, emiatt lehetővé válik a meneten keresztül a rugó majd a 4 mm átmérőjű illesztőszeg behelyezése. Az illesztőszeg vége támasztja a nyomórugót. Ezután következik az M6-os hernyócsavar behajtása a menetbe. A hernyócsavar segítségével zárható a furat, valamint a behajtásával előfeszíthető a rugó. Az illesztőszeg távtartóként szolgál, hogy a hernyócsavar ne torzítsa és ne gyűrje bele a menetbe a rugót.

Az összeépítés után ezt a prototípust is kipróbáltuk a rezgőmotorokkal. Mivel szemrevételezés alapján működőképesnek tűnt, fémporral is teszteltük ezt a verziót. A könnyebb vezérlés érdekében a rezgő motorok párhuzamosan lettek kapcsolva, a tápfeszültséget pedig egy megszakító gombbal tudtuk kapcsolni. A kísérlet összeállítása a 19. ábrán látható.



19. ábra Tesztkörülmények, függesztett prototípus

A mérés során ugyan azt a kísérletet próbáltuk megvalósítani, mint a vezetékes keret esetén, hogy a mérési eredmények, összehasonlíthatóak legyenek, ezáltal megállapíthatóvá váljon, hogy melyik prototípus alkalmasabb a fémpor terítésére. Az első, 10 másodpercig tartó mérést még sikerült elvégeznünk. (Valószínűleg itt már 1 motor hibás volt). Ennek az eredménye 0,0469 g lett, ami hasonló érték, mint amit a vezetékes keret esetében mértünk. A következő mérés ennél jelentősebben kisebb volt, ekkor tapasztaltuk, hogy két motor nem működött. A hiba mindkét motor esetében kábelszakadás volt.

A közeljövőben folytatjuk a kísérletet a megfelelő poradagoló mechanizmus meghatározásához.

4. Összefoglalás

A dolgozatomban először bemutattam a konzulensem által készített porterítő mechanizmust, ami jelenleg alkalmazható a több alapanyaggal történő nyomtatás során. Ezután bemutattam egy lehetséges megoldást a mechanizmus rögzítésére. A rögzítési módszer univerzálisan alkalmazható, tehát különböző típusú szitamechanizmusokkal is használható. Ezenfelül a gép meglévő alkatrészeire lehet rögzíteni, így a gépet nem kell átépíteni a mechanizmusok működtetéséhez.

A dolgozat kidolgozáskor három koncepciót mutattam be. Az első két koncepció működési elve azonos, itt a szitakeret egy lineáris tengely mentén tud elmozdulni, így egyetlen kötetlen szabadságfokkal rendelkezik. A szitakeret mozgását rezgőmotorok végzik. Az első verziónál a 4 tengely egytengelyűségi hibája miatt csak nehezen lehetett mozgatni a szitakeretet a fix kerete alatt. A rezgőmotor az egész szerkezet mozgatta, nemcsak a szitakeretet, így csak minimális fémpor kijuttatására volt képes. Mért áteresztési tesztet emiatt nem végeztünk a prototípussal.

A második verzió esetében minimalizálni tudtam az vezető tengelyek egytengelyűségi hibáját úgy, hogy a rögzítő füleket külön nyomtattam, valamint azokat állítási lehetőséggel láttam el. A vezető tengelyekből itt csak 2 darabot használtam, hogy még könnyebben tudjon futni a szitakeret. A por áteresztési teszt eredményesen sikerült, a mért adatokból megállapítottam, hogy a porszórás egyenletes, mértéke nem függ attól, hogy mennyi fémpor van a tartályban. Alkalmas lehet fémpor terítésére a mechanizmus.

A függesztett prototípus az előzőkétől eltérő elven működik. A szitakeretet húzórugók tartják és nyomórugók támasztják, így bármilyen irányba képes elmozdulni. Ennek köszönhetően nincs kötött szabadságfoka. A kísérlet motorhiba miatt nem lett elvégezve, így nem összehasonlítható a függesztett keret mért értékeivel.

5. Irodalomjegyzék

- [1] A. Singh és H. Singh, „Metal Additive Manufacturing: From History to Applications”, in *Innovations in Additive Manufacturing*, 1. kiad., A. M. Khan és J. T. W. Jappes, Szerk., Cham: Springer, 2022, o. 3–32. doi: 10.1007/978-3-030-89401-6_1.
- [2] T. T. Wohlers és T. Caffrey, *Wohlers report 2015: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*, 1. kiad. Fort Collins: Wohlers Associates, 2015.
- [3] P. N. Stroski, „3D printer: How it works”, <https://www.electricalibrary.com/en/2020/12/22/3d-printer-how-it-works/>.
Elérés: 2024.11.03.
- [4] H. M. Khan és E. Koc, „Additive Manufacturing-History, Recent Developments, and Advancement”, in *Powder Metallurgy and Additive Manufacturing: Fundamentals and Advancements*, S. Rajendrachari és D. Chaira, Szerk., Novelty: ASM International, 2024, 10, o. 207–245. doi: 10.31399/asm.tb.pmamfa.t59400207.
- [5] T. Rayna és L. Striukova, „From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation”, *Technol Forecast Soc Change*, köt. 102, o. 214–224, jan. 2016, doi: 10.1016/j.techfore.2015.07.023.
- [6] I. Gibson, D. Rosen, és B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, 2. kiad. New York: Springer, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
- [7] A. Kumar, P. Kumar, H. Singh, A. Haleem, és R. K. Mittal, „Integration of reverse engineering with additive manufacturing”, in *Advances in Additive Manufacturing Artificial Intelligence, Nature-Inspired, and Biomanufacturing*, 1. kiad., A. Kumar, R. K. Mittal, és A. Haleem, Szerk., Cambridge: Elsevier, 2023, o. 43–65. doi: 10.1016/B978-0-323-91834-3.00028-4.
- [8] D. Godec, A. Pilipović, és T. Breški, „General Process Workflow in Additive Manufacturing”, in *A Guide to Additive Manufacturing*, 1. kiad., D. Godec, J. Gonzalez-Gutierrez, A. Nordin, E. Pei, és J. Ureña Alcázar, Szerk., Cham: Springer, 2022, o. 45–57. doi: 10.1007/978-3-031-05863-9_2.
- [9] S. Khan, K. Joshi, és S. Deshmukh, „A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts”, *Mater Today Proc*, köt. 50, o. 2119–2127, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.433.
- [10] A. Gebhardt és J.-S. Hötter, *Additive Manufacturing*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. doi: 10.1007/978-1-56990-583-8.

- [11] M. T. Birosz, D. Ledenyák, és M. Andó, „Effect of FDM infill patterns on mechanical properties”, *Polym Test*, köt. 113, szept. 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107654.
- [12] M. Livesu, S. Ellero, J. Martínez, S. Lefebvre, és M. Attene, „From 3D models to 3D prints: an overview of the processing pipeline”, *Computer Graphics Forum*, köt. 36, sz. 2, o. 537–564, máj. 2017, doi: 10.1111/cgf.13147.
- [13] Y.-T. Wang és Y.-T. Yeh, „Effect of Print Angle on Mechanical Properties of FDM 3D Structures Printed with POM Material”, in *Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*, 1. kiad., R. P. Bajpai és Chandrasekhar U., Szerk., Singapore: Springer, 2017, o. 157–167. doi: 10.1007/978-981-10-1771-1_20.
- [14] S. Patel, Y. Liu, Z. Siddique, és I. Ghamarian, „Metal additive manufacturing: Principles and applications”, *J Manuf Process*, köt. 131, o. 1179–1201, dec. 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.09.101.
- [15] E. O. Hall, „The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results”, *Proceedings of the Physical Society. Section B*, köt. 64, sz. 9, o. 747–753, szept. 1951, doi: 10.1088/0370-1301/64/9/303.
- [16] Petch. N. J., „The Cleavage Strength of Polycrystals”, *Journal of the Iron and Steel Institute*, köt. 174, o. 25–28, 1953.
- [17] S. Pal, H. R. Tiyyagura, I. Drstvenšek, és C. S. Kumar, „The Effect of Post-processing and Machining Process Parameters on Properties of Stainless Steel PH1 Product Produced by Direct Metal Laser Sintering”, *Procedia Eng*, köt. 149, o. 359–365, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.679.
- [18] B. Kocsis, „3D fémnyomtatás alapismeretek – DMLS (Direct Metal Laser Sintering) technológia ismertetése”, <https://www.metalprinting.hu/technologia/>. Elérés: 2024.11.03.
- [19] C. Wei és L. Li, „Recent progress and scientific challenges in multi-material additive manufacturing via laser-based powder bed fusion”, *Virtual Phys Prototyp*, köt. 16, sz. 3, o. 347–371, máj. 2021, doi: 10.1080/17452759.2021.1928520.
- [20] I. H. ZainElabdeen, L. Ismail, O. F. Mohamed, K. A. Khan, és A. Schiffer, „Recent advancements in hybrid additive manufacturing of similar and dissimilar metals via laser powder bed fusion”, *Materials Science and Engineering: A*, köt. 909, szept. 2024, doi: 10.1016/j.msea.2024.146833.

- [21] M. Schneck, M. Horn, M. Schmitt, C. Seidel, G. Schlick, és G. Reinhart, „Review on additive hybrid- and multi-material-manufacturing of metals by powder bed fusion: state of technology and development potential”, *Progress in Additive Manufacturing*, köt. 6, sz. 4, o. 881–894, dec. 2021, doi: 10.1007/s40964-021-00205-2.