

Csillagmotor újra alkotása modern technológiával

Írta:

Bartalos Bendegúz

Mechatronikai Mérnök B.Sc. hallgató

Konzulens:

Dr. Fecser Nikolett

(egyetemi adjunktus, oktatási dékánhelyettes, GIVK esélyegyenlőségi koordinátor)

Széchenyi István Egyetem

2022. November

Győr

TDK-dolgozat

Tartalomjegyzék

Ábra és képjegyzék.....	3
Táblázatjegyzék.....	4
1. Bevezetés.....	5
2.0 Computer-aided design (CAD) Technológia.....	7
2.1 CAD Rendszerek megjelenése.....	8
2.2 Műszaki rajz	9
2.3 Számítógépes műszaki rajz előnyei	9
2.4 Végeselem módszer CAD segítségével.....	11
3.0 3D nyomtatás	13
3.1 Csillagmotorhoz használt alapanyag.....	15
3.2 Csillagmotor gyártásához használt nyomtató	15
3.3Hogyan kezdődik egy nyomtatás?	16
3.4 Nyomtató fej felépítése	16
3.5 Extruder működése	17
3.6 Gyakori nyomtatási hibák.....	18
3.7 Nyomtatásban használt support szerepe és fontossága	20
3.8 Modell több részre bontása.....	20
3.9 Illesztések és méretek meghatározása	22
4.0 3D Nyomtatás anyagvizsgálat	25
4.1 Anyagvizsgálathoz használt műanyag.....	26
4.2 Anyagvizsgálathoz és gyártáshoz használt nyomtató	26
4.3 Nyomtatási paraméterek.....	26
4.4 Szakítószilárdság mérés	27
4.5 Ütő vizsgálat.....	30
4.6 Mérés összefoglalás	30
Összegzés	31
Irodalomjegyzék.....	32

Ábrajegyzék

1. ábra: Tervezett Csillagmotor [saját forrás]	7
2. ábra: Tervező iroda a CAD előtt [2]	7
3. ábra: Tervező iroda a CAD után [3]	8
4. ábra: Robbantott ábra a csillagmotorról [saját forrás]	10
5. ábra: Végeelem analízis testháló [saját forrás]	11
6. ábra: Végeelem szimuláció eredmények [saját forrás]	13
7. ábra: Prototípus gyártás 3D nyomtatás előtt [4]	14
8. ábra: Prototípus gyártás 3D technológia alkalmazásával [5]	15
9. ábra: 3D Nyomtató fej felépítése [6]	17
10. ábra: Extrúder felépítése [7]	18
11. ábra: 3D Nyomtató asztal szintezése [8]	19
12. ábra: Példa a nyomtatásban használt támasztékra [9]	20
13. ábra: Egy alkatrész több darabra bontása [saját forrás]	21
14. ábra: Szétbontott alkatrész nyomtatásának előnyei [saját forrás]	21
15. ábra: Példa vetemedésre [saját forrás]	23
16. ábra: Példa vetemedésre [saját forrás]	23
17. ábra: Megfelelő méret meghatározása [saját forrás]	25
18. ábra: Próbatetek paraméterei [saját forrás]	26
19. ábra: Szakító vizsgálat [saját forrás]	27

Táblázatjegyzék

1. táblázat: Vetemedési vizsgálat értékei
2. táblázat: Szakítóvizsgálat eredményei
3. táblázat: Szakítóvizsgálat eredményei
4. táblázat: Űtő vizsgálat eredményei

1. Bevezetés

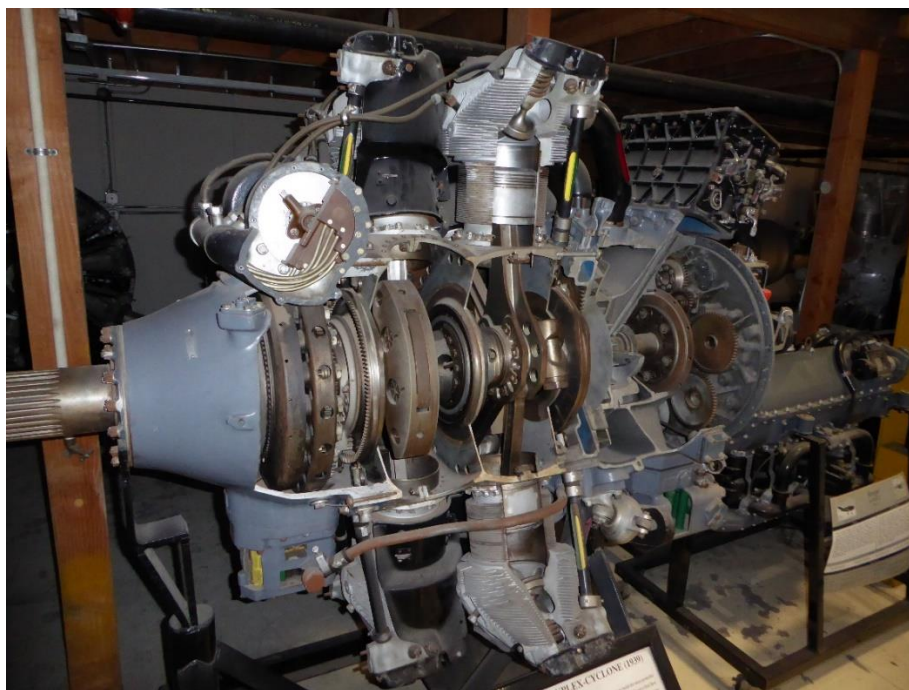
A csillagmotor egy speciális dugattyús belső égésű motor fajta, amelynél a hengerek egy síkban, körben helyezkednek el. A hengerek elhelyezkedése a csillag alakzatra emlékeztet, innen az elnevezés. A négyütemű egysoros csillagmotorok minden esetben páratlan hengerszámmal készülnek, a gyújtási problémák kiküszöbölése érdekében. Első sorban legnagyobb darabszámban a hadiparban használták őket, a második világháború után viszont már légi személyszállításban is alkalmazták őket. Előnyei a sokak által ismert soros motorokkal szemben például a hűtés típusa, ugyanis a csillagmotorok léghűtéssel rendelkeztek a folyékony hűtőrendszerekkel szemben. A hadászatban pedig kulcsfontosságú volt a sebezhetőség és ez nagy előnyt jelentett, hogy míg a soros motorok hűtése a kisebb repeszek által bekövetkezett sérülések hatására könnyen eredményezett hűtőfolyadék veszteséget és ennek következtében túlmelegedést, addig a léghűtéses csillagmotorokat ezek a sérülések nagyrészt nem érintik. Ezen felül rövidebb és merevebb főtengellyel rendelkeznek. Előnyös még az a tény is, hogy a csillagmotor beépítésével rövidebb lehet a géptörzs, illetve megoldható, hogy két csillagmotort építenek egymás mögé, közös tengelyre, így erejük megsokszorozható anélkül, hogy a repülőgép motortere indokolatlanul hosszú lenne. Hátrányai közé tartozik a hengerek elrendezéséből adódóan a megnövelt légellenállás, ezt a problémát egy speciális burkolattal oldották meg amik terelőlemezekkel rendelkeztek. Jelentős hátrány, hogy hosszabb állásidő elteltével az alsó hengerekbe folyik a kenőolaj, ami gondot okozhat a következő indítási műveletnél. Ennek kiküszöbölése érdekében érdemes a csillagmotorokat indítás előtt kézzel átmozgatni és a leeresztő csapokon a felesleges olajat kiengedni. Leváltásuknak egyszerű oka volt, nagyobb sebességet szerettek volna elérni ezt végül sugárhajtóművekkel oldották meg.

Azért választottam ezt a témát a dolgozatomnak, mert mindig is csodáltam ennek a szerkezetnek a különlegességét és a működését, és ezen ikonikus belső égésű motortípuson keresztül szeretném bemutatni a mai modern tervezőprogramok jelentőségét a mérnökök körében. A motort létrehozva a teljes tervezési folyamaton keresztül bemutatom a tervezőprogram lehetőségeit, rávilágítva arra, hogy használata még az ilyen komplex szerkezetek létrehozását is milyen jelentős mértékben felgyorsítja és megkönnyíti. Elég csak a számítógépes műszaki rajzokra gondolni, vagy a komplett szerelésre, amin különféle szimulációkat futtathatunk, valamint az alkatrész specifikus analízisek alkalmazására.

A megtervezett motort legyártva, és rajta szemléltetve mutatom be a mai világban már szinte mindenki számára otthon is elérhető 3D nyomtatás technológiáját. De vajon hogyan lesz egy megtervezett alkatrészből kézhez kapott nyomtatvány? Ezt az utat végig járva ismertetem a technológia felépítését, mi kell ahhoz, hogy egy alkatrész nyomtatható legyen, mennyire költséges ez az eljárás, illetve, hogy milyen előnyei és hátrányai lehetnek. Miként forradalmasította ez a modern technika a prototípusgyártást az iparban, és miért döntenek egyre többen emellett a rohamosan fejlődő és az otthoni felhasználásban is utat törő technológia mellett. Ezeket a technológiákat használva alkottam újra a csillagmotort.

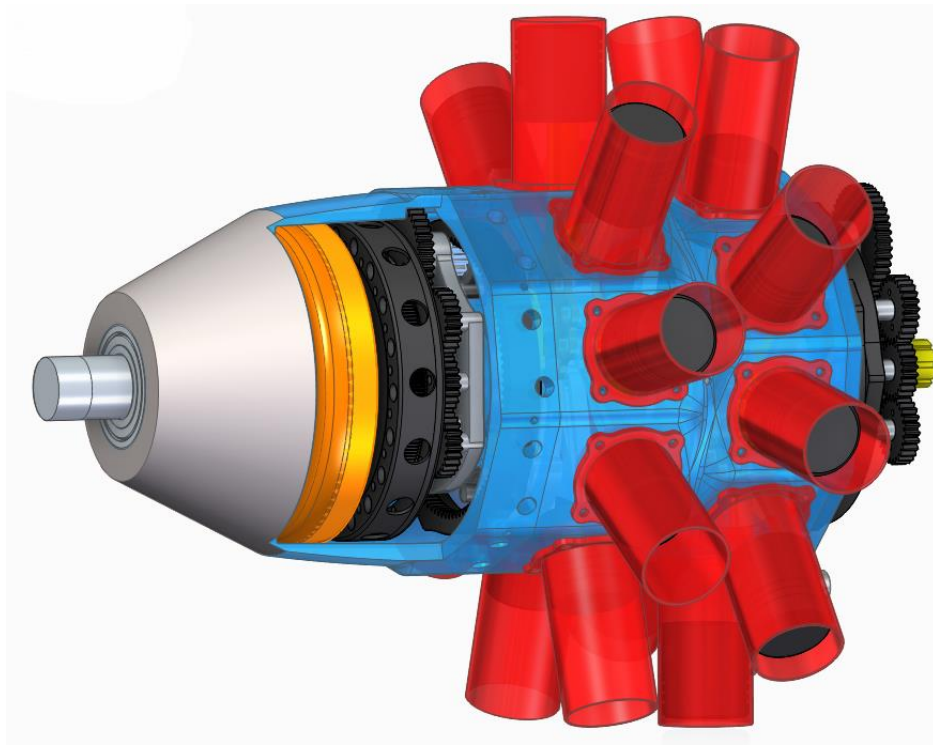
Az általam megtervezett motort a Wright R-3350 Duplex-Cyclone típusa ihlette, amit 1937-ben építettek meg először és összesen 29181 darabszámban gyártották és leginkább, a Boeing B-29 Superfortress nevezetű stratégiai nehézbombázóhoz használták.

Az eredeti motor száraz súlya üzemanyag nélkül 1,210 kg volt és a maga 54,8 literes löketérfogatával 3,700 lóerőt volt képes leadni 2,900-as percenkénti fordulatszám mellett. [1]



1. kép: Wright R-3350 Duplex-Cyclone Csillagmotor [1]

Az általam tervezett motor 10 kg súllyal és 3 literes lökettérfogattal rendelkezik így megközelítőleg 1:18-as a modell aránya az eredeti motorhoz képest.



1. ábra: Tervezett Csillagmotor [saját forrás]

2. Computer-aided design (CAD) Technológia



2. ábra: Tervező iroda a CAD előtt [2]

Egy tervező iroda még a CAD megjelenése előttről.



3. ábra: Tervező iroda a CAD után [3]

2.1 CAD Rendszerek megjelenése

A CAD rendszerek története régre nyúlik vissza, a tervezők hosszú ideje használnak munkájukhoz számítógépet. A kezdeti lépéseket az 1960-as években tette meg a repülőgép és gépkocsi ipar a 3D felülettervezés és az NC technológia terén. Ezek a kezdeti próbálkozások nem álltak kapcsolatban egymással, és közzétételük sok esetben csak sokkal később történt meg. A görbék matematikai leírására az első lépéseket már az 1940-es évek elején megtette Isaac Jacob Schoenberg, (Douglas Aircraft) és Roy Liming (North American Aircraft), azonban a polinomokkal leírható és a görbékről és szoborfelületekről szóló legértékesebb munkákat az 1960-as és az 1970-es években készítették Pierre Bezier (Renault), Paul de Casteljau (Citroën), James Ferguson (Boeing). A CAD rendszerek fejlődésében fordulópontot jelentett a MIT által megalkotott SKETCHPAD rendszer. Ennek az volt a lényege, hogy itt jelent meg először a lehetőség, hogy a tervező a grafikus rendszerbe közvetlen beavatkozhasson. Ténylegesen itt jelent meg először a grafikus interface, ami a modern CAD rendszerek nélkülözhetetlen eszköze.

Az első kereskedelmi forgalomba került rendszereket a nagy cégek fejlesztették a gépkocsi, repülőgép és elektronikai iparban. Csak a legnagyobb cégek engedhették meg maguknak a számítások elvégzéséhez szükséges nagy teljesítményű számítógépek alkalmazását. Ahogy a számítógépek fokozatosan egyre olcsóbbak és könnyebben kezelhetők lettek, úgy terjedt el a CAD alkalmazása gyakorlatilag minden mérnöki tervezésre. Fontos lépés volt a személyi

számítógépek megjelenése. Ugyancsak kulcsfontosságú volt a nagy számítástechnikai cégek bekapcsolódása a fejlesztésbe. 1981-ben megjelentek a szilárdtest modellező programok (például Romulus és Uni-Solid) valamint a Dassault felület-modellezője, a CATIA. Az Autodesk céget 1982-ben alapította John Walker, az ő programjuk a 2D rajzoló AutoCAD lett. Majd később megjelentek a közepes bonyolultságú szoftverek (Solid Works 1995, Solid Edge 1996). [14]

A CAD rendszerek szolgáltatásai közé tartoznak például []:

- Műszaki rajz készítés a szilárdtest modellből
- Lemezalkatrészek tervezése
- Kinematika, ütközésvizsgálat, tűrésanalízis
- Lehetőség más szoftverekkel történő adatcserére (export, import)
- Szabványos alkatrészek automatikus generálása
- A modell könnyű változtathatósága
- Automatikus összeállítás modellezés, melyek összetevői alkatrészek vagy más összeállítások lehetnek

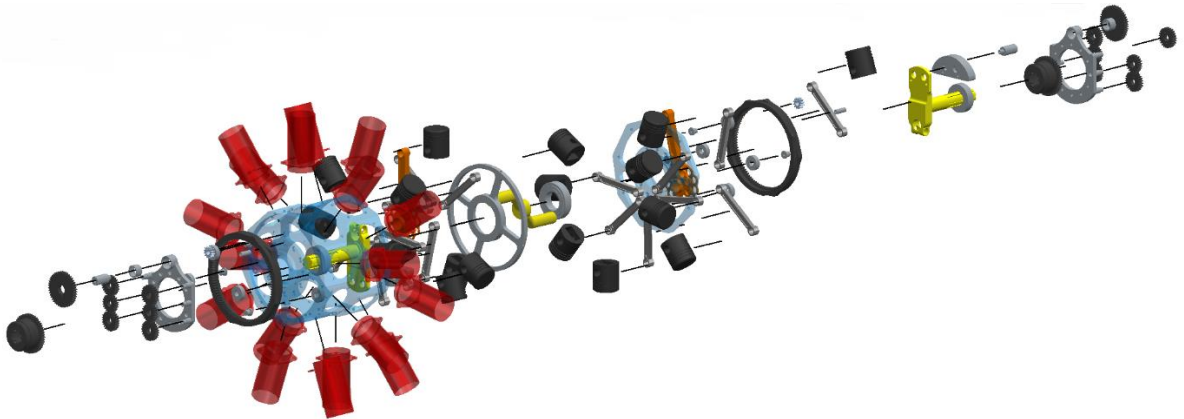
2.2 Műszaki rajz

A műszaki rajz a mérnöki tervezés egyik alappillére, ez az ipari célú gondolatok sajátos vizuális kommunikációs eszköze. Ebben rögzíti és közvetíti a tervező az elgondolásait a kivitelező szakemberrel. A műszaki rajzok tájékoztatnak az alkatrészek alakjáról, méreteiről és egyéb műszaki követelményekről. A tervezési folyamat a műszaki rajzzal kezdődik, eleinte vázlatok formájában majd ahogy egyre jobban kezd alakot öltetni egy gondolat úgy születik meg az adott alkatrész szabványos műszaki rajza. A műszaki rajz elsajátítása a mérnöki lét alapját képezi. A CAD rendszerek megjelenésével és fejlődésével a mai világban egyre jobban háttérbe szorul a szabadkezes műszaki rajzok készítése a nála jóval gyorsabb számítógépes műszaki rajzokkal szemben.

2.3 Számítógépes műszaki rajz előnyei

A számítógépes műszaki rajzok számos előnnyel rendelkeznek, talán a legfontosabb ezek közül az elkészítési idő rövidege a szabadkezes rajzokkal szemben. Míg egy egyszerű alkatrész több nézettel rendelkező rajzának elkészítése is akár órákat vehet igénybe szabadkézzel, addig ez pár percet jelent a programmal elkészíteni.

A következő érv, ami szintén a számítógépes rajz mellett szól, az a komplex alkatrészek nézeteinek elkészítése. Egy összetett alkatrész szabadkézi rajzában könnyű elveszni és átláthatatlannak tűnhet, míg a programban hatványozottan könnyebb egy átlátható rendszert felépíteni. Számítógépes műszaki rajzot alkalmazva a magas alkatrésszámmal ellátott összeállítási rajzok sem okoznak gondot, melyeket szabadkézzel adott esetben nagyon hosszú idő alatt, vagy esetleg el sem lehetne készíteni.



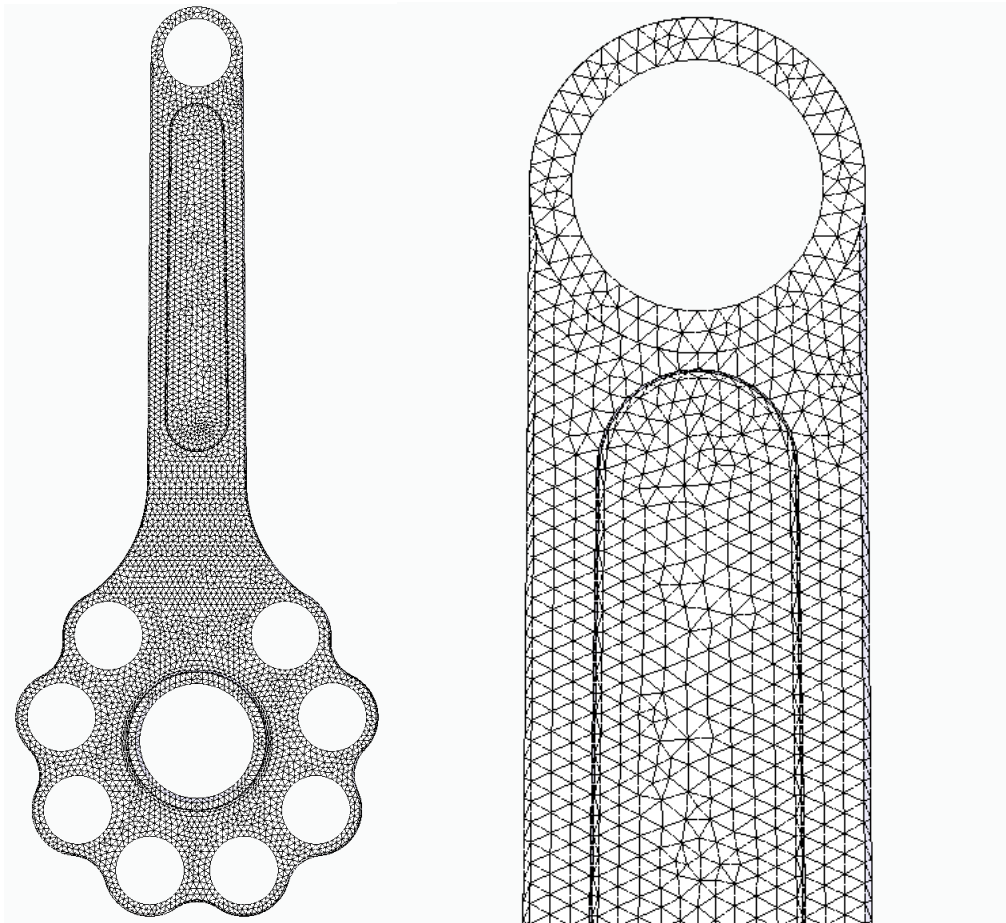
4. ábra: Robbantott ábra a csillagmotorról [saját forrás]

A következő igen jelentős pozitívum a szabadkézi rajzzal szemben az a módosíthatóság. A programnak köszönhetően a tervezési folyamat bármely szakaszában módosíthatunk a rajzunkon bármi féle negatív hatás nélkül, míg a szabadkézi rajzot nagyon körülményes egy hiba esetén módosítani, illetve javítani.

Ezen előnyök összessége sem jelenti azt, hogy a szabadkezes műszaki rajzot teljes mértékben el kellene felejtenünk, hiszen az alapokat itt tudjuk igazán elsajátítani, és ezen ismeretek nélkül hiába a program fejlettsége, ha nem tudjuk a benne rejlő lehetőségeket kihasználni.

2.4 Végeelem módszer CAD segítségével

A végeelemes módszer (VEM) egy speciális numerikus módszer parciális differenciálegyenletek közelítő megoldására. Ezt a technológiát jellemzően mérnökök használják, a gépészmérnöki és építőmérnöki feladatokkal szorosan összefüggő mechanikai (szilárdságtani és lengéstani) számítások elvégzésére, valamint a villamosmérnöki gyakorlatban mezőszimuláció során is ezt a módszert alkalmazzák. Tipikus példa a végeelemes módszer használatára mikor egy bonyolult alakú statikusan terhelt gépalkatrész feszültségi állapotát és alakváltozását vizsgáljuk. Ebben az esetben a vizsgálni kívánt alkatrészt a modellező program geometriai testek véges számú elemeire bontja. Síkbeli problémáknál például háromszögekre vagy négyszögekre, térbeli esetben esetleg hasábokra vagy tetraéderekre. [15]



5. ábra: Végeelem analízis testháló [saját forrás]

A modellben az elemek csak sarokpontjaikon (csomópontjaikon) csatlakoznak egymáshoz. A csomópontokon az elemekre ható erők és a csomópontok elmozdulása között a Hooke-törvényt

követő anyag esetén lineáris összefüggés van, ezekből összeállítható az elemek merevségi mátrixa, amely mátrixból megszerkeszthető az egész alkatrészre feladatához tartozó merevségi mátrix. A feladat egyenlete így erre a megoldásra redukálódik:

$$\vec{k}\vec{u} = \vec{F}$$

ahol

$\vec{u}$ = az m elemű elmozdulásvektor

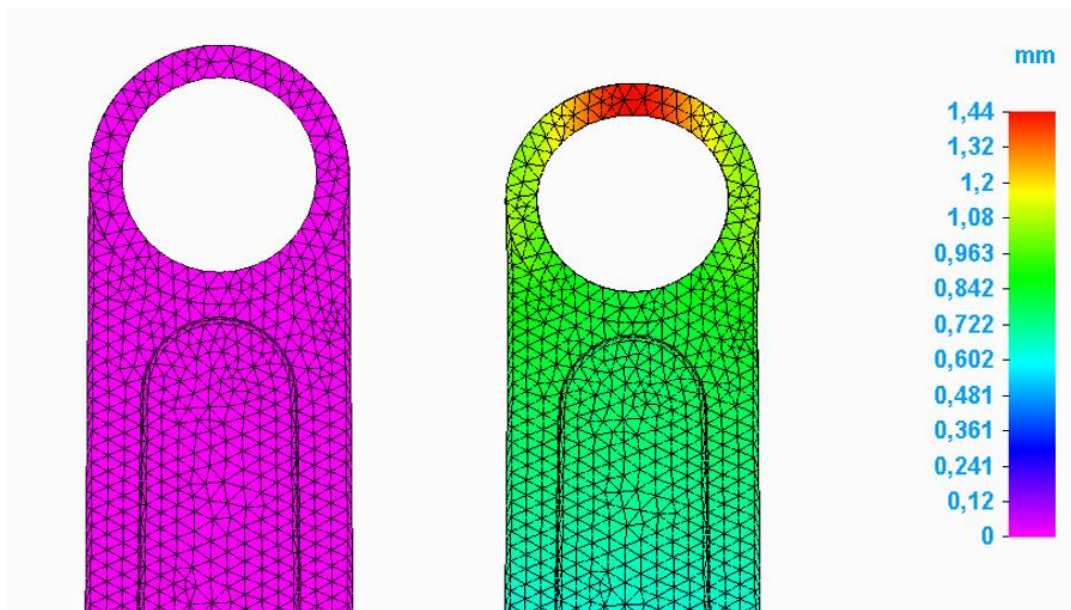
$\vec{F}$ = az m x m elemű terhelésvektor

$\vec{k}$ = egy m elemű szimmetrikus mátrix, a rendszer merevségi mátrixa

$m = nk$ a rendszer csomópontjainak (n) és a csomópontok szabadságfokainak (k) szorzata

Az egyenletrendszer megoldásával kiszámítható az egyes csomópontok elmozdulása, majd az elmozdulásokból a csomóponti erők és a közelítő mechanikai feszültségek. A végesesemes módszer kézi számításokra nem a legalkalmasabb, mivel nagyon sok elemi műveletet kellene megoldani hozzá. A végesesemes módszer alkalmazásánál nemcsak a tulajdonképpeni matematikai feladat (egyenletrendszer megoldása, sajátérték-feladat) megoldása, ami munkaigényes, hanem magának az adatoknak az előkészítése majd az eredmények értékelhető alakba hozása is sok időt igényelne. A statikus problémák tehát végső fokon egy lineáris egyenletrendszer megoldását kívánják, amelyre sok jól használható számítógépes módszert dolgoztak ki. Ezáltal a mai viszonylag kis teljesítményű személyi számítógépek is alkalmasak arra, hogy egy sor gyakorlatilag fontos feladatot rövid idő alatt végrehajtsanak. A lent bemutatott példában az általam megtervezett csillagmotor fő hajtókarát vizsgáltam. Az anyagnak a nyomtatásban is gyakran használt ABS közepes szilárdságú műanyagot adtam meg. A szimulációban arra voltam kíváncsi mekkora alakváltozást szenved el a hajtókar, ha egy 2000N (200kg) lineáris irányú terhelés éri.

A 4. ábra bal oldalán a terhelés előtti állapot látható míg a jobb oldalán a terhelés hatására bekövetkező legnagyobb alakváltozás végül a színhez tartozó értékeket láthatjuk „mm” nagyságrendben.



6. ábra: Végeselem szimuláció eredmények [saját forrás]

Ez alapján láthatjuk, és vizsgálhatjuk, hogy a megtervezett alaktrész kibírja-e a szükséges terheléseket amik a munkavégzés közben érik. Ezzel a módszerrel megelőzhetjük, hogy az adott alkatrész olyan helyre építsék be, ahol az adott terhelés nagyobb a megengedett értéknél, vagy lehetőséget biztosít arra, hogy módosítsuk a modellt olyan mértékben, hogy ellen álljon a szükséges terhelésnek.

A végeselem módszere mostanra elengedhetetlen kelléke lett a mérnöki eszköztárnak, felgyorsítva és biztonságosabbá téve a tervezési folyamatokat.

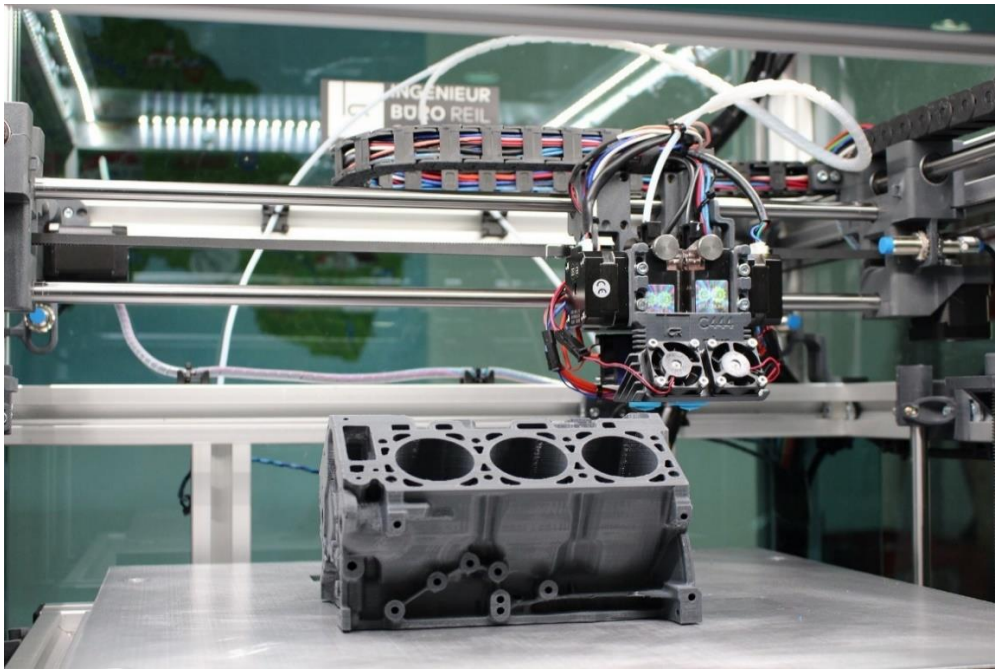
3. 3D nyomtatás

Prototípus gyártás a 3D nyomtatás megjelenése előtt



7. ábra: Prototípus gyártás 3D nyomtatás előtt [4]

Prototípus gyártás 3D nyomtató technológiával



8. ábra: Prototípus gyártás 3D technológia alkalmazásával [5]

Mostanra a gyors prototípus gyártás fogalma egygé vált a 3D nyomtatással ahogy nemcsak egyre népszerűbbé, hanem egyúttal elérhetőbbé válik. Már nem csak a nagyobb vállalatok engedhetik meg maguknak, hogy vizuális modelleket, funkcionális prototípusokat valósítsanak meg, hanem a magánszemélyek is vásárolhatnak az elérhető árral rendelkező 3D nyomtatók közül.

3.1 Csillagmotorhoz használt alapanyag

A motor összes alkatrészét PLA-ból (Polylactic acid) készítettem. Ez az anyag egy biológiai úton lebomló, hőre lágyuló műanyag, melyet növényekből állítanak elő. Elsősorban magas keményítő tartalmú gabonafélékből (kukorica, rizs, búza) lehet előállítani, tejsavas erjesztéssel és polikondenzációval. A 3D nyomtatásban az egyik legelterjedtebb anyag a könnyű felhasználhatósága miatt. A többi népszerű anyaghoz képest alacsonyabb hőmérsékleten nyomtatható 195-215 °C között, kevésbé hajlamos a vetemedésre, rugalmas és nyomtatás során nem keletkezik kellemetlen szag.

3.2 Csillagmotor gyártásához használt nyomtató

A nyomtatáshoz egy Creality Ender 6-os nyomtatót használtam. Ez egy úgynevezett FDM technológiával működő nyomtató, mely szilárd műanyag huzalt használ fel. A nyomtató maximális nyomtatási sebessége 150mm/s és 0,1 mm-s pontossággal rendelkezik. Ennek a modellnek a nyomtató tere 250x250x400mm. Ennél a típusnál az az érdekesség, hogy nem a fej halad Z tengely mentén lentől felfelé, hanem az asztalt süllyeszti Z tengely mentén fentről lefelé így felépítve a nyomtatványt.

3.3 Hogyan kezdődik egy nyomtatás?

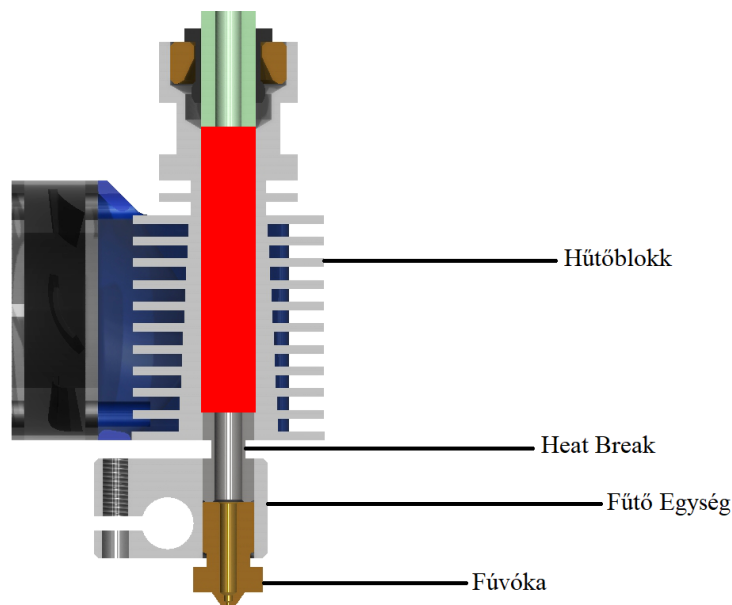
Ahhoz, hogy megkezdhessük a nyomtatást a kiválasztott modellünket be kell helyeznünk egy speciális programba, amit „szeletelő” programnak hívunk. Ehhez viszont a megfelelő fájlformátumra van szükség (STL). Szerencsére mostanra több CAD szoftver is rendelkezik ezzel a funkcióval, hogy átkonvertálja a modellt a számunkra a kívánt formátumba. Ezután elhelyezzük a modellt az előbb említett szeletelő programba, ahol a program az egész modellünket az általunk megválasztott vékonyságú szeletekre bontja és egyenként minden szeletnek elkészíti a G kódos (ezt használják a modern CNC gépeknél is) programját. Így a nyomtató egyszerre mindig egy rétegen dolgozik majd halad a következőre így építve fel a kész nyomtatványt.

A nyomtatók felépítése változó lehet, van, hogy a fej csak X és Y koordinátákon mozog és az asztal mozog a Z koordinátán, vannak nyomtatók, ahol viszont az asztal csak X irányban mozog és a nyomtató fej végzi a maradék Y és Z koordinátákon való mozgást. Az utóbbi valamivel gyorsabb az első változatnál mivel itt az asztal is végez mozgást oldalirányban. A huzallal dolgozó nyomtatók technológiája nem bonyolult. Az anyag egy dobban helyezkedik el, innen lefűzve egy speciális kopás és hő álló csövön keresztül a fejbe befűzve érkezik meg a fűtőtesthez „hotend-hez”.

3.4 Nyomtató fej felépítése

A fej felépítése lentől felfelé a következő, a fűvóka, amin keresztül távozik az olvadt műanyag, ennek átmérője változó az átlagfelhasználók körében 0,1mm-től egészen 0,8mm átmérőig. A fűvókán egy szilikonvédő található, ami segíti a gyorsabb felmelegedést és az állandó hőmérsékleten tartást. Ezt a fűvókát csavarjuk bele abba a fűtőblokkba ami helyet ad a termisztornak és a fűtőpatronnak is. A fűtőblokk másik oldalába csatlakozik a „Heat Break” nevezetű cső, amin keresztül az anyag eljut a fűtőblokkba, erre húzzuk rá a hűtőblokkot. Ahogy

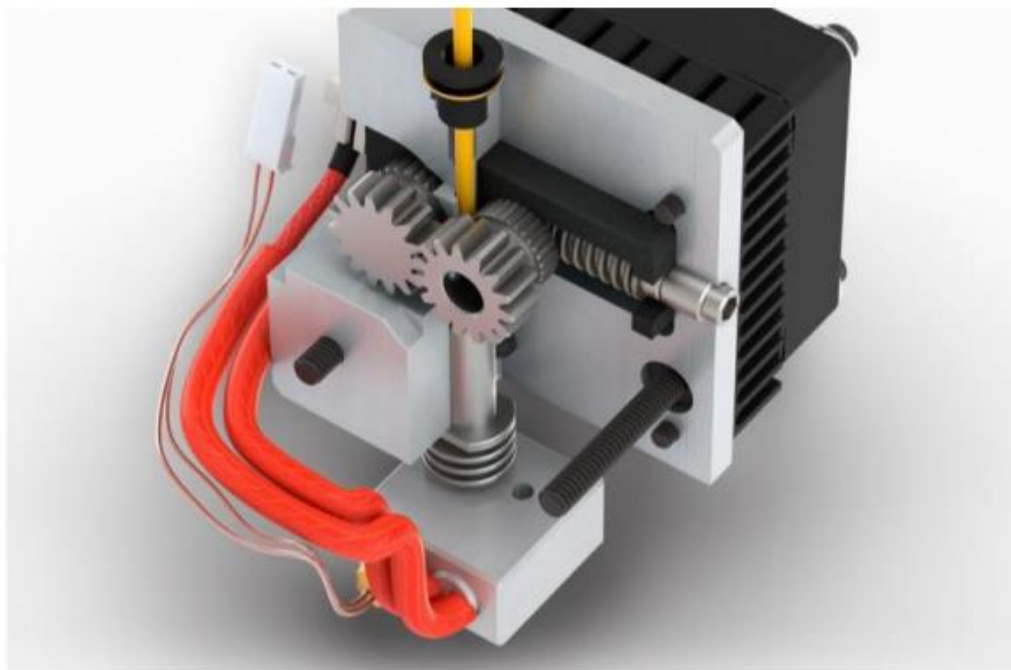
a szilárd huzal halad a fej felé a „Heat Break”-ben elkezdődik a lágyulás majd a fűtőblokk-ban már a folyékony olvadék található ami távozik a fűvókán. Fontos a megfelelő hűtés, hogy csak a fűtőblokkban legyen olvadék feljebb ne, ugyanis az duguláshoz vezethet.



9. ábra: 3D Nyomtató fej felépítése [6]

3.5 Extruder működése

A huzal adagolására az extruder nevezetű alkatrész a felelős, ebből kétfajta létezik, bowdenes és közvetlen vezérelt. Mindkét esetben a huzalt két bemarásokkal ellátott henger köré helyezük, a bemarások azért szükségesek, hogy biztosítsák a megfelelő adagolást anélkül, hogy a huzalon elcsúszna, gyakorlatilag ugyan úgy működik, mint a CO hegesztőgépeknél a rézhuzal adagoló. A bowdenes megoldás olcsóbb mindazonáltal pontatlanabb, mint a közvetlenül vezérelt társa. Az extrudernek van a legnagyobb hatása a nyomtatás minőségére, az itt beállított paraméterek nagyban hozzájárulnak a kész nyomtatvány felületi minőségéhez és mechanikai tulajdonságaihoz. A leggyakoribb problémák közé tartozik, amiket az extruder beállításai befolyásolnak az anyagáramlás értéke. Itt két jelenséget különböztetünk meg „alul extrudált” és „felülextrudált” nyomtatás.



10. ábra: Extrúder felépítése [7]

3.6 Gyakori nyomtatási hibák

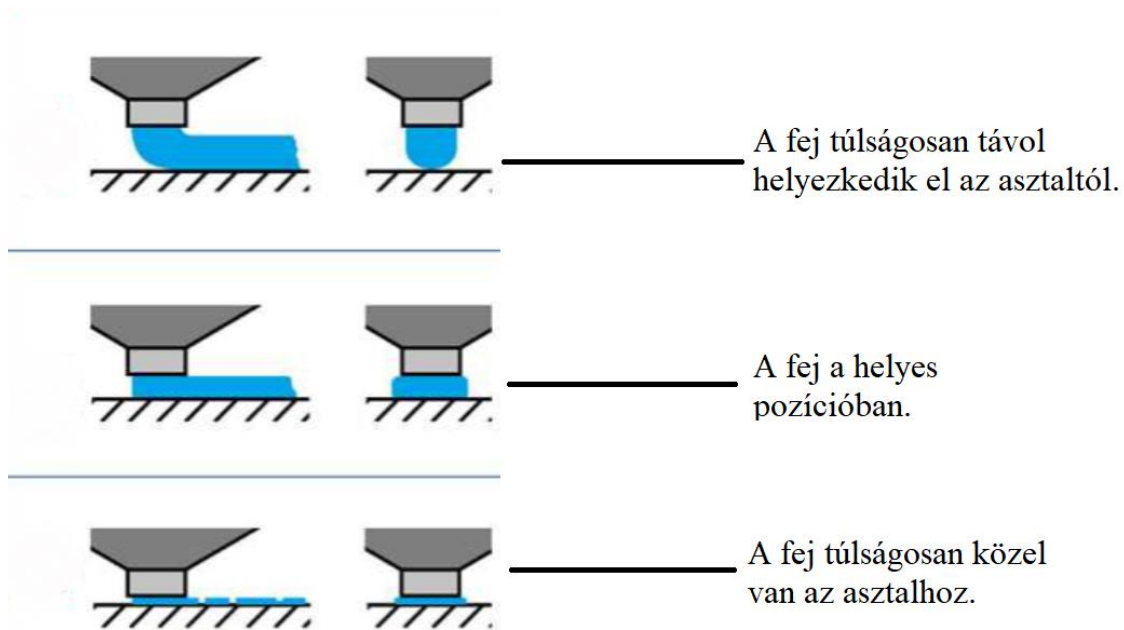
Abban az esetben, ha az extruder „alul extrudál” abból az következik, hogy nem juttat elég anyagot a nyomtatáshoz ezáltal az anyag összetétele nem lesz megfelelő, mechanikai tulajdonságai pedig csökkennek. Saját tapasztalataim alapján úgy jellemezném, hogy „alul extrudálás” következtében a nyomtatvány állaga „szivacsos” könnyen összenyomható lesz.

A másik lehetőség mikor „felül extrudálásról” beszélhetünk. Ilyenkor az extruder túl sok anyagot juttat a nyomtatás helyszínére. Ez több problémát is eredményezhet, először is a megnövekedett anyagtól a fej eldugulhat és kár keletkezhet a nyomtatófejben. Másodszor, a nyomtatás felületére érkező megnövekedett anyagáramlás következtében az anyag folyós marad nincs elég ideje megszilárdulni és torzul a nyomtatás felülete.

A következő leggyakoribb probléma, amivel nyomtatás közben szembesülni kell az a „szálazás”, angol nevén „stinging”. A szálazás akkor jelentkezik, mikor a fej a nyomtatás közben munkavégzés nélkül vált pozíciót. Ilyenkor az anyagáramlást meg kell szakítani, különben felesleges anyag kerül a fej által megtett út helyszínére. Ezt a jelenséget a szálvisszahúzás „retraction” értékeivel tudjuk kiküszöbölni. A két legfontosabb érték a szálvisszahúzás sebessége és nagysága. Fontos, hogy a két értéket egyszerre kell módosítani ugyanis az egyik befolyásolja a másikat. Ha az értékek túl alacsonyak úgy a szálazás nem szűnik

meg, ha túl magasra állítjuk őket, akkor előfordulhat, hogy a szálát olyan magasra húzza ki a fejből, hogy az túl messzire kerül a fűtőpatrontól és elkezd megszilárdulni ezzel dugulást okozva a fejben. Szerencsére a szeletelő program gyártója több lehetőséget is biztosít ennek a megoldására.

A következő dolog amire figyelniünk kell az a fej távolsága az asztaltól, vannak gépek, amik már automatikusan vagy félig automatán, de elvégzik helyettünk a szintezést, vannak mindazonáltal olyan modellek is, ahol manuálisan kell ezt megtennünk. A 11. ábrán láthatjuk, hogy ha a beállítás nem megfelelő és a fej túlságosan távol helyezkedik el az asztaltól akkor azzal nagyban rontjuk a nyomtatás letapadásnak mértékét, ami ahhoz vezethet, hogy a nyomtatás közben a modell felválk a tárgyasztaltól. Ha pedig túl közel pozicionáljuk a fejet akkor nem hagyunk elég helyet az olvadt anyag távozására, ez pedig duguláshoz vezet.



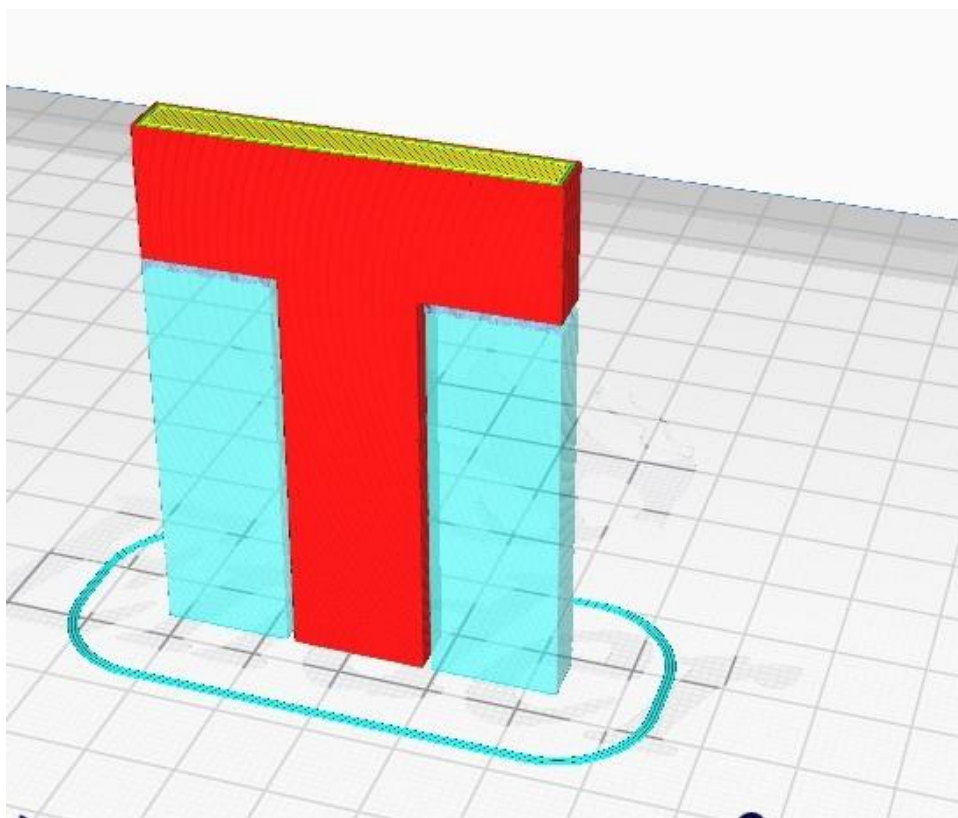
11. ábra: 3D Nyomtató asztal szintezése [8]

Mikor nyomtatásra tervezünk egy modellt fontos előre gondolkodni és úgy megalkotni, hogy nyomtatható legyen. Fontos megjegyezni, hogy mikor a CAD szoftver átkonvertálja számunkra a megfelelő formátumra a modellt, akkor csak annyit tesz, hogy egy hálót húz a modellre és ebből a hálóból lesz az a test, amit nyomtatásra küldünk. Nem minden alkatrész nyomtatható elsőre. Akár egyszerűbbnek tűnő alkatrészek esetében is van, hogy módosításokat kell

eszközölni annak érdekében, hogy a legkevesebb anyagból és a legrövidebb idő alatt lehessen azt legyártani. Az is előfordul, hogy egy adott alkatrészt több darabból kell létrehozni és később összeilleszteni azokat a végleges formára. A csillagmotor megalkotását megelőző a tervezésben is több ilyen problémával kellett szembenéznem.

3.7 Nyomtatásban használt support szerepe és fontossága

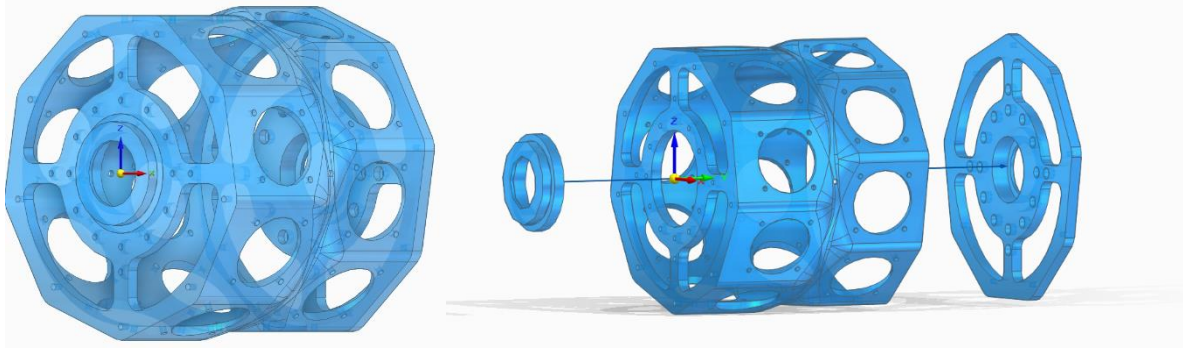
A nyomtatás technológiájából adódva, rétegről rétegre halad és építkezik. Akár csak az épületeknél sok esetben alátámasztást igényel sok esetben, nincs ez másképp a nyomtatásnál sem, ugyanis nem tud a nyomtató a levegőbe építkezni, biztosítani kell számára megfelelő alátámasztást ezt a 3D nyomtatásban „supportnak” nevezzük. Ez egy kevesebb anyagot igénylő része a nyomtatásnak és csak azt a célt szolgálja, hogy biztosítson egy platformot amire a nyomtató a következő rétegre haladva építkezhet.



12. ábra: Példa a nyomtatásban használt támasztékra [9]

3.8 Modell több részre bontása

Ha ezt a tényezőt ignoráljuk akkor nem csak többlet anyaggal és megnövekedett gyártási idővel kell számolunk, de olyan helyzetbe sodorhatjuk magunkat egy komplex alkatrész készítésénél, hogy ezt az alátámasztást nem tudjuk eltávolítani, vagy az eljárás közben maradandó károkat okozunk a nyomtatványnak. Ha amellet döntünk, hogy megbontjuk az alkatrészt több darabra a 13.ábrán látható példa alapján:

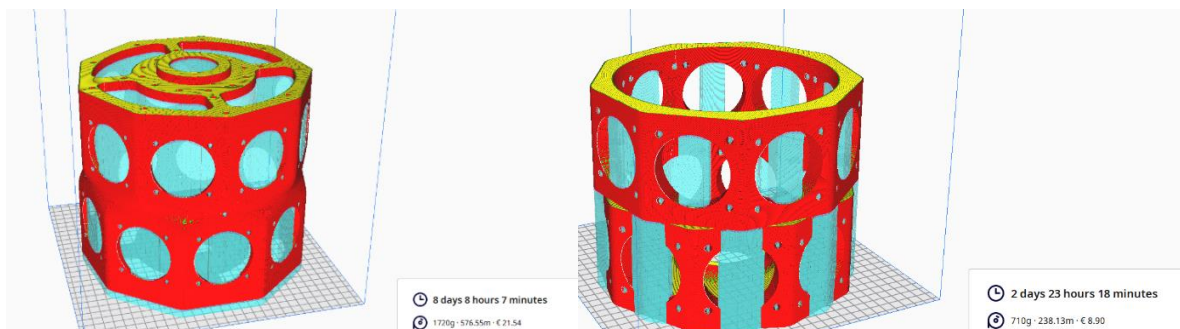


13. ábra: Egy alkatrész több darabra bontása [saját forrás]

Akkor ebben az esetben kell választanunk az összeállításához szükséges illesztési formát, ez lehet csavarkötés, ragasztás vagy zsigorkötés is.

Megfelelő illesztést választva a több daraból legyártott alkatrész mechanikai tulajdonságai szinte megegyeznek az egy darabból előállított munkadarab tulajdonságaival. A következő ábrákon bemutatva szemléltetem az alkatrész megbontásából származó előnyöket.

A 14. ábra első felén az egyben legyártott alkatrész értékei láthatók, majd a megbontott modellel.



14. ábra: Szétbontott alkatrész nyomtatásának előnyei [saját forrás]

Az ábrákon jól látható a különbség, míg az egyben nyomtatott darabon irreális értékeket kapunk mind a nyomtatási idő, mind az anyagköltségre nézve is, és ezen felül az alátámasztást lehetetlen roncsolásmentesen eltávolítani, addig a szétbontott alkatrész nyomtatási ideje gyakorlatilag a harmada, az anyagköltség pedig 2,4-re csökkent. Ha a bontott alkatrészhez

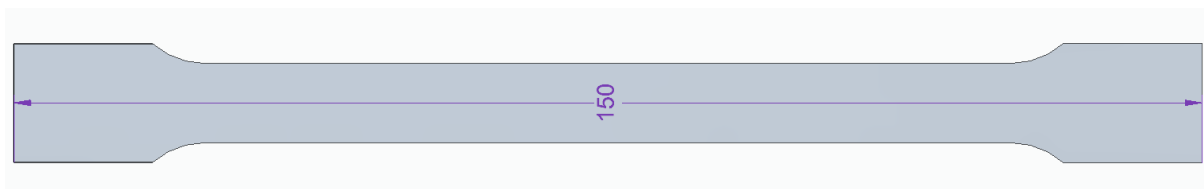
hozzá adjuk a maradék darabokat, még akkor is hatványozottan csökkentettük a gyártási idő és a szükséges anyag mértékét. Fontos, hogy mindig előrelátóan tervezzük és szükség esetén módosítsuk az alkatrészt abban az esetben, ha azt utána a leghatékonyabban szeretnénk kinyomtatni.

Abban az esetben mikor alkatrészek illesztéséről van szó, vagy ha egy vagy több alkatrészt szerelésre gyártunk, kiemelt jelentősége van a végleges méretnek. Itt minden esetben figyelni kell a nyomtató pontosságára és az adott anyag vetemedésére is, csakúgy, mint a fröccsöntésnél, itt sem a végleges méreteket adjuk meg, rá kell számolni az anyag vetemedéséből keletkező értékét is. Tapasztalataim szerint minél kisebb egy alkatrész annál jobban eltér a modellen megadott méret a legyártott munkadarabon méretekől. Ahogy az alkatrész befogadó méretei növekszenek, úgy lesz a torzulás mértéke egyre kisebb.

3.9 Illesztések és méretek meghatározása

Ezek az illesztések meghatározó fontosságúak voltak egy ilyen jellegű és ilyen magas alkatrészszámmal ellátott szerelésnél, mint ez a megtervezett csillagmotor. Ha valahol megszorul az végzetes lehet az adott modellre nézve, de az is elég, ha csak kisebb akadást esetén egymáshoz csiszolódik a műanyag és kikoptatja az adott méretet. Ennél a működő modellenél rengeteg egymáshoz illeszkedő alkatrész, csapágyra tűrt méret, és különböző átmérőjű menet található, ezért nagy kihívást jelentett ezek pontos nyomtatási méretének a meghatározása, annak érdekében, hogy a végén ez egyes elemeket összeépítve a csillagmotor megfelelően és problémamentesen működjön.

Az alkatrészek mérésére az egész folyamat alatt a Mitutoyo 500-181-20-as számú modelljét használtam. Az alábbi példákban a szakítóvizsgálathoz nyomtatott szabvány próbatesteken mutatom be hogyan változik a modellen megadott méret a kinyomtatott munkadarabon. Ahogy azt a tapasztalataim is mutatják, a kisebb méretek megadásánál nagyobb eltéréseket lehet mérni, míg a nagyobb értéknél jóval közelebb kerül a méret a megadotthoz.



15. ábra: Példa vetemedésre [saját forrás]

A példában látható, hogy a 150mm-es hosszon csak 0,01mm az eltérés, ami gyakorlatilag méretpontos nyomtatványt eredményez.



16. ábra: Példa vetemedésre [saját forrás]

Míg a 4mm-es megadott értéknél csak 3,91mm-es értéket mértem, ami 0,09mm-es eltérést jelent. Ez az eltérés határeset ugyan, de még bele tartozik a nyomtató gyártója által megfogalmazott

0,1mm-es pontosság tartományába, mindazonáltal ez már sokkal nagyobb eltérés, és bizonyos esetekben már nem elfogadható, ha méretpontos alkatrészeket szeretnénk kézhez kapni. A csillagmotor legyártott alkatrészeinek méreteit megvizsgálva szemléltetem átlagosan mekkora változás tapasztalható a mért értékek között. Az alábbi méretek nem illesztésre készültek így a kapott méretekkel kerültek beépítésre.

A táblázatban található értékek „mm”-ben értendők.

Méret típusa	Megadott méret	Mért méret	Különbség
Külső szélesség méret	5	4,92	0,08
Belső távolság méret	9,5	9,38	0,12
Külső szélesség méret	10	9,93	0,07
Külső átmérő méret	14,4	14,34	0,06
Belső átmérő méret	14,5	14,44	0,06
Külső átmérő méret	55,2	55,17	0,03
Külső szélesség méret	61	61,05	0,05
Külső szélesség méret	121	120,97	0,04
Külső szélesség méret	140	140,02	0,02
Külső szélesség méret	145	144,98	0,02

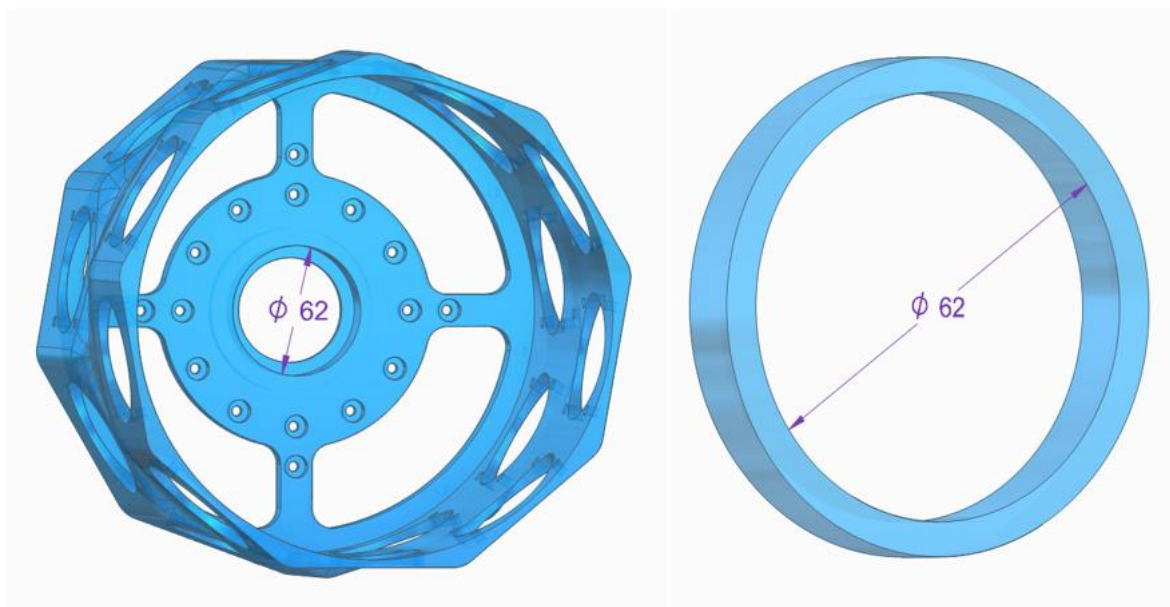
1. táblázat: Vetemedési értékek [saját forrás]

A táblázat értékein megfigyelhető a változás miszerint a kis méretek nagyobb léptékkel vetemednek, mint a nagyobb értékű méretek. A 10 vizsgált méretből 9 a nyomtató gyártója által megadott pontosságon belül mérhető.

Amennyiben a méretet illeszteni kell és közel méretpontosra kell gyártani és alig pár század eltérést határozunk meg, úgy a méret megadására jó támpontot biztosíthat ez a táblázat, vannak esetek viszont amikor olyan kiemelt fontosságú alkatrészt készítünk, hogy előtte egy próbadarabot gyártunk le a megadott méretekkel, majd a nyomtatást követően ezeket lemérve látjuk, melyik méret milyen mértékben változott. Ezeket a változásokat eszközöljük a modellen majd a rászámolt méretekkel újra nyomtatva méretpontos nyomtatványt kapunk.

Ez kisebb modelleknél alkalmazható, azonban nagyobb anyagköltséggel és gyártási idővel rendelkező modelleknél nem tehetjük meg, hogy két darabot nyomtatunk belőle. Ez volt a nehézség a csillagmotor legnagyobb alkatrészének a blokknak a nyomtatásával. Rengeteg

illeszkedő méret található rajta, csapágyra tűrt méret, csavarmenet névleges méretei több átmérőben, külső és belső illeszkedő méretek. Ezt a problémát úgy oldottam meg, hogy a korábban legyártott alkatrészekben hasonló méreteket kerestem és azok változásait figyelembe véve határoztam meg a szükséges méretet a blokkon. Voltak azonban méretek, amikkel előzőleg nem volt dolgom például adott csapágy méretek, így ki kellett találnom egy gyors és hatékony megoldást. Ez nem más volt, mint megkerestem a blokkon a szükséges meghatározandó méretet és helyét, majd ezt kiszakítva a blokk modelljéből külön legyártva vizsgáltam meg. Ez gyakorlatban azt eredményezte, hogy egy adott átmérő 62mm-es csapágy méret meghatározására, legyártottam egy gyűrűt, aminek a belső átmérője 62mm-volt így képes voltam meghatározni a szükséges tűrt méretet a lehető legkevesebb anyag és idővesztéssel.



17. ábra: Megfelelő méret meghatározása [saját forrás]

Ezen megoldások vezettek a nyomtatás sikerességéhez, hogy egy működő, funkcionális modellt legyek képes előállítani.

4. 3D Nyomtatás anyagvizsgálat

Ebben a tesztben azt vizsgáltam, hogy a megtervezett és legyártott csillagmotor anyaga milyen megpróbáltatásoknak képes ellenállni. A tesztben szakító és ütésvizsgálatot végeztem a

szabványos próbadarabokon, kettő különböző gyártási beállítást alkalmazva és ezeken megfigyelve, hogy változik az anyag mechanikai tulajdonsága.

4.1 Anyagvizsgálathoz használt műanyag

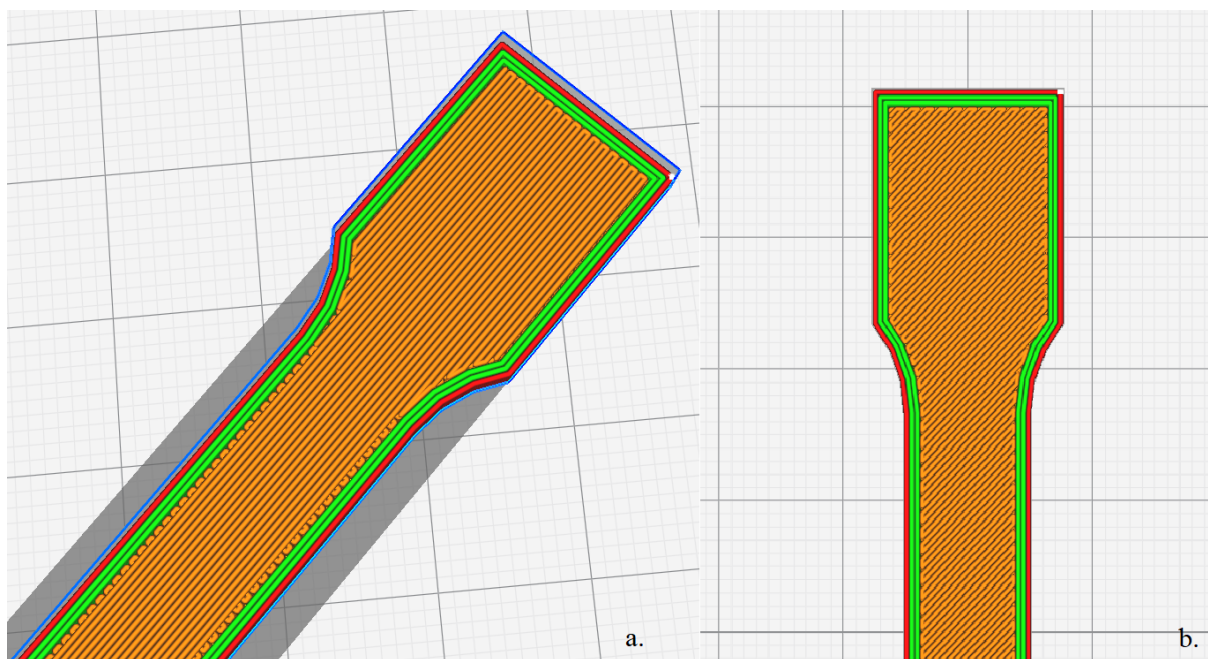
A tesztben a Herz Hungária Kft-től beszerzett PLA Filament 1,75-mm átmérőjű huzaljára esett a választás, melyet a csillagmotor gyártásához is használtam.

4.2 Anyagvizsgálathoz és gyártáshoz használt nyomtató

A próbadarab nyomtatásához szintén a csillagmotorhoz használt saját Creality Ender 6-os változatát használtam.

4.3 Nyomtatási paraméterek

A vizsgálathoz két különböző építési struktúrát választottam, az első struktúránál az egyik réteg 45°-os a következő pedig erre merőleges elhelyezkedésű (a). A második mintánál az egyik réteg párhuzamos a húzás irányával míg a rá következő erre merőleges (b). A nyomtatás 205°C-os fej hőmérséklet és 54°C-fűtött tárgyasztalnál készült 80mm/s nyomtatási sebességgel. Egy beállítással 5 próbadarab készült a szakítóvizsgálatra és 5 az ütés vizsgálatra.



18. ábra: Próbatestek paraméterei [saját forrás]

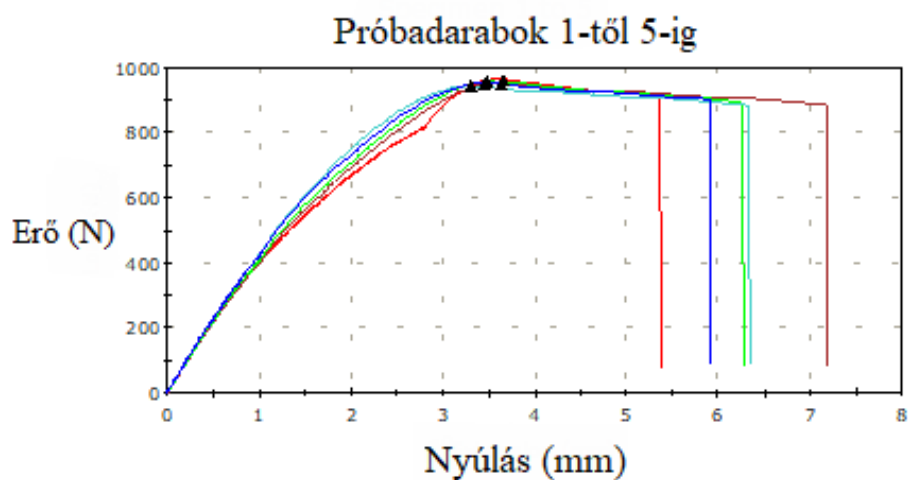
4.4 Szakítószilárdság mérés

A vizsgálatot az Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszékén hajtottuk végre szobahőmérsékleten. A teszthez az Instron 5582 univerzális gépét használtuk fel.



19. ábra: Szakító vizsgálat [saját forrás]

Az első táblázatban láthatóak a 45°-os elrendezésű nyomtatás szakítóvizsgálatának értékei.



	Modulus (Young's Tensile stress 0.05 % - 0.25 %) (GPa)	Load at Tensile Strength (N)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)	Tensile strain at Tensile Strength (%)
1	1.16	964.5	24.48	3.646
2	1.17	952.5	24.00	3.629
3	1.18	958.2	24.36	3.480
4	1.21	943.0	23.63	3.301
5	1.20	950.4	24.00	3.450

	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Tensile strain at Break (Standard) (%)
1	23.042	5.362
2	22.188	7.178
3	5.779	6.280
4	22.027	6.334
5	22.618	5.917

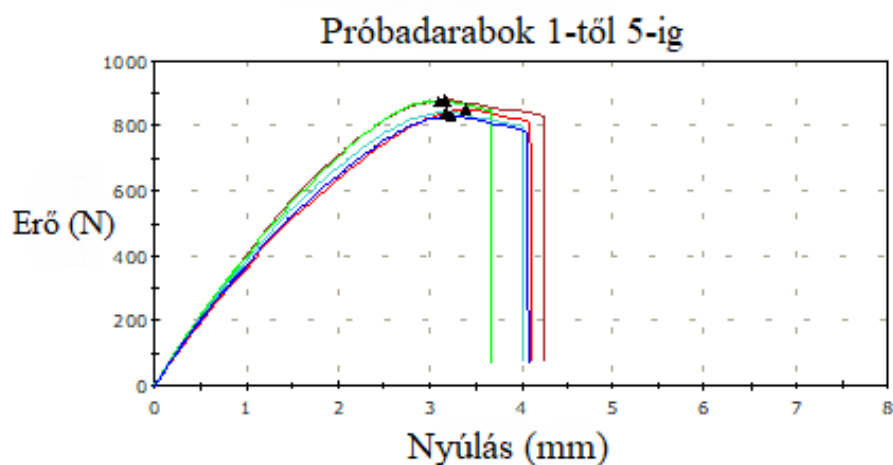
2. táblázat: Első próbatest szakító értékei [saját forrás]

A 2.táblázat oszlopaiban haladva balról jobbra megfigyelhető a rugalmassági modulusz értéke és a hozzá tartozó erő, majd a szakító szilárdság és hozzá tartozó nyúlási érték, legvégül pedig láthatjuk a szakadási nyúlás értékeit. Ennél a beállításnál átlagosan 953N erőt és 5%-os szakadási nyúlást mértünk a próbadarabokon.

Jól kivehető a kis mértékű szórás az mért értékek között.

Rugalmassági moduluszhoz tartozó erő	Szakító szilárdsághoz tartozó nyúlás	Szakadási nyúlás
21,5N	0,34%	1.81%

Az 3. táblázatban láthatóak a 90°-os elrendezésű nyomtatás szakítóvizsgálatának értékei.



	Modulus (Young's Tensile stress 0.05 % - 0.25 %) (GPa)	Load at Tensile Strength (N)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)	Tensile strain at Tensile Strength (%)
1	1.12	848.6	21.38	3.393
2	1.15	879.5	22.22	3.162
3	1.17	878.0	22.12	3.100
4	1.10	841.7	21.28	3.183
5	1.08	831.4	20.94	3.228

	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Tensile strain at Break (Standard) (%)
1	20.360	4.093
2	20.981	4.229
3	21.264	3.667
4	13.392	4.016
5	19.644	4.061

3. táblázat: Második próbatest szakító értékei [saját forrás]

Az értékek alapján jól látható a két beállítás közti jelentős különbség a rugalmassági moduluszhoz tartozó erő és a szakadási nyúlás oszlopában. Ennél a tesztnél a próbadarabunkon átlagosan 855N erőt és 4%-os szakadási nyúlást figyelhattunk meg.

Rugalmassági moduluszhoz tartozó erő	Szakító szilárdsághoz tartozó nyúlás	Szakadási nyúlás
48,1N	0,29%	0,56%

Az értékek alapján megfigyelhető, hogy a 90°-os elrendezésű nyomtatás során átlagosan 100N-nal, míg a szakadási nyúlásnál 1% mértünk kevesebbet.

4.5 Ütő vizsgálat

A következő tesztben a legyártott próbadarabokat ütés vizsgálatnak tettük ki. A vizsgálatot szintén az Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszékén végeztük a CEAST 6545/000-ás gépén. A vizsgálat során a gép szabadlengése $1,2[\text{kJ/m}^2]$ volt.

A vizsgálat értékei a 4.táblázatban megfigyelhetők.

Nyomtatási beállítás	Eredmény	Nyomtatási beállítás	Eredmény
45°-os elrendezés	$[\text{kJ/m}^2]$	90°-os elrendezés	$[\text{kJ/m}^2]$
1. próbadarab	8,4	1. próbadarab	7,5
2. próbadarab	7,8	2. próbadarab	6,8
3. próbadarab	8,1	3. próbadarab	6,9
4. próbadarab	6,9	4. próbadarab	7,8
5. próbadarab	8,4	5. próbadarab	7,5

4. táblázat: Ütés vizsgálat értékei [saját forrás]

Az adatokból kiolvasható, hogy a 45°-os elrendezéssel készült próbadarabok esetében átlagosan $7,92[\text{kJ/m}^2]$ addig a 90°-os beállítással $7,3[\text{kJ/m}^2]$ értékeket mértünk.

4.6 Mérés tapasztalatainak összefoglalása

Összességében a szakító és ütő vizsgálatok mérési eredményeiből az állapítható meg, hogy az alkalmazott beállítások, 45°-os és 90°-os elrendezésű nyomtatások közül, 45°-os beállítással készült nyomtatás magasabb mechanikai tulajdonsággal rendelkezik mindkét vizsgálat esetében. Míg a szakítóvizsgálatban átlagosan 100N-al nagyobb erőt és 1% nagyobb szakadási nyúlást mértünk, addig az ütő tesztben is ez a beállítás bizonyult jobbnak átlagosan $0,6[\text{kJ/m}^2]$ -el. Valószínűsíthetőleg a 45°-os elrendezésű szálak nagyobb részben tudják felvenni a próbatestre hosszirányba és az arra merőleges erőket, míg a 90°-os szálak mind a húzó és az ütő igénybevételek esetében hamarabb elszakadnak egymástól.

Összegzés

A komplex csillagmotorok megalkotása óta már eltelt közel 100 év. Az idő múlásával pedig rohamosan fejlődött a technika is. Jelenleg a 4. ipari forradalom zajlik, aminek keretein belül extrém sebességgel fejlődik körülöttünk az ipar, olyan rendszerek jönnek létre, melyek a folyamatok digitalizálásával megkönnyítik azok optimalizálását, és a hatékonyabb, versenyképesebb termelést. Számunkra, a jövő mérnökeinek, kulcsfontosságú napra késznek lennünk az új technológiákkal és kötelességünk elsajátítani azokat.

A CAD rendszerek folyamatos fejlődésével a tervezési folyamatok nagyban felgyorsulnak, használatuk eredményeként a megtervezett alkatrészekről pontosabb és átfogóbb képet kaphatunk. Számos iparág-specifikus lehetőségekkel rendelkeznek, hogy megfeleljenek a vállalatok igényeinek. A hosszútávú és sikeres tervezés megvalósításához használatuk mára elkerülhetetlen lett.

A 3D nyomtatás rohamos elterjedése alapjaiban változtatja meg a prototípus gyártásról alkotott képet az iparban. Alkalmazásával olyan modellek készíthetők, melyek más technológiákkal rendkívül költségesek és időigényesek lennének. Ezt a lehetőséget felismerve a vállalatok nagy többsége döntött a technológia használata mellett. Az additív gyártástechnológia egyre nagyobb szerepet kap melynek részeként a 3D nyomtatás mára szinte kihagyhatatlan eleme lett a tervezési és gyártási folyamatoknak.

Irodalomjegyzék

1. <https://nuclearcompanion.com/data/wright-r-3350-duplex-cyclone-technical-specification/>
2. <https://www.wmeglobal.com/how-people-worked-before-autocad/>
3. [https://www.cnc.hu/2020/07/muhelyrajz-generalas-solid-edge-osszeallitasbol/\(letöltés ideje\)](https://www.cnc.hu/2020/07/muhelyrajz-generalas-solid-edge-osszeallitasbol/(letöltés ideje))
4. <https://www.metals-hub.com/blog/eitrawmaterials-3dprintingproject/>
5. <https://www.assemblymag.com/articles/94614-how-fords-willow-run-assembly-plant-helped-win-world-war-ii>
6. <https://www.technipages.com/3d-printing-basics-heat-creep>
7. <https://orballoprinting.com/es/home/87-kit-de-extrusion-heatcore-ddg.html>
8. <https://top3dshop.ru/wiki/3d-print-main-problems-and-solutions.html>
9. <https://3dprinterly.com/how-to-3d-print-support-structures-properly/>
10. <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/195992/wright-r-3350-23-duplex-cyclone/>
11. <http://www.aviation-history.com/engines/r3350.htm>
12. <https://amt.sze.hu/content/index/id/17492>
13. <https://autoblink.hu/csillagmotor-milyen-tipusu-motor/>
14. <https://tangens.hu/cad-szoftver-mi-koze-a-kanadai-dollar-nak-a-mernoki-tervezeshez/>
15. Végeelem módszerek írta Dr. Tamás Péter; Bojtos Attila; Décsei-Paróczy Annamária; Dr. Fekete Róbert Tamás; 2014; 234. oldal; ISBN 978-963-313-145-9