

GENERATÍV TERVEZÉS KOMBINÁLÁSA 3D NYOMTATÁSSAL

Tóth Balázs^a, Andó Mátyás^{b*}

^a ELTE, Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet, Duális gépészmérnöki BSc, 4. évf.

^b ELTE, Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi docens

ABSZTRAKT A korszerű tervezési módszerekkel bizonyítottan csökkenthető az alkatrész tömege, amely rendkívül fontos egy gyorsan mozgó gép esetében. Egy egyszerű mechanikával rendelkező CNC marógépet megvizsgálva és egy alkatrészét kiválasztva végeztünk el különböző szoftveres modelloptimalizálási módszereket. Igazoltuk, hogy az új gyártástechnológiák alkalmazása esetén (3D-s nyomtatás - FDM) a gyártási költségek csökkenthetők, hiszen mind a szükséges alapanyag, mind pedig a megmunkálási idő drasztikusan csökkent. Megállapítottuk, hogy a piacon jelenleg elérhető topológiai optimalizálásra alkalmas szoftverekkel is rendkívüli előrehaladást lehet elérni egy meglévő konstrukció továbbfejlesztése és optimalizálása esetén. A kialakított munkadarab jobb mechanikai tulajdonságokkal és tömeg-terhelés aránnyal bír, mint amit hagyományos tervezői módszerekkel elérhetnénk.

Kulcsszavak: 3D nyomtatás, FDM, VEM, generatív tervezés, topológiai optimalizálás

1. Bevezetés

A XXI. századról elmondható, hogy az egyik legfőbb hajtóeleme a számítógépes rendszerek robanásszerű fejlődése. A számítógépek fejlődésével egyre inkább elérhetővé vált a háromdimenziós tervező- és gyártó szoftverek használata. Ezek segítségével vizuálisabbá tehetjük a modelljeinket és egy szakmában ismeretlen külső szemlélőnek is érthetővé tehetjük.

Az egyre fejlődő gyártástechnológiák által lehetőség nyílik a mérnöki tervezési szemlélet változtatására is, hiszen olyan dolgok valósíthatók meg, amelyek eddig elképzelhetetlenek voltak. A 3D nyomtatás elterjedésével és folyamatos fejlődésével sok új lehetőség adódik a szerszám- és termék-konstrukciók létrehozásakor. Új nyomtatási technológiákkal és egyre több alapanyagként szolgáló műanyag, fém, kompozit anyagok felhasználásával megközelíthetjük, vagy akár túl is léphetjük a hagyományos forgácsolással, vagy öntéssel készült darabok fizikai és mechanikai tulajdonságait. Továbbá lehetségessé vált, hogy a tervezést és a termék formáját ne korlátozzák a hagyományos gyártástechnológiák. Ráadásul mindez elfogadható költségkeretek között is megvalósítható.

Ezeknek a lehetőségeknek a kiaknázása a megszokott tervezési módszerekkel és a jelenleg elterjedt CAD szoftverekkel nem lehetséges, legalábbis aránytalanul sok időt vesz igénybe. Azonban az iparban és a közéletben is egyre inkább ismertté válik a mesterséges intelligencia fogalma (AI). Egy probléma megoldása, a megfelelő bemeneti feltételek definiálása mellett egy AI rendszer számára viszonylag gyors. Felismerték, hogy ez a tervezési folyamatok során is hasznos, hiszen ezidáig leginkább csak topológiai optimalizálások álltak a mérnökök segítségére, ha egy tervezett tárgy esetében a legkisebb súly elérése volt a cél. A generatív tervezés létrejöttével ez a folyamat teljes mértékben megváltozott. A végeredmény kívánt fix pontjait, a gyártástechnológiát, valamint a szükséges erőhatásoknak való ellenállást meghatározva a szoftver már kiszámolja az általa optimálisabbnak vélt összetett alakot,

melyekből a mérnököknek már csak ki kell választani a számunkra leginkább megfelelőt. Már most is több nagyvállalat kutatja és keresi az alkalmazási lehetőségeit a generatív tervezésnek, kombinálva a 3D nyomtatással.

Az új technológiák használata mind tervezési, mind gyártástechnológia szinten nem feltétlenül csökkentik a jelenleg alkalmazott technológiák fontosságát, hanem inkább olyan problémákra is választ kínálnak, amit eddig nem tudott az emberiség költséghatékonyan megoldani. A cikkben szemléltetjük, hogy mekkora változást okoznak ezek az új módszerek. Kitérünk arra is, hogy milyen irányban fejlődhetnek még tovább, valamint milyen akadályokba ütközhetünk a használatuk során. Bemutatjuk a vizsgált optimalizálási módszereket, melyek használata során az additív gyártás adta lehetőségeket kívántuk kihasználni.

2. Anyag és módszer

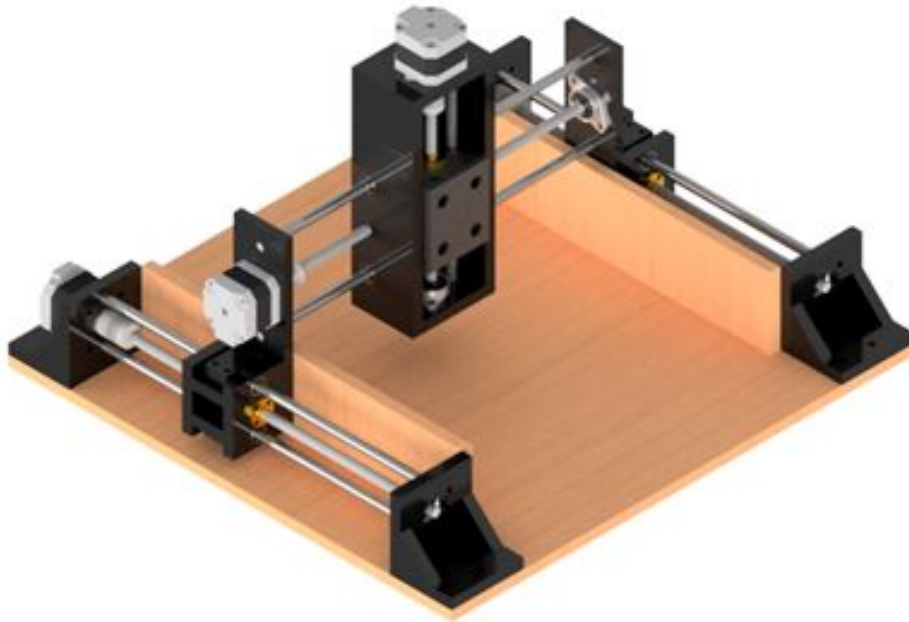
A szimuláció, valamint a nyomtatás során egyaránt ABS (Akrilnitril-butadién-sztirol) anyagot használtam fel. Ez az alapanyag jó ütésállósággal, szilárdsággal és hőállósággal rendelkezik a műanyagok terén. A hőre lágyuló amorf polimerek közé tartozik. A nyomtatási ciklus alatt rendkívül érzékeny a külső környezeti légáramlatokra és hőmérséklet ingadozásokra. A nyomtatás során 245 °C-os hőmérsékletre kellett hevíteni a dűznyt, valamint 100 °C-on tartani az asztal hőmérsékletét.

A prototípusgyártásra használt eszköz egy Ender 3 típusú Creality által gyártott belépőszintű FDM nyomtató volt. Az előkísérletek alapján 60 mm/s-os nyomtatási sebesség, valamint 0,2 mm-es rétegvastagság optimális, hogy megfelelő alakot és felületi minőséget kapjunk. A munkánk során a Siemens által fejlesztett Solid Edge ST10-es verziójának generatív tervezésre alkalmas modulját, valamint az Autodesk Fusion 360 2.0.7036-os verziójának topológiai optimalizáló egységét használtuk. A végelem szimulációk elvégzésére az ANSYS 2019 R3-as verzióját választottuk. A VEM szimulációk elvégzése során lineáris anyagmodellt alkalmaztunk, ahol az ABS anyagra jellemző sűrűség, rugalmassági modulus és Poisson tényező megadásával definiáltuk a paramétereket. A 3D nyomtatáshoz szükséges G-CODE generálására a CURA 4.0 szeletelő szoftvert alkalmaztuk.

3. Célgép 3D nyomtatott alkatrészekkel

Általános, hogy a célgépek tervezésekor, a tervezési folyamat során a hagyományos tervezési elveket követve alakítják ki a szükséges alkatrészek dizájnját. Így sokszor túlméretezett modellek jöttek létre, melyek egy gyorsan mozgó berendezés során nem túl előnyösek. A sok anyagot tartalmazó nehezebb alkatrészek nemcsak a nem kívánatos tehetetlenségi erők szempontjából előnytelenek, hanem a 3D nyomtatott alkatrészek anyagszükségletét is nagymértékben indokolatlanul növelik. Az optimalizálási folyamatot egy konkrét alkatrészen mutatjuk be. A tervezési szempontok pontos ismerete miatt egy olyan célgépet választottunk, melynek átlátható a szerkezeti felépítése és eredetileg is 3D-s nyomtatással gyártották volna le az alkatrészeit. Az 1. ábrán látható a kis teljesítményű CNC marógép felépítése. Ennek a marógépnek az x -tengelyt tartó konzolja tipikusan olyan alkatrész, melyet a befoglaló méretek alapján terveznek meg. Azonban, ha figyelembe vesszük, hogy a gyártástechnológia nem korlátozza az alakot, akkor valójában az optimális alkatrész minimális tömeg mellett biztosítja a megfelelő merevséget a gépnek, vagyis az alkatrész deformációjának kell minimálisnak lennie. Emellett a tehetetlenségi erők csökkentése számos előnnyel jár, például kisebbek lesznek a káros lengések, nagyobb gyorsulások érhetőek el.

Az említett alkatrész lineáris csapágyak által kerül megvezetésre. Ezen két furat hengeres palástfelületeit tekintettük fixnek és definiáltuk kényszerként. Az alkatrészeire terhelésként hat az x -tengely, valamint a főorsó tömegének a fele (mivel a két oldal közel azonos terheléseket vesz fel), a két 8 mm átmérőjű tengelyen keresztül. Az egyik oldalon ehhez hozzáadódik még a léptetőmotor súlya.



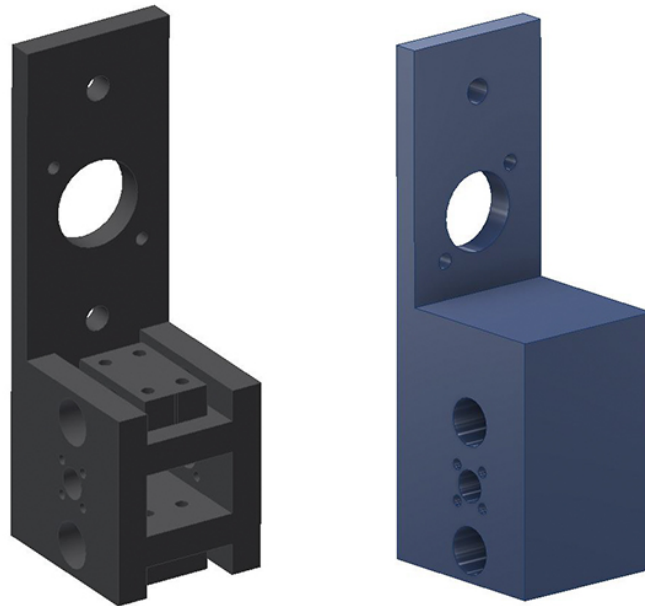
1. ábra: Kis teljesítményű 3-tengelyes CNC marógép

4. Az optimalizálás folyamata

Többfajta optimalizálási módszer létezik, melyekkel meglévő modelleket tehetünk jobbá és hatékonyabbá. Ezek közül emeltük ki a topológiai optimalizálást és a generatív tervezést, hiszen ezek használata van elterjedőben a korszerű tervezési folyamatokban. A hétköznapi életben ezek jelentése meglehetősen összemosódott, pedig a két módszer közel sem egyezik. A topológia optimalizálása egyetlen megoldásra konvergál, csak funkcionális célok, korlátozások és terhelések alapján. A generatív tervezés egyidejűleg több irányból közelíti meg az adott problémát, hogy a lehető legjobb megoldásokat érjük el. Ez a módszer lényegében átalakítja a terméktervezés következő generációját. Amellett, hogy a generatív tervezés teljesen új megoldásokat hoz létre, abban is eltér a többi technológiától, hogy számításba veszi a gyárthatósági szempontokat.

Előkészítésként leegyszerűsítettük a modelleket és az új szemlélet szerint egy teljesen letisztult, csak a tényleg szükséges furatokat és csatlakozó részeket alakítottuk ki rajtuk (2. ábra), a további konstrukciós megoldások megvalósítását teljes mértékben a szoftverre hagyva. A szoftverekben meg kellett határoznunk a határoló geometriákat, ezért a bemeneti modelleket úgy alakítottuk ki, hogy a felhasználható területeken tömör anyagot definiáltunk.

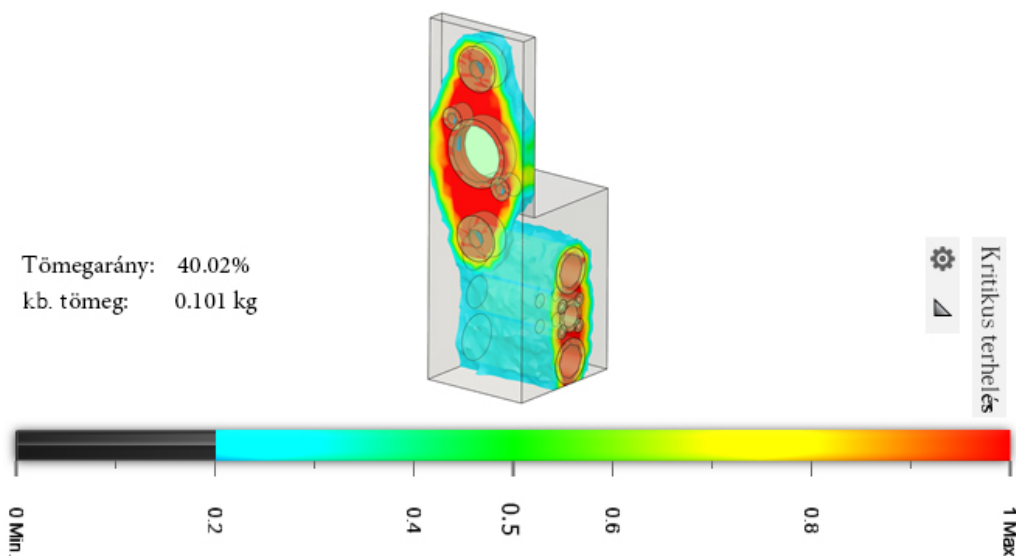
Topológiai optimalizáláshoz a Fusion 360-ban található terheléses szimulációt használtuk (shape optimization), melynek végeredményéből kiindulva elvégezhető a topológiai optimalizálás a modellen. A vizsgálat létrehozásának első lépéseként definiáltuk a használni kívánt modellt és a rendelkezésre álló térfogatot. A vizsgálat során csak az elemek tömegéből adódó z-irányú terhelésekkel számoltunk. Az y-tengely mentén mozgó teljes szerkezet össztömege nagyságrendileg 5 kg. Közel szimmetrikus terhelést feltételezve a két oldalon, az y-tengely mentén mozgó két konzol egyenlő arányban veszi fel a terheléseket. Ezért ezt oldalanként a két 8 mm átmérőjű furatra merőlegesen z-irányban definiáltunk 12 N nagyságú statikus terhelést. A kényszerek, valamint a becsült igénybevételek megadása után a szoftver elvégezte a számításokat az alkatrész becsült tömegcsökkentés mellett fellépő feszültségeire és a kialakult kritikus terhelési mezőkre vonatkozóan, ez látható a 3. ábrán. Az állítható skálán 0-tól 1-ig a tömegcsökkentés mértékének változtatásával láthatjuk a kritikus terheléseket. Ezt az eredményt elmentettük és ez alapján manuálisan eltávolítottuk az eredeti modelltől a terheletlen részeket. Az így



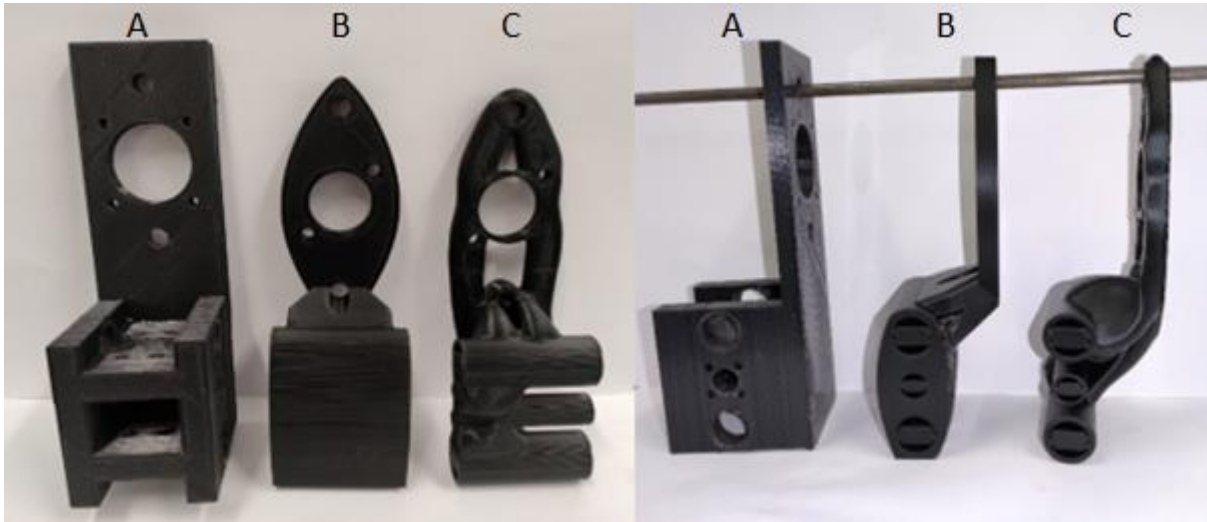
2. ábra: Az alkatrész egyszerűsítése

elkészült modellel nagymértékű térfogatcsökkenést értünk el. Generatív tervezéshez a Solid Edge-ben minden tervezési folyamat elején szükséges egy vizsgálatot létrehozni. Egy modellhez egy fájlban belül több vizsgálatot is létrehozhatunk, ezáltal alávétve különböző terheléseknek. Módosíthatjuk a megadott anyagot, valamint a generatív tervezési paramétereket is, hogy ezáltal több lehetséges megoldást hasonlíthassunk össze.

Itt is szükséges kijelölni az optimalizálni kívánt testet. Következő lépésként meghatároztuk azokat a régiókat, alakajátosságokat, melyek fontosak a kész modell esetében, ezek az úgynevezett megmaradó régiók. A terhelések és rögzítési pontok után a nyomtató által használt alapanyagot (ABS) állítottuk be. A vizsgálat paramétereit változtathatjuk, így az elérni kívánt tömegcsökkenést egy adott biztonsági tényező mellett értelmezi a szoftver. Ezen paraméter használatával több lehetséges megoldást is létrehozhatunk, melyekből kiválaszthatjuk a számunkra optimálisabbat.



3. ábra: Az eredeti modellhez választott tömegcsökkentés során a kritikus terhelések



4. ábra: 3D-s nyomtatással készült konzolok a) hagyományos tervezési módszerrel; b) topológiai optimalizációval; c) generatív tervezéssel

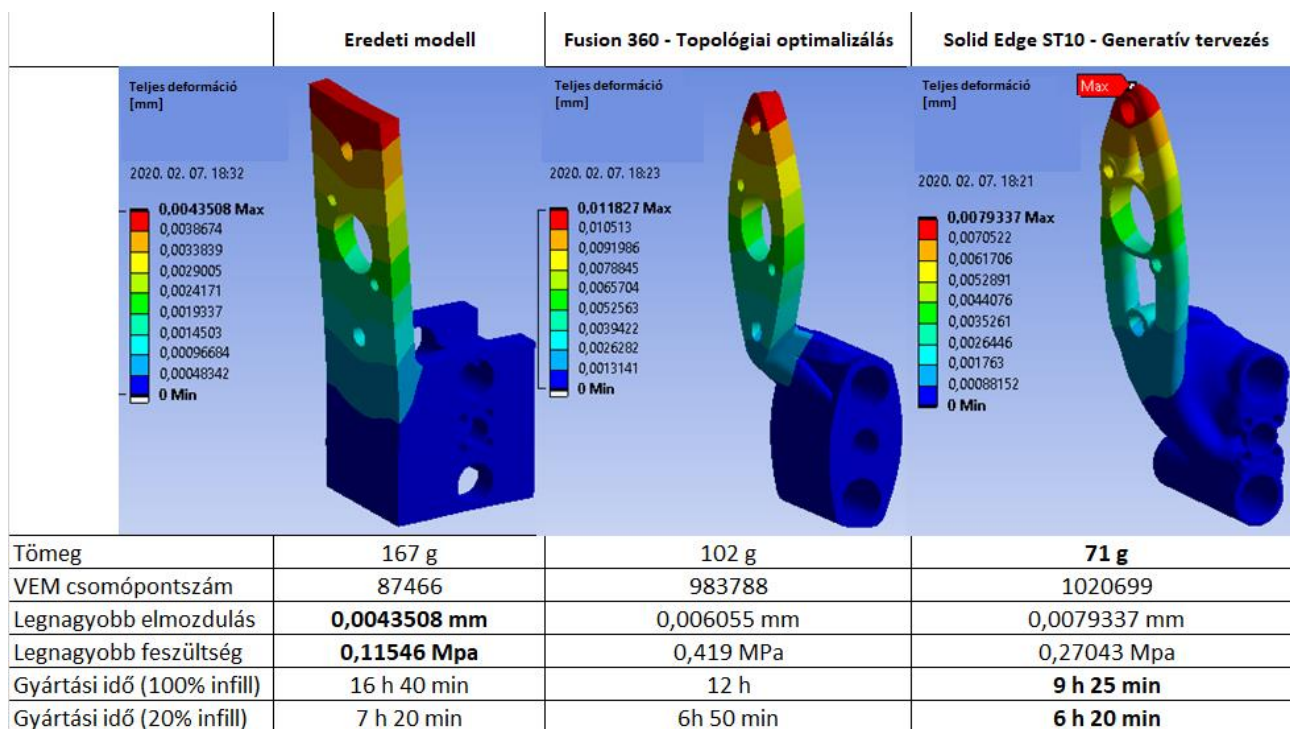
A vizsgálat minősége nagymértékben befolyásolja a vizsgálatához szükséges időtartamot. Magas vizsgálati minőség mellett pontosabb és részletesebb lesz a folyamat, de órákig, sőt bizonyos esetekben, komplex alkatrészeknél akár napokig is eltarthat, így ennek megválasztása során is érdemes az optimumra törekedni.

A számítások elvégzése után létrejött a modell, melyet a Solid Edge egy másik modulján belül még optimalizálni kell, hogy ne lehessenek benne alámetszett, vagy ütköző alakelemek, hiszen ezek a végeelem szimuláció eredményét hátrányosan befolyásolhatják. A létrehozott alkatrészek a 4. ábrán láthatóak.

5. Eredmények összehasonlítása

Az összehasonlíthatóság érdekében egy szoftverben vizsgáltuk mind a három CAD modellt. A modelleken statikus mechanikai vizsgálatot végeztünk, mindhárom esetben ugyanazon terhelési paraméterek és kényszerek megadásával. Fontos megemlíteni, hogy minden egyes gép esetében a pontosságot alapvetően nem a gép alkatrészeiben fellépő feszültség, hanem az alkatrészek terhelés közbeni deformációja adja, ezért erre fontos hangsúlyt fektetni, hiszen jelen esetben egy marógép alkatrészéről volt szó.

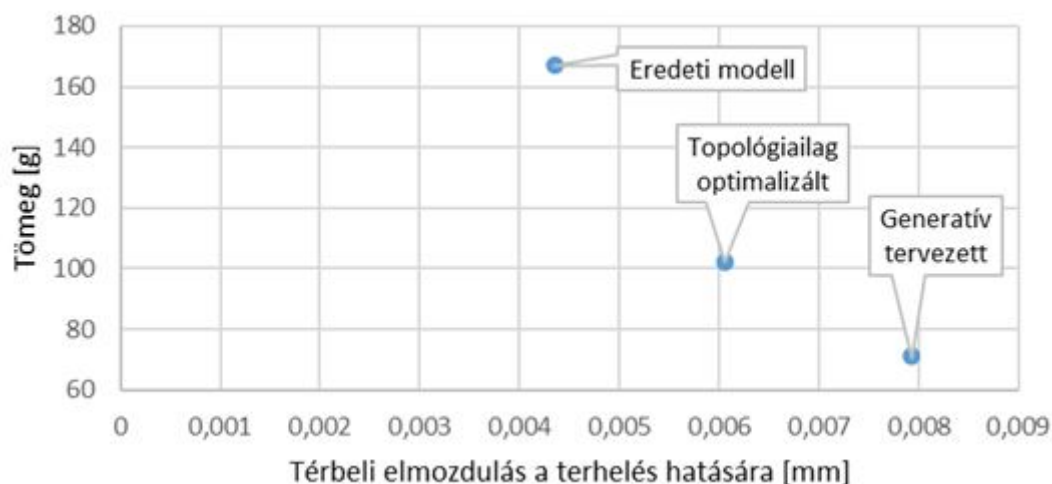
A gyártási eljárás során fontos szempont lehet a gyártási idő, amely FDM nyomtatás esetén nagyban függ a nyomtatni kívánt modell komplexitásától és térfogatától. Elvégeztük szeletelőszoftverben a gyártási idők kiszámítását is, mely hasonló fontosságú maraméter mint a VEM szimulációk eredménye, ezért ezeket is itt szerepeltetjük (5. ábra). A VEM szimulációk során tetraédes hálózasi módszert alkalmaztunk. A modellek elem- és csomópontszáma a különböző geometria, valamint az adaptív elemméret alkalmazása miatt eltér, ezeket szintén feltüntettük a táblázatban. Az ábrán az adott tulajdonság (sor) legjobb eredményeit kiemeltük. Az alkatrészeken a teljes térbeli deformáció mértékét jelzik a színek. Leolvasható, hogy milyen mértékű fejlődés érhető el az alkatrész tömegcsökkentését valamint gyártási idejét tekintve. Ugyan a gyártási idő egyedi alkatrészek szempontjából nem mindig kiemelt költség tényező, azonban már látszik, hogy a 3D-s nyomtatás a kis sorozatok gyártásánál is megjelent, így egyre lényegesebb szemponttá válik a gyártástechnológia ezen területén is. A hagyományosan tervezett alkatrész gyártási idejének majdnem csak a fele szükséges a generatív tervezett modell magalkotásához. 7 óra 15 perccel rövidebb gyártási idő gyakorlatilag egy műszak megspórolását jelenti.



5. ábra: Az eredmények összehasonlítása, a teljes deformációt megjelenítve

Megállapítható, hogy az egyenértékű feszültségek értéke kismértékben növekedett, de ez nem veszélyezteti az alkatrész stabilitását, illetve nem valószínűsíthető a kifradási probléma sem. Megjegyezzük, hogy ennél az alkatrésznél a kúszás ugyan felléphet, azonban a marógép pillanatnyi pontosságát ez nem befolyásolja, hiszen a szerkezet szimmetrikusnak tekinthető, vagyis a másik oldalon lévő konzol kúszása is hasonló lesz. Belátható, hogy a tömeg mellett a terhelés hatására fellépő deformáció határozza meg elsődlegesen a gép pontosságát. Ezt a két tulajdonságot az alkatrészek a 6. ábra mutatja be.

Az ábra alapján megállapítható, hogy a tömeg csökkenése mellett nő a térbeli elmozdulás mértéke. Ez alapján látjuk, hogy nem csökkenthetjük egy bizonyos érték alá a tömeget, hiszen az már a



6. ábra: Térbeli elmozdulás változása a tömeg függvényében

gép pontosságának rovására menne – például 0,01 mm maximális térbeli elmozdulás. Így tehát nagyon fontos tényezőként kell kezelni a generatív tervezési folyamatok során a tömeg csökkentésének mértékét, mert ez befolyásolja a végső munkadarabunk térbeli elmozdulásának nagyságát.

Egy szerszám gép pontosságát nem csak az alkatrészeinek deformációja korlátozza. Az alkatrészek között hézagok, illesztések minősége és ezek között fellépő játék nagymértékben befolyásolja a pontosságot. A hirtelen és rendkívül pontosan történő megállások során nagymértékű tehetetlenségi erők léphetnek fel, de ez elkerülhetetlen egy CNC marógép esetén. Ezek az erők a lassulás mértékének és a tömegnek a szorzatával egyenlők. Így belátható, hogy nagyobb tömeg esetén a fellépő erők is növekednek [4].

$$F = m \cdot a. \quad (1)$$

Az y -tengely mentén mozgatott alkatrészekre ható tehetetlenségi erők számításakor az előzőekben bemutatott 3 modellel változtatva végeztük el a számításokat. A tömeg a vizsgált alkatrészekből, az x tengely és a főorsó tömegéből adódik. A szoftveres korlátozás által megadott maximum 100 mm/s-os sebességről történő hirtelen megállásokat vizsgáltuk, az alábbi képlet alapján:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s}, \quad (2)$$

ahol $v_2 = 0$ m/s. A számításokat 1 mm, 0,5 mm és 0,1 mm belüli megállásra végeztük el és az 1. táblázat tartalmazza.

Leolvasható, hogy 0,1 mm megállás esetén 246,7 N erő terheli az eredeti alkatrészt. A korábban elvégzett konzol optimalizációjának köszönhetően 240,2 N valamint 237,1 Newtonra csökkenthető ez az erő. Vagyis egyetlen alkatrész áttervezése a fellépő tehetetlenségi erőt is csökkentheti 3-4%-kal. A rendszerben használt alkatrészek optimalizálásával ez tovább csökkenthető, de vannak olyan elemek (pl. vezetékek, csapágyak, tengelyek) melyek tömege nem változtatható.

A tehetetlenségi erők korlátozásának másik eszköze, hogy a vezérlőben megadható a legnagyobb gyorsulás/lassulás értéke. Ahhoz, hogy a gép kímélése valamint a megfelelő pontosság érdekében helyes értéket adjunk meg a konstrukciós megoldásokat és a szoftveres beállításokat egymáshoz kell illeszteni, optimalizálni.

6. Összefoglalás

A korszerű tervezési módszerekkel bizonyítottan csökkenthető az alkatrész tömege, amely rendkívül fontos egy gyorsan mozgó gép esetében. Igazoltuk, hogy az új gyártástechnológiák alkalmazása esetén (3D-s nyomtatás) a gyártási költségek csökkenthetők, hiszen mind a szükséges alapanyag, mind pedig a megmunkálási idő drasztikusan csökkent. Az ANSYS szoftverrel meghatározható adott terhelés mellett az alkatrészek deformációja. Megállapítottuk, hogy a piacon jelenleg elérhető topológiai

1. táblázat: Tömegcsökkenés hatása a tehetetlenségi erőkre

Lassulás közben megtett út [mm]	Lassulás [m/s ²]	Tehetlenségi erő [N] eredeti modell	Tehetlenségi erő [N] Modell - topológiai optimalizációval	Tehetlenségi erő [N] Modell - generatív tervezéssel
1	5	24,6	24,02	23,71
0,5	10	49,34	48,04	47,42
0,1	50	246,7	240,2	237,1

optimalizálásra alkalmas szoftverekkel is rendkívüli előrehaladást lehet elérni egy meglévő konstrukció továbbfejlesztése és optimalizálása esetén. Az igazi áttörést azonban a generatív tervezői szoftverek hozzák el a tervezési folyamatok során. A sok megtakarított munkaóra által nagyobb összegeket spórolhatunk meg ezen technológia alkalmazása mellett, továbbá a kialakított munkadarab jobb mechanikai tulajdonságokkal és tömeg-terhelés aránnyal bírhat, mint amit hagyományos tervezői módszerekkel elérhetnénk. Ez a fajta optimalizálás kihat a működési paraméterekre is, így például nagyobb lassulások engedélyezhetőek.

7. Köszönetnyilvánítás

Az ED_18-1-2019-0030 szerződésszámú projekt (Alkalmazásiterület-specifikus nagy megbízhatóságú informatikai megoldások tématerület) a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a Tématerületi kiválósági program támogatásával valósult meg.

8. Irodalomjegyzék

- [1] Autodesk, *Generative Design*, 2019. ([weboldal](#))
- [2] Siemens, *Generative Design*, 2019. ([weboldal](#))
- [3] Autodesk, *Topology optimization*, 2019. ([weboldal](#))
- [4] Andó M., *CNC gépek felépítése, jegyzet*, ELTE, Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet, 2018.