

Hegedűs Ernő,<sup>1</sup> Gávay György,<sup>2</sup> Sebők István,<sup>3</sup> Tenczel Martin Bence<sup>4</sup>

# Topológiai optimalizálás, generatív tervezés és a 3D-nyomtatás<sup>5</sup>

## Az additív gyártástechnológia ipari alkalmazhatóságának vizsgálata

### Topological Optimisation, Generative Design and 3D Printing Investigating the Industrial Applicability of Additive Manufacturing Technology

*Az additív gyártástechnológia ipari alkalmazhatóságát jelentős mértékben befolyásolják az olyan innovatív tervezési módszerek, mint a topológiai optimalizálás és a generatív tervezés. A cikk e módszerek, illetve az ADAM<sup>6</sup>-technológiájú Markforged Metal X 3D-fémnyomtató képességeinek tükrében vizsgálja a konstrukciós lehetőségeket és korlátokat, helyenként kitekintve a gépjármű- és a repülőipar konkrét alkalmazási példáira is.*

**Kulcsszavak:** topológiai optimalizálás, generatív tervezés, 3D-nyomtatás, Markforged Metal X fémnyomtató, ADAM-fémnyomtatás

<sup>1</sup> Adjunktus, Nemzeti Közsolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék, e-mail: [Hegedus.Erno@uni-nke.hu](mailto:Hegedus.Erno@uni-nke.hu)

<sup>2</sup> Adjunktus, Nemzeti Közsolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék, e-mail: [Gavay.Gyorgy@uni-nke.hu](mailto:Gavay.Gyorgy@uni-nke.hu)

<sup>3</sup> Tanársegéd, Nemzeti Közsolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék, e-mail: [Sebok.Istvan@uni-nke.hu](mailto:Sebok.Istvan@uni-nke.hu)

<sup>4</sup> Tisztjelölt, Magyar Honvédség Ludovika Zászlóalj, e-mail: [btenczel0@gmail.com](mailto:btenczel0@gmail.com)

<sup>5</sup> A cikk a 2022-2.1.1-NL-2022-00012 azonosítószámú Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratóriuma projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2022-2.1.1-NL Nemzeti Laboratóriumok Létrehozása, Komplex Fejlesztése pályázati program finanszírozásában valósul meg.

<sup>6</sup> Atomic Diffusion Additive Manufacturing, ADAM.

*Innovative design methods such as topological optimisation and generative design have a significant impact on the industrial applicability of additive manufacturing. This paper explores the design opportunities and limitations in the light of these methods and the capabilities of the Markforged Metal X 3D metal printer with ADAM technology, with some examples of specific applications in the automotive and aerospace industries.*

**Keywords:** *topological optimisation, generative design, 3D printing, Markforged Metal X metal printer, ADAM metal printing*

## Bevezetés

A topológiai optimalizálás a 3D-nyomtatás gyártástechnológiai lehetőségeihez kötődően elterjedt gépészeti tervezési eszköz, amelynek alkalmazásával olyan térrácsszerű tartók és gépelemek hozhatók létre a 3D-modellezés során, amelyek a hagyományos gyártástechnológiával előállított tömör alkatrészekkel közel azonos szilárdság mellett kisebb szerkezeti tömegűek. A Markforged szakértői szerint „A topológia optimalizálásával anyag takarítható meg – ugyanolyan szilárdsággal.”<sup>7</sup> Ez a lehetőség jelentős hatást gyakorol például a járműiparra – legyen szó akár hagyományos vagy elektromos gépjárművekről, vagy akár légi járművekről –, mivel „az energiahatékonyság egy fontos fogalom manapság a járműiparban. Az egyik legkézenfekvőbb megoldás az alkalmazott szerkezetek tömegének csökkentése, azonban ezt úgy kell megvalósítanunk, hogy a szerkezet szilárdsága és funkciója megmaradjon. A topológiai optimalizálás módszere pont ebben a helyzetben nyújt számunkra segítséget.”<sup>8</sup> A topológiai optimalizáció során első lépésben a mérnök megtervezi az alkatrészt, megadott terhelésekkel, kényszerekkel. A szoftver ezután topológiai optimalizált hálómódellet készít.



1. kép: A topológiai optimalizált 3D-nyomtatott alkatrész változatai: az első hagyományos gyártástechnológiai módszerekkel, a további, optimalizált változatok additív gyártástechnológiával készíthetők el

Forrás: <http://hu.insta3dp.com/info/what-is-topology-optimization-simply-explai-79279655.html>

<sup>7</sup> Markforged 3D Printers.

<sup>8</sup> PUSZTAI 2021: 85.

A Nemzeti Közszolgálati Egyetem (NKE) Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar (HHK) Hadi-technikai Tanszék kutatói már több publikációban is foglalkoztak a topológiai optimalizált gépelemek tervezésének és gyártásának kérdéseivel.<sup>9</sup>

A hagyományos tervezési módszerek és gyártástechnológiák gyakran korlátozzák a tervezők kreativitását és hatékonyságát. Adott feladatokra optimalizált alkatrészek esetén akár több tucat iterációra is szükség lehet, míg egy termék elkészül. A generatív tervezés ezt a hiányosságot pótolja, és rendkívüli mértékben felgyorsíthatja a fejlesztési, tervezési folyamatot. Egyúttal olyan hatékony eszközkészletet biztosít, amely a 3D-nyomatásban rejlő teljes potenciált is képes kiaknázni.

## A topológiai optimalizálás és az additív gyártástechnológia

A topológiai optimalizálás egy tervezési eljárás. Az optimalizált gépelem gyakorlati megvalósítása, legyártása azonban additív gyártástechnológia alkalmazását igényli. A topológiai optimalizálás a 3D-nyomatás alkalmazását feltételezi, mivel e folyamat során a tervezés eredménye gyakran rendkívül nagy hatékonyságú, de igen komplex forma (például: rácsszerkezet). Az ilyen összetett geometriák legyártása hagyományos módszerekkel bonyolult, lassú, rendkívül költséges, illetve adott esetben véges számú darabból összeillesztve is lehetetlen. Akár fröccsöntéssel, akár forgácsolással, a generatív tervezés során létrehozott topológiai optimalizált, nagy komplexitású geometriával rendelkező szerkezeteket, alkatrészeket létrehozni egyszerűen nem kifizetődő. Az olyan additív gyártási eljárás, mint a 3D-s nyomtatás jelenti a megoldást az ilyen komplex geometriák gyártásához.



2. kép: Topológiai optimalizált titántartó EOS<sup>10</sup> nyomtatóval előállítva

Forrás: [www.aeroexpo.online/prod/eos-gmbh-electro-optical-systems/product-169717-72644.html](http://www.aeroexpo.online/prod/eos-gmbh-electro-optical-systems/product-169717-72644.html)

<sup>9</sup> VÉGVÁRI–ZENTAY–HEGEDŰS 2022: 56; FICSOR–HEGEDŰS 2023: 38.

<sup>10</sup> Electro Optical Systems GmbH.

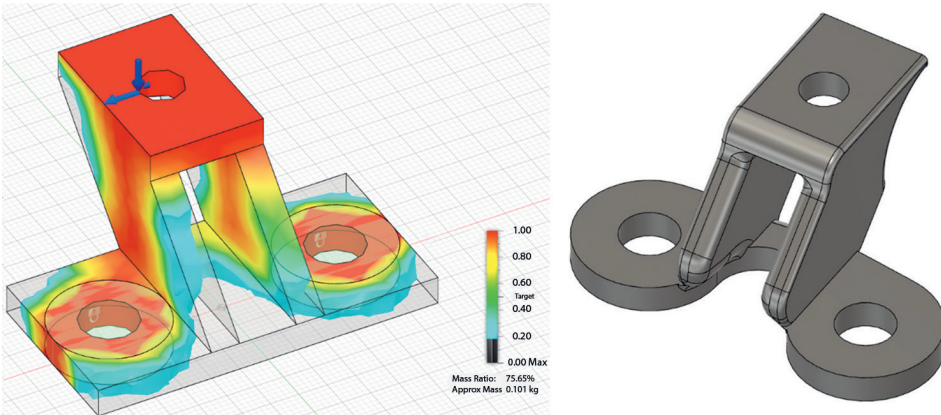
A topológiai optimalizálás egy gépelem optimalizálásának tervezési folyamata, amely általában a felhasznált alapanyag mennyiségének csökkentésével jár. A topológiaoportimalizálási módszerekből adódó összetett geometriák csak additív gyártási folyamattal állíthatók elő hatékonyan, mivel a hagyományos gyártástechnológiák nem tudják kihasználni az új eljárások által biztosított tervezési szabadságot, nem képesek a komplex geometriák előállítására. A 3D-nyomatás és a tervezői munkát megkönnyítő szoftverek együttes alkalmazásában rejlő lehetőségek jelentősek. Ugyanis a 3D-nyomatás lehetővé teszi optimálisabb formájú, ezáltal könnyebb és mindeközben azonos, vagy akár nagyobb szilárdságú alkatrészek tervezését. Alkalmazásával lehetségessé vált, hogy a termék formáját ne korlátozzák a hagyományos gyártástechnológiák.

## **Végelem-alapú topológiai-optimalizálási módszer feszültségelemzéssel, illetve fáradásellenállás-számítással, továbbá az Autodesk Fusion 360 3D-modellező szoftver és a topológiai optimalizálás**

A geometria és a számítások az additív gyártás folyamatának tervezési fázisában összefüggnek a tervezési validálással. A tervezési validálás során a geometria kulcsfontosságú szempont. Ennek oka, hogy az additív gyártási folyamatok lehetővé teszik komplex geometriák létrehozását, amelyek hagyományos gyártási módszerekkel nehezen, vagy egyáltalán nem valósíthatók meg. A geometria optimalizálása során a tervezők kihasználhatják az additív eljárások előnyeit – például a tömegcsökkentés lehetőségét, belső szerkezetek kialakítását és más speciális geometriai tulajdonságokat. A topológiai optimalizálás (végelem-analízis) és a fáradási ellenállás számításai is összefüggnek a tervezési validálással és a geometriával. Ezek a számítások lehetővé teszik a tervezők számára, hogy feszültségelemzést végezzenek az alkatrész tervezése során. A számítások révén meghatározható, hogy az adott geometria és anyag milyen terheléseket képes elviselni anélkül, hogy meghibásodna. Ez lehetővé teszi a túlterhelés elkerülését, és megmutatja, hogy az alkatrész melyik részeire esik a terhelés, ezzel lehetséges a súlycsökkentés. Fáradási ellenállás szimulációjával vizsgálható és biztosítható, hogy hogyan viselkednek az anyagok hosszabb ideig tartó terhelés esetén.

A tervezési módszereknek két különböző kategóriája különböztethető meg: a tervezőmérnök által vezérelt és a folyamatvezérelt tervezés. A folyamat által vezérelt forma a tervezőmérnök, az ember manuális részvételének minimalizálását helyezi előtérbe a tervezési folyamat felgyorsítása és hatékonyságának növelése érdekében. Ezzel szemben a tervező által vezérelt forma olyan tervezőmérnököket foglal magában, akik aktívan alakítják a folyamatot, és a gyártással kapcsolatos szakértelmet nyújtanak a drága szériaalkatrészek gyártásának érdekében. Mindkét megközelítésben alapvető fontosságú az additív gyártás gyárthatósági szempontjainak figyelembevétele, a teljesítmény javítása és az alkatrészenkénti költségek közötti kényes egyensúly fenntartása a nagyüzemi gyártás során. A folyamatvezérelt forma módszere a topológiai optimalizálás formájában kihasználja az additív gyártás előnyeit, komplexitási képességét az alkatrész teljesítményének növelése érdekében. A topológiai

optimalizálás elsősorban a tervezés megkönnyítésére és a modell tömegének csökkentésére használt technika. A tervező meghatároz egy tervezési teret, és a topológiai optimalizáló szoftver eltávolítja a tervezési tér minden olyan részét, amely nem járul hozzá a termék szerkezeti integritásához. A topológiai optimalizálás ezt úgy éri el, hogy a végelem-analízis segítségével a tervezetet diszkrét darabokra bontja, poligonokra, csúcokra és szélekre, amelyek hálót alkotnak, majd elemzi a hálóra ható erőket. Ennek a folyamatnak köszönhetően a felesleges anyagok eltávolításával organikus formák alakulnak ki.



3. kép: Tartókonzol feszültségvizsgálata megadott terhelések alapján, illetve a topológiai optimalizálással kikönnyített alkatrész a felesleges anyagok eltávolítását követően

Forrás: NKE HHK Haditechnikai Tanszék, a szerzők szerkesztése, Fusion 360

A topológiai optimalizáció során első lépésben a mérnök megtervezi az alkatrészt, megadott terhelésekkel, kényszerekkel.<sup>11</sup> A szoftver ezután topológiailag optimalizált hálómodellt készít. A topológiai optimalizálás képességével egyes CAD<sup>12</sup>-szoftverek rendszerint már eleve rendelkeznek, de sok esetben ezt a lehetőséget egy plusz szoftver vagy szoftvermodul által érhetjük csak el.

A véges elemes szimulációknál alkalmazott topológiai optimalizálás tulajdonképpen nem más, mint egy matematikai módszer, amely az adott peremfeltételek mellett ideális szerkezeti kialakítást tesz lehetővé. Peremfeltételek alatt azokat a terheléseket, megfogásokat és szimulációs korlátokat értjük, amiknek köszönhetően leírhatjuk a fizikai környezetet a szimulációs térben. A módszernek köszönhetően komplex formákat kaphatunk.

A topológia optimalizálásával kapcsolatos összes számítást speciális szoftveren keresztül futtatják, amely általában 3D FEA<sup>13</sup> platformot igényel. Ezek az eszközök lehetnek önálló programok vagy CAD-be integrált modulok. A topológiai optimalizálás képesség egyik úttörője

<sup>11</sup> SAADLAOUI et al. 2017: 178.

<sup>12</sup> Computer-Aided Design, CAD.

<sup>13</sup> Finite Element Analysis, FEA.

az Altair Opti Struct modul a Hyperworks számára. A topológiaoportimalizálás másik jelentős szereplője a Dassault Systèmes, amely több topológiaoportimalizálási modulért felelős, például a Tosca és az ATOM Abaqus. Néhány CAD-program, mint amilyen a Solidworks és a Creo, szimulációs moduljaikban már tartalmaznak beépített szerkezetoptimalizáló eszközöket.

A végeelemes módszer egy hatékony numerikus módszer, amelyet széles körben használnak mérnöki problémák megoldására. A topológiaoportimalizálás végeelem-elemzési szimulációkat használ annak felmérésére, hogy a gépelem mely részei nem döntő fontosságúak strukturális és teherviselési szempontból.<sup>14</sup>



4. kép: Az Airbus APWorks elektromos motorkerékpár topológiaoportimalizált 3D-s nyomtatott fémváza, amely mindössze 6 kg tömegű

Forrás: [www.carbodydesign.com/gallery/2016/05/airbusunveils-3d-printed-motorcycle-with-bionic-design/4/](http://www.carbodydesign.com/gallery/2016/05/airbusunveils-3d-printed-motorcycle-with-bionic-design/4/)

A felhasználó által bevitt külső erőhatások alapján szimulálja a gépelem feszültségeloszlását, ezzel meghatározható, hogy a gépelem mely részei vannak kevésbé kitéve belső feszültségeknek – így ezek potenciálisan eltávolíthatók. Az algoritmus folyamatosan értékeli a szerkezeti feszültségeloszlást az anyag eltávolítása során, hogy felmérje az ebből eredő további hatásokat. Ez számos diszkrét lépésből álló iteráción keresztül történik, amíg stabil geometriákat nem kapunk a korábban beállított terheléseknek és peremfeltételeknek megfelelően.

A topológiai optimalizáláshoz egy 3D-modellező szoftverben előállított előzetes testmodell szükséges. Az Autodesk Fusion 360 a 3D-nyomtatást alkalmazók által elterjedten használt 3D-modellező szoftver, amely beépített topológiai optimalizáló funkciókkal is rendelkezik. A topológiai optimalizálás a Fusion 360 Simulations menüpontjában végezhető el a szerkezeti anyag megadásával, a bekötési csomópontok kényszerek segítségével történő rögzítésével, illetve a ható erők megadásával, majd a Shape Optimization funkció aktiválásával.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> GÖNCZI 2021: 177.

<sup>15</sup> Autodesk Sustainability Workshop 2017.

## A topológiai optimalizálás szerkezetitömeg-csökkentő hatása és a repülőipari felhasználás

Minden hagyományos megmunkálással előállított mechanikus gépészeti alkatrész tömege nagyobb a szilárdságtani szempontból szükségesnél, hacsak nincs topológiai optimalizálva. A topológiai optimalizálás megoldja azt a mérnöki problémát, hogy hogyan lehet egy alkatrészt kellően erőssé tenni a legkevesebb anyag felhasználásával, ezáltal csökkentve a szerkezeti tömeget és a költségeket is. Alkalmazása a felhasznált alapanyag csökkentését és a gépelem szerkezeti tömegének csökkentését eredményezi. A könnyítés mértékét és jellegét a működés során az alkatrészt érő mechanikai igénybevételek alapján számítják ki. Számos ipari szektorban használják, de különösen a repülőgépiparban, ahol a tömegcsökkentés elengedhetetlen.



5. kép: Topológiai optimalizált tartó a repülőiparból

Forrás: [www.3dsystems.com/aerospace-defense/lightweight-brackets](http://www.3dsystems.com/aerospace-defense/lightweight-brackets)

Az Airbus A380 lehajló orrbordáinak tervezési folyamata jól ismert a mérnökök körében, mivel ez volt a topológiai optimalizálás első jelentősebb alkalmazása. Ezt a szárny szerkezeti részt az Altairrel együttműködésben optimalizálták, és mintegy 500 kg tömegcsökkenést értek el repülőgépenként.<sup>16</sup>



6. kép: A topológiai optimalizált 3D-nyomatott Airbus-repülőalkatrész tömegét 50%-kal csökkentették

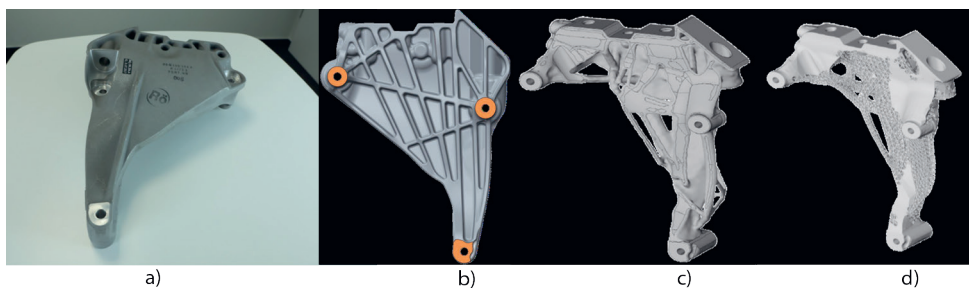
Forrás: BROOKE 2013

<sup>16</sup> PUSZTAI 2021: 85.

A további repülőipari példák közé tartozik az Airbus A320 hajtóműgondola csuklópánttartója, amelynél 918 g-ról 326 g-ra, azaz mintegy 60%-kal csökkentették a tömeget.<sup>17</sup>

## A topológiai optimalizálással tervezhető könnyített alkatrészek felhasználásának egyik fő gyakorlati korlátja: a fáradásos törés

A topológiai optimalizálás alkalmazásakor a szakirodalomban különféle gépelemekre 13–33% közötti reális tömegcsökkentési lehetőségre találhatunk példákat, az eredeti szilárdság jelentős csökkenése nélkül.<sup>18</sup> A fő probléma azonban – összefüggésben a 3D-nyomtatott alkatrészek anyagának fáradásra mutatott kedvezőtlenebb tulajdonságaival – a fáradásos törésre való hajlam. Motortartó bak topológiai optimalizálását és 3D-nyomtatását EOS porágyas lézeres (Selective Laser Sintering, SLS) nyomtatóval végezték el az Audi Hungáriánál (7. kép). A szériaalkatrész többlépcsős geometria-optimalizálását, majd 3D-nyomtatását a Kísérleti Motorgyártó Központban végezték, előbb 33%-os (c), majd 39%-os (d) tömegcsökkenéssel.<sup>19</sup>



7. a, b, c, d kép: AlSi10Mg anyagú motortartó bak topológiai optimalizálása az Audinál: 33%-os (c), majd 39%-os (d) tömegcsökkenéssel

Forrás: NAGY 2023: 9–11.

Az eredeti alkatrész több mint 10 millió fárasztási ciklust viselt el repedés nélkül. A 33%-os tömegcsökkenésű alkatrész azonban már csak 6 545 132 ciklust viselt el repedés nélkül, míg a 39%-os tömegcsökkenésű már 258 867–358 049 ciklus után eltört. Mint látható, a 30–33%-os tömegcsökkentés léptékét nem célszerű meghaladni a fárasztó igénybevételnek kitett topológiai optimalizált 3D-nyomtatott fémtartó tervezése és gyártása során.

<sup>17</sup> TOMLIN–MEYER 2011: 9.

<sup>18</sup> SZABÓ 2021: 6.

<sup>19</sup> NAGY 2023: 9–11.





8. kép: Eredeti, hagyományos technológiával tervezett és gyártott, illetve topológiai optimalizált Airbus tartó  
 Forrás: <https://crossberrysolutions.com/topology-optimization-in-metal-3d-printing/>

A porozitási probléma az additív technológiák gyenge pontjának tekinthető, amely szinte mindegyik technológiánál előfordul, különböző méretekben, formában és eloszlásban. Jellemzően negatívan befolyásolja a gyártott alkatrészek mechanikai tulajdonságait, ami megnehezíti a folyamatok minősítését és a megbízható alkatrész-tulajdonságok elérését. A porozitás a nyomtatási folyamat során lép fel, amikor kis lyukak és üregek keletkeznek az alkatrészen belül. Ezek az apró, általában mikroszkopikus pórusok alacsony sűrűséget okozhatnak – minél több a pórusok száma, annál kisebb az alkatrész sűrűsége. A belső szerkezet gyengítésével befolyásolhatják az alkatrész mechanikai tulajdonságait is, és hajlamosá teszik a repedésekre vagy más sérülésekre, különösen nagy terhelés esetén.

A porozitás legtöbb esetben mechanikai problémákat okoz, de egyéb más elektromos, illetve kémiai hatása is lehet (például korrózió). A porozitás befolyásolhatja a statikus mechanikai tulajdonságokat azáltal, hogy csökkenti a határos teherhordó felületet. A pórusok repedésképző helyként is működhetnek, a legnagyobb pórusok gyakran a hiba kritikus helyei. A kifáradási tulajdonságokat viszont kifejezetten erősen befolyásolja a porozitás, és még a kis pórusok is repedések kiindulási helyei lehetnek fárasztó igénybevételnél. A porozitás alacsony kifáradási szilárdságot eredményez. Az ADAM-technológia – a kemencében végzett szinterezés anyaghomogenizáló hatása miatt – kedvezőbb porozitásmutatókkal rendelkező termék előállítását teszi lehetővé, mint a legelterjedtebb fémnyomtatási eljárások.<sup>20</sup> Emellett az alkatrészek anizotrópiája – a rétegek egymásra építéséből előálló rétegelkülönülés, amely a teherviselő képesség irányítottságát okozza – is kevésbé jellemző az ADAM-technológiára. Az anizotrópia abból adódik, hogy a rétegekkel párhuzamos irányban az alkatrész teherbírása eltér a rétegekre merőleges teherbírástól. Ez leginkább a húzó igénybevételnél jelentkezik.

Megállapítható, hogy a gyakorlatban mintegy 30–33%-os tömegcsökkentés érhető el topológiai optimalizált geometriájú 3D-nyomtatott fémtartó tervezése és gyártása során – aminek egyik fő korlátja a fáradásos törés. A tömegcsökkentés szempontjából – például a repülőipar szempontrendszerét figyelembe véve – vizsgálva a tervezési folyamatokat megjegyzendő, hogy az ADAM-technológiájú fémnyomtatás alkalmazásával, zárt belső cellák, különféle kitöltések (például giroid) alkalmazásával úgy érhető el általános 20%

<sup>20</sup> ABDEL-AAL 2021: 388.

tömegcsökkenés, hogy a szilárdság mindössze 10–15%-kal csökken.<sup>21</sup> Elméletileg a topológiailag optimalizált geometria és az ADAM-technológiával gyártható zárt belső cellás, kitöltéses szerkezet ugyanazon alkatrészen is megvalósítható. Ehhez kapcsolódóan – a fenti fáradásos jellemzők és porozitási problémák tükrében – az alábbi kutatási kérdések fogalmazhatók meg, figyelembe véve a Markforged Metal X ADAM-technológiájú fémnyomtató technológiai képességeit (SLS-hez viszonyítva: költséghatékonyság, zárt belső cellák lehetősége, kisebb porozitás, kevesebb hőfeszültség):<sup>22</sup>

- Összehetető-e az SLS-technológiájú alkatrész tömegcsökkenése és fáradásos tulajdonsága egy Markforged Metal X fémnyomtatóval előállított, topológiailag optimalizált és ezáltal könnyített alkatrész fáradási tulajdonságával?
- A topológiai optimalizálás az ADAM-technológia esetében is hasonló tömegcsökkentésre képes, vagy ez még tovább fokozható zárt belső cellák, például giroidkitöltés alkalmazásával?
- Utóbbi esetben hogyan alakulnak az immár üreges alkatrész fáradásos tulajdonságai?

## A generatív tervezés és az additív gyártástechnológia, kitekintéssel a repülőipari felhasználásra

A 3D-nyomtatási technológia által kínált előnyök teljes kihasználását nehezítik a szokványos tervezőprogramok korlátjai. Megoldást a generatív tervezési módszer kínál.

Ez idáig leginkább csak a topológiai optimalizálás állt a mérnökök segítségére, ha egy tervezett tárgy esetében a legkisebb fajlagos szerkezeti tömeg elérése volt a cél. A generatív tervezés létrejöttével ez a folyamat megváltozott. A végeredmény kívánt fix pontjait, a gyártástechnológiát, valamint a szükséges erőhatásoknak való ellenállást meghatározva már a szoftver számolja ki az általa optimálisnak vélt összetett alakokat, amelyekből a mérnököknek csak ki kell választani a számunkra leginkább megfelelőt.

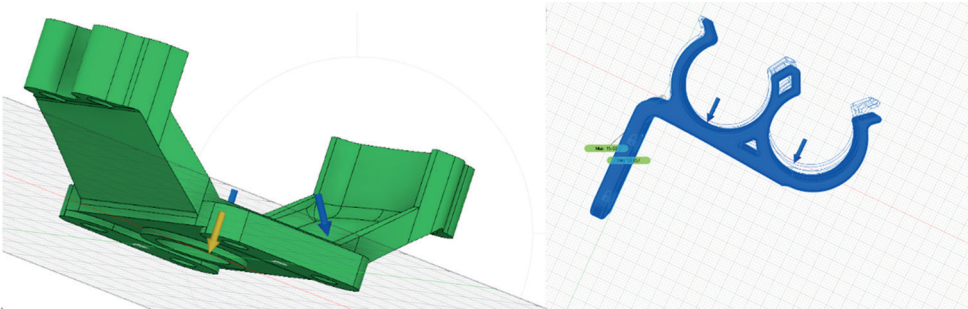
A generatív tervezés a gépészeti tervezés egy olyan formája, amely tervezési lehetőségeket generál, vagy optimalizál egy meglévő tervet a felhasználó által meghatározott kritériumok teljesítése érdekében.<sup>23</sup> A tervezők a szoftverben határozzák meg az alkatrészre vonatkozó korlátozásokat és célkitűzéseket. A szoftver ezután egy, az algoritmus által meghatározott alapértelmezett alkatrészre tesz javaslatot. A javasolt lehetőség tovább optimalizálható, paraméterezhető például a tömeg vagy a merevség szempontjából. Ily módon a generatív tervezés jelentős hatást gyakorol a tervezési folyamatra, hiszen annak egy jelentős részét a generatív tervezőszoftver már végrehajtja, időt takarítva meg a tervezőknek. A folyamat végén a tervezők feladata a különböző tervezési lehetőségek áttekintése és az alkalmazásukhoz legjobban illeszkedő lehetőség kiválasztása. A mesterséges intelligencia, azon belül is a gépi tanulás lehetőségeit kiaknázva a generatív tervezés lehetővé teszi, hogy a tervezők

<sup>21</sup> JAGTAP–KAKANDIKAR–JAWADE 2022: 583.

<sup>22</sup> SÆTERBØ–SOLVANG 2023: 113.

<sup>23</sup> TÓTH–ANDÓ 2020: 61.

különböző lehetséges megoldásokat hozzanak létre egy adott feladatra. A generatív tervezés automatizált tervezési folyamatában a gépi tanulás algoritmusainak segítségével, előre meghatározott kritériumok szerint innovatív, adott feladatra, alapanyagra és gyártástechnológiára optimalizált terveket hoznak létre. A terveket az algoritmus készíti el a megadott paraméterek alapján, majd a szoftver optimalizálja és összegzi az eredményeket. A generatív tervezésnek és az additív gyártástechnológiáknak együttesen köszönhetően a tervezők sokkal nagyobb szabadságot élvezhetnek egy-egy gépelem létrehozása során.



9. kép: Gépjárműalkatrészek tervezési folyamata 3D-nyomatást megelőzően. Balra: a generatív tervezés kiinduló fázi- sa az erők és megfogatások felvételét követően. Jobbra: tartókonzol deformációjának vizsgálata megadott terhelések alapján

Forrás: NKE HHK Haditechnikai Tanszék, a szerzők szerkesztése, Fusion 360

Az additív gyártástechnológia a legtöbb esetben kedvezőbb a felhasznált alapanyag mennyi- ségének szempontjából. A generatív tervezés segítségével az anyagokat már eleve optimálisan felhasználó tervek készíthetők, ami csökkentheti egyfelől az alapanyag-felhasználást, másfelől a gyártás során keletkező hulladékokat.

Például a repülőgépgyártásban olyan alkatrészekre van szükség, amelyek könnyűek, tartósak és teljesítményre optimalizáltak. A generatív tervezőeszközökkel olyan összetett geometriák és szerkezetek hozhatók létre, amelyek aerodinamikusak, költséghatékonyak. A szakirodalom rámutat a generatív tervezés és az additív gyártás összefüggésére, egymásra gyakorolt szinergikus hatására:

„A generatív tervezés során a mesterséges intelligenciára épülő szoftverek alkalmazásával le- hetővé válik, hogy akár több ezer tervváltozatot hozzunk létre egy tervezési feladat megoldása során az alapvető paraméterek (pl. terhelés, szilárdság, méret, anyag) megadásával. Az additív gyártás lehetőséget ad összetett generatív tervezésű testek nyomtatására.”<sup>24</sup>

Az Autodesk vállalat számos lépést tett már a generatív tervezés fejlesztése érdekében: a cég Generative Design platformja beépült a felhőalapú Fusion 360 Ultimate termékfejlesztő szoftverébe. A platform lehetővé teszi a mérnökök számára olyan tervezési paraméterek meghatározását, mint az anyag, méret, súly, szilárdság, gyártási módszerek és költségkorlátok.

<sup>24</sup> DARUKA et al. 2024: 34.

A szoftver AI-alapú algoritmusokat használ, amelyek segítenek kiszűrni az érvényes, valid terveket a tervezési lehetőségek közül. A szoftver a gyárthatóságot is figyelembe veszi, így a tervezők akár tíz különböző adalékanyagot is kiválaszthatnak a tervezés tanulmányozásához. A General Motors az Autodesk generatív tervezőszoftver segítségével vizsgálja a generatív tervezés és a 3D-nyomatás lehetőségeit jövőbeli termékeihez.

A repülő- (és UAV-) ipar az, ami a leginkább érdekelt a generatív tervezés és a 3D-nyomatás kombinációjából adódó szerkezetitömeg-csökkenésben. Egy konkrét példaként említhető: a General Electric gázturbinás hajtóművekben alkalmazott alumínium-szilícium-magnézium ötvözetű tartók tömege a konvencionális tervezési és gyártási módszerekhez képest mintegy 40%-kal csökkenthető generatív tervezés és 3D-nyomatás együttes alkalmazásával.<sup>25</sup> Különösen a repülőiparban – amint arra egy UAV sárkányszerkezeti tervezése során kidolgozott példa és tanulmány is rámutat:

„egyre kisebb tömegű és térfogatú alkatrészekre van szükség a megfelelő szilárdsági tulajdonságok megtartása vagy javítása mellett. Ezekre a generatív tervezés kínál megoldást. A technológiával több külön részegységből álló összeállításokat egy alkatrészévé lehet összevonni. Gyakran az így megtervezett alkatrészeknek kedvezőbb szilárdsági tulajdonságaik vannak, mint a több részegységből álló összeállításoknak. A kisebb tömeg kevesebb anyagfelhasználást jelent és a járművekben hatékonyabb.”<sup>26</sup>

Összességében: az additív gyártás lehetőséget biztosít komplex, generatív tervezésű, 3D-nyomatásra tervezett testek előállítására.<sup>27</sup>

## Összegzés és következtetések

Összességében a generatív tervezés és a topológiai optimalizáció kapcsolatban áll a 3D-s nyomatással. A generatív tervezés egyes geometriáknál lényegében igényli is a 3D-s nyomatás alkalmazását. Ugyanis a generatív tervezés eredménye gyakran rendkívül nagy hatékonyságú, de igen komplex forma (például organikus rácsszerkezet). Az ilyen összetett geometriák legyártása hagyományos módszerekkel bonyolult, lassú, rendkívül költséges, illetve adott esetben véges számú darabból összeillesztve is lehetetlen. A generatív tervezés során létrehozott topológiai optimalizált, nagy komplexitású geometriával rendelkező szerkezeteket, alkatrészeket hagyományos megmunkálással létrehozni egyszerűen nem kifizetődő. Az olyan additív gyártási eljárás, mint a 3D-s nyomatás jelenti a megoldást az ilyen komplex geometriák gyártásához. A generatív tervezés jellemzően CAD-végeselem-alapon realizálódik, amely a CAD-tervezés fejlődésével – a várakozások szerint – a közeljövőben széles körben teret nyer, részben a mesterséges intelligenciában rejlő lehetőségeket kihasználva. A generatív tervezés

<sup>25</sup> DUGHMI–KÁTAI 2022: 10.

<sup>26</sup> SEREGI–FICZERE–BORBÁS 2021: 74.

<sup>27</sup> MARKOVITS–ERŐSS–FENDRIK 2023: 45.

során az általunk megadott paraméterek és peremfeltételek alapján a szoftver több lehetséges megoldást hoz létre egy termékre vonatkozóan.

Összességében a tanulmányban ismertetett topológiai optimalizálás és generatív tervezés jelentős lehetőségeket rejt magában a szerkezeti elemek fajlagos tömegcsökkentése területén a 3D-nyomatott fém alkatrészek esetében. Alkalmazásával lehetővé válik:

- egyes alkatrészek fajlagos tömegének csökkentése,
- a gyártási költség leszorítása.

E lehetőségek egyik legjelentősebb korlátja a porozitás és a fáradásos jelenségek. A tanulmányban ismertetett fáradásos jellemzők tükrében a Markforged Metal X ADAM-technológiájú fémnyomató technológiai képességeit figyelembe véve az alábbi kutatási kérdések fogalmazhatók meg: alkalmazható-e egyes konstrukcióknál együttesen a topológiai optimalizált rácsszerkezet, és a Markforged Metal X fémnyomatóval előállítható-e például giroidkitöltés, és ennek milyenek a fáradásos tulajdonságai, illetve milyen mértékű tömegcsökkenés érhető el? A kérdések pontos és részletes megválaszolása további kutatásokat igényel.

## Felhasznált irodalom

- ABDEL-AAL, Hisham A. (2021): *Additive Manufacturing of Metals: Fundamentals and Testing of 3D and 4D Printing*. Toronto: McGrawHill.
- Autodesk Sustainability Workshop [@AutodeskEcoWorkshop] (2017): Topology Optimization in Autodesk Fusion 360. *YouTube*, 2017. április 12. Online: [www.youtube.com/watch?v=lyTUL-zvHhXw&ab\\_channel=AutodeskSustainabilityWorkshop](http://www.youtube.com/watch?v=lyTUL-zvHhXw&ab_channel=AutodeskSustainabilityWorkshop)
- BROOKE, Rose (2013): Additive Manufacturing 'Can Lower Aircraft Building and Operating Costs'. *TCT*, 2013. október 29. Online: [www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/additive-manufacturing-can-lower-aircraft-building-and-oper/](http://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/additive-manufacturing-can-lower-aircraft-building-and-oper/)
- DARUKA Norbert et al. (2024): A 3D nyomtatási képesség kialakításának lehetőségei és korlátai a Magyar Honvédségben. *Hadtudomány*, 34(E-szám), 27–39. Online: <https://doi.org/10.17047/Hadtud.2024.34.E.27>
- DUGHMI, Ahmad – KÁTAI László (2022): A generatív tervezés módszerének áttekintése. *A Gép*, 73(3–4), 5–10. Online: [https://epa.oszk.hu/03300/03334/00058/pdf/EPA03334\\_gep\\_2022\\_3-4\\_005-010.pdf](https://epa.oszk.hu/03300/03334/00058/pdf/EPA03334_gep_2022_3-4_005-010.pdf)
- FICSOR Botond – HEGEDŰS Ernő (2023): A 3D fémnyomatás alkalmazhatóságának vizsgálata MALE-kategóriájú UAV-dízelmotor fejlesztésre. 3D nyomtatással gazdaságosan gyártható könnyített szerkezetű alkatrészek és részegységek a repülő szakterületen. *Katonai Logisztika*, 31(1–2), 38–72. Online: <https://doi.org/10.30583/2023-1-2-038>
- GÖNCZI Dávid (2021): Topológiai optimalizálási feladatok alapvető sajátosságai Abaqus végelelem programrendszerben. *Multidiszciplináris Tudományok*, 11(4), 177–187. Online: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.22>
- JAGTAP, Balaji M. – KAKANDIKAR, Ganesh M. – JAWADE, Samidha A. (2022): Mechanical Behavior of Inconel 625 and 17-4 PH Stainless Steel Processed by Atomic Diffusion Additive Manufacturing. In DAVE, Harshit K. – DIXIT, Uday Shanker – NEDELUCU, Dumitru (szerk.): *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems*. [H. n.]: Springer Nature Singapore, 583–594. Online: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7787-8\\_47](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7787-8_47)
- Markforged 3D Printers. Online: [www.mark3d.com/en/buy-markforged-3d-printers/](http://www.mark3d.com/en/buy-markforged-3d-printers/)

- MARKOVITS, Tamás – ERŐSS, László Dániel – FENDRIK, Ármin (2023): Analysing The Generative Design of Payload Part for the 3D Metal Printing. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 25(1), 45–51. Online: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.010>
- NAGY Tibor (2023): 3D nyomtatás az Audi Hungaria szolgálatában. Next 3D – additív gyártástechnológia konferencia. Budapest, 2023. szeptember 12., 12. dia.
- PUSZTAI Zoltán (2021): Topológiai optimalizálás alkalmazása autonóm energiahatékony jármű motor-tartó adapterén. Autonóm Járművek. Workshop-sorozat. Konferenciakiadvány. Győr: Széchenyi István Egyetem, 85–91.
- SAADLAOUI, Y. et al. (2017): Topology Optimization and Additive Manufacturing: Comparison of Conception Methods Using Industrial Codes. *Journal of Manufacturing Systems*, 43(1), 178–186. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.03.006>
- SÆTERBØ, Mathias – SOLVANG, Wei Deng (2023): Evaluating the Cost Competitiveness of Metal Additive Manufacturing – A Case Study with Metal Material Extrusion. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 45, 113–124. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.06.005>
- SEREGI Bálint Leon – FICZERE Péter – BORBÁS Lajos (2021): Drón vázszerkezet létrehozása generatív tervezéssel. *Acta Periodica*, 23, 72–80. Online: <https://doi.org/10.47273/AP.2021.23.72-80>
- SZABÓ Kristóf (2021): Topológiai módszerek alkalmazása. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, 11(4), 218–226. Online: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.26>
- Titanium 3D printing powder – EOS GmbH Electro Optical Systems – corrosion-resistant/DMLS/for the aerospace industry. Online: [www.directindustry.com/prod/eos-gmbh-electro-optical-systems/product-5078-2528687.html](http://www.directindustry.com/prod/eos-gmbh-electro-optical-systems/product-5078-2528687.html)
- TOMLIN, Matthew – MEYER, Jonathan (2011): Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part. The 7<sup>th</sup> Altair CAE Technology Conference, 1–9. Online: [www.pfonline.com/cdn/cms/uploadedfiles/topology-optimization-of-an-additive-layer-manufactured-aerospace-part.pdf](http://www.pfonline.com/cdn/cms/uploadedfiles/topology-optimization-of-an-additive-layer-manufactured-aerospace-part.pdf)
- TÓTH Balázs – ANDÓ Mátyás (2020): Generatív tervezés kombinálása 3D nyomtatással. *Mérnöki és Informatikai Megoldások*, 7(1), 61–68. Online: <https://doi.org/10.37775/EIS.2020.1.9>
- VÉGVÁRI Zsolt – ZENTAY Péter – HEGEDŰS Ernő (2022): A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei 1. rész. *Haditechnika*, 56(6), 56–61. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.56.6.09>