



ÓBUDAI EGYETEM  
ÓBUDA UNIVERSITY

BÁNKI DONÁT GÉPÉSZ ÉS  
BIZTONSÁGTECHNIKAI MÉRNÖKI KAR  
Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet

**36. Országos Tudományos Diákköri Konferencia**



# **VERSENYAUTÓ-CSONKÁLLVÁNY STRUKTURÁLIS FELÉPÍTÉSÉNEK OPTIMALIZÁLÁSA**

**Csányi Mihály**

Konzulens: Dr. Molnár Ildikó

## TARTALOMJEGYZÉK

|                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. BEVEZETÉS .....</b>                                                                                  | <b>3</b>  |
| <b>2. AZ EGYETEMI FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓ FUTÓMŰJÉNEK<br/>BEMUTATÁSA.....</b>                          | <b>5</b>  |
| 2.1 A csapat versenyautójának futóműve.....                                                                | 6         |
| <b>3. AZ EGYETEMI FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓ CSONKÁLLVÁNYA.....</b>                                       | <b>7</b>  |
| 3.1. Csonkállványon ébredő hosszirányú és keresztirányú erők.....                                          | 8         |
| 3.2. Kiinduló csonkállvány strukturális végeelem szimulációja ANSYS programban.....                        | 10        |
| 3.3. A kiinduló csonkállvány strukturális végeelem szimulációja INVENTOR programban                        | 17        |
| <b>4. A VERSENYAUTÓ CSONKÁLLVÁNYÁNAK TÖMEG- ÉS STRUKTURÁLIS<br/>OPTIMALIZÁLÁSA .....</b>                   | <b>21</b> |
| 4.1. Topológiai optimalizáció.....                                                                         | 21        |
| 4.2. Generatív tervezés .....                                                                              | 25        |
| <b>5. A MEGTERVEZETT CSONKÁLLVÁNYOK FELÉPÍTÉSÉNEK VÉGESELEM<br/>SZIMULÁCIÓVAL TÖRTÉNŐ VIZSGÁLATA .....</b> | <b>34</b> |
| 5.1. Generatív tervezéssel készült csonkállvány strukturális szimulációja INVENTOR<br>programban .....     | 34        |
| 5.2. Generatív tervezéssel készült csonkállvány strukturális szimulációja ANSYS programban<br>.....        | 37        |
| 5.3. Alakoptimalizálással készült csonkállvány strukturális szimulációja .....                             | 39        |
| <b>7. ÖSSZEGZÉS .....</b>                                                                                  | <b>44</b> |
| <b>IRODALOMJEGYZÉK.....</b>                                                                                | <b>46</b> |
| <b>MELLÉKLETEK.....</b>                                                                                    | <b>48</b> |

## 1. BEVEZETÉS

Az egyetemre történő felvételem előtt tudtam, hogy tanulmányaim alatt részese szeretnék lenni egy olyan társaságnak, ahol az oktatók által leadott anyagokkal párhuzamosan további mérnöki tudásra tehetek szert, ezzel még szélesebb körben megismerkedve a szakma rejtelmeivel. Ezért egy évvel a felsőoktatásba történő bekerülésemet követően jelentkeztem az egyetemi Formula Student csapatba.

Kezdetektől fogva a futómű részleg tagjaként a felfüggesztés fejlesztésében vettem részt. A szervezet ösztönzött arra, hogy egy mérnöknek elengedhetetlen nyomon követni a műszaki világ fejlődését. Így ismerkedtem meg az úgynevezett generative design-nal (magyarosítva: generatív tervezés) és a topológiai optimalizációval, amivel óriási áttöréseket lehet elérni futómű fejlesztésnél, tömeg- és strukturális optimalizáció terén. A jövőben is alkatrész fejlesztéssel szeretnék foglalkozni, emiatt a futómű egyik legfontosabb elemének, a csonkállványnak az optimalizálását választottam a kutatási témájaként.

A kiindulási adatoknál a már egyszer megtervezett csonkállványt vettem alapul, melynek geometriáját Kádár Bertold Gergő tervezte meg 2020-ban a „Formula Student versenyautó futómű tervezése” című szakdolgozatában. Az optimalizálást a kutatási projektben kétféleképpen vittem véghez, majd az eredményeimet összehasonlítottam a kiinduló alkatrésszel.

Az első módszer, a topológiai optimalizáció (angolul: Topology Optimization) során egy már előre megtervezett alkatrész felfogatási pontjainál adtam meg az azokat érő terheléseket, melyek alapján a program feltüntette a szükséges geometriát. Ilyenkor tisztább képet kaptunk arról, hogy az általunk tervezett tárgyon hol van terheletlen rész.

A második bemutatott módszer a generatív tervezés. Itt a topológia optimalizációval ellentétben nem elvesszük a fölösleges anyagot, hanem felépítünk egy új testet. A tervezést maga az AI (Artificial Intelligence), azaz mesterséges intelligencia végzi. A mi dolgunk a kiindulási adatok betáplálása volt: felfogatási pontok, és az azokat érő erőhatások megadása. Ezt követően különböző szempontokat is tudtunk rangsoroltatni (pl.: gyárthatóság, költséghatékonyság, anyagmennyiség). Az alapvető adatok beállítása után kezdődhetett meg a

tervezés, az AI legenerált több potenciális megoldást. A leképzett lehetőségek paramétereit megismerve kiválaszhattuk a végleges alkatrészt.

Az optimalizálásokra az AUTOCAD termékcsalád FUSION 360 nevezetű programját használtam. A fejlesztések végeztével a kapott geometriákat AUTOCAD INVENTOR és ANSYS WORKBENCH programok segítségével strukturális végelem szimulációkkal ellenőriztem.

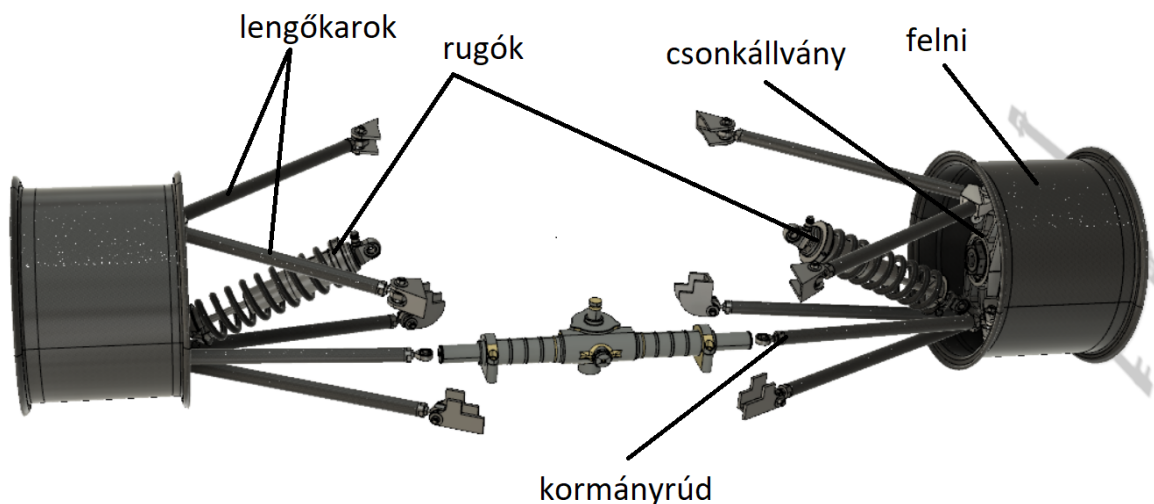
Az optimalizálásokkal egy olyan csonkállvány konstrukciót szerettem volna létrehozni, mely a kiindulási elemhez képest jobb strukturális felépítéssel, vagy kedvezőbb súllyal rendelkezik.

## 2. AZ EGYETEMI FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓ FUTÓMŰJÉNEK BEMUTATÁSA

Mit nevezünk futóműnek? Különfajta szakértelmezés terjedt el a futóművel kapcsolatban. Európában elméletben a kerekekből, azok felfüggesztéséből és a rugózásából épül fel az említett alkatrészcsoporthoz. Gyakorlatban ez kiegészül az angolszász és japán értelmezéssel, ahol beleveszik a fékezés és kormányzás részeit is.

Legfontosabb feladatának mondható, hogy az út és a jármű között közvetítse az erőhatásokat, ezzel kellő tapadást teremtve. Csökkentenie kell továbbá a gépjármű alkatrészeinek dinamikus igénybevételét, megnövelve ezzel élettartamukat. Fontos, hogy megfelelő rezgéstartományban tudjon működni a rendszer, ezzel elkerülve az öngerjesztés folyamatát és megteremtve az utasok utazási kényelmét. Egy jól összeállított futómű aktívan is képes hozzájárulni a gépkocsi menetstabilitásához.

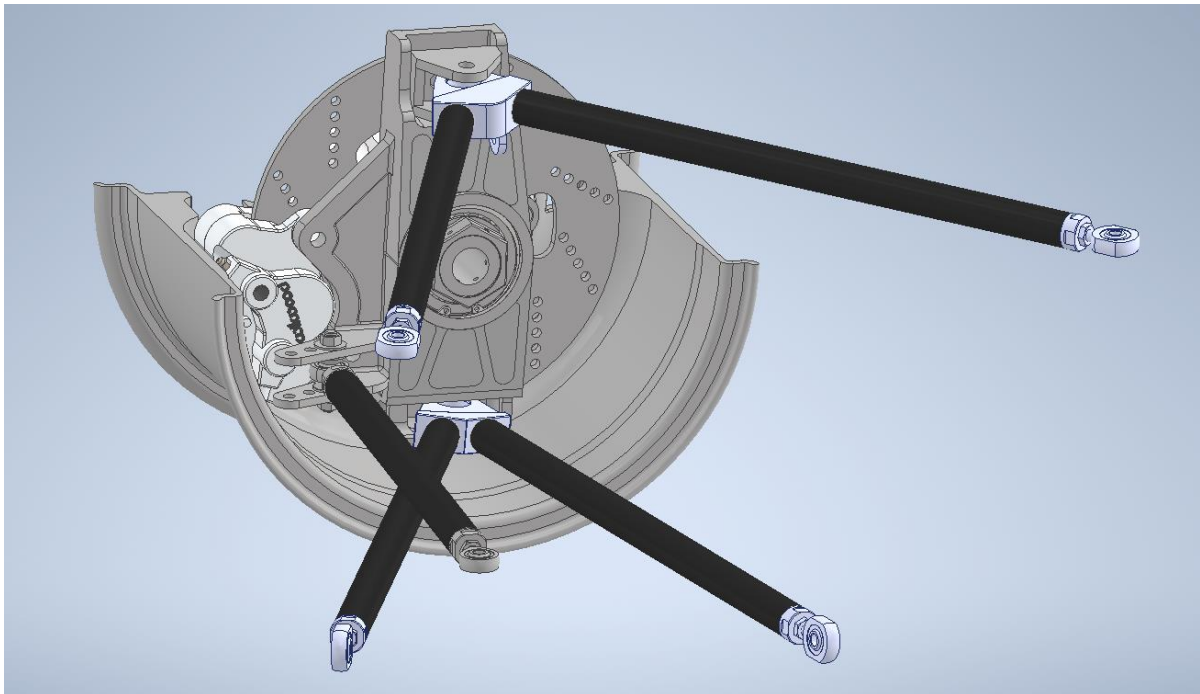
Jelen versenyautónknál a szűkebb értelemben vett futómű elemeit vizsgáltuk. A 3. ábra a jármű futóművének meghatározó elemeit szemlélteti.



1. ábra: A csapat futómű elemeinek geometriai elrendezése

## 2.1 A csapat versenyautójának futóműve

A csapat egy kettős (másnéven dupla-) keresztlengőkaros futóművet épít, ami könnyen szerelhető és nagyon széles beállítási lehetőségeket biztosít. Ez a konstrukció egy alsó és egy felső lengőkar párból (úgynevezett A-Arm-ból), egy a rugózásért, és egy a kormányzásért felelős rúdból áll. A nem kormányzott hátsó tengelyen a kormányösszekötő rudazatot felváltja egy rögzítő rúd. A rudak a 2. ábrán látható módon három helyen csatlakoznak a csonkállványhoz különböző gömbcsuklók segítségével



2. ábra: Az egyetemi csapat egy futómű koncepciójának felépítése

### 3. AZ EGYETEMI FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓ CSONKÁLLVÁNYA

A csonkállvány a futómű azon eleme, melyre rögzítésre kerülnek az alkatrészcsoport elemei. A csonkállvány közepén a keréktengely megy át, a fészekben két kerékcsapágy található. A külső oldalon a felni csatlakozik a kerékagyra, amit a csonkállvány tart. A csonkállvány oldalán két fül segítségével kerül rögzítésre a féknyereg. Belső oldalról a felfüggesztés elemei, a lengőkarok és a kormányrudazat csatlakoznak gömbcsuklók segítségével. Amennyiben szeretnénk, hogy a szögsebesség, hőmérséklet, egyéb erőhatások mérhetőek legyenek a kerekeknél, úgy különböző szenzorok is rögzítésre kerülhetnek különálló konzolok segítségével.



3. ábra: A csapat kikönnyített csonkállványa

A felfüggesztés elemei a csonkállványnál futnak össze, ezért az alkatrész kialakításánál nagy hatással lehetünk a menetdinamikai tulajdonságok beállítására. A felfüggesztési rudak hosszának változtatásával szélesebb beállítási paramétereket biztosíthatunk. Állítani tudjuk a kerékdőlést, csapterpesztést vagy akár a kerékutánfutást is. A kormányrudazatnak több csatlakozási pont áll rendelkezésére, szintén a kormányozhatóság beállítására.

### 3.1. Csonkállványon ébredő hosszirányú és keresztirányú erők

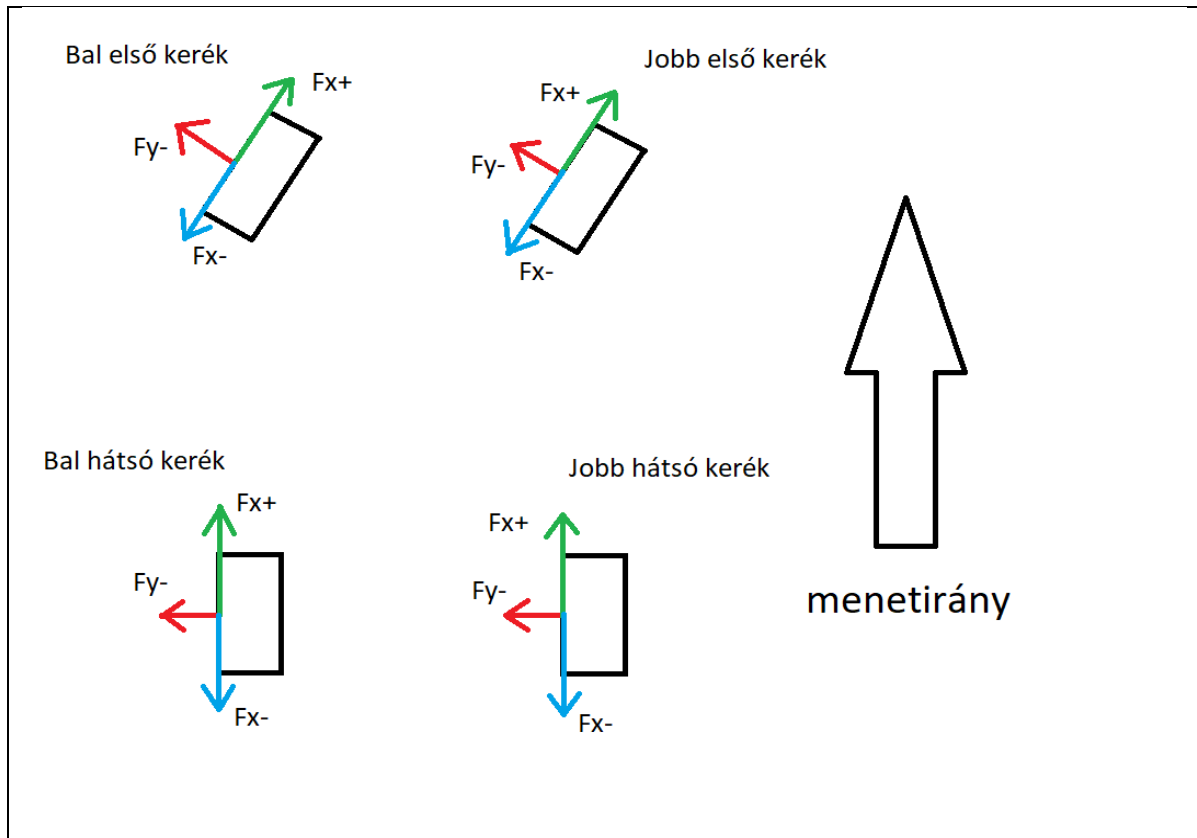
Versenyzés során egymást követik a teljes terheléssel történő kigyorsítások, gyors irányváltoztatások és a kanyarok bevezetősége miatti erős fékezések. A 1. táblázat összesíti a maximálisan ébredő kritikus erőket, amelyek az egyik irányba nagy sebességgel történő kanyarodásnál érhetik a járművet. A 1. táblázat a futóművel foglalkozó hallgatók által lett meghatározva. A számítások során figyelembe vették, hogy előre láthatólag a hátul elhelyezett motor a tömegeloszlást 40%-60%-ban (elől-hátul) befolyásolja. A feltüntetett értékek előzetes szimulációk alapján készültek.

1. Táblázat: Jobbra történő kanyarodás során ébredő maximális erők [3]

| Bal első kerék külső része   |          |         |            |           |                    |                      |
|------------------------------|----------|---------|------------|-----------|--------------------|----------------------|
|                              | Statikus | Fékezés | Kanyarodás | Gyorsítás | Fékezés+kanyarodás | Gyorsítás+kanyarodás |
| Fx[N]                        | 0        | -2450   | 0          | 802       | -3508              | 1859                 |
| Fy[N]                        | 0        | 0       | -2158      | 0         | -2821              | -1496                |
| Fz[N]                        | 613      | 1065    | 1167       | 349       | 1525               | 808                  |
| Jobb első kerék belső része  |          |         |            |           |                    |                      |
|                              | Statikus | Fékezés | Kanyarodás | Gyorsítás | Fékezés+kanyarodás | Gyorsítás+kanyarodás |
| Fx[N]                        | 0        | -2450   | 0          | 802       | -1392              | -256                 |
| Fy[N]                        | 0        | 0       | -457       | 0         | -1120              | 206                  |
| Fz[N]                        | 613      | 1065    | 247        | 349       | 605                | -111                 |
| Bal hátsó kerék belső része  |          |         |            |           |                    |                      |
|                              | Statikus | Fékezés | Kanyarodás | Gyorsítás | Fékezés+kanyarodás | Gyorsítás+kanyarodás |
| Fx[N]                        | 0        | -802    | 0          | 2450      | -1859              | 3508                 |
| Fy[N]                        | 0        | 0       | -2158      | 0         | -1496              | -2821                |
| Fz[N]                        | 613      | 349     | 1167       | 1065      | 808                | 1525                 |
| Jobb hátsó kerék külső része |          |         |            |           |                    |                      |
|                              | Statikus | Fékezés | Kanyarodás | Gyorsítás | Fékezés+kanyarodás | Gyorsítás+kanyarodás |
| Fx[N]                        | 0        | -802    | 0          | 2450      | 256                | 1392                 |
| Fy[N]                        | 0        | 0       | -457       | 0         | 206                | -1120                |
| Fz[N]                        | 613      | 349     | 247        | 1065      | -111               | 605                  |

Ezen adatok segítségével végeztük el a csonkállványok különböző verzióinak strukturális ellenőrzését a már említett végelem szimulációs programokkal. A 1. táblázatban fellelhető értékek 250 kg-os versenyautó esetében 7,625 m kanyarrádiusznál, 11 m/s sebességről történő gyorsulás és fékezés esetén készültek. A maximális gyorsulás és lassulás a csapat által kiválasztott versenygumik esetében 1,8 G lehet. Ezt a gyorsulást túllépve a tapadás nem garantálható, a gumi megcsúszhat.

Kerekenként a maximálisan ébredő erők lettek kiemelve a 1. táblázatban, így jobbra kanyarodás esetén az első tengely bal kerekének külső, jobb kerekének belső, illetve a hátsó tengely bal kerekének külső és jobb kerekének belső oldala (4. ábra).



4. ábra: Jobbra történő kanyarodás esetén a maximális erők

Fékezéskor a féknyereg rászorítja a fékbetéteket a féktárcsára, ezzel lassítva a jármű haladását. A súrlódás során olyan erők és forgatónyomatékok ébrednek, melyeket a csomópontnak el kell viselnie. Nekünk a féknyereg felfogatási pontjában ébredő erőre volt szükségünk. Ahhoz, hogy azt meg tudjuk határozni, először a szükséges fékezési nyomatékot kellett megadnunk.

$W_t$  ~ Szükséges dinamikus súlyeloszlás [kg]

$h$  ~ Jármű súlypontjának magassága [m]

$m$  ~ Jármű össztömeg [kg]

$g$  ~ Gravitációs gyorsulás [ $\text{m/s}^2$ ]

$b \sim$  Tengelytávolság [m]

$M_f \sim$  Fékező nyomaték igény [Nm]

$D_w \sim$  Gumi külső átmérője [m]

$R_t \sim$  Féknyerek dugattyújának kerék forgáspontjától mért távolsága [m]

$$W_t = \frac{h * m * g}{b} = \frac{0,23 * 250 * 9,81}{1,54} = 366,28 \text{ kg} \quad [3.1]$$

$$M_f = \frac{W_t}{2} * \frac{D_w}{2} * g = \frac{366,28}{2} * \frac{0,48}{2} * 9,81 = 431,19 \text{ Nm} \quad [3.2]$$

A fékezési nyomatékból meghatározható a felfogatási pontokban ébredő erő, amennyiben ismerjük annak erőkarját:

$$F_f = \frac{M_f}{R_t} = \frac{431,19}{0,085} = 5072,82 \text{ N} \quad [3.3]$$

Szimulációink során bemenő adatokat kellett megadnunk a szoftvereknek. Ilyen adatok közé tartoznak a rögzítési pontok és a csonkállványon ébredő erőhatások. A csonkállványra a méréseim során úgy tekintettem, hogy a vázhoz van közvetlenül rögzítve a lengőkarokon keresztül. A csatlakozási pontoknál különféle kényszerekkel rögzíthettük a csonkállványt. A szerkezet felépítésére nagy hatással lévő erőket a jármű tömegéből, mozgásából és fékezéséből eredeztettem. Az alkatrészeire a csapágyakon keresztül és fékezéskor a féknyereg felfogatásán keresztül hatottak a környezeti erők. A 1. táblázatból meg tudtuk határozni a csonkállványt minden irányból érő erőhatásokat.

### 3.2. Kiinduló csonkállvány strukturális végeelem szimulációja ANSYS programban

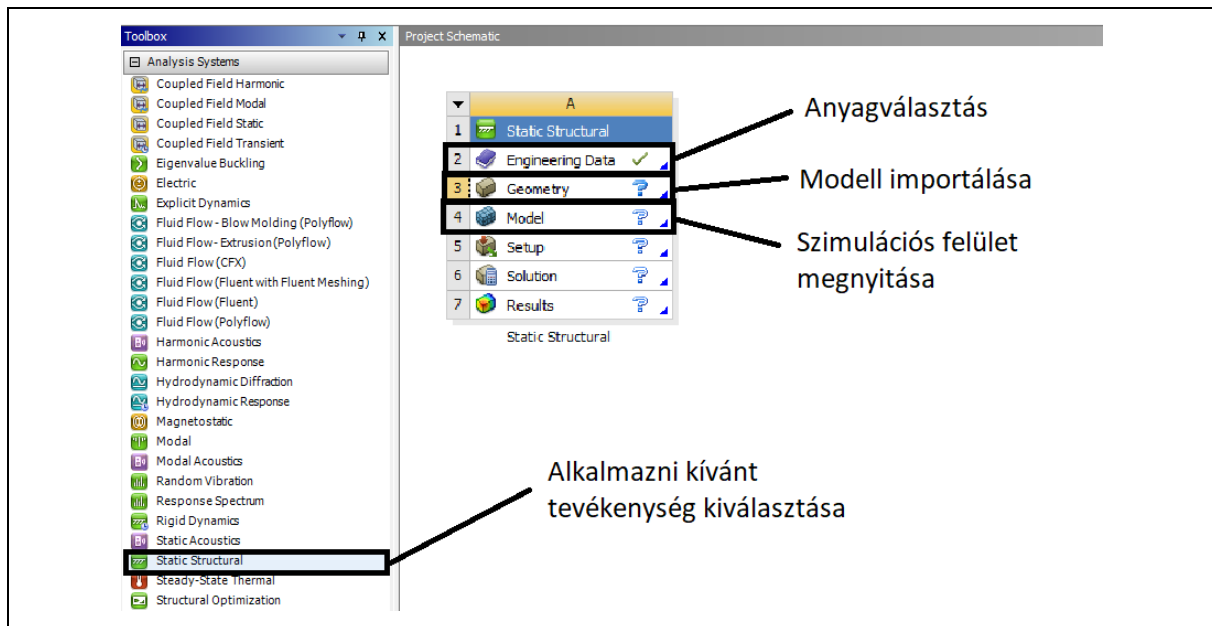
Az erőhatások ismeretében elkészíthettük a jelenlegi geometria végeelem szimulációit. A végeelem módszerrel egy bonyolult, bizonyos esetekben egy lépésben nem megoldható problémát osztunk fel több részegységre. A feldarabolással a célunk az, hogy annyi véges számú elemre osszuk fel a feladatot, hogy az megoldhatóvá váljon. A probléma megoldása így

egy bonyolult számítás helyett sok, véges számú egyszerűbb számítással történik. Manapság a műszaki tervezésben a végeelem szimulációt különféle esetekben használjuk:

- „termék szilárdsági, hőtani, áramlástani, elektromos, mágneses vizsgálata, használati körülmények közt, amely a termék minőségét javítja, költségét (pl. tömeg) csökkenti,” [5]
- „termék gyártás közbeni szimulációja (gyártástechnológia szimulációja), az optimális költségű, de megfelelő termék gyártástervezéséhez,” [5]
- „szerszámok szimulációja, amely azok élettartamát, optimális üzemi feltételeit adja.” [5]

Esetünkben a csonkállványunk térfogatát daraboljuk szét, a program által még kezelhető számú térfogategységekre. Ezek az egységek eltérő geometriájúak lehetnek, az alkalmazni kívánt alakot a végeelem szimulációra használt programban van lehetőségünk beállítani. A strukturális szimulációt kétféle program segítségével hajtottam végre, először ANSYS WORKBENCH programmal.

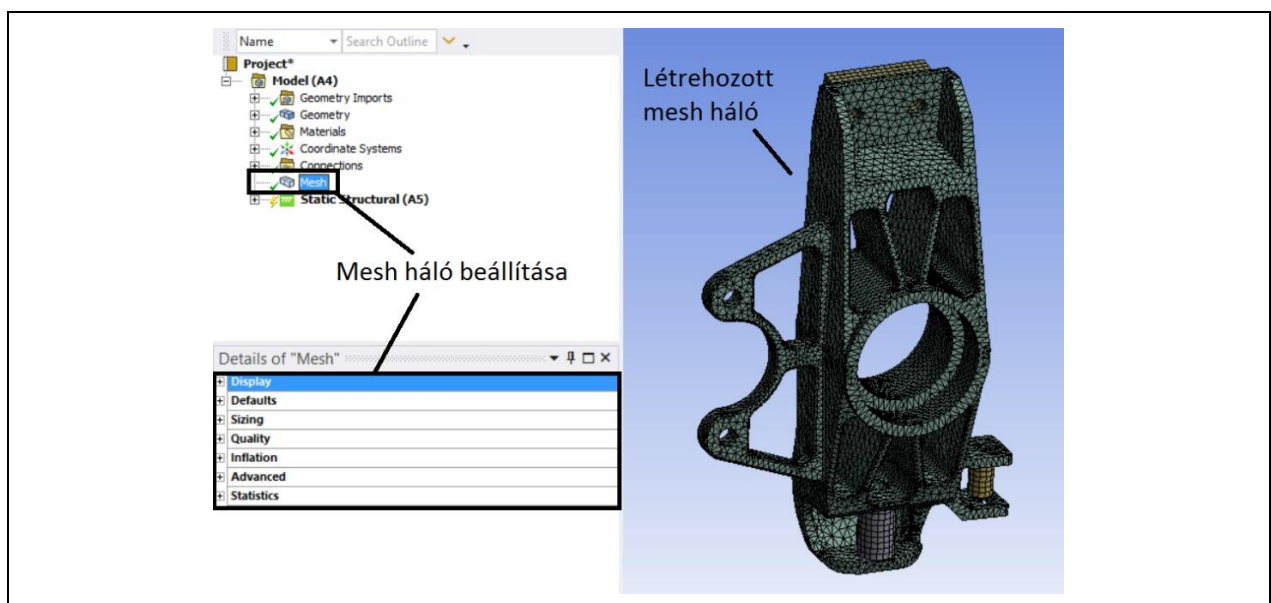
A 1. táblázatban szereplő kerekenként ébredő eltérő maximális erőhatásokat külön szimulációkban kellett vizsgálnunk. Amennyiben azonos szimulációban tettük volna, úgy az ellentétes irányú erők nem valós megoldásokat jelenítettek volna meg. A programban a „static structural” modult kiválasztva lépésről lépésre definiálhatóak voltak a szimulációhoz szükséges bemenő adatok (5. ábra). A csonkállvány nem ebben a programban lett megtervezve, így először exportálnunk kellett egy másik programból a geometriát. Legkönnyebben az .stp, .igs vagy .step kiterjesztésű fájlokat kezeli a program, ezért ebben a formátumban olvastam be a rendszerbe. Ez a „geometry” részben történik, ahol a program által kezelhető formában került megnyitásra az alkatrész.



5. ábra: ANSYS WORKBENCH kezelő felülete

„Engineering Data” címszónál megadtuk a csonkállványunk anyagát, amely a tervezésekor AlSi7(LM25) alumínium ötvözetnek lett kiválasztva. Ezt az anyagot felváltottam a csapat által használni kívánt 6061-es alumíniumra. Ez az anyag könnyebben elérhető, és az optimalizáláshoz használt programokban is fellelhető.

A „model” fül megnyitását követően elindul a program azon része, ahol magát a szimulációt végeztem. Itt létre kellett hoznom egy úgynevezett „mesh-t”, hálót, mely az alkatrész geometriáját behálózta az általunk beállított elemnagysággal (6. ábra).



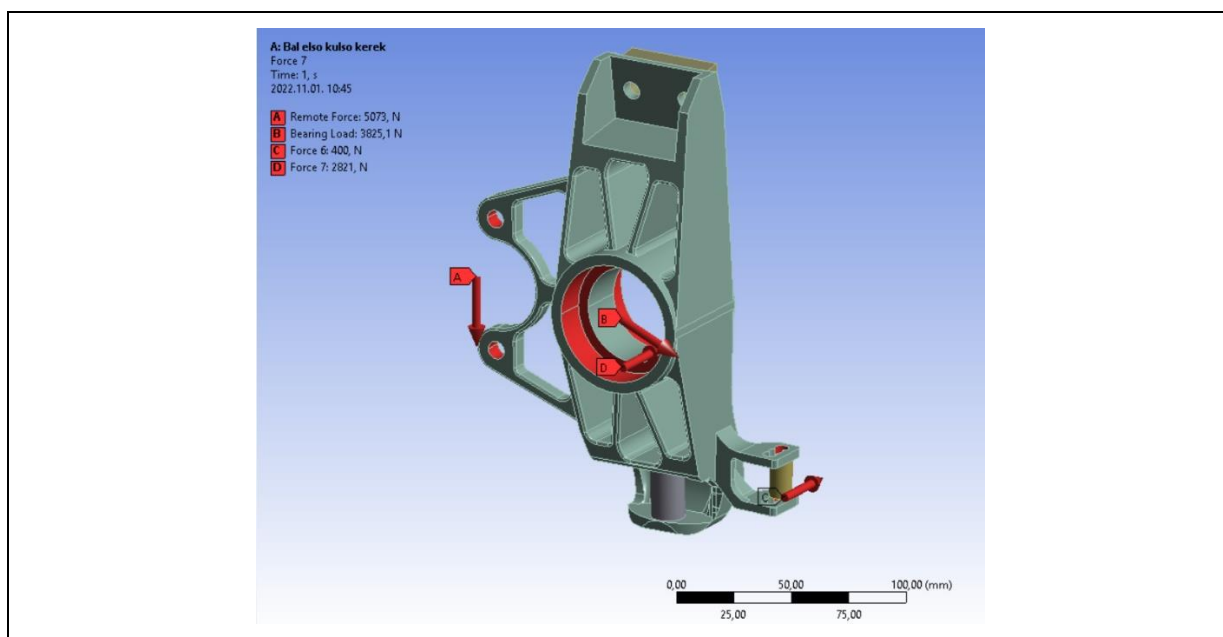
6. ábra: A geometria hálózása ANSYS

A megfelelő háló elkészítése alapfeltétele az elfogadható és jövőben használható számítási eredményeknek. Az elemszám azonban a renderelési-, megoldási időt jelentősen képes meghosszabbítani.

A meshelés, háló létrehozása után definiáltam az ébredő erőket, forgatónyomatékokat és a befogási pontokat. Erők megadásánál lehetőségem volt választani megoszló, gravitációs és egy pontban ható erők között.

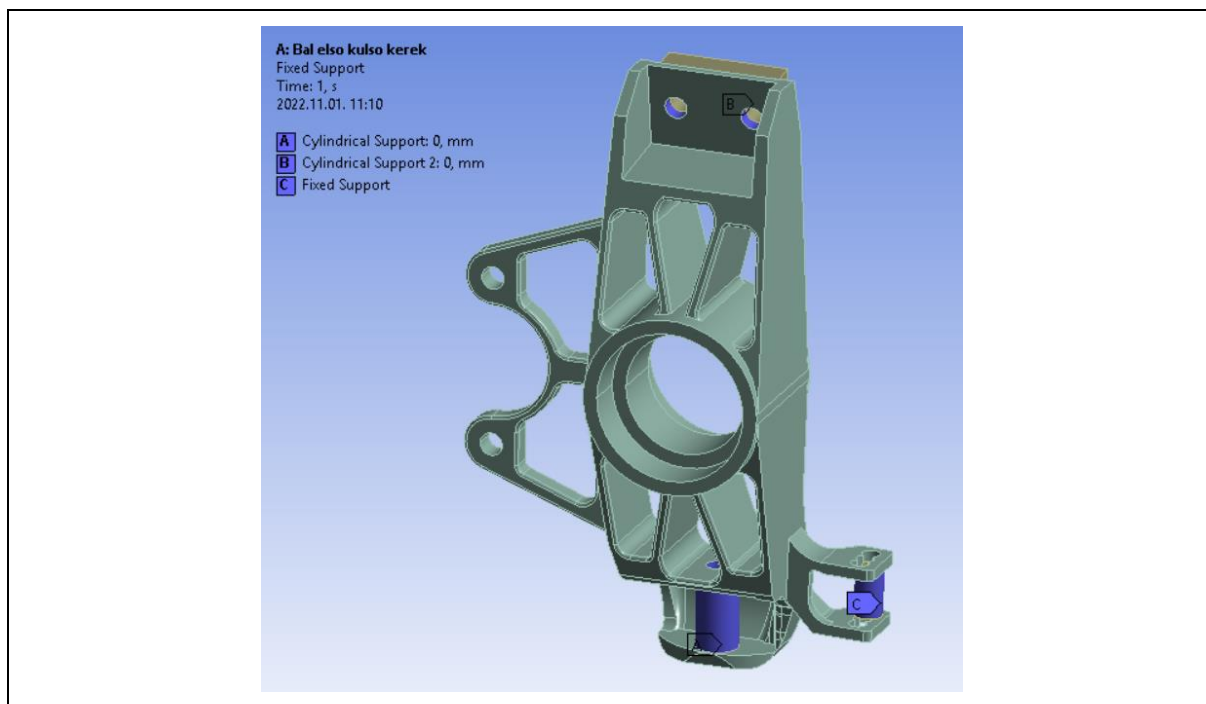
Az erők identifikálása a következő módon történt:

A 1. táblázatban megállapított keréktalpponti erők a csapágyakon keresztül továbbítódnak a csonkállványra, de csak radiális irányokba (x, y tengelyen). Ennek a megadására a program 2022-es verziójában külön kiválasztható volt egy csapágyon átadódó (angolul: BEARING) erőhatás. A program nem kezelte még a csapágyak oldalirányú erőátadását, emiatt a csapágyak oldalfalával érintkező felületen kellett megoszló erőként megadni a keresztirányú erőket. Ezt követően külpontos erőt helyeztem 85 mm rádiuszban a féknyereg felfogatási pontjaira, a 3.3. összefüggés által meghatározott nagyságban. A kormányzási erő definiálása érdekében a kormányösszekötő rúd becsatlakozási pontjára erőt fejtettem ki az 7. ábrán látható módon.



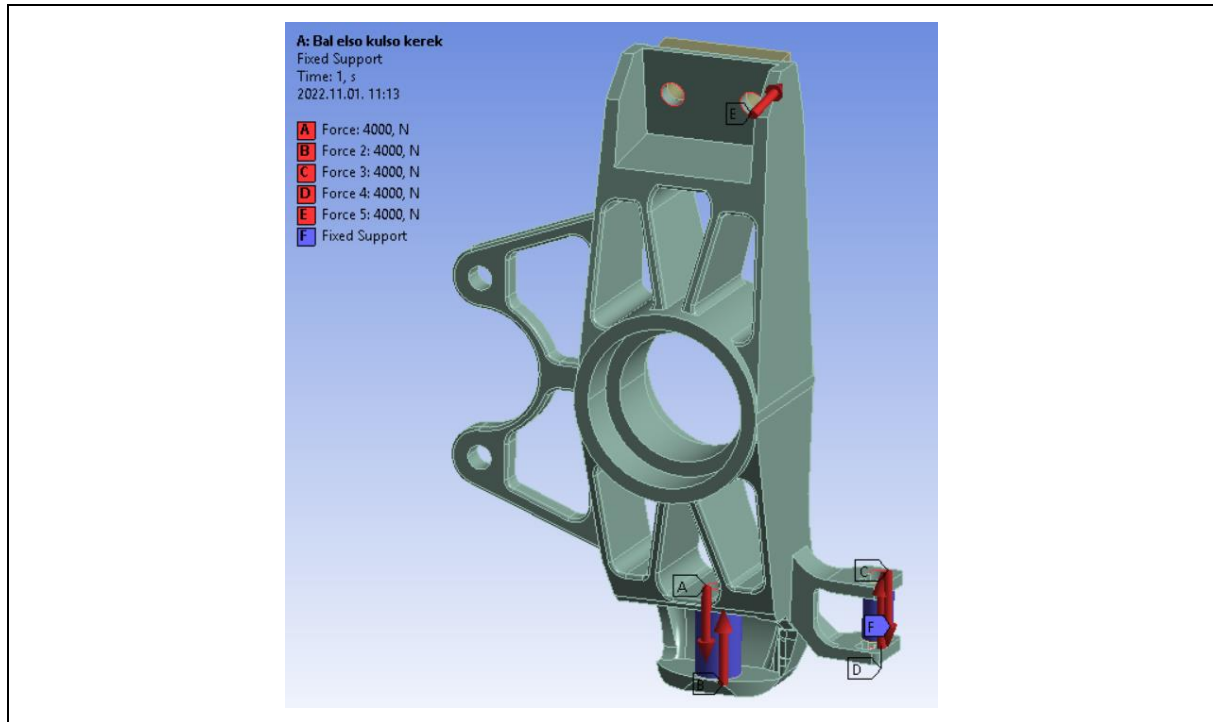
7. ábra: Erőhatások definiálása ANSYS

Kényszereket definiáltam a lengőkarok csatlakozási pontjaiban, törekedve arra, hogy ne legyen túlhatározott a rendszer. Rosszul megadott kényszerek esetén a valóságtól túlságosan eltérő szimulációs értékeket kaphatunk.



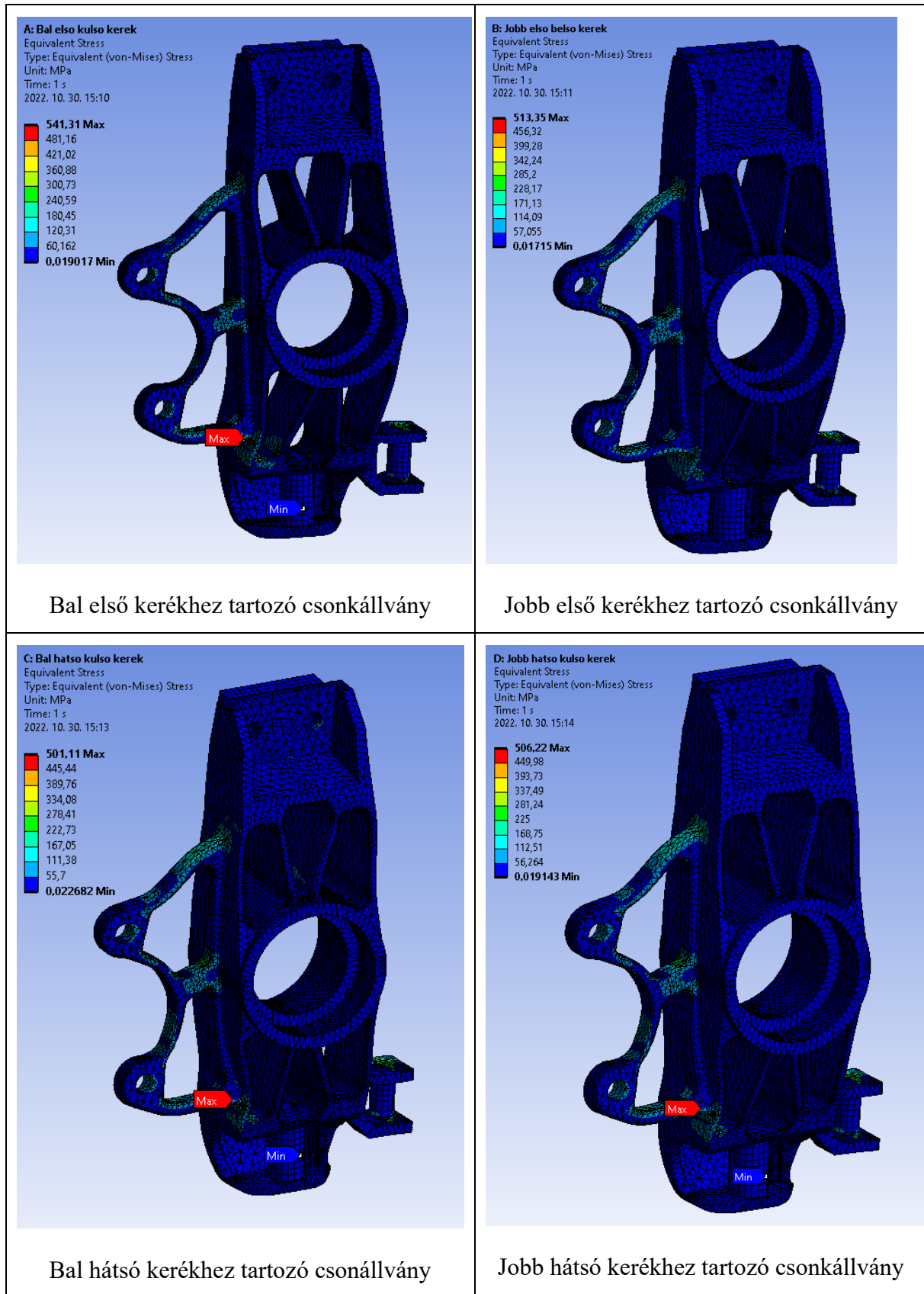
8. ábra: Kényszerek meghatározás ANSYS

A lengőkarok csatlakoztatása tengelyek segítségével történt, melyeket csavar-anyag kombinációhoz hasonló konstrukcióval rögzítettem a csomópontok előre kialakított részeihez. Ennél a rögzítési formánál előfeszítést alkalmaztam, melyet a szerkezetnek szintén ki kellett bírnia. Az előfeszítő erő nagysága más csapatok tapasztalatai alapján megközelítőleg 4000 N. Szintén más csapatok szimulációs tapasztalataiból kiindulva az összeszorítandó felületek közé érdemes betervezni egy olyan hengeres testet, mely a csapra helyezett távtartók, a lengőkarok becsatlakozási pontjának, rögzítésének feladatát hivatott betölteni. Ezek a csomóponttól független testek láthatóak a szimulációim során.



9. ábra: Rögzítési tengelyek és előfeszítése ANSYS

Utolsó lépésként meg kellett határozni, hogy a szimuláció lefutását követően mely eredményeket szeretnénk a kiértékelés során megkapni. Mi a megadott erők és kényszerek hatására a csonkállvány maximális geometriai deformációját (Total Deformation) és a testet érő feszültségeket (Equivalent Stress) vizsgáltuk. A peremfeltételek megadását követően megkezdődhetett a szimuláció, melyet a „solve” (megoldás) parancs segítségével indíthatunk el. A korábban már említett módon az egyes kerekeken ébredő maximális erőhatásokat külön vizsgáltuk. Az eredmények kiértékelését segítette, hogy animáció segítségével figyelemmel tudtuk kísérni az értékek változását 0-tól a maximális értékekig.



10. ábra: A kiinduló csónkállvány Von-Mises feszültségi eloszlása ANSYS

Az eredményeket a jobb átláthatóság érdekében táblázatba foglaltam:

2. Táblázat: A kiinduló csomakállvány szimulációs eredményei ANSYS programban

| ANSYS                  | Kategória              | Tömeg [g] | Anyag          | Maximális feszültség [Mpa] | Minimális biztonsági tényező | Deformáció [mm] |
|------------------------|------------------------|-----------|----------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|
| Kiinduló csomakállvány | Bal első kerék külső   | 530       | 6061 Alumínium | 541                        | 0,51                         | 0,22            |
| Kiinduló csomakállvány | Jobb első kerék belső  | 530       | 6061 Alumínium | 513                        | 0,54                         | 0,22            |
| Kiinduló csomakállvány | Bal hátsó kerék külső  | 530       | 6061 Alumínium | 501                        | 0,55                         | 0,24            |
| Kiinduló csomakállvány | Jobb hátsó kerék belső | 530       | 6061 Alumínium | 506                        | 0,54                         | 0,22            |

A 10. ábra és 2. Táblázat segítségével elmondható, hogy a kiinduló csomakállvány és a választott anyag nem felel meg az általunk elvárt tulajdonságoknak. Habár a deformációs értékeink megfelelő tartományba estek, addig a számunkra fontosabb feszültségi értékek és az abból eredeztetett biztonsági tényező azon kívül. A test deformációit az 1. mellékletben találjuk. Az általunk elérni kívánt szilárdsági tulajdonságok kétféleképpen érhetőek el. Erősebb anyagválasztással, ami általában tömegnövekedéssel jár, vagy egy kedvezőbb strukturális felépítés létrehozásával.

A biztonsági értékek meghatározása a következő összefüggés alapján történik:

$s \sim$  Biztonsági tényező

$R_{EH} \sim$  Ébredő feszültség [MPa]

$\sigma_{max} \sim$  Folyáshatár [MPa]

$$s = \frac{R_{EH}}{\sigma_{max}} \quad [4.4]$$

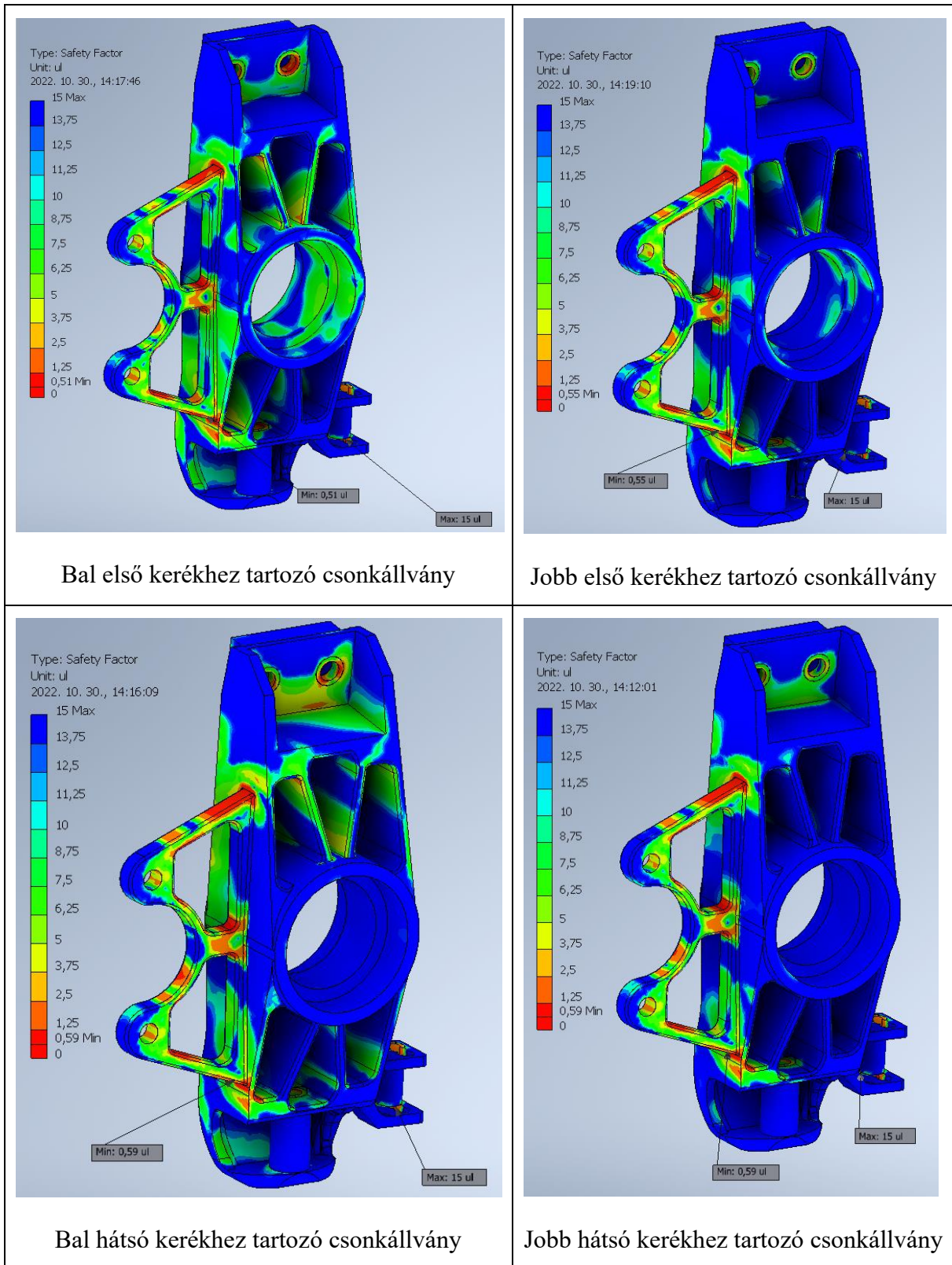
### 3.3. A kiinduló csomakállvány strukturális végelem szimulációja INVENTOR programban

Annak érdekében, hogy pontosabb és biztosabb képet kapjunk a kiinduló és általunk tervezett geometriák strukturális felépítéséről, a szimulációt két eltérő programmal is elvégeztük. A választott második végelem szimulációs program az AUTOCAD INVENTOR volt. A „stress analysis” lehetőség csak az INVENTOR PROFESSIONAL verzióban érhető el.

Az AUTOCAD programokról elmondható, hogy tanulmányként kezeli az összes ilyesfajta szimulációt, ideértve az általunk későbbiekben bemutatott topológiai optimalizációt és generatív tervezést is.

Maga a „stress analysis” (magyarul: feszültség analízis) a programon belül az „enviromental” fül alatt érhető el. Ahhoz, hogy ez a funkció működjön, szükséges volt a nagyobb gépigényű INVENTOR PROFESSIONAL program használata. Itt új tanulmány létrehozása esetén megjelent a felület, ahol a bemeneti paraméterek megadhatóak voltak. A vizsgálandó geometria importálását követően az ANSYS szimulációjához hasonlóan megadtuk a kényszereket a befogási pontokban, majd elhelyeztük a csonkállványt érő erőhatásokat. A fékbetétek 85 mm-es érintkezési rádiuszában definiáltuk a külpontos erőt (angolul: remote force), melyek a nyereg felfogatási pontjaiban fejtették ki hatásukat. Megadtuk a programnak, hogy a keréktalpponti erők a csapágyak „fészkében” fejtsenek ki hatást. Az erőhatások és kényszerek megadásával párhuzamosan megadtuk a vizsgálandó alkatrész anyagát. Itt a kiválasztás mellett lehetőség volt arra is, hogy tetszőleges mechanikai tulajdonságokat adjunk meg. Eltérő a két program között, hogy az INVENTOR az ANSYS-szal szemben képes volt kezelni a csapágyakon keresztirányban ébredő erőket. Ennek ellenére az azonos szimulációs beállítások elérése érdekében azonosan, külön erőként határoztam meg a keresztirányú erőket.

A mesh háló létrehozása az INVENTOR-ban egy puritánabb beállítási panelen volt megvalósítható. ANSYS-ban a mesh, háló beállítására szélesebb beállítási paletta állt rendelkezésünkre. Ahhoz, hogy minél valóságghűbb legyen a szimulációnk, érdemes volt a rendelkezésre álló lehetőségeket minél jobban megismerni. Sok idő és energia megspórolható egy-egy szimuláció során ezen tevékenység gyors abszolválása esetén. A mesh, háló elkészítése után kezdődhetett a szimuláció lefuttatása. A számolást követően a bal oldali információs sávnál volt megtekinthető a test megadott paraméterek szerinti deformálódása, a rajta ébredő feszültségek eloszlása és a test geometriájára jellemző biztonsági tényezők elrendeződése.



11. ábra: A kiinduló csonkállvány szimulációja INVENTOR

Az eredményeket a jobb átláthatóság érdekében táblázatba foglaltuk:

### 3. Táblázat: A kiinduló csomakállvány szimulációs eredményei INVENTOR programban

| INVENTOR               | Kategória              | Tömeg [g] | Anyag          | Maximális feszültség [Mpa] | Minimális biztonsági tényező | Deformáció [mm] |
|------------------------|------------------------|-----------|----------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|
| Kiinduló csomakállvány | Bal első kerék külső   | 530       | 6061 Alumínium | 534                        | 0,51                         | 0,47            |
| Kiinduló csomakállvány | Jobb első kerék belső  | 530       | 6061 Alumínium | 496                        | 0,55                         | 0,4             |
| Kiinduló csomakállvány | Bal hátsó kerék külső  | 530       | 6061 Alumínium | 464                        | 0,59                         | 0,3             |
| Kiinduló csomakállvány | Jobb hátsó kerék belső | 530       | 6061 Alumínium | 467                        | 0,59                         | 0,24            |

Összességében elmondható, hogy az eddigi csomakállvány túl nagy biztonsági tényezővel rendelkezett a geometria számottevő részében, viszont előfordultak részek, ahol a biztonsági tényező nem haladta meg az 1-es értéket az általunk létrehozott végelem szimuláció szerint. A végelem szimuláció során kapott Von-Mises feszültségi és deformációs értékeket az 2. melléklet tartalmazza. Fellelhetőek voltak a testen belül olyan helyek is, ahol nagyobb letörésekre lenne szükség az erők jobb eloszlátása érdekében, helyenként pedig fölösleges az „anyag”: az alkatrész tömeg- és szerkezeti optimalizációra szorult.

Ez a feladat a kutatási munkámban kétféleképpen kerül feldolgozásra:

1. Topológiai optimalizációval
2. Generatív tervezéssel

## **4. A VERSENYAUTÓ CSONKÁLLVÁNYÁNAK TÖMEG- ÉS STRUKTURÁLIS OPTIMALIZÁLÁSA**

Az optimalizálás során egy előre meghatározott szempont vagy kritérium alapján igyekeztem elérni a lehető legjobb állapotot, eredményt. Műszaki életben többféle optimalizációt ismerünk. Ameddig egy gyártási folyamat optimalizálása talán az elterjedtebb, addig egy alkatrész fejlesztésénél a tömeg-, szerkezet-, külső hatásokkal szembeni ellenálló képességének az optimalizálása a leginkább ismert. A tömegcsökkentés történhet a térfogat csökkentésével vagy akár egy kedvezőbb sűrűségű anyag alkalmazásával is. A kutatás során mindkét lehetőséget együttesen alkalmaztam.

### **4.1. Topológiai optimalizáció**

„A topológiai optimalizálás egy olyan kifejezés, mellyel olyan tervezési optimalizálási függvényeket írhatunk le, melyek lehetővé teszik egy strukturális és mechanikai rendszer elrendezésének előrejelzését. Ez azt jelenti, hogy maga az adott struktúra topológiája vagy felülete az eljárás egyik eredménye.” [4] A topológiai optimalizáláson belül elsősorban alakoptimalizálást végeztem, ami azt jelenti, hogy egy már létező, megalkotott konstrukción hajtottam végre térfogatcsökkentést. A tervezést FUSION 360 program segítségével végeztem.

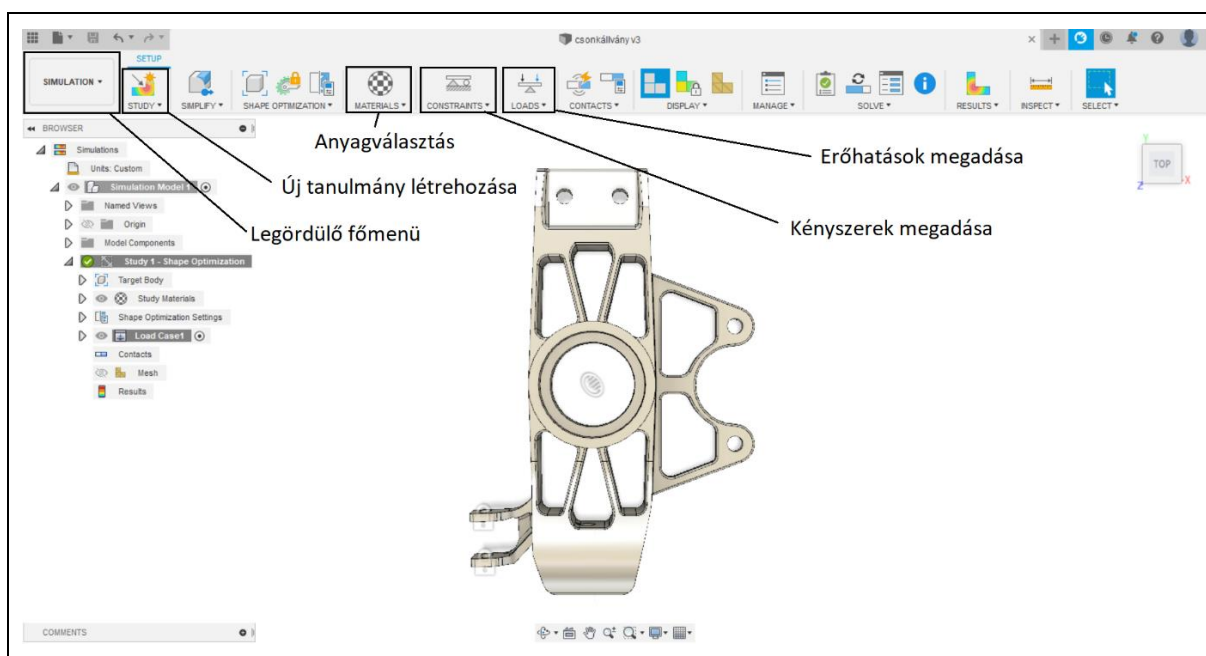
Az egyetemi csapat ezt a programot használja a könnyebb hozzáférhetősége végett. Előnyös, mivel felhőalapú adattárolás segítségével az előre megadott elérési jogoknak köszönhetően mindenki a csapaton belül hozzáférhet és módosíthat a saját munkakörébe tartozó alkatrészekben. Egy tervezés során megadhatók verziószámok az előrehaladás ellenőrzése vagy egy korábbi verzió visszakeresése céljából. Erre igazán nagy szükségem volt most, hiszen a végső eredményeket a beállítások variálásával érhettem el. Amennyiben úgy éreztem, hogy nem a megfelelő irányba haladok, lehetőségem volt egy korábbi kedvezőbb modell tervezésének folytatására.

A csonkállvány betöltését követően kiválasztható volt egy főmenüben (12. ábra bal felső sarka), hogy mit kívánunk tenni az alkatrésszel. A topológiai optimalizáció a „simulation” (szimuláció)

fül alatt volt található, „shape optimization” (alakoptimalizáció) néven. Kiválasztva elének tárul a felület, ahol a folyamatot elvégeztem.

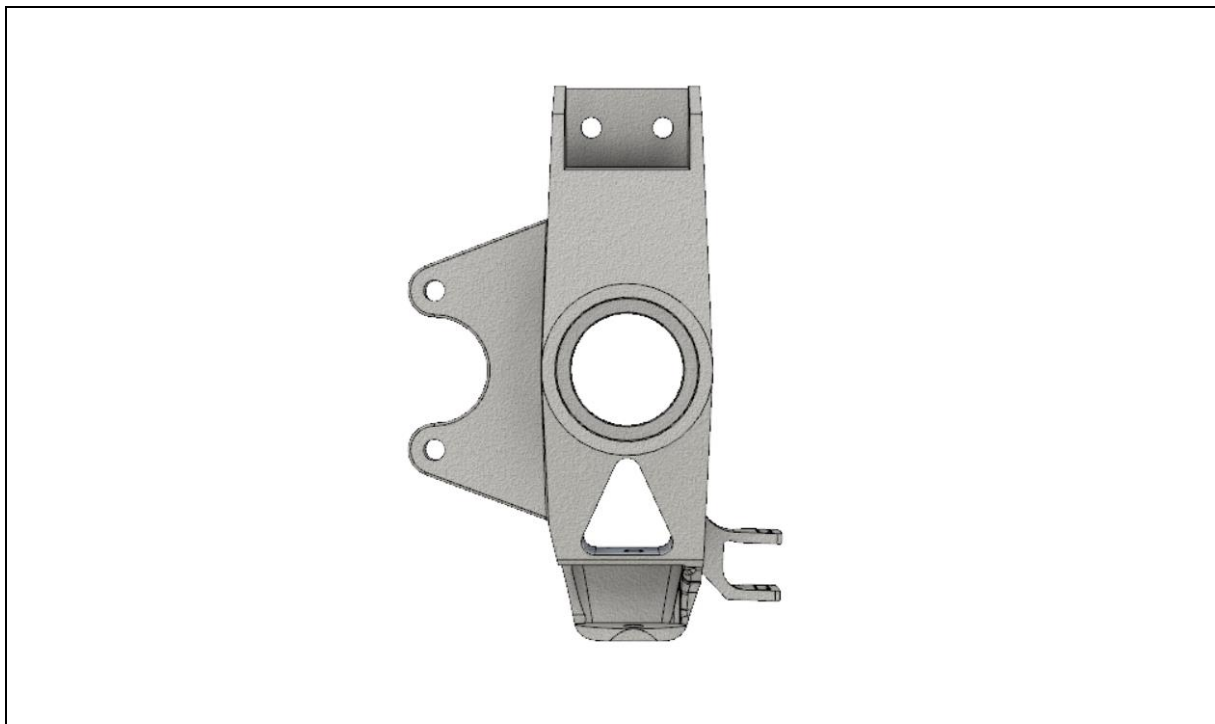
A szimulációs programokhoz hasonlóan erőhatásokat és kényszereket kellett rögzítenünk a kiválasztott geometriához annak érdekében, hogy a rendszer el tudja végezni azt a feladatot, amit megadtunk neki. Mivel az AUTOCAD termékcsaládba tartozik az INVENTOR és a FUSION 360 is, ezért a bemeneti adatok (anyag, erőhatások, kényszerek) megadásának módszere közel azonos volt.

Az alakoptimalizálás során a régi és az új test felépítése közötti különbségek bemutatására szerettem volna több hangsúly fektetni, így vizsgálati anyagként itt is 6061-es alumíniumot választottam. Az erőket az optimalizálás beállítása során nem az eddig leírt módon adtam meg. Míg a szimulációk során különböző eseteket külön kellett vizsgálni, addig itt az összes kritikus erőt egyszerre adtam meg. Ez azt jelentette, hogy a 1. táblázat szerint négy különböző eseményben fellépő kritikus keréktalpponti erőket, melyek a csapágyakat terhelik egyetlen vizsgálaton belül rögzítettem.



12. ábra: Alakoptimalizáló program – FUSION 360

Az első tömeg-optimalizálás során rájöttem, hogy a már létező geometria túlságosan bonyolult egy ilyesfajta szimulációhoz, jobb eredményt tudunk elérni, amennyiben az alakját egyszerűsítjük. Ezt a problémát úgy küszöböltem ki, hogy a már meglévő kikönnyítéseket megszüntettem, ezzel egy olyan alakzatot kapva, ahol az optimalizáló rendszernek minél nagyobb lehetősége van kibontakozni.



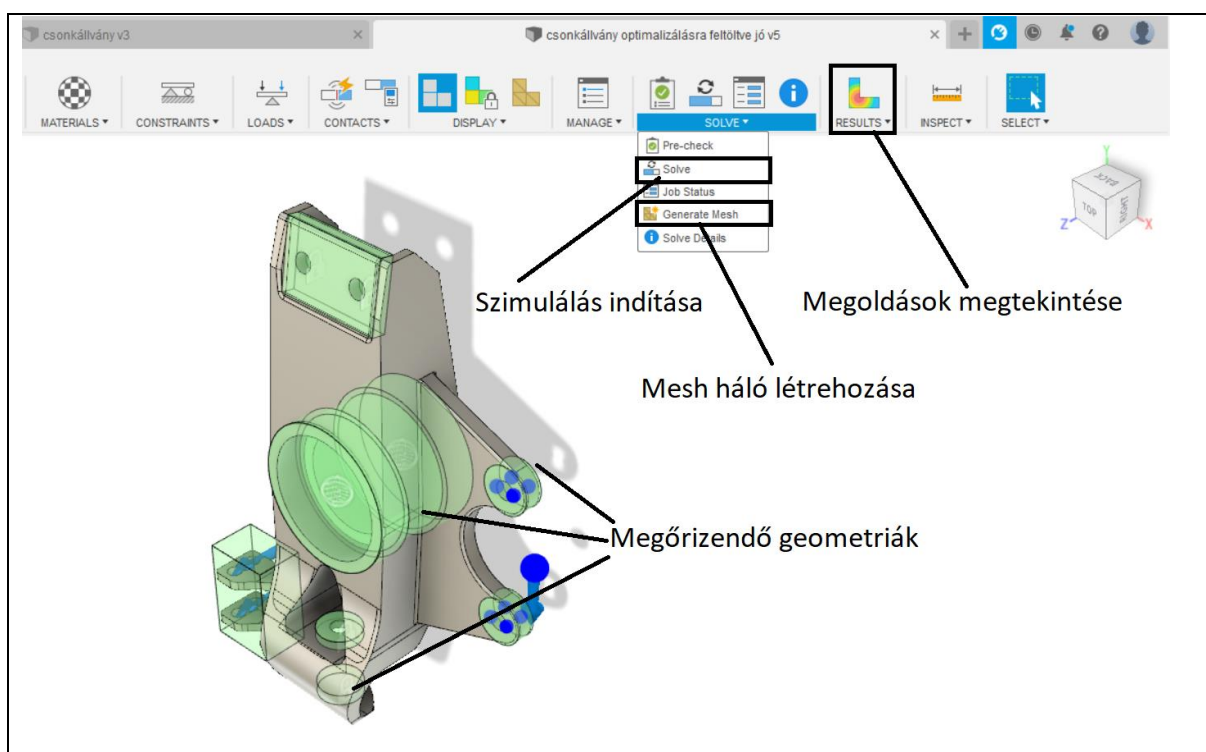
13. ábra: Optimalizálásra előkészített csonkállvány

Mikor kezdetben az eredeti geometriával dolgoztam, az optimalizálás csak a megmaradt bordák mentén történt meg, viszont így egy-egy helyen a csonkállvány többi részéhez képest túlságosan nagy feszültségek keletkeztek. A kikönnyítések megszüntetése mellett egy a csapat által jelzett hiány javításra szorult. Az eddigi csonkállványnál az alsó lengőkar bekötési pontjainál a felső rögzítési lyuk felett a hely túlságosan kevésnek bizonyult egy csavar megfelelő meghúzásához. A verseny során a futómű geometria könnyen és gyorsan állítható kell, hogy legyen, ezért nem volt kérdés, hogy ezt a hibát javítani kell. Közös konzultálás után az 13. ábrán látható hely lett felszabadítva a csavarozáshoz.

Az alkalmazni kívánt geometrián megadható volt, hogy melyek legyenek a testnek azon pontjai, melyek az eredeti formájukban maradjanak meg. Itt a féknyereg felfogatási pontjait, a

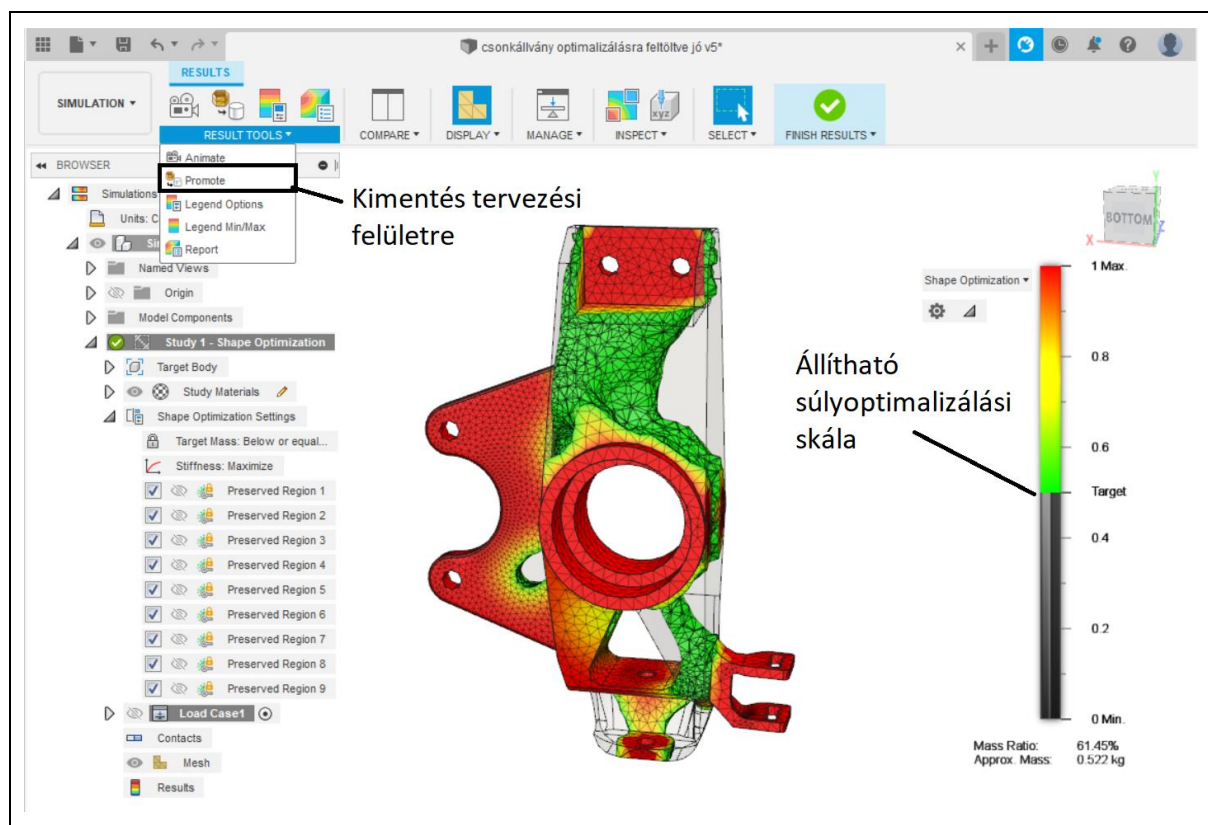
kormányösszekötő rudazat csatlakozási fülét, a csapágyak és a hajtás tengelyének helyét, illetve a lengőkarok rögzítési pontjait jelöltem ki.

A bemeneti adatok beállításakor lehetőség volt a megcélzott tömegcsökkentés meghatározására. Tesztjeim során 40%-os tömegcsökkentés esetén születtek számomra szimpatikus eredmények. A szimulálás a megcélzott érték közelében a leginkább kidolgozott, ennek ellenére a vizsgálat teljeskörű, 0-100%-ig van lehetőség a gép által megalkotott tömegcsökkentés ellenőrzésére. A test optimalizálása a test mesh hálójának létrehozását követően a „solve” parancs segítségével volt elindítható.



14. ábra: Alakoptimalizálás

A program a sikeres lefuttatását követően megjelenítette az eredményeket. Magam részéről hiányosnak találtam, hogy nincs lehetőség arra, hogy megjelenítse a felület a maximálisan és minimálisan ébredő feszültségeket, egyéb hatásokat. Amennyiben létezne ez a tulajdonság, nem feltétlenül lett volna szükséges más programmal szilárdságtani végeselem szimulációt alkalmazni a modellen.



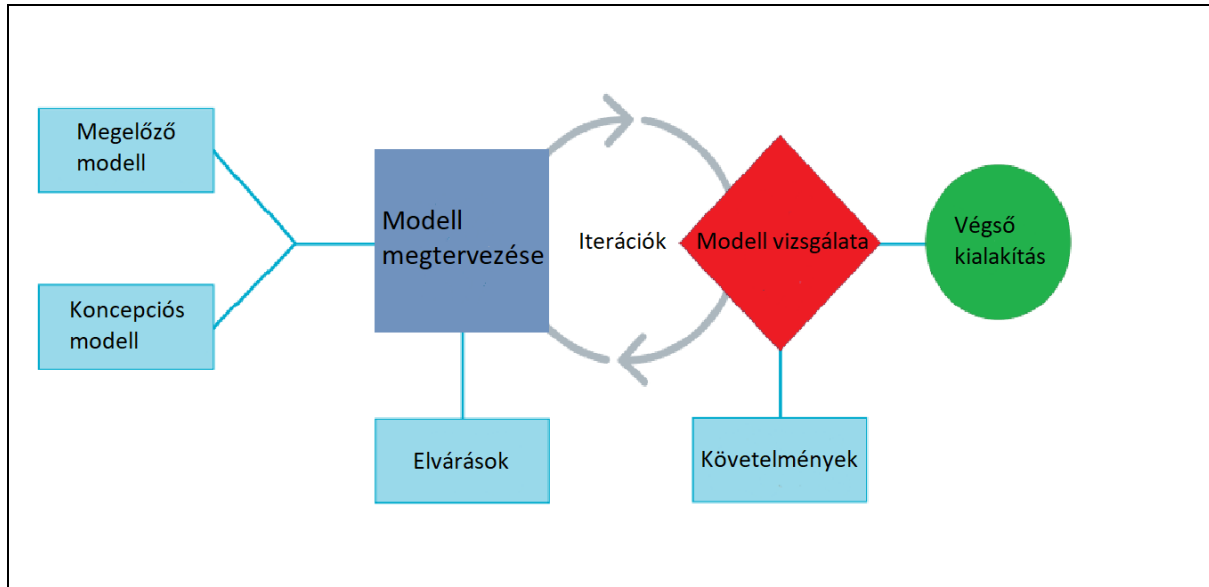
15. ábra: Alakoptimalizálás eredménye

A kiválasztott redukálást követően a program a saját mesh háló formátumába mentette ki a testet. Ezt követően lehetőségünk volt arra, hogy egybefüggő testté alakítsuk a mesh hálót. Nekünk azért volt erre szükségünk, mert a program csak ezt követően engedte, hogy olyan formátumba mentjük ki a modellt, amelyet más program is kezelni képes. Külön funkció áll rendelkezésünkre, amennyiben ki szeretnénk nyomtatni 3D-ben a testet.

#### 4.2. Generatív tervezés

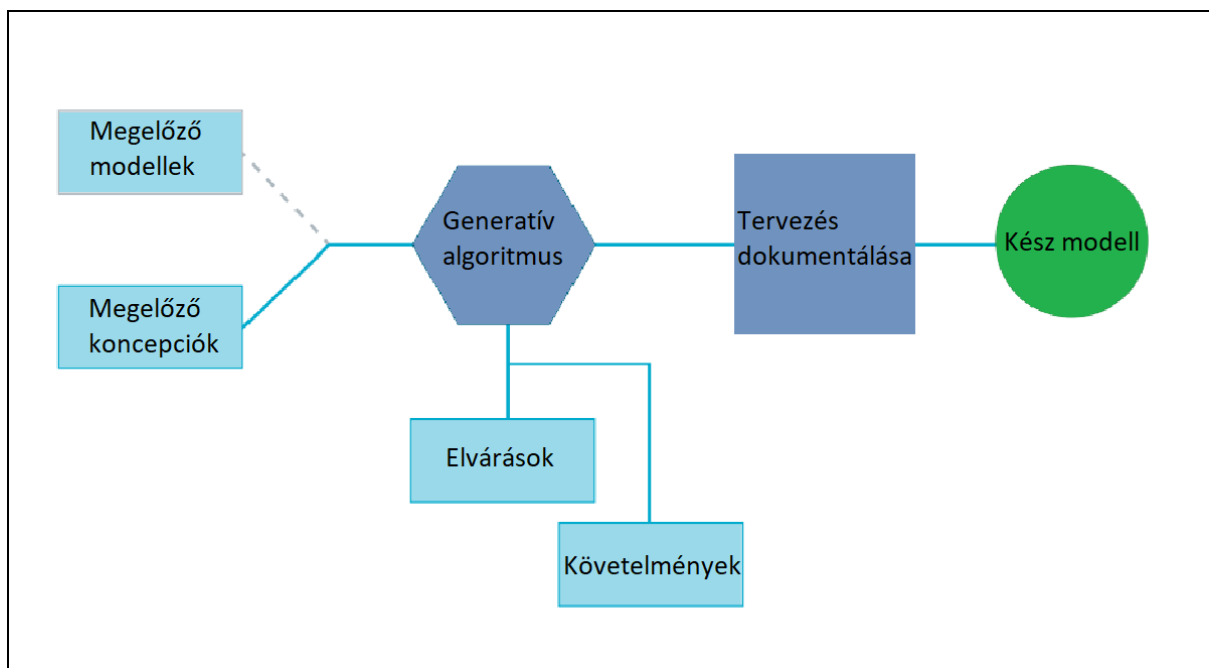
A generatív kifejezés a generál, létrehoz szóból ered. A kiindulási pontokból egy teljesen új formát hoz létre a rendszer. A generatív dizájnál iterálás segítségével fedezi fel a mesterséges intelligencia által felügyelt program a tervezés egymást követő lépéseit. Lépésről lépésre építi fel a geometriát a program, amennyiben az AI úgy érzékeli, hogy nem a megadott cél felé halad az adott lépés, kontrollálja azt. Egyszerre több geometriát épít párhuzamosan és amint úgy érzi a program, hogy eleget tett a beállítási adatoknak, késznek minősíti az adott tervezést. Az általános tervezéseknél sok időt vesz igénybe a teljes folyamat véghezvitele. Általános tervezés esetén az iterációkat a tervezők maguk végzik, így a korábban feljegyzett

hiányosságok javítása során előjöhetnek újabb hibák, melyek kiküszöbölésére ismételten időt és energiát kell befektetni (16. ábra).



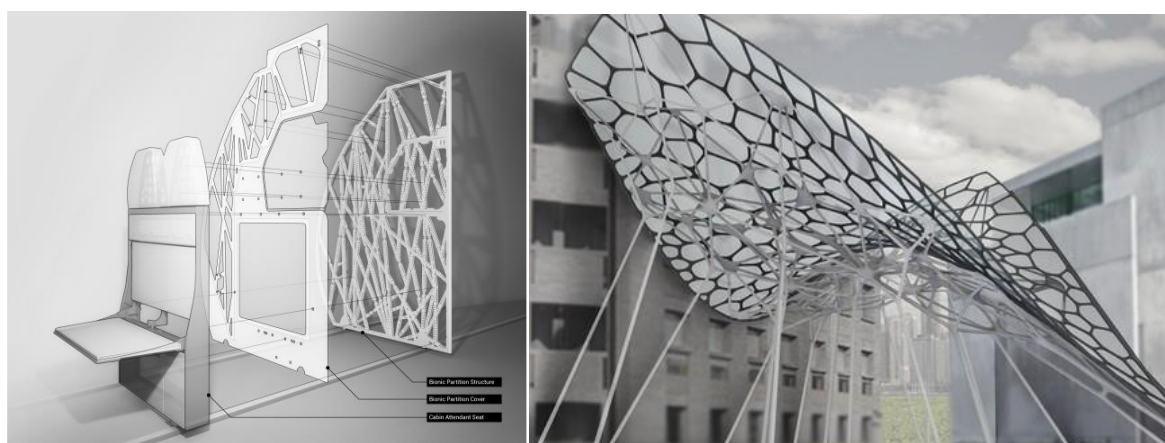
16. ábra: Alkatrész tervezés egyszerűsített folyamatábrája

A generatív dizájn megkönnyíti a tervezést, helyes használata esetén rengeteg tervezési idő és az abba fektetendő energia megspórolható. További előnye, hogy maga a tervezési folyamat is dokumentálásra kerül, így nyomon követhető, hogy iterálásonként milyen állapotban volt a modell (17. ábra).



17. ábra: Generatív tervezés egyszerűsített folyamatábrája

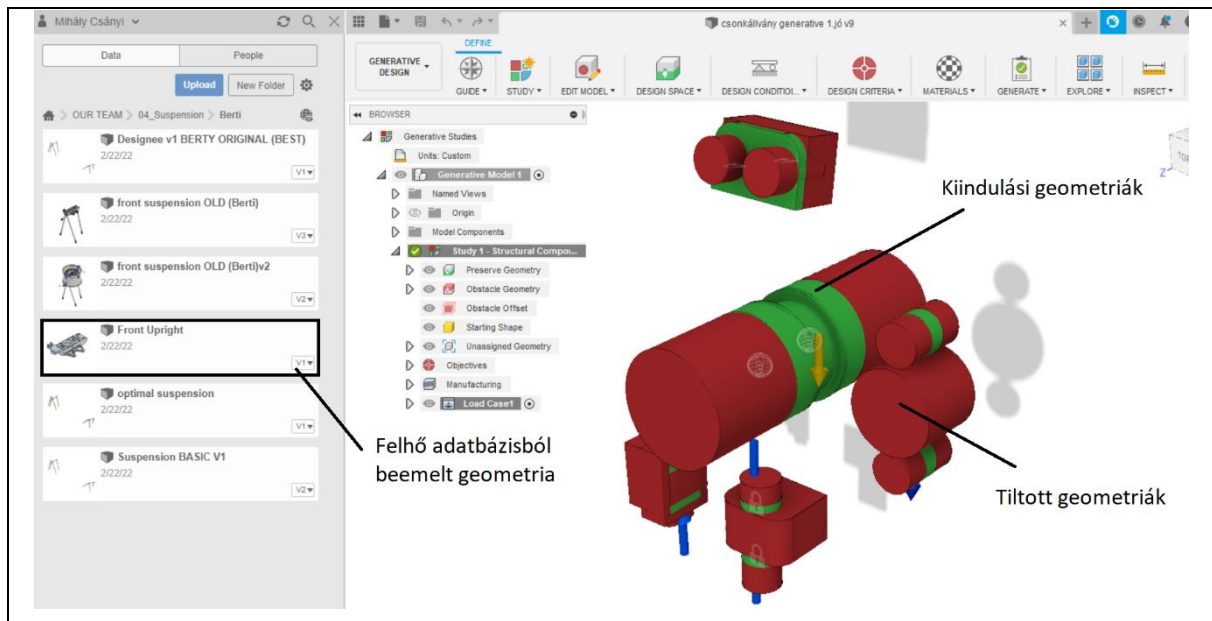
Az efféle tervezési formát nem csak alkatrész tervezésnél, hanem összetettebb rendszereknél, szerkezeteknél is használhatják. Ilyen a repülőgépipar és az építészet. A repülésnél elengedhetetlen a lehető legkisebb össztömeg megvalósítására való törekvés. Ez látható az 18. ábra bal oldali képén, ahol egy Airbus 320-as légijármű belső válaszfal szerkezetének kialakítása történt generatív dizájnnal. Építészetnél az AI segítségével futurisztikus formák (18. ábra jobb oldali kép) és még nem látott formavilág hozható létre.



18. ábra: Példák generatív tervezés használatára

forrás: <https://www.autodesk.com/>

A tervezést FUSION 360 programba hajtottam végre. Egy legördülő menüben a „generative design” fület kiválasztva volt lehetőségünk ennek a tervezési formának a megkezdésére. A felhőalapú adattárolásnak köszönhetően egy új tervezésbe behívtam a csapat csonkállványának modelljét. Ez elősegítette a tervezés előrehaladását, ugyanis így gyorsabb volt a felfogatási pontokat a már létező rögzítési helyekre definiálnom. Első feladatunk az összeköttetendő részek megadása volt. Lehetőségünk volt arra, hogy már előre megtervezett geometriákat jelöljünk ki erre a célra, de a munkafelületen találhattunk olyan parancsot is, mellyel egyszerűbb kiindulási testek voltak készíthetők. Ezek a geometriák zöld színnel jelentek meg a tervezés során. Következő feladatunk az elkerülendő térfogatok megadása volt. Szintén kijelölhetők voltak már előre megalkotott terek, de találhattunk olyan parancsot is, mellyel a kijelölt rögzítési lyukak azonnal elkerülendő helyé változtathatók.



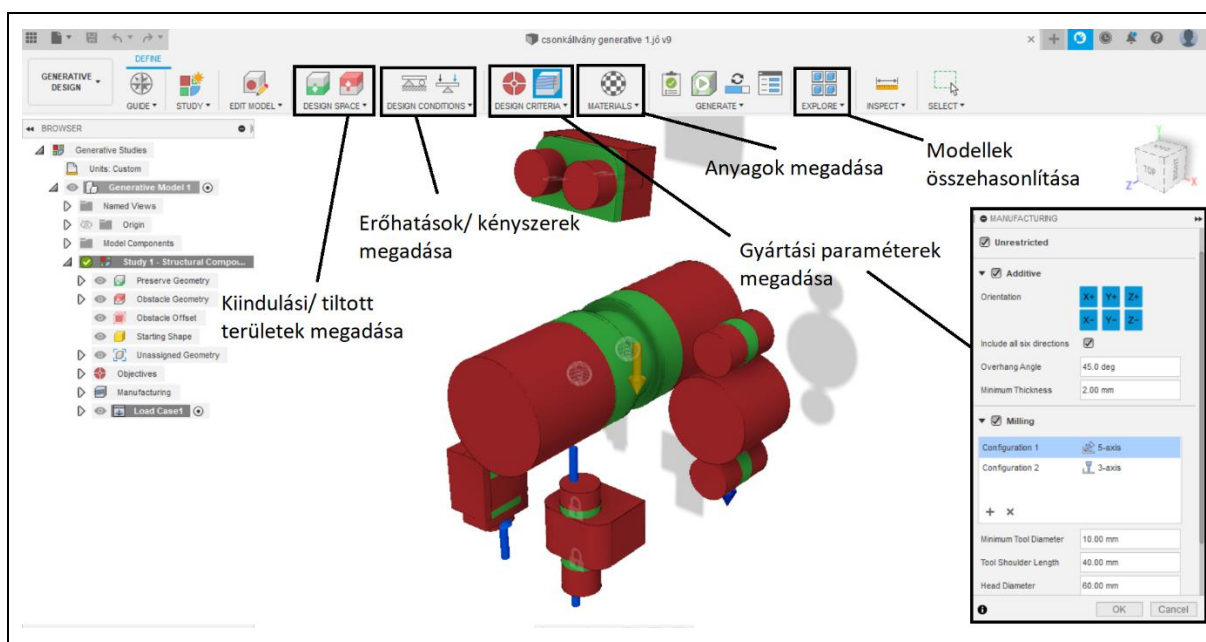
19. ábra: Kiindulási és tiltott geometriák generatív tervezésnél

A kiindulási és tiltott területek megadását követően az erők és kényszerek megadása következett. Itt teljesen azonosan jártam el, mint a topológiai optimalizálás során bemutatott hatások definiálásánál. A 1. táblázatban megjelenített kritikus talpponti erőket egyszerre határoztam meg, ezzel minél érthetőbb helyzetet teremtve a tervező gépnek. A következő lépésnél kiválaszthattam, hogy a program milyen anyagokat vegyen számba az új test megalkotásánál. Az újratervezést négy különböző anyaggal végeztem el, melyek közül az első egy AlSi10Mg ötvözet, második egy jóval keményebb Titán 6Al-4V ötvözet volt. Sima 6061-es alumínium volt a harmadik féle anyagunk, negyedikként rozsdamentes acélt választottam.

4. táblázat: A tömeg- és szerkezeti optimalizálás során használt mechanikai tulajdonságok

|                                   | AlSi10Mg | Titánium 6Al-4V | AISI 304<br>Rozsdamentes acél | Alumínium<br>6061 |
|-----------------------------------|----------|-----------------|-------------------------------|-------------------|
| <b>Sűrűség [g/cm<sup>3</sup>]</b> | 2.67     | 4.43            | 8                             | 2.7               |
| <b>Rugalmassági Modulus [GPa]</b> | 71       | 113.8           | 195                           | 68.9              |
| <b>Poissons tényező</b>           | 0.33     | 0.35            | 0.29                          | 0.33              |
| <b>Folyáshatár [MPa]</b>          | 240      | 882.5           | 215                           | 275               |
| <b>Szakítószilárdság [Mpa]</b>    | 460      | 1034            | 505                           | 310               |

Az anyagok kiválasztását követően megadtam, hogy tömegcsökkentést szeretnék végezni. Ezt követte gyárthatósági paraméterek beállítása. A menüsorban végighaladva több gyártási forma is kiválasztható volt. Itt az additív technológiát (3D nyomtatás), 5 tengelyű forgácsolást, 3 tengelyű forgácsolást és öntészetet adtam meg, mint felmerülő gyártási forma. Az 5 tengelyű forgácsolás esetén lehetőségünk volt megadni a megmunkáló szerszám befoglaló méreteit, így ezzel kalkulálni tudott a gép a geometria felépítése során. Egyes opcióknál a gyártási irány is kiválasztható volt. Igyekeztem minél több, a csapat által megvalósíthatónak vélt bemeneti lehetőséget kiválasztani annak érdekében, hogy a rendszer is minél többszínű megoldási palettát alkothasson. Utolsó lépésként megadható volt továbbá, hogy mekkora minimális anyagvastagságban gondolkozzon a rendszer. Én itt a 2-3 mm vastagságot találtam ideálisnak.



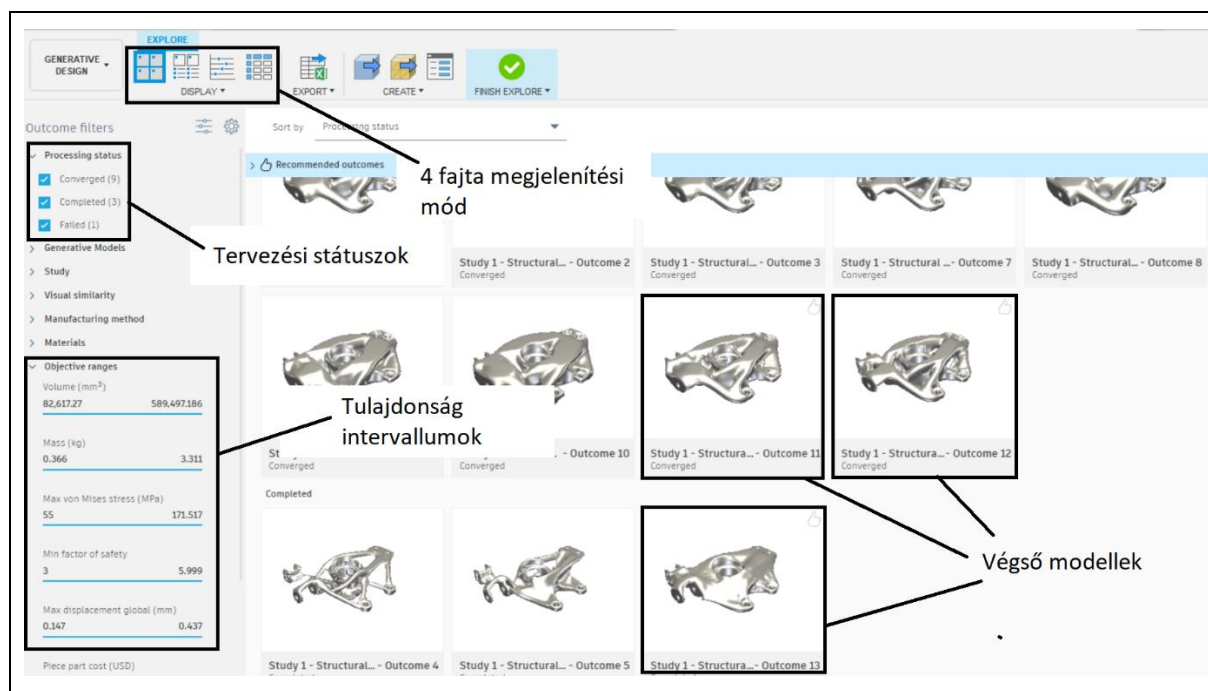
20. ábra: Generatív tervezés lépései

Ahhoz, hogy a FUSION360 programmal el tudjuk végeztetni az alakoptimalizálást és a generatív tervezést, krediteket kellett felhasználni. Ezek a kreditek általánosságban térítés ellenében vehetőek igénybe, de a jogviszonnyal rendelkező hallgatók a student verzió megigénylését követően mentesülnek a tanulmányok létrehozásáért felszámolt költségek megfizetése alól. A tervezés megkezdését követően a program megkezdte az iterálást, a test

felépítését. Az előrehaladás nyomon követhető volt az erre kialakított panelen. Négy különböző státusszal találkozhattunk a folyamat során:

- Processing: A tervezés folyamatban van
- Failed: A tervezés nem ment végbe, nem sikerült a beállítási paraméterek megvalósítása
- Completed: A folyamat befejeződött, de nem sikerült az összes beállított célt elérni
- Converged: A folyamat befejeződött, minden beállított célt sikerült teljesíteni

Ezen a felületen lehetőségünk volt egy bal oldali sávban az általunk ideálisnak talált tulajdonság tartományok (tömeg, maximálisan ébredő feszültség, biztonsági tényező, ...) és tervezési/ gyártási tulajdonságok (tervezés állapota, gyártás fajtája, ...) beállítására. Így csak azok a tesztek jelentek meg, amelyek eleget tettek az általunk megadott értékeknek. A készülő/elkészült tesztek összehasonlítását a program négy különböző módon tette lehetővé. Az első kettő módszer közötti különbség annyiban nyilvánult meg, hogy míg a kettes számú elrendezés megjelenítette a tesztek tulajdonságait, addig az első ezt nem tette, csupán egy egyszerűsített képet kaphattunk a geometriákról. A hármas számú összehasonlításnál egy koordináta-rendszerrel mutatta be az alkatrészek tulajdonságait a rendszer. A tengelyek tulajdonságait az említett oldalsáv szerint tudtam beállítani, ezzel tetszőleges koordináta-rendszereket alkotva. Én a tömeg-biztonsági tényező és a biztonsági tényező- ébredő maximális feszültségek szerint vizsgáltam az alkatrészeim. Az utolsó elrendezési fajtánál listaszerűen rendszerezte modelljeinket a tervezőprogram. Ezt a fajta rendszerezést használtam a legritkábban. Az 21. ábrán látható összehasonlításon kívül bemutatott többi rendszerezést a 4. melléklet jeleníti meg.

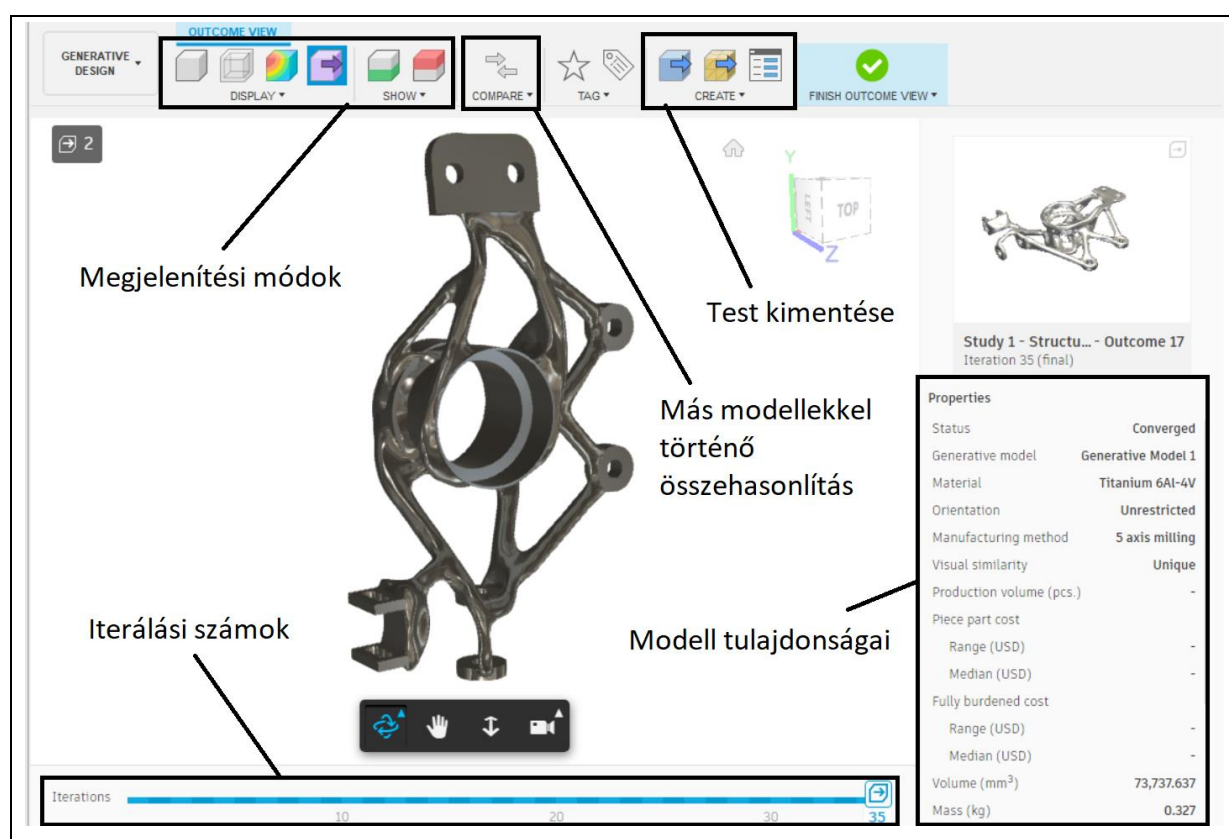


21. ábra: A modellek összehasonlítását segítő csoportosítások

A felsorolt módszerek segítségével nekiláttam a számomra szimpatikus geometriák kiválasztásának. Elsősorban tömeg szerint rangsoroltam a testeket. Ez azért volt fontos, mert célként a tömegcsökkentést és a szerkezet optimalizálását tűztem ki. A tömeg mellett szerettem volna, ha a test maga megvalósítható, így figyelembe kellett vennem a gyártási módszert is. Utolsó dolog, amit a listázásból ki lehetett szűrni és figyelembe vettem, az a biztonsági tényező volt. A szimpatikus testek kiválasztását követően megnyitottam őket, hogy közelebbről szemügyre vehessem a felépítésüket. Ez egy elengedhetetlen lépés, mivel itt derülhetnek ki a beállítási hibák. Előfordult, hogy a tiltott területek mérete nem volt elegendő, így oda is tervezett a program geometriát, ahol már találkozott volna más alkatrészekkel. Ilyenkor a beállításokban javítani kellett a hibát, majd a generálást előről kellett kezdeni. Amennyiben nem találtam olyan testet, ami megfelelt volna az elvárásaimnak, szintén állítani kellett a bemeneti tulajdonságokon. Nem használtam még ezt a fajta tervezési módot ennyire fontos alkatrészhez, így sokszor kellett a megadott paramétereken változtatnom. Ennek ellenére mégsem a beállítás tartott a leghosszabb ideig, hanem amíg a rendszer legenerálta a modelleket. Szerencsére a tervezés maga nem a gépen, hanem a “felhőben” történt, így az iterálási idő alatt mással is lehetett foglalkozni. Ez egy nagyon fontos előnye az ilyesfajta tervezési

mechanizmusoknak. Igyekeztem minél nagyobb mennyiségű bemeneti adatot beállítani annak érdekében, hogy minél több és minél különbözőbb megoldások születhessenek. Ez persze nagyban befolyásolta a tervezési időt.

Amennyiben találtam olyan geometriát, amely megfelelt az elvárásaimnak, azt ki kellett mentenem az adott tanulmányból. Csak ezt követően volt lehetőségem olyan formátumba exportálni, hogy azt kezelni tudjam INVENTOR, majd ANSYS szimulációs programmal. A választásom a program leírása szerint egy olyan test, amely 5 tengelyű forgácsolással, titán 6Al-4V anyagból készült, 2-es biztonsági tényezővel rendelkezik és össztömegét tekintve 327g-ot nyom.



22. ábra: Kiválasztott, generatív tervezéssel készült csonkállvány

Meglepődtem, hiszen ez a fajta ötvözet egy jóval sűrűbb anyag, mint az alumínium, mégis annnyival kevesebb mennyiség került felhasználásra, hogy össztömegét tekintve sikeresnek mondható a tömegcsökkentés. Ez részben az anyag mechanikai szilárdságának köszönhető. A testet érő külső hatásokkal szembeni ellenállóságot, a csonkállvány strukturális szilárdságát a szimulációs programok segítségével tudjuk értékelni.

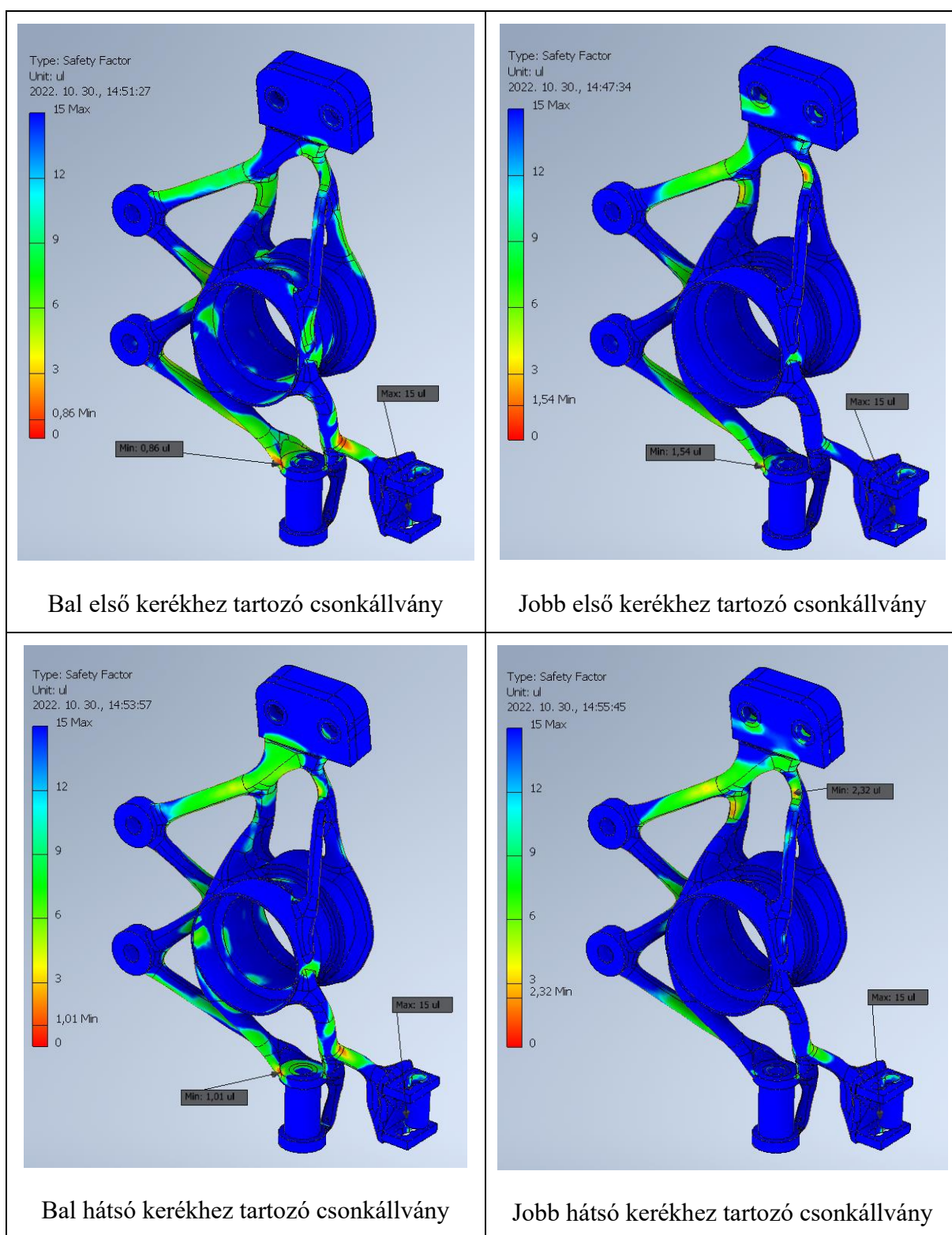


## **5. A MEGTERVEZETT CSONKÁLLVÁNYOK FELÉPÍTÉSÉNEK VÉGESELEM SZIMULÁCIÓVAL TÖRTÉNŐ VIZSGÁLATA**

Az optimalizált testeket is szimulációnak vetettem alá, így tudtam ellenőrizni a tervezés hitelességét. Először INVENTOR programban vizsgáltam a testeket. Első körben a generatív dizájnnal tervezett alkatrészen végeztem szimulációt. A tervezés során figyeltem arra, hogy a kiinduló geometriáknak azon csatlakozó részei, melyek szabadon kell, hogy legyenek hagyva a szimuláció segítése végett, tiltott zónákkal szükséges, hogy érintkezzenek. Ennek köszönhetően a csatlakozási pontok járművön belüli koordináta pontjai nem változtak, így az új testre ugyanazon erőhatásokat és kényszereket helyeztem el, mint a kiinduló testünkre. A szimulációkat az 3.3. részben bemutatott módon végeztem. A szimulációt követően megvizsgáltam és összevetettem az eredményeket a kiinduló test eredményeivel.

### **5.1. Generatív tervezéssel készült csonkállvány strukturális szimulációja INVENTOR programban**

A generatív dizájnnal készült test szimulációs tanulmányában a következő eredmények születtek:



23. ábra: Generatív dizájnnal készült csomakállvány biztonsági tényezőjének eloszlás

Az eredményeket a jobb átláthatóság érdekében táblázatba foglaltuk:

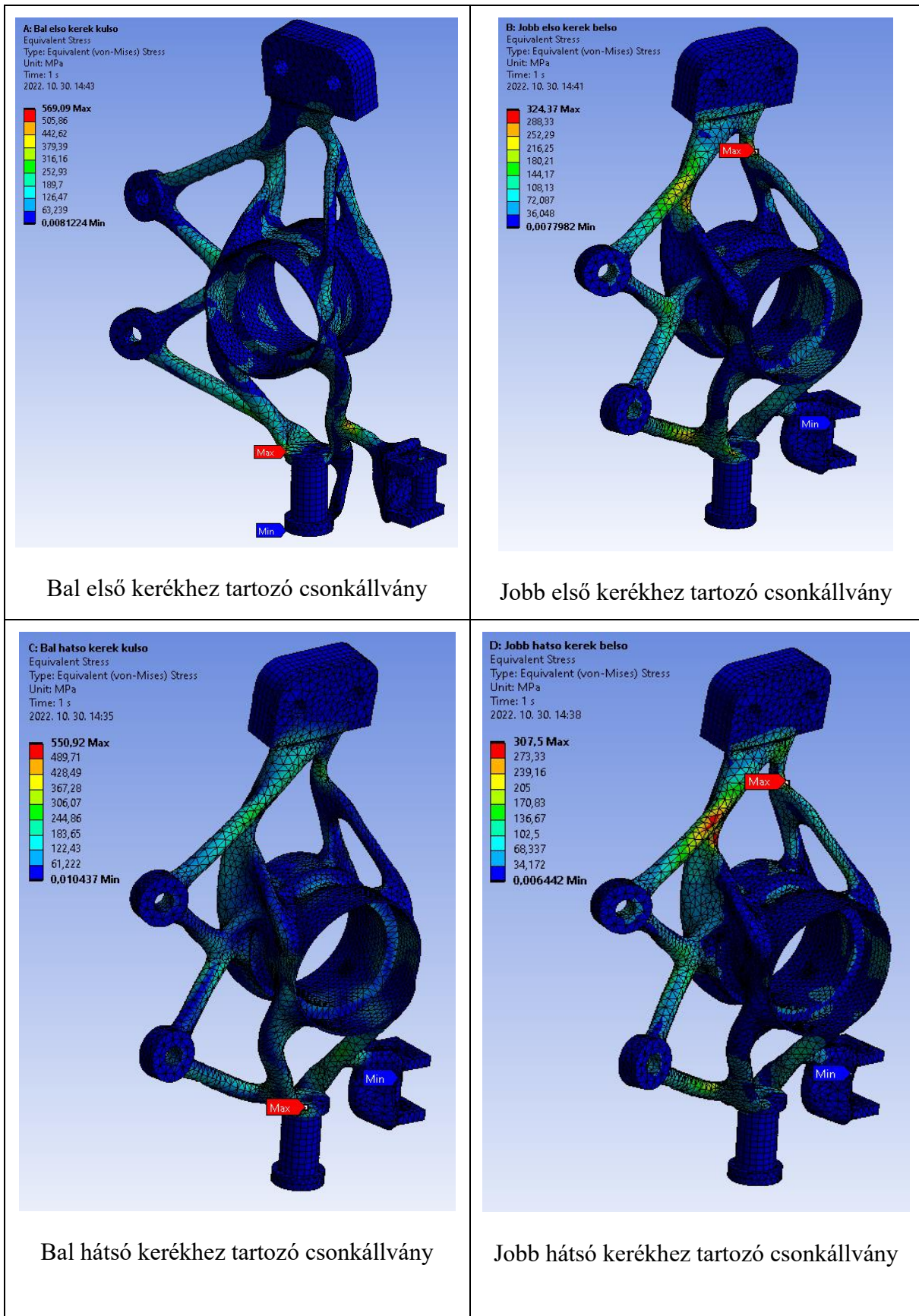
5. Táblázat: A generatív dizájnnal készült csonkállvány szimulációs eredményei

| INVENTOR                  | Kategória              | Tömeg [g] | Anyag        | Maximális feszültség [Mpa] | Minimális biztonsági tényező | Deformáció [mm] |
|---------------------------|------------------------|-----------|--------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|
| <b>Generatív tervezés</b> | Bal első kerék külső   | 327       | Titán Al6-V4 | 1021                       | 0,86                         | 1,28            |
| <b>Generatív tervezés</b> | Jobb első kerék belső  | 327       | Titán Al6-V4 | 571                        | 1,54                         | 0,79            |
| <b>Generatív tervezés</b> | Bal hátsó kerék külső  | 327       | Titán Al6-V4 | 877                        | 1,01                         | 1,2             |
| <b>Generatív tervezés</b> | Jobb hátsó kerék belső | 327       | Titán Al6-V4 | 380                        | 2,32                         | 0,63            |

A végeelem szimulációk eredményeinek ábrán és táblázatban történő megjelenítésének segítségével megállapítható, hogy az új generatív tervezéssel létrehozott csonkállvány a tömegcsökkentés ellenére magasabb és számunkra optimális biztonsági tényezővel rendelkezik. Sajnos a bal első kerék és bal hátsó keréknél a maximálisan ébredő feszültség kimagaslóan nagy. A hiba eredete a generatív tervezéssel készült csonkállványon egyértelműen azonosítható és megmagyarázható: Az egyik csatlakozási fülnél a mesterséges intelligencia úgy építette fel a modellt, hogy a tiltott zóna kikerülését mellőzte, csupán utólag „kimarta” a megtervezett geometriából, ezzel olyan lekerekítés nélküli sarkot létrehozva, ahol összpontosulni tudnak a feszültségek, ezzel meghaladva az elvárt értékeket. Ezt a felmerülő hibát úgy igyekeztem kikerülni, hogy nagyobb biztonsági tényezőt adtam meg egy új csonkállvány tervezésekor. Az alkalmazott javítás ellenére a probléma ismét felmerült, folyáshatáron túli értékek ébredtek abban az egy pontban. A bemutatott hibán túl elmondható, hogy a közel 40%-os (37,4%) tömegcsökkenés számottevő, az újratervezett csonkállvány geometriája jobban ki van használva, mint a kiinduló csonkállvány geometriája. Míg a kiinduló csonkállvány szimulációján (10. ábra és 11. ábra) jól látható, hogy sok olyan rész van, ahol állandó jelleggel magas a biztonsági tényező, addig az AI által felügyelt iterációs tervezésnek köszönhetően a test részei közel azonosan terhelődnek. A test deformáció elfogatható tartományon belülre tehetőek. A program által meghatározott Von-Mises féle feszültséget és deformációt az 2. melléklet tartalmazza.

## **5.2. Generatív tervezéssel készült csomakállvány strukturális szimulációja ANSYS programban**

INVENTORBAN történő szimuláció után megismételtem a szimulációt ANSYS programban is, ezzel tisztább összképet kapva a testek felépítéséről. A szimulációkat a 3.2. részben bemutatott módon hajtottam végre. Az eredmények az előbb látott módon összesítésre kerültek táblázatban és 24. ábrák segítségével.



24. ábra: Generatív dizájnnal tervezett csunkállvány Von-Mises feszültségi eloszlása

Az eredményeket a jobb átláthatóság érdekében táblázatba foglaltuk:

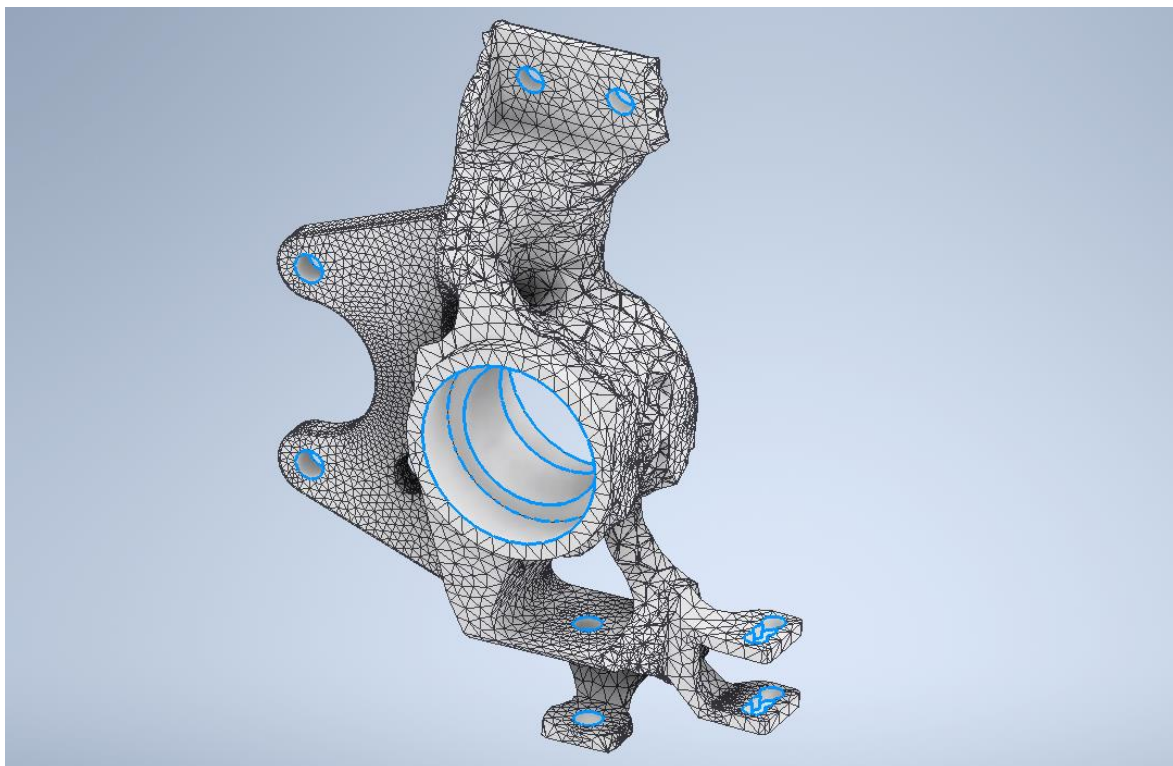
6. Táblázat: Generatív dizájnnal tervezett csomakállvány szimulációs eredményei

| ANSYS                     | Kategória              | Tömeg [g] | Anyag        | Maximális feszültség [Mpa] | Minimális biztonsági tényező | Deformáció [mm] |
|---------------------------|------------------------|-----------|--------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|
| <b>Generatív tervezés</b> | Bal első kerék külső   | 327       | Titán Al6-V4 | 569                        | 1,55                         | 1,1             |
| <b>Generatív tervezés</b> | Jobb első kerék belső  | 327       | Titán Al6-V4 | 324                        | 2,7                          | 0,78            |
| <b>Generatív tervezés</b> | Bal hátsó kerék külső  | 327       | Titán Al6-V4 | 551                        | 1,6                          | 1,31            |
| <b>Generatív tervezés</b> | Jobb hátsó kerék belső | 327       | Titán Al6-V4 | 308                        | 2,87                         | 0,73            |

A szimuláció során számunkra kedvező értékek születtek. Elmondható, hogy a két különböző program eredményei közel azonosak, az eredmények egymást erősítik. A különbség a 5.1.-es témában taglalt kritikus feszültségi helyen mutatkozik meg, ahol INVENTOR-ban készült szimulációval szemben itt elfogadható értékek mutatkoztak. Ezen szimuláció is megerősíti, hogy az erőhatások a teljes geometrián megoszlanak, redukálásra kerültek a terheletlen részek. A test deformációját a 2. melléklet mutatja be.

### 5.3. Alakoptimalizálással készült csomakállvány strukturális szimulációja

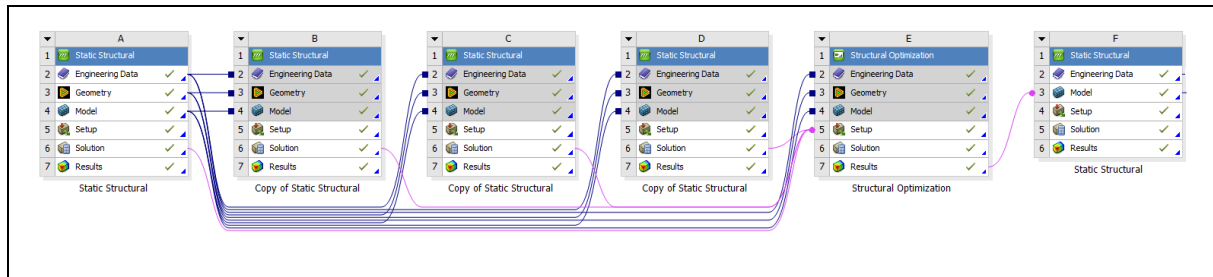
Megvizsgáltam az alakoptimalizálás során megalkotott testünk is. A tervezést követően sajnos nem találtam egyik programban sem olyan módszert, mellyel a feldarabolt test felülete ismét olyan formába önthető lett volna, hogy arra gond nélkül kényszereket és erőhatásokat tudnánk elhelyezni. Ezeket a felületeket egybefüggő felületként lenne szükséges kezelni. A szükséges módszer hiányában a problémát úgy oldottam meg, hogy a kezelendő felületekből 0,1 mm kivágtam, ezzel mérhető felületet teremtvé. Ezt a csapágyak fészkeiben, lengőkarok és kormányösszekötő rúd csatlakozási pontjaiban, valamint a féknyereg felfogató pontjaiban hoztam létre (25. ábra).



25. ábra: Optimalizálásra előkészített test

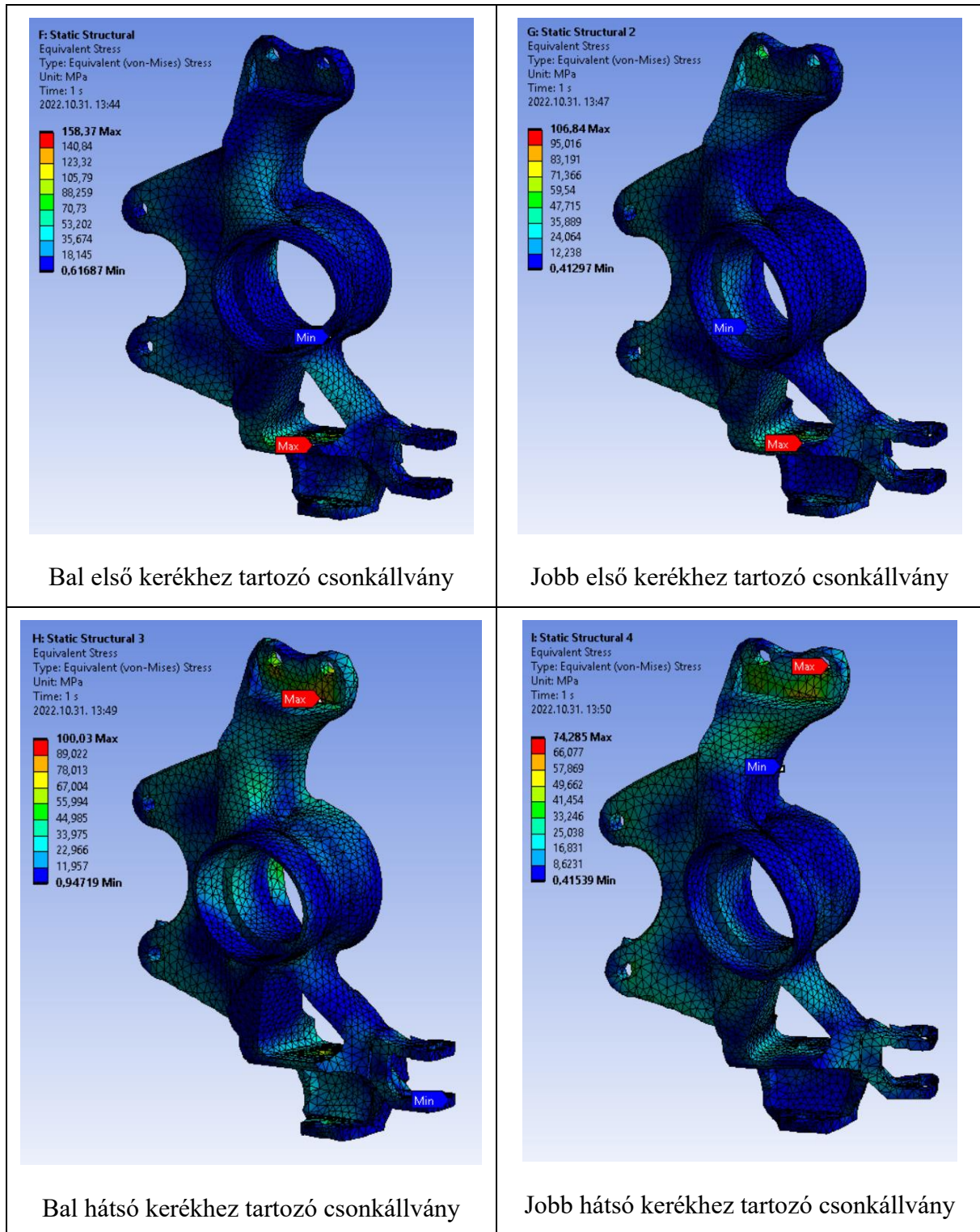
Az alkatrész szimulációra történő előkészítését INVENTOR programban végeztem. Ez a módszer működni látszott, így az újonnan megalkotott testen kezdtem hozzá a szilárdságtani szimulációhoz. Az erőhatásokat, kényszereket az 3.3. részben bemutatott módon adtam meg, majd a szimulációt is ezen leírás alapján hajtottam végre. A 3. témában bemutatott módszerhez hasonlóan mesh hálót próbáltam hozzáadni az optimalizált csonkállványhoz, de sajnos a test töredezettsége miatt ez sikertelen volt INVENTOR, ANSYS WORKBENCH és FUSION 360 programban is. Létezett lehetőség az ilyen testek úgynevezett lyukainak, réseinek és hibáinak a javítására, de ezeket végrehajtva sem sikerült olyan formára alakítani a testet, hogy arra bármelyik program segítségével mesh hálót lehessen létrehozni. A topológiai optimalizálás által elérhető eredményekkel kapcsolatban nagy elvárásaim voltak, így a tervezést másik programban is végrehajtottam. ANSYS WORKBENCH programot választottam optimalizálási programként, melyben kiindulásként a már egyszer végrehajtott strukturális szimulációt kellett alkalmaznom, annyi különbséggel, hogy a szimulálni kívánt test az 4.1. rész szerinti optimalizálásra előkészített csonkállvány. Az 3.2. rész alapján elvégzett végelem elemzést követően az eredményeket hozzárendeltem a programban fellelhető topológiai optimalizálási folyamathoz. Itt lehetőségem van arra, hogy kiválasszam az optimalizálás szempontját, és annak nagyságrendjét. A tömegcsökkentés érdekében 50%-os térfogatcsökkentést rendeltem el.

Az iterálások befejezését követően a végső testen ismételt strukturális végelem szimulációt kellett végrehajtani a megalkotott test kielemezése érdekében.



26. ábra: Folyamatábra az ANSYS programban végzett optimalizálásról

Mivel egy tanulmányban végeztem az előbb említett szimulációkat, így az erőhatásokat és kényszereket nem kellett még egyszer betáplálnom, a program átemelte őket a megelőző elemzésből. Az alakoptimalizálás során megalkotott test komplexitásából adódóan erre a testre történő mesh háló létrehozása körülményes, sikeres elvégzése időigényes, tapasztalatot igényel. A program hallgatói verziójának használatából adódóan egyes specifikációk beállítási tartománya korlátozva van. Ennek következtében a tervezés és szimulálása általános minőségű, pontosabb mérésekhez elengedhetetlen ezen korlátozások feloldása, ahogy szükség van a minőségi munkához egy a program használatára alkalmas számítógépre is.



27. ábra: Alakoptimalizálással tervezett csomópont Von-Mises feszültségi eloszlása, deformáció szemléltetése mellett

7. Táblázat: Alakoptimalizálással tervezett csomópont szimulációs eredményei

| ANSYS                    | Kategória                 | Tömeg<br>[g] | Anyag             | Maximális<br>feszültség<br>[Mpa] | Minimális<br>biztonsági<br>tényező | Deformáció<br>[mm] |
|--------------------------|---------------------------|--------------|-------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| <b>Alakoptimalizálás</b> | Bal első kerék<br>külső   | 428          | 6061<br>Alumínium | 158                              | 1,74                               | 0,21               |
| <b>Alakoptimalizálás</b> | Jobb első<br>kerék belső  | 428          | 6061<br>Alumínium | 107                              | 2,57                               | 0,11               |
| <b>Alakoptimalizálás</b> | Bal hátsó<br>kerék külső  | 428          | 6061<br>Alumínium | 100                              | 2,75                               | 0,19               |
| <b>Alakoptimalizálás</b> | Jobb hátsó<br>kerék belső | 428          | 6061<br>Alumínium | 74                               | 3,71                               | 0,11               |

A szimulációk alátámasztják, hogy egy olyan test került megalkotásra, mely teljes mértékben megfelel az elvárásainknak. A végső modell alakját tekintve nagyon hasonlít a FUSION 360 programban optimalizált csonkállvány alakjához, ezzel megerősítve az optimalizálás során beállított paraméterek helyességét. A kiinduló csonkállványhoz képest, mint egy 20%-os (19,2%) tömegcsökkentés ellenére az optimalizált testünk strukturális felépítését illetően megfelelő szilárdságú. A testünk deformációja mind a négy vizsgált kritikus helyzetben elenyésző. A test deformációit a 3. melléklet tartalmazza.

## 7. ÖSSZEGZÉS

A szakmai munkámban az egyetemi Formula Student csapat versenyautójának egyik futómű alkatrészét vettem alá különböző fejlesztési módszereknek. Ez a járműelem a futómű különböző elemeit összekapcsoló csonkállvány volt. Egy volt egyetemi hallgató által tervezett kiinduló test tömege 530 gramm volt. Célként a csonkállvány tömeg- és strukturális felépítésének optimalizálását tűztem ki. Az újratervezéseket FUSION 360 és ANSYS programok segítségével végeztem. Eredményeimet végeelem szimuláció segítségével ellenőriztem, majd hasonlítottam össze egymással és a kiinduló test tulajdonságaival. Ehhez az INVENTOR PROFESSIONAL és ANSYS program strukturális végeelem szimulációit használtam. A vizsgálatok során megismerhettem a csonkállványok külső hatásokkal szembeni ellenállóságát, tisztább képet kaptam a testekben megoszló feszültségekről és a várható deformációs értékek nagyságáról, térbeli irányultságáról.

Összességében elmondható, hogy mindkettő újratervezett csonkállványnál javulás volt kimutatható a testek tömegét illetően. Generatív tervezéssel 327 grammig, topológiai optimalizáció segítségével 428 grammig sikerült redukálni az értékeket. Amennyiben a járművek minden alkatrészén 20%-hoz közeli, vagy azon túlmutató tömegcsökkentést lehetne elérni, jelentős javulás történne üzemanyagfogyasztás és menetdinamikai tulajdonságok terén is. Optimalizálás során sikerült azt a célt is elérnünk, hogy a tömegcsökkentés ellenére ne csökkenjen a csonkállványok felépítésének strukturális szilárdsága. Ezzel megőrizve, esetleg növelve a használat biztonságosságát.

Az elkészített két csonkállvány közül, amennyiben lenne rá lehetőség, hogy legyártsunk a versenyautóhoz egy prototípust, én a topológiai optimalizáláshoz kapcsolódó alakoptimalizálással készült modellt választanám. A generatív tervezésnél, habár olyan formavilággal dolgozhatunk, mellyel fel tudjuk hívni járműtervezésünk módjára a figyelmet, sajnos ez a fajta tervezési módszer véleményem szerint még nem kiforrott. Ezt erősíti a generatív test végeelem szimulációi során feltárt alakhiba is. Szintén a topológia optimalizáció mellett szól, hogy ezzel a módszerrel megalkotott geometria sokkal kedvezőbb deformációs értékekkel rendelkezik, mint a generatív tervezéssel készült geometria. Sikerült megőrizni a 0,2 mm-hez közeli deformációs értékeket. Ez a mesterséges intelligencia által felügyelt tervezésnél meghaladta az 1 mm-t. Elmondható, hogy tömegcsökkentés terén nem értem el

akkora áttörést, mint generatív tervezés esetén, de összességében, mivel a csapat első versenyautójánál egy megbízható konstrukcióra van szükség, így véleményem szerint az alakoptimalizálás módszere az ideális választás.

A jövőben szívesen elvégezném a csonkállványok strukturális analizálását és topológiai optimalizációját egy erre a célra kialakított számítógépen, ahol a geometrián sokkal pontosabb, jobb minőségben lehetne vizsgálatokat végrehajtani. A csonkállvány továbbfejlesztése érdekében vizsgálataimat kiterjeszteném a 6061-es alumíniumtól eltérően olyan anyagokra is, melyeket a csapatnak lehetősége nyílna beszerezni. A vizsgálatok során megismert tervezési formákat előadás formájában népszerűsíteni szeretném a csapaton belül, ezzel lehetőséget teremtve egy minél hatékonyabb versenyautó létrehozására. Az első versenyautó megépítése jelenleg is folyik, a végleges járműkonstrukciót a csapat a 2023-as év tavaszán szeretné egy rollout (bemutató) esemény során bemutatni.

A generatív tervezés és az alakoptimalizálás során olyan tapasztalatokra tehettem szert, melyeket később biztos vagyok benne, hogy valamilyen formában hasznosítani tudok alkatrésztervezéssel kapcsolatban. A projekt véghezvitele során végesem szimulációval kapcsolatban is értékes tapasztalatokat tudtam begyűjteni. A jövőben szívesen részt vennék ezekhez a módszerekhez hasonló innovatív tervezési és szimulációs technológiákkal kapcsolatos konferenciákon és előadásokon, ahol szélesíteni tudnám ezen területekkel kapcsolatos ismereteimet.

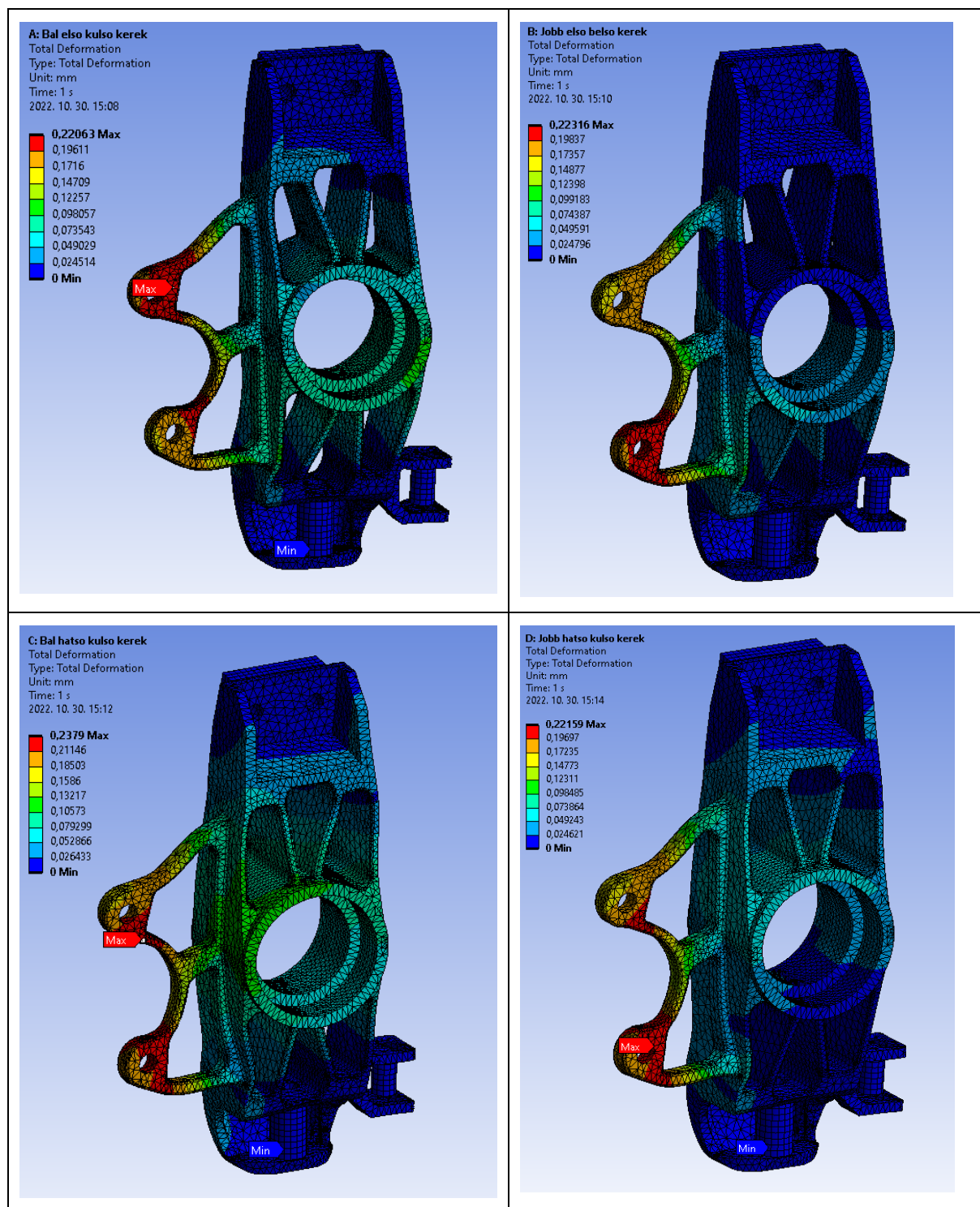
## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Kádár, L., Varga F., Kőfalusi P., Közúti Járműrendszerek szerkezetana
  - [2] Dr. Lévai Zoltán, Budapest, 1978 és 1990, Gépjárművek szerkezetana, Egyetemi Tankönyv, ISBN 963 17 25189
  - [3] Kádár Bertold Gergő, Formula Student versenyautó futómű tervezése szakdolgozat, OE-BGK 2020.
  - [4] Gersborg-Hansen, A., Bendsøe, M.P. & Sigmund, O. Topology optimization of heat conduction problems using the finite volume method. Struct Multidisc Optim 31, 251–259 (2006)
  - [5] 2012-2017, dr. Kovács Ádám, Moharos István, dr. Oldal István, Szekrényes András, VÉGESLEM-MÓDSZER, ISBN 978-963-279-539-3
  - [6] <https://medium.com/pixmoving/generative-design-at-pix-94a5f10cd509>, 2022.09.11.
  - [7] Jørgen Eliassen, Simuleringsbasert-design for full utnyttelse av additiv tilvirkning, 2017
  - [8] William Kinkead, Adrian Pickering, James Waldo, Connor Morette, Zachary Sears: Design and Optimization of a Formula SAE Vehicle, 2016
  - [9] Bódi Máté, Szabó J. Ferenc, AUTÓ FUTÓMŰ VÉGESELEM VIZSGÁLATA, Multidiszciplináris tudományok, 9. kötet. (2019) 1 sz. pp.127-140
  - [10] Anshul Dhakar, Rishav Ranjan, FORCE CALCULATION IN UPRIGHT OF A FSAE RACE CAR, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) Volume 7, Issue 2, March-April 2016, pp. 168–176
  - [11] Óskar Kúld Pétursson, Uprights, wheel hubs and brake system for a new Formula Student race car, 2016
  - [12] Formula SAE Rules 2022
- <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=1ddb17e7-00fc-4716-829a-09413f519eba>

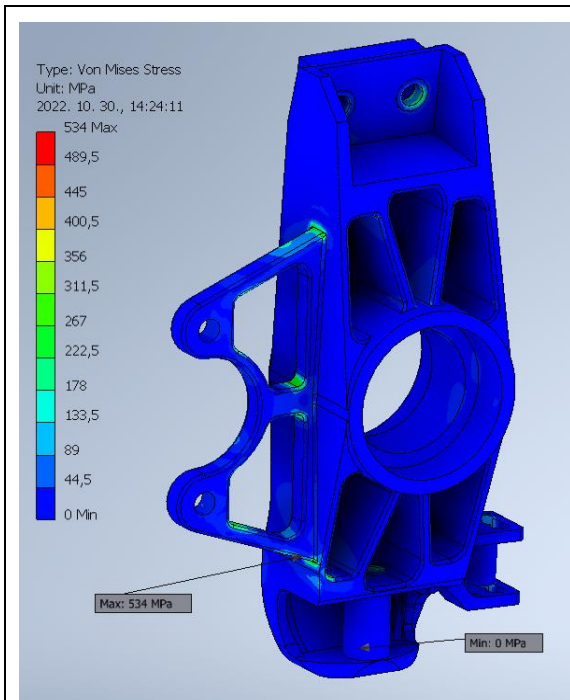
- [13] William F. Milliken, Douglas L. Milliken; Race Car Vehicle Dynamics, 1994, ISBN 978-1-56091-526-3
- [14] Bodolai Péter, Csörtán-Szilágyi György, Kerékagymotoros Formula Student versenyautó fékrendszerének és tengelycsonkjainak tervezése és szilárdsági vizsgálata, 2013
- [15] [https://www.researchgate.net/figure/FSAE-Germany-Endurance-track\\_fig2\\_320102772](https://www.researchgate.net/figure/FSAE-Germany-Endurance-track_fig2_320102772), 2022.09.21.

## MELLÉKLETEK

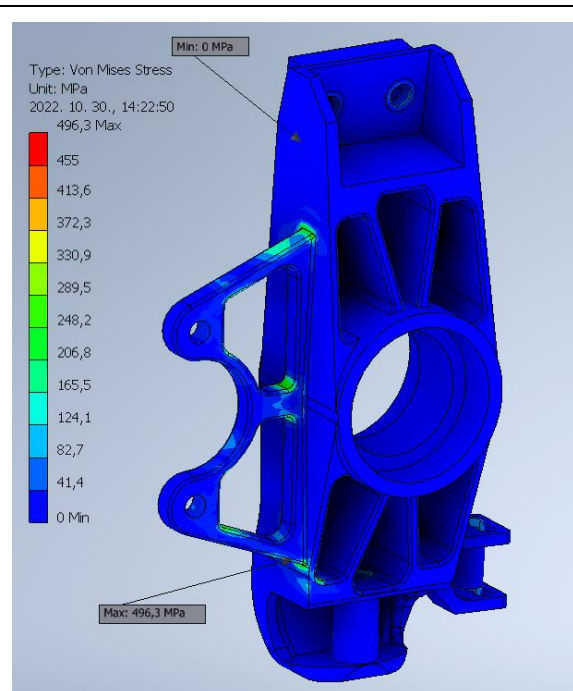
1.sz. melléklet: Kiinduló csomkállvány végeelem szimulációi



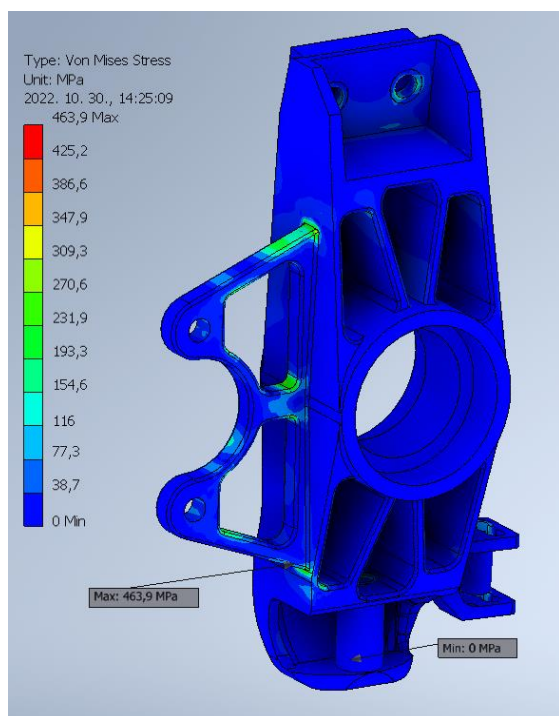
1. ábra: Kiinduló csomkállvány biztonsági tényezőjének eloszlása



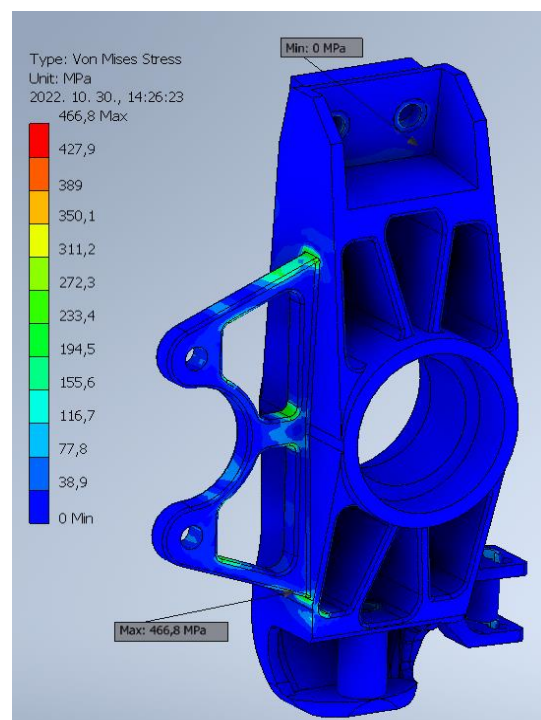
Bal első kerékhez tartozó csomakállvány



Jobb első kerékhez tartozó csomakállvány

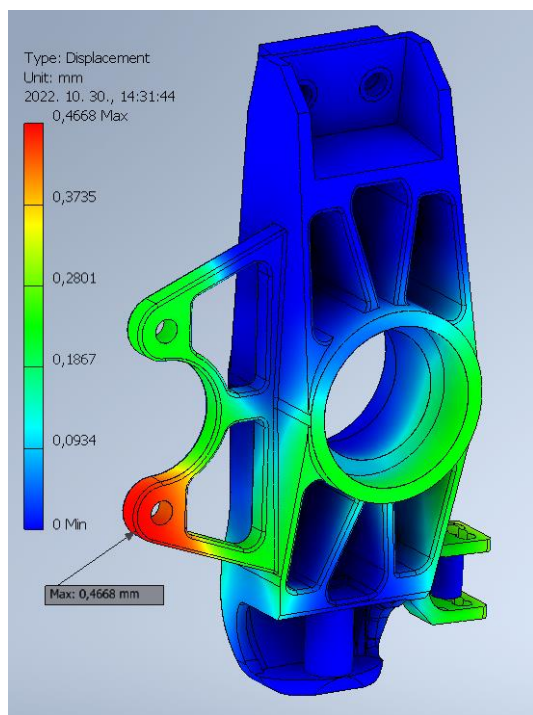


Bal hátsó kerékhez tartozó csomakállvány

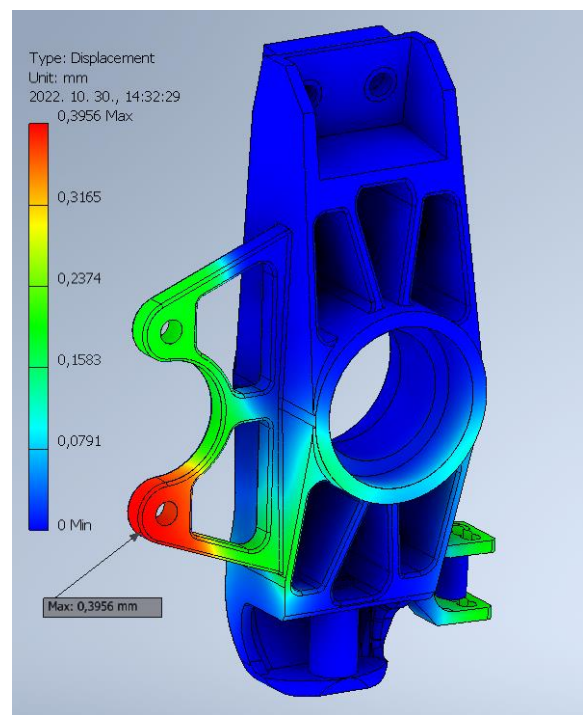


Jobb hátsó kerékhez tartozó csomakállvány

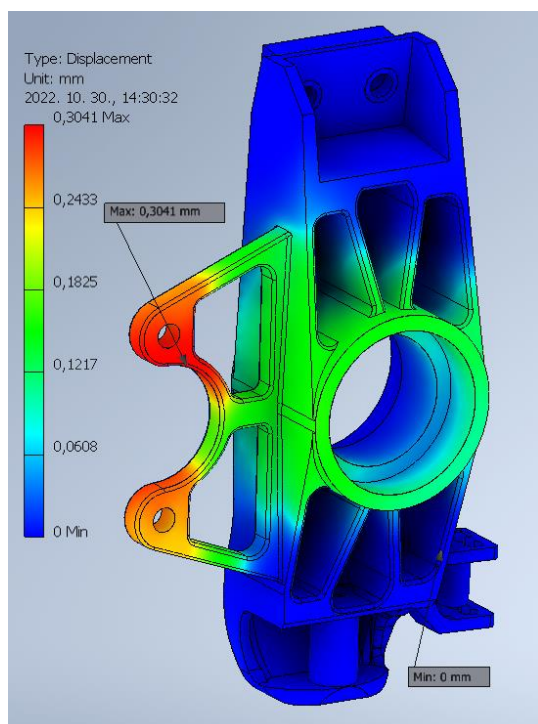
2. ábra: Kiinduló csomakállvány szimulációja Von-Mises feszültség eloszlásának



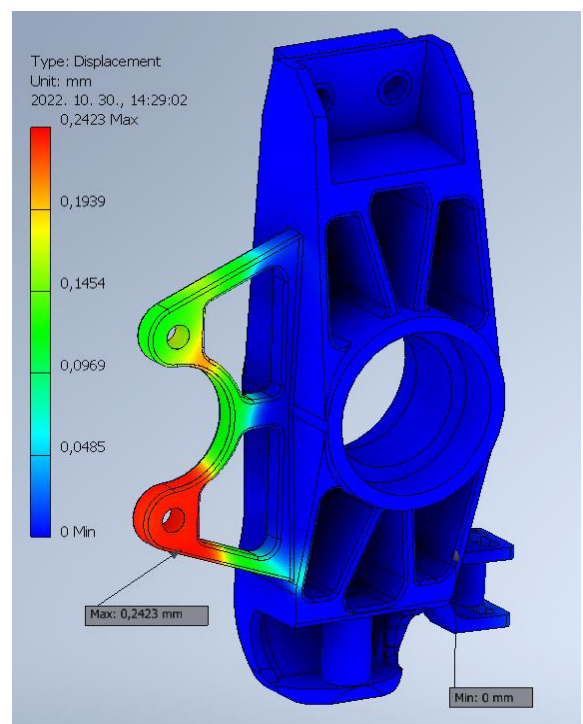
Bal első kerékhez tartozó csunkállvány



Jobb első kerékhez tartozó csunkállvány



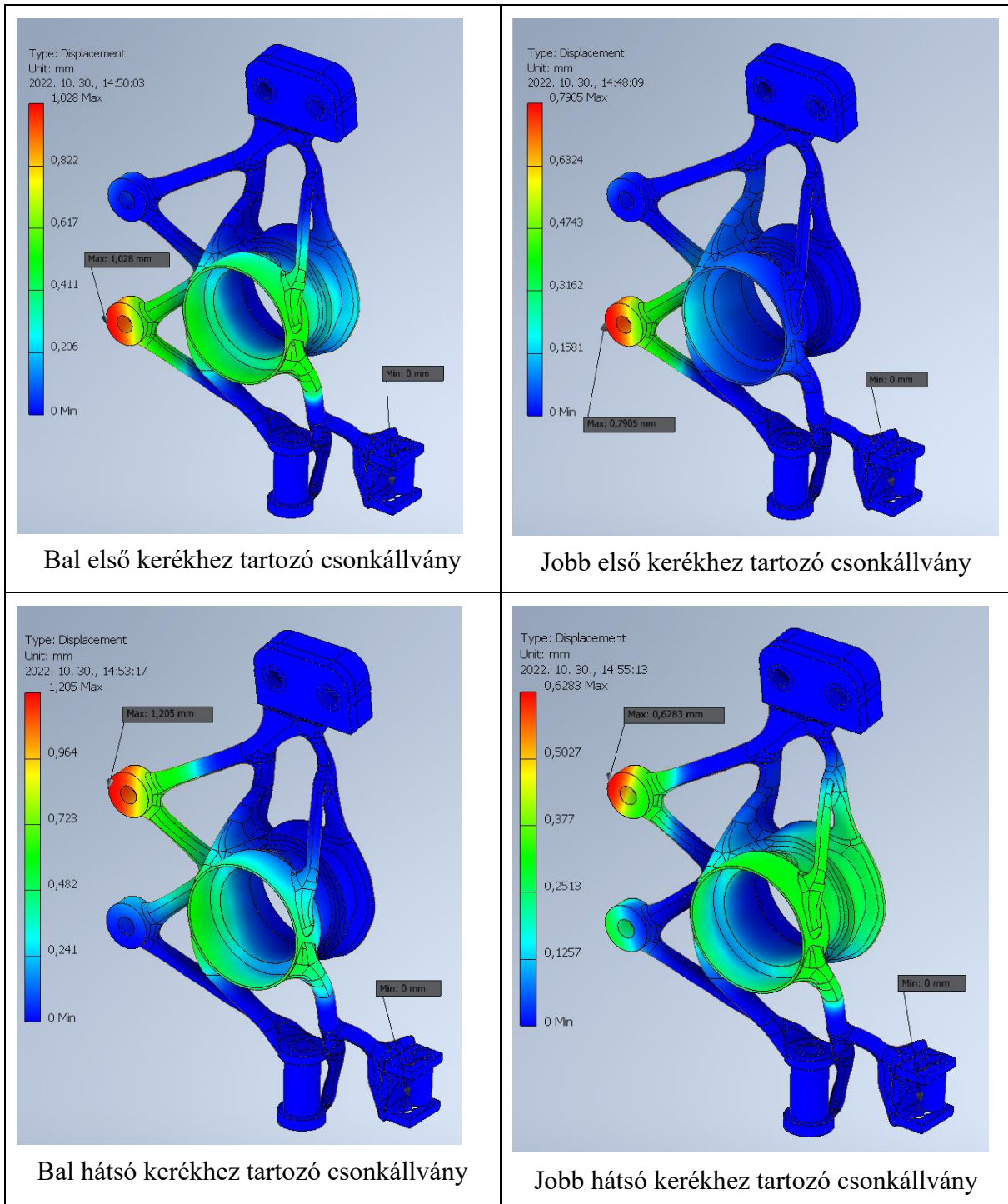
Bal hátsó kerékhez tartozó csunkállvány



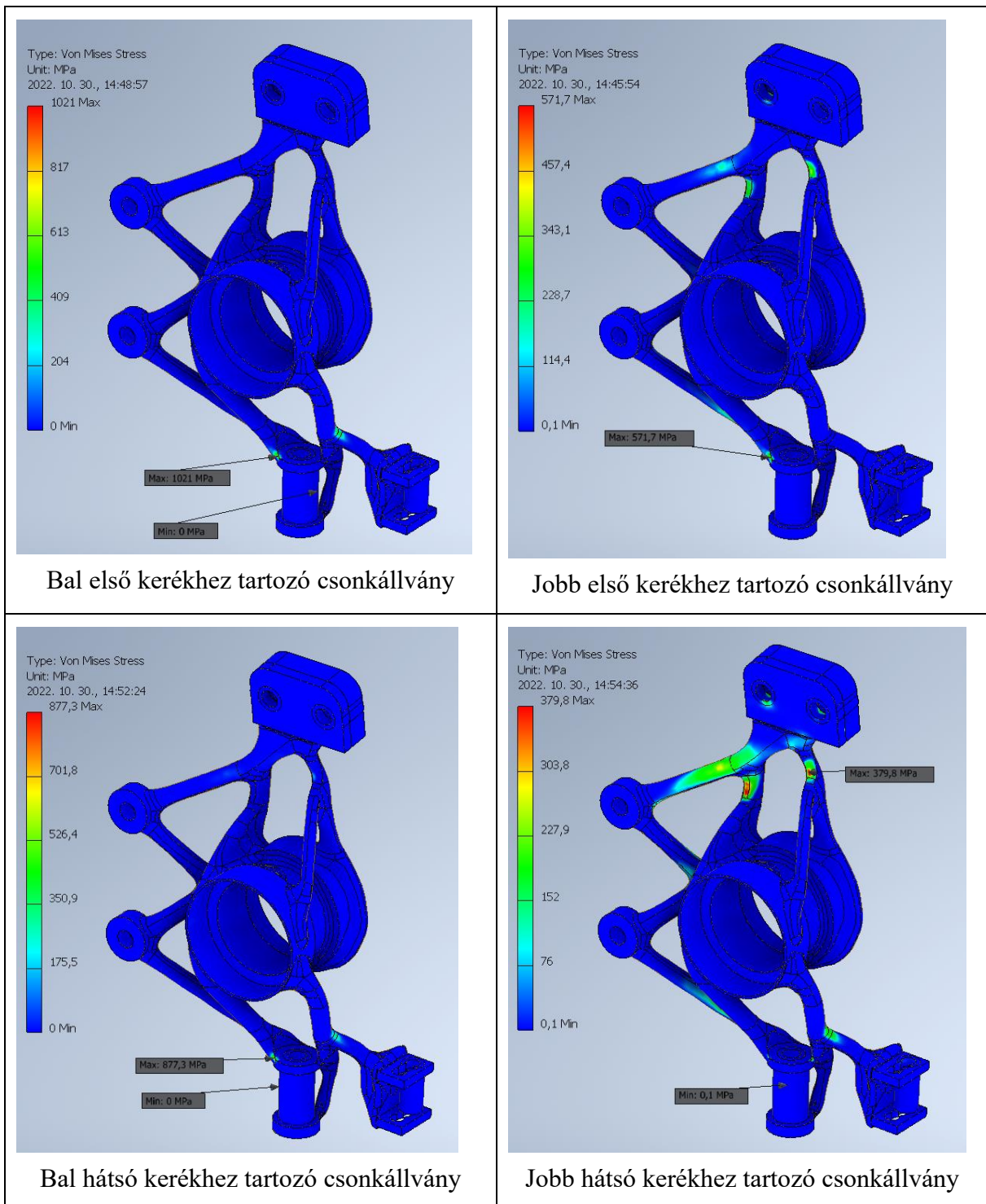
Jobb hátsó kerékhez tartozó csunkállvány

3. ábra: Kiinduló csunkállvány szimulációja deformáció tekintetében

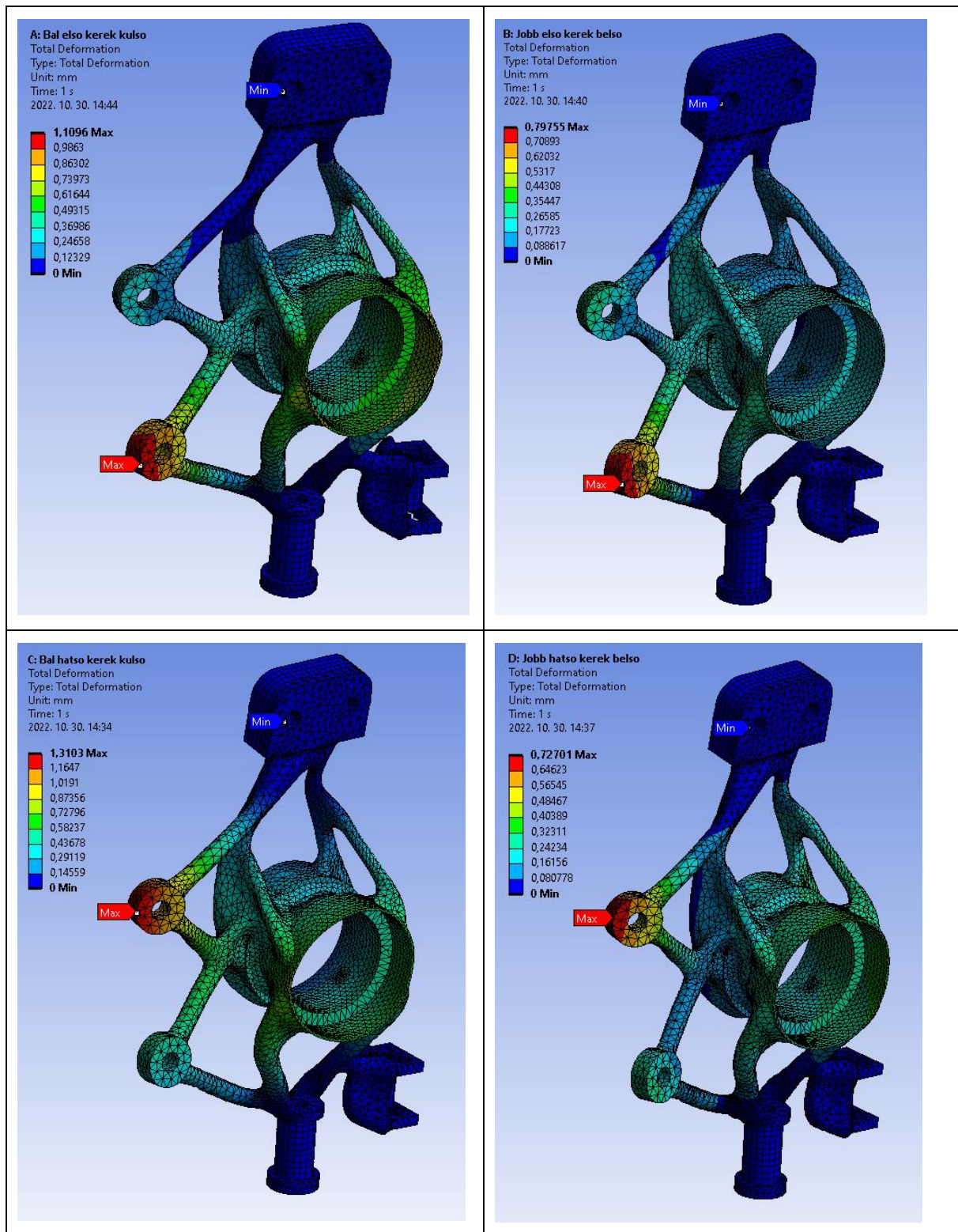
2.sz. melléklet: Generatív tervezéssel létrehozott csomkállvány végeelem szimulációi



4. ábra: Generatív tervezéssel készült csomkállvány deformációja

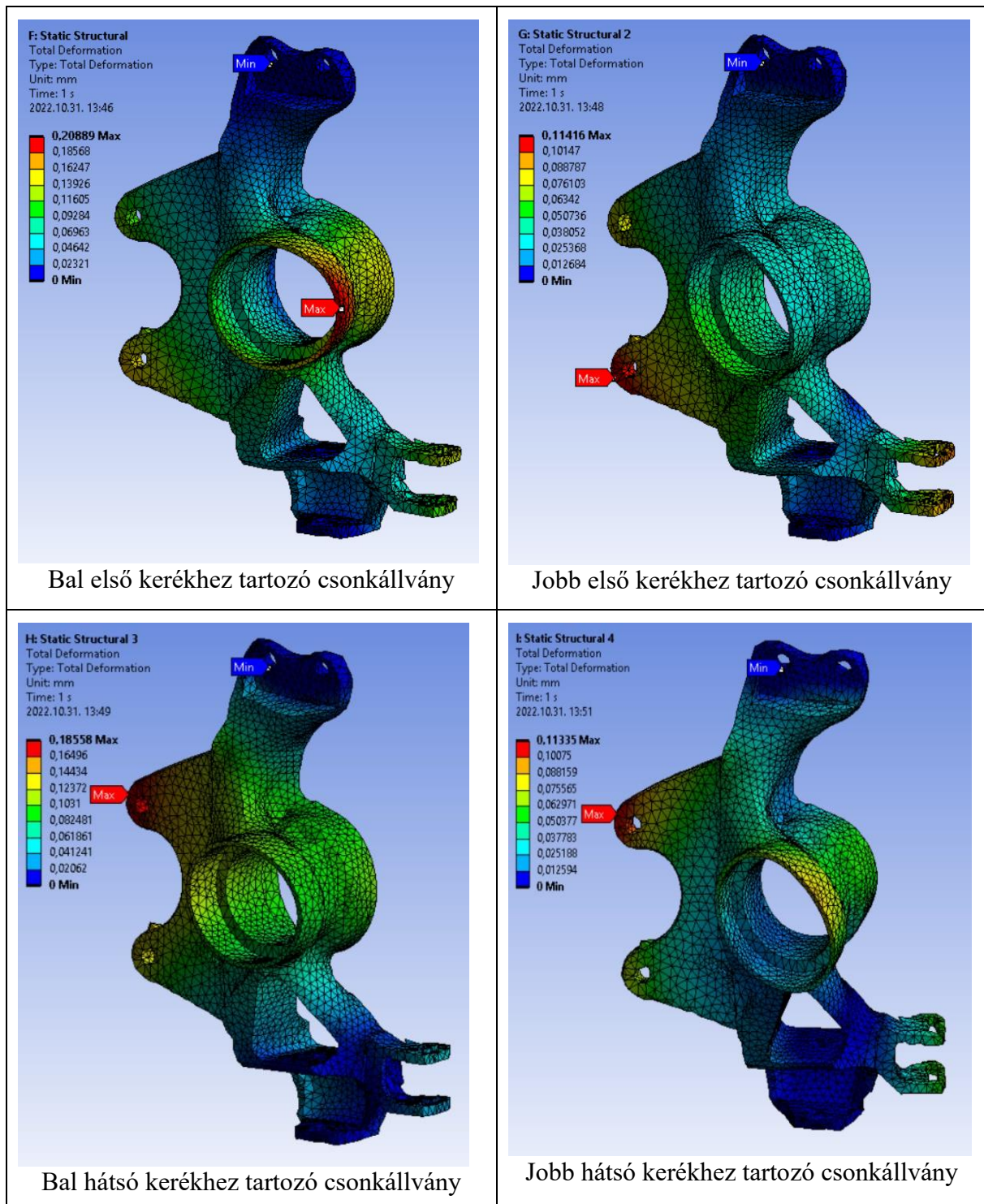


5. ábra: Generatív tervezéssel készült csomópont Von-Mises feszültségének eloszlása



6. ábra: Generatív dizájnnal tervezett csomakállvány deformációja

## 3.sz. melléklet: Topológiai optimalizálással létrehozott test végelem szimulációja

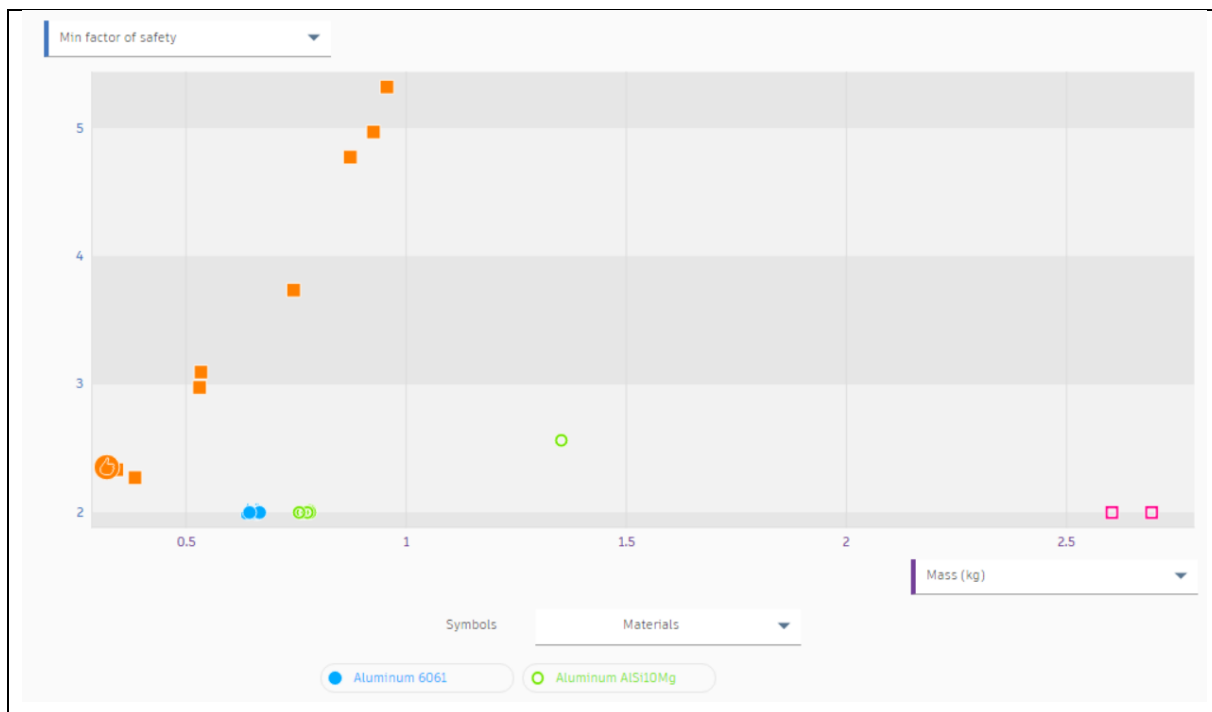


7. ábra: Alakoptimalizálással tervezett csomópont Von-Mises feszültségi eloszlása, deformáció szemléltetése mellett

#### 4.sz. melléklet: Generatív tervezés modelljeinek összehasonlítását segítő csoportosítások

| Recommended outcomes <span>Compare</span>                                         |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                    |                            |                    |                            |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
|  |  |  |  |  |                    |                            |                    |                            |                    |
| Study 1 - Structur... - Outcome 10<br>Converged                                   | Study 1 - Structura... - Outcome 17<br>Converged                                  | Study 1 - Structura... - Outcome 19<br>Converged                                  | Study 1 - Structur... - Outcome 20<br>Converged                                    | Study 1 - Structura... - Outcome 21<br>Converged                                    |                    |                            |                    |                            |                    |
| Properties                                                                        |                                                                                   | Properties                                                                        |                                                                                    | Properties                                                                          |                    | Properties                 |                    | Properties                 |                    |
| Status                                                                            | Converged                                                                         | Status                                                                            | Converged                                                                          | Status                                                                              | Converged          | Status                     | Converged          | Status                     | Converged          |
| Generative model                                                                  | Generative Model 1                                                                | Generative model                                                                  | Generative Model 1                                                                 | Generative model                                                                    | Generative Model 1 | Generative model           | Generative Model 1 | Generative model           | Generative Model 1 |
| Material                                                                          | Titanium 6Al-4V                                                                   | Material                                                                          | Titanium 6Al-4V                                                                    | Material                                                                            | Aluminum 6061      | Material                   | Aluminum 6061      | Material                   | Aluminum 6061      |
| Orientation                                                                       | -                                                                                 | Orientation                                                                       | Unrestricted                                                                       | Orientation                                                                         | -                  | Orientation                | X+                 | Orientation                | Y+                 |
| Manufacturing method                                                              | Unrestricted                                                                      | Manufacturing method                                                              | 5 axis milling                                                                     | Manufacturing method                                                                | Unrestricted       | Manufacturing method       | Additive           | Manufacturing method       | Additive           |
| Visual similarity                                                                 | Unique                                                                            | Visual similarity                                                                 | Unique                                                                             | Visual similarity                                                                   | Group 2            | Visual similarity          | Unique             | Visual similarity          | Group 4            |
| Production volume (pcs.)                                                          | -                                                                                 | Production volume (pcs.)                                                          | -                                                                                  | Production volume (pcs.)                                                            | -                  | Production volume (pcs.)   | -                  | Production volume (pcs.)   | -                  |
| Piece part cost                                                                   | -                                                                                 | Piece part cost                                                                   | -                                                                                  | Piece part cost                                                                     | -                  | Piece part cost            | -                  | Piece part cost            | -                  |
| Range (USD)                                                                       | -                                                                                 | Range (USD)                                                                       | -                                                                                  | Range (USD)                                                                         | -                  | Range (USD)                | -                  | Range (USD)                | -                  |
| Median (USD)                                                                      | -                                                                                 | Median (USD)                                                                      | -                                                                                  | Median (USD)                                                                        | -                  | Median (USD)               | -                  | Median (USD)               | -                  |
| Fully burdened cost                                                               | -                                                                                 | Fully burdened cost                                                               | -                                                                                  | Fully burdened cost                                                                 | -                  | Fully burdened cost        | -                  | Fully burdened cost        | -                  |
| Range (USD)                                                                       | -                                                                                 | Range (USD)                                                                       | -                                                                                  | Range (USD)                                                                         | -                  | Range (USD)                | -                  | Range (USD)                | -                  |
| Median (USD)                                                                      | -                                                                                 | Median (USD)                                                                      | -                                                                                  | Median (USD)                                                                        | -                  | Median (USD)               | -                  | Median (USD)               | -                  |
| Volume (mm <sup>3</sup> )                                                         | 72,224.177                                                                        | Volume (mm <sup>3</sup> )                                                         | 77,385.731                                                                         | Volume (mm <sup>3</sup> )                                                           | 236,635.407        | Volume (mm <sup>3</sup> )  | 246,347.191        | Volume (mm <sup>3</sup> )  | 243,574.564        |
| Mass (kg)                                                                         | 0.32                                                                              | Mass (kg)                                                                         | 0.343                                                                              | Mass (kg)                                                                           | 0.639              | Mass (kg)                  | 0.665              | Mass (kg)                  | 0.658              |
| Max von Mises stress (MPa)                                                        | 374.993                                                                           | Max von Mises stress (MPa)                                                        | 378.087                                                                            | Max von Mises stress (MPa)                                                          | 137.5              | Max von Mises stress (MPa) | 137.5              | Max von Mises stress (MPa) | 137.5              |

8. ábra: Generatív tervezés modelljeinek összehasonlítását segítő csoportosítások II.



9. ábra: Generatív tervezés modelljeinek összehasonlítását segítő csoportosítások III.

|  | Name                                | Tech-Preview | Recommendation ↓ | Processing status | Generative model   | Material          | Manufacturing method | Visual similarity |
|--|-------------------------------------|--------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 10 |              | 86.196 %         | Converged         | Generative Model 1 | Titanium 6Al-4V   | Unrestricted         | Unique            |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 27 |              | 86.058 %         | Converged         | Generative Model 1 | Aluminum 6061     | 3 axis milling       | Unique            |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 19 |              | 84.876 %         | Converged         | Generative Model 1 | Aluminum 6061     | Unrestricted         | Group 2           |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 26 |              | 84.776 %         | Converged         | Generative Model 1 | Aluminum 6061     | 5 axis milling       | Unique            |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 36 |              | 84.181 %         | Converged         | Generative Model 1 | Aluminum AlSi10Mg | 3 axis milling       | Unique            |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 35 |              | 83.429 %         | Converged         | Generative Model 1 | Aluminum AlSi10Mg | 5 axis milling       | Group 2           |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 28 |              | 83.285 %         | Converged         | Generative Model 1 | Aluminum AlSi10Mg | Unrestricted         | Unique            |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 17 |              | 77.779 %         | Converged         | Generative Model 1 | Titanium 6Al-4V   | 5 axis milling       | Unique            |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 18 |              | 71.455 %         | Completed         | Generative Model 1 | Titanium 6Al-4V   | 3 axis milling       | Unique            |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 15 |              | 69.885 %         | Completed         | Generative Model 1 | Titanium 6Al-4V   | Additive             | Group 1           |
|  | Study 1 - Structura... - Outcome 23 |              | 68.398 %         | Converged         | Generative Model 1 | Aluminum 6061     | Additive             | Unique            |

10. ábra: Generatív tervezés modelljeinek összehasonlítását segítő csoportosítások IV.