



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Gépjárműtechnológia Tanszék



TDK dolgozat

Hibrid légterelő elem fejlesztése fém 3D nyomtatással és generatív tervezéssel versenyautók számára

Készítette:
Molnár Károly

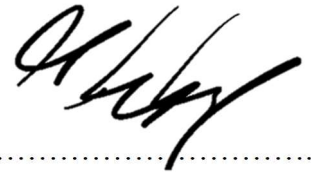
Témavezető:
Erőss László Dániel

Konzulens (ha van):
-

Budapest, 2024.

Nyilatkozat

Alulírott Molnár Károly kijelentem, hogy a TDK dolgozat önálló munkám és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.



Molnár Károly

Tartalomjegyzék

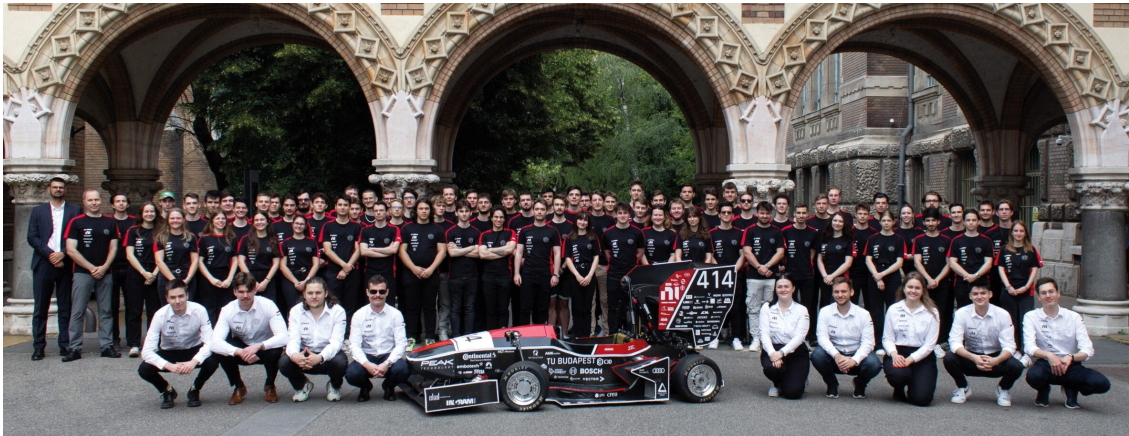
1.	Bevezetés.....	5
1.1.	Csapat bemutatása	5
1.2.	Probléma ismertetése	5
1.3.	Megoldás	6
2.	Irodalomkutatás.....	7
2.1.	Additív gyártás	7
2.1.1.	SLM.....	8
2.1.2.	Az SLM gyártás folyamata	8
2.1.3.	Nyomtatási szakasz	9
2.1.4.	Utómunka	10
2.1.5.	A szelektív lézerolvasztás alkalmazási területei	10
2.1.6.	Repülőgépipar – Rakétahajtómű égéstér.....	11
2.1.7.	Vasútipar – Fékpanel.....	12
2.1.8.	Autóipar – Czinger 21C	13
2.1.9.	Orvostudomány - protézisek	14
2.2.	Generatív tervezés	14
2.2.1.	Generatív tervezés a gyakorlatban [15].....	15
3.	Módszertan.....	16
3.1.	CFD	16
3.1.1.	Geometria	16
3.1.2.	Hálózás	17
3.1.3.	Solver beállítások	20
3.1.4.	Hálófüggetlenségi vizsgálat	20
3.2.	A Generatív tervezés menete	21
3.2.1.	Geometria	21
3.2.2.	Régiók parametrizálása	22
3.2.3.	Tervezési peremfeltételek	22
4.	Aerodinamikai optimalizáció eredményei	24
5.	Osztott terelőelem generatív tervezés eredményei.....	26
5.1.	V1	26
5.2.	V4.1	27
5.3.	V5.1	29
5.4.	V8.2.....	31
5.5.	V10.1	32
5.6.	V10.2.....	34
5.7.	V13	35
5.8.	V16.1	36
6.	Végeselemes mechanikai analízis	40
6.1.	Előkészítés.....	41
6.2.	Terhelések	41
6.3.	Kiértékelés.....	42
7.	Összegzés	43
8.	Jövőbeli tervek	44
9.	Irodalomjegyzék.....	45

10.	Ábrajegyzék	46
11.	Táblázatok jegyzéke	47
12.	Mellékletek	47
12.1.	Végeselemes mechanikai analízis	47
12.1.1.	Feszültségértékek	47
12.1.2.	Deformáció	48

1. BEVEZETÉS

1.1. CSAPAT BEMUTATÁSA

Témavezetőmmel, Erőss László Dániellel közösen választott alkatrészemet a BME Formula Racing Team egyik 2024-es első szárny koncepciójára optimalizálom aerodinamikai és mechanikai szempontból.



1. ábra: BME Formula Racing Team 2024 csoportkép [1]

A BME Formula Racing Team a BME neve alatt 2007-ben alapított versenycsapat, mely évről évre a világ minden táján elterjedt Formula Student versenysorozatban méretteti meg magát. A csapat fotója az 1. ábrán látható.

A kizárólag egyetemi hallgatókból álló csapatoknak egy előre megadott szabályrendszer alapján megtervezett és megépített formula típusú versenyautóval kell összemérniük tudásukat mind statikus, mind dinamikus versenyszámokban.

A csapatban 4 szezon erejéig tevékenykedtem aerodinamika csoporttagként, melynek túlnyomó részében a hátsó szárny felelőse voltam. A jelen dolgozatban vizsgált elem azonban az autó egy egész más részéhez tartozik.

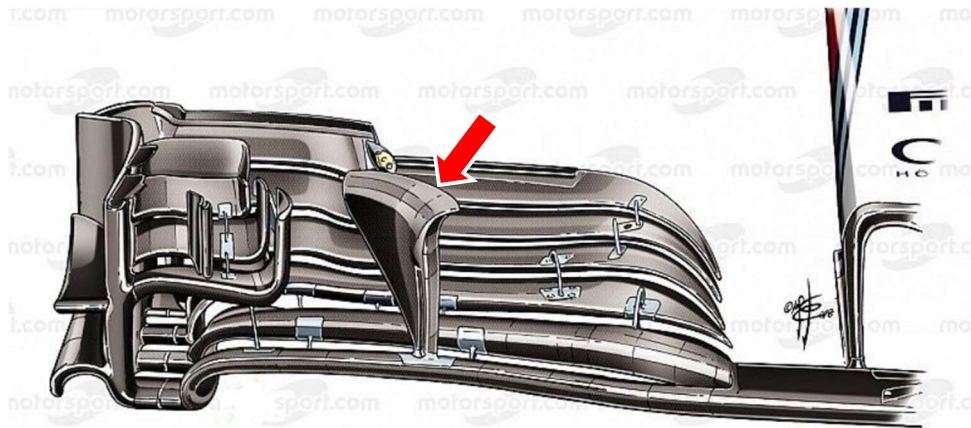
1.2. PROBLÉMA ISMERTETÉSE

Mint minden versenyautónál, úgy a Formula Student autóknál is kiemelten fontos tényező az aerodinamikai hatékonyság, melyet általában a leszorítóerő- és a légellenállási koefficiens arányaként adnak meg. A legmeghatározóbb ilyen szempontból az első szárny, amely a legelső elem az autón, ami érintkezik a menetszéllel és kulcsfontosságú, hogy a róla leváló áramlatok a leghatékonyabban legyenek eloszlatva.

Egy formula típusú autónál a legrosszabb aerodinamikai hatékonysággal rendelkező részegységek a kerekek. Nem csak hogy kifejezetten nagy légellenállással rendelkeznek,

de az általuk keltett turbulencia is káros az autó menetdinamikáját tekintve. Ezt a csapatok általában egy, az első szárnyon lévő vertikális terelőelemmel (2. ábra) próbálják csökkenteni, ami eltereli a levegőt az első kerekek elől így enyhíti az imént taglalt hatásokat. Azonban a gépátvételnél esedékes szigorú terhelési vizsgálatok miatt legtöbb esetben túlzott mennyiségű kompozit anyagra és ragasztóanyagra van szükség, ez pedig nem kívánt tömegnövekedést eredményez.

A Formula Student autók első szárnyai általában többelemű (multielement) elrendezéssel rendelkeznek, vagyis szükséges az egyes szárnyelemek egymáshoz rögzítése speciális kapcsolóelemekkel. Ezen elemek kialakítása azonban bármilyen minimalista is, mindenképp nem kívánt turbulenciát fog kelteni. Erre kiváló példa a Williams 2018-as szezonban használt első szárnya, ami a 2. ábrán látható.



2. ábra: Williams FW41 első szárny [2]

1.3. MEGOLDÁS

A megoldást egy hibrid alkatrész tervezése jelenti, amely egyszerre valósítja meg a szárnyelemek megfelelő kapcsolatát, hozza létre a kívánt aerodinamikai hatást minimalizált tömeg mellett.

A kiinduló koncepció egy olyan generatív tervezéssel fejlesztett kapcsolóelem, amely a szárny megtartására szolgáló strukturális elem mellett rendelkezik egy kiegészítő tartóvázzal is, ami a terelő elem karbon kompozit héját hivatott merevíteni, ezzel jelentősen csökkentve az össztömeget.

2. IRODALOMKUTATÁS

Irodalomkutatásomban értekezem az additív gyártás, azon belül az SLM technológia működéséről, főbb alkalmazási területeiről, valamint az úgyszintén a dolgozat szerves részét képező CFD szimulációk ismertetésére, elméleti háttérére, gyakorlati alkalmazhatóságára is ki fogok térni.

2.1. ADDITÍV GYÁRTÁS

Régen a gyártás során főként szubsztraktív technológiákat alkalmaztak, melyek során egy anyagtöbblettel rendelkező munkadarabból különféle anyagleválasztással járó eljárásokkal (pl. esztergálás, fúrás, marás) került kimunkálásra a kívánt alkatrész. Ez a technológia, habár a mai napig is kiválóan alkalmas az erre a gyártási módszerre tervezett alkatrészek költséghatékony és megfelelő minőségű előállítására, egyre többször ütközik geometriai korlátokba, főként a megmunkáló szerszámok hozzáférhetősége miatt bonyolult formák esetén, nem beszélve az anyagleválasztás során keletkező nagymennyiségű hulladékról, ami csak korlátozott mennyiségben hasznosítható újra. Az öntés létezett ugyan, mint additív eljárás, azonban az öntőformák magas költsége mellett ennek a technológiának is voltak geometriai korlátai. Ezen hátrányok miatt új technológia után kellett kutatni. [3]

Egy kézenfekvő alternatíva az úgynevezett 3D nyomtatási technológia, amely során a testet anyaghozzáadással állítjuk elő. Legtöbb esetben ez rétegről rétegre felvitt anyagból való felépítést jelent, ami a legtöbb fizikai hozzáférhetőségből fakadó problémát megoldja. További előnyként hozható még fel a szubsztraktív eljárásokkal szemben a sokkalta alacsonyabb hulladékköltség, valamint az a tény, hogy ami mégis keletkezik (selejt, túlfolyás, support), azt a legtöbb esetben igen nagy arányban lehet újrahasznosítani későbbi gyártásoknál. Geometriai szempontból való rugalmasságának köszönhetően ez a technológia rendkívül gazdaságos a prototípusgyártás területén is, mivel a kismennyiségű sorozatok után nem igényel különösebb ráfordítást, míg ez egy célgép esetén új konstrukciót, egy célszerszámot használó gép esetén új szerszámot igényel. [3]

Az additív gyártás első lépése a geometria meghatározása, aminek paramétereit egy CAD modellből konvertált .stl („Standard Triangular Language”) kiterjesztésű fájl tárol. Itt egy háromszög alakú elemekből álló felületet közelítenek a test eredeti felületéhez. A testet ezután rétegekre szeletelik, amelyek az építés irányvektorára merőlegesek. A felvihető rétegek vastagsága technológiánként, anyagonként és berendezésenként eltérő.

Emellett meghatározható a falvastagság és a kitöltési minta is az elvárt merevség függvényében. Amint az összes anyag- és folyamattechnológiai paraméter meghatározásra került, következik a nyomtatás. Befejeztével az alkatrész eltávolítható a munkatérből. A nyomtatást adott esetben utómunka is követi, mely jellemzően a támasztékok eltávolítására, vagy a felületi minőség javítására irányul, de előfordulhat szilárdítás is. [3]

Jelenleg igen változatos additív technológiák léteznek mind alapanyagok, mind eljárások terén. Többféleképp is csoportosíthatjuk őket, azonban a legelterjedtebb az alapanyag halmazállapota alapján való kategorizálás, melynek során megkülönböztetünk szilárd, folyékony, illetve poralapú alapanyagokat. Az SLM, vagy másnéven szelektív lézeres olvasztás a poralapú technológiák csoportjába tartozik. [4]

2.1.1. SLM

A legelső lézerek az 1900-as évek második felében jelentek meg, majd igen gyorsan elterjedtek a világ minden területén. A gyártáson belül is temérdek feladatot látnak el (pl. hegesztés, vágás, bevonatolás stb.). Ide tartozik az additív gyártás is, közte az SLM.

Fémek 3D-nyomtatásához túlnyomórészt az SLM („Selective Laser Melting”) technológiát használják világszerte, melyhez nagyon sok cég szolgáltat különböző méretű és célú gépeket, valamint különféle összetételű alapanyagokat. A technológiának léteznek szinte azonos verziói is, mint például az LPBF, az LMF, vagy a DMLS, melyek lényegében csupán elnevezésükben különböznek. [3]

Az SLM additív eljárás révén rengeteg előzőleg felsorolt előnnyel jár, azonban a legjelentősebb talán az, hogy a legösszetettebb formák is létrehozhatók a segítségével, mivel ez sok esetben más fémmegmunkálási módszerekkel nem megoldható. Ezzel az eljárással gyárthatók továbbá alkatrészek belső merevítőszerkezettel súlycsökkentés, illetve alapanyagmegtakarítás céljából úgy, hogy merevségük nem változik. Ezen felül additív eljárással létrehozhatók olyan összevont alkatrészek is, amelyek alapvetően több komponensből állnának. [5]

Hozzá kell tennünk azonban, hogy a temérdek pozitív tulajdonság mellett az ilyen nyomtatók rendkívül drágák, rendkívül magas energiafogyasztással rendelkeznek, ráadásul a fogyócékkekhez (alapanyag, inert gáz) sem lehet olcsón hozzájutni. [5]

2.1.2. AZ SLM GYÁRTÁS FOLYAMATA

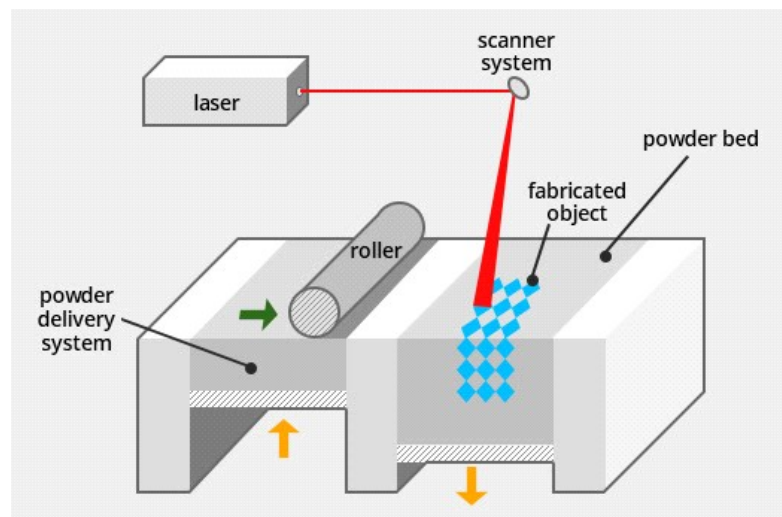
A szelektív lézerolvasztás folyamata alapvetően két jól elkülöníthető fázisra oszlik. Első körben beszélünk magáról a nyomtatásról. Ebben a szakaszban hozzuk létre az alap

geometriát, azonban ez még sok hiányossággal rendelkezik. Az alkatrész végső formáját a második fázisban, azaz az utómunkálás során nyeri el. Itt alkalmazhatnak hőkezelést a mechanikai tulajdonságok javítására, forgácsolást a sorja eltávolítására, vagy éppen különféle felületkezelési eljárásokat a felületi minőség korrigálására.

Mindkét fázis kulcsfontosságú szerepet játszik abban, hogy a kész alkatrész megfeleljen minden vele szemben nyújtott elvárásnak.

2.1.3. NYOMTATÁSI SZAKASZ

Az SLM nyomtatás folyamatát az 3. ábra szemlélteti. Ez természetesen kisebb részletekben eltérhet.

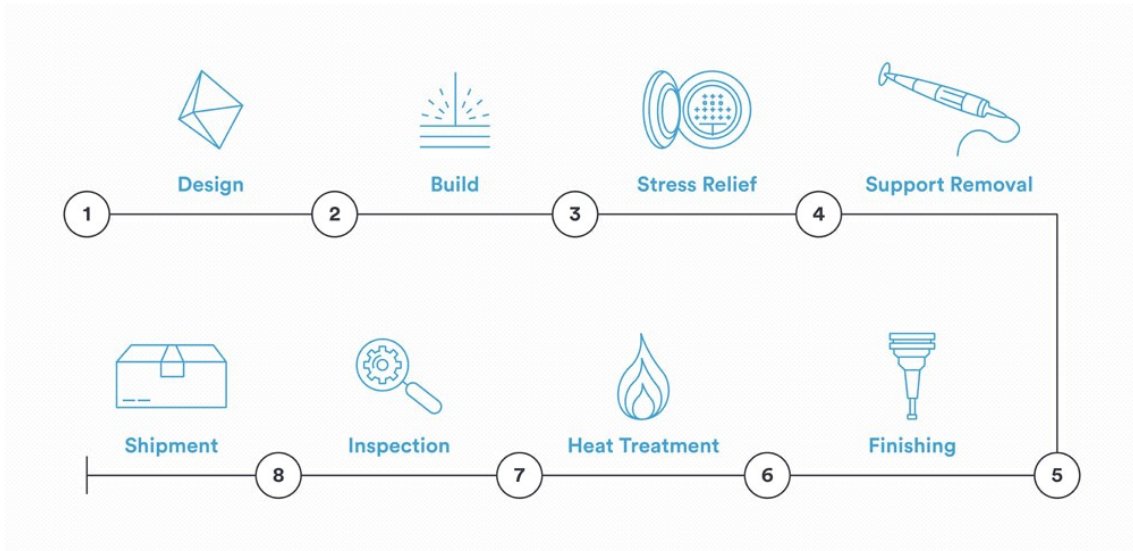


3. ábra: Nyomtatási folyamat menete [6]

A nyomtatás az STL fájl importálásával kezdődik a nyomtató szoftverbe, ahol megtörténik a rétegekre bontása és a szükséges megtámasztások kijelölése. Ezt követően a tartályt a megfelelő poralapanyaggal feltöltjük. Magát a kamrát szükséges inert gázzal feltölteni, hogy az olvadt fém ne oxidálódhasson. A nyomtatás tényleges kezdetekor a terítőhenger egy rétegvastagságnyi port terít egyenletesen a nyomtatási területre. Ezután a lézer a pásztázó rendszeren keresztül megkezdí az első porréteg megolvasztását. Ezt a feladatot általában nagyteljesítményű szállézer végzik, amelyek könnyedén előállítják az olvasztáshoz szükséges hőt. A megszilárdulást követően a tálca függőleges irányban pontosan egy rétegvastagságnyi süllyed lefelé, a porszállító tálca pedig pontosan ennyit tolódik felfelé biztosítva ezzel a következő réteg porellátását. Ez a folyamatsor egészen addig ismétlődik, amíg az alkatrész végső geometriája létre nem jött. Végül a maradvány por eltávolítása után az alkatrész kivehető a munkatérből. A port ezután leszűrik és újra felhasználják, az alkatrészen pedig elvégzik a szükséges utómunkákat. [6]

2.1.4. UTÓMUNKA

A 4. ábrán az utómegmunkálás menete látható a terv létrejöttétől egészen a kész termék kiszállításáig.



4. ábra: Utómegmunkálás menete [7]

Az első lépés a nyomtatási fázis után a stresszmentesítő hőkezelés. Ennek során a nyomtatás során keletkezett belső feszültegektől szabadítják meg az alkatrészt. A hőkezelés még az építési területen történik, ezután viszont az alkatrész kivehető és eltávolíthatók róla a felesleges megtámasztások.

Az SLM nyomtatás során az alkatrész felülete igen durva a félig megolvadt szemcsék miatt. Ez a lépés már nem tartozik a kötelezően alkalmazandó utómunkákhoz, azonban, ha a pontosabb tűrésérték, vagy a felületi érdesség megkövetelt, finisielést kell alkalmaznunk. [7]

2.1.5. A SZELEKTÍV LÉZEROLVASZTÁS ALKALMAZÁSI TERÜLETEI

Mint említettük, mára az SLM szinte az összes ipari területen jelen van és folyamatosan növeli jelentőségét. A járműiparon belül az vasútgyártás és a repülőgépipar is kiváló példákkal képes reprezentálni ezt a technológiát, azonban nem szabad megfeledkezni olyan kulcsfontosságú területekről sem, mint az orvoslás. Közös igényeik közé tartozik a minőségi és egyben gazdaságos alkatrészek gyártása.

2.1.6. REPÜLŐGÉIPAR – RAKÉTAHAJTÓMŰ ÉGÉSTÉR



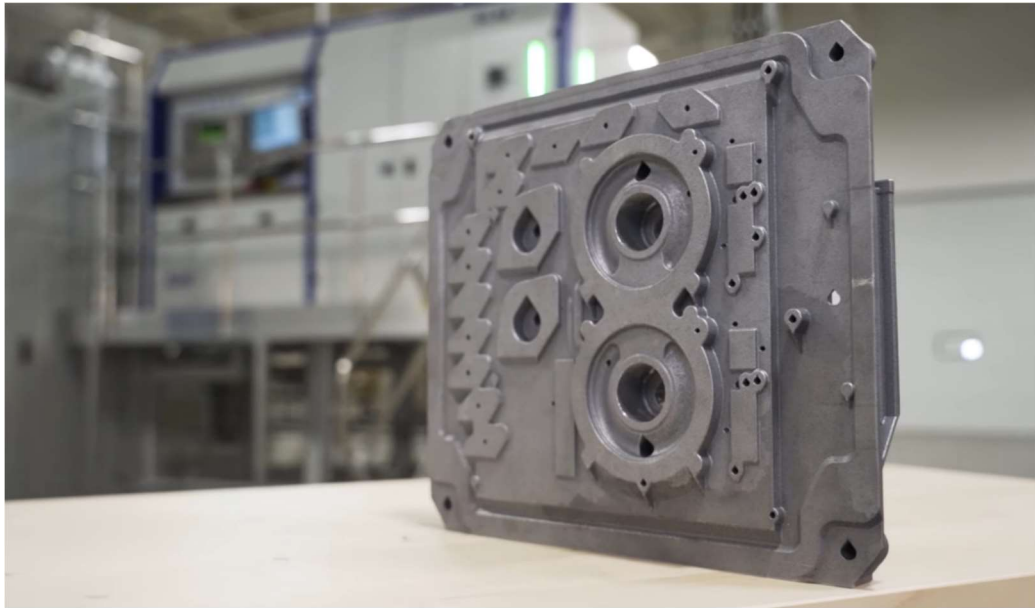
5. ábra: SLM technológiával gyártott rakétahajtómű égéstér [8]

A rakétahajtóművek alkatrészeinek rendkívül szigorú feltételeknek kell megfelelniük. Amellett, hogy rendkívül magas hőterhelést és egyéb igénybevételeket kell elviselniük, különösen megbízhatósággal kell rendelkezniük, mindezt minél kisebb tömeg mellett. Költségesebbé teszi még az előállításukat, hogy gyártásuk hagyományos technológiákkal igen komplikált. Ezen kritériumok elérésének megkönnyítésére jelenthet megoldást az SLM technológia. [8]

A CellCore és a Nikon SLM Solutions által gyártott hajtómű (5. ábra), mint minden hagyományos társa, rendelkezik egy égéstérrel, ennek központi elemével, valamint egy befecskendező rendszerrel. Az égés során nagy mennyiségű hő keletkezik, így megkövetelt a falhűtőcsatornák bevezetése. Míg hagyományos módszerekkel az üregbe süllyeszti, majd több folyamat során lezárják, addig a szelektív lézerolvasztás során a teljes hajtóművel egyszerre hozzák létre. Ezzel az eljárással ennél a termékénél a gyártás 4 napot vesz igénybe, míg a hagyományos gyártási technológiákkal minimum fél évet. Nem szabad elhanyagolnunk azt a tényt sem, hogy előbbi esetben egy funkcionálisan optimalizált alkatrésztől beszélünk. [8]

A hajtóművet egy SLM[®]280 fémnyomtatóval gyártották IN718 nikkel-króm ötvözetből, ami kivételes hőállósági, szakítószilárdsági, kúszási és fáradási értékekkel rendelkezik. Az alkalmazott technológiának köszönhetően az előállítást követően csupán minimális utómunkára volt szükség, ami jelentősen lecsökkentette a szerszámkopást és a felhasznált energia mennyiségét. [8]

2.1.7. VASÚTIPAR – FÉKPANEL



6. ábra: SLM technológiával készült fékpanel [9]

A vasúti és bányászati szektor népszerű beszállítója a Wabtec. Különböző biztonsági berendezéseik szinte minden vasúti eszközben megtalálhatók és hogy ezt a tendenciát fenntartsák, igyekeznek minél innovatívabb, zöldebb, jövőállóbb termékeket a piac rendelkezésére bocsátani, amihez a Nikon SLM Solutions fémnyomtatóit is rendszeresen igénybe veszik. [9]

Az egyik ilyen fejlesztési cél egy 24 kg-os komplex geometriájú fékpanel áttervezése volt, melynek hagyományos módszerekkel való legyártása 3-6 hónapot is igénybe vett. Ez drasztikusan megnövelte a költségeket, a szállításból fakadó emissziót, valamint késéseket is okozott. [9]

Az SLM[®]800 nyomtató sebességének és precizitásának köszönhetően a gyártási sebesség meghatszorozódott, emellett a szállítási idő 70%-kal, míg a tömeg 50%-kal csökkent. [9]

Természetesen nem maradhattak el a kötelező tesztek sem a rendszeresítés előtt. Az alkatrész a légnyomás teszt elvárásait 30%-kal, a hidraulikus teszt elvárásait pedig 50%-kal lépte túl, ezzel bebizonyítva a technológia teljesmértékű megbízhatóságát. [9]

A fejlesztés végeredménye a 6. ábrán tekinthető meg.

2.1.8. AUTÓIPAR – CZINGER 21C



7. ábra: Czinger 21C váz [10]

2014-ben a kaliforniai Torrance városában alapul meg a Divergent 3D azzal a céllal, hogy forradalmasítsa az autógyártást olyan fejlett technológiákon keresztül, mint például a fém 3D nyomtatás. A Czinger Vehicles 2019-ben jött létre és habár különálló céggént van jelen, a Divergent 3D fennhatósága alá tartozik. [11]

„A járművek, és különösen a járműszerkezetek analóg gyártása több mint 100 éves” – mondta Kevin Czinger. „Egységnyi vastagságú acéllemez vagy alumíniumötvözet, sajtolás, rögzítés és hegesztés egy nagyon analóg, tökeigényes folyamaton alapul.” [11]

A Czinger 21C-t ezen analógiák mentén tervezték meg. Szénszálerősített kompozit „monocoque”-ot kapott, majd erre kezdtek tervezni egy olyan összetett vázszerkezetet, melybe szinte minden apró funkció integrálva van. Ha csak az 7. ábrán látható hátsó szekciót nézzük, egy olyan komplex struktúrát látunk, amely egyszerre tartalmazza a futóművet, a lengéscsillapítást, a hajtáslánc rögzítését, a gyűrődőzónát és biztosítja a váz megfelelő torziós merevségét minimális önsúly mellett. A szabálytalan formájú elemek, melyeket SLM technológia nélkül képtelenség lett volna legyártani, mesterséges intelligencia segítségével lettek optimalizálva fiktív terheléseknek megadásával.

2.1.9. ORVOSTUDOMÁNY - PROTÉZISEK



8. ábra: 3D nyomtatott titán álkapocsprotézis [12]

A 3D nyomtatást széleskörben használják különböző protézisek, implantátumok gyártására, mivel kiemelkedő pontossága lehetővé teszi a finom ortopéd implantátumok gyártását és a komplex formák létrehozását. Egy ilyen implantátumot láthatunk a 8. ábrán. A leggyakrabban alkalmazott anyag az ortopédiában a Ti6Al4V titánötvözet. Habár a csontok rugalmassági modulusa 10-20 GPa körül mozog, a tömör titánötvözeté pedig 110 GPa is lehet. Ezzel a technológiával és rácsszerkezetek alkalmazásával a Young-modulus jelentősen közelíthető a valós csont értékéhez. Emellett további előny még az öntéssel szemben, hogy egyedi implantátum készíthető minden pácienshez. Előny még továbbá a titánötvözet biokompatibilitása, korrózióállósága és merevsége-rugalmasság aránya is. [13]

2.2. GENERATÍV TERVEZÉS

A tervezési folyamatokban végzett optimalizálás értelmezhető az adott működési feltételek mellett előállított megoldások halmazából kiválasztott legjobb megoldásként. Matematikai szempontból az optimalizálás egy megadott tartományon belül a célfüggvény legjobb értékét jelenti. Itt a célfüggvény és a tartomány különböző típusúak is lehetnek.

Különböző alkatrészek formai optimalizációjánál a határoló felületek alakját úgy változtatjuk, hogy a megadott feltételek betartása mellett a célfüggvény minél jobb értéket érjen el. A kiinduló CAD modell biztosítja nekünk különböző peremfeltételeket, paramétereket. Mivel ezek hatással lehetnek az optimalizációs folyamatra, ezért különlegesen nagy figyelmet kell szentelni a geometria kialakításának.

Ha az előbb leírt elméletet átültetjük a gyakorlatba, akkor azt láthatjuk, hogy a topológiai optimalizáció során a célfüggvény ideális értékét, azaz a legjobb geometriai

kialakítást keressük a megadott tartományban, vagyis előre definiált térfogaton belül, adott peremfeltételek és terhelések mellett.

2.2.1. GENERATÍV TERVEZÉS A GYAKORLATBAN [15]

A generatív tervezési módszerek az additív és hibrid gyártástechnológiák térnyerésével egyre nagyobb számban jelennek meg a gépészeti tervező rendszerekben. A generatív tervezés alapját a gépi tanulás („machine learning”) és a mesterséges intelligencia kombinálásán alapuló szoftverek adják, melyek segítségével az alkatrész alakját végeselemes szimulációval vagy egyéb más elemzési metódusokkal hozza létre az előre definiált feltételek betartása mellett, törekedve a kitűzött célok elérésére. Ez a tervezési forma olyan módon különbözik a hagyományostól, hogy a szoftver algoritmus minden iteráció után kiértékeli a változó geometria aktuális verzióját, majd az ez alapján frissített modellt viszi tovább a következő iterációba. Mindezt automatizáltan, külső beavatkozás nélkül teszi és a tervezés során készített megoldásváltozatok száma is több. Ez a folyamat figyelhető meg a 9. ábrán is.



9. ábra: Generatív tanulmány iterációkra bontva [14]

A szoftver a gépi tanulás segítségével elvégzi a felhasználó helyett az iteratív fejlesztés folyamatát. Ebből fakadóan csupán a tervezési paramétereket kell manuálisan bevinni, mint például a kiinduló geometria, az alapanyag, terhelések, maximális tömeg, vagy éppen a gyártási költségcsapka.

A hagyományos tervezés során az optimalizáció egy már létező, működőképes geometrián kerül végrehajtásra, ahol a funkciót tekintve felesleges anyag eltávolításra kerül. Hátrány, hogy a folyamat nem veszi figyelembe a gyárthatóságot és a gyártási költségeket, így újabb modellezésre, szimulációkra van szükség. Ezzel szemben igen nagy előny a generatív tervezési folyamattal kapcsolatban, hogy már a fejlesztés megkezdésekor alkalmazható, nincs szükség előzetes koncepcióra, a szimuláció iterációnként történik. Ezzel nem csupán a gyártási, de a tesztelési költségek is csökkenthetők.

Több olyan generatív tervező szoftver is létezik, ami képes kezelni különböző megmunkálástípusokat, így csak olyan megoldásokat generál, amelyek legyárthatók a

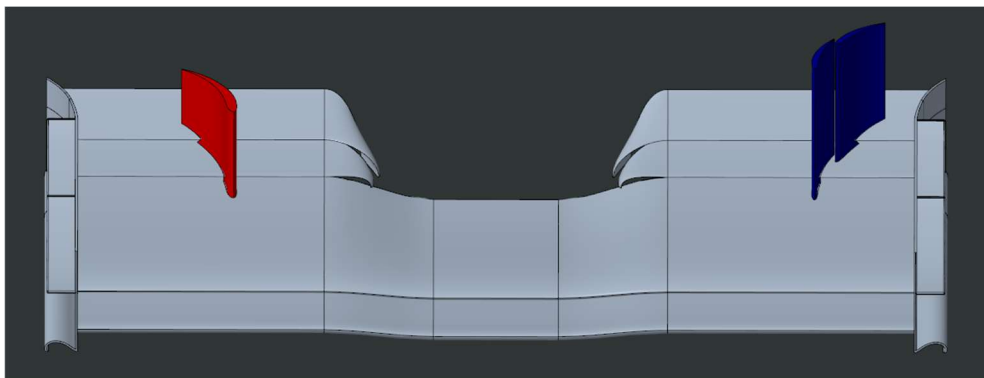
kiválasztott módszerekkel. Generatív tervezéssel létrehozhatunk továbbá olyan összevont, több funkciót is ellátó alkatrészeket, melyek a hagyományos megmunkálási technológiákkal csak több komponensből álló összeállításként lehettek volna legyárthatók.

3. MÓDSZERTAN

3.1. CFD

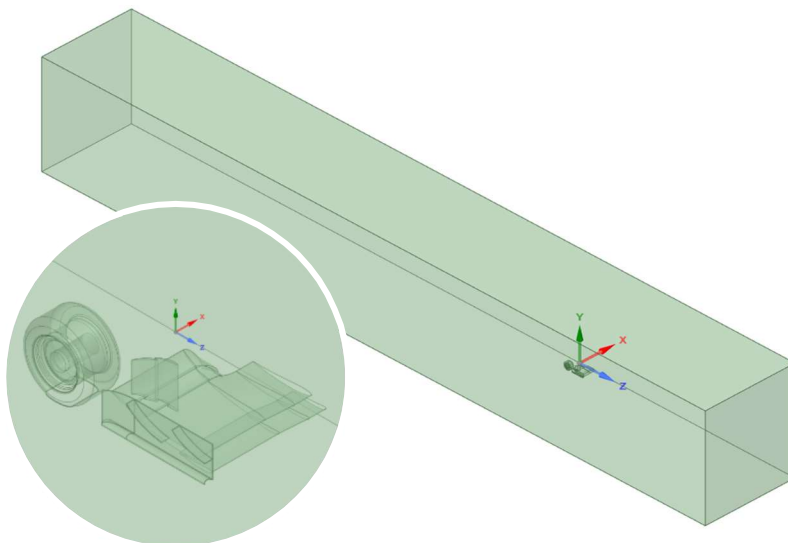
3.1.1. GEOMETRIA

Dolgozatomhoz a csapat által alkalmazott PTC Creo Parametric 8 programot használtam az alap geometria elkészítéséhez. Két különböző kialakítású terelőelemet terveztem, melyek később összehasonlításra kerültek. Az említett elemek a 10. ábrán láthatók.



10. ábra: A terelőelem C1 (bal) és C2 (jobb) verziója

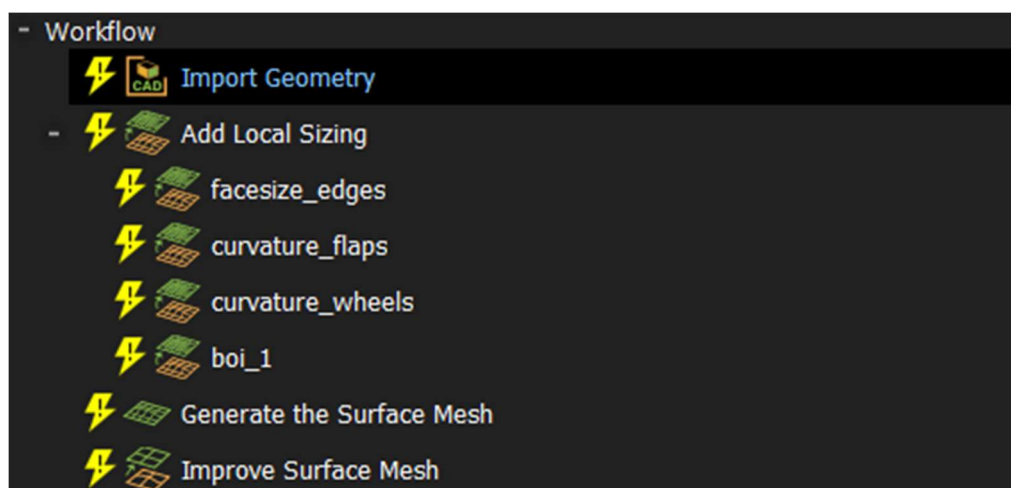
Mivel az elsődleges aerodinamikai cél az első kerekek légellenállásának csökkentése, ezért azok mindenképp a modell részét képezték, azonban az autó többi része számítási kapacitás hiányában nem kerülhetett bele. Az áramlástan vizsgálat célja egyébként is a különböző verziók összehasonlítása volt, melyben a terelőelem nélküli első szárny (C0) szolgált referenciaként.



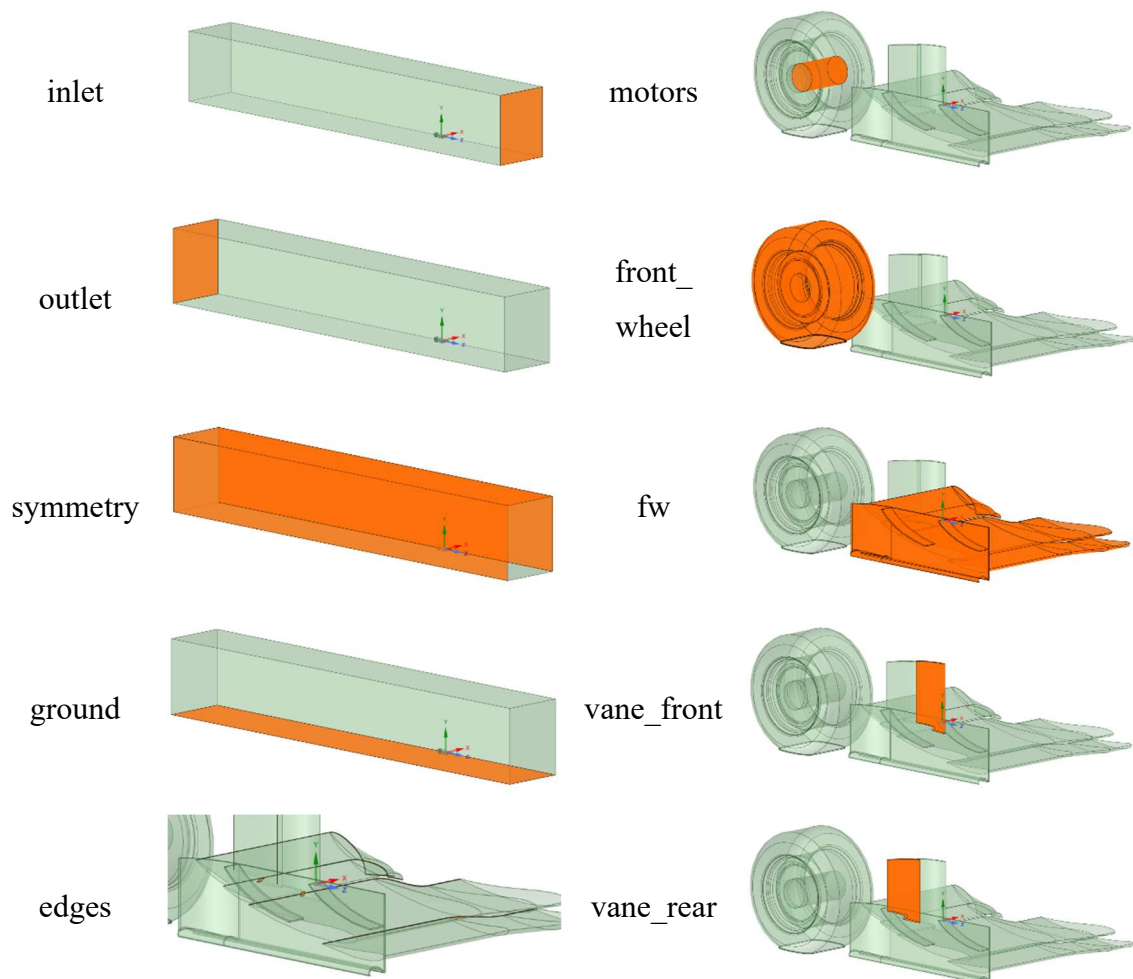
11. ábra: Az áramlási tér létrehozása „SpaceClaim-ben”

A kezdeti geometriát beimportálva a „SpaceClaim-be” az FRT-ben használt dimenziókkal (37000x5000x6000mm) létrehoztam az áramlási teret (11. ábra). Ebből kivágásra került a modell, amit a közepsík mentén kettéosztunk a kisebb számítási igény érdekében. Ezt követően elvégeztem minden módosítást, javítást, ami ahhoz szükséges, hogy a későbbi hálózás során minél jobb minőségű hálót kapjunk. Ezután definiáltam a különböző felületcsoportokat, melyek később egyéni peremfeltételeket kaphatnak, illetve lekérdezésekhez használhatók fel.

3.1.2. HÁLÓZÁS



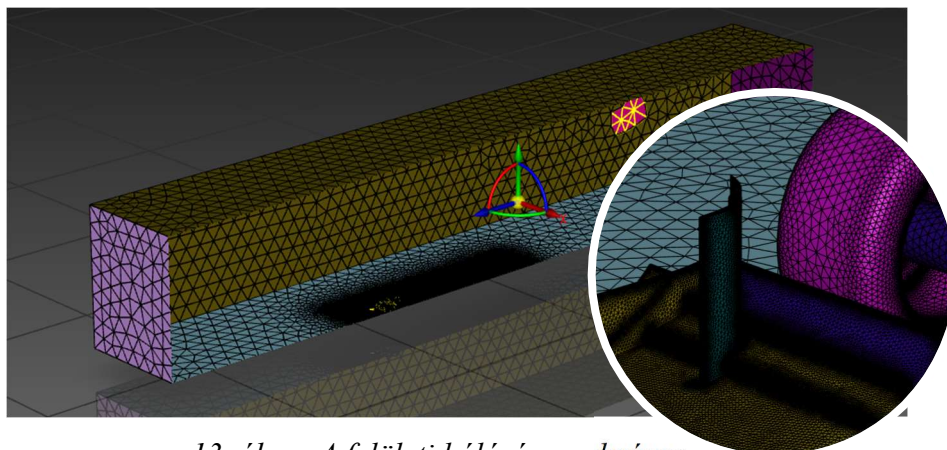
12. ábra: A hálógenerálás lépései ½



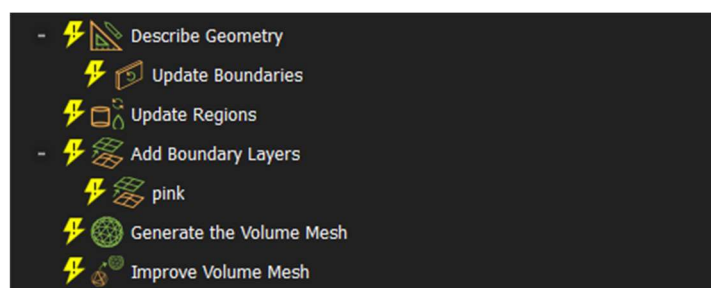
1. táblázat: A lokális hálóméretek csoportosítása

A hálózási lépések (12, 14. ábra) közül az első a „SpaceClaim-ben” elkészített geometria importálása, melyet a lokális hálóméretek definiálása követ. Szimulációimban az 1. táblázatban látható lokális csoportokat különítettem el egymástól. Az alábbi ábrákon az egyes „local sizing-okhoz” tartozó felületek láthatók.

A fentebb taglalt lokális hálóméretek az adott elemek komplexitása, vizsgálat szempontjából vett prioritása és az eredményt befolyásoló képességük szempontjából lettek meghatározva. Így az olyan részek, mint az élek („edges”) és a szárnyelemek („flaps”) kisebb, míg a kerekek („wheels”) nagyobb hálóméretet kaptak. A geometria közvetlen környezetére továbbá egy nagyobb hálósűrítés is került az eredmények pontossága érdekében. Ezen paraméterek beállítása után a felületi hálózás, majd egy háló javítás következett, melynek grafikus eredményét a 13. ábra szemlélteti.

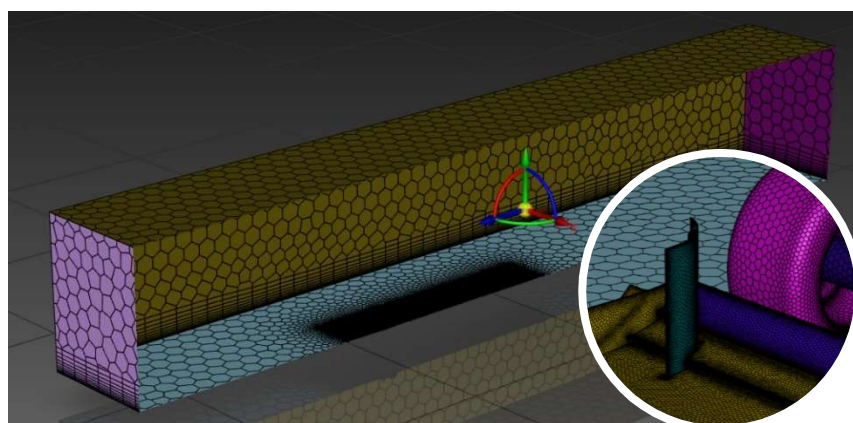


13. ábra: A felületi hálózás eredménye



14. ábra: A hálógenerálás lépései 2/2

A felületi hálózást követően az egyes felületek típusait állítottam be. Definiáltam a be- és kiáramlási felületet, valamint a szimmetriát. Minden egyéb felületre fal típust alkalmaztam. Az „Update Regions” lépésnél a különálló egységek térfogati tulajdonságait tudjuk szilárd, folyadék, vagy éppen kihagyott állapotúra állítani. Ezt követően határréteghálót lehet létrehozni, aminek a beállításai szintén felületenként variálhatók. A hálózás folyamata a térfogati háló generálásával ér véget, emellett a jobb hálómínőség érdekében egy térfogati háló javítást is alkalmaztam. A térfogati hálózás grafikus eredménye a 15. ábrán tekinthető meg.



15. ábra: A generált háló a térfogati hálózás után

3.1.3. SOLVER BEÁLLÍTÁSOK

A „Fluent” megoldó szegmensében az FRT által használt beállításokat használtam. Ami a közeg paramétereit illeti, különböző számításokból kiderült, hogy a Mach szám elég alacsony ahhoz, hogy a levegőt összenyomhatatlannak tekintsük. A sűrűség az átlag versenykörülményekből került kiszámításra, mely így $1.1841 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ -ben került meghatározásra. Turbulenciamodellként az SST k- ω -t használtam, mivel a tapasztalatok alapján moderált hálómínőség mellett is relatíve magas konvergenciaarányal rendelkezik.

A vizsgálatot 15 m/s-os beáramlási sebességgel végeztem, mivel az elemzések alapján az 50 km/h körüli kanyarsebesség a leggyakoribb a Formula Student pályákon. Ezután a beáramlással azonos irányban és azonos sebességgel mozgó talajfelületet is beállítottam. Az FRT-ben a kerekek forgását is szimuláljuk, így én is meghatároztam a szimulációkban egy 75 rad/s szögsebességű rotációt.

Az eredmények számszerűsítésére lekérdezéseket hoztam létre. Elsődlegesen az összesített leszorítóerőt és a légellenállás értékeket kérdeztem le, melyek irányadóként szolgáltak az iteratív fejlesztéshez. Emellett szárnyelemenként is vizsgáltam a különböző irányokba mutató erőket, mivel ezek a későbbiekben bemeneti feltételként szolgálhatnak a generatív tervezésnél.

3.1.4. HÁLÓFÜGGETLENSÉGI VIZSGÁLAT

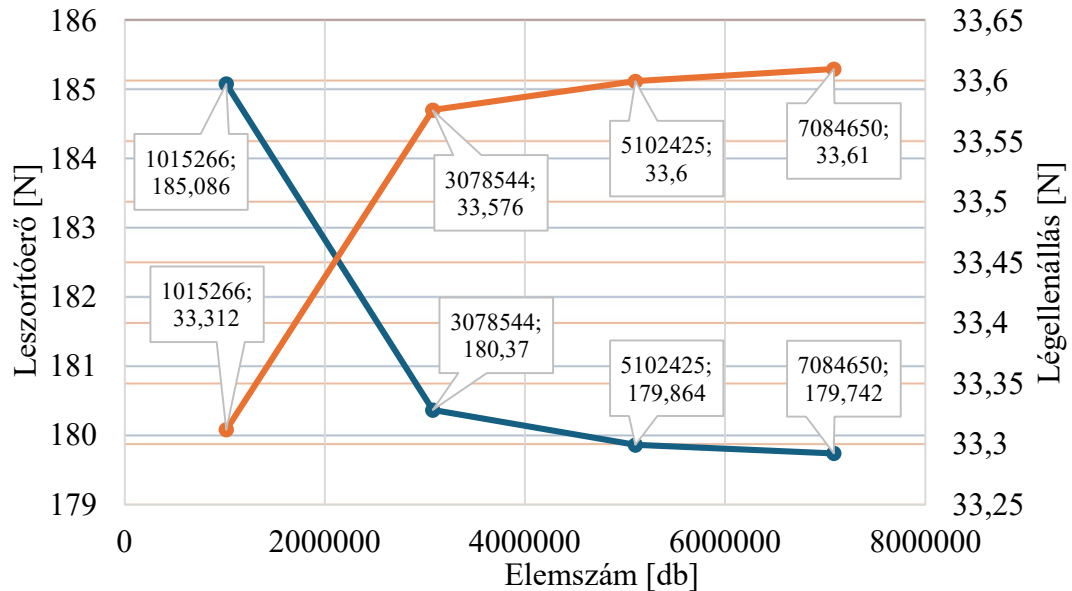
A dolgozatban megválasztott hálóbeállításokhoz az FRT-ben használt beállításokat vettem alapul, ahol szinte minden részegység külön hálómérettel rendelkezik a rá jellemző komplexitás, relevancia fényében. Természetesen hálófüggetlenségi vizsgálat is készült az ideális beállítások megtalálása érdekében.

	Cell Number	Min. Orthogonal Quality	Downforce [N]	Drag [N]
Mesh 0	1015266	0,13	185,086	33,312
Mesh 1	3078544	0,14	180,37	33,576
Mesh 2	5102425	0,1	179,864	33,6
Mesh 3	7084650	0,14	179,742	33,61

2. táblázat: A hálófüggetlenségi vizsgálat numerikus eredményei

A hálózó az alapeometriára az FRT beállításaiival egy 3 millió körüli elemszámú hálót generált, így egy kisebb és két nagyobb elemszámú háló vizsgálata mellett döntöttem 2 milliós lépésközzel. Mint már említésre került, a vizsgálatot egy V0 verziószámú szárnyal

végeztem, amin még nem szerepelt terelőelem. Az 2. táblázatban látható a négy különböző háló elemszám, leszorítóerő, illetve légellenállás szerint.



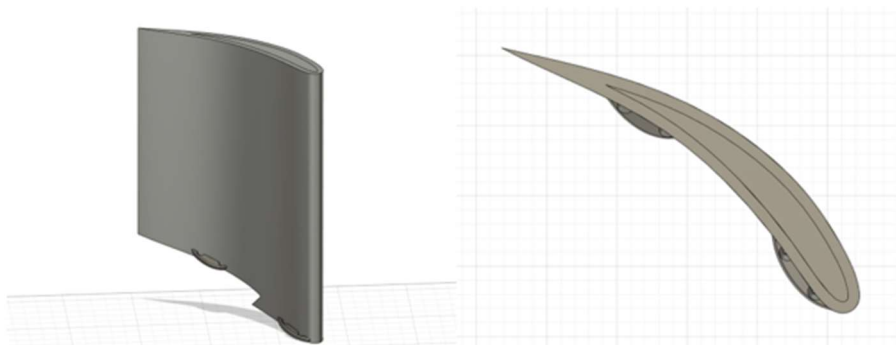
16. ábra: Hálófüggetlenségi vizsgálat eredményei az elemszám függvényében

A 16. ábra jól szemlélteti az 1. táblázatban felsorolt adatok egymáshoz viszonyított értékét. Az elemzés során megállapítottam, hogy a második számú hálóbeállítás (táblázatban „Mesh 2”) már elegendő pontossággal rendelkezik ahhoz, hogy az eredményeket valósnak tekintsük, illetve az elemszám is elfogadható. A saját konfigurációmon a Mesh 2 ötmillió körüli elemszáma nagyjából 7 és fél órás futásidőt eredményezett, így ezt a beállítást választottam a későbbi vizsgálatokhoz.

3.2. A GENERATÍV TERVEZÉS MENETE

Dolgozatom mechanikai optimalizációval foglalkozó részének tervezési munkáit az Autodesk Fusion 360 szoftverrel végeztem.

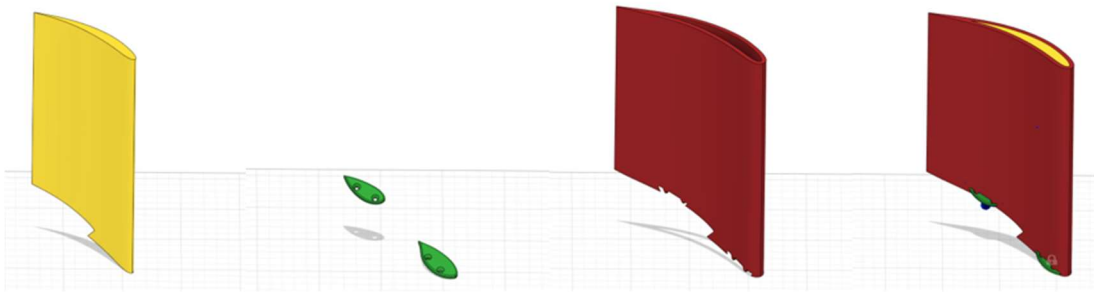
3.2.1. GEOMETRIA



17. ábra: Generatív tervezéshez előkészített geometria

A kezdeti geometria (17. ábra) az áramlástan szimulációk alapján legelőnyösebbnek ítélt terelőelem Creo modellje volt, amit rögzítőfelületekkel egészítettem ki. Ezt követően a modellt beimportáltam a Fusion CAD moduljába és elvégeztem azokat a módosításokat, melyek szükségesek voltak a generatív tervezés elkezdéséhez. A modell felosztásra került két független testre. A külső rész egy héj, amely tartalmazza a szükséges áramlási geometriát. A belső rész pedig a merevítő szerkezet létrehozásához rendelkezésre álló térfogat.

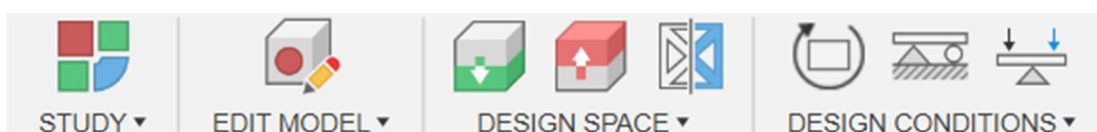
3.2.2. RÉGIÓK PARAMETRIZÁLÁSA



18. ábra: Tervezési régiók felosztása

Mindenekelőtt definiálni kellett, hogy melyik testek milyen formában vegyenek részt a tervezésben (18. ábra). Kezdeként a terelőelem modelljét jelöltem ki, ami a kiinduló geometriaként (sárga) szolgált. Ez a térfogat az, amelybe az algoritmus anyagot rendezhet át. A rögzítőtalpak adták a maradó geometriát (zöld), ugyanis ezeknek az optimalizáció során változatlanul kellett maradniuk, illetve a terhelések egy részét is ezek felületeire adtam meg. Az előbbi csoportba tartozó testeket a szoftver nem módosíthatja. Természetesen kizáró geometriára (piros) is szükség volt, hogy a szoftver a tervezés során ne hagyja el a szárnyprofil formát és ezen belül hozza létre az optimalizált alkatrészt. Ezt a geometriai módosítások során létrehozott kiinduló geometriát körülvéő héj biztosította. Az ilyen típusú geometriákat a program kizárja a tervezési térből, nem hoz létre benne anyagot.

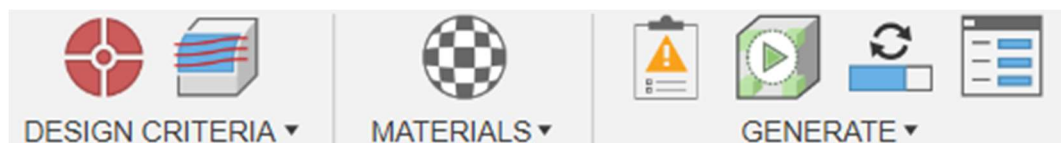
3.2.3. TERVEZÉSI PEREMFELTÉTELEK



19. ábra: Generatív tervezés beállításai 1/2

A geometriai előkészítés után megadtam, milyen keretek között menjen végbe az optimalizációs folyamat. A „STUDY” fül alatt (19. ábra) a végeredmény felbontását tudjuk állítani a magasabb számítási igény ellenében. A lehető legelőnyösebb eredmény érdekében ezt a beállítást maximális felbontásra állítottam.

A tanulmányban az első rögzítőtalpat teljesen befogottnak tekintettem, így annak semmilyen irányú elmozdulást nem engedélyeztem. A terheléseket a hátsó talpra vettem fel, az értékek és a terhelés helye pedig a CFD szimulációk végeredménye alapján kerültek meghatározásra.



20. ábra: Generatív tervezés beállításai 2/2

Célkitűzésként (20. ábra) megadhatunk tömegminimalizálást, vagy pedig szilárdságmaximalizálást céltömeg elérése mellett, amik közül legtöbb iterációmnál az előbbi bizonyult hatékonyabbnak. Emellett a program lehetőséget biztosít a deformáció és kihajlás értékek korlátozására lokálisan és globálisan egyaránt.

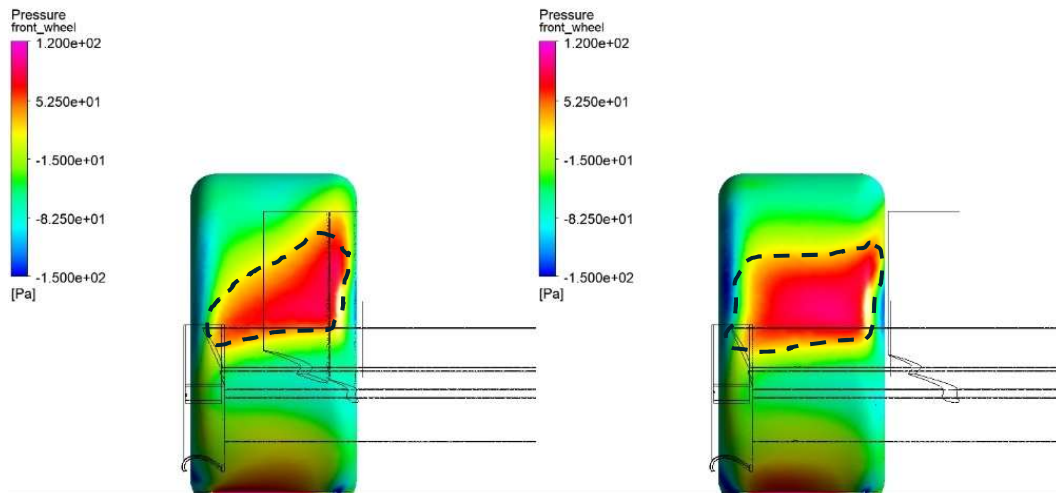
A gyártástechnológiák közül jelen esetben az additív, illetve a korlátlan létrehozás releváns számomra, azonban lehetőség van marás, vágás, illetve öntés beállítására, valamint ezek finomhangolására, így az algoritmus a kívánt eljárásra és paraméterekre optimalizáltan fogja létrehozni a geometriát.

Utolsó lépésként az anyagmodell szükséges definiálni. Rendelkezésre áll az Autodesk saját anyagkönyvtára, ami tartalmazza a gyártásban használatos alapanyagok széles választékát. Emellett létrehozhatók saját anyagmodellek, vagy akár a meglévők karakterisztikája is módosítható. A fejlesztés során főként a Ti6Al4V ötvözetet használtam, azonban kipróbáltam 3D nyomtatásban használt kompozit anyagokat is, mint például a PA 12 CF szénszálerősítéses műanyag.

A tervezés megkezdése előtt megbizonyosodtam róla, hogy az előzetes ellenőrző funkció semmiféle hibát nem talált a geometriában, illetve a beállításokban. Ezt követően elkezdhetővé vált az első szimuláció, mely az Autodesk saját szerverein kerül számításra, függetlenül a saját erőforrásoktól.

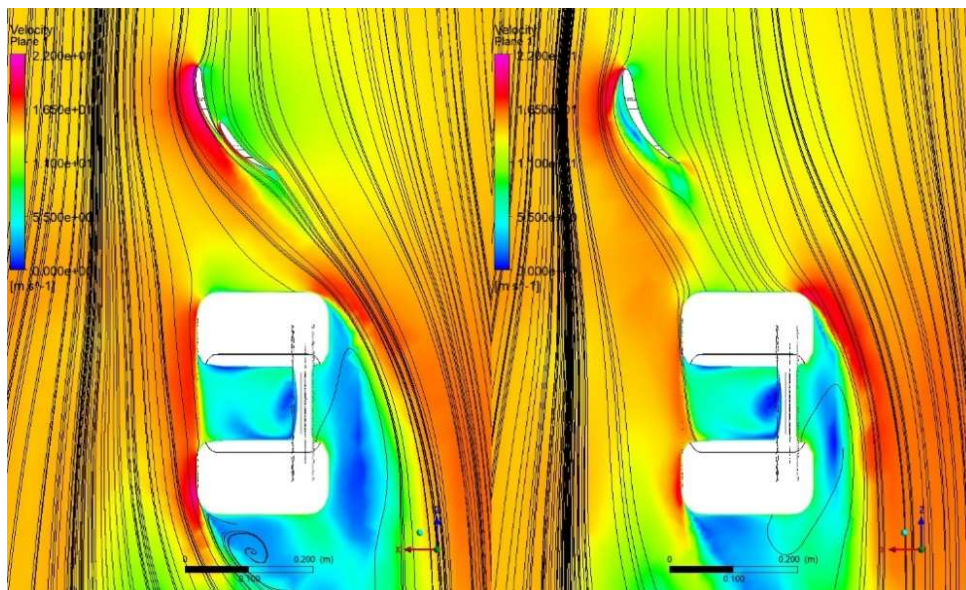
4. AERODINAMIKAI OPTIMALIZÁCIÓ EREDMÉNYEI

Az áramlástanai fejlesztést 2 iterációban, egy C1, C2 verziószámú koncepcióval végeztem, melyek vizsgálatakor megfogalmaztam az egyes variánsokkal kapcsolatos problémákat és módosítási javaslatokat, amiket a következő változatnál figyelembe vettem.



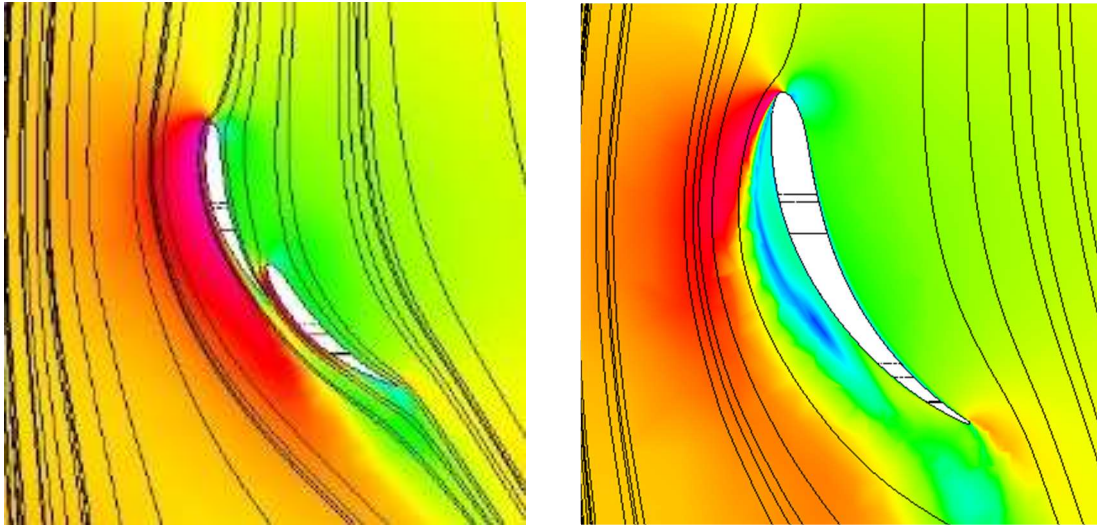
21. ábra: A kerekek felületi nyomásképe

Az aerodinamikai fejlesztés fő célja a kerekek légellenállásának csökkentése volt. A felületen vizsgált nyomáseloszlásból jól megmondható, hogy mely területeken éri nagy sebességű levegő az adott elemet. A 21. ábrán láthatjuk, hogy a C2 elemnél (bal) sokkal kisebb a magasnyomású felületek aránya, ami esetünkben kisebb légellenállást is jelent, mint a C1 (jobb).



22. ábra: Felülnézeti sebességeloszlás áramvonalakkal

A 22.-23. ábra jól szemlélteti, hogy míg a C2 (bal) elem tökéletesen hozza létre az terelő hatást, addig a C1 (jobb) csak annyira tereli meg az áramlásokat, hogy azok pont a kerék homlokfelületének ütköznek. A C1 verziónál továbbá erős leválás tapasztalható, ami a 23. ábrán kiemelten látszik. Ennek javítására az egy nagy szárnyprofilt két kisebb profilra bontottam, így sikerült a szívóoldali áramlás energiáját növelni, amivel jelentősen csökkent a leválás. Így az irányított légmennyiség nagy része a kerék külső síkján kívülre terelődött.



23. ábra: A leválási zónák kinagyítva

	Leszorítóerő [N]		Légellenállás [N]	
	C2	C1	C2	C1
Belépő élek	0,005	0,005	0,05	0,05
Első kerék	-4,414	-5,096	5,252	8,618
Első szárny	185,86	186,12	18,22	18,12
Agymotor (kerékben)	-0,082	-0,081	0,136	0,14
Első terelőelem	-0,422	(csak egy elem)	1,836	(csak egy elem)
Hátsó terelőelem	-0,295		3,996	
Overall	180,652	180,281	29,49	31,688

3. táblázat: Az áramlástan vizsgálat numerikus eredményei

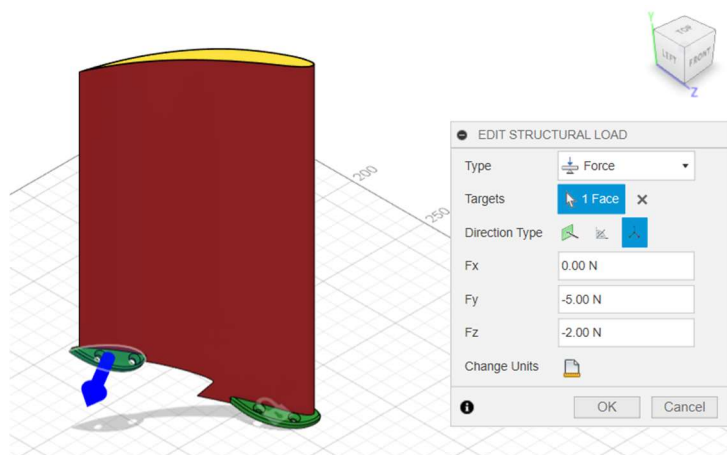
A 3. táblázatban láthatóak a későbbi generatív tervezéshez felhasználandó terhelések. Ezek közül kiemeltem a két változat között látható kerékre ható erő értékeket. Itt jelentős terhelés csökkenés látható a két verzió között (~39%-s csökkenés). Ez indokolja, hogy a későbbiekben miért csak a C2-s verzió lefejlesztésével foglalkoztam.

5. OSZTOTT TERELŐELEM GENERATÍV TERVEZÉS EREDMÉNYEI

A tervezés során minden mérföldkőnél figyelembe vettem az előzőleg tapasztalt tervezési hibákat és a korrigált geometriákkal, beállításokkal kezdtem meg a következő fejlesztési lépcsőt. Az egyes iterációkon belül több beállítást és alapanyagot is kipróbáltam, melyek csupán egy része teljesítette a felállított követelményeket. Emiatt csak a fejlesztés szempontjából lényeges tanulmányokat fogom részletesebben bemutatni a teljesség igénye nélkül.

5.1. V1

A kezdeti geometria már a módszertani fejezetben futólagosan bemutatásra került, itt viszont szeretném részletezni a forma kialakulásának elméleti hátterét, illetve a konkrét terhelési értékeket. A geometria szétbontott ábrája (18. ábra) feljebb tekinthető meg.

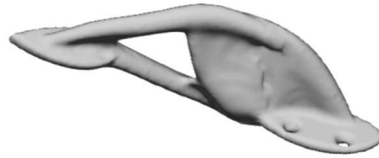


24. ábra: V1 tanulmány kiinduló geometriája és terhelései

A kezdeti geometriát, vagy másnéven a tervezési teret a CFD szimulációkból a legoptimálisabbnak ítélt szárnykonceptió adta. A vizsgálatok után erre rögzítőtálpakat terveztem, melyek maradó geometriaként szolgáltak a tervezési folyamat során. Annak érdekében, hogy a létrehozott szerkezet a szárnyprofil alapú hasábon belül maradjon, egy vékony héjat terveztem a kezdeti geometria köré, amelyet kizáró régióként definiáltam.

Az első rögzítőtálpalpon fix megfogás kényszer alkalmaztam, ugyanis a tanulmány során a második szárnyelemmel tökéletes kapcsolatot feltételeztem.

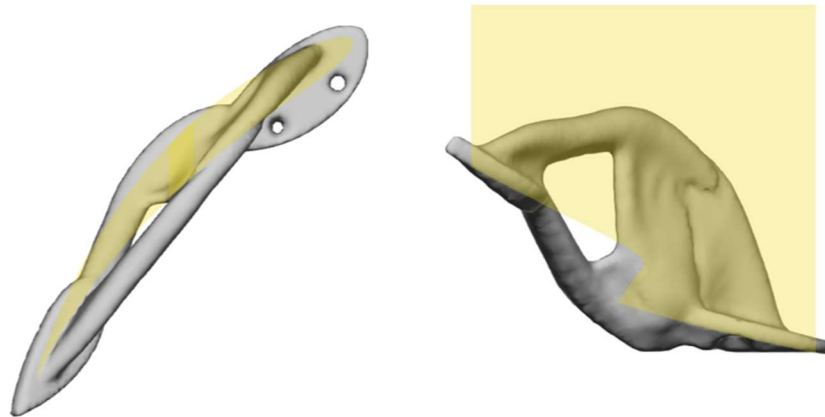
A terhelések, melyek a hátsó talp felületére lettek megadva, a CFD szimulációkból kapott numerikus eredményekből származtak. A terelőelem által generált terheléseket szintén a hátsó talpon ébredő erőként definiáltam. A konkrét értékek a 24. ábrán figyelhetők meg.



Properties	
Status	Converged
Generative model	Generative Model 1
Material	Titanium 6Al-4V
Orientation	Y+
Manufacturing method	Additive
Visual similarity	Ungrouped
Volume (mm ³)	17,115.658
Mass (kg)	0.076
Max von Mises stress (MPa)	0.312
Safety factor limit	1
Min safety factor	2,831.775
Max displacement global (mm)	8.594e-4

25. ábra: V1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei

A tanulmány végeredményeit a 25. ábra szemlélteti. A generált alkatrész több ponton sem felelt meg a céloknak. Egyrészt ahogy a 26. ábrán is látszik, nem sikerült kizárni a profilt határoló területeket, így az algoritmus a tervezési téren (sárga) kívül is hozott létre anyagot, valamint nem alakított ki vertikális rácsszerkezetet, ami a terelőelemet stabilizálná. Egyedül a vízszintes szárnyelem terheléseinek felvétele teljesült, azonban itt átfedés tapasztalható a létrehozott geometria és a szárnyelem között.

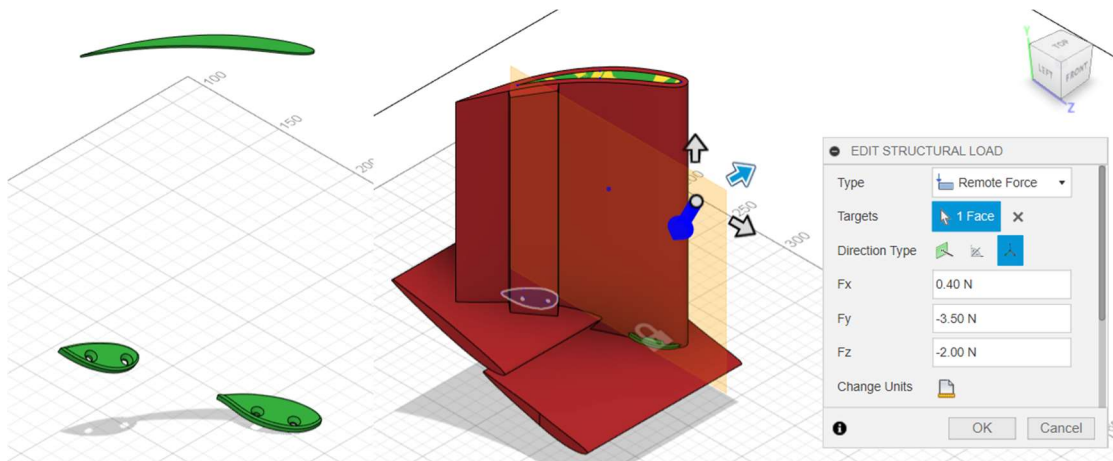


26. ábra: V1 alkatrész felül- és oldalnézete

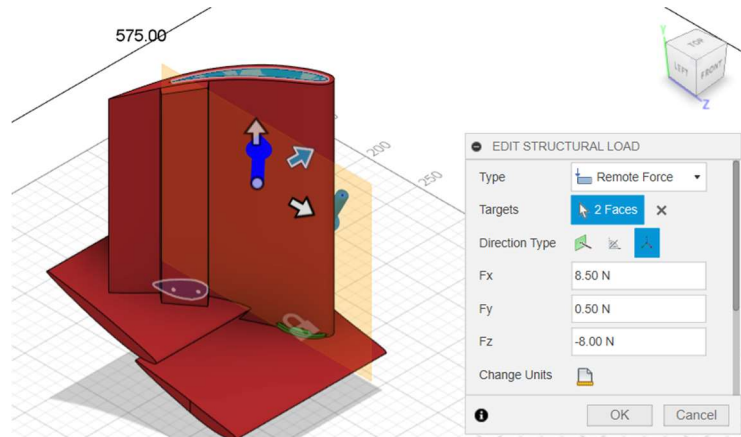
5.2. V4.1

A V4.1 tanulmányban a korábbi iterációk több hibáját is sikerült orvosolnom.

A tervezés szárnyprofilon belül tartását a külső héj-szerű kizáró geometria falvastagságának növelésével sikerült elérni, amelyet néhány ponton külön kiterjesztettem, hogy a csavarfej-süllyesztékek is szabadon maradjanak (27. ábra). Emellett a szimulációkhoz használt vízszintes szárnyelemeket is beimportáltam és a kizáró csoporthoz adtam őket, hogy elkerüljem a V1 verziónál tapasztalt ütközéseket.



27. ábra: V4.1 tanulmány maradó geometriái (balra) és a véglapra megadott terhelések



28. ábra: V4.1 tanulmány - rögzítőtalpra megadott terhelések

Annak érdekében, hogy a szoftver a terelőelem számára is hozzon létre tartószerkezetet, az elem tetejére egy profil formájú véglapot (27. ábra, bal oldal) modelleztem, ami maradó régióként lett definiálva és az elemen ébredő terhelések is ennek felületére lettek felvéve eltolt erőként, aminek a hatásvonala a CFD szimulációk alapján került megállapításra és megközelítőleg az elem középpontján mutat keresztül (28. ábra).

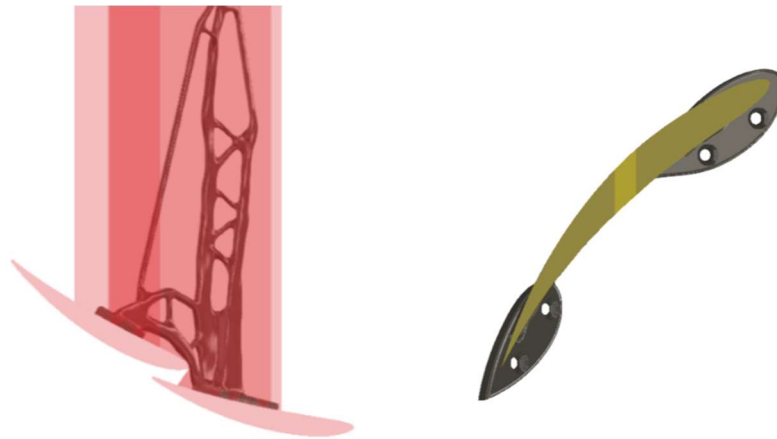


Properties	
Status	Converged
Generative model	Generative Model 1
Material	Titanium 6Al-4V
Orientation	-
Manufacturing method	Unrestricted
Visual similarity	Ungrouped
Volume (mm ³)	16,533.193
Mass (kg)	0.073
Max von Mises stress (MPa)	10.507
Safety factor limit	1
Min safety factor	83.995
Max displacement global (mm)	0.402

29. ábra: V4.1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei

Eredmények szempontjából is fejlettebb lett ez a koncepció, ugyanis megközelítőleg azonos tömeg mellett sikerült egy vertikális tartószerkezetet létrehozni és jelentősen csökkenteni a túlzottan magas biztonsági tényezőt (29. ábra).

A fejlesztés során azt tapasztaltam, hogy amennyiben a vízszintes szárnyelemek aktív használatban (kizáró régióként) vannak a geometriában, úgy a szoftver nem futtatja le az algoritmust additív gyártási technológiára, az 1. iterációt követően hibaüzenettel megszakítja azt. Ebből kifolyólag a továbbiakban független gyártási módot használtam, mivel a gyártástervezés és kivitelezés megfelelő orientációval és esetlegesen támaszanyag beépítésével így is megoldható.



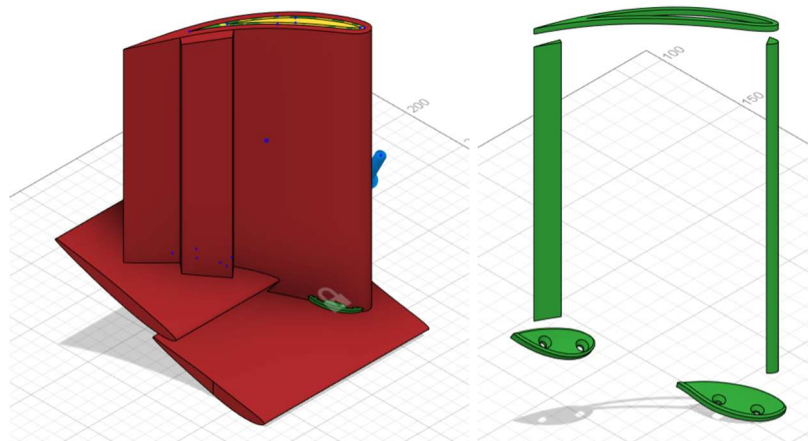
30. ábra: V4.1 tanulmány kizáró (balra) és kiinduló (jobbra) geometriája

A 30. ábrán megfigyelhető, hogy a vízszintes elemek használatával megszűntek az egybeérő régiók, illetve a megvastagított héjnak köszönhetően a teljes kötőelem a profilon belül jött létre.

5.3. V5.1

A V5.1 verziónál a terelőelem kompozit héjának minél pontosabb pozicionálására törekedtem.

A 31. ábrán látható, hogy ezt a profil belépő- és kilépőeleinek maradó geometriához csatolásával igyekeztem megvalósítani. Emellett a tömegcsökkentés érdekében a felső véglapról anyagot távolítottam el, hogy csak a héj keresztmetszetének megtartását biztosítsa.



31. ábra: V5.1 tanulmány felépítése (balra) és maradó geometriája (jobbra)

A megadott terhelések megegyeztek a V4.1 tanulmányban alkalmazottakkal.

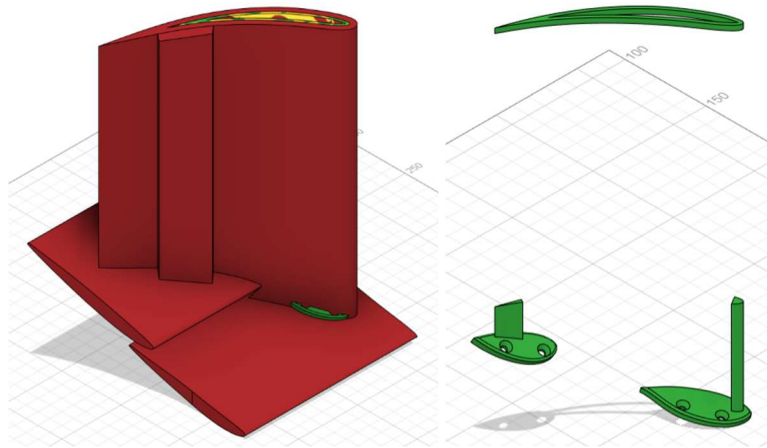


Properties	
Status	Converged
Generative model	Generative Model 1
Material	Titanium 6Al-4V
Orientation	-
Manufacturing method	Unrestricted
Visual similarity	Ungrouped
Volume (mm ³)	22,229.625
Mass (kg)	0.098
Max von Mises stress (MPa)	9.007
Safety factor limit	1
Min safety factor	97.981
Max displacement global (mm)	0.342

32. ábra: V5.1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei

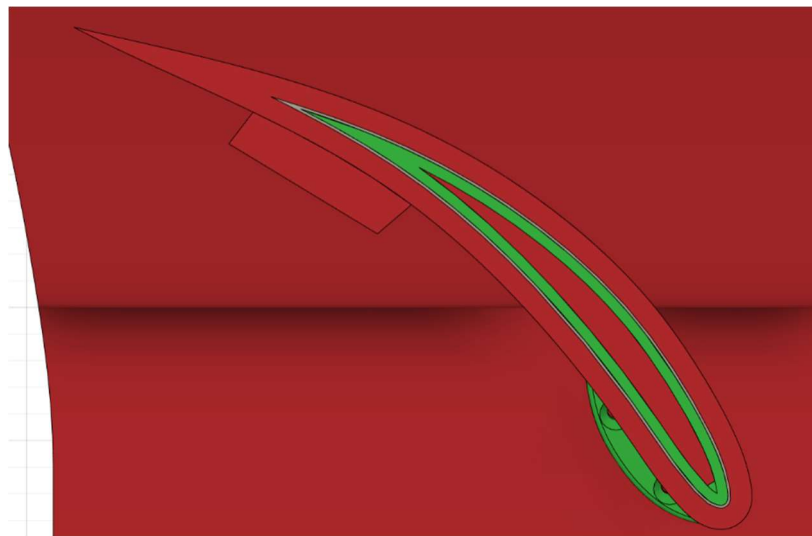
Az eredmények nem kielégítőek. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a maradó testek számának növekedésével egyre nehezebben generálja le problémamentesen a geometriát a szoftver. Ráadásul a lefutott tanulmányok közül sem sikerült optimálisat találni. Legtöbb helyen a belépő- és kilépőélek nem vettek részt az erőjátékban és mivel a pozicionáláshoz kisebb csomópontok is elegendők, így csak felesleges tömegként voltak jelen (32. ábra). A jobb megvezetéshez nagyobb tömeg és biztonsági tényező társult, azonban a feljebb leírtak miatt nem bizonyult elég hatékonynak a koncepció.

5.4. V8.2



33. ábra: V8.2 tanulmány felépítése és maradó geometriái

Az előző iterációk hibáiból tanulva itt egy komplexebb héjrendszert alakítottam ki. Az alap méretek a régiéek maradtak, a pozícionáló csomópontok viszont inkább a rögzítőtálpak nyúlványaivá alakultak át, mivel a kompozit héj felső végének rögzítését maga a véglap is el tudta látni (33. ábra).

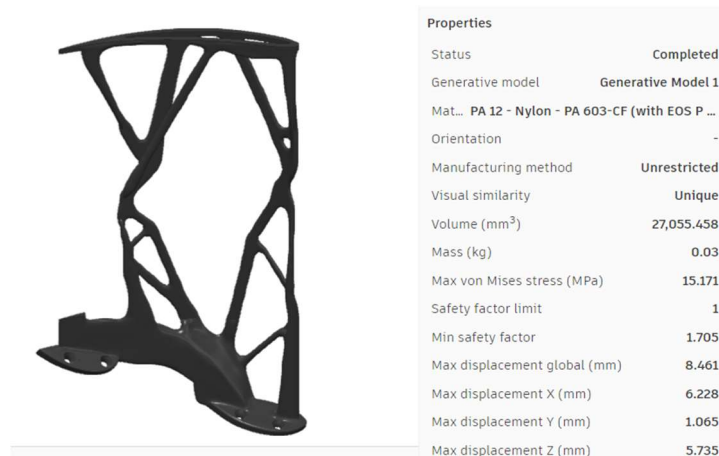


34. ábra: V8.2 tanulmány geometriai felépítése felülnézetből

A geometriában újonnan helyet kapott egy a kompozit héjat reprezentáló test, melynek falvastagsága 0,5 mm. Fontos megjegyezni, hogy a generatív tervezés szempontjából nem kerül felhasználásra ez az elem, azonban mivel átfedésben van a tervezési térrel, így később kivonható lesz a tervezett alkatrészből, biztosítva ezzel, hogy a héjjal problémamentesen egybecsússzon.

Annak érdekében, hogy a tartószerkezet közvetlenül a héj belső falát merevítse, a tervezési tér középebe egy kicsinyített profilos hasábot modelleztem abból a célból, hogy

az kikényszerítse a tervezést a falak mellé. Ennek megfelelően kizáró geometriaként definiáltam. Az imént felsorolt fejlesztések a 34. ábrán láthatóak.



35. ábra: V8.2 tanulmány grafikus és numerikus eredményei

A tanulmányban megadott terhelések a régiek maradtak és az is egyre nyilvánvalóbb lett, hogy ilyen feltételek mellett a szálerősített PA 12 polimer is elegendő lenne, mint alapanyag (35. ábra). Habár a tömeg sokkal kedvezőbben alakult ez esetben, a deformáció növekedett, ezért annak maximumát a teljes alkatrészre nézve 10 mm-re állítottam be.

A középső kizáró geometria révén sikerül a héj falához szorítani a szerkezetet, ami nem csak esztétikailag, de mechanikai szempontból is előnyösnek bizonyult. Emellett a kezdeti geometriákban rejlő potenciál elérte a maximumát, így azt a fejlesztés további szakaszára befagyasztottam.

5.5. V10.1

A V10.1 és V10.2 tanulmányokat egy új FSG szabályrendszer szerint paramétereztem fel. Itt a kezdő geometria többnyire ugyan az volt, mint a V8.2 esetében, egyetlen eltérés a központi kizáró geometria kikapcsolása volt.

T8.3 Aerodynamic Devices Stability and Strength

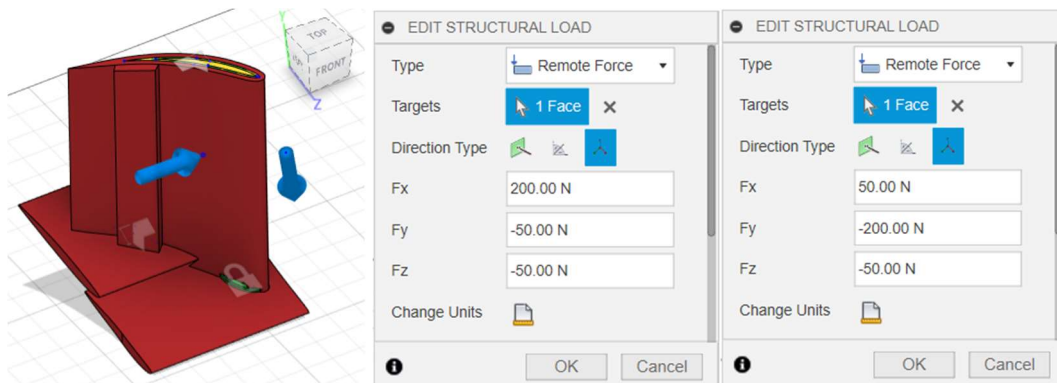
- T8.3.1 Any aerodynamic device must be able to withstand a force of 200 N distributed over a minimum surface of 225 cm² and not deflect more than 10 mm in the load carrying direction.
- T8.3.2 Any aerodynamic device must be able to withstand a force of 50 N applied in any direction at any point and not deflect more than 25 mm.

36. ábra: A 2025-ös Formula Student Germany szabályzat T8.3 pontja [17]

A terhelések meghatározása a Formula Student Germany által kiadott, a 2025-ös versenyszezontól érvénybe lépő Formula Student Szabályzat T8.3 szabálypontja szerint történt, mely kimondja, hogy

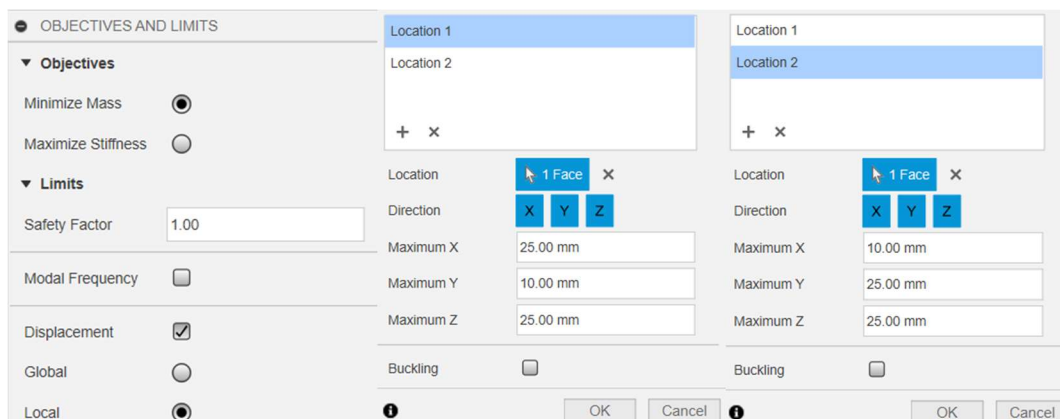
- Minden aerodinamikai eszköznek ellen kell állnia 200 N nagyságú erőnek egy minimálisan 225 cm² nagyságú területen szétszlatva és a deformáció nem lehet nagyobb 10 mm-nél teherviselő irányban. [17]
- Minden aerodinamikai eszköznek ellen kell állnia 50 N nagyságú erőnek bármilyen irányban és bármely ponton terhelve, a deformáció pedig nem lehet nagyobb 25 mm-nél. [17]

A szabálypont pontos leírása a 36. ábrán látható.



37. ábra: V10.1 tanulmány terhelései

A terheléseket a 37. ábrán látható módon adtam meg a véglapra (középen), illetve a rögzítőtalpra (jobbra). Érdeemes megjegyezni, hogy a Fusion-ben terhelés megadása csak maradó geometriák felületére lehetséges, így a szabályzatban leírt felületen megoszló teher leképezése nem megoldható, mivel a software az ilyen típusú terheléseket nem ismeri. Ebből kifolyólag a már bemutatott terheléstípusokat alkalmaztam, azonban az értékeket módosítottam. A véglap esetében a teherviselési irány, tehát a 200 N nagyságú vektorkomponens az X, míg a talp esetében -Y irányban lett definiálva. Ezek meghatározásához támpontként szolgáltak a CFD szimulációk eredményei. Minden más irányban 50 N nagyságú erő lett felvéve.



38. ábra: V10.1 tanulmány célkitűzési és feltételi beállításai

A szabályzatnak megfelelően módosításra kerültek a deformációkorlátok is. A globális helyett a lokális elmozdulások meghatározása mellett döntöttem, amiket a terhelésekkel azonos felületekre vettem fel. A 38. ábrán a tervezési célkitűzés beállításai mellett láthatók a rögzítőtalp (Location 1), illetve a véglap (Location 2) deformációs küszöbei. A teherviselési irányokba a szabályzatba foglalt 10 mm-t, míg a többi irányba 20 mm maximális elmozdulást állítottam be.



Properties	
Status	Converged
Generative model	Generative Model 1
Material	Titanium 6Al-4V
Orientation	-
Manufacturing method	Unrestricted
Visual similarity	Unique
Volume (mm ³)	18,371.624
Mass (kg)	0.081
Max von Mises stress (MPa)	362.099
Safety factor limit	1
Min safety factor	2.437
Max displacement global (mm)	9.324

39. ábra: V10.1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei

Az eredmények mind esztétikai, mint mechanikai szempontból kedvezőek lettek. A tömeget ideálisnak ítéltam és a maximális deformáció értéke is határon belül volt (39. ábra).

A tanulmányból egyértelművé vált, hogy a versenyszervezés által meghatározott terhelések elviselésére a PA 12 CF már nem alkalmas, így a továbbiakban nem is készültek tanulmányok erre az anyagra.

5.6. V10.2

Ez a tanulmány a V10.1 verzióval párhuzamosan futott. A peremfeltételek szinte azonosak voltak azzal a különbséggel, hogy itt újra a geometria részét képezte a központi profilos hasáb alakú kizáró elem. Ezzel azt vizsgáltam, hogy miként befolyásolja a szilárdsági tulajdonságokat a V8.1 verziónál már említett kompozit héj falához való kényszerítés.

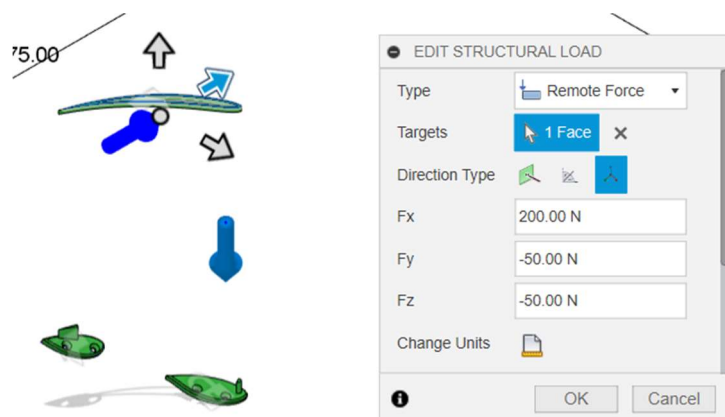


Properties	
Status	Converged
Generative model	Generative Model 1
Material	Titanium 6Al-4V
Orientation	-
Manufacturing method	Unrestricted
Visual similarity	Unique
Volume (mm ³)	16,532.154
Mass (kg)	0.073
Max von Mises stress (MPa)	458.547
Safety factor limit	1
Min safety factor	1.925
Max displacement global (mm)	22.647

40. ábra: V10.2 tanulmány grafikus és numerikus eredményei

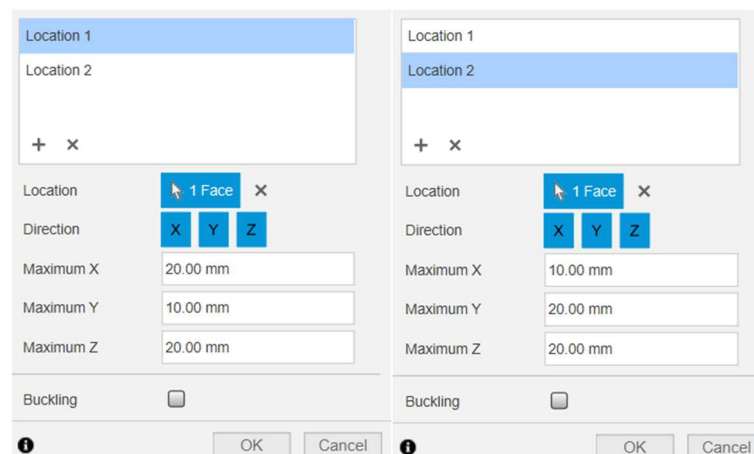
A generált forma kisebb térfogattal és tömeggel rendelkezett, mint a V10.1 esetében, azonban a 40. ábrán megfigyelhető, hogy a maximális deformáció majdnem a kétszerese lett, mint a párhuzamos tanulmányé. Ebből tehát kiderült, hogy a központi kizáró geometria jelentős szilárdságbeli csökkenést okoz, azonban a héj merevítése miatt egy esetlegesen nagyobb tömeggel rendelkező alkatrész is megfelelő megoldás lehet. Ebből kifolyólag a fejlesztést két ágon folytattam tovább, aminek során a különbség a kizáró geometria jelenléte volt.

5.7. V13



41. ábra: A V13 tanulmány maradó geometriája és a véglap terhelése

A V13 verziónál több finomhangolást is alkalmaztam. Egyrészt a véglapra helyezett terhelés hatásvonalát síkba hoztam a lappal, melyet a 41. ábra szemléltet. Ez azért volt lényeges lépés, mivel a gépátvételi ellenőrzés során a vertikális elemek terhelését csak egy beakasztható húzó erőmérővel tudják vizsgálni, amit az elem végpontjára tudnak rögzíteni. Ebből kifolyólag a szerkezetet ezen a ponton éri koncentrált terhelés. Emellett a pozicionáló csapok hosszát is redukáltam a maradó tömeg csökkentése érdekében.



42. ábra: A V13 tanulmány deformációkorlátai a talpra (balra) és a véglapra (jobbra)

Az előzőekben tapasztalt magas deformációs értékek miatt a maximális elmozdulás értékeket a nem teherviselő irányokban csökkentettem. Ezek a módosítások a 42. ábrán megtekinthetők.



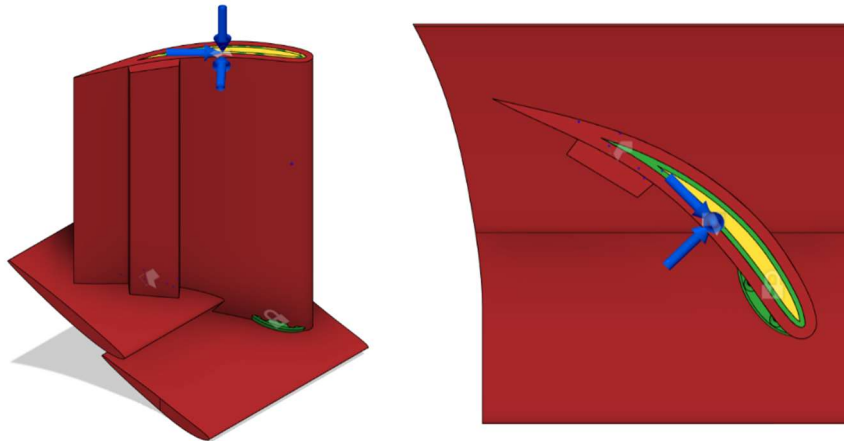
Properties	
Status	Converged
Generative model	Generative Model 1
Material	Titanium 6Al-4V
Orientation	-
Manufacturing method	Unrestricted
Visual similarity	Unique
Volume (mm ³)	20,334.257
Mass (kg)	0.09
Max von Mises stress (MPa)	370.214
Safety factor limit	1
Min safety factor	2.384
Max displacement global (mm)	14.046

43. ábra: A V13 tanulmány grafikus és numerikus eredményei

A kiértékelésnél azt tapasztaltam, hogy a nagyobb tömeggel párhuzamosan a legnagyobb elmozdulás értéke csökkent ugyan, de nem sikerült a határérték (43.ábra) alá vinni. Pozitív tényező, hogy mindezt a megnövelt erőkar ellenére teljesítette az alkatrész.

5.8. V16.1

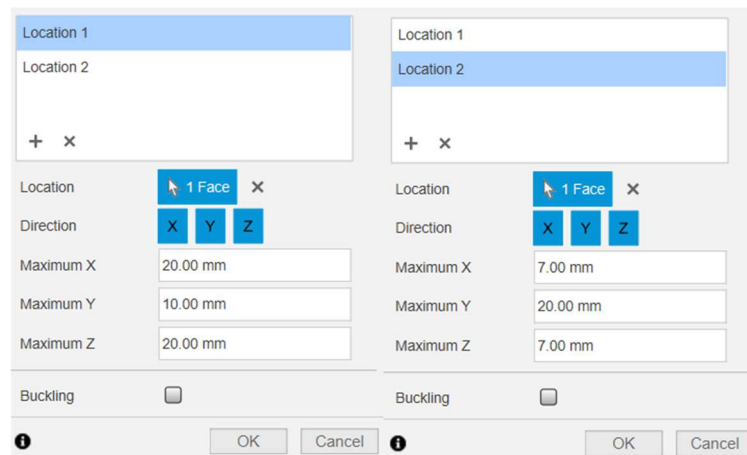
A V16.1 verzióhoz érve realizálódott, hogy bár nagyon sok potenciál volt a kizárt középrésszel rendelkező koncepciókban, azonos tömeg mellett szilárdsági tulajdonságokban elmaradtak a kizárt középrésszel nem rendelkező tanulmányoktól. Ebből kifolyólag a V16.1-nél az utóbbi kiosztást alkalmaztam



44. ábra: A V16.1 tanulmány terhelései

A véglap terhelésére módosításokat eszközöltem. Az eddigi összevont teher helyett most 3 darab különálló, felületre felvett erővel operáltam, melyet a 44. ábra szemléltet.

Erre azért volt szükség, mert az eddigi megoldásnál nem lehetett pontosan definiálni a teherviselési irányt. Az új megközelítésnél viszont mindegyik erővektornak külön megadható az iránya, illetve a nagysága.



45. ábra: A V16.1 tanulmány deformáció korlátai a talpra (balra) és a véglapra (jobbra)

Az elmozdulás határok meghatározásánál is tapasztaltam ezt a hibát, azonban itt a korlátozott beállítási megoldások miatt X és Z komponensekre kellett bontani a különböző deformációs irányokat. Mivel a teherviselési irányokban szigorúbbak a követelmények, ami 10 mm maximális kitérést enged, így azt tartottam fontosnak meghatározni az alábbi számolás segítségével.

$$a^2 + a^2 = c^2$$

$$a^2 + a^2 = 10^2$$

$$2a^2 = 100$$

$$a^2 = 50$$

$$a = \sqrt{50} = 5\sqrt{2} \approx 7,071 \text{ mm}$$

A szárnyprofil húrja 45°-os szöget zár be az X és Z tengellyel egyaránt, így a vektorok egy egyenlő szárú derékszögű erőháromszöggént értelmezhetők, melynek alapja a 10 mm-es elmozdulás. A Pitagorasz-tétel elvégzése után megkapjuk a maximális deformáció X és Z komponensét, ami mindkét esetben a pozitív irányba kerekítve 7 mm. A beállítások a 45. ábrán láthatók.

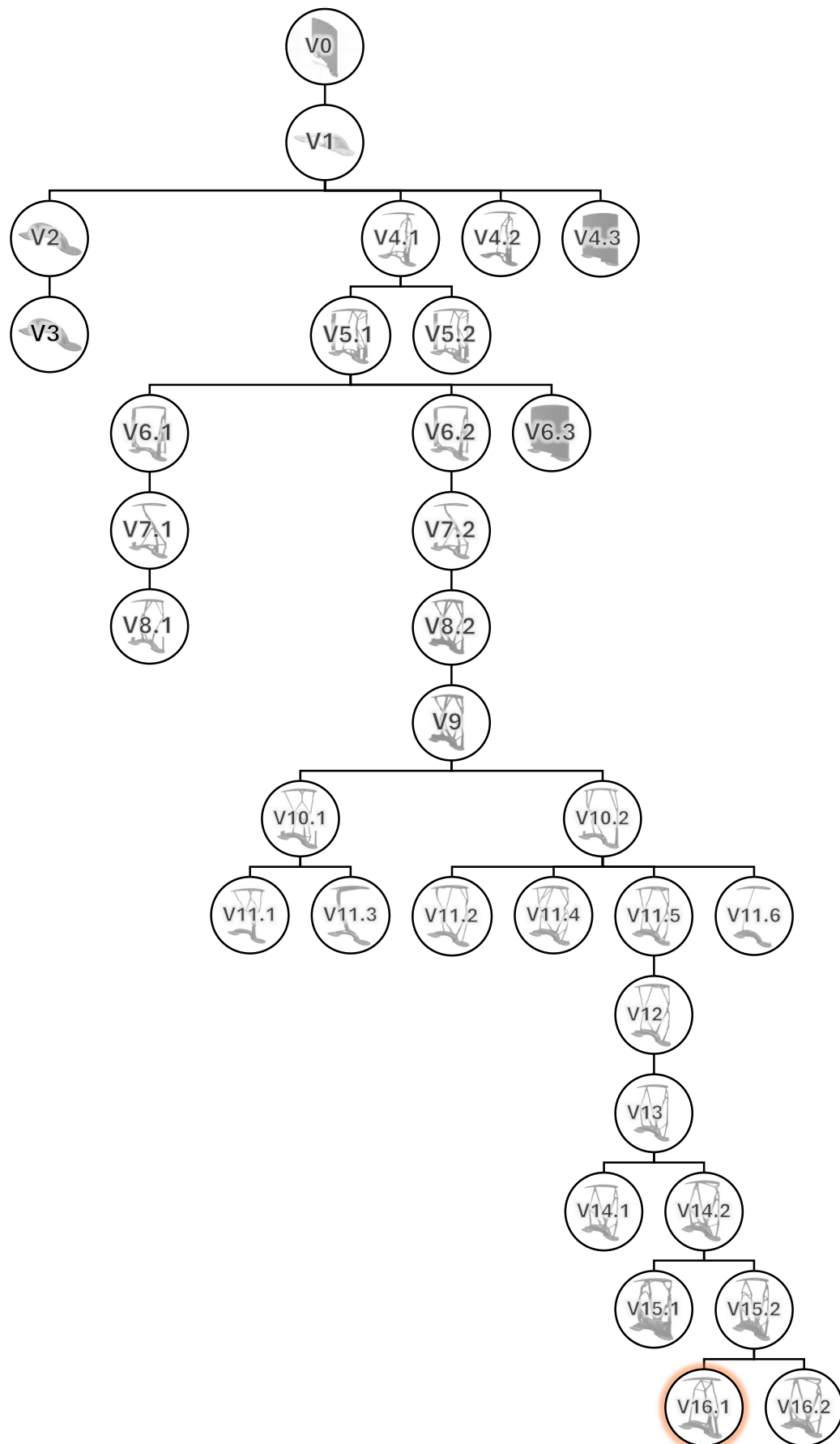


46. ábra: A V16.1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei

A 46. ábrából látható, hogy az eredmények kiegyensúlyozottak voltak. Sajnos a tömegnövekedést nem sikerült elkerülni, viszont a maximális deformáció sem haladta meg a megengedett értéket.

A V16.1 tanulmánnyal párhuzamosan futó tervezéseknél megfigyeltem, hogy egyre több projekt fut ki hibaüzenetre, vagy elégtelen szilárdsági értékeket produkál. Ez részben az egyre inkább behatárolt parametrizálásnak, ebből kifolyólag pedig az egyre csökkenő fejlesztési potenciálnak tudható be.

Ez a tanulmány volt az első, aminél a kész alkatrész szilárdsági tulajdonságainak visszaellenőrzésére végelelemes mechanikai analízist végeztem, melynek eredményeit a 6. fejezetben fejtettem ki részletesen.



47. ábra: A generatív tervezés fejlesztési ágdiagramja

A 47. ábrán látható a teljes fejlesztési fa, melyen több koncepcióváltást, fejlesztési zsákutcát, illetve elágazást láthatunk.

A V0 kezdeti geometriából kiindulva az első generatív verzió a V1 volt. Ez a tanulmány több külön fejlesztési utat is elindított, de míg a V3-nál a tartószerkezet hiánya, addig a V4.3-nál a nyomással való terhelésmegadás, a V4.2-nél a nem megfelelő anyaghasználat okozta a fejlesztési ág befejezését.

A V6.1-es verzió több iterációt is fel tudott mutatni, azonban a V8.1-nél már kijöttek azok a geometriai elégtetenségek, ami miatt a továbbfejlesztés lehetetlenné vált. A V6.3 koncepciót a rossz maradó geometria használata miatt nem tudta legenerálni a szoftver.

A V6.2 és V9-es verziók között több geometriai módosítás, illetve terhelés és megoldási beállítás változtatás történt, melyek közelítették a tanulmányok eredményeit a valósághoz.

A V10.1 és V10.2 tanulmánnyal elindult két párhuzamos fejlesztési főág, melyek között a fő különbséget a tervezési tér teljes illetve falszerű struktúrája jelentette.

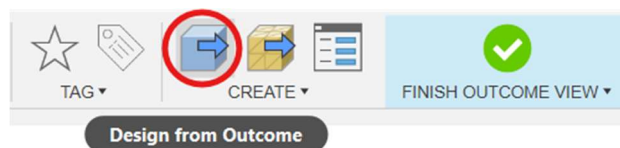
A V11-es sorszámú verziók között több olyan tanulmány is volt, melynek eredménye nem teljesítette a megadott kritériumokat, vagy éppen a szoftver nem tudta megoldani. Éppen ezért csak egy ág maradt, ahol továbbra is nagy fejlesztési potenciállal rendelkező tanulmányokat sikerült létrehozni.

A V16.1 és V16.2 verziók megoldási beállításainál a valósághoz közelebb álló peremfeltételek megadását a szoftver kínálta lehetőségek korlátozták. Így kimondható, hogy a lehetőségekhez mérten a legvalóságosabb peremfeltétel-rendszert sikerült összeállítanom az utolsó iterációkra. A leoptimálisabb geometriának végül a V16.1-est választottam, ugyanis a V16.2 a falmenti építés miatt nem tudta teljesíteni a deformációra vonatkozó kritériumokat.

6. VÉGESELEMES MECHANIKAI ANALÍZIS

A véges elemes analízis terheléseit a versenyszabályzat alapján megadott értékekkel végeztem el. A Gépjármű Technológia tanszék mérési eredményei alapján a Ti6Al4V ötvözet folyáshatára 1100 MPa, így a feszültséganalízis felső határa ez az érték lesz. A versenyszabályzat előír még egy maximum 25 mm-s deformációs kritériumot is. Ezt is belevettem a vizsgálatba, mint teljesítendő elvárást.

6.1. ELŐKÉSZÍTÉS

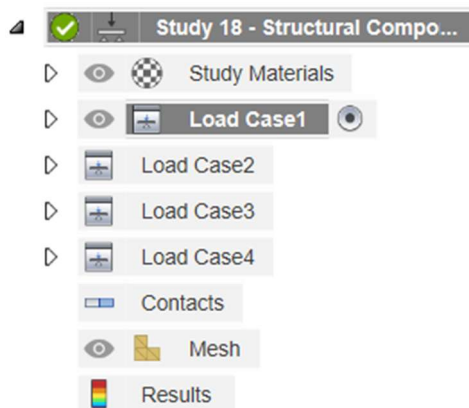


48. ábra: Geometria exportálása

Az előkészítést a generatív tervezési tanulmány végeredményeként kapott geometria exportálásával kezdtem, melyet az eredmények ablakában lévő menüsoron lehet megtalálni, ahogy azt az 48. ábra is szemlélteti. A modellen ezután hasonló javításokat alkalmaztam, mint a CFD szimulációk előtt, aminek célja a hálózás, később pedig a gyártás megkönnyítése. Emellett az 5.4-es alfejezetben leírt héjkivágást is elvégeztem.

A szimulációs modulba való átváltás után a rendszer képes érzékelni, hogy egy generatív tervezett alkatrész került behívásra, így felajánlja, hogy automatikusan importáljon minden terhelést és anyagparamétert az adott tanulmányból. Elfogadtam az opciót, de módosítottam is a terhelési beállításokon.

6.2. TERHELÉSEK



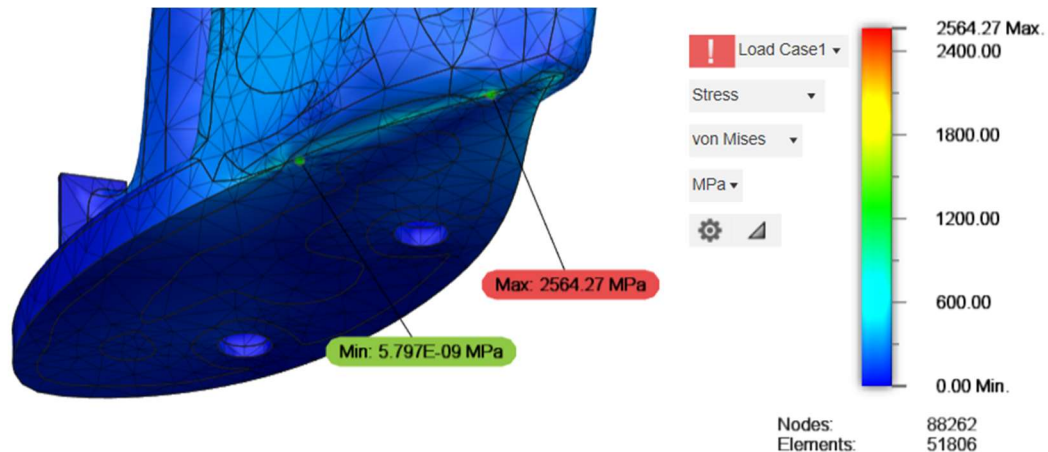
49. ábra: A végelelemes analízis állomásai

Mint leírtam, a testen ébredő erőket teljes mértékben átvettem a generatív tanulmányból, amit az 49. ábrán az 1. terhelési eset (Load Case1) tartalmaz. Az erővektorok irányai a 44. ábrán, az értékek pedig a 41. ábrán tekinthetők meg.

Az 49. ábrán látható az is, hogy létrehoztam még 3 terhelési esetet, melyekre azért volt szükség, mert a véglapon ébredő erőket komponensekre bontva szétválasztottam, hogy az egyes terheléseket hatását külön-külön is tudjam vizsgálni. A rögzítőtalpon ébredő erők mindegyik terhelési esetben szerepeltek.

6.3. KIÉRTÉKELÉS

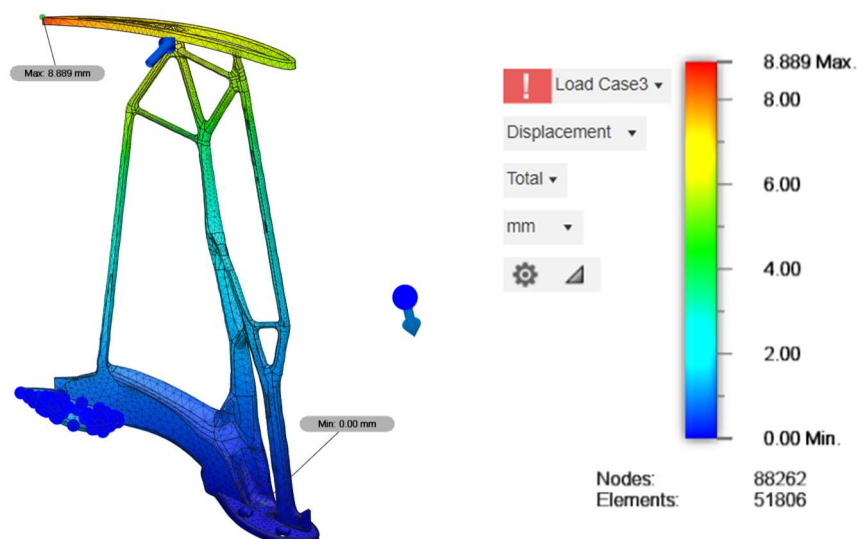
A háló generálása után a szimulációt csak el kellett indítani és gyorsan elérte az alap konvergenciahatárt. Az eredmények közül csak a kritériumok szempontjából lényeges jelenségeket fogom részletesen bemutatni a teljesség igénye nélkül.



50. ábra: 1. terhelési eset feszültségeloszlása

Az eredmények kielégítőek lettek. Az alkatrészben egyik terhelési esetben sem keletkezett 1100 MPa-nál nagyobb feszültség, tehát a Tanszék által meghatározott kritériumoknak megfelelt. Az 50. ábrán láthatók a minimális és maximális feszültségértékek, amin ugyan megfigelhető egy nagyobb kiugrás, azonban az éles sarkok miatt ezt modellhiba okozza.

A deformáció vizsgálata a szabályzatnak való megfelelés miatt volt kulcsfontosságú. A legnagyobb elmozdulás a 3. terhelési esetben volt tapasztalható, amikor a terhelési irányban ébredő 200N nagyságú erő párosult a talpon ébredő erőkkel.



51. ábra: A 2. terhelési eset eredménye

Ahogy az 51. ábrán észrevehető, ez a deformáció a várt módon a véglap kilépőélén keletkezett, ugyanis az alkatrész egyik legkisebb keresztmetszetű pontjáról van szó, ami közvetlen terhelés alatt áll és nincs hozzá kapcsolódó merevítés. Ennek ellenére az elmozdulás csak 8,889 mm, ami a 10 mm-es határértéken belülre esik amellet, hogy a valóságban a karbon kompozit héj a geometriájából fakadóan tovább merevíti az említett régiót.

A többi terhelési eset eredményei szintén megfeleltek mindkét kritériumrendszernek, részletesebb bemutatásukat azonban a dolgozat szempontjából nem tartom lényegesnek. A fejezethez tartozó egyéb ábrák a mellékletek közt a 12.1. fejezetben találhatók. A konvergencia görbe a mellékletben megtekinthető.

7. ÖSSZEGZÉS

Dolgozatom témája egy hibrid terelőelem megtervezése áramlástani szimuláció és generatív tervezés segítségével.

A cél a Tanszék illetve a BME Formula Racing Team tudásbázisának bővítésében való segédkezés, valamint egy esetleges jövőbeli Formula Student autó menetdinamikájának javítása volt.

Elsőként irodalomkutatást végeztem az additív gyártás fogalmáról, történetéről, majd részletesebben belementem az SLM technológia működésébe, folyamataiba és alkalmazási területeibe. Írtam továbbá a generatív tervezés technológiájáról is, amire később kutatásom és fejlesztésem túlnyomó része épült.

A módszertan fejezetben egy általános leírást adtam az Ansys Fluent-ben végzett áramlástani szimulációk felépítéséről, valamint az előkészítés lépéseinek sorrendjéről, amelyek a legtöbb esetben irányadók. Részleteztem a Fusion 360 szoftver segítségével készített generatív tervezési tanulmányok felépítésének, kiértékelésének és az iteratív módon való fejlesztésnek a menetét.

A CFD szimulációk során kiderült, hogy a több elemből álló terelőelem-konceptió lényegesen hatékonyabban csökkenti a kerék keltette turbulenciát, illetve a rajta ébredő légellenállásból származó erőt is nagyjából 39%-al, ezzel javítva az autó aerodinamikai hatékonyságát. Ezzel egy megfelelő alap jött létre a generatív tervezés megkezdéséhez.

A Fusion 360 generatív tervező moduljának működését elsajátítva sikerült 33 különböző fő koncepciót kifejlesztenem, melyeket parametrizálását iteratív módon finomítottam a fejlesztési határ eléréséig.

A legigéretesebb verzión végeselemes mechanikai analízist végeztem, melynek során bebizonyosodott, hogy a tervezett alkatrész a külső kompozit héj nélkül is képes teljesíteni azokat a követelményeket, amiket a Formula Student Germany határozott meg aerodinamikai eszközökkel kapcsolatban, illetve előidézi az elvárt és előre megbecsült áramlástani hatást.

Úgy gondolom, hogy két ennyire fejlett és intenzíven terjedő technológia fúziója a különleges és nagy teherbírású anyagokkal párosítva rendkívüli jelentőséggel bírhat az olyan iparágakban, ahol a mechanikai és aerodinamikai lehetőségek együttes, maximális kihasználása a cél és rendelkezésre áll a megfelelő anyagi háttér a még kétség kívül drágának mondható technológiák finanszírozására.

8. JÖVŐBELI TERVEK

Elsőként a tervezett alkatrész gyártását szeretném megvalósítani. A V16.1 tervezéshez felhasznált Ti6Al4V ötvözet, és a gyártó berendezéssel történő prototípus nyomtatás költségei jelentősek. Ezért elsőként egy egyszerűbb technológiával gyártott műanyag helyettesítő alkatrésszel (V16.1-s verzió PLA anyagból kinyomtatva) fogunk geometria tesztet végezni. Ehhez már ki is lett nyomtatva a külső héj a hibrid szárnyelemhez (szintén PLA, FDM technológiával nyomtatva). Az elsődleges továbblépés így ennek a geometria tesztnek az elvégzése. Ezzel azt tudnánk bizonyítani, hogy a generatív tervezés külső geometria határoló rétegét jól figyelembe tudta venni a szoftver.

Második lépés, az elsőhöz tartozó szárnyelem teljes megtervezése, mechanikai analízise, nyomtatása és tesztelése lenne, abban az esetben, hogyha a V16.1-s alkatrész prototípusa megfelel a geometria teszt követelményeinek.

Ezután a műanyag prototípusok egy szintén kinyomtatott első teljes szárnyra kerülve szélesatorna teszten vehetnének részt. Ha ott is hozza az alkatrész az elvárt áramlási tulajdonságokat, akkor történhetne meg a tényleges gyártás Ti6Al4V ötvözetből és karbon kompozitból.

9. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] BME Formula Racing Team
<https://frtbme.hu>
- [2] <https://www.motorsport.com/f1/news/how-a-non-performance-change-made-williams-better-1063343/3146921/>
- [3] Dr. Markovits Tamás: Korszerű lézersugaras technológiák, első magyarnyelvű digitális kiadás, Akadémiai Kiadó, Magyarország, Budapest, 2018 (2023.09.30.)
- [4] Emmanouil L. Papazoglou, Nikolaos E. Karkalos, Panagiotis Karmiris-Obratański, Angelos P. Markopoulos: 'On the Modeling and Simulation of SLM and SLS for Metal and Polymer Powders: A Review', Archives of Computational Methods in Engineering, nyolcadik kiadás, Springer Nature, Barcelona, Spanyolország, 2021, 941-973 (2023.10.08.)
- [5] Ile Kaupila: The Complete Guide to SLM 3D Printing (Selective Laser Melting)
<https://all3dp.com/1/selective-laser-melting-guide/#what-is-slm%20> (2023.02.01.)
- [6] <https://hanaamt.com/powder-production/slm-pbf/>
- [7] <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/post-processing-for-metal-3d-printing/>
- [8] <https://www.etmm-online.com/3d-printing-a-rocket-engine-a-886960/>
- [9] <https://www.freedee.hu/a-femnyomtatás-sikerés-alkalmazása-a-vasutiparban-wabtec-es-nikon-slm-solutions/>
- [10] <https://www.pmw-magazine.com/features/powertrain-focus-czinger-21c-the-3d-printed-hypercar.html>
- [11] <https://www.metal-am.com/articles/metal-3d-printing-in-automotive-how-the-czinger-21c-is-redefining-next-generation-car-manufacturing/>
- [12] <https://gyartastrend.hu/cikk/elkeszult-az-első-3d-nyomtatott-titanium-alkapocspotezis>
- [13] <https://hu.tiflance.net/info/clinical-application-and-progress-of-3d-printing-85287547.html>
- [14] <https://www.cnc.hu/2019/01/a-generatív-dizájn-napjainkban-megoldások-működésük-es-a-piaci-helyzet/>
- [15] <https://www.digitalengineering247.com/article/when-generative-design-and-additive-manufacturing-come-together/>

[16] <https://www.scribd.com/document/523728823/GenerativeDesign-CadalytGuide-1638>

[17] Formula Student Germany: FS-Rules 2025 v1.0.pdf
<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

10. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: BME Formula Racing Team 2024 csoportkép [1]	5
2. ábra: Williams FW41 első szárny [2]	6
3. ábra: Nyomtatási folyamat menete [6]	9
4. ábra: Utómegmunkálás menete [7]	10
5. ábra: SLM technológiával gyártott rakétahajtómű égéstér [8]	11
6. ábra: SLM technológiával készült fékpanel [9]	12
7. ábra: Czinger 21C váz [10]	13
8. ábra: 3D nyomtatott titán álkapocsprotézis [12]	14
9. ábra: Generatív tanulmány iterációkra bontva [14]	15
10. ábra: A terelőelem C1 (bal) és C2 (jobb) verziója	16
11. ábra: Az áramlási tér létrehozása „SpaceClaim-ben”	17
12. ábra: A hálógenerálás lépései 1/2	17
13. ábra: A felületi hálózás eredménye	19
14. ábra: A hálógenerálás lépései 2/2	19
15. ábra: A generált háló a térfogati hálózás után	19
16. ábra: Hálófüggetlenségi vizsgálat eredményei az elemszám függvényében	21
17. ábra: Generatív tervezéshez előkészített geometria	21
18. ábra: Tervezési régiók felosztása	22
19. ábra: Generatív tervezés beállításai 1/2	22
20. ábra: Generatív tervezés beállításai 2/2	23
21. ábra: A kerekek felületi nyomásképe	24
22. ábra: Felülnézeti sebességeloszlás áramvonalakkal	24
23. ábra: A leválási zónák kinagyítva	25
24. ábra: V1 tanulmány kiinduló geometriája és terhelései	26
25. ábra: V1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei	27
26. ábra: V1 alkatrész felül- és oldalnézete	27
27. ábra: V4.1 tanulmány maradó geometriái (balra) és a véglapra megadott terhelések	28
28. ábra: V4.1 tanulmány - rögzítőtalpra megadott terhelések	28
29. ábra: V4.1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei	28
30. ábra: V4.1 tanulmány kizáró (balra) és kiinduló (jobbra) geometriája	29
31. ábra: V5.1 tanulmány felépítése (balra) és maradó geometriája (jobbra)	30
32. ábra: V5.1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei	30
33. ábra: V8.2 tanulmány felépítése és maradó geometriái	31
34. ábra: V8.2 tanulmány geometriai felépítése felülnézetből	31
35. ábra: V8.2 tanulmány grafikus és numerikus eredményei	32
36. ábra: A 2025-ös Formula Student Germany szabályzat T8.3 pontja [17]	32
37. ábra: V10.1 tanulmány terhelései	33
38. ábra: V10.1 tanulmány célkitűzési és feltételi beállításai	33
39. ábra: V10.1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei	34
40. ábra: V10.2 tanulmány grafikus és numerikus eredményei	35
41. ábra: A V13 tanulmány maradó geometriája és a véglap terhelése	35

42. ábra: A V13 tanulmány deformációkorlátai a talpra (balra) és a véglapra (jobbra) ...	36
43. ábra: A V13 tanulmány grafikus és numerikus eredményei	36
44. ábra: A V16.1 tanulmány terhelései	37
45. ábra: A V16.1 tanulmány deformáció korlátai a talpra (balra) és a véglapra (jobbra)	37
46. ábra: A V16.1 tanulmány grafikus és numerikus eredményei	38
47. ábra: A generatív tervezés fejlesztési ágdiagramja	39
48. ábra: Geometria exportálása	41
49. ábra: A végelelemes analízis állomásai	41
50. ábra: 1. terhelési eset feszültségeloszlása	42
51. ábra: A 2. terhelési eset eredménye	42

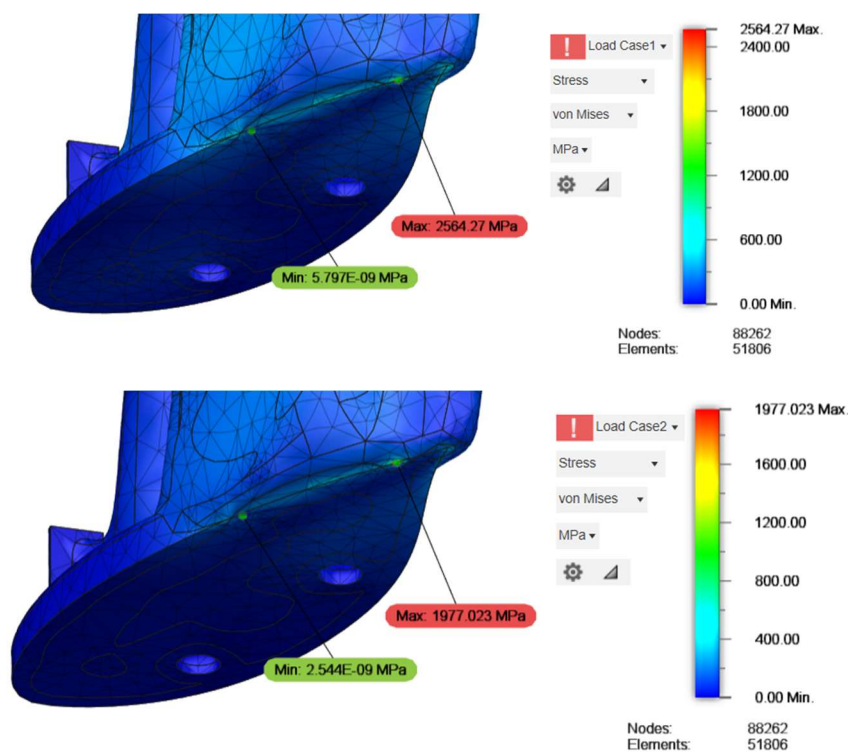
11. TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

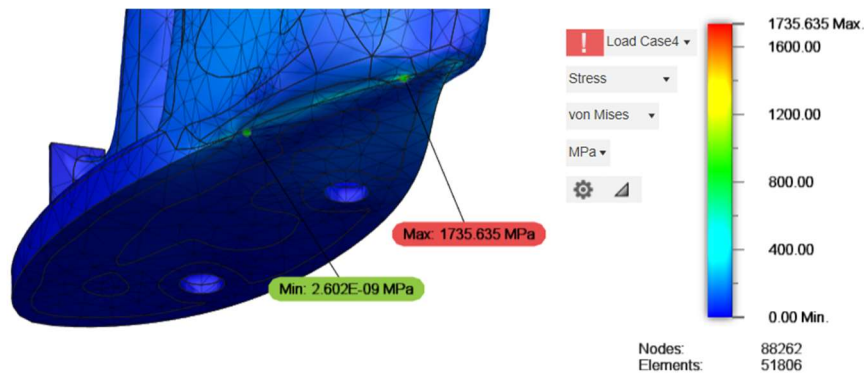
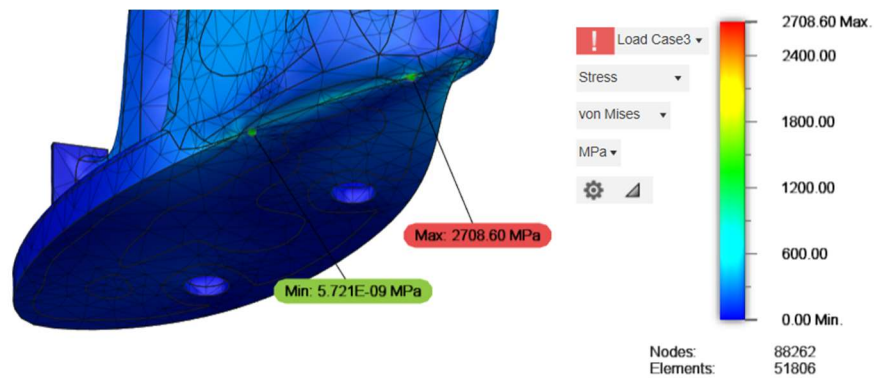
1. táblázat: A lokális hálóméretetek csoportosítása	18
2. táblázat: A hálófüggetlenségi vizsgálat numerikus eredményei	20
3. táblázat: Az áramlástan vizsgálat numerikus eredményei	25

12. MELLÉKLETEK

12.1. VÉGESELEMES MECHANIKAI ANALÍZIS

12.1.1. FESZÜLTSGÉRTÉKEK





12.1.2. DEFORMÁCIÓ

