



SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM

AUDI HUNGARIA

JÁRMŰMÉRNÖKI KAR

CFRP wheel design for a Formula Student race car

Bársony Dániel

Járműmérnök MSc (angol nyelven)

Konzulens:

Kaszab Martin

Járműfejlesztési Tanszék

Győr, 2024

Absztrakt

Dolgozat címe: CFRP wheel design for a Formula Student race car
(Karbon kompozit felni tervezése Formula Student versenyautóhoz)

Dolgozatom célja a győri Széchenyi István Egyetem hallgatói versenycsapata, az Arrabona Racing Team tizenegyedik generációs Formula Student versenyautójának kompozit felnijének megtervezése.

A tervezés lehető legmegfelelőbb kivitelezése érdekében szakirodalom kutatást végeztem a felnik és kerekek tervezéséről és a hozzájuk kapcsolódó gyártási technológiákról. Ezt követően versenytárs elemzést végeztem a Formula Student-ben elterjedt keréktárcsa- és felni kialakítások bemutatására céljából. Emellett bemutattam és megvizsgáltam az Arrabona Racing Team által korábban használt kerék- és felni megoldásokat is.

Először felvázoltam azokat a követelményeket és kritériumokat, amelyeknek a kompozit felniknek meg kell felelniük. E kritériumok célja a biztonságos működés, a versenyszabályzatnak megfelelés, valamint a jelenlegi és korábbi felfüggesztési konstrukciókkal való kompatibilitás biztosítása a minimális tömeg elérése mellett.

A tervezést a felhasználandó kompozit anyagok mérésének és azok eredményei segítségével létrehozott anyagkártyák bemutatásával kezdtem. Majd CAD program segítségével létrehoztam a felni geometriáját, a gumikkal optimális érintkezés szemmel tartása mellett. Végül bemutattam a megfelelő kompozit rétegrend megtalálása érdekében végzett végelelemes szimulációk, előkészítését, futtatását és kiértékelését.

Végül összehasonlítottam az elkészült kompozit kerekeket a korábban használt konstrukciókkal, hogy bemutassam a tömegcsökkentést és a lehetséges jövőbeni fejlesztéseket.

Megjegyzés: A pályamunka eredeti nyelve angol. A 37. Országos Tudományos Diákköri Konferencia Műszaki Tudományi Szekció felhívásának 1. számú melléklete 1. pontjának megfelelően a munkát magyarra lefordítottam. Tartalmi változás nem történt az intézményi TDK-n bemutatott pályamunkához képest.

Tartalom

1. Bevezetés.....	4
2. Irodalom kutatás	5
2.1. Formula Student	5
2.1.1. Arrabona Racing Team.....	5
2.2. Nevezéktan	6
2.3. Kerekek kategorizálása	7
2.3.1. Acélkerekek.....	7
2.3.2. Alumínium könnyűfém keréktárcsák	7
2.3.3. Magnézium könnyűfém keréktárcsák	8
2.3.4. Titán könnyűfém keréktárcsák	9
2.3.5. Kompozit kerekek	9
2.4. Formula Student versenytársелеmzés	10
2.4.1. Kereskedelmi forgalomban kapható kerekek	10
2.4.2. Egyedi könnyűfém kerekek.....	10
2.4.3. Egyedi többrészes felnik	10
2.4.4. Egyedi kompozit kerekek.....	10
2.5. ART által korábban használt kerekek.....	11
2.6. Anyag tulajdonságok.....	12
2.6.1. Általános anyagtulajdonságok	12
2.6.2. Mechanikai szabadságfokú anyagmodellek	13
2.6.3. Rugalmasság	14
2.6.4. Lineárisan rugalmas ortotróp anyagtörvény.....	16
2.7. Tönkremeneteli kritériumok.....	17
2.7.1. Tsai-Wu tönkremeneteli kritérium	19
2.8. Kompozitok.....	20
2.8.1. Hosszúsálerősített kompozitok.....	20
2.9. Forgó és rugózatlan tömegek hatásai	21
2.9.1. Rugózatlan tömeg.....	21
2.9.2. Forgó tömeg	22
3. Tervezési folyamat	23
3.1. Módszertan	23
3.2. Követelmények.....	23

3.2.1. Kerekekre vonatkozó szabályok	24
3.2.2. Tervezési követelmények	24
3.3. Terhelési esetek meghatározása.....	25
3.3.1. Mechanikai terhelések szimulációkból	25
3.3.2. Nyomás	28
3.3.3. Nyomaték	28
3.3.4. Hőterhelések.....	29
3.4. Kerék geometria tervezés	29
3.5. Kompozit rétegrend tervezés.....	32
3.5.1. Anyag mérések.....	32
3.5.2. Measurement parameters	33
3.5.3. Próbatetek gyártása.....	34
3.5.4. Szakító vizsgálat.....	35
3.5.5. Nyíró és nyomó vizsgálatok.....	37
3.5.6. Anyagkártyák	37
3.5.7. FEM szimuláció	38
3.5.8. Végző rétegrend	46
4. Lehetséges jövőbeni fejlesztések.....	51
5. Összegzés	52
6. Források.....	53
7. Képjegyzék.....	56
8. Táblázatjegyzék.....	57

1. Bevezetés

2021 októberében kerültem az Arrabona Racing Teamhez, ahol a járműdinamikai részleghez csatlakoztam, amely a Formula Student (FS) versenyautó felfüggesztési geometriáját tervezi és alkatrészeit gyártja. A fő feladatom egy hibrid kompozit kerék tesztelése és gyártása volt, amelyet az elődöm tervezett az előző szezonban. Ez a konstrukció két szénszál-erősítésű polimer (CFRP) keréktárcsa felniket használ, 3d nyomtatott alumínium keréktárcsa-középpontokkal. A 2022-es szezonban egy új, könnyebb, 3D nyomtatott alumíniumból készült hátsó kerékközéppontot terveztem, amely magában foglalta az abban a szezonban végrehajtott felfüggesztési geometriaváltozásokat.

Szakdolgozatom célja, hogy az Arrabona Racing Team 11. generációs autójához új kerekeket fejlesszek ki, amelyek minden szempontból javítják a korábban használt konstrukció tulajdonságait. Az optimális használathoz szükséges, hogy a kerekek a lehető legkönnyebbek legyenek, ugyanakkor a vezető és a jármű többi részének biztonsága érdekében üzembiztos működést biztosítsanak. Ennek eléréséhez tanulmányoznom kell a motorsportban, illetve a Formula Studentben használt különböző konstrukciókat. A kerékgyártásban használt gyártási technológiákat is fel kell kutatnom, különösen a kompozit anyagok felhasználásával kapcsolatban. Meg kell tanulnom, hogy a kerék fizikai tulajdonságai hogyan befolyásolják a versenyautó teljesítményét. A tervezési fázis megkezdése előtt ki kell számolnom a kerekekre ható erőket, és el kell készítenem a kompozit anyagok szimulálásához szükséges anyagkártyákat. A véglegesített kerekek integritásának ellenőrzésére végelelemes analízist használunk.

2. Irodalom kutatás

2.1. Formula Student

A Formula Student egy nemzetközi versenysorozat egyetemi hallgatók számára, amelynek középpontjában egy nyitott kerekű benzines vagy elektromos versenyautó tervezése, építése, tesztelése és versenyeztetése áll. Az első versenyt 1981-ben rendezték meg az Egyesült Államokban hat egyetem részvételével. Ma már több tucat verseny van több kontinensen, több mint 300 regisztrált csapattal.

A Formula Student versenyek két részre oszlanak: Statikus és dinamikus versenyekre, amelyek mindegyike több alversenyből áll, és összesen 1000 elérhető pont van. [1]

	CV, EV	DV
Static events	325	475
Business plan presentation	75	75
Cost and manufacturing	100	100
Engineering design	150	300
Dynamic events	675	525
Skid pad	75	75
Acceleration	75	75
Autocross	100	100
Endurance	325	-
Efficiency	100	75
Trackdrive	-	200
Overall	1000	1000

Table 1 A Formula Student versenyen elérhető pontok bontása [2]

2.1.1. Arrabona Racing Team

Az Arrabona Racing Team (ART) 2013-ban alakult lelkes mérnökhallgatókból, a Széchenyi István Egyetem Formula Student csapataként. A csapat első, 2014-es szezonjában megnyerte élete első nemzetközi versenyét, a Formula Student Russia-t, ami a magyar Formula Student történetében kiemelkedő, még megismételhetetlen eredménynek számít. Az első csapat mindössze 18 tagból állt, mára ez a szám 60 fölé nőtt, 6 szakosztályra szétosztva. Az autók tervezése a csapattal együtt fejlődött: az acélcsöves, aerodinamikai csomag nélküli, acél felfüggesztéses vázról, egy teljes CFD-vel optimalizált aerodinamikai csomaggal és CFRP

felfüggesztéses alkatrészekkel ellátott, szendvicsszerkezetű kompozit monocoque vázra váltottak. A motorok az enyhén módosított motorkerékpár-motoroktól a testvércsapat, a SZEngine Formula Student Engine Development Team által kifejezetten az ART számára kifejlesztett versenymotorokig fejlődtek. [1] [3]

A 2024-es szezon nem csak az ART, hanem a magyar Formula Student történetének legsikeresebb szezonja is volt. A csapat egy 2. és egy 1. összesített helyezést ért el az Ausztriában, Magyarországon és Horvátországban rendezett 3 magasan értékelt versenyen. [1]



Figure 1 Az Arrabona Racing Team tagjai a 2024-es szezonban

2.2. Nevezéktan

Először is tisztázni kell a dolgozatban használt nevezéktant. A kerekeket a keréktárcsából (vagy felnikből) és a kerék középpontjából (center) állítják össze. (Figure 2). A „kerék” szót gyakran felváltva használjuk a „felni” szóval, de az utóbbi csak a kerék külső részét takarja, amelyre a gumibroncsot szerelik. A keréktárcsa (vagy center) célja, hogy rögzítési felületet biztosítson a keréknek a kerékagyon, és átadja a nyomatékot a hajtáslánchról a kerékre. [2]

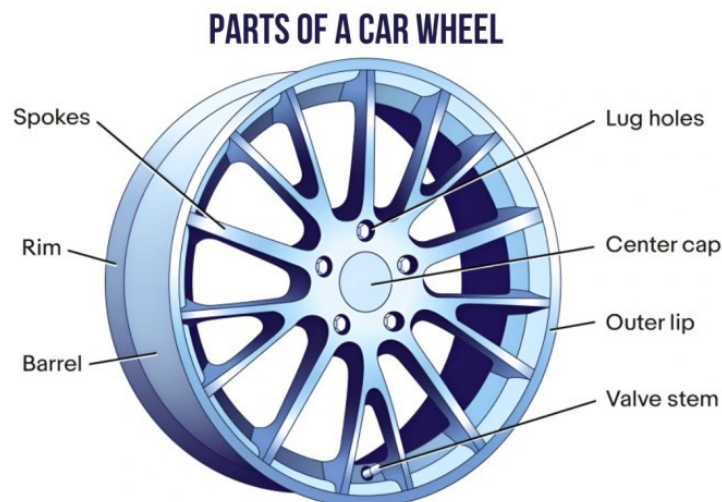


Figure 2 Jármű kerekének részei [4]

2.3. Kerekek kategorizálása

A kerekek gyártásához használt anyagok és gyártási technikák megértése érdekében, különösen a motorsportban, ez a fejezet áttekintést ad a közúti járműveken és a motorsportban használt keréktípusokról, és kategorizálja azokat. A keréktípusok formájukban, tulajdonságaikban és használatukban is igen eltérőek lehetnek egymástól. Az alapanyagok befolyásolják leginkább a végtermék tulajdonságait, de az alkalmazott gyártási módszer is kulcsszerepet játszik.

2.3.1. Acélkerekek

Az autóiparban a kerekeknél használt legolcsóbb anyag. Tartósságot, kiváló időjárásállóságot és hővezető képességet ötvöznek. Súlyuk nagyobb, mint a más anyagból készült kereké, ami negatívan befolyásolja a járművek kezelhetőségét és üzemanyag-fogyasztását. Általában lemezbélyegzéssel készülnek, majd a felnit és a középső részeket összehegesztik (Figure 3). Ma leginkább nehézgépjárműveken és flottajárműveken használják őket, a motorsportban csak az alsóbb osztályokban és a klasszikus versenyeken alkalmazzák őket. [5] [6]



Figure 3 Egy veterán nyitott kerekű versenyautón használt acél versenykerék [7]

2.3.2. Alumínium könnyűfém keréktárcsák

Napjainkban az alumíniumötvözetek a leggyakrabban használt anyag a kerékgyártásban. Alacsony tömegük javítja a járművek kezelhetőségét és üzemanyag fogyasztását, ideális személygépkocsik számára. Emellett kiváló hővezető képességgel és időjárásállósággal rendelkeznek. [5]

Az alumíniumgyártás kutatott és bizonyított, valamint újrahasznosíthatóságot is kínál. Az

alumíniumötvözetből készült keréktárcsákat vagy egy öntési eljárással (gravitációs öntés, alacsony nyomású öntés) vagy kovácsolási eljárással gyártják. A Flow Forming (folyós alakítás) egy speciális alakítási módszer, amelyhez egy speciális gépre van szükség. A gép az öntvényt pörgeti és a felnit hő és acélhengerek segítségével a végső formájára húzza, hasonló tulajdonságokat kínál, mint a kovácsolás, alacsonyabb gyártási költség mellett. [8]

Használatuk az autóiparban igen széles körben elterjedt, az alacsony minőségű, gravitációs öntvényből készült utángyártott keréktárcsáktól kezdve az eredeti gyártók (OEM) keréktárcsáin át a motorsportban használt csúcskategóriás kovácsolt kerekekig. [8] [6]

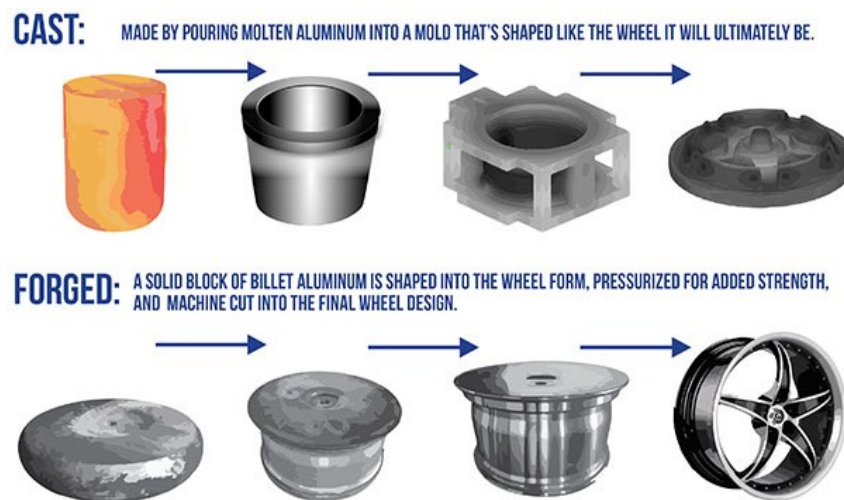


Figure 4 Öntési és kovácsolási eljárások a kerékgyártásban [9]

2.3.3. Magnézium könnyűfém keréktárcsák

A magnéziumötvözetek 25-30%-kal könnyebbek, mint a leggyakrabban használt alumíniumötvözetek. Nagy méretstabilitást és ütésállóságot, de alacsony időjárásállóságot biztosítanak. Az alumíniumötvözetekhez hasonlóan önthetőek vagy kovácsolhatóak (Figure 4). Drága gyártásuk és magas karbantartási költségeik miatt a magnézium keréktárcsákat szinte kizárólag versenysportban és egzotikus járműveken használják. [8] [5]



Figure 5 Formula 1-ben használt magnézium felni [10]

2.3.4. Titán könnyűfém keréktárcsák

A titánötvözetek kiváló anyag tulajdonságokkal rendelkeznek, körülbelül 2-szer erősebbek, mint az alumíniumötvözetek. A hagyományos módszerekkel való előállításuk nehézségei és magas alapanyagköltségeik miatt ritkán használják őket. Az új gyártási technikák, mint például az additív gyártási módszerek, kihasználhatják a titánötvözetek pozitív anyagi jellemzőit, azok hátrányai nélkül. [6] [8]



Figure 6 2 részes keréktárcsa 3D nyomtatott titán centerrel és CFRP külsővel [11]

2.3.5. Kompozit kerekek

A kompozitok, különösen a szénzál-erősítésű műanyag (CFRP) 1,5-szer könnyebbek és 8-szor erősebbek az alumíniumnál. A keréktervezésben alacsony tömegük, nagy fajlagos merevségük és korrózióállóságuk miatt szinte ideális anyagnak számítanak. A CFRP-t ortotróp anyagtulajdonságai miatt nehéz tervezni, gyártása pedig drága és sokkal több munkaórát igényel, mint a fém kerekeké. Alacsony hőállóságát nehéz leküzdeni a keréktervezés során. Sérülés esetén szinte lehetetlen a javításuk. Rendkívül magas költségeik miatt leginkább egzotikus járműveken találhatók meg. [10] [6]



Figure 7 A Koenigsegg Regera egy részes, CFRP keréktárcsája [12]

2.4. Formula Student versenytárselemzés

A Formula Student-ben az egyik legjobb lehetőség a tanulásra, a versenytársak megfigyelése. A versenytársak által használt jelenlegi trendek elemzésével meghatározható a jövőbeli fejlesztések hasznossága a saját koncepciókban. Ez a fejezet összefoglalja az FS és FSAE csapatok által használt keréktípusokat.

2.4.1. Kereskedelmi forgalomban kapható kerekek

Sok csapat a saját tervezés helyett inkább kész kerekek vásárlását választja, idő és erőforrás megtakarítás céljából. OZ Racing, BRAID és a Keizer számos kereskedelmi forgalomban kapható opciót kínál. OZ Racing és BRAID egy darabból álló, alumíniumból, magnéziumból vagy CFRP-ből készült kerekeket kínál (Figure 8 1. és 2. kép). A Keizer több darabból álló kerekei lehetővé teszik a csapatok számára, hogy testre szabják a kerekek paramétereit, vagy hogy saját tervezésű centereket használjanak. [13] [14]

2.4.2. Egyedi könnyűfém kerekek

Az egyedi könnyűfém keréktárcsák nagyfokú testreszabhatóságot és a kerekek a saját felfüggesztési elemekhez való igazítását kínálják (Figure 8 3. és 4. kép). Szinte kizárólag magas minőségű alumíniumból készülnek, mivel a magnézium és a titán nyersanyagárai túl magasak. A Formula Student-ben meglehetősen ritkák, mert hasonlóan drágák, mint a hibrid CFRP kerekek, kisebb potenciális tömegcsökkentést biztosítanak. [15]

2.4.3. Egyedi többrészes felnik

Az egyedi, több részes kerekek általában kereskedelemben vásárolt alumínium felnikből készülnek, egyedi mart vagy 3D nyomtatott alumínium centerekkel. A CFRP felnik (Figure 8 5. és 6. kép) egyre elterjedtebbek, mivel az alumínium felnikhez képest nagyobb tömegcsökkentést biztosítanak, miközben egyszerűbb és olcsóbb szerszámozást igényelnek, mint a teljes CFRP kerekek. [15]

2.4.4. Egyedi kompozit kerekek

Hasonló testre szabhatóságot és merevséget kínálnak, mint az egyedi könnyűfém keréktárcsák, jelentősen nagyobb tömegcsökkentéssel. (Figure 8 7. és 8. kép). Fő hátrányuk a magas anyag- és gyártási költségek. Tervezésük és gyártásuk szakértelmet és tapasztalatot igényel a kompozit anyagokkal és szerszámaikkal. [16]



Figure 8 A Formula Student-ben gyakran használt kerékkialakítások [2]

2.5. ART által korábban használt kerekek

2020 előtt az Arrabona Racing Team 13 colos kerekeket és gumikat használt. A kerekek kereskedelmi forgalomban vásárolt OZ Racing modellek voltak, kezdetben alumínium, később magnézium kerekek. Bár megbízhatóan teljesítették feladatukat, fix geometriájuk miatt a felfüggesztés alkatrészeit, különösen a kerékagyakat hozzájuk kellett igazítani. A méretbeli különbségek és a felfüggesztés későbbi változtatásai miatt ezek a kerekek a jelenlegi dolgozat szempontjából már nem relevánsak.

A 2020-as szezonra a csapat a 13 colos Continental abroncsokról 10 colos Hoosier abroncsokra váltott. Az új abroncsok szélesebb termikus működési tartományt biztosítottak, így a csapat nagyobb teljesítményt tudott kihozni az autóból, míg a kisebb súlyuk segített csökkenteni a jármű rugózatlan tömegét. A kisebb kerék- és gumimérethez való váltás miatt a felfüggesztés legtöbb alkatrészét át kellett tervezni. A csapat úgy döntött, hogy Keizer felniket használ, egyedi mart alumínium centerekkel. Ez a 3 részes kialakítás lehetővé tette, hogy azonos a centerek használatát az első és hátsó tengelyen, míg első és a hátsó kerekek eltérő ET (Einpresstiefe) értékekkel rendelkezzenek. Ezen kívül lehetővé vált egyetlen egyedi alumínium kerékanya használatát négy acél kerécsavar helyett, ami lehetővé tette nagyobb kerécsapágyak beépítését a kerékagyakba. A nyomatékot a kerékagyról a kerékre a kerékagyat a centerrel összekötő három csap továbbítja. Ez az új kerék összeállítás az szezonok során problémamentesen működött. A fő hátránya azonban a nagyobb tömeg a többi azonos méretű opcióhoz képest.

A következő szezonokban a járműdinamikai részleg fő céljai a felfüggesztési elemek

optimalizálása és a rugózatlan tömeg csökkentése voltak. A leg költség- és időhatékonyabb megoldásnak az alumínium kerék összeállítást egy hibrid CFRP összeállításra cserélni bizonyult. Az új konstrukció két CFRP felni felet és topológiaiilag optimalizált alumínium centert tartalmazott, amelyek additív gyártással készültek. Ez a kialakítás csereszabatos volt a korábbi alumínium összeállítással, a felni külső geometriája pedig egyezett a hátsó tengelyen használt Keizer felnikhez. Az első és a hátsó tengely eltérő ET követelményei miatt azonban mindkét tengelyhez egyedi centereket kellett tervezni.

A CFRP felnik gyártásához egy 5 darabos alumínium lamináló szerszámot készült. A szezon utáni értékelés során a hibrid CFRP keréktárcsát sikeresnek minősült, és a jövőbeni továbbfejlesztésére forrásokat különítettek el. A végleges összeállítás tömege a tervezettnél nagyobb volt, ami néhány gyártási problémának tudható be. A tervezett 600 gramm helyett csak 400 gramm tömegcsökkentést ért el kerékenként az alumínium összeállításhoz képest.



Figure 9 Hibrid CFRP kerék és annak lamináló szerszáma

2.6. Anyag tulajdonságok

Az anyagmodell egy anyag terhelésre adott válaszának matematikai leírása. Ez a terhelés lehet mechanikai, termikus vagy elektromos, a válaszfüggvény pedig lehet alakváltozás, hőmérséklet vagy elektromos feszültség. [17]

2.6.1. Általános anyagtulajdonságok

Matematikailag az anyagok viselkedése több kategóriába sorolható a terhelésre adott válaszuk alapján.

A linearitás a bemeneti és kimeneti mennyiségek közötti kapcsolatra utal. Ha ezek között közvetlen arányosság áll fenn, akkor a kapcsolatot lineárisnak tekintjük, az arányossági

tényezőt pedig egy anyagtulajdonság határozza meg. Ha nincs közvetlen arányosság, a folyamatot nem lineárisnak minősítik.

A homogenitás azt írja le, hogy mennyire egységesek az anyag tulajdonságai. A homogén anyagok a tulajdonságok minden irányban egyenletes eloszlását mutatják, ami azt jelenti, hogy a sűrűség vagy a szilárdság nem változik a különböző részek között. Ezzel szemben az inhomogén anyagoknál nincs ilyen egyenletes eloszlás, és ezt a változást a számítások során figyelembe kell venni.

Az irányítottság arra vonatkozik, hogy egy anyag hogyan viselkedik az irányok alapján. Izotróp modellben az anyag tulajdonságai minden irányban azonosak. Az ortotróp modell azonban olyan anyagokat ír le, amelyek tulajdonságai három egymásra merőleges tengely mentén változnak, és ezek az eltérések az anyag szerkezetéből vagy gyártási folyamatából adódhatnak. Végül az anizotróp modell hasonló az ortotróp modellhez, de az anyag tulajdonságai több irányban is különböznek, nem feltétlenül három egymásra merőleges tengely mentén. [17]

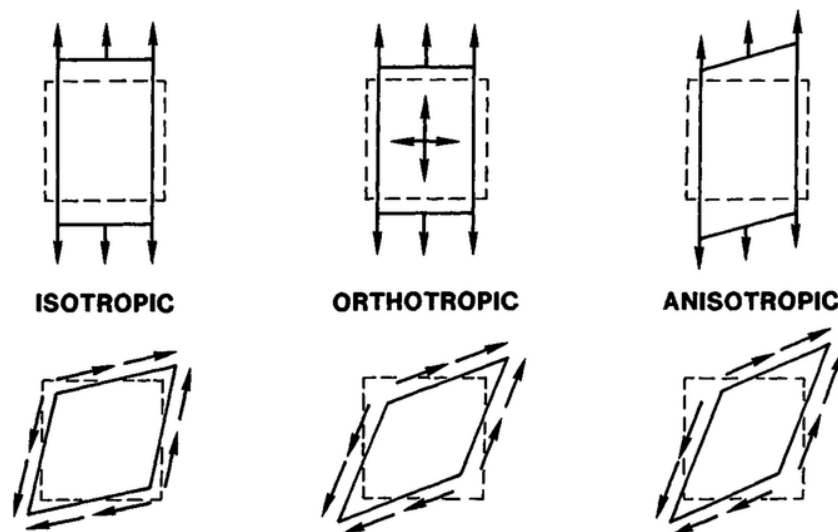


Figure 10 Izotróp, ortotróp és anizotróp anyagok alakváltozása [18]

A hosszú szál erősítésű kompozitok általában ortotróp anyagok, mivel a rugalmassági modulus és a mechanikai tulajdonságok a szálak irányában mások, mint a szálakra merőleges irányban.

2.6.2. Mechanikai szabadságfokú anyagmodellek

Az anyagmodell terhelési módja, azaz bemenete lehet elmozdulás, hőmérséklet, elektromágneses vagy kapcsolt. A figyelembe vett bemeneti mód határozza meg a modell szabadsági fokozatait.

Jelen vizsgálati esetben a szabadsági fok a mechanikai, ahol a bemenet egy deformáció

függvény, amely lehet elmozdulás, deformáció. Az erre adott válasz lehet erő vagy feszültség. A mechanikai anyagmodelleket tehát a feszültség-alakváltozás függvény jellemzi, amely lehet lineáris, nemlineáris, rugalmas, képlékeny vagy viszkoelasztikus karakterisztikájú. [17]

2.6.3. Rugalmasság

A rugalmasság az anyag azon tulajdonsága, amely meghatározza, hogy a mechanikai terhelés megszűntetése után visszanyeri-e eredeti alakját. Ha az anyag teljesen visszanyeri a terhelés előtti méretét, akkor rugalmas, ha deformált marad, akkor szintén képlékeny. A rugalmas viselkedés fizikai háttere különböző anyagok esetében eltérő lehet. Erő kifejtésekor a fémekben megváltozik az atomrács mérete és alakja. Ha az erők megszűnnek, a rács visszatér az eredeti, alacsonyabb energiájú állapotába. A polimerek és a gumik esetében a rugalmasságot a polimerláncok megnyúlása okozza.

Egy anyag lehet lineárisan vagy nem lineárisan rugalmas. A következő típusokat szokták használni a szerkezeti vizsgálatokban: lineárisan rugalmas, többszörösen lineárisan rugalmas, hiperelasztikus, viszkoelasztikus, plasztikus, viszkoplasztikus. [17] [19]

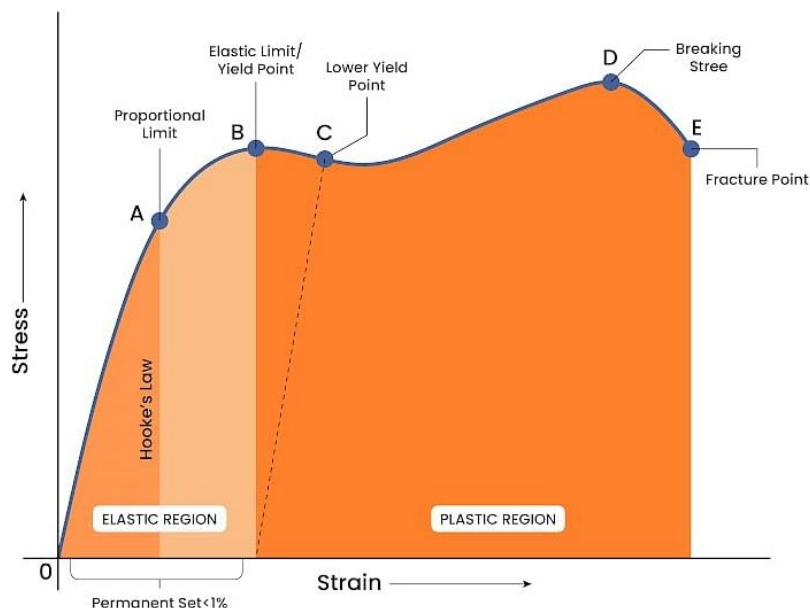


Figure 11 Feszültség-alakváltozás diagram [20]

A Figure 11 a fémekre jellemző feszültség-alakváltozás diagramot mutatja, amelyen jól láthatóak a különböző rugalmassági fokozatok. A terhelési erő növekedésével a deformáció jellege eltérő. Fémek esetében ez a görbe lineáris és nemlineáris (képlékeny) fázisokra osztható. Statikus vizsgálatoknál általában a görbén jelölt folyáshatár a domináns, ami a rugalmas alakváltozás után kezdődő képlékeny alakváltozást jelzi. A rugalmas szakasz leírására a Hooke-törvényt alkalmazhatjuk, amely a szerkezeti analízis alapját képezi. [17]

2.6.3.1. Hooke törvény

A Hooke-törvény kimondja, hogy a rugó bizonyos távolságra történő kinyújtásához vagy összenyomásához szükséges erő arányos a távolsággal. Ez matematikailag a következő egyenletben fejezhető ki:

$$F = -k * X \quad [17]$$

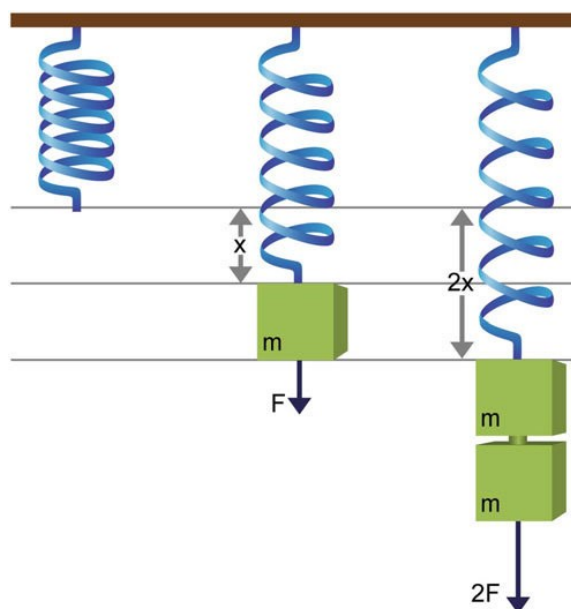


Figure 12 Hooke törvény vizualizációja [21]

Ahol F a rugóra ható erő, X a rugó elmozdulása, a negatív érték a rugó elmozdulása a kinyújtás után, k pedig a rugóállandó és a rugó merevsége (erő/hosszúság aránya). [17]

Az első klasszikus példa a rugalmasság magyarázatára a Hooke-törvény, amely a rugók viselkedésének leírása mellett más rugalmas testekre is érvényes. Általános formájában tehát összeegyeztethető Newton statikus egyensúlyi törvényeivel. E törvények együttes alkalmazása lehetővé teszi az alakváltozás és a feszültség közötti kapcsolat levezetését az alkotó anyagok saját tulajdonságaiból. Így a modern rugalmassági elmélet a Hook-törvényen alapul, amely kimondja, hogy egy rugalmas tárgy vagy anyag alakváltozása arányos a rá ható feszültséggel. [17]

Matematikailag az általános feszültségek és alakváltozások több független komponensből állhatnak, így az „arányossági tényező” már nem csak egyetlen valós szám. Ilyen esetekben egy lineáris leképezést kell létrehoznunk az egyenlet leírásához, azaz tenzorokat használunk, ami egyetlen érték helyett valós számokból álló mátrixot jelent. Ez a mátrix lehet például egy anyag merevségi mátrixa, amelynek szerkezete az anyag viselkedését ragadja meg bizonyos tengelyek mentén mechanikai terhelés alatt. [17]

2.6.3.2. Hooke törvénye lineáris, izotróp anyagokra

Izotróp anyagok esetén az általános Hooke-törvény tenzorformáját kell alkalmazni a térbeli feszültség alatti alakváltozásra:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1+\nu}{E} * \left[\bar{\sigma} - \frac{\nu}{1+\nu} * \sigma_I * \bar{I} \right] \quad [19]$$

Az általános Hooke-törvény tenzorformáját a térbeli feszültség állapotában fellépő feszültségre alkalmazzuk:

$$\bar{\sigma} = \frac{E}{1+\nu} * \left[\bar{\varepsilon} + \frac{\nu}{1+2*\nu} * \varepsilon_I * \bar{I} \right] \quad [19]$$

Izotróp esetben az anyag viselkedése két paraméter megadásával határozható meg. A leggyakrabban használtak a rugalmassági modulus (Young-modulus, E) és a Poisson-szám (ν). [19]

2.6.4. Lineárisan rugalmas ortotróp anyagtörvény

Mivel a szálerősítésű rétegek a szénszálas kompozit kerekek fő alkotóelemei, meg kell határozni az ilyen kompozitok anyagi tulajdonságait. Az anyagi tulajdonságok feltérképezése mikroszkopikus szinten végezhető, ahol az anyagszerkezeten belüli feszültségek és alakváltozások külön a mátrixanyagban és külön a szálakban (részecskékben) határozhatók meg. Alternatív megoldásként az anyagot az anyag makroszkopikus modellje segítségével is vizsgálhatjuk, amely az anyag egy homogénnek tekintett, megfelelő számú szálakat tartalmazó kis területének jellemzőit ragadja meg. Ez a kisebb régió általában a vizsgált kompozit egy rétege, amelyben a szálak egy vagy több irányba orientáltak valamilyen szövésmintázat mentén. Ha a szálak egy irányban futnak, vagy ha egy adott rétegen belül egymásra merőlegesek, akkor az ortotróp anyagtörvényt lehet alkalmazni. [22] [23]

Ha egyetlen réteget vizsgálunk, mechanikai szempontból megállapítható, hogy a terhelés általános síkbeli feszültséget eredményez, ami azt jelenti, hogy csak a két síkbeli normál és egy csúszó síkbeli feszültségkomponens tér el a nullától. Továbbá ezek a feszültségek nem változnak a réteg vastagságának irányában, így, ha a rétegre ható igénybevétel hajlító, akkor a fenti feszültségkomponensek értékei egyenesen arányosak a vastagsággal. [22]

Lineárisan rugalmas ortotróp anyagtörvény általános síkbeli feszültségi állapotra a rétegek fő anyagirányainak $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ koordináta-rendszerében:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} * \sigma_1 - \frac{\nu_{12}}{E_2} * \sigma_2 \quad [23]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\nu_{21}}{E_1} * \sigma_1 - \frac{1}{E_2} * \sigma_2 \quad [23]$$

$$\gamma_{12} = \frac{1}{G_{12}} * \tau_{12} \quad [23]$$

Az egyenletekben szereplő Poisson-együtthatók nem függetlenek egymástól, és a következő korrelációval rendelkeznek:

$$\frac{\nu_{21}}{E_1} = \frac{\nu_{12}}{E_2} \quad [23]$$

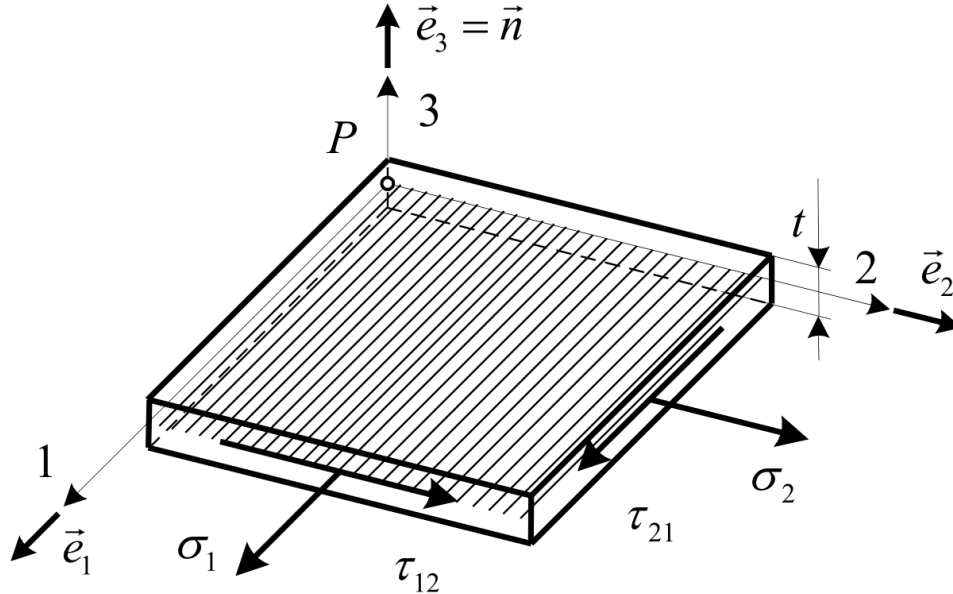


Figure 13 Stresses of a layer in the coordinate system of the principal material directions [22]

Amint Figure 13-on látható, az 1. tengely a szálvonalnak, a 2. tengely az arra merőleges iránynak, az n tengely pedig a rétegre merőleges iránynak felel meg.

Ezekből az összefüggésekből az ortotróp réteg anyagi viselkedése négy anyagtulajdonsággal határozható meg: a rugalmassági modulusok E_1 , E_2 , a Poisson-tényező ν_{12} (vagy ν_{21}) és a nyírási modulus G_{12} . [22]

Feltételezve, hogy $\sigma_n = 0$ az általános síkbeli feszültségállapot, a feszültségkoordinátákra a következő összefüggések írhatók fel:

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} * \varepsilon_1 + \frac{\nu_{12} * E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} * \varepsilon_2 \quad [23]$$

$$\sigma_2 = \frac{\nu_{21} * E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} * \varepsilon_1 + \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} * \varepsilon_2 \quad [23]$$

$$\tau_{12} = G_{12} * \gamma_{12} \quad [23]$$

2.7. Tönkremeneteli kritériumok

A szálerősítésű kompozitokban nem következik be képlékeny alakváltozás, a törés szinte azonnal a lineáris fázis után következik.

Az alkotóelemek összetettsége és szilárdsági eltérései miatt a tönkremenetel többféleképpen is bekövetkezhet a kompozit anyagon belül. A kompozitok lehetséges

tönkremeneteli típusai a Figure 14-en láthatók.

A szál mikrohajlítása egy mikroszerkezeti hiba, amely nyomás hatására következik be, míg a szálszakadás egy rétegek közötti hibatípus, amelyet szintén nyomás okoz. A mátrixanyag tönkremenetele egy másik rétegek közötti tönkremenetel, akárcsak a mátrixanyag és az erősítőszálak közötti kötéstörés, amely veszélyezteti a kompozit szerkezet integritását. A rétegek közötti tönkremenetel, a rétegek szétválása az anyagon belüli rétegek szétválását jelenti. Végül a csavarodás egy szerkezeti hibatípus, amely akkor következik be, amikor az anyag vagy a szerkezet a terhelés alatt elveszíti stabilitását. [24]

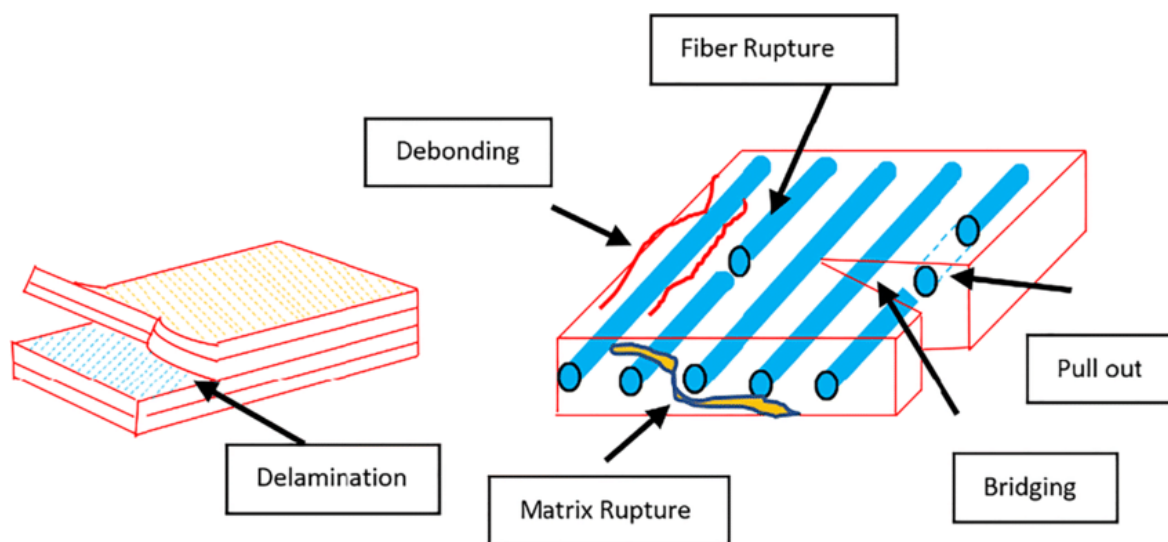


Figure 14 Kompozit hiba típusok [25]

A tönkremeneteli típusok sokfélesége miatt általában nem lehet kijelenteni, hogy a tönkremenetel a szerkezet azon pontján következik be, ahol a feszültség értéke a legmagasabb. Az elemzéshez egy olyan értékelési képletre van szükség, amely figyelembe veszi a kompozit tönkremeneteli módjait.

Ennek az igénynek az eredményeként különböző tönkremeneteli képleteket fejlesztettek ki. Ezeknek a képleteknek a lényege, hogy matematikailag meghatározzák azt a pontot, ahol a laminátum tönkremenetele bekövetkezik, és leírják az anyagon belüli tönkremeneteli jellemzőket. Fontos megjegyezni, hogy a tönkremeneteli formulák csak feltételezések, amelyek előrejelzést adnak a különböző terhelési esetek esetén bekövetkező tönkremenetekre. Ahogy napjainkban a kompozit anyagok tanulmányozása folytatódik, a rendelkezésre álló empirikus ismeretek is formálódnak. Így még egy látszólag pontos előrejelzést adó tönkremeneteli képlet is téves lehet bizonyos vizsgálati és terhelési körülmények között.

A tönkremeneteli kritériumoknak nincs általános kategorizálása, de különbséget lehet tenni az úgynevezett klasszikus tönkremeneteli formulák között, amelyek minden kompozit anyagra

alkalmazhatók (pl. Tsai-Wu, Tsai-Hill), és azok között a tönkremeneteli formulák között, amelyeket kifejezetten az úgynevezett hosszú szálerősítésű kompozitok tönkremenetelének leírására fejlesztettek ki (Hashin, Puck stb.).

Az egyik csoport a fellépő feszültségek alapján ad előrejelzést, a másik csoport pedig a fellépő alakváltozás alapján ad értékelést. Továbbá léteznek olyan képletek, amelyek a fenti megközelítés mindkét formáját alkalmazzák. [22]

2.7.1. Tsai-Wu tönkremeneteli kritérium

A maximális feszültség kritérium mellett a leggyakrabban használt kritérium a Tsai-Wu tönkremeneteli képlet. Ez a képlet az izotróp anyagokra vonatkozó Huber-Mises-Hencky-kritérium általánosítása anizotróp anyagokra. A képletben az összes szilárdsági határparamétert arra használják, hogy lokálisan meghatározzák a vizsgált szerkezeten belül azt a felületet, ahol a tönkremenetel bekövetkezhet. Ha anyagunkat makroszkopikus szinten akarjuk vizsgálni, megbízható eredményeket ad a kompozitokban előforduló különböző tönkremeneteli módok valószínűségére vonatkozóan. A felsorolt kompozit tönkremeneteli módok közül azonban a mikroszinten bekövetkező anyagtörést ezzel a kritériummal nem lehet kimutatni. Ilyen például a szálak és a mátrixanyag delaminációja és mikrorepedése. [22]

A kritérium másodfokú kifejezéseket használ, és 5 bemeneti paramétert igényel. Ezek a paraméterek egytengelyű feszültségvizsgálatok során határozhatók meg. A Tsai-Wu formula szerint a tönkremenetel egy ortotróp anyagréteg egy pontján akkor következik be, ha a következő összefüggés érvényesül:

$$\left(\frac{1}{S_{1T}} - \frac{1}{S_{1C}}\right) * \sigma_1 + \left(\frac{1}{S_{2T}} - \frac{1}{S_{2C}}\right) * \sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{S_{1T}*S_{1C}} + \frac{\sigma_2^2}{S_{2T}*S_{2C}} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{shear}}\right)^2 - \sqrt{\frac{1}{S_{1T}*S_{1C}*S_{2T}*S_{2C}}} * \sigma_1 * \sigma_2 \geq 1 \quad [22]$$

A képletbe behelyettesítve az eredmény a Tsai-Wu kihasználtság (meghibásodási arány), amely minél közelebb van az 1,00 értékhez, annál nagyobb a meghibásodás valószínűsége. Bár a képlet túlnyomórészt helyesen jelzi előre a tönkremenetelt, a tapasztalatok azt mutatják, hogy a hosszirányú-keresztmetszeti biaxiális terhelési esetre irreálisan magas szilárdsági határértékekkel rendelkezik. Az említett terhelési esetet kivéve a kritérium az alkalmazások széles körében alkalmazható, és még pontosabb eredményeket lehet elérni, ha a hagyományos képletet progresszív tönkremeneteli modellezéssel van kombinálva. [22]

2.8. Kompozitok

A kompozitok olyan anyagok, amelyek két vagy több különböző anyagból állnak, és az így kapott kombináció kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkezik, mintha külön-külön használnák őket. [26]

Szálerősítésű polimer (Fibre Reinforced Polymer, FRP) kompozitként is ismertek, és olyan polimer mátrixból készülnek, amelyet mesterséges vagy természetes szálakkal (például üveg, szén, aramid) vagy más erősítőanyaggal erősítenek meg. A mátrixanyag megvédi a szálakat a környezeti vagy külső károsodástól, és átadja a terhelést a szálak között. A szálak viszont szilárdságot és merevséget biztosítanak a mátrix megerősítéséhez, és segítenek ellenállni a repedéseknek vagy töréseknek. [26]

A kompozit anyagok jelentősen fejlődtek az elmúlt évtizedekben, a rövid és hosszú szálerősítésű változatok széles választékával és a szendvicsszerkezetek megjelenésével. [26]

2.8.1. Hosszúszálerősített kompozitok

A szálerősítésű kompozitok két fő kategóriába sorolhatók: rövid szálak és hosszú szálak. Rövid szálerősítés esetén a szálak rendezetlenül és homogénen helyezkednek el a mátrixanyagban, míg a hosszú szálerősítésnél (Figure 15), a szálak egy vagy több orientációt vesznek fel annak érdekében, hogy befolyásolják az anyag irányított tulajdonságait. [23]

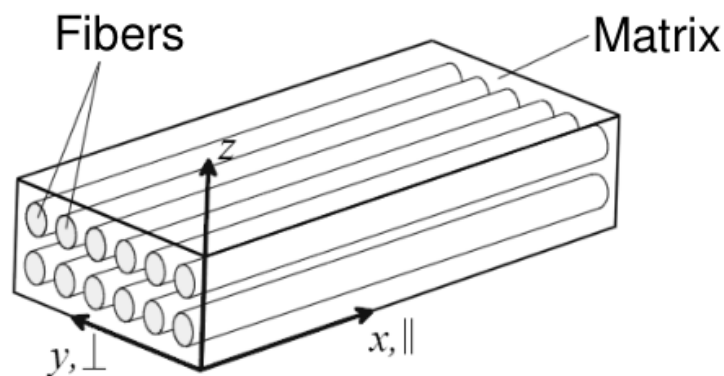


Figure 15 Hosszúszálerősített kompozit anyag [23]

A hosszú szálerősítésű kompozitok előnye a szálak iránya mentén kiváló mechanikai tulajdonságaik, valamint az alacsony sűrűségük. A szálak elrendezésének módja is sokféle formát ölthet.

Az egyirányú (UD) hosszú szálerősítésű kompozitokban a szálak egyetlen tengely mentén helyezkednek el a mátrixanyagban, így az anyag ebben az irányban különösen jó anyagtulajdonságokkal rendelkezik.

A szőtt hosszú szálerősítésű kompozitoknál a szálak szövésmintázatban helyezkednek el

(Figure 16) általában egymásra merőlegesen. [22]

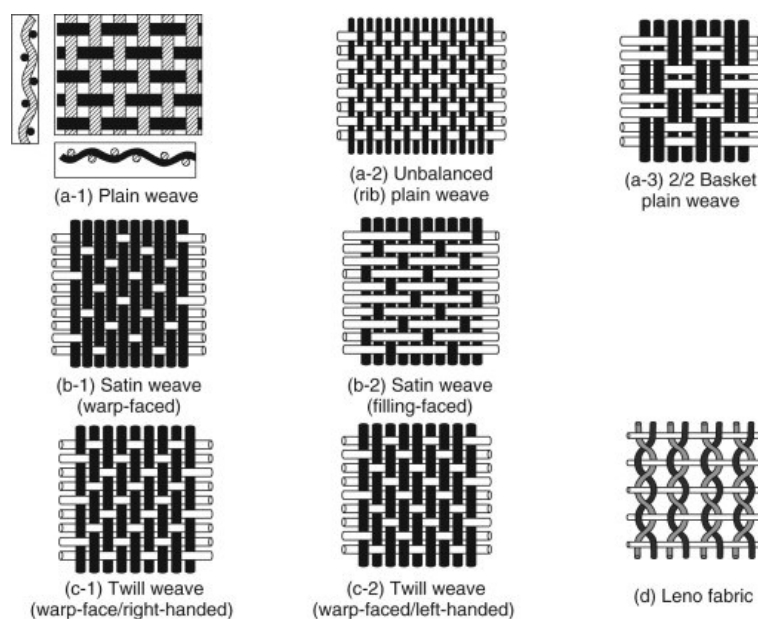


Figure 16 Szövési típusok [27]

A szálakat a mátrixanyag tartja össze, amely szintén sokféle lehet (hőre keményedő polimerek, hőre lágyuló műanyagok, fémek, kerámiák).

A mátrixanyag és a szálerősítésű rétegek összekeverését laminálásnak nevezzük. Ez a folyamat az anyaggal és a szerkezettel szemben támasztott követelményeknek megfelelően többféle gyártási eljárás alapján alapulhat. A főbb gyártási módszerek a következők.

A kézi laminálás során a mátrixanyagot kézzel viszik fel az egyes rétegekre.

A befecskendezés során a gyantát a vákuumzáró laminálószerszámmra fektetett laminálóanyag-rétegeken keresztül fecskendezik be.

Prepreg-technológiában a mátrixanyagot előimpregnálják a szálrétegbe, amelyet hő hatására térhálósodik ki. [23] [22]

2.9. Forgó és rugózatlan tömegek hatásai

A következő fejezet bemutatja a fontosságát egy utcai- vagy versenyautó forgó- és rugózatlan tömegének csökkentésének.

2.9.1. Rugózatlan tömeg

A jármű rugózatlan tömege a jármű tömegének az a része, amelyet a jármű felfüggesztése nem támogat. Egy Formula Student versenyautó esetében a rugózatlan tömeg magában foglalja a kerekek, a gumiabroncsok, a kerékagy, a tengelycsapágyak, a fékrendszer részei, a hátsó féltengelyek, az esetlegesen jelenlévő elektromos kerékagymotorok és egyéb különféle felfüggesztési alkatrészek tömegét. A jármű rugózatlan tömegének csökkentése jobb

kezelhetőséget eredményez gyorsításkor és fékezéskor, ezáltal jobb tapadást és a jármű feletti irányítást biztosít. A kisebb rugózatlan tömeggel rendelkező felfüggesztési rendszer kisebb erőfeszítést igényel a gumiabroncs és az útfelület közötti állandó kapcsolat fenntartásához az út egyenetlenségei ellenére. [28] [29]

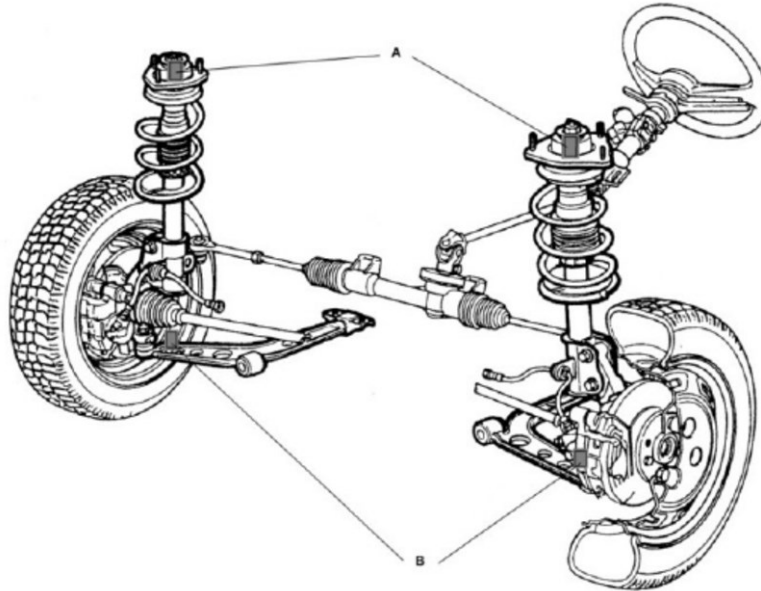


Figure 17 Rugózott (A) és rugózatlan (B) tömeg egy első kerék meghajtású közúti járművön [30]

2.9.2. Forgó tömeg

Egy forgó tárgy forgási állapotának fenntartására való hajlamát a forgási tehetetlensége határozza meg. A forgási tehetetlenség nagysága a forgó test tömegétől függ. A kisebb forgó tömeg és a tengely és a tárgy szélei közötti rövidebb távolság kisebb forgási tehetetlenséget eredményez. Járművek esetében, különösen a felfüggesztési egységekkel ellátott esetekben, a kisebb forgási tömeg kisebb nyomatékot eredményez, amely a hajtott vagy fékezett kerekek gyorsításához és lassításához (fékezéséhez) szükséges. Ez javítja a fékezés hatékonyságát és csökkenti az üzemanyag-fogyasztást, ami a versenyautóknál és a sorozatgyártású járműveknél egyaránt kívánatos. [16] [31]

3. Tervezési folyamat

A következő fejezet bemutatja a tervezési folyamatot és annak lépéseit melyek elvezetnek a végső alkatrészhez, felhasználva az előző fejezekben bemutatott tudást.

3.1. Módszertan

Ez a fejezet tisztázza a kerekek tervezéséhez használt munkamódszertant. Ebben a dolgozatban az iteratív tervezési módszertan került alkalmazásra. Az iteratív tervezési módszertan egy ciklikus folyamatot igényel, amely prototipizálásból, tesztelésből és elemzésből áll. Ebben a dolgozatban a CAD-tervezés az Autodesk Inventor és Fusion 360 CAD szoftverekben, a FEM-elemzés a Dassault Systemes ABAQUS CAE programban történt, az ANSA pre-processor szoftver segítségével.

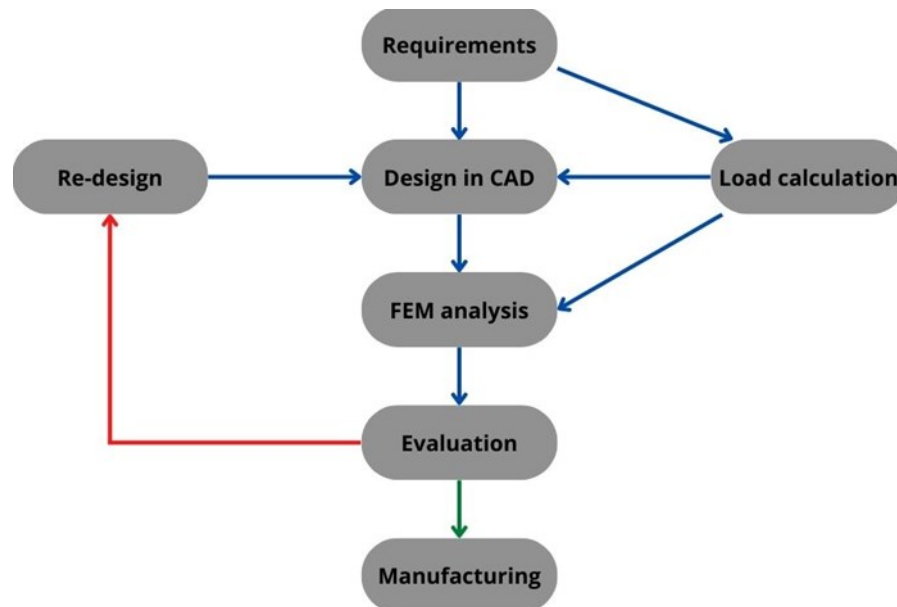


Figure 18 Iteratív tervezési folyamatára [2]

3.2. Követelmények

Mielőtt a tervezési folyamat megkezdődne, meg kell határozni az új kerekekre vonatkozó követelményeket. Rendkívül fontos, hogy a végső alkatrész megfeleljen ezeknek a céloknak, különben olyan keréktervet kapunk, amely nem felel meg a szabályoknak, így használhatatlan a versenyen, vagy egyszerűen csak a tervezési folyamatba fektetett idő és energia kárba vész, ahelyett, hogy egy másik alkatrészre összpontosítanánk, amely nagyobb teljesítményjavulást eredményezne.

3.2.1. Kerekekre vonatkozó szabályok

Először is, világosan meg kell határozni a Formula Student járműveken használt kerekek kialakítására vonatkozó szabályokat. Alapvető fontosságú, hogy a versenyautó minden alkatrésze megfeleljen ezeknek az előírásoknak, mivel egyetlen szabályszegés is kizáráshoz vezethet, vagy a nem megfelelő alkatrészt egy megfelelő, de rosszabb alkatrészsre kell cserélni.

A kerékrögzítésre és a kritikus rögzítőelemekre vonatkozó szabályok a biztonságot és a legjobb mérnöki gyakorlatok alkalmazását hangsúlyozzák. A kerekek esetében, ha egyetlen rögzítőanyát használnak, annak tartalmaznia kell egy olyan mechanizmust, amely megakadályozza annak meglazulását, a „ellenanya” nem felel meg a szabványnak. A kerécsavaroknak és a csapszegeknek tömör acélból kell készülniük, és nem lehetnek üregek, így biztosítva, hogy megbízható műszaki kötőelemként működjenek. Ezenkívül az alumínium kerékanyák is megengedettek, de kemény eloxáltak és kiváló állapotban kell lenniük. [32]

A kritikus kötőelemeknek, azaz az olyan kulcsfontosságú rendszerekben használt kötőelemeknek, mint az elsődleges szerkezet, a kormányzás, a fékezés, a felfüggesztés és a vezetői heveder, különleges szabványoknak kell megfelelniük. Ezeknek a kötőelemeknek legalább 4 mm átmérőjűnek kell lenniük, 8.8-as vagy magasabb szilárdsági osztályúakkal. Ezeknek vagy hatlapfejű vagy belsőkulcsnyílású csavaroknak kell lenniük, és minden alternatív kötőelemnek egyenértékű szilárdságot kell mutatnia. Az elsődleges szerkezetben lévő csavaros kötéseknel 1,5 vagy annál nagyobb peremtávolság-arányt kell alkalmazni, amely biztosítja, hogy a csavarfurat körül elegendő anyag legyen a szerkezeti integritáshoz, kivéve a felfüggesztés rögzítő füleit. [32]

3.2.2. Tervezési követelmények

A dolgozat célja az Arrabona Racing Team következő Formula Student versenyautójában használt kerékszerelvény továbbfejlesztése. A jelenlegi 3 darab hibrid CFRP keréktárcsák sikeresen csökkentették a felfüggesztés rugózatlan és forgó tömegét, miközben megbízhatóan működnek. Mivel azonban a 3 darabból álló kerekek tervezésekor magas biztonsági tényezőket alkalmaztak, lehetőség van további súlycsökkentésre anélkül, hogy a működési megbízhatóságuk sérülne.

Ennek eléréséhez az új kerekek tervezésénél több kritikus követelményt kell betartani. Mindenekelőtt a kerekeknek garantálniuk kell a hibamentes működést, legalább 1,2-es biztonsági tényezővel. A szerkezeti integritás biztosítása érdekében a globális elmozdulást 3,0 milliméter alatt kell tartani. Az új kerekeknek továbbá teljes mértékben kompatibilisnek kell lenniük az autó meglévő felfüggesztési geometriájával és kerékagy-kialakításával, lehetővé

téve a csereszabotosság a jelenlegi CFRP és alumínium kerekekkel.

Másodszor, a kész felni tömegének a centerek és rögzítőelemek nélkül 1000 grammnál kisebbnek kell lennie. Ez 35%-os tömegcsökkenést jelent az alumínium felnikhez képest, és 10%-os súlycsökkenést a kétrészes CFRP felnikhez képest.

Ezenkívül a tervezésnek tartalmaznia kell a metrikus M6-os kötőelemek használatát, mivel ezeket az autóban általánosan használva vannak. A kerekeknek az ART és partnerei által gyárthatónak kell lenniük, hogy gyártásuk megvalósítható maradjon. Végül a költséghatékonyság is prioritást élvez, mivel a felesleges kiadások csökkentése a teljesítmény csökkenése nélkül kulcsfontosságú a csapat versenysikeréhez. Ezek a kritériumok képezik a tervezési folyamat alapját, amelyek a kerékösszeállítás további javítására irányuló erőfeszítéseket irányítják, miközben optimalizálják a teljesítményt és minimalizálják a tömeget.

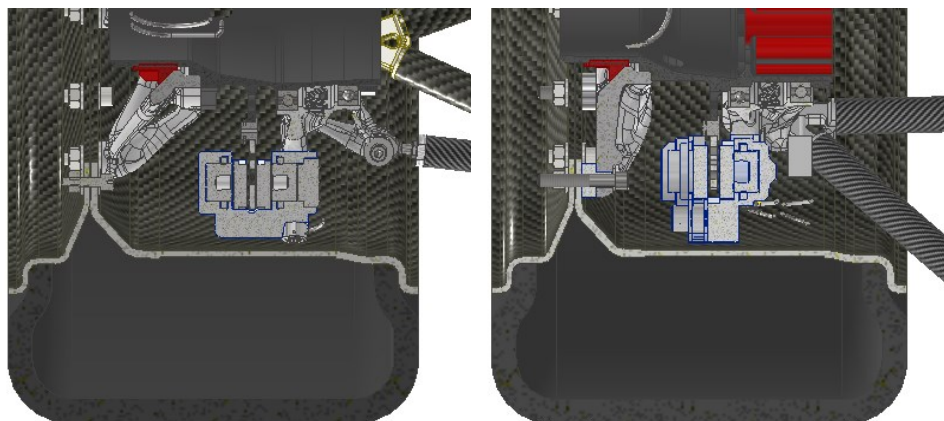


Figure 19 Az első (bal) és a hátsó (jobb) kerék összeállítások

3.3. Terhelési esetek meghatározása

Az új kerekek megfelelő tervezéséhez és szerkezeti integritásuk pontos szimulálásához először meg kell határozni a felniket érő terhelést. E dolgozat eredeti célja az volt, hogy az autó acél A-lengőkarjaira szerelt nyúlásmérő műszerek hitelesített adatait használjuk, amelyeket a versenyek során tapasztalt legnagyobb terhelést reprodukáló környezetben végzett tesztek során rögzítettünk. Sajnos elektromos hiba miatt a nyúlásmérők adatrögzítője a tesztelés során helyrehozhatatlanul megsérült.

3.3.1. Mechanikai terhelések szimulációkból

Mivel a felfüggesztés nyúlásmérőiből nem lehetett információt kinyerni a felfüggesztés terheléséről, helyette az IPG Carmaker szoftver adatait kellett felhasználni. Az IPG Carmaker egy többcélú szoftver, amely egyéb funkciók mellett szimulálja egy kiválasztott jármű köridejét egy kiválasztott forgatókönyv szerint, miközben szimulálja és rögzíti a járműre ható erőket is. Egy ilyen szimuláció elvégzéséhez az autót és a pályát magában a szoftverben kell definiálni

és felépíteni.

A kerekre ható terhelések kiszámításához a gumibroncsok érintkezési felületén fellépő normál erőket kell felhasználni. A kerekre ható maximális erők meghatározásához szélsőséges esetek meghatározása szükséges. Ezeknek az eseteknek szinte semmi esélyük sincs arra, hogy a szokásos versenyhasználat során bekövetkezzenek, de elméletileg előfordulhatnak az autóban.

Az első eset célja a kerekre ható legnagyobb lehetséges hosszirányú erők kiszámítása. Ez egy végsebességig történő gyorsítás speciális, nagy tapadású aszfalton, majd fékezés ugyanezen a felületen teljes megállásig. Ez a forgatókönyv nem valósítható meg a Formula Student verseny dinamikus versenyszáma során, mivel a gyorsulási pálya a szabályok szerint csak 75 méter hosszú, ami nem elegendő ahhoz, hogy az autó elérje a végsebességet. Egyes versenyek, mint például a Formula Student Austria, azonban nagyobb tapadású aszfaltot használnak a gyorsulási pályán.

A második forgatókönyv egy hagyományos, 30 méter átmérőjű csúszópályát (skidpad) foglal magában. A skidpad egy kör alakú pálya, amelyet különböző paraméterek, többek között a jármű oldalirányú gyorsulásának tesztelésére használnak. Ez a szimuláció meghatározza az autó érintkezési felületére ható maximális oldalirányú erőt. Ez az eset azonban nem fordulhat elő versenykörülmények között, mivel a Formula Student szabványos skidpad nem egy 30 méter átmérőjű kör, hanem egy nyolcas alakú, amely két 21 méter átmérőjű körből áll.

A keréktalppontra egyszerre ható maximális erők kiszámításához a virtuális autót a Formula Student Germany autocross-pályán ideális körülmények között került szimulálásra. Ezt a szimulációt azért kellett külön elvégezni, mert az előző forgatókönyvekben szimulált erők nem jelentkezhetnek egyazon időpontban.

A következő táblázat a különböző szimulált forgatókönyvek összes erőhatását felsorolja. A külön-külön ható erők és az egyszerre ható erők az áttekinthetőség érdekében külön-külön szerepelnek. Mivel a külön-külön ható erők az egyszerre ható erők helyett egyidejűleg kerülnek felhasználásra, a különbségük a biztonsági tényező oszlop alatt szerepel.

Erő	Külön fellépő [N]	Egyszerre fellépő [N]	Biztonsági tényező
Hosszanti (F_x)	+/-2400	+1050	2,3
Kereszt (F_y)	+/-2300	+1800	1,25
Függőleges (F_z)	+2650	+1600	1,65

Table 2 A keréktalppontra ható erők

A szimulációkban az keréktalppont erőit úgy modelleztem, hogy a Table 2-ben szereplő erőket alkalmaztam az érintkezési pont elméleti középpontjában elhelyezett csomópontra, és ezt összekötöttem a peremmel a kapcsolási kényszerekkel (coupling). Ezek a kényszerek

hasonlóan osztották el a terhelést a felni elemeire, mint ahogyan a gumiabroncs is tenné.

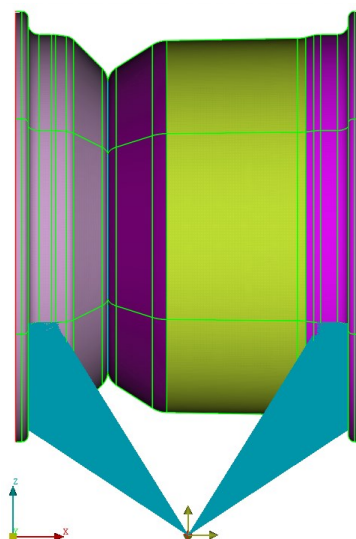


Figure 20 A keréktálpont terhelése ráadva a kerékre

3.3.1.1. Validáció

Mielőtt a fent említett táblázatban felsorolt erők felhasználhatók lennének a FEM-elemzésben és a rétegrendtervezésben, validálni szükséges őket. Ez a lépés azért kulcsfontosságú, mert a kerekek az autó kritikus alkatrészei, és bármilyen meghibásodás jelentős anyagi károkat okozhat, vagy ami még rosszabb, a pilóta sérülését eredményezheti.

A validáláshoz az ART_09 fedélzeti telemetriájának élő adatait használtam fel, amelyeket a Formula Student Germany (FSG) 2022 során kerültek rögzítésre. IPG-ben az ART_09 modelljét használtam, amelyet ugyanazokkal a technikákkal és elvekkel került felépítésre, mint az ART_11 modellje. A szimulációból származó maximális hosszirányú és oldalirányú gyorsulási értékeket ezután összehasonlítottam a telemetriai adatrögzítőből kinyert értékekkel.

	IPG szimuláció [G]	FSG [G]	Különbség [%]
Legnagyobb hosszanti gyorsulás	-1,91	-1,89	+1,59
Legnagyobb kereszt gyorsulás	2,06	2,11	-2,84

Table 3 A szimulált és a rögzített gyorsulási csúcserőértékek összehasonlítása

Amint az a Table 3-ban látható, az IPG-szimulációban az autó hasonló csúcsgyorsulási értékeket ért el, mint a valós versenyen. A szimulált és a valós eredmények közötti minimális különbség valószínűleg abból ered, ahogyan az IPG Carmaker a pályát reprodukálja. Míg a tényleges FSG versenypálya bójákkal van kialakítva, ami lehetetlenné teszi a kanyarok büntetés nélküli levágását, addig az IPG-ben a virtuális pálya egy hagyományos versenypályára hasonlít, kifutó területekkel, ami lehetővé teszi a virtuális vezető számára, hogy kissé levágja a kanyarokat.

3.3.2. Nyomás

A felnik által tapasztalt másik nagy terhelés az abroncsnyomás. A valósághű szimulációs eredmények elérése érdekében a nyomást szorosan modellezni kell. A felni felületén 4 bar nyomást állítottam be, ami a gumibroncs felszerelése során kifejtett nyomást tükrözi, mivel tapasztalatom alapján ez a maximális nyomás szükséges ahhoz, hogy a gumibroncs kenőanyag nélkül felcsússzon a felnire. Felfújáskor a gumibroncs oldalfala ezen nyomás alatt megnyújtja a peremet, de mivel a teljes gumibroncs szimulálása meghaladta a szakdolgozat kereteit, ezt a hatást nem szimuláltam. Mivel a használt megoldóprogramban előre be van állítva egy nyomásterhelési opció, a szimuláció során a felni belső felületein keresztül alkalmaztam.

3.3.3. Nyomaték

Mivel az ART versenyautókban használt SZEngine motor pontos nyomatékadatai nem állnak rendelkezésre, a SZEngine csapattagjaival folytatott konzultációt követően 1000 Nm nyomatékértéket választottak. Ez az elméleti maximum tartalmazza az autó sebességváltójának és differenciálművének teljes áttételét, valamint egy kis biztonsági tényezőt. Ez a megközelítés azt is biztosítja, hogy az új felnik jövőbiztosak legyenek, befogadva az esetleges fejlesztéseket, például a turbófeltöltős SZEngine modellekre vagy elektromos kerékgymotorokra való áttérést, amelyek mindkettő nagyobb nyomatékot tudna biztosítani, mint a jelenlegi belsőégésű motorok. A szimulációban a nyomatékot egyetlen terhelésből származó tengelykapcsolókon keresztül juttatják a kerékközéppontokhoz (Figure 21), modellezve a valós körülményeket, mivel nem hat közvetlenül a felnikre.

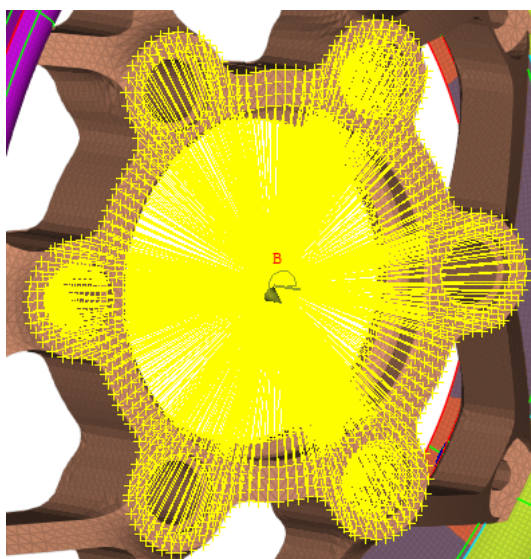


Figure 21 Torque load applied on the wheel center

3.3.4. Hőterhelések

A hőforrások közelében elhelyezkedő alkatrészek tervezése során figyelembe kell venni a hőterhelést. A hő befolyásolhatja az alkatrész anyagának mechanikai tulajdonságait, leginkább a folyáshatárt és a szakítószilárdságot. Ez különösen fontos a kompozit alkatrészek esetében, mivel a kellően magas hőmérséklet megolvaszthatja az alkatrészben lévő epoxigyantát.

A korábbi tesztelési tapasztalatok alapján, a hőmatricákkal és festékekkel (Figure 22) a csapat dokumentálta, hogy míg a féktárcsák $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ feletti hőmérsékletet is elérhetnek, a kerekek belső felületi hőmérséklete nem emelkedett $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ fölé. Ezért biztonságosnak tekinthető a CFRP-alkatrészek használata ezen a területen. [15]



Figure 22 Hőmérséklet mérések a keréken és az első tengelyen [15]

3.4. Kerék geometria tervezés

A kétrészes CFRP felnikhez hasonlóan az autó első és hátsó tengelyén is ugyanazt a geometriát alkalmazzák majd. Erre azért van szükség, hogy optimalizáljuk az idő- és költséghatékonyságot mind a tervezési fázisban, mind a felnik gyártása során.

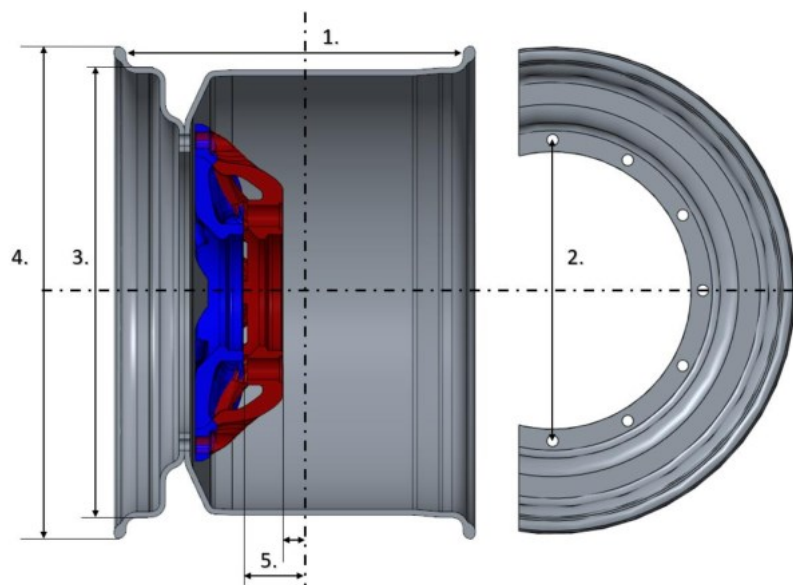


Figure 23 A korábban használt felnik méretei: 1. Rim width 7,25" – 184,15 mm, 2. Pitch Circle Diameter (P.C.D.) 171,2 mm, 3. Wheel rim diameter 10" – 254 mm, 4. Flange diameter 274 mm, 5. ET number (Einpresstiefe) [15]

Mint már említettem, az új kerék minden méretének meg kell egyeznie a korábban használt felni méreteivel (Figure 23), kivéve a felni szélességét, amely 7,25"-ről (184,15 mm) 8"-re (203,2 mm) változik a felfüggesztési geometria alcsoport ajánlása alapján, hogy jobban kihasználja a gumiabroncsok érintkezési felületét.

A felnik fő méreteit az Európai Gumiabroncs- és Felniügyi Műszaki Szervezet (ETRTO) határozza meg. Szabványosított dokumentumuk a hagyományos járművek felnijeinek típusait és geometriai méreteit határozza meg. Meghatározza a felni peremének ajánlott méreteit a gumiabroncsnak a felnire történő biztonságos rögzítése érdekében, valamint a gumiabroncsra a kerékcseré során ható terhelés csökkentését célzó tervezési jellemzőket. Az ETRTO által megadott szabványosított méretek a Table 4-ben részletesen szerepelnek, és a Figure 24 szemlélteti őket, egyértelmű iránymutatást nyújtva az iparági szabványoknak megfelelő felni tervezéséhez.

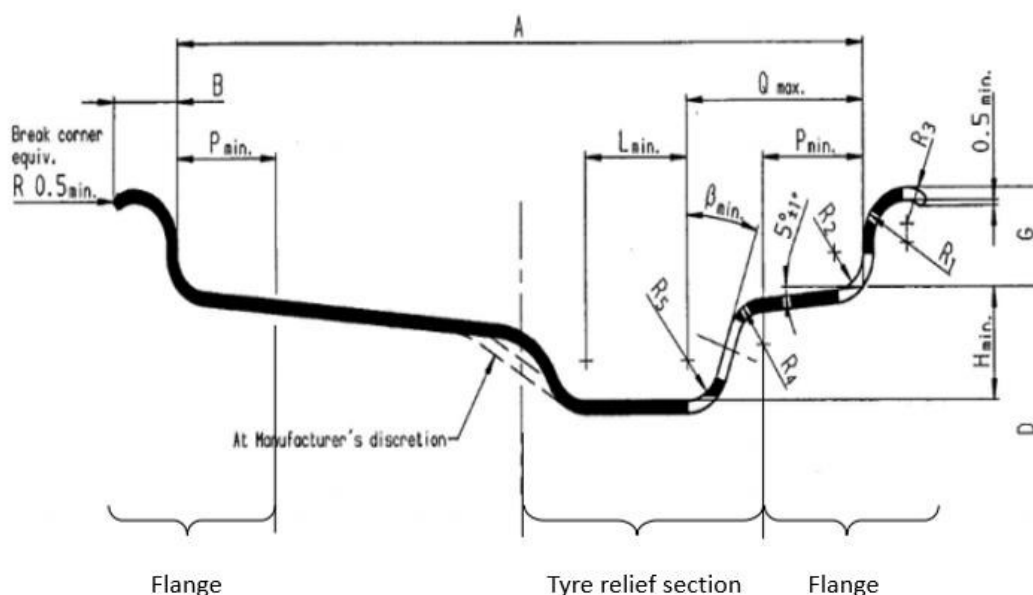


Figure 24 ETRTO szabványos méretek [33]

Width	Dimensions of the rim [mm]											
	A		B		G	P	H	L	Q	R1	R2	β
			Min	Max	$+1,2$ $-0,4$	Min	Min	Min	Max	Min	Max	Min
8"	203,2	$\pm 1,5$	10,3	15	17,3	19,8	17,3	22	45	9,7	6,4	15°

Table 4 Egy 8" felni méretei [33]

Egy karbonkompozit Formula Student felnik tervezésekor nem szükséges betartani a közúti járművekre meghatározott összes méretet, mivel a közúti szabályok nem vonatkoznak az adott sorozatra épített versenyautókra. Ehelyett ezek a méretek iránymutatásként szolgálnak,

segítve a felnik és a kerékpánt felület megfelelő méretének meghatározását. Különösen fontos jellemző a „tyre relief section”, amely segít a gumibroncs pántjának a horonyba nyomását a szerelés során. Ez a kialakítás lehetővé teszi, hogy a gumipánt a horonyba gördüljön, csökkentve a feszültséget és megelőzve a gumibroncs anyagi károsodását.

A korábban használt Keizer felnik is rendelkeztek ezzel a kialakítással, de az első és a hátsó tengelyeknél eltérő volt az elhelyezés. Megfigyeltem, hogy az 1,25-6,-os felnik sokkal jobb szervizelhetőséget biztosítanak a kerékcserék során, mint a 2-5”-os felnik. Ez főként azért volt így, mert a gumibroncs merev oldalfala nehezen volt benyomható a kisebb horonyba. A gumibroncs oldalfalának merevségét a magassága befolyásolja, amelyet a gumibroncs szélességének százalékában számolnak ki. A gumibroncs felszerelésének megkönnyítése érdekében kialakított hornyok kulcsszerepet játszottak a használhatóság javításában.

A geometriai tervezés során az ilyen gumibroncs-változtatásokkal kapcsolatos tapasztalataimat felhasználtam az új CFRP felnik használhatóságának javítására. Sajnos a felni külső részén a 2,-os felnik geometriáját használták a megfelelő méret miatt, még akkor is, ha az 1,25”-os felnik geometriája jobb lett volna. Nagy figyelmet fordítottak a geometria egyszerűsítésére a gyártás megkönnyítése érdekében, mivel a kompozit rétegeket nem lehet éles sarkokba vagy kis sugarú lekerekítésekbe fektetni, valamint a jobb feszültségeloszlás érdekében. Az egyszerűbb geometria kevesebb anyagszükségletet, így kisebb tömeget és alacsonyabb gyártási költségeket jelent.

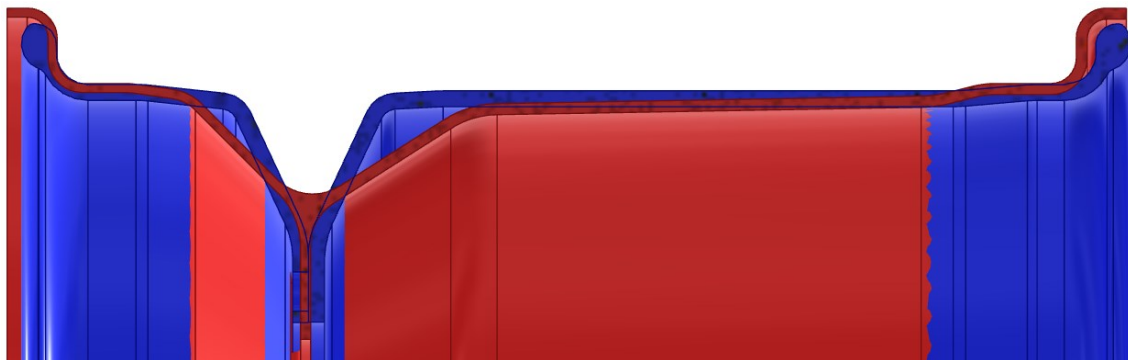


Figure 25 Comparison between the Keizer (blue) and the new CFRP (red) geometry

Mivel a peremszelvények követik a korábban használt felnik peremgeometriáját, valamint az ETRTO szabványait, a gumibroncsok megfelelő peremmezése, a régebbi felnikre történő gumibroncscsere tapasztalataim alapján, garantálható. Sajnos ezt CAD-ben nem lehet ellenőrizni, mivel a megfelelően felfűjt gumibroncsról nem létezik pontos modell.

A következő lépés a felniken vagy azok közelében lévő felfüggesztési alkatrészek és maguk a felnik közötti távolságok CAD-ben történő ellenőrzése. Fontos, hogy minden alkatrész és a felnik között legalább 3 mm legyen, mert mint a későbbi szimulációkból kiderül, a felnik

maximális elmozdulása elérheti a 2,7 mm-t, bár nem a felni nagyobb részének közepén, hanem a peremén, így az alkatrészek között nincs konfliktus.

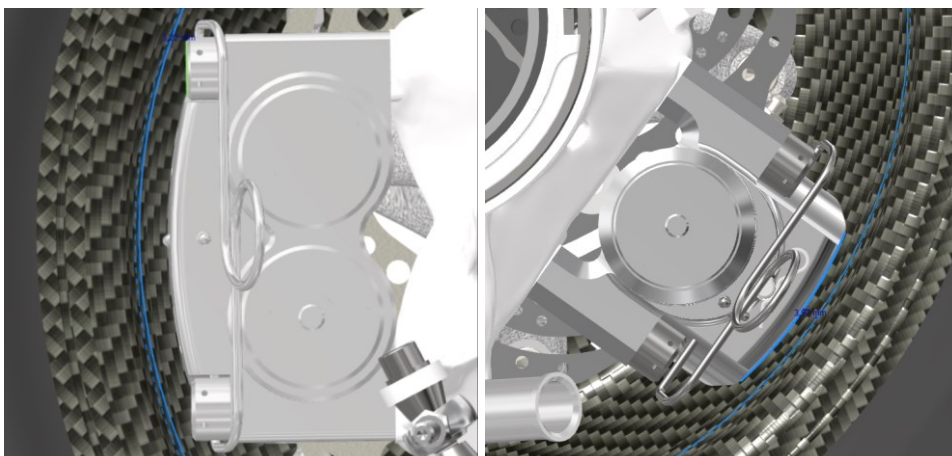


Figure 26 Minimum distance between the rims and the front (left) and rear (right) brake callipers

3.5. Kompozit rétegrend tervezés

Ebben a fejezetben ismertetem, hogyan alkalmaztam végeselemes módszereket (FEM) a kerekek tervezésének optimalizálásához. Az optimalizálás elsődleges célja az volt, hogy minimalizáljam az alkatrész tömegét, ugyanakkor biztosítsam, hogy a korábban kiszámított terheléseknek a szükséges biztonsági tényezővel továbbra is ellenálljon. A folyamat egyik legnagyobb kihívása a szálerősítésű anyagok ortotróp viselkedésének figyelembevétele volt, amelyet a 2.6.1. fejezetben részletesen tárgyaltam.

A tervezési folyamat fontos része volt a csapat karosszéria részlegével a szoros együttműködés. Ez a részleg nemcsak a versenyautó monocoque-jának tervezéséért és gyártásáért felelős, hanem a kompozit anyagokkal való munka terén is széleskörű szakértelemmel rendelkezik. A monocoque egy kompozit szendvicsszerkezetet tartalmaz, amely több réteg twill és unidirekcionális szénzál-erősítésű polimerből (CFRP) készült, alumínium méhsejt maggal kombinálva. A karosszéria részleggel együttműködve sikerült a fejlett kompozit anyagokkal kapcsolatos tudásukat integrálni a keréktervezésbe, így biztosítva mind a szerkezeti integritás, mind a tömegoptimalizálási célok teljesülését. Ez az együttműködés alapvető fontosságú volt az erő, a súly és a gyárthatóság közötti kívánt egyensúly elérésében.

3.5.1. Anyag mérések

As Mivel a textilkompozitok gyártására nincsenek szabványosított eljárások, a kompozitiparban a termékek tulajdonságai nagyon változatosak. Az anyagtulajdonságok jellege függ a szálaktól, a mátrixanyagtól és e kettőnek a rétegben való arányától, de a gyártási

eljárástól is. Bár a rendelkezésünkre álló karbonszövetekhez a gyártótól kaptunk egy adatlapot, amely fontos szilárdsági tulajdonságokat tartalmazott, ez nem tartalmazta az összes szükséges anyagtulajdonságot, és ami még fontosabb, a gyártási módszerünk nem felelt meg teljes mértékben az adatlapon ajánlott paramétereknek. Így a kompozitrétegek szilárdsági tulajdonságait csak kísérletileg lehet meghatározni. Amint a 2.6. fejezetben bemutattam, négy független anyagtulajdonságot kellett meghatározni: E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} . Továbbá a Tsai-Wu tönkremeneteli képlethez szükséges szilárdsági határértékek.

Mivel a kompozit alkatrészek (pl.: az ART monocoque) általában több különböző típusú és orientációjú szövetből állnak, szükséges volt megvizsgálni ezeket a különálló rétegeket, hogy aztán meghatározhassuk az anyagmodellt a szerkezet végesesemes modellelemzéséhez. Az ART monocoque rétegrendjét alkotó kétféle karbonszövet a 2x2 sávolszövésű (twill) prepreg és az egyirányú (UD) szövet. Ezekből a laminátumokból kellett az anyagvizsgálathoz néhány rétegből álló próbatesteket gyártani.

A próbatestek méretét, alakját és mérési eljárását szabványok határozzák meg. A kompozit anyagok szilárdságmérésére két fő szabvány létezik: az ISO és az ASTM (American Society for Testing Materials) által meghatározottak. A vizsgálatok az utóbbiak alapján történnek.

3.5.2. Measurement parameters

A vizsgálatokat a Széchenyi István Egyetem Anyagvizsgáló Laboratóriumában INSTRON 5582 szakítógéppel végezték. A gép 100 kN-os cellával és videós extenzométerrel van felszerelve, amely a pontos elmozdulások meghatározásához a próbadarabon lévő alappontok megjelölésével határozza meg a pontos elmozdulásokat. A méréseket 2 mm/perc sebességgel végeztük egytengelyű terhelés mellett.

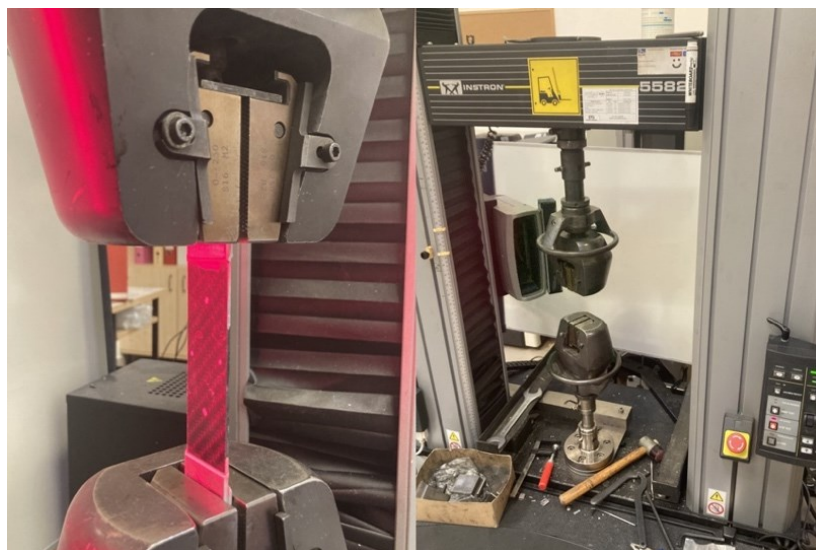


Figure 27 A szakítóvizsgáló gép a próbadarabbal [34]

Ahogy korábban említésre került, a szál erősítésű kompozitok anyagi koordináta-rendszere a következő tengelyek mentén értelmezhető. Az 1. tengely a szálak iránya, a domináns szálirány. A 2. tengely a keresztirány, a vetületi irány. A 3. tengely a kompozitlemez normálisa (Figure 28).

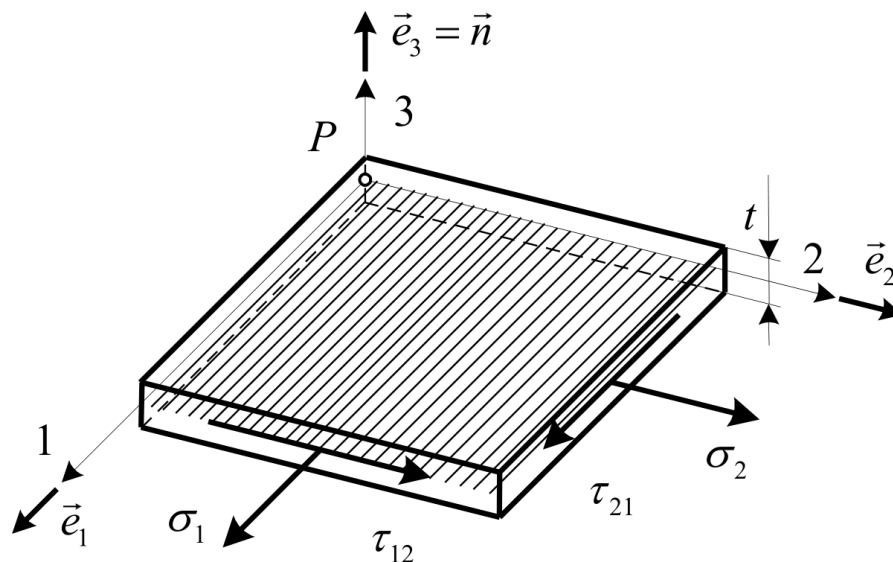


Figure 28 Egy réteg feszültségei a fő anyagirányok koordináta-rendszerében [22]

A 2x2 twill szövet mechanikai tulajdonságai az 1. és a 2. tengely irányában azonosak, így nem szükséges mindkét irányban ugyanazokat az anyagtulajdonságokat vizsgálni.

Az egyirányú rétegelt anyag esetében a szilárdsági tulajdonságok a szálirányban és a vetülékirányban jelentősen különböznek, ezért mind a 0°-os, mind a 90°-os irányban szükséges az anyagvizsgálatokat elvégezni.

3.5.3. Próbatestek gyártása

A kompozit anyag összes mechanikai paraméterének és szilárdsági tulajdonságának meghatározásához alapvetően háromféle anyagvizsgálatra van szükség: szakító-, nyíró- és nyomóvizsgálatra. Minden egyes vizsgálati típusból 5 próbatestet készítettünk, hogy az eredmények átlagolásakor figyelmen kívül lehessen hagyni az esetleges kiugró értékeket. A próbatestek gyártása során számos fontos tényezőt kell figyelembe venni. Mivel az alkatrészekben szénkompozitot használnak, a prepregben használt mátrixanyag (gyanta) egy adott hőkezelési (sütési) ciklus alatt kikeményedik. A próbatestek gyártása során a fő cél annak biztosítása, hogy az előállított laminátum tökéletesen megfeleljen a végső alkatrészben használt laminátum típusának.

Ezt a fogyóanyagok, a sütési ciklus, a sütés során alkalmazott túlnyomás és vákuum értékek meghatározásával lehet elérni a későbbi alkatrészgyártás paramétereinek alapján. A gyártási folyamat a következő lépésekből áll.

A folyamat egy sík alumíniumlap előkészítésével kezdődött, amelyet formaleválasztó anyaggal vontunk be, és amelyre egy egyirányú szénlemezekt fektettünk, a teljes felületen egyenletes vastagság megtartásával. A rétegek száma megfelelt a vizsgálati követelményeknek.

Ezt a laminált lemezt ezután 120 °C-on, 1 bar vákuum és 2 bar túlnyomás mellett, a meghatározott kezelési ciklus szerint, autoklávban hőkezeltük. A hőkezelés befejezése után a laminátumot vízzel megfelelő méretű próbatestekre vágtuk, a vágásokat a kívánt szálirányhoz igazítva. A víz vágást választottuk a kézi szerszámos vágással szemben, minimalizálva a delamináció kockázatát.

A próbatestek szakítóvizsgálatra való előkészítése érdekében 1 mm-es alumíniumlemezeket ragasztottunk a megragadandó területekre. Ez a lépés alapvető fontosságú, mivel a szakítóvizsgálati gép megfogó pofái különben összenyomhatják a laminátumot, ami pontatlan eredményekhez vezethet. A felhasznált ragasztónak elegendő nyírószilárdsággal kellett rendelkeznie ahhoz, hogy ellenálljon a vizsgálat során alkalmazott terhelésnek; ellenkező esetben meghibásodhat, és érvénytelenítheti az eredményeket. Végül a ragasztott próbatesteket a vizsgálat folytatása előtt vákuumban térhálósodtak.

3.5.4. Szakító vizsgálat

A szakítóvizsgálat paraméterei az ASTM 3039 szabvány ajánlásain alapulnak (Figure 29) mind a twill, mind az UD esetében, azzal a különbséggel, hogy a sávolykötéses minta rövidebb az 1. tengely mentén.

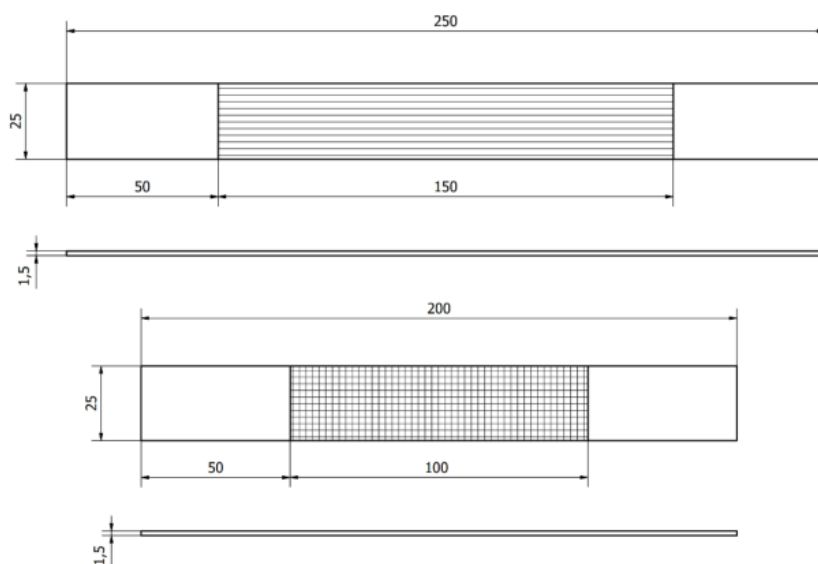


Figure 29 Unidirekcionális (fent) és twill (lent) szakító próbatestek [22]

A vizsgálatok befejezése után rendelkezésre állt a próbatestek töréséhez szükséges erő (F). A próbatestben keletkező feszültség (σ) az erő és a próbatest keresztmetszeti felülete (A) hányadosa.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [17]$$

A terhelés hatására bekövetkező hossz- és keresztirányú elmozdulásokból az alakváltozás kiszámítható a hosszváltozás (Δl) és a kezdeti hossz (l_0) hányadosaként.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [17]$$

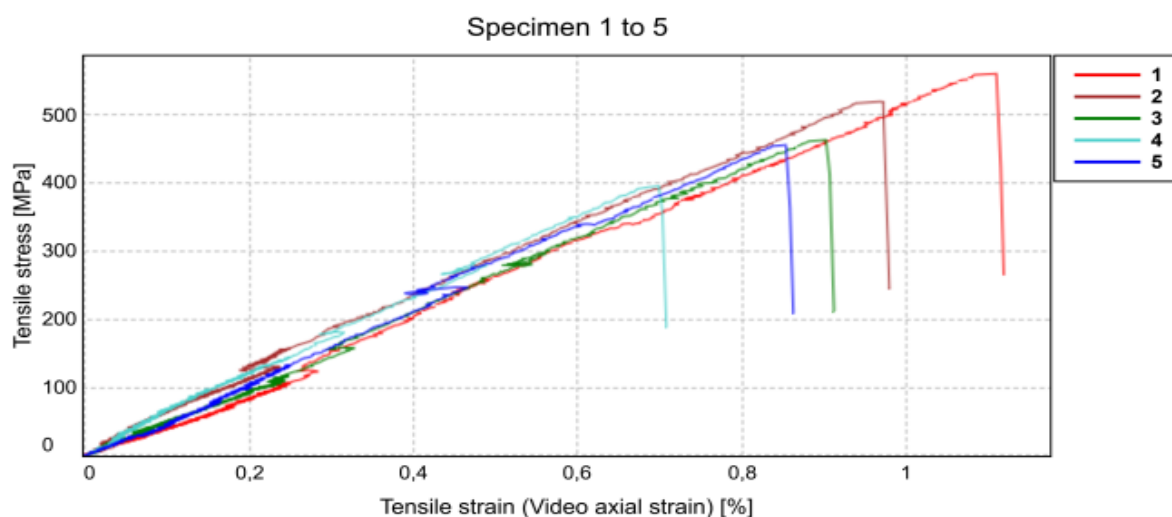


Figure 30 Twill szakító próba eredmény [34]

	E_1 [MPa]	S_{1T} [MPa]
TW-2-1	52230	559,84
TW-2-2	54785	519,02
TW-2-3	52255	462,74
TW-2-4	-	-
TW-2-5	55793	455,43
Átlag	53765,75	499,26

Table 5 Twill szakító próba eredmény [34]

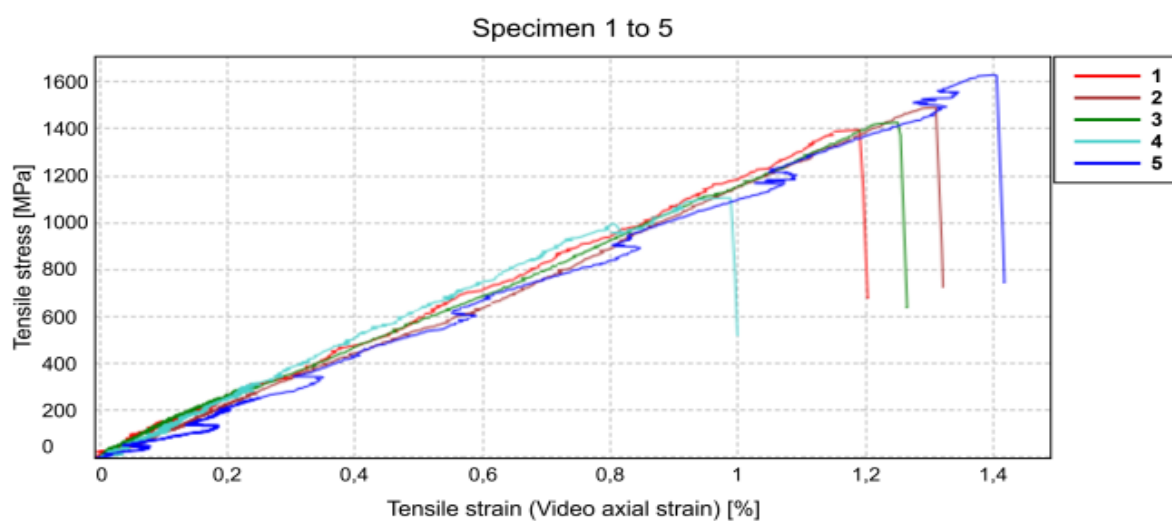


Figure 31 UD szakító próba eredmény [34]

	E ₁ [MPa]	S _{1T} [MPa]
UD-2-1	116881	1396
UD-2-2	114334	1490,56
UD-2-3	113846	1427,58
UD-2-4	-	-
UD-2-5	115770	1629,56
Átlag	115208	1485,95

Table 6 UD szakító próba eredmény [34]

3.5.5. Nyíró és nyomó vizsgálatok

A próbatestek nyírószilárdsága az ASTM D3518 szabvány szerint vizsgálható. Ez a vizsgálat a szálak 45 fokos elforgatásával történik, ami a szálak között nyíróerőt hoz létre, amely a szakítószilárdsággal azonos módon értékelhető. A vizsgálathoz használt próbatestek méretei megegyeztek a korábban bemutatott húzópróbatestek méreteivel (Figure 29). A nyírószilárdság elemzésénél a hosszirányú és a keresztirányú alakváltozások különbségéből számított szögtörést (γ_{12}) kell kiszámítani, hogy az 1. és 2. tengely által bezárt síkokra gyakorolt nyíróhatást elemezni lehessen:

$$\gamma_{12} = 2 * \varepsilon_{12} = \varepsilon_{11} - \varepsilon_{22} \quad [17]$$

A feszültségek a nyíró feszültség közben:

$$\sigma_{12} = \frac{F}{2 * A} \quad [17]$$

A nyomóvizsgálat során a próbatestekre nyúlásmérőket helyeznek, hogy meghatározzák az elmozdulást. Sajnos, bár az eljárási módszerek ismertek, ezeket a vizsgálatokat nem végeztük el, tekintettel a mérés körülményeire és költségeire.

Ezért a nyomószilárdsági és nyírófeszültségi vizsgálatok értékeit más mérési eredményekből, műszaki adatlapokból vagy hasonló anyagtulajdonságokkal rendelkező szövetek paramétereiből számítottam ki.

3.5.6. Anyagkártyák

A vizsgálatok lefolytatása után az eredmények alapján létrejöttek a mechanikai anyagmodelljei a twill és UD prepreg anyagoknak.

E_1 [Mpa]	E_2 [Mpa]	G_{12} [Mpa]	ν_{12}
53765,75	53765,75	4716,8	0,04
S_{1T}	S_{2T} [Mpa]	G_{13} [Mpa]	S_{shear} [MPa]
499,26	499,26	3773,83	46,71119
S_{1C}	S_{2C}	G_{23} [Mpa]	ρ [g/cm ³]
459,2	459,2	3773,84	1.42

Table 7 Twill prepreg karbon kompozit anyagkártya [34]

E_1 [MPa]	E_2 [Mpa]	G_{12}	ν_{12}
1115208	7456,054	4176,73	0.2835
S_{1T}	S_{2T} [Mpa]	G_{13} [Mpa]	S_{shear} [MPa]
1485,95	46,08	4176,73	35.483283
S_{1c}	S_{2c}	G_{23} [Mpa]	ρ [g/cm ³]
1000	100	3443	1.57

Table 8 UD prepreg karbon kompozit anyagkártya [34]

3.5.7. FEM szimuláció

Ha egy részleges differenciálegyenlet megoldása keresett, például egy szilárd mechanikai problémára, egy geometriailag összetett tartományban, a végeselem-módszer egy hatékony eszköz. A módszer lényege, hogy a 3D modellt kisebb szabályos tartományokra osztja fel, ahol az egyes elemek csomópontokon keresztül kapcsolódnak egymáshoz. Az egyenletet így minden egyes elemre megoldjuk, és a csomóponti eredményekből pontos közelítést kapunk a teljes geometriai tartományra. A ma rendelkezésre álló számítási kapacitásnak és a szoftverek fejlődésének köszönhetően hatékony numerikus közelítő módszereket alkalmaznak a szilárdságtani problémákban. A végeselemes módszer sikerének titka az, hogy a teljes számítási folyamat számítógépen megvalósítható. Matematikai szempontból a lineáris szilárdsági problémák végeselemes módszerrel történő megoldása a legtöbb esetben lineáris egyenletrendszerhez vagy sajátérték-problémához vezet. Mindkét esetben a kereskedelembe kapható szoftverek hatékony numerikus közvetlen vagy iteratív numerikus módszereket alkalmaznak. [35]

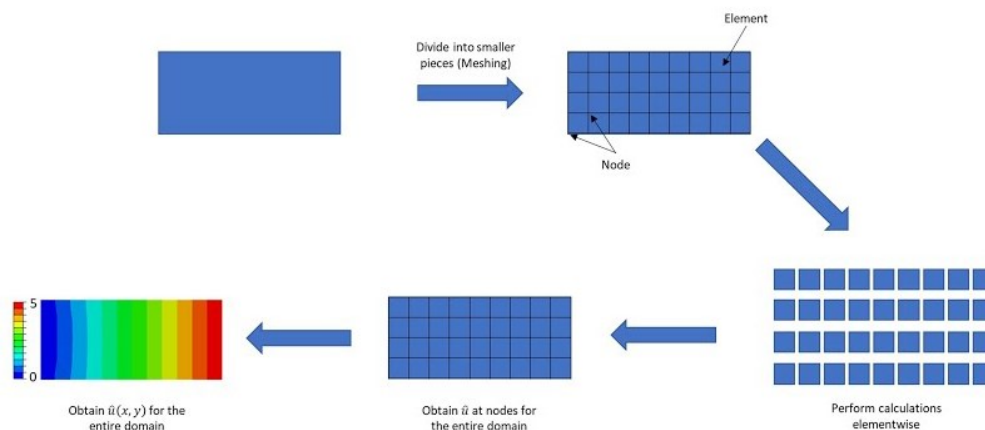


Figure 32 A végelem módszer alapjai [35]

Az előfeldolgozási fázisban a cél a végelem-háló létrehozása, valamint a peremfeltételek és az anyagminőségek meghatározása.

3.5.7.1. Diszkretizáció

A FEM szimuláció első lépése a CAD modell importálása az előfeldolgozó szoftverbe. A modell importálása után a számítógép igyekszik leegyszerűsíteni a geometria számítás szempontjából nem releváns részleteit, és kijavítani az adatkonverzió során felmerülő hibákat.

Ezek a hibák általában a szomszédos felületek vagy görbék több ponton való összekapcsolásának hiánya, amelyeket ki kell javítani, mert különben a szomszédos elemek nem kapcsolódnának össze az adott ponton. A következő lépés a geometria diszkretizálása (elemekre bontása).

A végeselemes háló létrehozását egy döntési fázisnak kell megelőznie, amelyben meghatározásra kerül, hogy az adott elemzéshez és modellhez milyen típusú hálóra van szükség. Különböző típusú elemeket választhatók, amelyek lehetnek 1D (beam), 2D (shell) vagy 3D (solid) elemek. Az elemtípusok alakjából következő tulajdonság az elemhez tartozó csomópontok száma, mivel a csomópontok az elem sarkaiban helyezkednek el. Ha az elemzés jellege megkívánja, a sarkok közötti élek mentén további csomópontok helyezhetők el, így a közelítés pontosabb lehet. A Figure 33 a különböző elemtípusokat mutatja alak és foksám szerint csoportosítva.

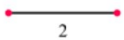
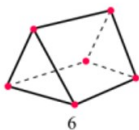
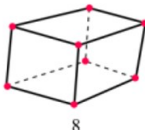
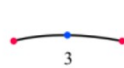
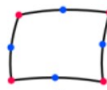
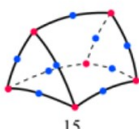
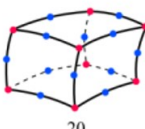
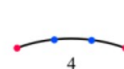
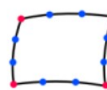
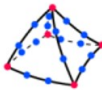
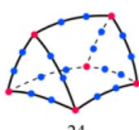
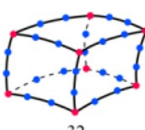
	1D	2D	(2 DoF/Node)	3D	(3 DoF/Node)		
	Line	Triangle	Quadrilateral	Tetrahedron	Piramid	Pentahedral Prism, Wedge	Hexahedron
Linear	 2	 3	 4	 4	 5	 6	 8
Quadratic	 3	 6	 8	 10	 13	 15	 20
Cubic	 4	 9	 12	 16	 21	 24	 32

Figure 33 Elemtípusok alak és közelítő polinomfok szerint [17]

Azt, hogy a végeselemes modell felépítéséhez milyen típusú elemet szükséges használni, a geometria típusa (felület vagy szilárd test), illetve az elemzés célja határozza meg.

Vannak további (gyakran solver-specifikus) elemtípusok, amelyek egyszerűsítik az egyes alkatrészek egymáshoz való viszonyát és a szabványos gépelemek modellezését. Ilyen például a merev elem, amely általában a modell különálló részeinek, pl. csavarkötéseknek a helyettesítésére vagy a peremfeltételek meghatározására használható. A merev elem egy központi független csomóponthoz kapcsolódó függő csomópontok rendszere, amely a függő és független csomópontok relatív elmozdulásának meghatározására használható.

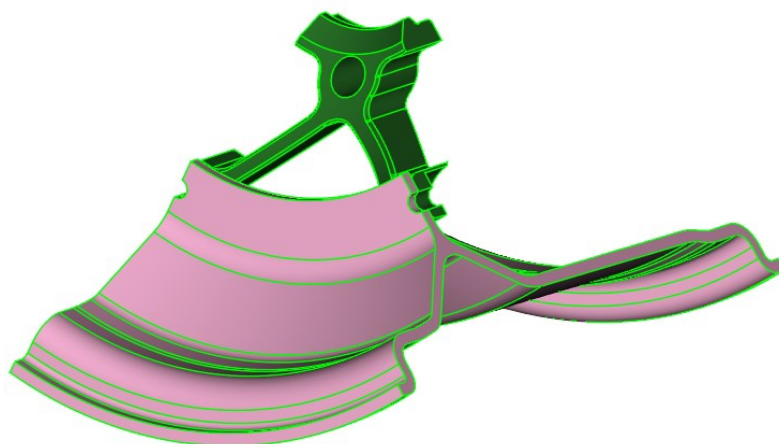


Figure 34 CAD modell preproceszáshoz

A perem előfeldolgozása a CAD modell 1/6-os részének STEP formátumú importálásával kezdődött. Tekintettel a felni több tengelyen átívelő szimmetriájára, elegendő volt csak ezt a részt behálózni, így időt takarítottam meg, és csökkentettem a behálózási hibák valószínűségét. A peremet első rendű shell elemekkel modelleztem, amelyeket a CAD modell felületei közötti

középfelületen határoztam meg. A szimulációkhoz szükséges optimális elemméret meghatározásához elemméret-elemzést végeztem, a modell méretei alapján 4 mm-es, 2 mm-es és 1 mm-es méreteket választva.

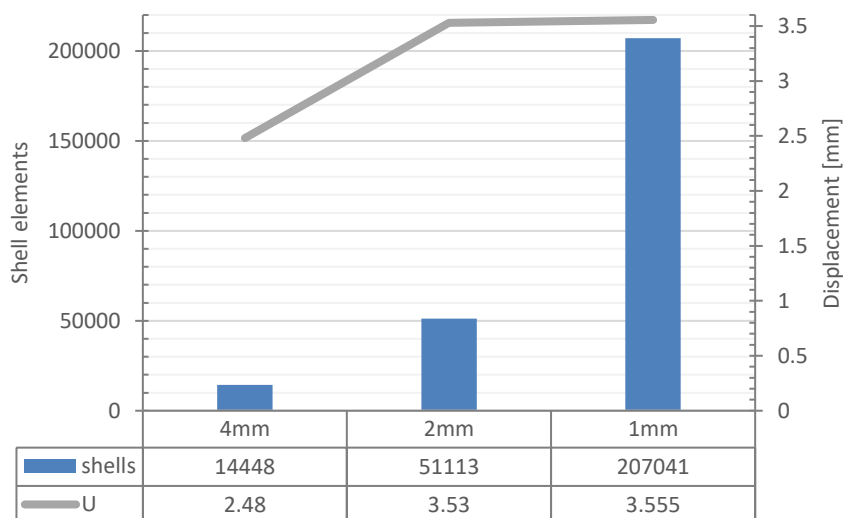


Table 9 Elem méret analízis

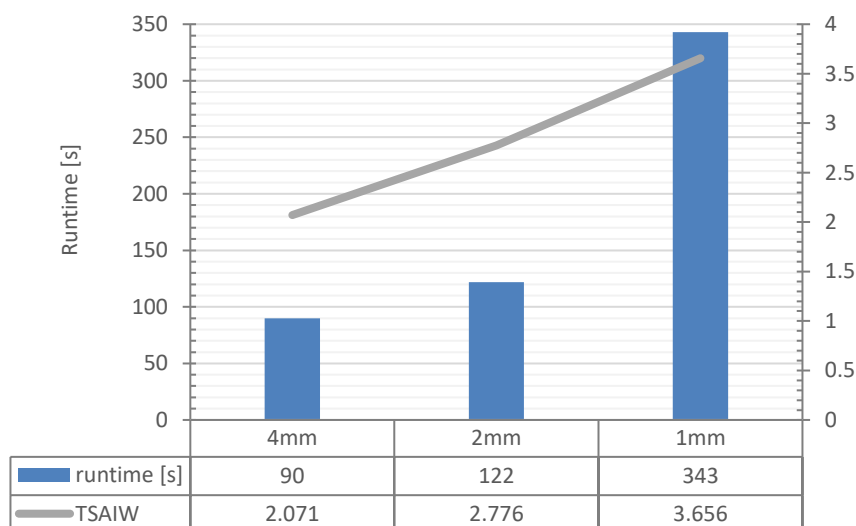


Table 10 Futásidő analízis

A kezdeti eredmények alapján a 2 mm-es elemméret tűnt az optimális választásnak. A perem és a center közötti csatlakozó felületeken azonban még kiterjedt optimalizálás mellett is a nagy éltérhelés pontatlanságot okozott az eredményekben. Így alakult ki az ideális beállítás: 1 mm-es elemméret használata a felni középső területein és 2 mm-es a többi geometria esetében. Sajnos egy ismeretlen hiba megakadályozta a szimulációs futtatások befejezését ezzel a vegyes elemmérettel. A probléma megoldása érdekében a teljes felnit egységes 1 mm-es elemmérettel hálóztam be, ami végül kielégítő eredményeket hozott.

A kerék közepét első rendű tetraelemekkel modelleztem. Mivel a középpont nem áll e

dolgozat középpontjában, nem volt szükség nagy részletességre a modelljében. A 2 mm-es elemméretet a kisebb elemszám és a még mindig nagy pontosság miatt választottam, korábbi FEM tapasztalataim alapján. [2]

A hálózási folyamatot követően a peremet kezdetben három részre bontottam, majd a végső rétegezéshez hatra bővítettem, és mindegyikhez egyedi tulajdonságazonosítót (Property ID, PID) rendeltem. Ezek az azonosítók tartalmazták a korábban meghatározott anyagkártyákat, és megadták a kompozit rétegek számát és sorrendjét.

A végső hálózási lépés során a hálózott szekciót az X tengely mentén ötször kellett megismételni a teljes kerék felépítéséhez. Az előre beállított PIDek lehetővé tették e szakaszok problémamentes összekapcsolását, így azok kezdetől fogva egységes alkatrészként működtek.

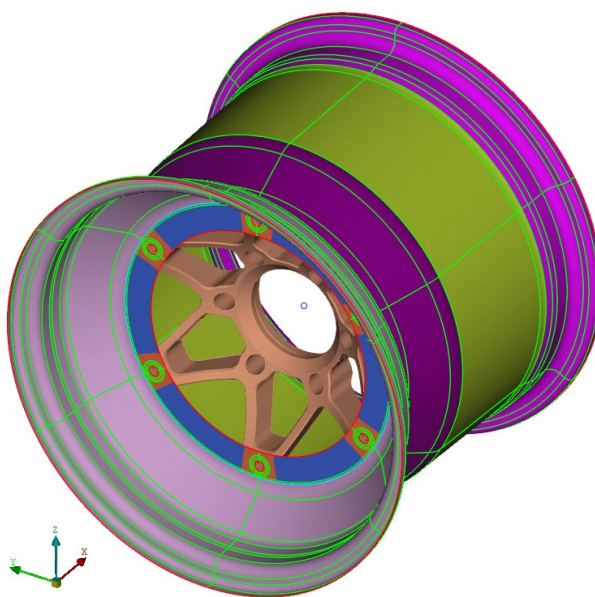


Figure 35 A kész behálózott modell

3.5.7.2. Perem feltételek

A következő lépés a peremfeltételek konfigurálása. A peremfeltételek meghatározásakor szokás a terhelések, megfogások, kényszerek és az alkatrészek közötti kapcsolatok meghatározása. A mechanikai terhelések lehetnek koncentrált erők és nyomatékok, felületi és térfogati eloszlású terhelések. A kényszerek lehetnek rögzítettek, rugalmasak, elmozdulások és elfordulások egy vagy valamennyi koordinátáirányban. Az alkatrészek közötti kapcsolatokat (érintkezés, tapadás stb.) meghatározó kényszerek is.

Mivel a szimulációkban csak két alkatrész van jelen, egyetlen kapcsolatot határoztam meg a felni és a kerék középpontja közötti kapcsolat ábrázolására. Ez a kapcsolat M6-os csavarokat, anyákat és alátéteket szimulál, amelyek rögzítik az alkatrészeket, és megakadályozzák a két felület közötti relatív mozgást vagy forgást. A modellben lévő kis rés abból adódik, hogy a

héjelemek a felni elméleti felületeinek középsíkja mentén helyezkednek el. Egy háromdimenziós elemeket használó modellben a két alkatrész ugyanúgy illeszkedne egymáshoz, mint a valóságban.

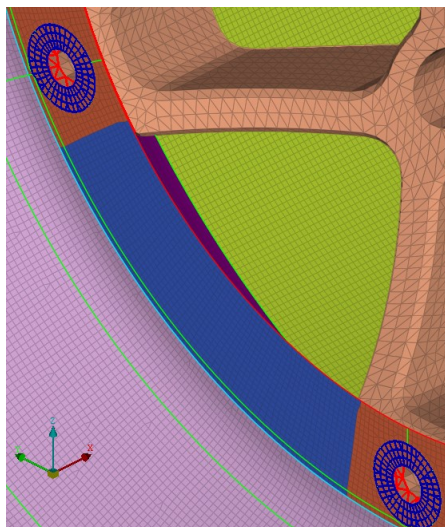


Figure 36 Kényszer a felni (kék) és a center (piros) között

A terhelések a 3.3. fejezetben kerültek részletes bemutatásra. Az érintkezési felületről származó terhelést és a nyomásterhelést ugyanazokban a szimulációkban használtam. A nyomatékterhelés esetét külön szimuláltam, mivel más peremfeltételeket használtam.

A felni szimulációjánál a fő kényszer a kerék centerére vonatkozott. Ez a center a kerékagyhoz való kapcsolódását modellezi a kerékcsapokon keresztül. A teljesen rögzített kényszer a kerék tengelyének egy pontján (B) van érvényben. A B pont többpontos kényszerekkel (multi point constraint, MPC) kapcsolódik a centerhez ugyanazokon a csatlakozó felületeken, mint amelyeken a valós center a kerékagyhoz csatlakozik. A nyomatékterhelés eset szimulációjához a terhelést a B pontra, a kényszert pedig az érintkezési felületet jelképező csomópontra helyeztük.

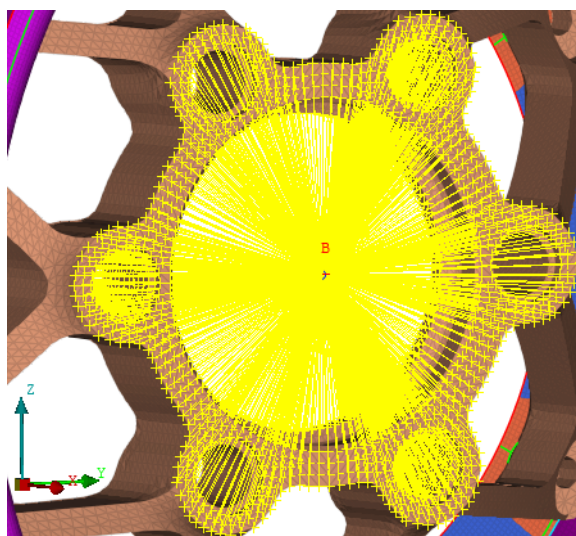


Figure 37 MPC-k a centerre helyezve

3.5.7.3. Eredmény vizsgálat

A szimulációkat követően az eredményeket vizualizálták, a kompozit rétegek értékelése a tönkremeneteli tényezőre összpontosított, amint azt a 2.7. fejezet részletesen tárgyalja. Az elemzés a klasszikus Tsai-Wu tönkremeneteli kritériumot használta, amely a kompozit szerkezet meghatározott pontjain határozza meg a tönkremeneteli állapotot, amelyet egy 0-tól 1-ig terjedő skálán ábrázol. Amint korábban említettem, a cél biztonsági tényező 1,2 volt, ami 0,833-as Tsai-Wu tönkremeneteli tényezőnek felel meg. A végső rétegre vonatkozó tönkremeneteli tényező eloszlása kombinált terhelési körülmények között a következő:

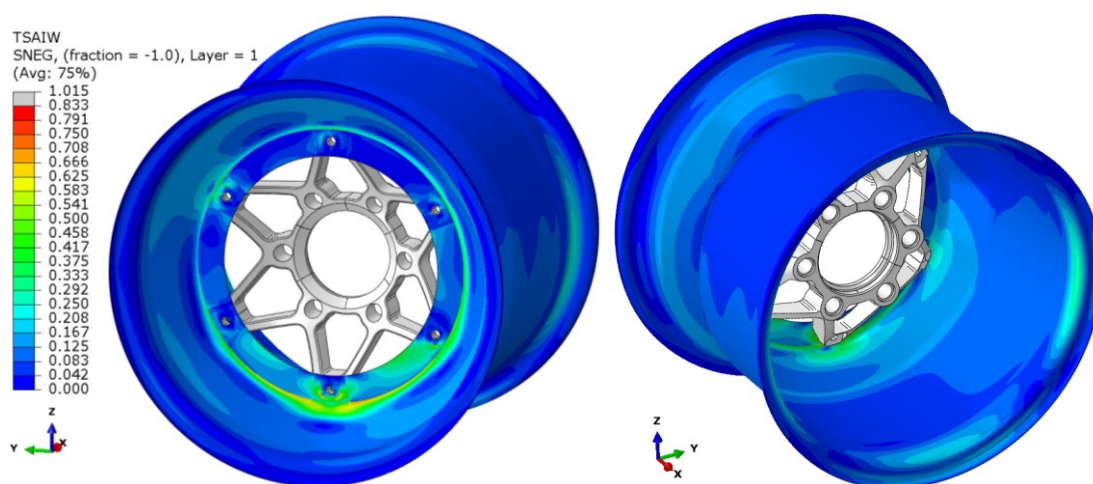


Figure 38 A tönkremeneteli tényező eloszlása a végső rétegre kombinált terhelési esetére

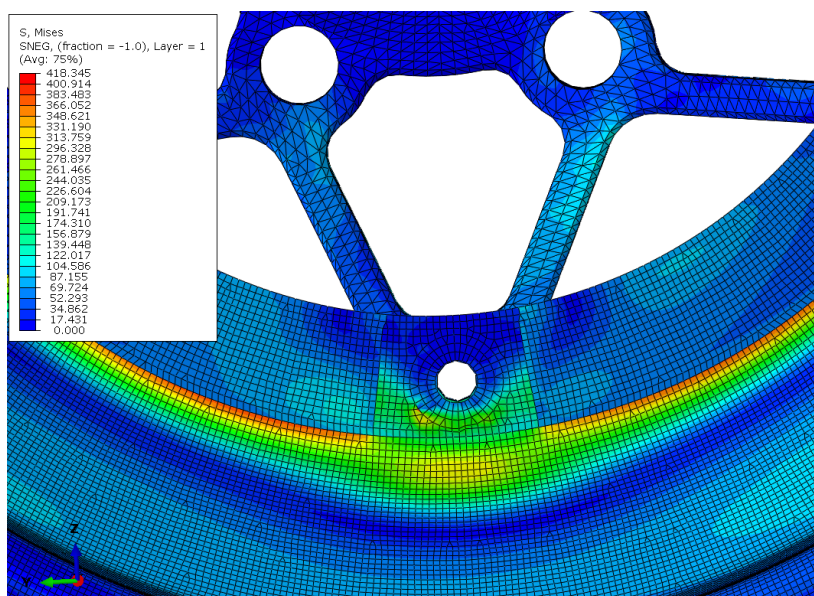


Figure 39 A legnagyobb feszültség eloszlása a felhőn

Amint a Figure 38-on látható, a peremnél a tönkremeneteli tényező legmagasabb értéke 1,015, de ez csak egy peremfeszültség-csúcs. Ez a feszültségcsúcs egy héjelem peremén helyezkedik el, ami nagyságrendekkel magasabb, mint a környező elemek feszültségértékei.

Ezekben az esetekben figyelmen kívül hagyhatjuk ezeket az elemeket, mivel a feszültségértékek az egyes csomópontokban nem monoton konvergenciát mutatnak, hanem inkább oszcillálnak. Hasonló feszültségcsúcsok általában torzított elemekben keletkeznek, vagy ahol rögzített kényszereket alkalmazunk egy él mentén. A Figure 40 szemlélteti ezeket a feszültségcsúcsokat, amelyek kizárása megerősíti, hogy a meghibásodási tényező jóval a 0,833-as határérték alatt marad.

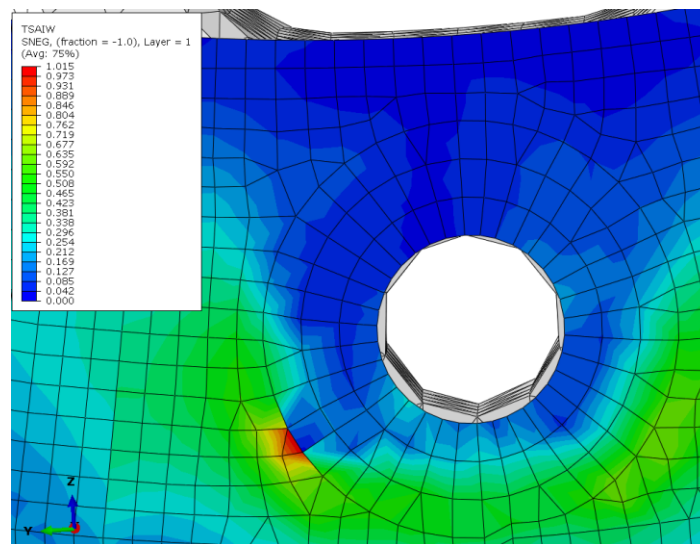


Figure 40 Feszültségcsúcs

A felni globális elmozdulása a kombinált terhelés esetén elérte a 2,763 mm-t, ami a 3 mm-es célhatáron belül maradt. Figyelemre méltó, hogy ez a maximális elmozdulás a felni szélénél következik be, míg a felfüggesztés kritikus alkatrészei, amelyek potenciálisan érintkezhetnek a felnival, beljebb helyezkednek el, ahol az elmozdulás értékei lényegesen alacsonyabbak, ahogy azt a Figure 41 is mutatja.

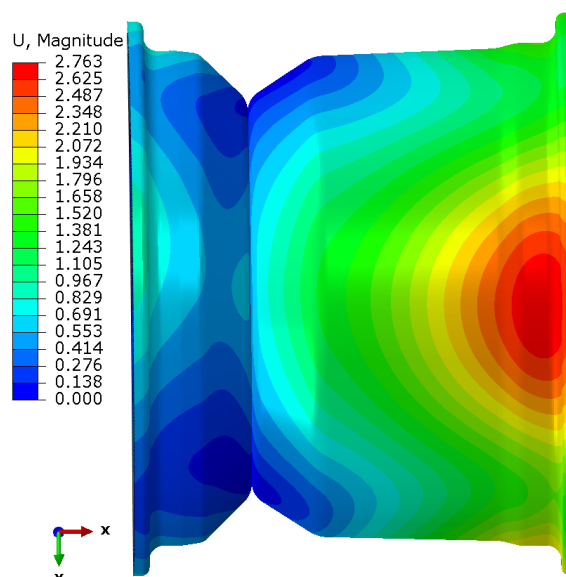


Figure 41 Globális elmozdulás a kombinált terhelés esetén

A nyomatékterhelés esetében a tönkremeneteli tényező 0,796 volt, hasonló megoszlással (Figure 42).

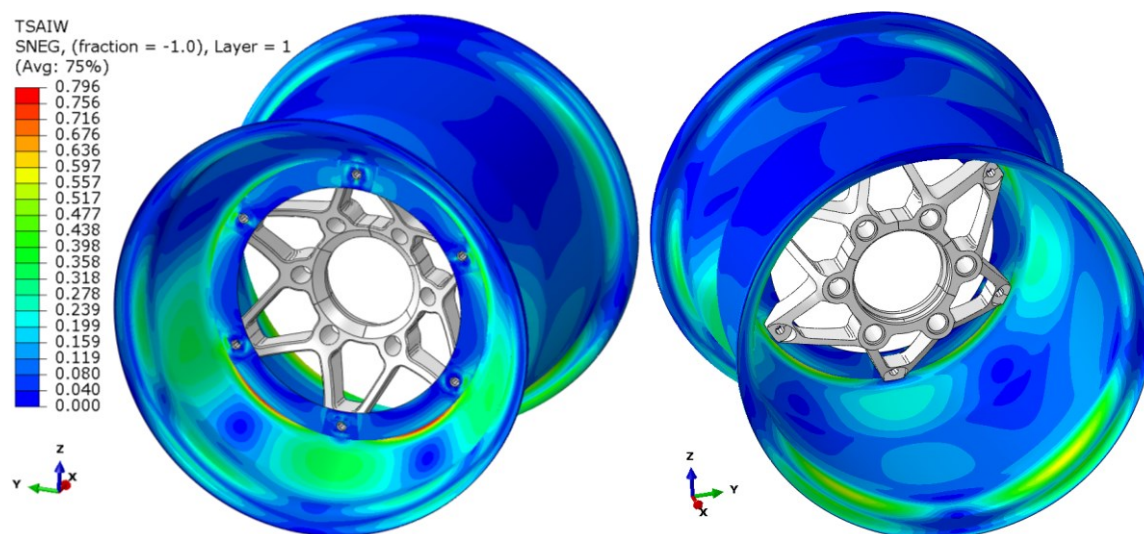


Figure 42 Globális elmozdulás a nyomtakékterhelés esetén

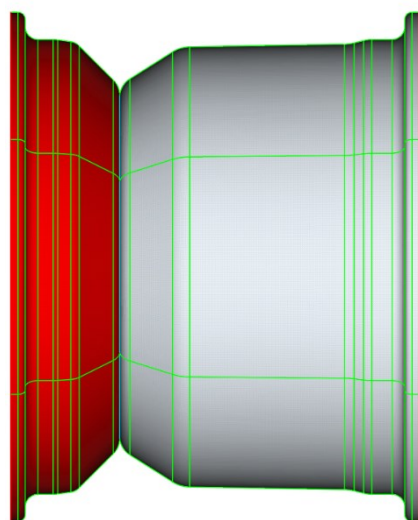
3.5.8. Végző rétegrend

A rétegrend kialakítása döntő fontosságú lépés a tervezési folyamatban, különösen a kompozit anyagok esetében, ahol a szükséges merevség és szilárdság elérése minimális tömeg mellett nagymértékben függ a rétegek elrendezésétől. Az alábbiakban bemutatott elrendezés kiterjedt szimulációs alapú tapasztalatok eredménye. A kompozitok egyik legfontosabb előnye a réteges szerkezeti felépítés, amely a szálak hatékony orientálásával lehetővé teszi a merevség optimalizálását. A helyes orientáció még azonos rétegszám mellett is nagyobb merevséget eredményezhet, ezért lényeges a rétegek orientációjának értékelése minden egyes iterációban.

Megvizsgáltam, hogy az anyag típusa hogyan befolyásolja a feszültségeket és elmozdulásokat 0° 30° 45° 60° 90° orientációs beállítások esetén. A vizsgálatok azt mutatták, hogy az UD rétegek jelentősen csökkentik a maximális elmozdulást a kivételes szálmerevségi tulajdonságaiknak köszönhetően. Az UD anyagok azonban kihívásokkal is járnak: az alapanyagban az egyetlen mechanikai irányból eredő szálzsugorodás megnehezíti a hajlítást az alkalmazás során. Ez a tulajdonság gondos kezelést igényel a rétegezési folyamat során az alkatrész minőségének megőrzése érdekében. Ezzel szemben a twill szövet nagyobb rugalmasságot és könnyű alkalmazhatóságot kínál a gyártás során, ami leegyszerűsíti a minőségi követelmények betartását.

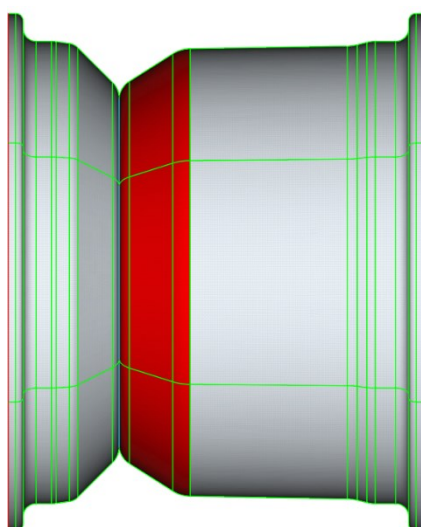
Korábbi projektek és szimulációs eredmények alapján optimalizált rétegszerkezeteket dolgoztam ki a 6 peremszelvényhez, amelyeket a Figure 43, Figure 44, Figure 45, Figure 46, Figure 47, Figure 48 részletez. Ez az elrendezés mind a Twill, mind az UD anyagokat magában

foglalja, kihasználva mindkettő erősségeit a tervezési követelmények hatékony teljesítése érdekében.



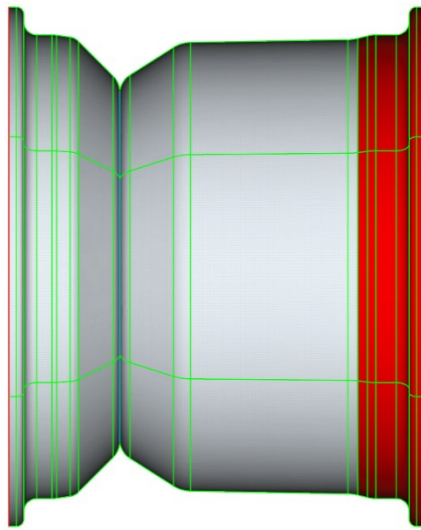
Rim outer	
Layer	Type
1	Twill 0
2	Twill 45
3	Twill 0
4	Twill 45
5	UD 0
6	Twill 0
7	Twill 45
8	Twill 0
9	Twill 45

Figure 43 Rim outer szekció rétegrendje



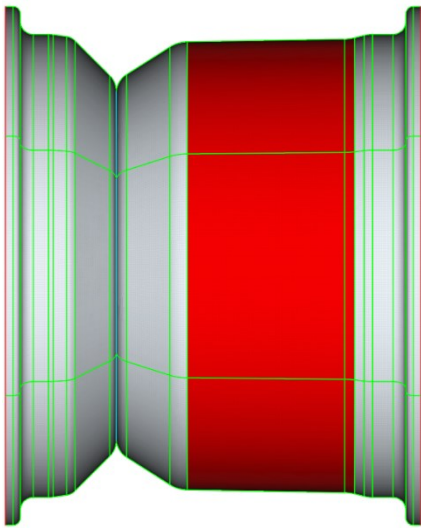
Rim inner1	
Layer	Type
1	Twill 0
2	Twill 45
3	Twill 0
4	Twill 45
5	UD 90
6	UD 0
7	UD 90
8	Twill 45
9	Twill 0
10	Twill 45
11	Twill 0

Figure 44 Rim inner 1 szekció rétegrendje



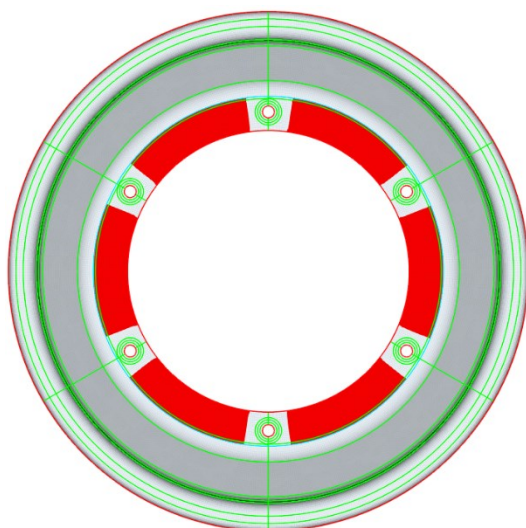
Rim inner3	
Layer	Type
1	Twill 0
2	Twill 45
3	Twill 0
4	Twill 45
5	UD 90
6	UD 0
7	UD 90
8	Twill 45
9	Twill 0
10	Twill 45
11	Twill 0

Figure 45 Rim inner 3 szekció rétegtrendje



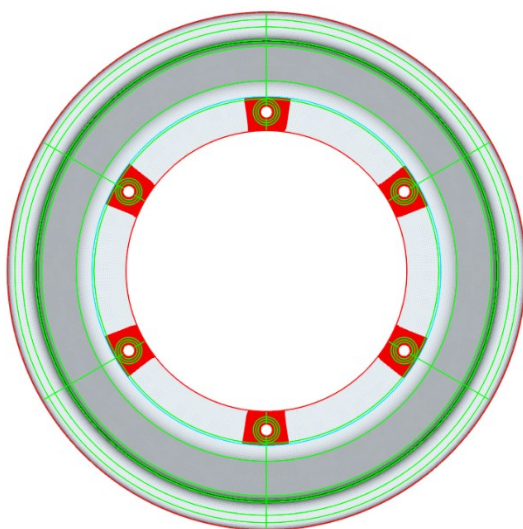
Rim inner2	
Layer	Type
1	Twill 0
2	Twill 45
3	Twill 0
4	Twill 45
5	UD +45
6	UD 0
7	UD -45
8	Twill 45
9	Twill 0
10	Twill 45
11	Twill 0

Figure 46 Rim inner 2 szekció rétegtrendje



Rim center1	
Layer	Type
1	Twill 0
2	Twill 45
3	Twill 0
4	Twill 45
5	Twill 0
6	Twill 45
7	Twill 0
8	Twill 45
9	Twill 0
10	Twill 45

Figure 47 Rim center 1 szekció rétegrendje



Rim center1	
Layer	Type
1	Twill 0
2	Twill 45
3	Twill 0
4	Twill 45
5	Twill 0
6	Twill 45
7	Twill 0
8	Twill 45
9	Twill 0
10	Twill 45
11	Twill 0
12	Twill 45
13	Twill 0
14	Twill 45
15	Twill 0
16	Twill 45
17	Twill 0
18	Twill 45
19	Twill 0
20	Twill 45
21	Twill 0
22	Twill 45

Figure 48 Rim center 2 szekció rétegrendje

A laminált szerkezet tervezésekor a szimmetria kulcsfontosságú szempont volt, hogy az alkatrész hatékonyan tudja kezelni az összetett terhelési helyzeteket, például a fékezés közbeni kanyarodást vagy a gyorsítás közbeni kanyarodást. A rétegek sorrendjét gondosan úgy alakítottam ki, hogy a felni és az abroncs felfekvő felülete közötti érintkezési felületeket szerkezetileg a középső részbe integráltak. A szálak folytonosságának fenntartása érdekében stratégiaileg átfedéseket építettem be, ami fokozza az alkatrész tartósságát.



Figure 49 A végső kerék összeállítás

A prepreg anyagok adatlapja és a csapat korábbi, kompozit alkatrészekkel kapcsolatos tapasztalatai alapján kiszámítottam a végleges kerék tömegét. Ez körülbelül 850 gramm, ami 35%-os tömegcsökkenést jelent az alumínium felnikhez és 15%-os tömegcsökkenést a korábbi CFRP felnikhez képest.

Felni+Center+Csavarok		Kül.
Keizer	2200	41%
OZ Racing Magnesium	1660	22%
ART_09/X	1600	19%
ART_11	1300	-

Table 11 Az új CFRP feni tömege a a korábban használtakkal összehasonlítva

4. Lehetséges jövőbeni fejlesztések

A következő cél természetesen a gyártás és a nemzetközi versenyeken való részvétel. Ahhoz, hogy a jövőben jobb kerekeket tervezhessünk, pontosabb adatokra van szükség a terhelésekről. Ehhez nagyszerű eszköz a korábban említett felfüggesztés nyúlásmérős mérése. Megfelelő validálással ezek a mérések valós betekintést nyújthatnak a felfüggesztésre különböző terhelési esetekben ható erőkbe, növelve a jövőbeli tervezési pontosságot.

Az pre-processor és a FEM szoftver mélyebb megértése szintén lehetővé tenné az optimalizált szimulációkat. Bár az ebben a dolgozatban alkalmazott módszerek hatékonyak voltak, finomításukkal csökkenthetők vagy kiküszöbölhetők a mechanikai feszültségcsúcsok, ami tovább javítaná a tervezést.

A különböző prepreg kompozit anyagok vizsgálata szintén javulást eredményezhetne a merevség vagy a tömegcsökkentés terén, növelve ezzel is a teljesítményt. Emellett a versenyautó monocoque-jában használt anyagokhoz hasonló maganyagok integrálása további innovációs lehetőségeket biztosíthatna, potenciálisan növelve a merevséget anélkül, hogy jelentősen növelné a tömeget.

5. Összegzés

A dolgozat célja a legújabb tervezési és szimulációs eszközök felhasználásával egy Formula Student versenyekre optimalizált kerék összeállítás tervezése és eredményei bemutatása. A versenytársak elemzésének elvégzése értékes betekintést nyújtott a Formula Student-ben létező megoldásokba, ami a tervezéshez nyújtott információt és javította azt. E folyamat révén fejlett alkalmazásokat tudtam alkalmazni az alkatrész optimalizálásához, az ortotróp kompozit anyagok egyedi jellemzőire és alkalmazására összpontosítva. A végső összeállítás teljesítette az összes meghatározott tervezési kritériumot, beleértve a biztonságos működést, a tömegcsökkentést és a merevséget, ami végül 15%-os tömegcsökkentést eredményezett a tavalyi modellhez képest. Ez a javulás jelentősen javítja az autó kezelhetőségét.

A műszaki fókuszon túl a dolgozat célja az is, hogy tervezési irányelveket állítson fel az Arrabona Racing Team jövőbeli tagjai számára, támogatva ezzel a csapat folyamatos sikerét. A Formula Student közösség részese lenni egyedülálló élmény volt, amely lehetővé teszi a fiatal mérnökök számára, hogy tudásukat és szenvedélyüket egy olyan jármű tervezésébe és építésébe fektessék, amely folyamatosan fejlődik a nemzetközi versenyeken a szakemberek visszajelzései által. A projekt során szerzett tapasztalataim rendkívül hasznosak voltak, és ez az én végső hozzájárulásom az Arrabona Racing Team folyamatos fejlődéséhez.

6. Források

- [1] "Arrabona Racing Team," Arrabona Racing Team, [Online]. Available: www.arrabonaracing.hu. [Accessed 29. August 2024].
- [2] D. Bársony, „Wheel center design of a Formula,” Széchenyi István Egyetem, Győr, 2022.
- [3] “Szengine - About us,” Szengine, [Online]. Available: <https://szengine.hu/>. [Accessed 29 August 2024].
- [4] S. Sabhadiya, „The 15 Basic Parts of a Wheel on a Car with Diagram,” The Engineering Choice, [Online]. Available: <https://www.theengineeringchoice.com/car-wheel-parts/>. [Hozzáférés dátuma: 28 August 2024].
- [5] „Summit Racing Equipment,” Summit Racing Equipment, [Online]. Available: https://help.summitracing.com/app/answers/detail/a_id/4640/~/-wheel-materials-%26-construction. [Hozzáférés dátuma: 23 august 2024].
- [6] S. B. N., M. P. and G. N. S., “Design and Analysis of Wheel Rim using CATIA & ANSYS,” *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, vol. 2, no. 8, pp. 14-20, 2013..
- [7] A. Speed, „Apex Speed,” Apex Speed, [Online]. Available: <https://www.apexspeed.com/forums/showthread.php?45853-Identifying-various-makes-of-steel-wheels>. [Hozzáférés dátuma: 27 August 2024].
- [8] "How Are Wheels Constructed?," TireRack, [Online]. Available: <https://www.tirerack.com/tires/tiretech/techpage.jsp?techid=90>. [Accessed 7. september 2022].
- [9] tirebuyer, „tirebuyer,” tirebuyer, [Online]. Available: <https://www.tirebuyer.com/education/what-types-of-wheels-should-i-get>. [Hozzáférés dátuma: 29 August 2025].
- [10] D. Sorrenti, “Wheel design and development for the Formula Student 2020 Race Car of The University of Nottingham,” The University of Nottingham, Nottingham, 2020.
- [11] H. Wheels, „HRE Wheels,” HRE Wheels, [Online]. Available: <https://www.hrewheels.com/wheels/concepts/hre3d>. [Hozzáférés dátuma: 1

September 2024].

- [12] Carnimal, „Koenigsegg Carbon-Fiber Wheels Are A Technological Masterpiece,” Carnimal, [Online]. Available: <https://carnimal.com/koenigsegg-carbon-fiber-wheels-are-a-technological-masterpiece/>. [Hozzáférés dátuma: 24 August 2024].
- [13] O. Racing, „OZ Racing wheels, Formula Student,” OZ Racing, 22 08 2024. [Online]. Available: OZ Racing. [Hozzáférés dátuma: 22 August 2024].
- [14] B. W. USA, „BRAID Sturace FSAE Wheels,” Baid Wheels USA, [Online]. Available: <https://braidusa.com/collections/sturace/products/braid-sturace-fsae-wheels-centerlock?variant=39459018932379>. [Hozzáférés dátuma: 22 August 2024].
- [15] T. Illés, „Carbon fiber racing wheel assembly design with 3D printed wheel center for Formula Student racecar,” Széchenyi István University, Győr, 2021.
- [16] P. Bhagwat, “DESIGN AND ANALYSIS OF A 10” CARBON FIBER WHEEL FOR A FORMULA SAE RACECAR,” THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, ARLINGTON, 2017.
- [17] P. Dr. Tamás, A. Bojtos, A. Décsei-Paróczi és R. T. Dr. Fekete, Végeselem módszerek, %1. kötet1., Budapest: BME MOGI, 2014.
- [18] A. Konyukhov, „Modelling of cutting with arbitrary kinematics. Special study of contact algorithms,” Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe , 2018.
- [19] M. H. Sadd, Elasticity Theory, Applications, and Numerics, %1. kötet3, Kingston, Rhode Island: Elsevier Inc., 2014.
- [20] C. Team, „Yield Strength: Stress-Strain Curve, Elastic & Ultimate Stress Point,” Collegedunia, [Online]. Available: <https://collegedunia.com/exams/yield-strength-physics-articleid-3471>. [Hozzáférés dátuma: 27 September 2024].
- [21] W. M. Taha, A.-E. M. Taha és J. Thunberg, Cyber-Physical Systems: A Model-Based Approach, %1. kötet1, Halmstad: Springer Cham, 2020, p. 187.
- [22] A. Víz, „Karbon kompozit monocoque váz és ütközés elnyelő zónájának optimalizálása,” Széchenyi István Egyetem, Győr, 2022.
- [23] Đ. M. Thanh, „ANSYS Composite PrepPost Modeling Composites the Simple Way,” ANSYS, Inc., 2013.

- [24] Á. Haász, „Design of a Commuter Bicycle with FRPC Frame Structure,” Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2013.
- [25] S. K. D. H. M. R. Salman Pervaiz, „Ecofriendly inclined drilling of carbon fiber-reinforced polymers (CFRP),” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, %1. kötet7, %1. szám8, p. 111, 2020.
- [26] „Composite lab,” Composite lab, [Online]. Available: <https://compositeslab.com/index.html>. [Hozzáférés dátuma: 23 august 2024].
- [27] Y. E. Mogahzy, *Engineering Textiles*, Auburn: Woodhead Publishing, 2009.
- [28] G. ŚLASKI, A. GUDRA and A. BOROWICZ, “ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ADDITIONAL UNSPRUNG MASS OF IN-WHEEL MOTORS ON THE COMFORT AND SAFETY OF A PASSENGER CAR,” *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, vol. 3, no. 65, pp. 51-64, 2014.
- [29] S. V. Deepak, . S. A. Hussain and C. Naresh, “MODELLING AND ANALYSIS OF ALLOY WHEEL FOR FOUR WHEELER VEHICLE,” *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 1., no. 3., pp. 72-80., october 2012.
- [30] R. B. Ś. B. L. Konieczny, „Usage of short time Fourier transform in identification of vehicle shock absorber technical conditions researched by force vibration method,” *Transport Problems* , %1. kötet3, %1. szám1, p. 4, 2009.
- [31] H. Walther, „DEVELOPMENT OF A LIGHTWEIGHT LAMINATED COMPOSITE WHEEL FOR FORMULA SAE RACE VEHICLES,” University of Kansas, Lawrence, 2016..
- [32] „Formula Student Rules 2024,” 2023. [Online]. Available: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf.
- [33] T. E. T. a. R. T. Organisation, „ETRTO,” The European Tyre and Rim Technical Organisation, [Online]. Available: <https://www.etrto.org/home>. [Hozzáférés dátuma: 30 08 2024].
- [34] D. Balogh, „Előimoregnált karbon kompozit szilárdságának tesztelése különböző túlnyomáson való gyártás után,” Széchenyi István University, Győr, 2024.

- [35] „SPARNO DINAMINIO SMŪGIO ATSPARUMO TYRIMAS,” VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS, VILNIAUS, 2022.
- [36] R. Budynas and K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 11. ed., New York: McGraw-Hill, 2019, p. 1095.
- [37] J. M. M. A. M. Po-Yu Chen, „Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs,” *Progress in Materials Science*, %1. kötet57, %1. szám8, p. 1492 – 1704, 2012.

7. Képjegyzék

FIGURE 1 AZ ARRABONA RACING TEAM TAGJAI A 2024-ES SZEZONBAN	6
FIGURE 2 JÁRMŰ KEREKÉNEK RÉSZEI [4]	6
FIGURE 3 EGY VETERÁN NYITOTT KEREKŰ VERSENYAUTÓN HASZNÁLT ACÉL VERSENYKERÉK [7]	7
FIGURE 4 ÖNTÉSI ÉS KOVÁCSOLÁSI ELJÁRÁSOK A KERÉKGYÁRTÁSBAN [9]	8
FIGURE 5 FORMULA 1-BEN HASZNÁLT MAGNÉZIUM FELNI [10]	8
FIGURE 6 2 RÉSZES KERÉKTÁRCSA 3D NYOMTATOTT TITÁN CENTERREL ÉS CFRP KÜLSŐVEL [11]	9
FIGURE 7 A KOENIGSEGG REGERA EGY RÉSZES, CFRP KERÉKTÁRCSÁJA [12]	9
FIGURE 8 A FORMULA STUDENT-BEN GYAKRAN HASZNÁLT KERÉKKIALAKÍTÁSOK [2]	11
FIGURE 9 HIBRID CFRP KERÉK ÉS ANNAK LAMINÁLÓ SZERSZÁMJA	12
FIGURE 10 IZOTRÓP, ORTOTRÓP ÉS ANIZOTRÓP ANYAGOK ALAKVÁLTOZÁSA [18]	13
FIGURE 11 FESZÜLTSG-ALAKVÁLTOZÁS DIAGRAM [20]	14
FIGURE 12 HOOKE TÖRVÉNY VIZUALIZÁCIÓJA [21]	15
FIGURE 13 STRESSES OF A LAYER IN THE COORDINATE SYSTEM OF THE PRINCIPAL MATERIAL DIRECTIONS [22]	17
FIGURE 14 KOMPOZIT HIBA TÍPUSOK [25]	18
FIGURE 15 HOSSZÚSZÁLERŐSÍTETT KOMPOZIT ANYAG [23]	20
FIGURE 16 SZÖVÉSI TÍPUSOK [27]	21
FIGURE 17 RUGÓZOTT (A) ÉS RUGÓZATLAN (B) TÖMEG EGY ELSŐ KERÉK MEGHAJTÁSÚ KÖZÚTI JÁRMŰVÖN [30]	22
FIGURE 18 ITERATÍV TERVEZÉSI FOLYAMATÁBRA [2]	23
FIGURE 19 AZ ELSŐ (BAL) ÉS A HÁTSÓ (JOBBS) KERÉK ÖSSZEÁLLÍTÁSOK	25
FIGURE 20 A KERÉKTALPPONT TERHELÉSE RÁADVA A KERÉKRE	27
FIGURE 21 TORQUE LOAD APPLIED ON THE WHEEL CENTER	28
FIGURE 22 HŐMÉRSÉKLET MÉRÉSEK A KERÉKEN ÉS AZ ELSŐ TENGYELÉN [15]	29
FIGURE 23 A KORÁBBAN HASZNÁLT FELNIK MÉRETEI: 1. RIM WIDTH 7,25” – 184,15 MM, 2. PITCH CIRCLE DIAMETER (P.C.D.) 171,2 MM, 3. WHEEL RIM DIAMETER 10” – 254 MM, 4. FLANGE DIAMETER 274 MM,	

5. ET NUMBER (EINPRESSTIEFE) [15]	29
FIGURE 24 ETRTO SZABVÁNYOS MÉRETEK [33]	30
FIGURE 25 COMPARISON BETWEEN THE KEIZER (BLUE) AND THE NEW CFRP (RED) GEOMETRY	31
FIGURE 26 MINIMUM DISTANCE BETWEEN THE RIMS AND THE FRONT (LEFT) AND REAR (RIGHT) BRAKE CALLIPERS	32
FIGURE 27 A SZAKÍTÓVIZSGÁLÓ GÉP A PRÓBADARABBAL [34]	33
FIGURE 28 EGY RÉTEG FESZÜLTSGEI A FŐ ANYAGIRÁNYOK KOORDINÁTARENDszerÉBEN [22]	34
FIGURE 29 UNIDIREKCIÓNÁLIS (FENT) ÉS TWILL (LENT) SZAKÍTÓ PRÓBATESTEK [22]	35
FIGURE 30 TWILL SZAKÍTÓ PRÓBA EREDMÉNY [34]	36
FIGURE 31 UD SZAKÍTÓ PRÓBA EREDMÉNY [34]	36
FIGURE 32 A VÉGESELEM MÓDSZER ALAPJAI [35]	39
FIGURE 33 ELEM TÍPUSOK ALAK ÉS KÖZELÍTŐ POLINOMFOK SZERINT [17]	40
FIGURE 34 CAD MODELL PREPROCESSÁLÁSHOZ	40
FIGURE 35 A KÉSZ BEHÁLÓZOTT MODELL	42
FIGURE 36 KÉNYSZER A FELNI (KÉK) ÉS A CENTER (PIROS) KÖZÖTT	43
FIGURE 37 MPC-K A CENTERRE HELYEZVE	43
FIGURE 38 A TÖNKREMENTELI TÉNYEZŐ ELOSZLÁSA A VÉGSŐ RÉTEGREND KOMBINÁLT TERHELÉSI ESETÉRE	44
FIGURE 39 A LEGNAGYOBB FELSZÜLTSG ELOSZLÁS A FELNIN	44
FIGURE 40 FESZÜLTSGCSÚCS	45
FIGURE 41 GLOBÁLIS ELMOZDULÁS A KOMBINÁLT TERHELÉS ESETÉN	45
FIGURE 42 GLOBÁLIS ELMOZDULÁS A NYOMTAKÉKTERHELÉS ESETÉN	46
FIGURE 43 RIM OUTER SZEKCIO RÉTEGRENDJE	47
FIGURE 44 RIM INNER 1 SZEKCIO RÉTEGRENDJE	47
FIGURE 45 RIM INNER 3 SZEKCIO RÉTEGRENDJE	48
FIGURE 46 RIM INNER 2 SZEKCIO RÉTEGRENDJE	48
FIGURE 47 RIM CENTER 1 SZEKCIO RÉTEGRENDJE	49
FIGURE 48 RIM CENTER 2 SZEKCIO RÉTEGRENDJE	49
FIGURE 49 A VÉGSŐ KERÉK ÖSSZEÁLLÍTÁS	50

8. Táblázatjegyzék

TABLE 1 A FORMULA STUDENT VERSENYEN ELÉRHETŐ PONTOK BONTÁSA [2]	5
TABLE 2 A KERÉKTALPPONTRA HATÓ ERŐK	26
TABLE 3 A SZIMULÁLT ÉS A RÖGZÍTETT GYORSULÁSI CSÚCSÉRTÉKEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	27
TABLE 4 EGY 8" FELNI MÉRETEI [33]	30
TABLE 5 TWILL SZAKÍTÓ PRÓBA EREDMÉNY [34]	36
TABLE 6 UD SZAKÍTÓ PRÓBA EREDMÉNY [34]	37
TABLE 7 TWILL PREPREG KARBON KOMPOZIT ANYAGKÁRTYA [34]	38

TABLE 8 UD PREPREG KARBON KOMPOZIT ANYAGKÁRTYA [34]	38
TABLE 9 ELEM MÉRET ANALÍZIS	41
TABLE 10 FUTÁSIDŐ ANALÍZIS	41
TABLE 11 AZ ÚJ CFRP FENI TÖMEGE A A KORÁBBAN HASZNÁLTAKKAL ÖSSZEHASONLÍTVA	50