



SZÉCHENYI
ISTVÁN
EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI, INFORMATIKAI ÉS
VILLAMOSMÉRNÖKI KAR



**KÖZÚTI &
VASÚTI**
JÁRMŰVEK
TANSZÉK

SZAKDOLGOZAT

Karosszéria fejlesztés

Lakatos Richárd

**Gépészmérnöki BSc szak
Járműgépész**

2015

Feladatkiírás

Hallgató adatai:

név: Lakatos Richárd
szak: Gépészmérnök BSc
specializáció: Járműgépész

Neptun-kód: I3H80U

Cím: Karosszéria fejlesztés

Feladatok leírása:

- Irodalom áttekintés (testek áramló közegben való viselkedése)
- Versenyszabályzatnak való megfelelés, befoglaló méretekre tekintve karosszéria megalkotása.
- Virtuális szélcsatornában (CFD) áramlástani szimulációk alkalmazására. (Fejlesztés közben folyamatos gyors vizsgálatok (Autodesk Flow Design), nagyobb mérföldköveknél való precízebb vizsgálat (Autodesk Simulation CFD).
- Gyártáshoz való anyagok kiválasztása, rétegrend meghatározása.
- Következtetések levonása

Belső konzulens adatai:

Név: Czeglédi Dávid

Munkahely: Széchenyi István Egyetem Közúti és Vasúti Járművek Tanszék

Beosztás: Tanársegéd

Külső konzulens adatai:

Név:

Munkahely:

Beosztás:

Győr, 2015.szeptember 1.

Czeglédi Dávid, Tanársegéd

Dr. habil Lakatos István Ph.D.
egyetemi docens
tanszékvezető

Nyilatkozat

Alulírott, Lakatos Richárd (I3H80U), Gépészmérnök, BSc szakos hallgató kijelentem, hogy a Karosszéria fejlesztés című szakdolgozat feladat kidolgozása a saját munkám, abban csak a megjelölt forrásokat, és a megjelölt mértékben használtam fel, az idézés szabályainak megfelelően, a hivatkozások pontos megjelölésével.

Eredményeim saját munkán, számításokon, kutatáson, valós méréseken alapulnak, és a legjobb tudásom szerint hitelesek.

Győr, 2015.12.10

hallgató

Kivonat

Karosszéria fejlesztés

Kulcsszavak: karosszéria kialakítás, virtuális szélcsatorna, Kármán-féle örvénysor, verseny-szabályzat, CFD

Cél: Új karosszéria megalkotása és áramlástan szimulációja

A feladatot egy korszerű áramvonalas karosszéria megalkotása inspirálta. Első lépésben meg kellett határozni az új formát. A döntés meghozatalakor figyelembe kellett venni az egyes formák áramlástan tulajdonságát. Követtem Járay Pál elveit, aki megalkotta az első áramvonalas karosszériát. Az új forma először papíron került felvázolásra, majd később CAD programban felület modellezéssel alakult ki a 3D-s modell. Az első prototípus még nagyon kezdetleges lett. Ezek után bevetésre került a virtuális szélcsatorna szimuláció (CFD). Ez nagymértékben megkönnyítette a forma továbbgondolását, hogy minél kedvezőbb aerodinamikai tulajdonságai legyenek. A szimulációkban jól kivehetők a leszakadó örvények, ezek az úgynevezett Kármán-féle örvénysorok, melyek sok problémát okoznak még a nagyobb autógyáraknak is. Mindezek mellett nem szabadott figyelmen kívül hagyni a Shell Eco-marathon verseny-szabályzatának ide vonatkozó részeit, mely tartalmazza a karosszéria külső és belső befoglaló méreteit. A szabályok betartása mellett komoly feladat egy alacsony légellenállású, hatékony karosszéria megalkotása, valamint a karosszéria rétegrendjének meghatározása.

Abstract

Bodywork

Keywords: bodywork formation, virtual wind tunnel, Kármán vortex street, competition rules, CFD

Aim: Creation and fluid mechanical simulation of new bodywork

The task was inspired by creating a modern streamlined body. Firstly, we have to determine the new shape by considering the fluid mechanical characteristics of each type of construction. I have followed the principles of Pál Járai, who created the first streamlined body. First, the new design was just a paper sketch, and then the final 3D model was created by surface modelling CAD program. The first prototype was quite rudimentary. After that we applied the virtual wind-tunnel simulation (CFD). Due to CFD, we could apply parts with more favorable aerodynamical characteristics, which greatly facilitate the further design. The simulation clearly showed left behind vortices, it is the so called Kármán vortex street, which cause serious problems, even for many car manufacturers as well. In addition, we have to take into account the Shell Eco-marathon's competition rules, which contain the inner and outer dimensions of the bodywork. Besides keeping the competition rules, it's a great effort to create a low air resistance, efficient bodywork. The last step was to decide the body's layer layout.

TARTALOMJEGYZÉK

1	Bevezetés	1
2	Irodalomkutatás	3
2.1	Shell Eco-marathon versenyszabályzata	3
2.2	Versenytapasztalatok:	4
2.2.1	Green Team Twente:	4
2.2.2	Cityjoule	4
2.2.3	Roul' cagouille:	5
2.2.4	SZEnergy Team:	5
2.3	Történelmi áttekintés	6
2.4	Testek körüli áramlás	7
2.4.1	Áramvonalas testek körüli áramlás:	7
2.4.2	Tompa testek körüli áramlás:	7
2.4.3	Tompa testek leválási buboréka:	8
2.4.4	Lamináris és turbulens leválás	9
2.5	Az ideális test	10
2.6	Menetellenállás összetevői	11
2.6.1	Légellenállás komponensek	11
2.6.2	A komponensek megjelenése a járműn	12
2.7	Kerékházban történő áramlás	12
2.8	Kompozit anyagok	13
2.9	Kompozit gyártástechnológiák	14
2.9.1	Kézi laminálás	14
2.9.2	Vákuum injektálás	14
2.10	Végeselem-módszer	15
2.11	CFD alap egyenletei	15
2.11.1	A tömegmegmaradás törvénye	15
2.11.2	Lendület megmaradás törvénye	16
2.11.3	Energiamegmaradás törvénye	17
2.12	A peremfeltételek	18
3	Az optimalizált karosszéria megalkotásának lépései	19
3.1	Kerékház kialakításához szükséges számítások	19
3.2	Dúcforma vizsgálata	21
3.3	Alapsíkok felvétele	23
3.4	Kerékburkolat	24
3.4.1	Első kerék	24
3.4.2	Hátsó kerék	25
3.5	Karosszéria test optimalizálási folyamata	26
3.6	Pilótafülke	28
3.7	A különböző részegységek egyesítése	29
3.8	Felületből test alkotása	30
4	CFD szimuláció elvégzése	31
4.1	Szimuláció eredményei	32
4.1.1	Szimulációból származó tapasztalatok	33
5	A Jármű részekre osztása	35
5.1	Karosszéria merevítési terve	37
5.1.1	Tűzfal	38

5.1.2	Műszerfal	38
5.2	Szerelőnyílások	39
5.3	Belső bordázat.....	40
6	Lámpák kialakítása	41
6.1	Első lámpa kialakítása	41
6.2	Hátsólámpa formaterve	42
6.3	Design szempontok.....	42
7	Rétegrend meghatározása	43
8	Konklúzió	43

1 Bevezetés

A csapat munkájának bemutatása

A SZEenergy Team egy olyan hallgatókból álló lelkes csapat, amely alternatív hajtású járművek fejlesztésével foglalkozik. Célunk, az alternatív energiaforrások használata, illetve a környezetvédelem fontosságának hangsúlyozása, ezek felhasználási módjait fejlesztjük és népszerűsítjük. Csapatunk egy önszerveződő csoportként indult, a Közúti és Vasúti Járművek Tanszék felhívására. Egyetemünk sikereinket elismerve és felkarolva a 2009. évben megalakult Jedlik Ányos Szakkollégium tagjává nyilvánított minket, és azóta ebben a szervezeti formában működünk.

A járművekkel (járműszerkezetek, járműrendszerek, járműfenntartás, járműdiagnosztika, járműgyártás, anyagismeret, gyártástechnológiai, hő és áramlástan), környezetvédelemmel és energetikával kapcsolatos tudományterületeken tevékenykedünk.

Csapatunk 2005-ben kezdte meg munkáját, és 2008 óta versenyez a Shell Eco-marathon Europe energiatakarékossági versenyen, melyre idén is nevezünk. Eddig 5 saját járművet építettünk, és több jármű kifejlesztésében vettünk részt partnerként más egyetemekkel és vállalatokkal.

Jelenleg 22 hallgató tagunk van, közöttük megtalálhatók gépészmérnöki Bsc, mechatronikai mérnök Bsc, mérnök informatikus Bsc, villamosmérnöki Bsc, építőmérnöki Bsc és járműmérnöki Msc hallgatók is. Emellett 3 PhD hallgató is részt vesz a csapatmunkában.

A csapatnak működik egy mentor rendszere, ami annyit jelent, hogy a csapat munkája a jármű fejlesztésénél felmerülő tématerületekre van felosztva, hallgatói témavezetőkkel, akik mentorálják az újonnan felvett csapattagokat. Minden tématerületnek van egy oktatói konzulense is, akihez tudunk fordulni a felmerülő problémákkal.

Ennek köszönhetően minden tagunk a lehető leghatékonyabban és legalaposabban tanulja meg választott szakmáját, és komoly tapasztalattal rendelkezve jut ki az iparba. Egyes tervezőszoftverek, és különleges probléma megoldások miatt tanfolyamokon veszünk részt.

A munkánkat 5 tanszék támogatja, melyről 8 oktató nyújt segítséget, ezzel majdnem minden tudományterületet lefedve. Közülük kiemelten megemlítendő Dr. Varga Zoltán egyetemi docens, aki alternatív hajtású járművek fejlesztésével foglalkozik, csapatunk megalapítója és oktatói vezetője.

A 2010 évi győztes, SZEvolution nevű napelemes autónk egy olyan fejlesztési alap lett, amin

minden évben fejlesztve még évekig versenyképesek maradhatunk. Ez egy karbon-kompozit karosszériájú 7 négyzetméter napelem felülettel rendelkező jármű, mely önerőből és csak a Nap energiáját felhasználva 50 km/h-s sebességre képes. Teljesen egyedi fejlesztés, nem tartalmaz, és a versenyszabályok miatt nem is alkalmazhatnánk semmilyen közúti járműben megtalálható nagyobb részegységet, elemet.

A 2013-as fejlesztésű SZElectricity névre hallgató autónk első versenyén 7. helyezést érte el. Karbon-kompozit karosszériájú, csővázas jármű. Teljes mértékben egyedi fejlesztés, motorvezérlő, BMS, részegységek is. Nem tartalmaz semmilyen közúti járműben megtalálható nagyobb részegységet. 2014-es évben a 4. helyezést sikerült elérnünk.

2014-ben Spanyolországban Murcia-i Solar Race versenyen 1. helyezést értük el.

2013-ban Hollandiában Rotterdam Shell Eco-marathon-on a 3. helyezést értük el.

2 Irodalomkutatás

2.1 Shell Eco-marathon versenyszabályzata

„Urban concept” kategóriában indul a csapatunk. Az „urban concept” azt jelenti, hogy a járműnek közel meg kell felelnie egy közúti személygépjárműre vonatkozó szabályoknak. Például rendelkeznie kell első és hátsó fényszóróval, féklámpával, indexel, 5 pontos biztonsági övvel.

A versenyszabályzatnak, a jármű külső geometriájára vonatkozó rész a lényeges számunkra. Pontosan meghatároznak minden egyes méretet, és ezeket a gépátvételnél nagyon szigorúan ellenőrzik is.

❖ Külső befoglaló méretek:

Magassága:	1000-1300 mm
Szélessége:	1200-1300 mm
Hossza:	2200-3500 mm
Has magasság:	100 mm

❖ Tengelyek méretei:

Első nyomtáv:	1000 mm
Hátsó nyomtáv:	800 mm
Tengelytáv:	1200 mm

❖ Pilóta fülke méretei:

Magassága:	minimum 880 mm
Szélessége:	minimum 700 mm

❖ További szem előtt tartandó paraméterek:

- Ajtó méretei: az ajtón döntés és forgatás nélkül be kell férnie egy 800x500 mm hasábnak.
 - A pilótának 10 mp alatt ki kell tudnia szállni.
- El kell helyezni egy csomagot is a járműben, mely 500x400x200 mm befoglaló méretekkel rendelkezik.
- A kocs tömege nem haladhatja meg a 225 kg–ot, vezető nélkül.

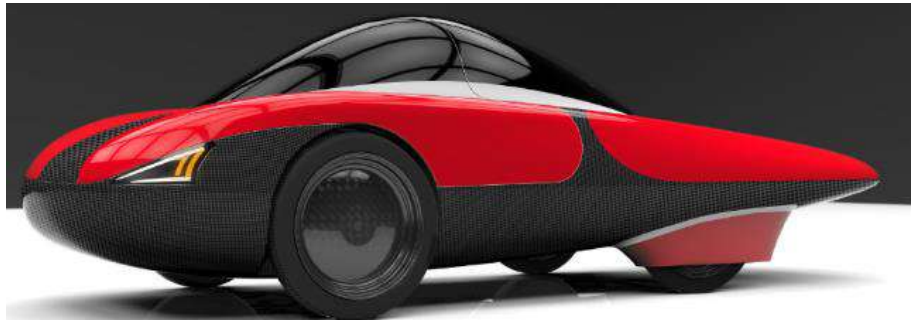
A versenyautó abroncs méretének 15-17 inch közöttinek kell lennie. Esetünkbe 16 inchet használunk és ehhez megfelelő gumibroncsot, ami megfelelő nyomásra történő felfújása során szélesebb, mint 80 mm.

2.2 Versenytapasztalatok:

A Shell Eco-marathon versenyen első helyezést elérő csapatok járműveinek tanulmányozásából az alábbi következtetésekre jutottam:

2.2.1 Green Team Twente:

Green Team Twente csapata hidrogén meghajtást alkalmaznak, melyből üzemanyagcella segítségével elektromos áramot nyernek (2.1. ábra). A karosszérián jól megfigyelhető, hogy egy darab éles él sem látható, minden le van kerekítve. Az ideális cseppformából indulhattak ki a tervezésnél, a testnél és a pilóta fülkénél is. Az első kereknél 1000mm-es nyomtáv van meghatározva, de a karosszériának minimum 1200mm szélesnek kell lennie, így a jobb légellenállás elérése érdekében megnövelték az első nyomtávot. A hátsó kerekeket is teljesen elburkolták.



2-1. ábra Green Team Twente járműve [14]

2.2.2 Cityjoule

A Cityjoule csapata is a hidrogén meghajtást választotta, ők is egy üzemanyagcellával alakítják át elektromossággá a hidrogént. Ők is az ideális cseppformából indultak ki. A Green Team Twente csapatához képest az a nagy különbség, hogy ők a hátsó kerék elburkolására más módszert használtak és a pilóta fülkét teljesen a jármű végéig kitölték.



2-2. ábra Cityjoule járműve [14]

2.2.3 Roul' cagouille:

Csapata náluk nem nagyon fedezhető fel az ideáliscsepp forma, viszont ők is figyeltek a kerek megfelelő elburkolására, látható a képeken, hogy a 100mm-es hasmagasságot is megnövelték, ezzel is javítva a légellenálláson.



2-3. ábra Roul' cagouille [14]



2-5. ábra SZEnergy Team 2013[14]



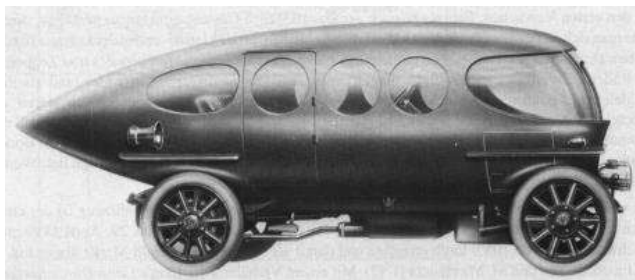
2-4. ábra SZEnergy Team 2015[14]

2.2.4 SZEnergy Team:

A Szelectricity járművünk 2013-ban épült. Immáron Három Shell eco-marathon-on és egy Solar-Race versenyen van túl. 3év alatt rengeteg fejlesztésen esett át, hogy minél jobb eredményt érjünk el a versenyeken. Első átalakításunk a karosszéria szélességének csökkentése volt az első kerek síkjaig és a fent maradó nyílások elburkolása. A 2015-ös évben a jármű kapott egy új orrkúpot, amely aerodinamikát javítja. A padlólemezen is történt pár apróbb változtatás pl.: első kerekknél, a jobb burkolás érdekében.

2.3 Történelmi áttekintés

Már az 1900 évektől fogva cél volt, hogy minél áramvonalasabb karosszériákat alkalmazzanak. Ezekben az időkben a sebesség növelés volt a fő szempont és nem az üzemanyag takarékoság. Több konstrukciót is kipróbáltak, más és más területekről, hogy hátha beválik a közúti járműveknél is. Az alábbi képeken láthatunk erre pár megvalósított konstrukciót az 1900-1920 évekből.[1]

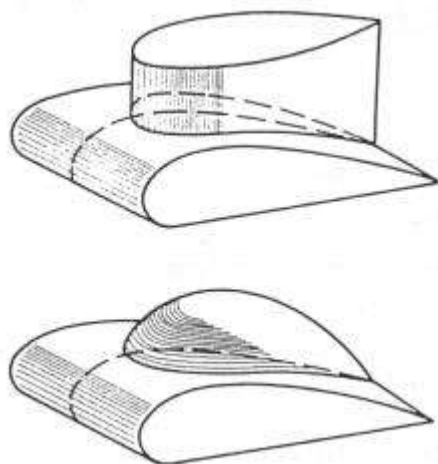


2-6. ábra Léghajó modell [1]

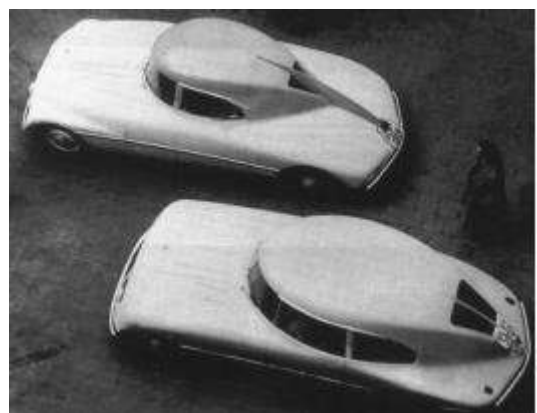


2-7. ábra Torpedó modell [1]

Az évek múlásával fejlődött a technológia és az 1920-1970 években Járay Pál kidolgozta és letesztelte az elméletét, miszerint minden éles sarkot és találkozó élt, le kell kerekíteni. Ezzel az egyszerűnek mondható kis trükkkel nagyot lendített a légellenállással vívott harcon. Pár elképzelés ami az Ő ötlete alapján épült.[1]



2-8. ábra Élek lekerekítése [1]



2-9. ábra Járay Pál tervei [1]

2.4 Testek körüli áramlás

A szilárdtest közvetlen közelében, felszíne mentén, az áramlás egészére jellemző nyomásnál és sebességnél kisebb és nagyobb helyi nyomás, ill. sebesség alakulhat ki.[2]

A tapasztalatok szerint a közegellenállási erő arányos a test homlokfelületének nagyságával és célszerű arányosnak tekinteni az áramló közeg dinamikus nyomásával, ami valójában a Bernoulli-egyenletből ismert, térfogategységre eső mozgási energia.

$$F_l = C_e * A * \frac{\rho}{2} * v^2 \quad (2.9.1)$$

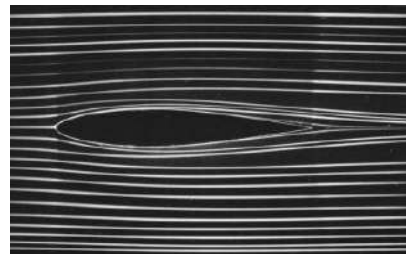
- ❖ A - az ún. homlokfelület (a jármű menetirányra merőleges legnagyobb területű szelvénye),
- ❖ ρ - a levegő sűrűsége,
- ❖ v - a jármű sebessége.
- ❖ Az összefüggésben „ C_e ” az alaki ellenállás tényezője, illetve „ C_w ” légellenállás tényezője.

2.4.1 Áramvonalas testek körüli áramlás:

Az áramvonalak követik a test felületét, a nyomásból származó erő kicsi, az ellenállási erő főként a „ T ” nyírófeszültségből származik. Ezért a „ C_w ” légellenállási tényező viszonylag kicsi lesz. (2.10-2.11 ábra)[1]



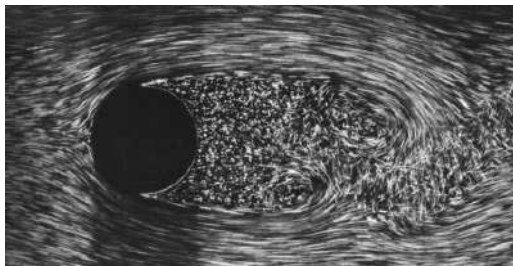
2-10. ábra csepp alak [1]



2-11. ábra csepp alak [1]

2.4.2 Tompa testek körüli áramlás:

Jellemző a tompa testekre a határréteg leválása. Leválási buborék, amely a test körül megváltoztatja az áramlást. Az ellenállást nagy részben a nyomásból származó erő határozza meg. Miután $P - P_0 \gg T$ (nyírófeszültség) ezért a C_w légellenállás nagy lesz. (2-12-2-13 ábra) [1]



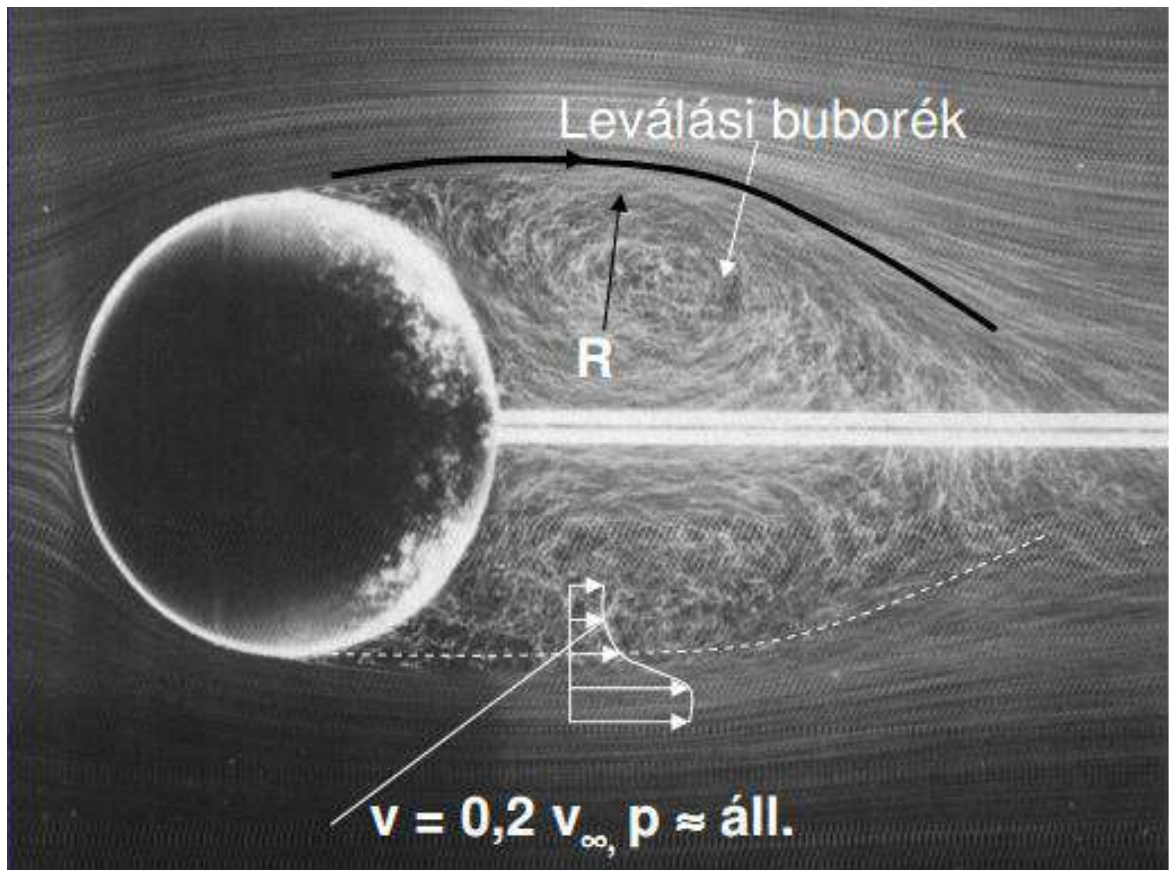
2-12. ábra Henger [1]



2-13. ábra Gömb [1]

2.4.3 Tompa testek leválási buboréka:

Amikor pedig a gömb felülete mentén a nyomás elkezd nőni, akkor a nyomáskülönbség hatására a határrétegen belül visszaáramlás indul meg a felület mentén. Ezáltal egy örvényekkel kitöltött viszonylag kis nyomású tér jelenik meg, melyet leválási buboréknak (leválási térnek) neveznek.[2]

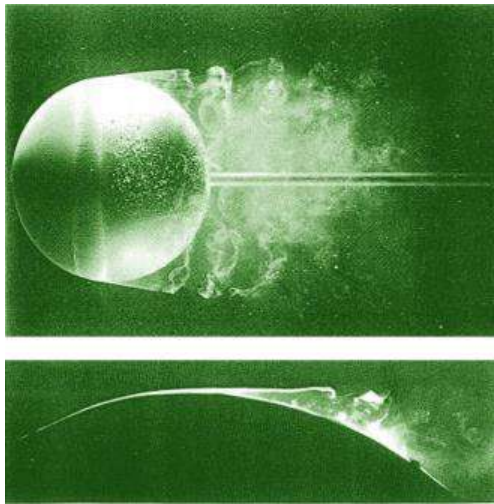


2-14. ábra Leválási buborék [1]

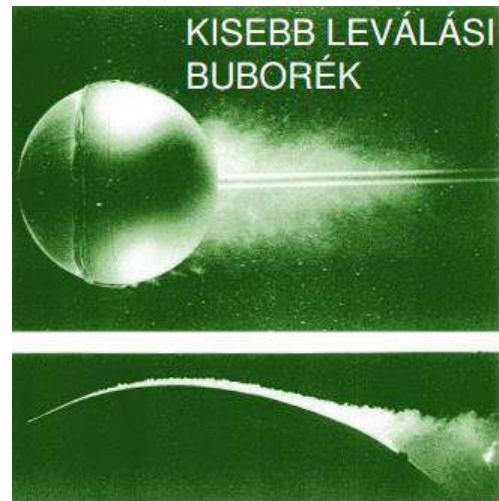
A depresszió annál nagyobb, minél nagyobb a szög a nyíróréteg érintője és a zavartalan áramlási szög között. Ez a határréteg leválása. (2.14 ábra) [1]

2.4.4 Lamináris és turbulens leválás

A turbulens leválás ellenállóbb a csúsztató feszültséggel szemben, és a nyomás növekedéssel szemben is. Turbulens áramlás megfigyelhető a golfabda felületén is. Turbulens áramlásnál sokkal kisebb a leválási buborék, mely kisebb ellenállást idéz elő. [1]



2-15. ábra Lamináris áramlás [1]



2-16. ábra Turbulens áramlás [1]

$$F_w(\text{lam}) > F_w(\text{turb})$$

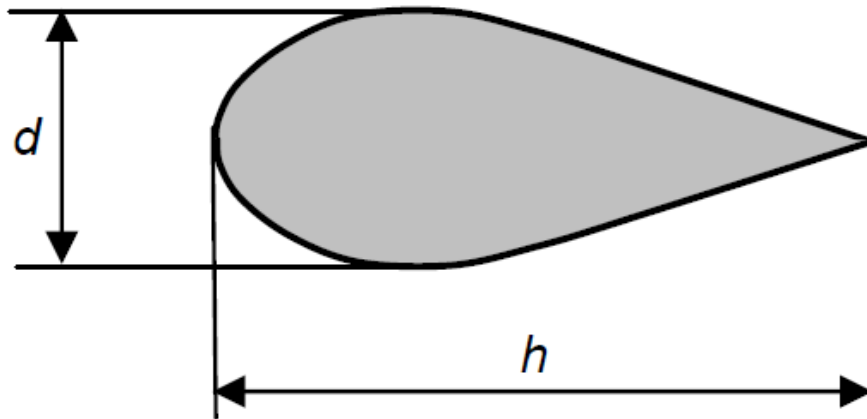
A turbulens áramlásra jellemző kavargás, örvénylés abból származik, hogy a sebességtér minden egyes pontjában a sebesség nagyon gyorsan és kiszámíthatatlanul változik, irányát és nagyságát tekintve.

Kísérletekből arra lehetett következtetni, hogy a réteges (lamináris) áramlás csak 2300 alatti RE számok esetén mondható stabilnak.

Teljes keresztmetszetben is a turbulens áramlás vegye át a szerepet, ezért 10000 Re számra van szükség.[2]

2.5 Az ideális test

Az áramlástan szempontból legkedvezőbb alak tehát elől legömbölyített és abból törésmenetesen kialakított, fokozatosan elkeskenyedő kúpos alakú test lenne, melyet dúc profilnak neveznek.[2]

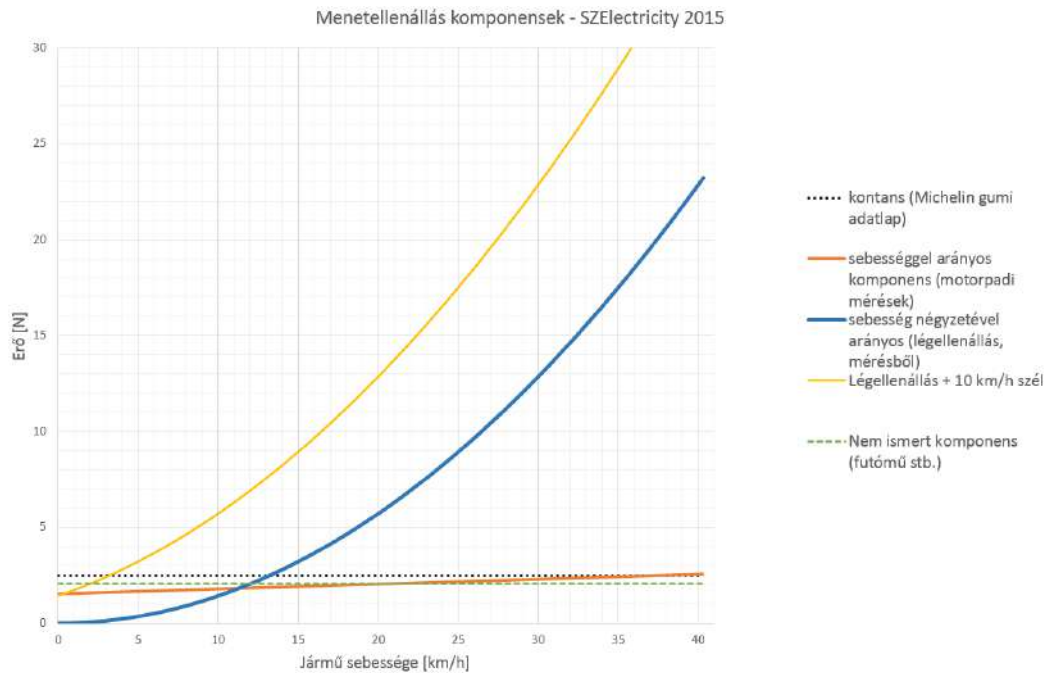


2-17. ábra Dúcforma [2]

A profilnak a hátsó elkeskenyedő kúpos része, kúpszögének optimális értéke $8-12^\circ$ között van. Ennél nagyobb kúpszög esetén már nagymértékű leválás figyelhető meg. Természetes igaz az is, hogy minél kisebb a kúpszög annál kisebb a leválási buborék. Optimális eset az, ha a „d” átmérőnél 10-szer nagyobb értékű, mint a „h” hossz. Érdekes megfigyelni a táblázatban lévő adatokkal kapcsolatban, hogy a megfűvás irányába eső hossz növelése minden esetben előbb kedvezően hat az ellenállási tényezőre, de egy bizonyos hosszától kezdve ismét növekedés figyelhető meg. Ennek oka a hosszan elnyúló felületen keletkező súrlódás egyre növekvő hatása az állandó mértékű leválás mellett.[2]

2.6 Menetellenállás összetevői

Az általunk végzett mérések eredményei alapján, - mely az alábbi diagramban kerül szemléltetésre - megfigyelhető, hogy 15km/h felett az ellenállások közül a légellenállás lesz a domináns. A kísérleti járművünk esetében 35-40km/h átlagsebességnél már jelentős ellenállási erő keletkezik, amely komoly hatással van a fogyasztásra (2-18 ábra).



2-18. ábra Mért menet ellenállási eredmények

2.6.1 Légellenállás komponensek

A menetdinamikai tulajdonságok alapján a járműre az alábbi légellenállások hatnak [3]:

- ❖ torló nyomásból származó a felületre ható normálerők eredője indukált ellenállás,
- ❖ a menetirányra merőleges áramlások,
- ❖ felületsúrlódási ellenállás 3-30 % a felületminőségétől függ,
- ❖ belső ellenállás 2-11 %.

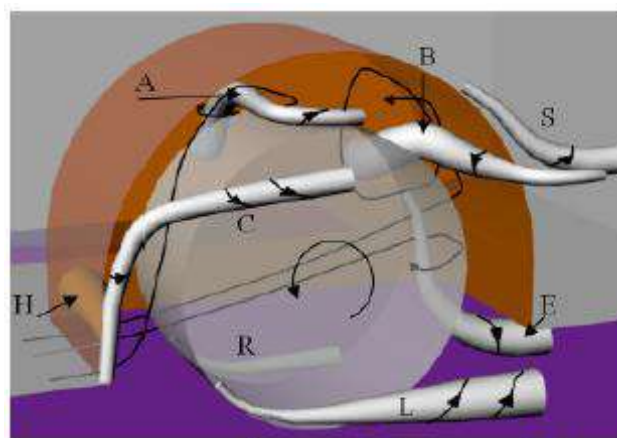
2.6.2 A komponensek megjelenése a járműn

- ❖ **Homlokfali ellenállás** 65% körüli értéket tesz ki egy közúti járműnél. Ezt a homlokfali túlnyomás okozza. Ennek csökkentési lehetőségei a felső vízszintes és oldalsó függőleges élek lekerekítése, homlokfal döntése. [2]
- ❖ **Oldalfali ellenállás** 0,1% csúsztató feszültségből származik. Csökkentési lehetőség a felület érdességének csökkentésével [2]
- ❖ **Hátfali ellenállás** 34,9% hátfali depresszióból származik. Ennek kiküszöbölésére a karosszéria összehúzását szokták alkalmazni, kilépő élek lekerekítése, nyomás növelését. [2]

2.7 Kerékházban történő áramlás

Kerékjáratí ívekben történő áramlás, és a kerék forgása, nagyban befolyásolja az egész jármű ellenállási tényezőjét, ez akár 30% is lehet, ha nincs megfelelően védve a kerék az áramló közegtől. Továbbá hozzá járulhat még 40%-os felhajtóerő növekedés is. A mozgó kerék felkavarja a levegőt megváltoztatva ezzel az áramlás irányát saját maga körül, így több levegő kerül a kerékjáratí ívbe, ami ez által „vitorlaként” fog működni, és visszahúzza a járművet. Ez látható a (2-19 ábrán) áramvonalakkal szemléltetve. [1]

Az áramlástani vizsgálatok alapján az ilyen jellegű kialakítás döntően befolyásolja a légellenállási tényezőt és az ellenállási erőt, ezért nagy hangsúlyt fektettünk erre az észrevételre, így célszerűnek látjuk a kerék körüli tér lehetőség szerinti elburkolását az áramló közeg elől.



2-19. ábra Kerékházban történő áramlás [1]

2.8 Kompozit anyagok

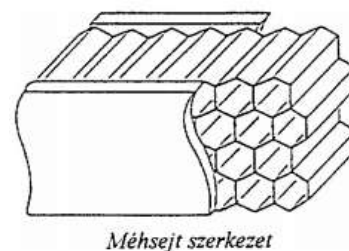
A kompozit anyagok két fő részből tevődnek össze. Az első alapanyag a szálak, melyek lehetnek üvegszálak. Gyártásuk felmelegített üvegből történő húzással történik, így 6-12 μm átmérőt érnek el. Kivitelük alapján lehetnek köteg, paplan vagy szövet kialakításúak. (2.21 ábra) [9]

A szálak készülhetnek továbbá karbonból (grafit) is, amelyek különféle karbonláncú vegyületeket tartalmazó anyagok pirolízisével, és nyújtásával hoznak létre, így szálirányban összefüggő grafit kristályokat nyernek. [9]

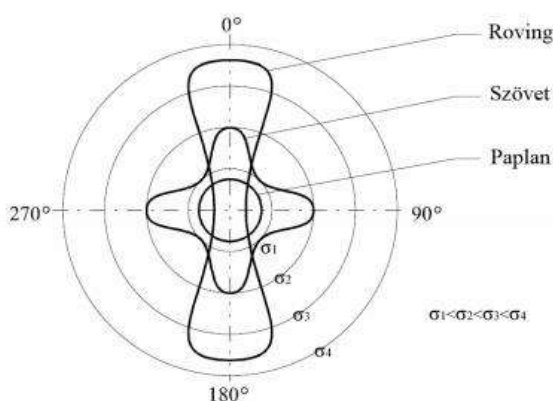
A második alapanyag az úgynevezett hordozók. Ezek rendszerint különféle kétkomponensű hőre keményedő műgyanták. A műgyanta egyik komponense a folyékony polimer, amelyhez a térhálósító adalékokat hozzákeverve, majd a szálakat, töltőanyagokat bedolgozva kikeményítik. [9]

Szendvics szerkezetek is a kompozitokhoz tartoznak, ezek a szerkezetek nagyszilárdságúak, kis tömegűek, nagy hajlító merevségűek (2-20 ábra). Alkalmazzák a járműiparban és a gépgyártás területein is. Karbon kompozit szendvics szerkezet felépítése:[9]

2db héj réteg,
hab vagy méhsejt réteg,
rétegek egymáshoz rögzítése ragasztással történik.



2-20. ábra Szendvics szerkezet[9]



2-21. ábra Polárdiagramm[11]

Az ábrán a különböző merevítő anyagok húzószilárdsága és rugalmasági modulusza van ábrázolva terhelés függvényében. [11]

2.10 Végeelem-módszer

A végeelem-módszer (FEM) egy numerikus módszer parciális differenciálegyenletek közelítő megoldására, tehát analitikus módszerekkel nem megoldható problémák közelítő megoldására alkalmas. A jelen problémán való alkalmazásához szükség van egy a valóságos jármű tulajdonságaihoz a legjobban hasonlító, azonban mégis a lehető legegyszerűbb végeelem-modell felépítésére. A probléma megoldásához és a peremfeltételek megadásához a modellt diszkretizálni kell, ehhez szükséges a végeelem-háló. Az Autodesk Simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) beépített hálózója kizárólag háromszög elemeket használ. Szükség van még az egyéb paraméterek kezdeti értékére $t=0s$, $P=0\text{ Pa}$, és a peremfeltételek definiálására. Ezek a számítások csak közelítő eredményt adnak, viszont a modell paramétereinek beállításával (pl. háló mérete) befolyásolható a közelítés pontossága. [10]

2.11 CFD alap egyenletei

A CFD alapegyenleteinek levezetése arra épülnek miszerint dx , dy , dz méretű végtelenül kicsi folyadékelemre alkalmazzuk a 3 megmaradás törvényt:

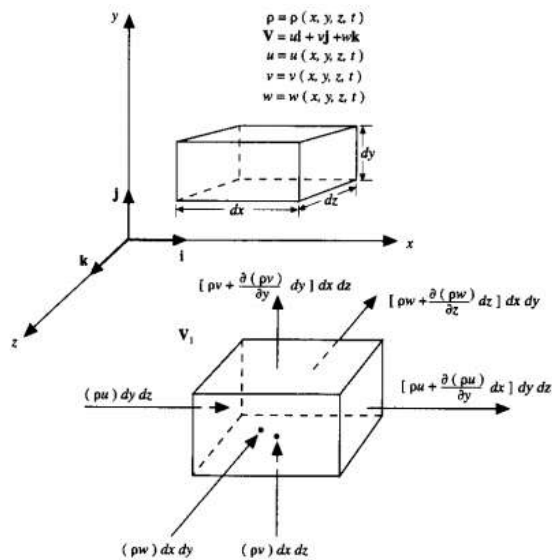
- ❖ tömegmaradás törvényét,
- ❖ lendület megmaradás törvényét,
- ❖ energia megmaradás törvényét.

A lendület megmaradás egyenlete, amit úgy is neveznek, hogy Navier- Stokes egyenlet, a két megalkotójáról kapta a nevét. Nagyjából 200 éve dolgozták ki őket a 19. században egymástól függetlenül.[12]

2.11.1 A tömegmegmaradás törvénye

A tömegmegmaradás törvénye a következő képen alakul, képzeljünk el egy dx , dy , dz méretekkel rendelkező folyadék elemet, amely rögzítve van, és ezen keresztül folyadék áramlik. Tehát elmondható, hogy a

$$(\text{kiáramló tömeg} - \text{beáramló tömeg}) = \text{kontrol térfogat tömeg csökkenésével.} [12]$$



2-24. ábra dx, dy, dz méretű folyadék elem [12]

Az előző megállapítás bal oldala egyenlő lesz a:

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (2.21.1.1)$$

Az egyenlet jobb oldala következő képpen fog alakulni:

$$-\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz) \quad (2.21.1.2)$$

A két egyenlet össze vonása után a következő alakot veszi fel. Ebből a két egyenletből kiindulva írták fel a végső összefüggést egy egyszerűbb alakban, először rögzített folyadék elemre, majd ez átírható mozgó folyadékelemre.[12]

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2.21.1.3)$$

2.11.2 Lendület megmaradás törvénye

Ennél is egy dx, dy, dz méretekkel rendelkező folyadékelem definiálására lesz szükségünk, ez az elem mozog a térben és rajta keresztül folyadék áramlik. A lendület megmaradás törvénye Newton II. törvény. Ami matematikailag a következőt írja le [12]:

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (2.21.2.1)$$

Bonyolult matematikai összefüggésekkel a következő Navier- Stokes össze fügést írták le. A három dimenzióhoz, (dx, dy, dz kiterjedésekhez).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = - \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \end{aligned} \quad (2.21.2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = - \frac{\partial \rho}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y \end{aligned} \quad (2.21.2.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = - \frac{\partial \rho}{\partial z} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z \end{aligned} \quad (2.21.2.4)$$

2.11.3 Energiamegmaradás törvénye

Ebben az esetben is vegyünk egy dx, dy, dz méretű folyadékelemet, amire az energia megmaradás törvényét fogjuk felírni. Ez azonos a termodinamika első törvényével. Három részből fog állni az energia változásának mértékéből, a folyadékelemben áramló hőmennyiség változásától, és a folyadékon végzett munkától.[12]

A három rész kibontása és matematikai levezetésük után az alábbi egyenletet fogjuk megkapni, ami meghatározza az energiaváltozását egy mozgó folyadékelemnek.[12]

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} \\ + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad (2.21.3.1)$$

2.12 A peremfeltételek

A szimulációs térben létrehozott jármű köré kell egy behatárolt tér, amely a közeget fogja képezni számunkra. Ennek a közegnek és a járműnek a peremfeltételeit kell definiálnunk. Ez a következő képpen történik, minél jobban a valóságot kell közelítenünk. A tér most egy téglatest, amelynek a járművel szembe lévő oldala lesz a kezdő oldal (Inlet), tehát innen indul az áramlás ($v = (m/s)$) a test mögötti falon (Outlet) távozik akadálymentesen a levegő, ezért itt ($P=0 \text{ Pa}$) nyomást kell felvenni. A téglatest felső és alsó része (Top, Bottom), és az oldalain (Side) szimmetriát kell definiálni. [7]

Határfelület	Határfelület típusa	Mértéke
Bemenő felület (inlet)	Áramlás sebessége	8.333 m/s
Kilépő felület (outlet)	Nyomás	0 Pa semleges nyomás
Felső felület (top)	Szimmetria	-
Oldalak (side)	Szimmetria	-
Alsó felület (bottom)	Szimmetria	-

1. táblázat Peremfeltételek

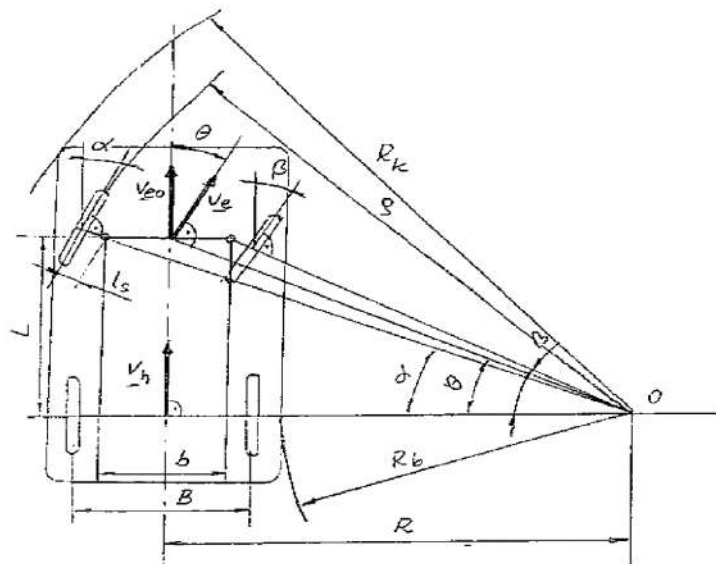
3 Az optimalizált karosszéria megalkotásának lépései

A Shell Eco-marathon versenyen résztvevő több száz egyetemi fejlesztésű áramvonalas jármű arra készítette a csapatot, hogy a SZEnergy karosszériáját újra tervezzük az optimalizált légellenállás figyelembe vételével. A megfelelő karosszéria kialakításának feltételei az alábbiak:

- kis tömeg,
- jó terhelhetőség,
- egyszerű kialakítás,
- súlypont minél alacsonyabb elhelyezése,
- kis fordulókör,
- lekerekített élek.

3.1 Kerékház kialakításához szükséges számítások

Ackermann kormányzást használunk a járművünk irányításához. Ennél a kormányzásnál a két kerék kanyarodáskor eltérő szöget zárnak be egymáshoz képest. A kerekek szögelfordulás értékeit kellett meghatároznunk, hogy el tudjuk burkolni őket. Ezeket a lenti ábra segítségével számoltuk.



3-1. ábra Ackermann kormányzás [5]

$$tg\alpha = \frac{L}{R + \frac{b}{2}} = \frac{L}{6000 + \frac{930}{2}} = \quad (3.2.1)$$

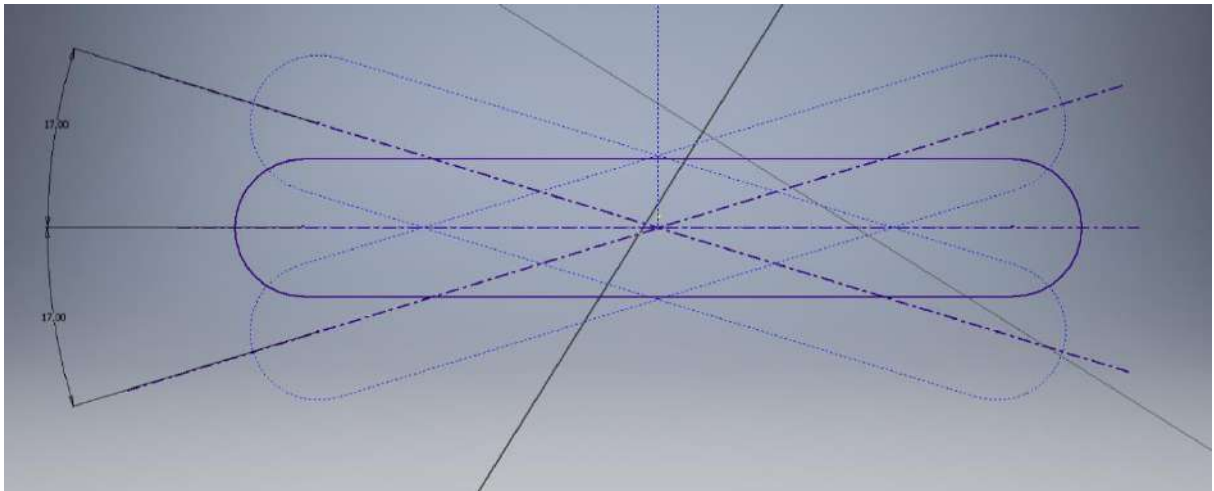
$$tg\beta = \frac{L}{R + \frac{b}{2}} = \frac{1500}{6000 - \frac{930}{2}} = \quad (3.2.2)$$

$$tg\theta = \frac{L}{R} = \frac{1500}{6000} = \quad (3.2.3)$$

A további tervezéshez INPUT adatként megvizsgálásra kerültek a különböző tengelytávolságok esetén kerék dőlés szögeinek értékei.

Tengelytávolság	$tg\alpha^\circ$	$tg\beta^\circ$	$tg\theta^\circ$
1200 [mm]	10,51°	12,23°	14,03°
1300 [mm]	11,36°	13,21°	14,03°
1400 [mm]	12,21°	14,19°	14,03°
1450 [mm]	12,64°	14,67°	14,03°
1500 [mm]	13,06°	15,16°	14,03°
1600 [mm]	13,9	16,12	14,03

2. táblázat Kerék kanyarodási szögek

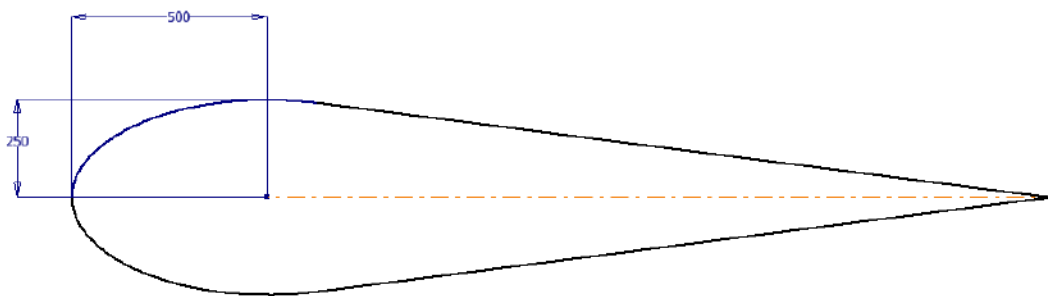


3-2. ábra Kerék szögelfordulása

A képen látható a kerék legnagyobb szögelfordulása, amely a mi szempontunkból a legfontosabb: β° mind két irányban. Ehhez még hozzá adódik a biztonsági tényező $+1-2^\circ$.

3.2 Dúcforma vizsgálata

Hogy megtaláljuk az ideális csepp alakot, vizsgálatokat végeztünk virtuális szélcsatornában különböző paraméterekkel. A paraméterek fő irányvonalát az ideális dúcformáról végzett irodalomkutatás adta meg, miszerint az átmérő és a test hossza között tízszeres szorzó van. Az ideális orr rész kialakításához viszont kísérleti úton jutottunk el.



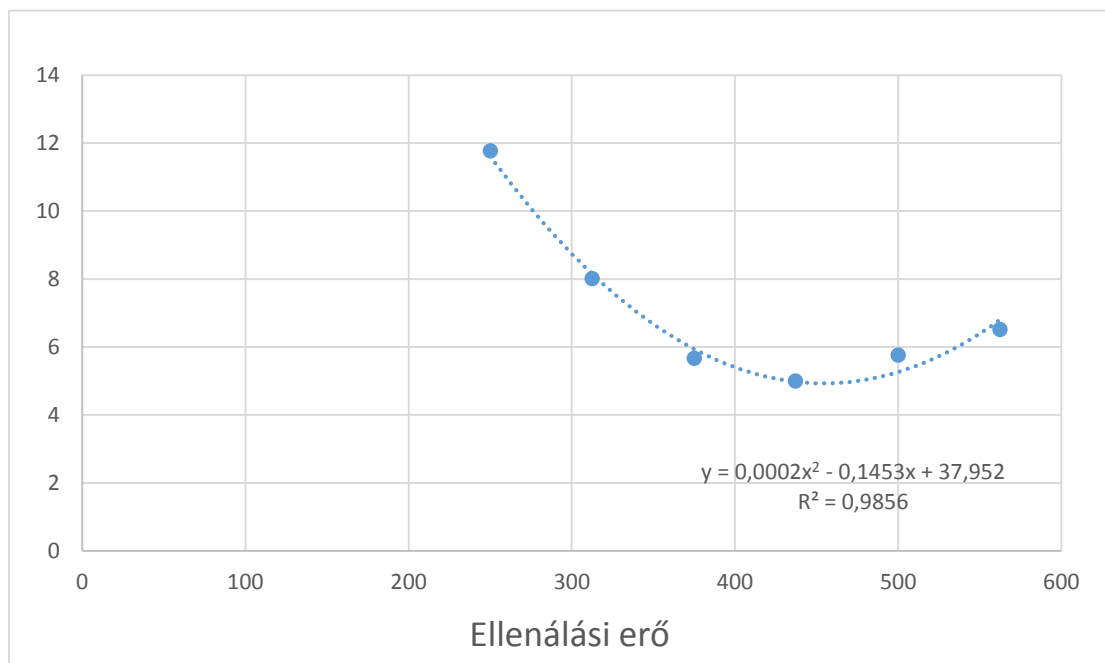
3-3. ábra Általam definiált dúcforma

Még pedig úgy, hogy az első ábrán látható ellipszis hosszúságának és szélességének arányát változtattam. A két méret között 0.25-ös szorzótényezőt használtam. Fő megfigyelési szempont az ellenállási erő változása volt, a különböző arányszámú formák között. Az eredményekből jól látszott a minimum, és azon az intervallumon szűkítettük a paramétereket, melyet az alábbi táblázat tartalmaz.

ellipszis kisebb rádiusz [mm]	ellipszis nagyobb rádiusz [mm]	Ellenállási erő [N]
250	562,5	6,516
250	500	5,768
250	437	5
250	375	5,675
250	312,5	8,016
250	250	11,774

3. táblázat Dúcforma vizsgálat

A táblázatból generáltunk egy pontdiagramot, melyre egy másodfokú polinomális függvényt illesztettünk, jól látszik a függvény fordulópontja a minimumában.



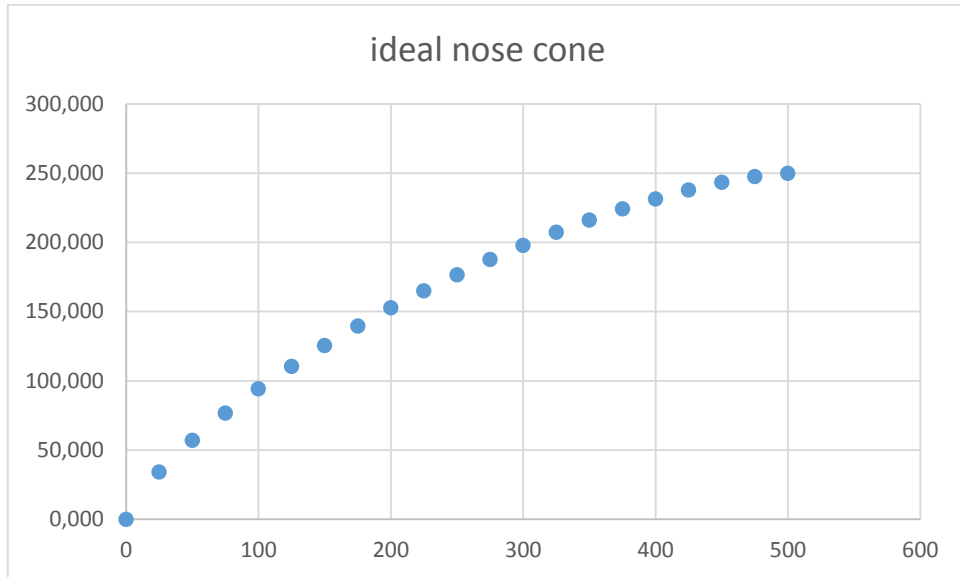
3-4. ábra Dúcforma geometriája az erő függvényében

Az értékek pontos meghatározásához az alábbi két képletet alkalmaztam, melyhez Excel táblázatot alkalmaztam. A szoftver a két rádiushoz kiszámolja a köztes értékeket, illetve diagramban is megjeleníti. Ezeket a segédpontokat felhasználva alakítottam ki az orrformáját.

[6]

$$\theta = \arccos\left(1 - \frac{2x}{L}\right)$$

$$y = \frac{R}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\theta - \frac{\sin(2\theta)}{2} + C \sin^3 \theta}$$
(3.3.1)



3-5. ábra Orrkúp pontjainak grafikus ábrázolása

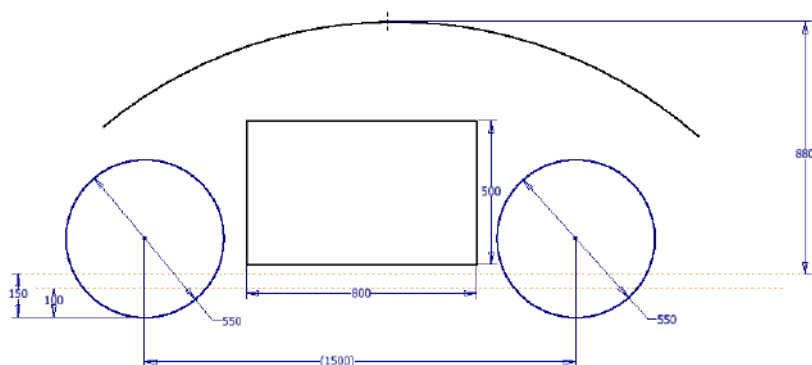
3.3 Alapsíkok felvétele

A jármű tervezése közben nélkülözhetetlen a síkok alkalmazása. Ezek a síkok határozzák meg egyes elemek befoglaló méreteit, a térben való elhelyezkedésüket, kiterjedésüket. Első lépésként felvettem az első tengelyt, és rajta párhuzamos síkra beállítottam az első nyomtávot 1000 mm-re. Hátsó nyomtávot is minimum értékre vettük fel - 800 mm-re -, hogy a járművünk minél kompaktabb legyen.



3-6. ábra Kerekek elhelyezése a térben

A tengelytávolság meghatározásához, figyelembe kellett venni egy nyílásméret-ellenőrző sablon méreteit (800x500 mm), amelynek az ajtónyíláson forgatás illetve döntés nélkül be kell férnie. A pilóta kényelmét figyelembe véve ez a hasáb fektetve számít a mi esetünkben. A 3-7. ábrán látható még két vízszintes vonal, melyek a jármű hasmagasságát jelölik.



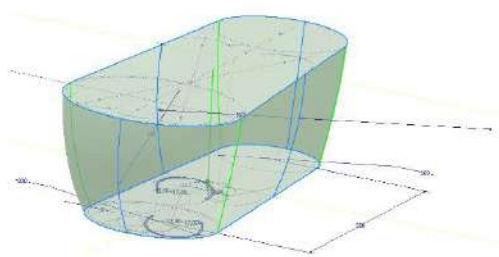
3-7. ábra Egyszerűsített jármű vázlat fő befoglaló méretekkel

A felső ív a pilótafülke minimális belső magasságát jelöli ki, amit minimum el kell érni a tervezés és gyártás során. Ennek a kis sematikus ábrának a segítségével alakítottam ki későbbiekben a felületmodellt.

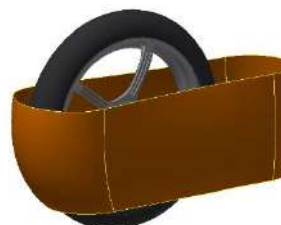
3.4 Kerékburkolat

3.4.1 Első kerék

Egyik fő cél az volt, hogy a kerekeket elrejtjük az áramló közeg elől, mivel egy forgó testnek sokkal nagyobb az ellenállási ereje, mint egy állóé, ezért különböző burkoló elemeket kell köré tervezni. Ennek kialakításában is az ideális dúcformát kell alapul venni.



3-8. ábra Burkolat szerkesztése

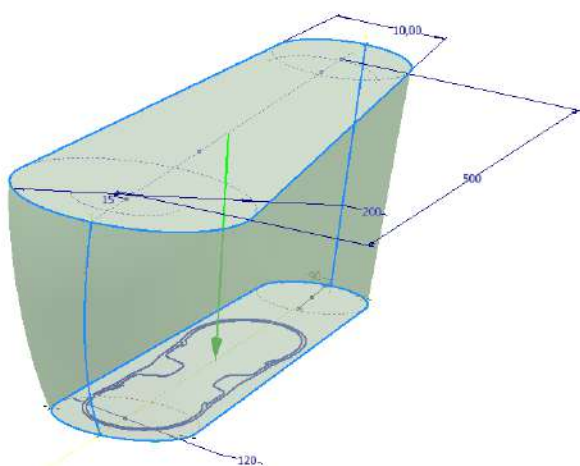


3-9. ábra Első kerék burkolat

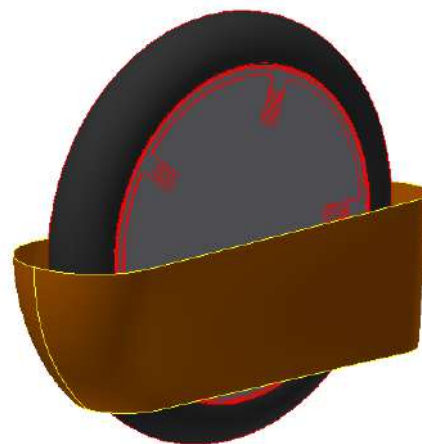
Az első keréknél nagyobb problémát okozott a burkoló elem kialakítása, mivel nem lóghat ki túlzottan oldalra, mert ezzel növeli a homlokfelület és túllépnénk a megengedett maximális szélességet is. A burkolat felépítéséhez szükséges számítások a 4.10- es pontban található meg. Először a drótvázát kellett megalkotni. Ez három részből áll, két ellipsziszből, melyek a kerék alsó és középső részénél helyezkednek el valamint, hogy ne forduljon magába a felület - 1-1 db segéd görbével ki kellett feszíteni a palást felületét.

3.4.2 Hátsó kerék

A hátsókerék burkolat elkészítése viszonylag egyszerűbb művelet volt mivel, ez nem fordul el irányváltás közben. Ez az elem is 3 részből áll össze. Ugyan úgy, mint az első, tartalmaz két ellipszist, egyet a minimális magasságon egyet a kerék középvonalában. Az ellipszisek síkjára merőlegesen 1-1 görbével van kifeszítve a felület, hogy elérjük a kellő formát.



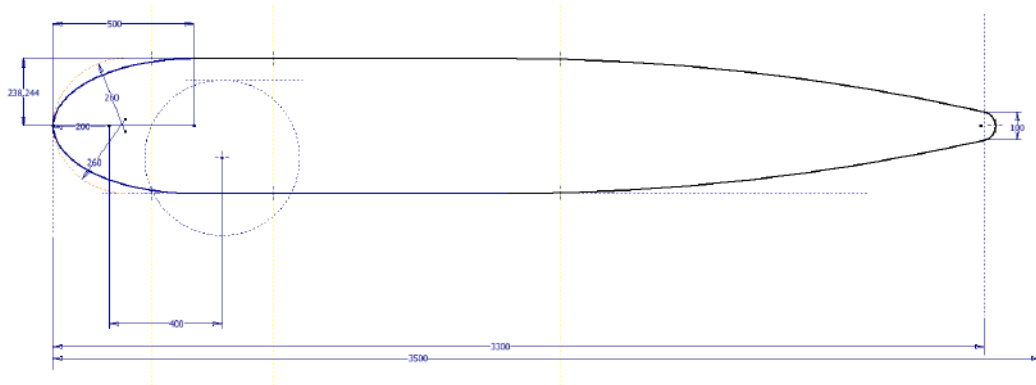
3-10. ábra Hátsó kerék burkolat szerkesztése



3-11. ábra Hátsó kerék burkolat

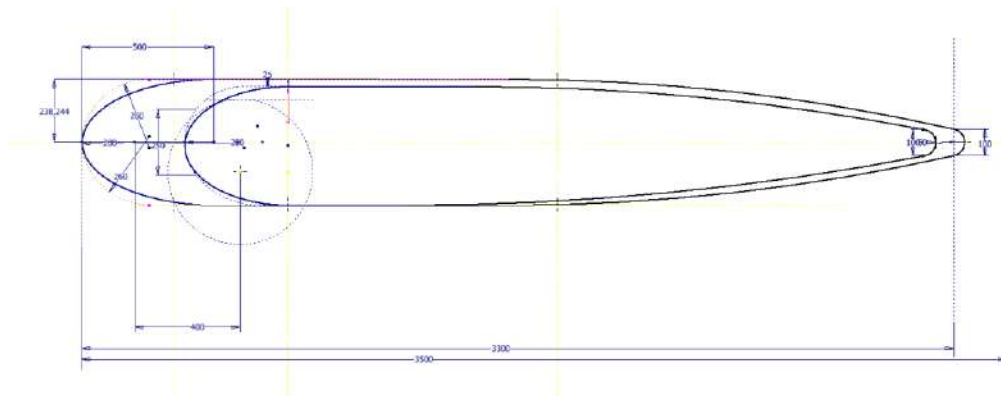
3.5 Karosszéria test optimalizálási folyamata

A jármű testének létrehozása, egy bonyolultabb felületmodellezetési feladat volt, mivel nagyobb egybefüggő felületről van szó. Az elkészítési folyamat a következőképpen alakult. Először is a leendő jármű középsíkjára vettem fel az első vázlatot, amelyre megrajzoltam az adott szelvényt. Ennél a vázlatnál van először meghatározva az orr formája, mely az egész jármű ellenállását döntően befolyásolja.



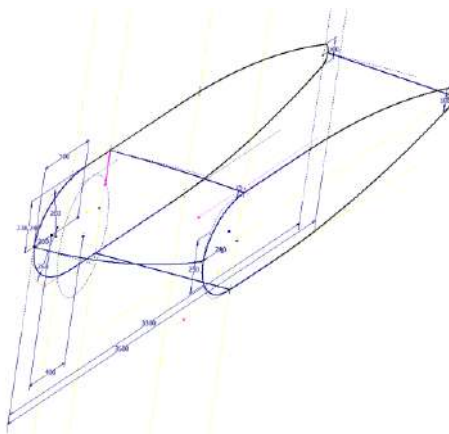
3-12. ábra A tervezett jármű középsíkjának metszete

Ettől a középsíktól van párhuzamosan eltolva az oldalfal síkja 650mm-re. Ez az érték a keréburkolat miatt van ennyire meghatározva. Mivel így fognak a különböző részegységek találkozni a térben. Az orrformája erre a síkra is fel van rajzolva, csak el van tolva a középsíktól képest hátra fele.



3-13. ábra A tervezett jármű oldalának vázlata

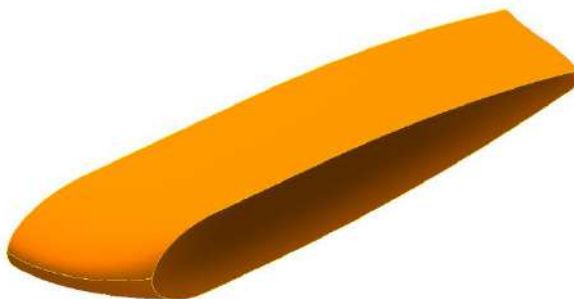
Az eltolás mértéke egy az előbb említett két síkra merőleges síkon látható. Ezen a merőleges síkon van a felülnézeti vázlatának részlete, amely csatlakozik a középső síkon lévő vázlat legelső pontjához és az oldalfalon lévő vázlat legelső pontjához.



3-14. ábra Karosszéria testének drótváza

A két párhuzamos vázlat azonban még nem volt elég a test felületének megalkotásához, kellett bele vezérgörbék is melyek összekötik a két vázlatot, ezek a görbék meghatározott helyeken vannak. Például a vázlatok elejében és végében, illetve az első kerekek és a pilótaülés között.

Az orr formája az úgy nevezett ideális csepp alakból és a fentebb (5. fejezet) levezetett számításokból alakult ki a legideálisabbra. Mivel előzőleg csak külön volt tesztelve a forma így nem biztos, hogy ez lesz számunkra is a legjobb. További tesztek szimulációk elvégzése szükséges, majd ha összeáll a teljes jármű.

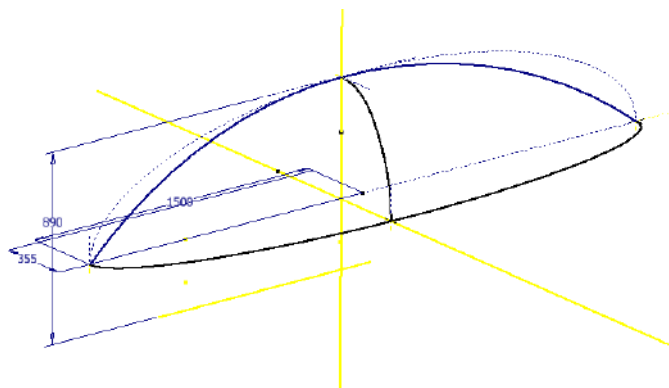


3-15. ábra Karosszéria testének felület modellje

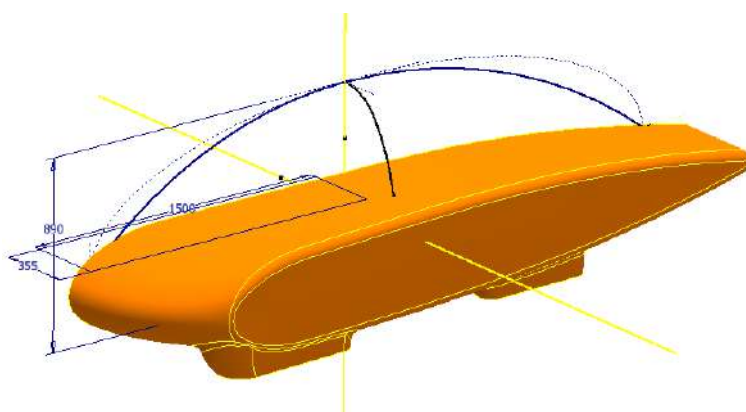
A jármű testének formája így néz ki miután a drótvázra rá illesztettük a felületet. Ezután még kisebb átalakításokon esett át. Felülnézetből is, hogy elérjük az ideális dúcformát meg kellett csonkítani a testet. A csonkítás $4-6^\circ$ szögben történt meg, mivel ez csak a testünk fele, így az ideális szögtartomány is feleződik.

3.6 Pilótafülke

Hogy a jármű alakot öltse, hiányzik még a pilótafülke. Ez az elem is hasonló képen alakult, ki mint a fent említett alegységek. Itt is szükség volt két egymásra merőleges síkra, melyekre megrajzoltam a pilótafülke elől és felül nézetét. A versenyszabályzatban foglalt paraméterek alapján készült el, ami a mi esetünkben, magasság a jármű padlólemezétől mérve 880 mm, ehhez még plusz 10 mm biztonsági tényezőt adtam, hogy magasabb ember is beférjen a kocsiba, a szélessége vállmagaságnál 700mm, ezt az értéket úgyszintén megnőveltem, 10 mm-rel hasonló okok miatt. Ez azonban még nem volt elég a szép egybefüggő felület létrehozásához, mivel a tükrözési síknál nem tangenciálisan lett vége a kihúzott felületnek. Ezért kellett egy kifeszítő görbét beiktatni, amely összeköti a két nézetet és ezen keresztül alakítjuk ki a felületet. Ennél az elemnél is be kellett tartani az ideális cseppformára vonatkozó szabályokat.



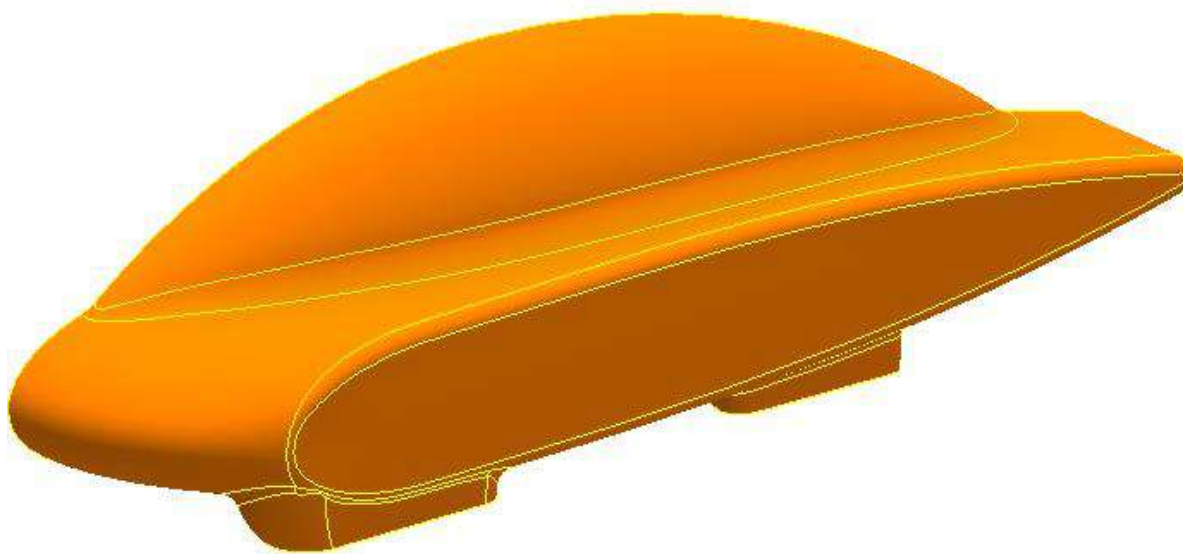
3-16. ábra Pilótafülke drótváza



3-17. ábra Pilótafülke drótvázának ráillesztése a karosszéria testére

3.7 A különböző részegységek egyesítése

Miután elkészültek külön-külön a részegységek már csak össze kellett illeszteni őket. A térben már a saját, előre meghatározott helyére lettek elkészítve. Ennek köszönhetően a közös metszéspontoknál el kellett távolítani a felesleges felületeket és ezt követően lehetett egy összevonás parancsot alkalmazni, amely egy egybefüggő felületet hozott létre.



3-18. ábra Jármű karosszéria modelljének kész felülete (bal oldala)

Erre az egyesített felületre már rá lehetett tenni a lekerekítéseket, melyeknek nagy szerepe van az aerodinamikus kialakításban. A lekerekítések nagyságával pozitív és negatív irányba is el lehet vinni a járműre ható ellenállási erő nagyságát. Ennek minél kisebb értéknek kell lennie. Az optimális értékek felvételéhez kísérleti úton jutottam el, több értékre is futtattam CFD szimulációt.

3.8 Felületből test alkotása

Az elkészült külső héjmodellből testet alkottam, mivel ezen a szinten már könnyebb azt kezelni, mind a feldarabolásnál mind a belső merevítők kialakításánál. Ehhez a művelethez először is vastagságot kellett megadnom, ezt tapasztalati úton választottam 3 mm –re mivel, a 2013-ban elkészült versenyautónk falvastagságai 3-5 mm közé esnek. A falvastagságok megadása után letükröztem a modellt, azért mert innentől már nem csak szimmetrikus kialakítások fognak benne megjelenni. Tükrözésnél figyelni kellett, hogy a találkozó felületek egymással tangenciálisak legyenek. A művelet végrehajtása után a következő modellt kaptuk.

A CFD szimulációhoz ez a lépés számomra nélkülözhetetlen volt, hogy teljes képet kaphassak a járműre ható ellenállási erőről illetve a járműkörüli áramlásról, nyomásviszonyokról.



3-19. ábra Felületmodellből konvertált test

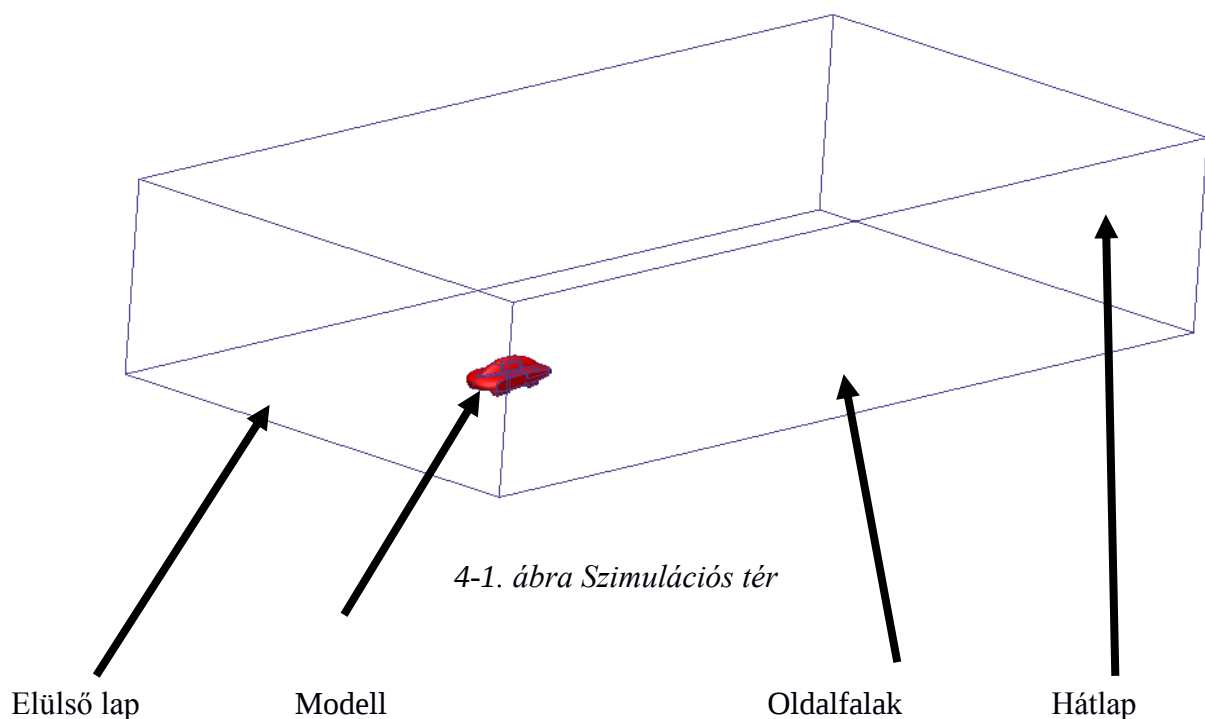


3-20. ábra Felület analízis vizsgálata

4 CFD szimuláció elvégzése

A CFD szimulációhoz az Autodesk Simulation CFD programot használtam fel. A fentiekben kifejtett beállítások szerint adtam meg a vizsgált környezetet és a járművet.(2.12 alfejezet) Ez a program egy automata hálózó rendszerrel rendelkezik, mely segítségével sokkal gyorsabb a modellek előkészítése, mint pl.: ANSYS Fluent-ben. Természetesen, ha szeretnénk, tudunk módosítani ezen a hálón, elem számon, méretén, elemtípusán stb. A jármű behelyezése után létre kell hozni az áramló közeget, erre is van lehetőség a programban, nem szükséges külön a modellező programban létrehozni. Sokkal dinamikusabbá téve a modell és a szimuláció kapcsolatát. Az áramló közeget a modell előtt 8m-re vettem fel, jármű mögött pedig 21m re határoztam meg, az oldalfalak távolsága karosszéria szélétől 7m re lett megadva felfele pedig 10m lett a zavartalan áramlás miatt.[8]

Az áramló közeg levegő melynek a sűrűsége 1.20473 kg/m^3 , és összenyomható közeg. A járművel szemben lévő falon lett megadva az áramlás sebességének nagysága ($v=8.33 \text{ m/s}$). A hátfalon 0 Pa-os, semleges nyomást, a többi falra pedig szimmetriát adtam meg. [7]



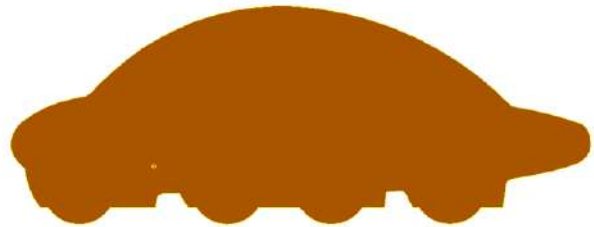
4.1 Szimuláció eredményei

Miután lefutott a szimuláció a megadott paraméterek alapján az alábbi eredmények jöttek ki. Három szimulációt futtattam erre a modellre, egyet front szélben egyet 45° -al elforgatva harmadikat pedig oldalszélben. Táblázatba szedve értékeltem ki az adatokat, Excel-ben csináltam egy légellenállási tényező kalkulátort. A következő adatokra van szükség, áramló közeg sűrűségére, sebességére, frontfelület nagyságára és a szimulációból származó ellenállási erőre.

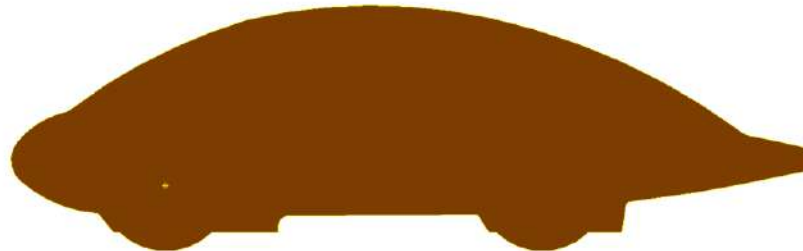
A front felület nagyságát CAD programból mértem vissza, mindig az áramlásra merőleges metszetet mértem.



4-2. ábra Front felület 0°



4-3. ábra Frontfelület 45°



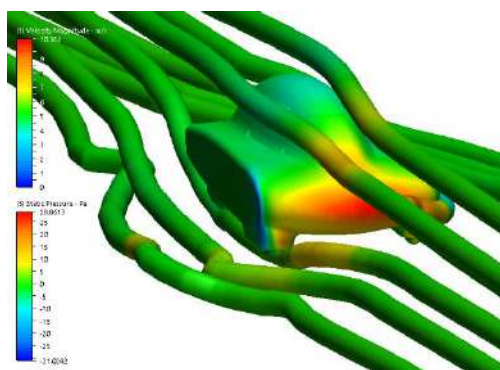
4-4. ábra Frontfelület 90°

<i>FOK [°]</i>	<i>0°</i>	<i>45°</i>	<i>90°</i>
<i>Homlokfelület [m²]</i>	<i>0,888621 m²</i>	<i>1,961136 m²</i>	<i>2,306927 m²</i>
<i>Ellenállási erő [N]</i>	<i>6,16569 N</i>	<i>27,9526 N</i>	<i>34,2604 N</i>
<i>Ellenállási tényező [Cw]</i>	<i>0,1658</i>	<i>0,3407</i>	<i>0,3550</i>

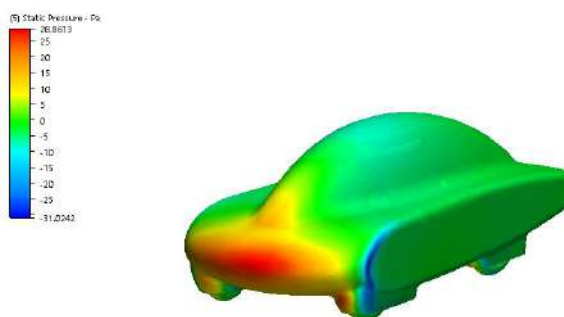
4. táblázat Ellenálláserő 0° - 45° - 90°

4.1.1 Szimulációból származó tapasztalatok

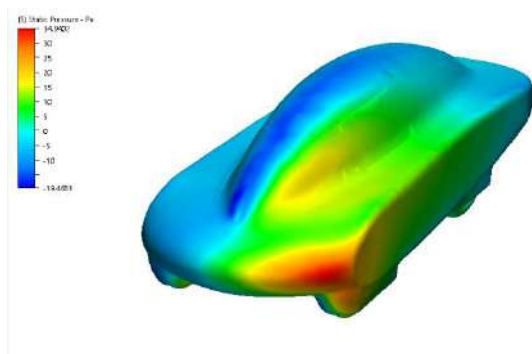
A szimulációt a fentiekben leírtak alapján végeztem el. A szimulációk elvégzése után kielemeztem a kapott adatokat és az alábbi következtetésekre jutottam. Az elemzéshez lekértem a külső felület nyomás és erő értékeit. Ábrán jelöltem a nyomásváltozásokat és az áramló közeg sebességét is. A fenti táblázatban láthatók a különböző szöghelyzetekhez tartozó erő értékek. Nem utolsó sorban az áramvonalakat is beállítottam, hogy a számomra lényeges részeken haladjanak át. A szimulációs eredményeket az alábbi (4-5-4-8 ábra) ábrák szemléltetik. Kékszínnel van jelölve rajtuk a negatív nyomás, ez főként 45° és oldalszélben jellemző a járműre, ezeken a részeken figyelhető meg a leválási buborék, amelyben depresszió uralkodik, és ez fejtírá ki a vissza húzó erőt.



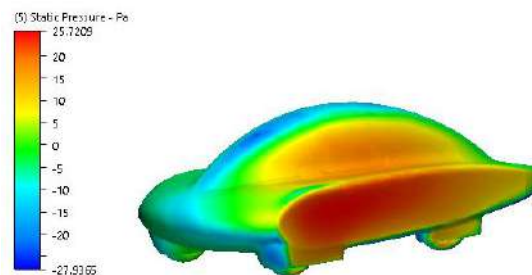
4-5. ábra Front szimuláció áramvonalakkal



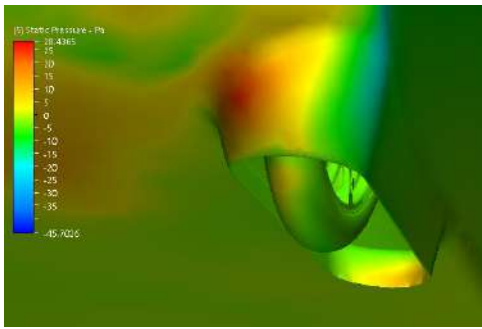
4-6. ábra Front szimuláció felületi nyomás



4-7. ábra 45°szimuláció felületi nyomás



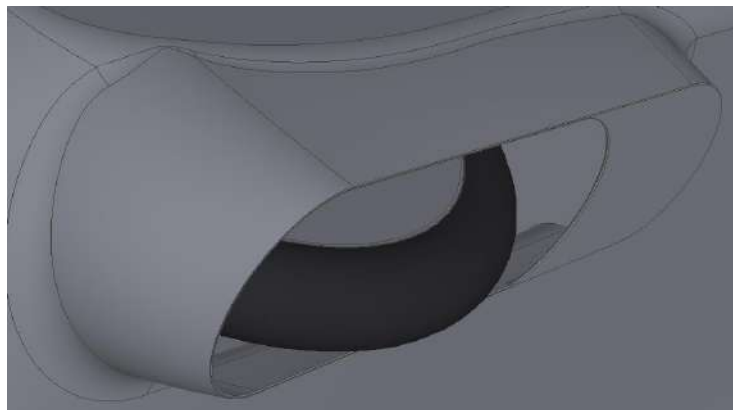
4-8. ábra 90° szimuláció felületi nyomás



4-9. ábra Front szimuláció eredménye
(kerékjárat kiemelve)

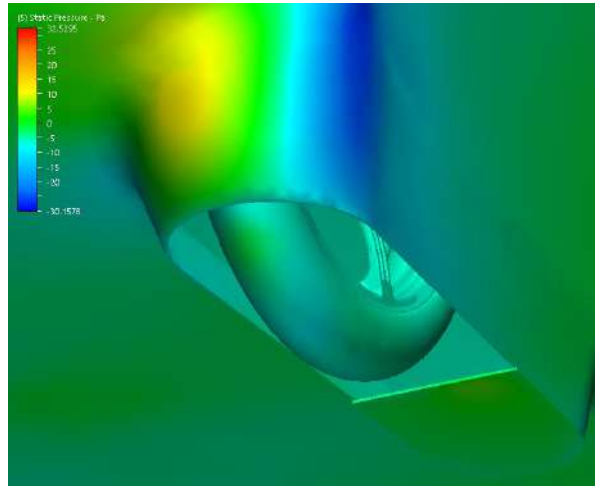
Az ábrán megfigyelhető, hogy az áramló közeg a kerékjárat ívbe behatol a kerék mögött. Az 2.7 alfejezetben kifejtett okok miatt ezt meg kell szüntetni, ha nem lehetséges, akkor minimalizálni kell a rést. Jelen esetünkben mivel egy forgó és kanyarodó kerékről van szó, a második eset lehetséges. Tehát a legkisebbre kell csökkentenünk a kerék és a burkolat közti hézagot.

Miután a problémát feltártam és sikeresen szerkesztettem egy erre a célra szolgáló takaró elemet, újabb szimulációt futtattam a karosszériára. Ennek köszönhetően csökkent az ellenállási erő is, és mivel a homlokfelületet nem növeltük ezzel, az átalakítással így csökkent a légellenállási együttható is, ezáltal kevesebb lehet a fogyasztásunk. Nagyobb, illetve jobb burkolás nem lehetséges az első kerekeknél, mivel ezek kanyarodnak és körülményes lenne egy olyan mechanikus burkoló elemet létrehozni, ami mindig kitakarja az összes rést, az összes szöghelyzetben.



4-10. ábra Kerékjárat ív alsó burkolatának tovább fejlesztett modellje

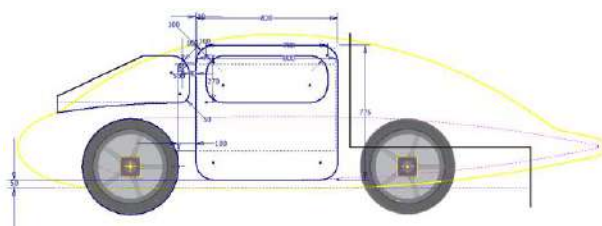
A szimulációs vizsgálat (4-11 ábra) eredményeit tanulmányozva a kapott értékek alapján a továbbfejlesztett modell légellenállása megfelelőnek bizonyult. Megfigyelhető, hogy a felgyülemlett nyomás a kerék járatí ívben eltűnt, tehát sikeresen elvezettük a jármű alá.



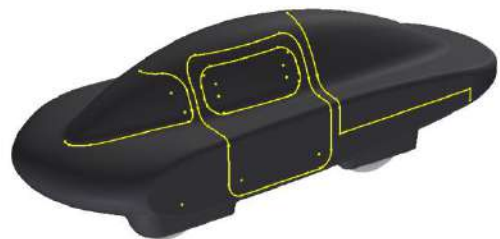
4-11. ábra Kerékjáratí ív alsó burkolatának szimulációs vizsgálat eredménye

5 A Jármű részekre osztása

Mivel a jármű már alakot öltött, el lehetett kezdeni a részekre bontását. Ennél a pontnál is a verseny szabályzatot kellett szem előtt tartani. A különböző részek vetületét megrajzoltam a jármű oldalsó síkjára. Ezeket levetítettem a felületre, hogy jól láthatóak legyenek a vágási élek. Így mindenki számára jobban láthatóak lettek a vágási vonalak.



5-1. ábra Elemek kivágásának kontúrja



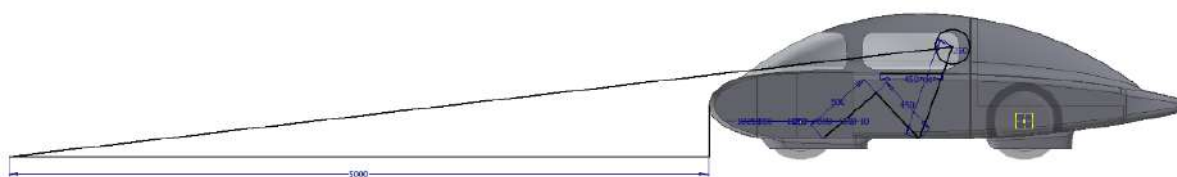
5-2. ábra Levetített kontúrok

Az ajtó méreteinek meghatározásához versenyszabályzatban szereplő méret a 800x500 mm, ezt fektetve helyeztük el a pilóta miatt, így kényelmesebb a ki és beszállása. Ez azért is fontos, mert a sofőrünknek a szabályzatban meghatározott idő alatt kell kiszállnia. További méretnövekedést jelentett a peremezése az ajtónak, hogy ne élbe találkozzanak, ennek köszönhetően lettek egymáson felfekvő felületeink. Az ajtóban ennek a negatívját kellett kialakítani. Természetesen minden egymáshoz kapcsolódó részegységnél szükséges ez a művelet, (szélvédőknél, hátsó burkoló elemnél).



5-3. ábra Ajtó peremezésének 3D-s modellje

Első szélvédő kialakításánál figyelni kellett a látótávolságra, tehát a sofőrnek a jármű előtt 5m-re lévő tárgyat látnia kell. Ehhez is készítettem egy vázlatot a modellen és kiserkesztettem a vágási vonalat.

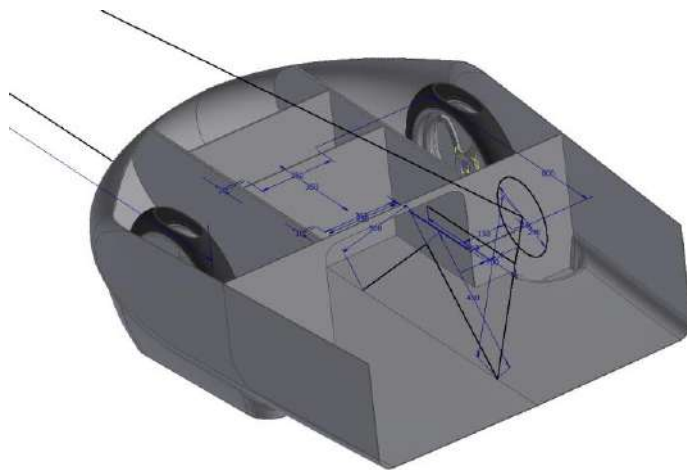


5-4. ábra Látótávolság

5.1 Karosszéria merevítési terve

Mivel a karosszéria „monocoque”, ami azt jelenti, hogy önhordó, tehát nincs belső csőváza, maga a külső héj veszi fel a terheléseket. „Monocoque” anyaga a lehető legjobb tömegszilárdság arány elérése miatt szénszálak kompozit, melynek legfőbb jellemzője, hogy szilárdsági tulajdonságai nagyban függenek az anyag szálirányától és a rétegek számától. Ezeknek a tulajdonságoknak a mérési úton való meghatározása a technológia csoport feladata. Az így kapott adatokkal folytatódik a szerkezeti tervezés, melynek során meghatározzák a különböző külső terhelések hatására a karosszériában ébredő feszültségeket. Ez a bonyolult felületek és anyagmodellek miatt numerikus módszerekkel, véges elem vizsgálatokkal történik. Mivel nincs csőváz a járműben így a bukókeret szerepét most a burkolat látja el, tehát ennek kell megfelelnie a szilárdságtani előírásoknak.

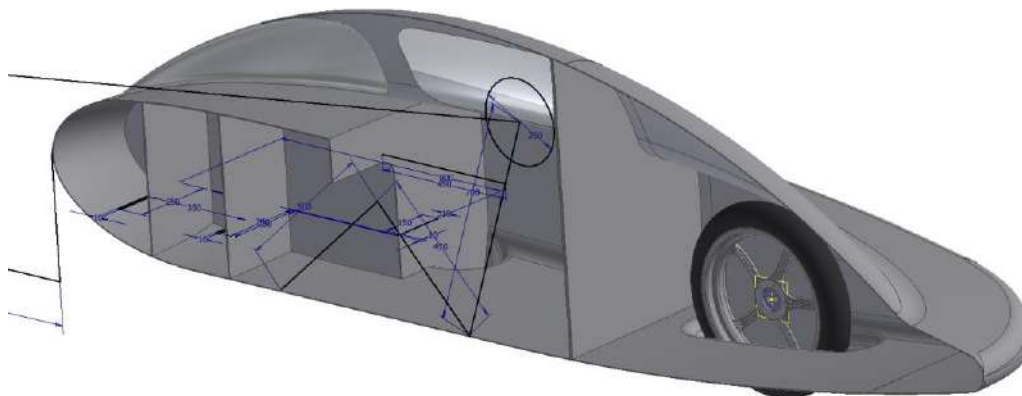
A futómű bekötési pontjaira is igaz az előző állítás, közvetlen a karosszériához kapcsolódnak tehát azokban a pontokban lesz a legnagyobb az igénybevétel. Ehhez a bekötési ponthoz lett létrehozva egy belső merevítő egység. Ennek a méreteit úgy határoztam meg, hogy a pilóta lábai kényelmesen elférjenek elől, illetve lengőkarok is elférjenek és illeszkedjen a műszerfal alsó lapjához. A sofőrt elburkoltam az első kerekektől is.



5-5. ábra Karosszéria merevítési terve

5.1.1 Tűzfal

A karosszéria belső terének domináns alkotóeleme a tűzfal, amelynek a fő szerepe az, hogy külön válassza a pilótafülkét a többi működéshez szükséges alkatrész terétől - teljesítmény elektronikát, a hátsó kerekeket. További kiemelt jelentőségű szempont, hogy a tűzfal a tűzállóság követelményeinek megfeleljen. Ez az egység úgyszintén merevítést ad a karosszériának, amelyre szükség is van, ahogy ezt az előző pontban kifejtettem már.(5.1 alfejezetben) A hátsó futómű bekötési pontok erre az egységre kerülnek fel, előreláthatólag villás befogása lesz a kerekeknek, így a tűzfal fogja tartani az egész futóművet. Úgyszintén erre lesz tervezve a teljesítmény elektronika, a myRIO, az akkumulátor dobozának felfogatása.



5-6. ábra Tűzfal elhelyezkedése a karosszériában

5.1.2 Műszerfal

A műszerfal kialakítása csak a belső merevítőktől függött, amit az előző pontban (5.1 alfejezet) részleteztem. Ehhez az elemhez csatlakozik a kormányrúd illetve a nyomógombok konzolja. Átlagos méretű pilótára lett méretezve és kialakítva a műszerfal, hogy mindent könnyen elérhessen. Mindezek mellett feladata, hogy eltakarja a mozgó alkatrészeket (futóművet). Merevítést szolgáltat a karosszériának, mivel erre támaszkodik fel a szélvédő egy része. A forma és design miatt pontosan követi a szélvédő ívét. A tömegre is figyelni kellett kialakítás során. Egy „tablet” beépítésére is fel kell készülni, amely valószínűleg egy külön konzol egységgel fog csatlakozni hozzá. Ezzel a „tablet”-tel tudja pilótánk vezérelni a járművet, és látja a telemetriából származó adatokat, hogy éppen mennyi a körönkénti és összes fogyasztása, milyen erők hatnak a járműre, egy-egy kanyarodásnál. A követelmények szerint kialakított műszerfal az 5-6 ábrán látható

5.2 Szerelőnyílások

A karosszériára szükség van szerelő nyílásokra is, mert másként megközelíthetetlen lenne a legtöbb belső alkatrészünk, és ezáltal nem lehetne összeépíteni a járművet a karosszéria legyártása után. Ilyen alkatrészek például:

- ❖ futómű bekötési pontok,
- ❖ első lámpatest,
- ❖ elektronika vezérlődoboz,
- ❖ kormánymű,
- ❖ ablaktörlő mechanizmus,
- ❖ antenna,
- ❖ pedálsor,
- ❖ fék légtelenítő,
- ❖ joule mérő kémlelő ablak.

A burkoló elemeknél is kellett alakítanom egy peremet a két egység találkozásánál ugyan úgy, mint minden egyes előző alkatrésznél. A szerelőnyílások takaró elemeit egy elforduló záras megoldással terveztem rögzíteni, hogy menet közben ne essenek ki a helyükről.

Az (5-7 ábra) beszíneztem a szerelőnyílások takaró elemeit, a jobb szemléltetés érdekében.



5-7. ábra Szerelő nyílások elhelyezkedése a járművön (pirossal jelölve)

5.3 Belső bordázat

A merevítéseken kívül még egy plusz bordára van szükség, mivel az eddig merevítők csak a karosszéria elejét merevítik ki megfelelő képpen. Ezért a pilótafülke felső része és az oldalsó részek, az ajtóval együtt kapnak egy bordázatot. Ennek a bordázatnak a nagysága attól függ, hogy a csatlakozó elem előre láthatólag mekkora terhelést fog felvenni. Az ajtó fogja kapni a legmerevebb bordázatot, mert nagy felületről beszélünk, és tartani lehet attól, hogy nem lesz elég nagy a tartása, elhajolhat a saját tömege alatt. Ez látható az alsó képen (5-8. ábra).



5-8. ábra Ajtó merevítése borda alkalmazásával

Következő az oldalsó részek. Ide nem szükséges nagyméretű bordákat betenni, mivel ehhez az elemhez már kapcsolódik a tűzfal és a műszerfal is. (5-9. ábra)



5-9. ábra oldalsó borda



5-10. ábra Pilótafülke bordázata

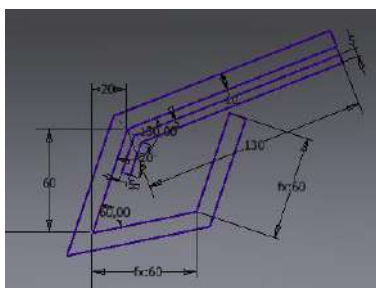
Pilótafülke feletti rész bordázata, itt a legkisebb az igénybevétel, és a legnagyobb a merevség, ez adódik a forma döntött kialakításából. Ide kerül a legkisebb borda. Ennél a résznél már figyelni kellett a belső minimális magasság megtartására is. (5-9. ábra)

6 Lámpák kialakítása

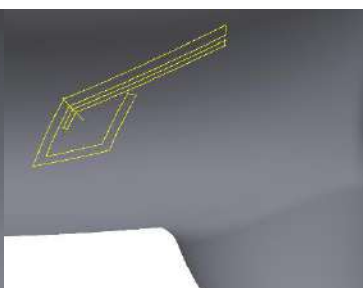
A karosszériába már ebben a fázisban bele kell tervezni a lámpatestek helyét. Ha ezt nem tenném az utólagos tervezés és a kész karosszériába történő beépítés nagyon sok akadállyal járna. Sérülne a fényezése, és az emberi tényezőt sem szabad elfelejteni, más helyre vágja a rést, megremeg a keze. Ehhez tartozik, hogy egy ilyen bonyolult geometriára később nehéz pontosan felmérni a lámpák helyzetét.

6.1 Első lámpa kialakítása

Az első lámpatestnél több forma alkalmazásának lehetősége merült fel, melyek közül a csapat által elfogadott kerül prezentálásra. A karosszéria minden eleme lekerekített formákból áll, hogy ezt kicsit megtörjük az első lámpát szögletesebb kivitelűre terveztem. Érdekesége még a lámpatestnek hogy ebben nem LED-es megvilágítás, hanem optikai szál lesz benne, ezt több méretben is be lehet szerezni. Ezért a lámpa formájánál, méreteinél szélességben 5-10 mm között kellett mozognom, mert ekkora méret már jól látható és kereskedelmi forgalomban is megvásárolható. A karosszéria középsíkjától 30 cm-re kell elhelyezkednie az első lámpatestnek.



6-1. ábra Lámpa vetülete



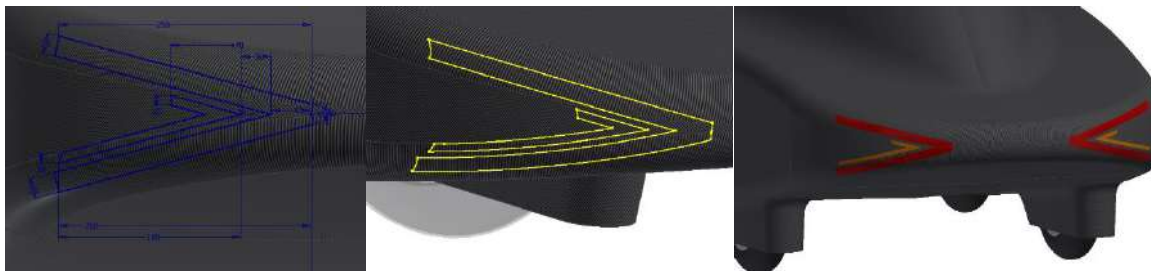
6-2. ábra Lámpa vázlat



6-3. ábra Kész beépítet lámpát

6.2 Hátsólámpa formaterve

A hátsó lámpa formájánál is több lehetőség szóba került, ennél is csak egyet mutatnék be. Itt is a végletekig lekerekített formát szerettem volna megtörni egy szögletes elemmel. A hátsó lámpában is optikai szál lesz beépítve. Magába foglalja még a féklámpa szerepét, és az indexet is.



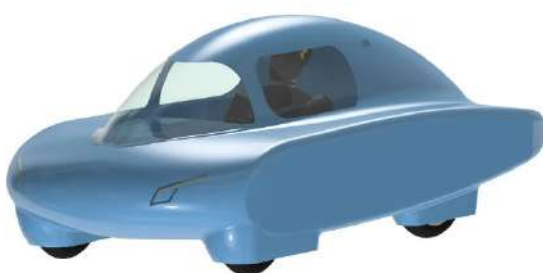
6-4. ábra H. lámpa vázlat 6-5. ábra H. lámpa vetület 6-6. ábra Beépített h. lámpa

6.3 Design szempontok

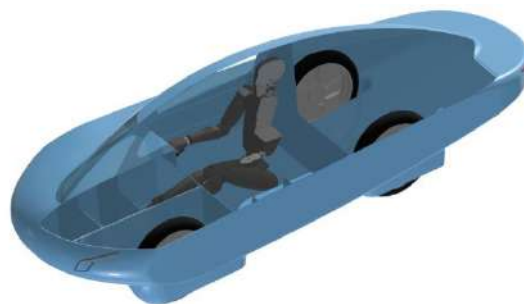
Ezen a rangos versenyen való részvételhez nem elegendő a megfelelő teljesítmény nyújtása, hanem fontos szempontot játszik a jármű külső megjelenése:

- ❖ fényezése,
- ❖ világító testek kialakítása,
- ❖ jármű formáját meghatározó domináns vonalak kiemelése

A fenti pontok számításba vételével megtervezésre került az áramvonalasságot sugalló jármű. Az elkészült jármű az alábbi képeken kerül szemléltetésre. (6-7-6-8. ábra)



6-7. ábra Kész modell



6-8. ábra Kész modell metszet

7 Rétegrend meghatározása

A rétegrend a következő képpen fog alakulni. A fenti fejezetekben véglegesítésre került, hogy a karosszérián „monocoque” kivitelű lesz, így ehhez kellett megtervezni a rétegeket. A tervezés lépéseinél figyelembe kellett venni az egyes elemekre eső feszültségeket. Mint például a futómű bekötési pontjában várhatóan nagy feszültség fog ébredni, mind az első mind a hátsó részben. Ide több rétegnek kell kerülnie és méhsejtes szövettel, vagy habbal is elő lehet segíteni a nagyobb szilárdságot.[13] Az általam kiválasztott anyagok a következők:

Carbon szövet:	DB420 45°
Hab	Divinycell

A karosszéria legnagyobb része három réteg DB 420 szövetből fog készülni. A veszélyes keresztmetszetek, tehát a tűzfal, első merevítő, és a padlólemez, illetve az A oszlopok, 2x2 réteg DB 420 és közte 6-10 mm Divinycell habból fog összeállni.[13]

A futómű bekötési pontoknál 40 mm átmérőben csak karbon szövet lesz egymásra rétegezve 8-10 rétegben, mivel ha csak kis felületen terheljük meg, a habot össze lehet roppantani még kikeménykedett formában is, viszont a karbon szövetett nem. [13]

A későbbi gyártóval még további konzultációk szükségesek ezen a téren.

8 Konklúzió

Az általam kifejlesztett karosszéria modell főként energiatakarékossági versenyekre készült. Ezekben a versenyekben fontos a menetellenállások csökkentése köztük a légellenállásé is. Úgy gondolom ezt sikerült minimalizálnom, mint az látható 4. táblázatban foglalt adatokból. Egy karosszéria aerodinamikai fejlesztését a legvégsőig lehet optimalizálni, csak a fejlesztésre szánt idő szabhat határt neki.

- ❖ Az általam használt programban, a modell könnyen cserélhető, úgyhogy megtartja az a peremfeltételeket.
- ❖ A jól kidolgozott strukturáltságnak köszönhetően a karosszéria geometriai paraméterei könnyen változtathatók az általam felépített modellben.

További célok lehetnek a karosszéria modell további optimalizációja, a rétegrendek pontos meghatározása, későbbiekben a legyártása, versenyeztetése.

Ábra jegyzék

2-1. ábra Green Team Twente járműve [14]	4
2-2. ábra Cityjoule járműve [14]	4
2-3. ábra Roul' cagouille [14]	5
2-5. ábra SZEnegy Team 2015[14].....	5
2-4. ábra SZEnegy Team 2013[14]	5
2-6. ábra Léghajó modell [1] 2-7. ábra Torpedó modell [1]	6
2-8. ábra Élek lekerekítése [1] 2-9. ábra Járay Pál tervei [1].....	6
2-10. ábra csepp alak [1] 2-11. ábra csepp alak [1]	7
2-12. ábra Henger [1] 2-13. ábra Gömb [1]	7
2-14. ábra Leválási buborék [1].....	8
2-15. ábra Lamináris áramlás [1] 2-16. ábra Turbulens áramlás [1].....	9
2-17. ábra Dúcforma [2]	10
2-18. ábra Mért menet ellenállási eredmények.....	11
2-19. ábra Kerékházban történő áramlás [1]	12
2-20. ábra Szendvics szerkezet[9]	13
2-21. ábra Polárdiagramm[11].....	13
2-22. ábra Laminálás folyamata [11].....	14
2-23. ábra Injektálás[11].....	14
2-24. ábra dx, dy ,dz méretű folyadék elem [12].....	16
3-1. ábra Ackermann kormányzás [5].....	19
3-2. ábra Kerék szögelfordulása	21
3-3. ábra Általam definiált dúcforma	21
3-4. ábra Dúcforma geometriája az erő függvényében.....	22
3-5. ábra Orrkúp pontjainak grafikus ábrázolása.....	23
3-6. ábra Kerekek elhelyezése a térben	23
3-7. ábra Egyszerűsített jármű vázlat fő befoglaló méretekkel	24
3-8. ábra Burkolat szerkesztése 3-9. ábra Első kerék burkolat	24
3-10. ábra Hátsó kerék burkolat szerkesztése 3-11. ábra Hátsó kerék burkolat	25
3-12. ábra A tervezett jármű középsíkjának metszete.....	26
3-13. ábra A tervezett jármű oldalának vázlata.....	26
3-14. ábra Karosszéria testének drótváza	27
3-15. ábra Karosszéria testének felület modellje.....	27
3-16. ábra Pilótafülke drótváza.....	28
3-17. ábra Pilótafülke drótvázának ráillesztése a karosszéria testére.....	28
3-18. ábra Jármű karosszéria modelljének kész felülete (bal oldala)	29
3-19. ábra Felületmodellből konvertált test.....	30
3-20. ábra Felület analízis vizsgálata.....	30
4-1. ábra Szimulációs tér	31
4-2. ábra Front felület 0° 4-3. ábra Frontfelület 45°	32
4-4. ábra Frontfelület 90°	32
4-5. ábra Front szimuláció áramvonalakkal 4-6. ábra Front szimuláció felületi nyomás.....	33
4-7. ábra 45°szimuláció felületi nyomás 4-8. ábra 90° szimuláció felületi nyomás.....	33
4-9. ábra Front szimuláció eredménye (kerékjárat kiemelve)	34
4-10. ábra Kerékjárat ív alsó burkolatának tovább fejlesztett modellje	34
4-11. ábra Kerékjárat ív alsó burkolatának szimulációs vizsgálat eredménye	35
5-1. ábra Elemek kivágásának kontúrja 5-2. ábra Levetített kontúrok	35
5-3. ábra Ajtó peremezésének 3D-s modellje.....	36

5-4. ábra Látótávolság	36
5-5. ábra Karosszéria merevítési terve	37
5-6. ábra Tűzfal elhelyezkedése a karosszériában	38
5-7. ábra Szerelő nyílások elhelyezkedése a járművön (pirossal jelölve)	39
5-8. ábra Ajtó merevítése borda alkalmazásával	40
5-9. ábra oldalsó borda 5-10. ábra Pilótafülke bordázata	40
6-1. ábra Lámpa vetülete 6-2. ábra Lámpa vázlat 6-3. ábra Kész beépített lámpát	41
6-4. ábra H. lámpa vázlat 6-5. ábra H. lámpa vetület 6-6. ábra Beépített h. lámpa	42
6-7. ábra Kész modell 6-8. ábra Kész modell metszet	42

Táblázat jegyzék

1. táblázat Peremfeltételek	18
2. táblázat Kerék kanyarodási szögek	20
3. táblázat Dúcforma vizsgálat	22
4. táblázat Ellenálláserő 0°-45°-90°	32

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Lajos Tamás Dr. Rékert Tamás: Járműáramlástan szárazföldi járművek aerodinamikája, BUDAPESTI MŐSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
https://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEAT1025/2010-2011-2/ea/jarmuaramlastan_bevezeto_eloadas.pdf
<http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATMG10/2012-2013-II/gyak/J%E1rmu%E1raml%E1stan%20I%FAj.pdf>
- [2] Dr. Író Béla, Hő és áramlástan 104-109 oldal
- [3] Dr. Emőd István BME Gépjárművek tanszék Járműmechanika 18oldal
- [4] SHELL ECO-MARATHON 2016 OFFICIAL RULES CHAPTER I 22 oldal
- [5] BUDAPESTI MŐSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM,
Közúti járműrendszerek
http://www.gjt.bme.hu/sites/default/files/kozuti-jarmurendszerekbschallgatoi_0.pdf
- [6] Nose cone design, Wikipedia, Haack series,
https://en.wikipedia.org/wiki/Nose_cone_design
- [7] Sneh Hetawal, Mandar Gophane, Ajay B.K., Yagnavalkya Mukkamala: Aerodynamic Study of Formula SAE Car, 12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT, GCOMM 2014
- [8] Bert Blocken, Yasin Toparlar: A followingcarinfluences cyclistdrag:CFDsimulationsandwind tunnel measurements, 2015
- [9] Dr. Tóth Tamás: Kompozitok, Miskolci Egyetem Dunaújvárosi Fiiskolai Kar Kiadó Hivatala, Dunaújváros, 1996
- [10] Moharos István, Oldal István, Szekrényes András: Végeselem-módszer, Typotex Kiadó, Budapest, 2011., ISBN-13 978-963-2795-39-3
- [11] Dr Hargitai Hajnalka Polimer kompozitok technológiái 2011.11.30
- [12] Feszty D. Jakubík T. Numerikus áramlástan Széchenyi István Egyetem Audi Járműfejlesztési Tanszék
- [13] Vedvik N. P. Composite Materials. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology 2011
- [14] <http://www.shell.com/global/environment-society/ecomarathon.html>

Mellékletek

Melléklet 1: Szakdolgozat modell.rar

Melléklet2: Cw érték számoló.xls

Melléklet 3: Front erők.xls

Melléklet 4: 45 fok erők.xls

Melléklet 5: 90 fok erők.xls

Melléklet 6: SZEvolution2.sat