

Versenyautó aerodinamikai rendszerének szélcsatornás mérése

Wind tunnel testing of a race car's aerodynamic package

CHUDI Levente Zsolt¹ BSc hallgató, **DR. MOLNÁR Ildikó**² okl. gépészmérnök, egyetemi docens, **DR. SZLIVKA Ferenc**³ okl. gépészmérnök, egyetemi tanár, **DR. KEPPLER István**⁴ okl. gépészmérnök, egyetemi tanár

¹Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet
H-1081 Budapest, Népszínház u. 8., Telefon: +36 1 666 5319,
Email: chudi.levente@stud.uni-obuda.hu

²Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet
H-1081 Budapest, Népszínház u. 8., Telefon: +36 1 666 5319,
Email: molnar.ildiko@bgk.uni-obuda.hu

³Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet
H-1081 Budapest, Népszínház u. 8., Telefon: +36 1 666 5319,
Email: szlivka.ferenc@bgk.uni-obuda.hu

⁴Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Műszaki Intézet
H-2100 Gödöllő, Páter Károly u. 1., Telefon: +36 28 522 1426,
Email: Keppler.Istvan@uni-mate.hu

Abstract

This study presents the wind tunnel testing results of a first-generation aerodynamic package of a Formula Student racing car. During the measurement procedure, various flow velocities and vehicle configurations were investigated. The resulting aerodynamic loads were determined by using load cells, and smoke visualization was employed to analyze the flow field characteristics. The results highlight the impact of individual aerodynamic components, providing a basis for optimizing design and manufacturing parameters, as well as establishing a benchmark for future developments and CFD (Computational Fluid Dynamics) correlation.

Keywords: aerodynamics, wind tunnel measurement, FS race car, wing elements, down force

Kivonat

A cikkben egy Formula Student versenyautó első generációs aerodinamikai rendszerének szélcsatornás mérési eredményét mutatjuk be. A mérés során különböző áramlási sebességek és járműkonfigurációk kerültek vizsgálatra. A kialakuló terheléseket tömegmérő cellák segítségével határoztuk meg, valamint füst vizualizációt is alkalmaztunk a kialakult áramlás láthatóságának érdekében. Az eredmények rámutatnak az egyes aerodinamikai elemek hatására, segítséget nyújtanak a tervezési és gyártási paraméterek optimalizálására, valamint alapul szolgálnak a további fejlesztések, és numerikus szimulációk összehasonlításához.

Kulcsszavak: aerodinamika, szélcsatornás mérés, FS versenyautó, szárnyelemek, leszorítóerő

1. BEVEZETÉS

A különböző tervezési folyamatok során bevett gyakorlat a numerikus szimulációk alkalmazása. A számítógépes modellek esetében a numerikus áramlástan szimulációk alkalmazása felgyorsítja a végleges modell megtervezését és gyártását. A szimulált környezet és a valóság között azonban gyakran adódnak eltérések. Esetünkben az Óbudai Egyetem Formula Student csapat versenyautó aerodinamikai elemeinek szimulációs eredményeit hasonlítottuk össze szélcsatornában történő mérésekkel. A cikk elsősorban a mérés bemutatásáról és eredményeiről szól, de bemutatunk néhány számítási és mérési eredmény összehasonlítását is. Az Óbudai Egyetemen ez az első olyan Formula Student versenyautó, amelyre aerodinamikai leszorító elemeket terveztünk és versenyeken teszteltünk.

A mérést a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Gödöllőn található szélcsatornában végeztük (1. ábra). A szívott rendszerű vízszintes csatornában az állandó légsebességet folyamatos fordulatszám-szabályozásra alkalmas frekvenciaváltóval felszerelt és elektromotorral hajtott axiálventilátor biztosítja. A csatorna szélessége 2 méter, magassága 1,6 méter. A ventilátor által létesített térfogatáram $64\,800\text{ m}^3/\text{h}$. A maximálisan elérhető fordulatszám 1465 min^{-1} . A mérés során a dunaiújvárosi székhelyű Momert Zrt. által biztosított mérlegeket használtuk.



1. ábra. A szélcsatorna felépítése

2. ALKALMAZOTT MÉRÉSI MÓDSZER

A mérés során 4 azonos mérleget használtunk. Fontos, hogy csak függőleges irányú erőket mértünk. A vízszintes irányú légellenállási erőket nem mértük. Igyekeztünk egy teljesen síkfelületet kialakítani az autó alatt és körül, hogy a valósághoz közelebbi áramlás valósuljon meg. Ügyeltünk arra, hogy a kialakított platform ne akadályozza a mérlegek szabad mozgását. Körülbelül 4-5 mm szabad rést hagytunk a mérlegek mozgó lapjai és a platform között. A mérlegeket az autó kerekei alá helyeztük, melyek kijelzőpaneljeit a szélcsatornán kívülre vezettük. A szélcsatorna beindítása előtt a mérlegeket bekapcsoltuk és lenulláztuk. Miután beindítottuk a szélcsatornát, és elértük a kívánt légsebességet minden esetben megmértük a levegő hőmérsékletét és Prandtl-cső segítségével megmértük a szélcsatornában az autó előtti zavartalan áramlás sebességét.

Az autó aerodinamikai rendszere több különböző egymásra hatással lévő aerodinamikai elemből áll. Az autó elején megtalálható egy több szárnyelemmel rendelkező első szárny (2. ábra). Az első szárny alapkonceptiója szerint, egy főprofilból és több segédszárnyból áll. A főprofil az a szárnyelem, amelyik először találkozik az áramló közeggel, ez van legalul. Feladata a talajhatás kihasználása, a leszorítóerő létrehozása. Ezért különböző hasmagasságoknál mértük meg az első szárny leszorítóerő nagyságát, és ebből kiválasztottuk a lehető legjobbat. A segédszárnyak segítséget nyújtanak a főprofil hatékonyságának maximalizálásában, és az autó körüli áramlás irányításában. A leszorítóerő nagyobb része a főprofil és a talajhatás kapcsolata által jön létre. Az első szárny tartószerkezete úgy lett megtervezve, hogy a teljes első szárny dőlésszöge és magassága is állítható. A számításokkal egyrészt optimalizáltuk a szárnyak dőlésszögét a talajhoz képest, és másrészt a lehető legnagyobb leszorítóerőre. Az autón megtalálható volt még egy a talajhatást kihasználó Venturi-csatorna, és a leszorítóerő jelentős részét képező hátsó szárny is. [1,2,3,6]

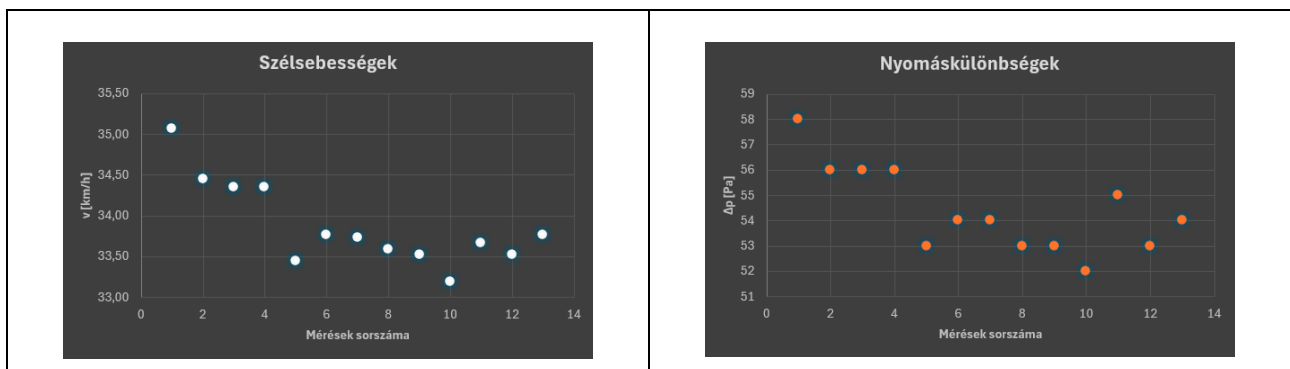


2. ábra. A versenyautó aerodinamikai elemei

A méréseket pilótával és pilóta nélkül is elvégeztük. Minden esetben, amikor a pilóta az autóban ül, az autó hasmagassága 35 mm. A hasmagasság jelenti az autó földtől mért függőleges irányú távolságát, ez az autó legalacsonyabb pontja. (2. ábra). Az első szárny magasságát az első mérési esetben 38 mm-re állítottuk be a talajtól számítva. Ebben az esetben pilóta nélkül mértünk. A második mérés során az első szárny átállítása nélkül, már pilótával az autóban mértünk, ekkora a szárny magassága 15 mm-re változott. A harmadik mérési esetre viszont átállítottuk az első szárny magasságát a szimulációinkban számított 40 mm-es magasságra, ami az optimálisnak tekinthető.

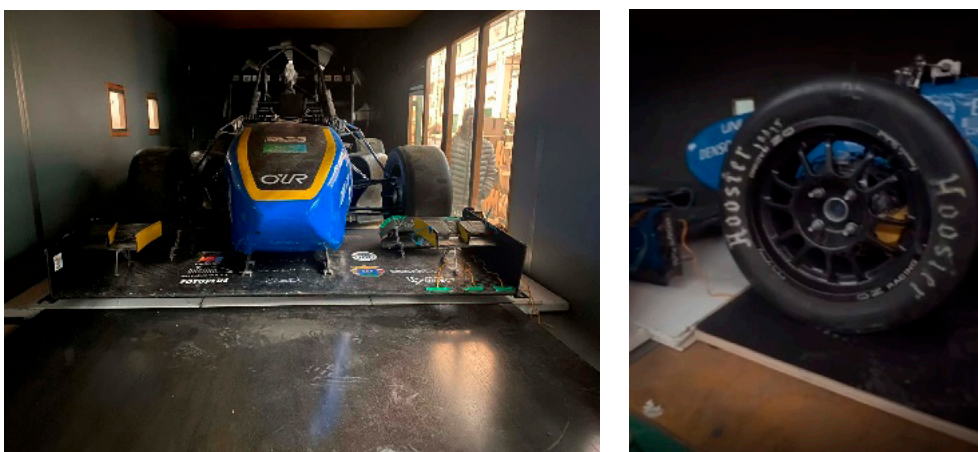
2.1. Szélcsatornában mért átlagsebességek

A különböző autóbeállításokkal és különböző szélesebességekkel végeztünk méréseket, amelyek során mértük a szélcsendes állapothoz képesti függőleges erőnövekedését a kerekeken. Az 3. ábra a fordulatszámokhoz tartozó átlagsebességeket mutatják, amit úgy kaptunk, hogy az összes méréshez tartozó sebességeket a fordulatszámokhoz társítva átlagoltuk. Azért mértünk a legnagyobb sebességértéknél, mert akkor követjük el a legkisebb hibát, itt kapjuk a legpontosabb leszorító értéket, hiszen a mérleg hibája itt kevésbé számít. A mérést többször ismételtük a pontosság érdekében. Kis sebesség esetén a mérlegekkel történő mérés pontatlan, de ezen sebesség értékek esetében is elvégeztük a méréseket. A különböző megfúvási sebességeknél a mérlegek által mutatott többleterő-nagyságokat és kiértékeléseket a 3. fejezet mérési eredmények részében fogjuk látni. [1]



3. ábra. Szélesebesség értékek és a Prandtl-csővel mért nyomásértékek

A 4. ábra egy közbenső állapotot szemléltet, ahol a mérleg előtt már kiépítettük a platformot, de a mérleg mellett még hiányzik. A mérések során itt is kiépítésre került a platform.

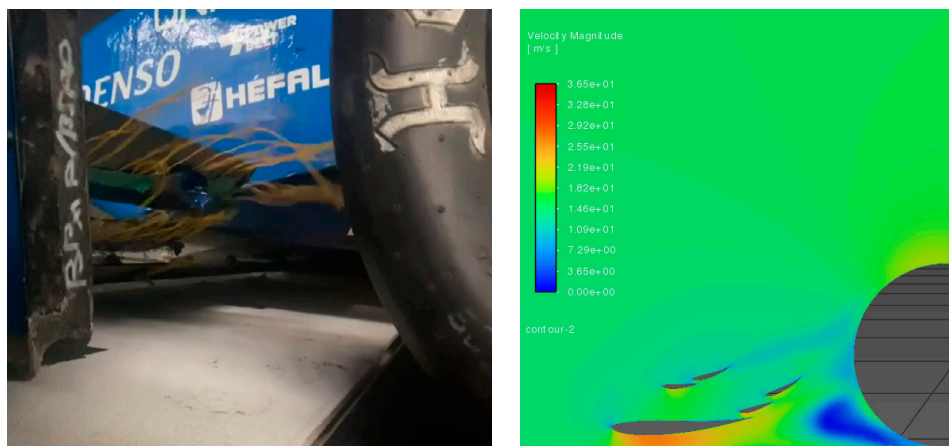


4. ábra. Szélcsatornában elhelyezett versenyautó és a mérleg

2.2. Vizualizációs módszerek

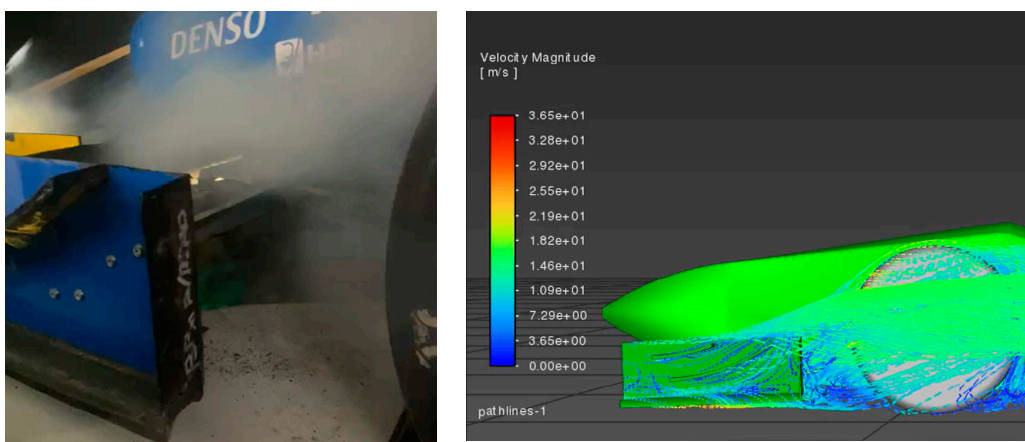
A mérés során két, az áramlás vizualizációjára szolgáló módszert is alkalmaztunk. Az első a fonalas áramlásvizualizációs módszer volt. A módszer lényege, hogy vizsgáljuk a szárnyprofilon elhelyezett fonalak áramlási viselkedését. Ez megmutatja az áramlás irányát, mennyire lobog a fonal, és van-e kezdődő vagy

nagymértékű leválás. Amennyiben a fonalak szorosan a felületre simulnak, és egy irányba mutatnak, az azt mutatja számunkra, hogy az áramlás rendezett és lamináris (5. ábra). Amennyiben a fonalak sztochasztikusan csapkodnak, esetleg visszahajlanak, akkor a profilról leválik az áramlás, és turbulencia alakul ki, ami nagy légellenállást okozhat. Ugyanolyan beállításokkal numerikus szimulációkat is végeztünk, és az 5. ábrán egy sebességeloszlást láthatunk. [4,5,7,8]



5. ábra Fonalas áramlás vizualizáció és ugyanazzal a beállítással a szimulációs vizsgálat

A másik módszer a füsttel történő vizualizáció volt. A füst vizualizációs módszer az aerodinamikai vizsgálatok másik látványos módszere. Míg a fonalas megoldásnál a felületi áramlásokról kaphatunk egy látható képet, a füst vizualizáció esetében az autó körüli szabad áramlást figyelhetjük meg. Az esetünkben ezt egy füstgyertyával valósítottuk meg.



6. ábra Füsttel történő áramlásvizualizáció és szimulációs vizsgálat

3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

3.1. Tengelyeken ébredő erők mérése

A tengelyeken ébredő erők meghatározásához a versenyautó kerekei alá Momert 6641 univerzális falapos mérlegeket helyeztünk el, amelyekkel mértük a kerekeken ébredő normálerőket (4. ábra). A korábban említett mérési beállítások esetében feljegyeztük a mérlegeken kijelzett értékeket. Összegeztük az egy tengelyhez tartozó mérési eredményeket. Az 1. táblázat mutatja a mérési eredményeket, az első és hátsó tengelyen fellépő terheléseket. Az első szárny esetében a leszorítóerőre voltunk kíváncsiak, amelyet szerettünk volna a korábbi szimulációs eredményekkel összehasonlítani. A mérlegek által mutatott mérési eredményeket 1. táblázat összegezi.

Első szárny magasság	Mérések száma	Szélesség (km/h)	Első tengelyre jutó terhelés (N)	Hátsó tengelyre jutó terhelés (N)
38 mm	7	33,88	43,56	137,03
38 mm	5	30,28	35,08	116,15
38 mm	5	22,54	19,35	67,66
38 mm	5	19,51	14,52	49,61
15 mm	5	33,88	21,63	152,13
40 mm	7	33,88	44,97	137,46
40 mm	5	30,28	35,69	116,45

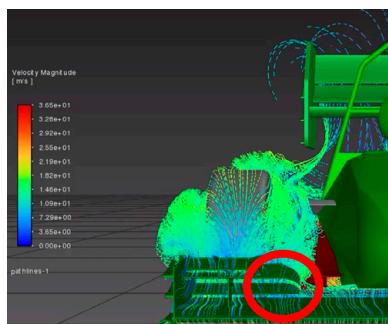
A 1. táblázat első sorában a 38 mm hasmagasságnál mértünk négy különböző sebességnél az ébredő erőket. A 15 mm hasmagasság esetében az autóban benne ült a pilóta. Ebben az esetben láthatóan az erő erősen lecsökken, ami azt jelenti, hogy túl közel van a talajhoz a szárny. A nagyon kis résen a kialakult határrétegek miatt, nem tud kellő mennyiségű levegő áramlani a szárny és a talaj között. Ugyanannál a sebességnél gyakorlatilag a felére leesett a leszorítóerő. A 40 mm hasmagasság esetén nincs nagy különbség a 38 mm-hez képest. A kapott eredményekből látható, hogy az erő a sebesség négyzetével nő, amit a mérési adatok is igazolnak.

$$\left(\frac{19,51 \text{ km/h}}{33,88 \text{ km/h}}\right)^2 \cdot 43,56 \text{ N} = 14,44 \text{ N}$$

A számítás igazolja a mérésünk helyességét. Kis sebességek esetén is pontos eredményeket kaptunk.

3.2. Vizualizációs eredmények

A fonalas áramlásvizualizációs vizsgálat során (5.ábra), azt figyeltük meg, hogy a 7. ábrán piros körrel jelölt szárnyvégeken a szimulációkon is megfigyelhető irányú örvényáram alakul ki. A segédcsárnyák és a főprofil esetében a fonalak a mérés közben a profilokhoz simultak, ami a számunkra megfelelő rendezett áramlást mutatja a szárnyprofilok alsó és felső felületein (5.ábra). Az első kerék előtt megfigyelhető volt, hogy az áramló közeg a kerékhez érve a kerék középső részén felfelé, illetve lefelé kezd el áramolni. Ezt a fonalak úgy mutatták, hogy volt olyan fonál, amely a profil alatti részén a profilhoz simult, azonban a kerék előtt már elkezdett lefelé kanyarodni. A füstvizualizáció esetében megfigyelhető volt, hogy amikor úgy irányítottuk a füstöt, hogy azt a szárny felső profiljai tereljék, a füst a szimulációknak megfelelően a kerék felett áramlott át rendezett módon (7. ábra). A szimulációkat az Ansys Fluent programban készítettük. A méréssel összehasonlított szimulációk esetében sem a talaj mozgása, sem a kerekek forgása sem volt definiálva. A mérések közben a kerekek és a talaj szintén álló helyzetben volt. [2]



7. ábra Első szárny körüli áramvonalak

4. EREDMÉNYEK ÖSSZEGZÉSE

A mérési eredmények kiértékelése után összehasonlítottuk a korábban elvégzett szimulációk eredményeivel. A vizualizációs vizsgálatok során megállapítottuk, hogy a szimulációkban az áramvonalak láthatóan hasonlítanak a valóságban tapasztaltakhoz. A szimulációk során az áramlási tér a szakirodalmaknak megfelelően lett kialakítva. A mérések során, azonban a szélcsatorna mérete a szakirodalmi ajánlásokhoz képest kisebb volt. Ezért elmondható, hogy a szakirodalmak és elméleti összefüggések alapján, a mért adatok esetében nagyobb értékeket kell kapnunk, hiszen a blokkolási arányunk nagyobb, mint a szakirodalmakban megemlített 5-10%-os arány. A blokkolási arány azt írja le, hogy az autó teljes homloklapfelülete hány százaléka a teljes áramlási keresztmetszetnek. Amennyiben ez a százaléktört nagyobb, mint 5-10%, akkor az eredményeinknek nagyobbak kell lenniük, mint a szimulációs adataink. A szimulációs eredmények alapján 33,87 km/h áramlási sebességnél az első tengelyre 29,91 N, a hátsó tengelyre 127,51 N többletterhelés hat. Amennyiben, az előbb említett szimulációs eredményeinket összevetjük az 1. táblázatban kapott eredményeinkkel, azt látjuk, hogy az előbb említett szakirodalmi megállapításoknak megfelelt a mérésünk, hiszen nagyobb értékeket kaptunk. Ez főleg az első szárny esetében figyelhető meg, hiszen ott jelenik meg a legjobban az, hogy a szárny szélső elemei közel voltak a szélcsatorna falaihoz. [1,4,5,7,8]

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet a MOMERT Magyar Optikai Művek Elektromechanikai Zártkörűen Működő Részvénytársaságnak a mérlegek biztosításáért.

Köszönet a MATE Műszaki Intézet, Mezőgazdasági Gépesítési Laboratóriumoknak a mérési helyszín biztosításáért, és a szélcsatorna használatáért.

A 2025-2.1.1-EKÖP-2025-00019-A-144 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2025-2.1.1-EKÖP Egyetemi kutatói ösztöndíj program finanszírozásában valósult meg.



IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Joseph Katz, Race Car Aerodynamics Designing for Speed, Bentley Publishers, 1996
- [2] Míngus Hokkanen, Aerodynamic Development of a Formula Student Front Wing, Degree Project in Technology, 2024
- [3] Ioannis Oxyzoglou, Design & Development of an Aerodynamic Package for a FSAE Race Car, University of Thessaly Department of Mechanical Engineering, 2017
- [4] Jaime Rafael Martins Pacheco, Wind Tunnel Testing of a Complete Formula Student Vehicle, Thesis to obtain the Master of Science Degree in Mechanical Engineering, 2022
- [5] Luís Miguel Poeriras Afonso, Aerodynamic Design and Wind Tunnel Testing of the Rear End of a Formula Student Vehicle, Thesis to obtain the Master of Science Degree in Aerospace Engineering, 2022
- [6] Chudi Levente Zsolt, Szlivka Ferenc, Molnár Ildikó, Fekete Gusztáv, Aerodynamic design and simulation of a racing car with regard to the front wing, 2025
- [7] Aaron Sütsch, Romain Seppey, Aerodynamic Package of a Formula Student Racing Car, Bachelor thesis, 2023
- [8] Elie de Oliveira, Patrick Jenni, Development and Construction of a Formula Student Wind Tunnel Model: Experimental and Numerical Simulation Correlation, Bachelor thesis, 2025