

# Formula student versenyautó áramlástanai modellezésének numerikus vizsgálata

## Numerical investigation of the fluid dynamics modeling of a Formula Student race car

MAGYAR Zsombor István<sup>1</sup> BSc hallgató, DR MOLNÁR Ildikó<sup>2</sup> okl. gépészmérnök, egyetemi docens

<sup>1</sup>Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar  
Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet  
H-1081 Budapest, Népszínház u. 8., Telefon: +36 1 666 5319,  
Email: [magyarzsombor@stud.uni-obuda.hu](mailto:magyarzsombor@stud.uni-obuda.hu)

<sup>2</sup>Óbudai 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](mailto:molnar.ildiko@bgk.uni-obuda.hu)

### Abstract

*In this article, we investigate the aerodynamic characteristics of the Formula Student race car of Obuda University using numerical simulations. Special attention is given to localized refinements during mesh generation and to the construction of the layers required for an accurate representation of the boundary layer, with the aim of further improving the precision of the simulation. During the study, we planned to apply different turbulence models in order to compare their performance and determine which provides the most reliable results for a Formula Student race car. The numerical model is configured with boundary conditions that correspond to the physical reality, enabling the subsequent validation of the results through experimental measurements.*

**Keywords:** formula student racing car, aerodynamics, CFD, turbulence modeling, mesh generation

### Kivonat

*A cikk keretében az Óbudai Egyetem Formula Student versenyautójának aerodinamikai jellemzőit vizsgáljuk numerikus számítással. Kiemelt figyelmet fordítunk a hálógenerálás során a lokális finomításokra, és a határréteg megfelelő leírásához szükséges rétegek kialakítására, annak érdekében, hogy a szimuláció pontosságát tovább növeljük. A vizsgálat során különböző turbulencia modell használatát terveztük, hogy összehasonlítsuk teljesítményüket, és meghatározzuk, melyik biztosítja a legmegbízhatóbb eredményeket egy Formula Student versenyautó esetében. A numerikus modell beállítása a fizikai valóságnak megfelelő peremfeltételkel történik, így lehetővé válik az eredmények későbbi kísérleti, mérésekkel történő validálása.*

**Kulcsszavak:** aerodinamika, CFD, turbulencia modellek, hálógenerálás, formula student versenyautó

## 1. A VERSENYAUTÓVAL SZEMBENI KÖVETELMÉNYEK ÉS AZOK NUMERIKUS VIZSGÁLATA

A Formula Student versenyek alapvetően két fő részre oszthatók, statikus és dinamikus értékelési feladatokra. A statikus versenyszámok a csapatok mérnöki tervezési kompetenciáját, költség- és gyártástechnológiai szemléletét vizsgálják, míg a dinamikus kategóriákban a jármű tényleges pályán mutatott teljesítménye kerül fókuszba. Az utóbbiak különösen érzékenyek a konstrukciós és aerodinamikai kialakításokra, ezért fontos szerepet töltenek be a jármű átfogó fejlesztésének értékelésében.

A gyorsulási versenyszám, amely egy 75 méter hosszú egyenes szakaszon zajlik, elsősorban a jármű gyors irányváltás nélküli egyenes vonalú mozgását vizsgálja. [1] Itt az aerodinamikai célrendszer, hogy a lehető legkisebb légellenállási tényezőt érjük el. A leszorító erő ebben a kontextusban másodlagos jelentőségű, hiszen az alacsony sebességtartományban, és rövid távon nem biztosít akkora előnyt, mint más versenyszámokban. Ennek megfelelően a többprofilos szárnyak elemeit a csapatok általában minimális vagy nulla dőlésszögre állítják annak érdekében, hogy a jármű ellenállása csökkenjen, miközben a mechanikai tapadás továbbra is elegendő a hatékony gyorsításhoz. Ezzel szemben a skidpad versenyszám a jármű oldalirányú dinamikáját vizsgálja egy nyolcas alakú pályán, ahol a kanyarsebesség, a stabilitás és az abroncsok oldalirányú tapadása kerül előtérbe [1]. A kanyarodási képesség szempontjából meghatározó a kerekekre jutó normálerő, amely növeli a gumiabroncsok súrlódását. Bár a nagyobb statikus tömeg hasonló módon növelhetné a tapadást, az a jármű gyorsulási és kezelhetőségi tulajdonságaira kedvezőtlenül hatna, valamint kanyarodás közben jelentős tömegáthelyeződést okozna, ami végső soron rontaná a stabilitást. Ezen problémák miatt a modern Formula Student járművek esetében az aerodinamikai leszorító erő jelenti az optimális megoldást. A jármű tömege alacsony maradhat, miközben nagy sebességű kanyarodásnál a leszorító erő jelentősen megnöveli a gumikra ható függőleges erőt, így az oldalirányú tapadást is. A csapat eredményei jól tükrözik az aerodinamikai fejlesztések hatását. Az OUR 002 (Tukán) versenyautó aerodinamikai csomag nélkül 7,069 másodperces időt ért el a skidpad teszten, míg az OUR 003 (Pelikán) versenyautó az első, amely komplett aerodinamikai elemekkel rendelkezett 5,566 másodpercre javította ugyanazon versenyszám eredményét. A mért javulás jól mutatja, hogy az aerodinamikai elemek nem csupán kiegészítő komponensek, hanem a jármű teljesítményének kulcsfontosságú meghatározói, különösen a kanyarodási dinamika és a gumiterhelés optimalizálása szempontjából.

A jármű aerodinamikai teljesítményének további fejlesztéséhez elengedhetetlenek a részletes áramlástani CFD (Computational Fluid Dynamics) elemzések. A CFD alkalmazása kiemelkedően fontos a Formula Student járművek fejlesztési folyamatában, mert lehetővé teszi a különböző aerodinamikai konfigurációk gyors, költséghatékony és reprodukálható vizsgálatát anélkül, hogy minden módosítást fizikai prototípuson kellene tesztelni. A laboratóriumi és a teszt pályán történő mérések jelentős idő- és erőforrásfordítást igényelnek, addig a numerikus szimulációk akár rövid időn belül képesek részletes áramlástani információt szolgáltatni a jármű környezetében kialakuló nyomás- és sebességeloszlásról, a leszorító erő és a légellenállás mértékéről, valamint a kritikus áramlási jelenségekről, mint például a leválás vagy a lokális örvényképződés.

A CFD alapja a Navier-Stokes-egyenletek numerikus megoldása, amelyek a folyadékok és gázok mozgását leíró alapvető fizikai törvényeket a tömeg-, impulzus- és energiamegmaradás elvét foglalják magukba. A turbulens viszkozitást tartalmazó Navier-Stokes egyenletet oldjuk meg, és a turbulens viszkozitásra különböző elméletek születtek, amelyek közül mi a  $k-\epsilon$  és  $k-\omega$  SST turbulencia modelleket vizsgáljuk. [2] [4] A számítógépes hálógenerálás segítségével a vizsgált áramlási tartományt kisebb cellákra (térfogatra) osztjuk, majd az egyenleteket ezen lokális tartományokra oldjuk meg iteratív módon. Ennek eredményeként nagy felbontású, térben és időben részletes képet kapunk az áramlás viselkedéséről, amely kísérleti úton gyakran csak jelentős költségek és korlátozások mellett lenne elérhető. A numerikus áramlástani vizsgálatok tehát olyan mérnöki döntéstámogató eszközök, amelyek lehetővé teszik a különböző aerodinamikai elemek hatásának előzetes kiértékelését, a koncepciók összehasonlítását, valamint a jármű teljesítményének optimalizálását már a fejlesztési folyamat korai szakaszában.

A kutatás tudományos újdonsága abban rejlik, hogy a turbulens áramlások modellezését több, egymással összehasonlított turbulenciamodellel alkalmazásával vizsgáljuk, és ezek hatását értékeljük a jármű aerodinamikai teljesítményére. Ez lehetőséget teremt a különböző modellek pontosságának és alkalmazhatóságának kritikus elemzésére, különösen a leválás, valamint a lokális örvényképződés előrejelzésében, amelyek meghatározó szerepet játszanak a nagy teljesítményű versenyjárművek esetében.

## 2. ANYAG ÉS MÓDSZER

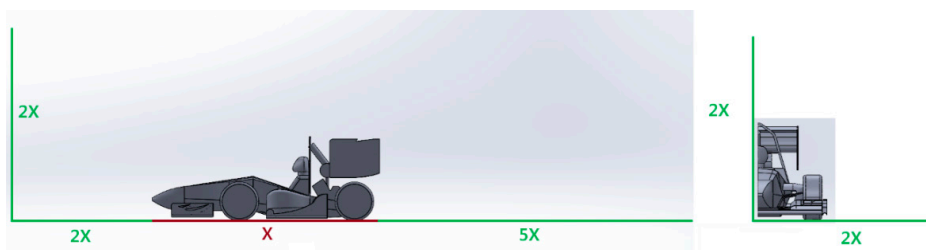
### 2.1. Alkalmazott szimulációs program

A numerikus szimulációk készítéséhez az ANSYS Fluent szimulációs programot használtuk, számunkra a könnyen kezelhető felület és a kiegészítő hálózó program miatt. A vizsgálatok során elsődlegesen a  $k-\epsilon$  turbulencia modellt használtuk a stabil és gyorsan konvergáló tulajdonsága miatt, amely jól kezeli a szabad áramlásokat, viszont hátránya, hogy a falak közelében hajlamos túlbecsülni a turbulencia mértékét, így a

valóságához képest túlságosan a felületen tartja az áramlást, és későbbre jósolja annak leválását. [2] Ezek kiküszöbölése érdekében esett a választásunk a  $k-\omega$  SST modellre. Sok helyen elterjedt, mivel a falak közelében a  $k-\omega$  számol, távolabb viszont a  $k-\epsilon$  előnyeit ötvözi. Ezáltal rendkívül pontosan és időben megjósolja az áramlás leválását, ami miatt a komplex aerodinamikai tervezés első számú iparági standardja. [2]

## 2.2. Modell készítése

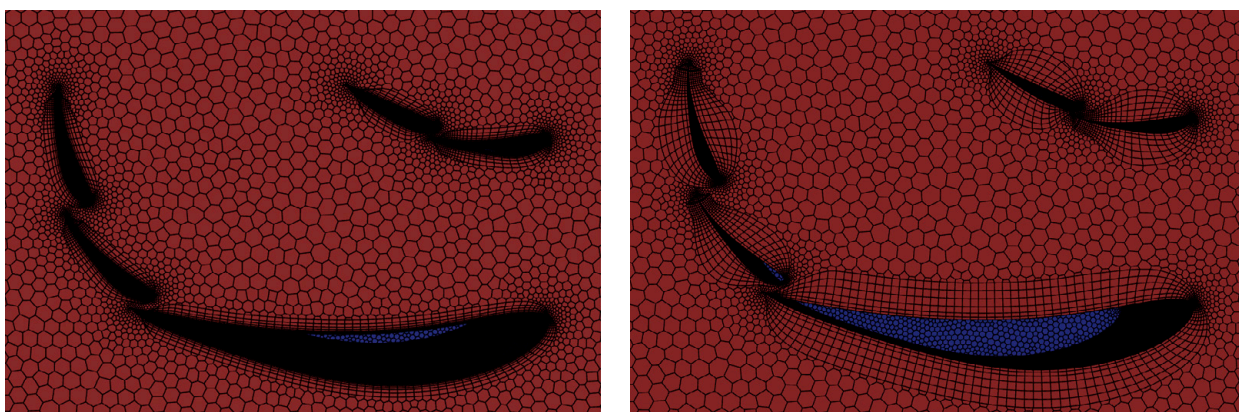
A szimuláció készítésének első lépése a számítási tartomány (domain) definiálása. A tartomány keresztmetszetét úgy kell megválasztani, hogy a jármű homlokfelülete ne haladja meg a beömlő keresztmetszet 10%-át. Bevett ökölszabály a jármű névleges hosszának alapul vétele a beömlési szakasz hossza, valamint a keresztmetszet szélessége és magassága egyaránt a névleges hossz kétszerese, míg a kilépési szakasz hossza a modell mögött a névleges hossz ötszörösét teszi ki (1. ábra).



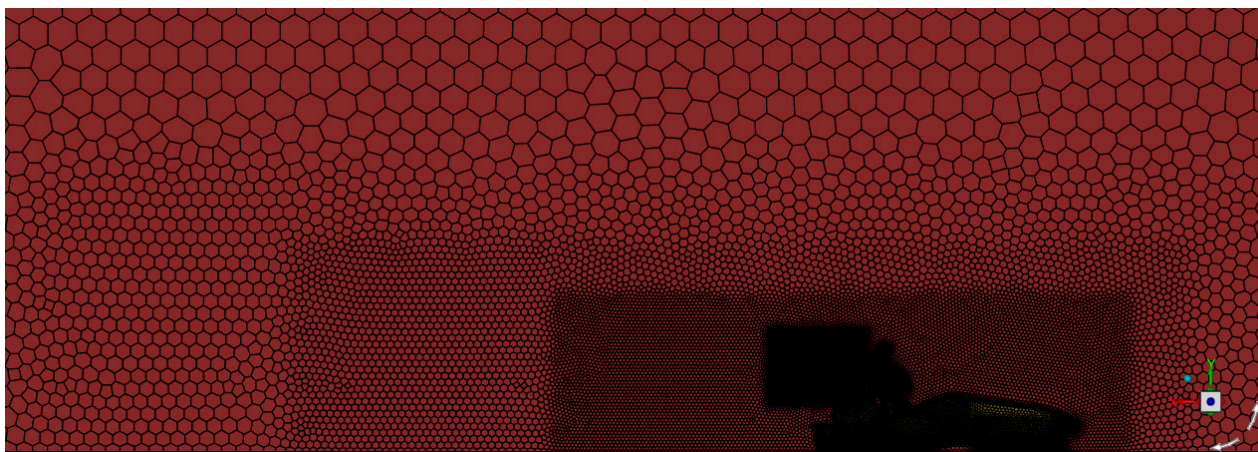
1. ábra. A számítási tér és a szimmetriafeltételek szemléltetése

A hálózás során a kritikus zónák egy finom felbontást kaptak, de a cellaszám csökkentése érdekében kihasználtuk a versenyautó szimmetrikusságát, és a számolás során az autónak csak a felét vettük figyelembe. A háló határretegét prizmákból alakítjuk ki. Ez függ egy névleges hosszától, ami lehet az egész autó hossza, és lehet az autó egyes elemei is. Függ még egy kívánt  $y^+$  számtól, amit a turbulencia modell ad meg. Magas  $y^+$  modell ( $30 < y^+ < 300$ , magas) a faltól távolabbi áramlást, az alacsony modell meg ( $y^+ < 5$ , alacsony) a falhoz közeli áramlást mutatja meg pontosabban. [4] A  $k-\epsilon$  modellnél a névleges hossz alapján egységesen  $y^+ = 50$  céltértekkel,  $k-\omega$  SST esetén pedig a szárnyaknál a névleges hossz alapján  $y^+ = 4$ , a test többi részén  $y^+ = 50$  értékkel alkalmaztuk (2. ábra). A térbeli sűrítést egymásba ágyazott finomítási tartományok biztosítják, az aerodinamikai elemek és kerekek körül helyi sűrítést alkalmazunk (a névleges hossz 0,1-szerese az elem előtt és mellett, illetve 0,5-szerese mögötte), az autó körül pedig globális zónákat alakítunk ki (3. ábra). A cellaméret a modelltől távolodva minden lépcsőben az aerodinamikai elemektől a közeli, köztes és távoli mezőig szakaszonként a kétszeresére növekszik. Az oldalirányú és függőleges kiterjesztés az autó névleges méreteit alapul véve három lépcsőben valósul meg, először 1,1-szerese, majd 1,5-szerese, végül 2-szerese szerint. Az ébredő áramlás megőrzése érdekében a modell mögött a névleges hossz 1-szeres, 2-szeres és 3-szoros távolságig tartunk fenn fokozott hálósűrűséget.

Rácsfüggetlenség vizsgálata céljából az alap cellaméretet (20 mm) kisebbre vettük, (18 mm) és kapott eredményekből megállapítottuk, hogy az nem térnek el. A választott alap cellamérettel több szimuláció is elkészült, több geometriával (közel 30 különböző geometria), és az eredmények eltérése nem mutat problémára. [3] [4]



2. ábra. Hátsó szárny  $k-\omega$  SST hattárréteg prizmák (ANSYS Fluent), hátsó szárny  $k-\epsilon$  hattárréteg prizmák (ANSYS Fluent)



3. ábra. A számítási tartomány lokális és globális hálósűrítése

A szimulációk során a hálózati stratégia és peremfeltételek alkalmazásával meghatározott  $y^+$  értékek a különböző turbulenciamodellek esetében eltérő eloszlást mutatnak. A  $k-\varepsilon$  modellnél alkalmazott magasabb célértékhez képest a  $k-\omega$  SST modell lokálisan finomabb falmenti felbontást igényel, különösen az aerodinamikailag kritikus elemeknél. Az egyes modellekhez tartozó  $y^+$  eredményeket és azok összehasonlítását az 1. táblázat tartalmazza.

Lefutott szimuláción a felületeken az átlag  $y^+$ 

1. táblázat

	k- $\varepsilon$ turbulencia modell ( $y^+$ )	magas/alacsony $y^+$ modell	k- $\omega$ SST turbulencia modell ( $y^+$ )	magas/alacsony $y^+$ modell
Váz, motor, futómű	42,29	Magas	41,32	Magas
Első kerék	70,73	Magas	65,69	Magas
Hátsó kerék	66,98	Magas	66,02	Magas
Első Szárny	52,63	Magas	4,63	Alacsony
Hátsó Szárny	55,96	Magas	4,45	Alacsony
Oldaldoboz	39,53	Magas	3,81	Alacsony
Venturi-csatorna	54,12	Magas	4,53	Alacsony

A szimuláció során a  $k-\varepsilon$  és a  $k-\omega$  SST turbulenciamodelleket alkalmazzuk az áramlási kép elemzéséhez. A bemeneti peremfeltétel sebességét az autó átlagsebességéhez igazítva 15 m/s értékre állítjuk be. A valóságban áramlás érdekében a talajfelszín mozgó falként definiáljuk 15 m/s, a kerekre pedig a haladási sebességnek megfelelő, 57,7 rad/s mértékű forgó peremfeltételt adunk meg. A levegő fizikai jellemzőit standard atmoszférikus adatokkal (1,2 kg/m<sup>3</sup> sűrűség, 1,7894·10<sup>-5</sup> kg/ms dinamikai viszkozitás) vesszük figyelembe. A referenciaértékek számításához az autó névleges hosszát és a bemeneti paramétereket használjuk. A numerikus megoldáshoz csatolt (coupled) sémát alkalmazunk, a térbeli diszkretizációt pedig a nagyobb pontosság érdekében másodrendű szélirányú (second-order upwind) módszerrel végezzük.

### 3. KAPOTT EREDMÉNYEK

A szimulációkból megkapjuk a teljes autóra vonatkozó eredményeket. A negatív felhajtóerőt (azaz a leszorító erőt)  $F_l$  [N] és a légellenállás erőt az  $F_d$  [N], amelyek a sebességtől függenek. A felhajtóerő-tényező

$C_l$  [-] (negatív, mivel leszorító erőként valósul meg), az ellenállás-tényező  $C_d$  [-], és az aerodinamikai hatékonyságot kifejező  $C_l/C_d$  [-] hányados pedig sebességtől független együtthatók. A koordináta rendszerben az y tengely a talajtól felfele mutat, így az eredményekben a leszorító erők negatívak (3. ábra). Az x tengely az autó menetirányával szemben van elhelyezve, így a légellenállás pozitív érték (3. ábra). A szimulációkból kapott eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

k-ε és k-ω SST turbulencia modellek eredményei

2. táblázat

	k-ε realizable	k-ω SST	Eltérés
Leszorító erő - $F_l$ [N]	-546,19	-508,11	~7 [%]
Légellenállás - $F_d$ [N]	202	187,72	~7 [%]
Felhajtóerő-tényező - $C_l$ [-]	-3,18	-2,96	~7 [%]
Ellenállás-tényező - $C_d$ [-]	1,18	1,09	~8 [%]
Aerodinamikai hatékonyság - $C_l/C_d$ [-]	2,7	2,71	~0 [%]

Az eredményekből megállapítható, hogy a k-ε modell eredményei nagyobbak egy nagyjából 7%-os eltéréssel. A szárny végén a leválási hely a k-ε modellben később alakul ki, mint a k-ω SST modellben.

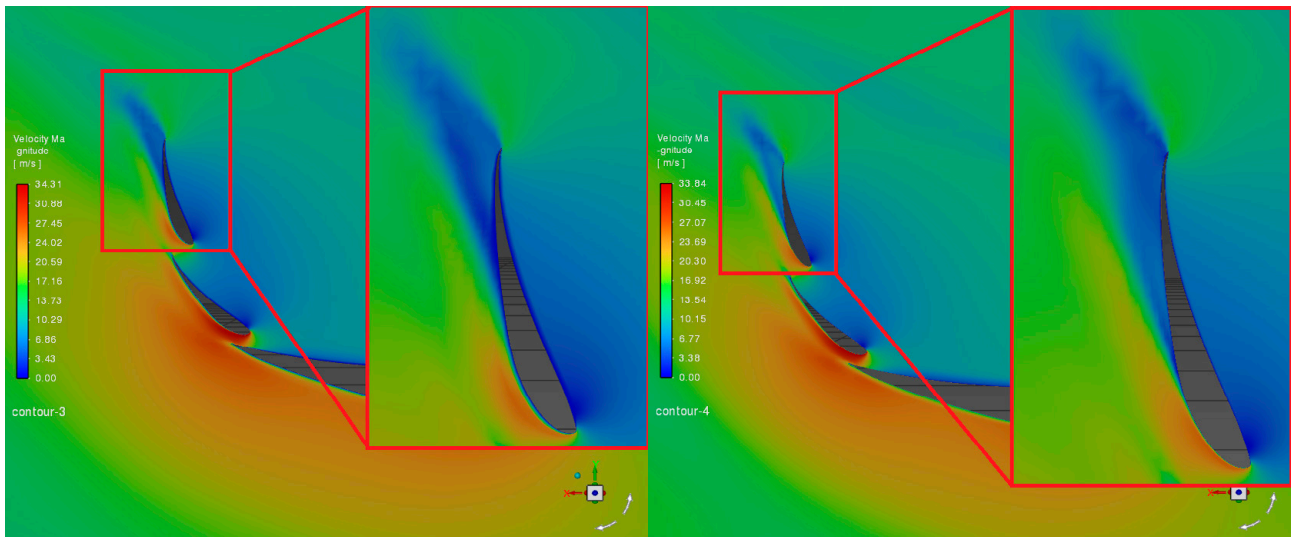
Aerodinamikai elem specifikus eredményei

3. táblázat

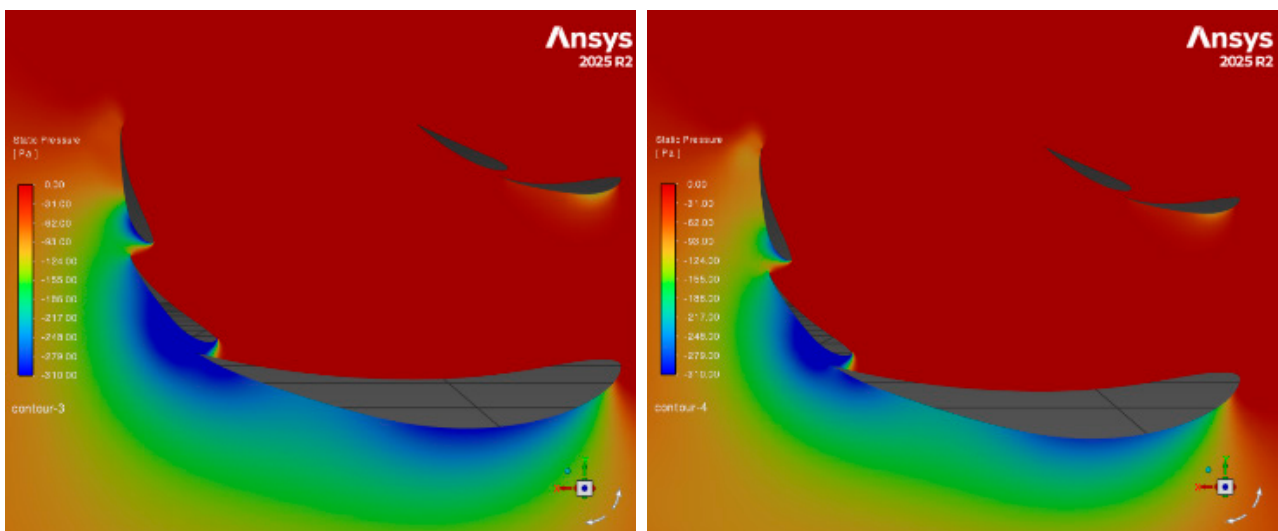
	Első szárny		Venturi-csatorna		Hátsó szárny	
	k-ε realizable	k-ω SST	k-ε realizable	k-ω SST	k-ε realizable	k-ω SST
Leszorító erő $F_l$ [N]	-195,18	-186,78	-142,77	-137,56	-180,61	-163,2
Légellenállás $F_d$ [N]	22,46	22,95	24,8613	24,32	67,46	63,14
Aerodinamikai hatékonyság $C_l/C_d$ [-]	-8,69	-8,14	-5,74	-5,66	-2,68	-2,58
Leszorító erő százalékos eltérés	~4%		~4%		~9%	

A 3. táblázatban látható, hogy a hátsó szárnynál jelenik meg jelentős eltérés. A leszorító erő esetében lép fel nagyobb változás, a légellenállás viszont közel hasonló (nagyobb változás a hátsó szárnyánál van).

A 4. ábrán lévő sebesség eloszláson látható, hogy a k-ω modellben a fal közeli leválás előbb jelenik meg, és a k-ε modellen a fal mellé torlódik a levegő, emiatt később válik le onnan. Emiatt alacsonyabb nyomás jön létre a szárny alatt (5. ábra), viszont nagyobb leszorító erő ébred. Az autó dinamikai szempontjából ez az erő különbség azt jelenti, hogy a COP (center of pressure) pozíció miatt az első kerekekre több erő hat, mivel hátul kevesebb leszorító erőnk lesz, ami változást hozhat menetstabilitás szempontjából gyorsabb kanyarokban. [5]



4. ábra. Sebesség eloszlás a hátsó szárnyon  $k-\epsilon$  realizábilis (bal oldali);  $k-\omega$  SST (jobb oldali)



5. ábra. Statikus nyomás eloszlás hátsó szárnyon  $k-\epsilon$  realizábilis (bal oldali);  $k-\omega$  SST (jobb oldali)

## 4. KÖVETKEZTETÉS ÉS TOVÁBBI FEJLESZTÉSEK

Végleges következtetés kizárólag a szimulációs eredmények, és a valós mérések összevetését követően vonható le. Ugyanakkor a  $k-\epsilon$  turbulenciamodell sajátosságai miatt a jövőben indokolt a csapat számára a  $k-\omega$  SST modellre való átállás a nagyobb prediktív pontosság érdekében. Az átállás ugyanakkor megnövekedett számítási igénnyel járhat. A jelenlegi futási idők alapján a  $k-\epsilon$  modell ~6 óra, míg a  $k-\omega$  SST modell ~10 óra számítási időt igényel. Emiatt elengedhetetlen egy jól megtervezett ütemezés.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] \*\*\*, Formula Student Rules 2026, [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2026/rules/FS-Rules\\_2026\\_v1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2026/rules/FS-Rules_2026_v1.1.pdf)
- [2] Versteeg, H. K., Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (Second Edition), Pearson Education (Prentice Hall), Harlow, 2007.
- [3] Kirchberger Michael: CFD Simulation and Validation of a Formula Student Car., <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/188917/1/Kirchberger%20Michael%20-%202023%20-%20CFD%20Simulation%20and%20Validation%20of%20a%20Formula%20Student...pdf> (Utolsó letöltés: 2026. 02.24.)
- [4] Schlichting, H., Gersten, K., Boundary-Layer Theory, Springer, Berlin, 2017.
- [5] Katz, J., Race Car Aerodynamics: Designing for Speed, Bentley Publishers, Cambridge, 1995.