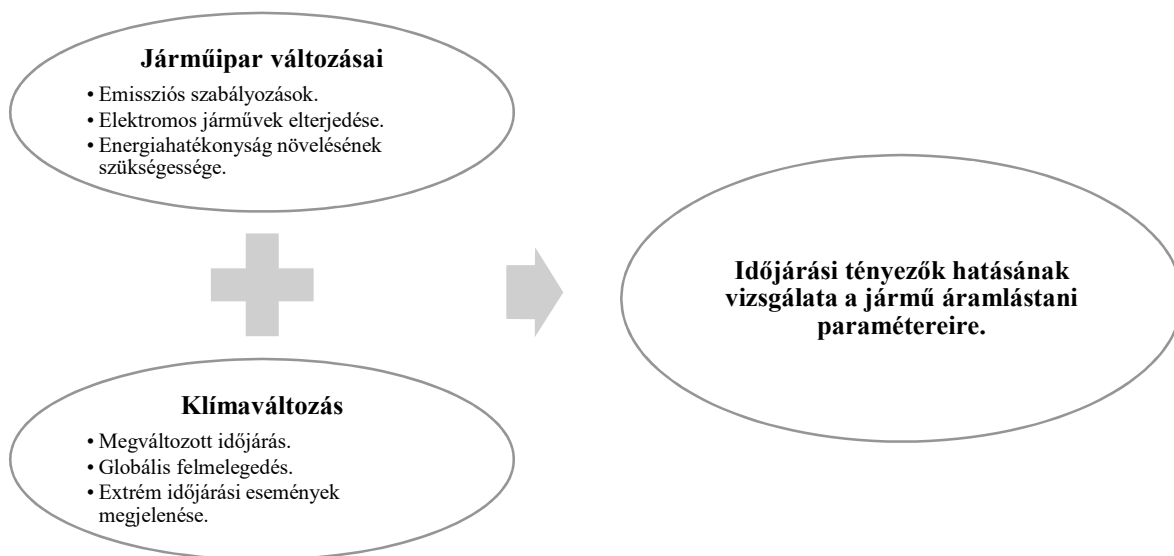


1 Motiváció

A kutatási téma megalkotását és szükségességét két területen végbemenő változások indikálták. Egyrészt a járműipari változások: elektrifikáció és a belsőégésű járművek szabályozása, illetve a klíma- és az időjárási trendek változása (1. ábra)



1. ábra Kutatási téma alappillérei (forrás: saját ábra)

Az elektromobilitás napjaink egyik legjobban kutatott területe. Az elektromos autók elterjedése nagy hatással van az iparágra (Grosso és mtsi, 2021). Robbanásszerű elterjedésének egyik gátja a magas költségű, nehéz és limitált energiamennyiséget tárolni képes akkumulátor (Hang, 2023). A moderált hatótávú elektromos autók használata hosszútávú utakra szervezést és körültekintést igényel. A töltőpontok helytelen kiválasztása az utazási idő ugrásszerű növekedését okozhatja. Így a megállók helyes kiválasztása és minimalizálása fontos tényező az elektromos járművek használók között (Yichan és mtsi, 2025). A polgári felhasználás mellett az elektromos kamionok is megjelentek, melyek közt még fontosabb az optimális megállók megválasztása és az energiahatékony üzemeltetés. Az elektromos járművek megjelenése megváltoztatta az autóipar összetételét. Napjainkban a közúti járművek legfontosabb paraméterei az alacsony légellenállási együttható és a nagy hatótávolság. Ezek a

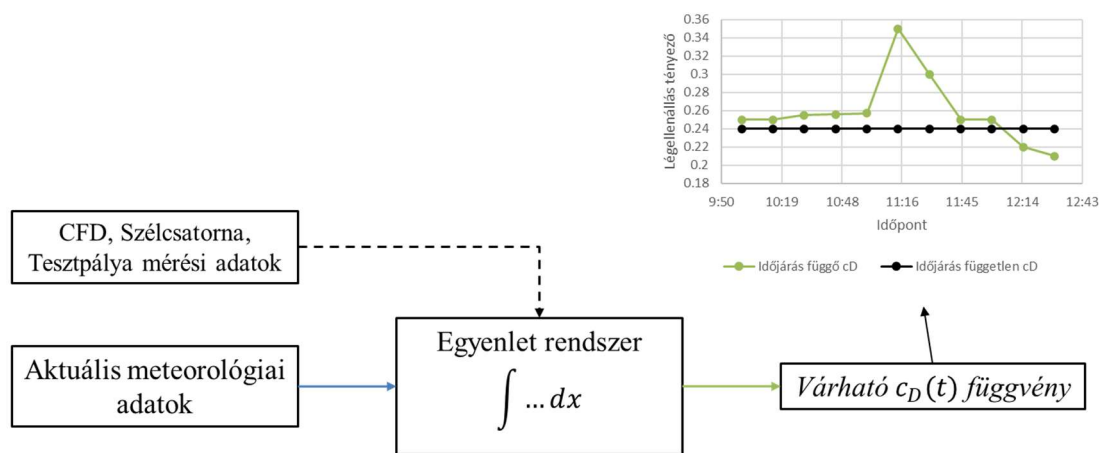
¹ Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Prof. Dr. habil. Lakatos István, egyetemi tanár, Vállalati szakértő: Dr. Hlinka József, Munkáltató: ZalaZONE InnoTech Nonprofit Kft.

paraméterek számos tényezőtől függenek, de a fejlesztések kulcsa az energiahatékonyság növelése, és az ezt befolyásoló paraméterek meghatározása, szabályozása. Az energiahatékonyságot befolyásoló tényezők közé tartozik a jármű aerodinamikai paraméterei is, melyet az időjárási tényezők erősen befolyásolnak (Winkler és mtsi, 2016)

Jelenleg az időjárási trendek is meghatározó változásokon mennek keresztül (Gilli és mtsi, 2024). A klímaváltozás és a globális felmelegedés okozta változások befolyásolják és módosítják az eddig megszokott klímát. A változásoknak köszönhetően folyamatos az átlaghőmérséklet növekedése, a viharos szelek esetszáma évről-évre nő (Vigh, 2023), illetve az erős csapadékozások, felhőszakadások száma is emelkedő trendet mutat (Szabó, 2023).

2 Kutatási téma rövid bemutatása

A kutatás célja, hogy a megfelelő mérési módszerekkel és - apparátussal meghatározzuk azokat az időjárási tényezőket, melyek mérhetőek és releváns hatással vannak a jármű áramlási paramétereire. Ezeket felhasználva méréseket végzünk annak érdekében, hogy a mérési adatok alapján felállítsunk egy matematikai modellt. A modellbe integrált egyenletrendszer, mely az előzetes mérések által lesz meghatározva, képes becsülni az időjárási előrejelzések (aktuális, 1 órán belüli várható időjárási trend) szerint, hogy a jármű légellenállás tényezőjére milyen hatással lesz. Ezáltal meg lehet határozni egy légellenállás tényező – idő függvényt, mely folyamatosan aktualizálódik a friss időjárás előrejelzés szerint. A matematikai modell sematikus ábrázolása az 2. ábrán látható.



2. ábra Matematikai modell sematikus ábrája az időjárási tényezők és a légellenállás tényező kapcsolatának meghatározására (forrás: saját ábra)

A matematikai modell az aktuális időjárási előrejelzések alapján képes lesz különböző típusú (formájú) járművek légellenállás tényező – idő függvény meghatározására. A becslés alapján

a modell jelzést és opciót ad a jármű vezetőjének, ha a betervezett útvonal nem teljesíthető a rendelkezésre álló energiával és korábbi töltési pontok lehetőségét ajánlja fel. A matematikai modell kifejlesztése után a közúti járműveken túl, a szállítmányozásban résztvevő elektromos eszközökre (például kamionok, tehervonatok) is kiterjesztésre kerül, mellyel optimalizálható az energiafogyasztásuk. Ezzel hozzájárulva a fenntartható közlekedés megteremtéséhez.

3 Kutatás jelenlegi állása

A kutatás során az előzetes CFD szimulációk, melyek a vizsgált probléma relevanciájának alátámasztása érdekében végeztem elkészültek. A szélcsatornás mérések szintén elvégzésre kerültek. Jelenleg azok a CFD szimulációs vizsgálatok folynak, melyeket a szélcsatornás és tesztpályás mérések eredményeivel fogok összehasonlítani. A tesztpályás mérések előkészítése folyamatban van.

3.1 Előzetes 2-dimenziós szimulációk

3.1.1 Csapadék

A csapadékkal kapcsolatos mérések során két különböző típusú CFD szimulációs vizsgálatot végeztem. Az első típusban az esőcseppeket, mint szilárd részecske modelleztem. A második típusú vizsgálat során a közeg átlagsűrűségét növeltem. Az átlagsűrűség elvén működő szimulációs modell azért került megvizsgálásra, mert a szilárd részecskék modellezése nagyon körülményes és időigényes volt. Emellett a numerikus modell bizonytalansága is magas. Ezért egy alternatív megoldás megvizsgálása indokolt volt.

Mindkét vizsgálati típus esetén az eső hatását vizsgáltam a jármű ellenállás erejére. Az első esetben az eső tömegáramát állandónak vettem és a becsapódási sebességet növeltem. A második módszer esetén a tömegáramot növeltem ezzel modellezve az egyre hevesebb esőzést. Mindkét esetben a szimulációk $v=15$ m/s és 25 m/s haladási sebességre lettek elkészítve.

Az átlagsűrűség növekedés számítási módja az alábbi volt. Az első esetnél használt becsapódási sebesség növekmény alapján növeltem az eső tömegáramát és ezáltal a közeg átlagsűrűségét. Feltételezve, hogy a tömegáram és az áramlási sebesség hányados állandó,

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \frac{v_2}{v_1}$$

így meghatároztam az előző eset tömegárama alapján a következő eset tömegáramát. Ebből a közeg átlagsűrűsége számolható, mint

$$\rho_{\text{átlag}} = \rho_{\text{levegő}} + \frac{\dot{m}_{\text{eső}}}{\dot{V}_{\text{lev}}}$$

ahol $\rho_{\text{levegő}}$ a levegő sűrűsége, $\dot{m}_{\text{eső}}$ az eső tömegárama és $\dot{V}_{\text{lev}}$ a fajlagos levegőtérfogat, melyet 1 m^3 -nek vettem minden esetben.

3.1.2 Szél

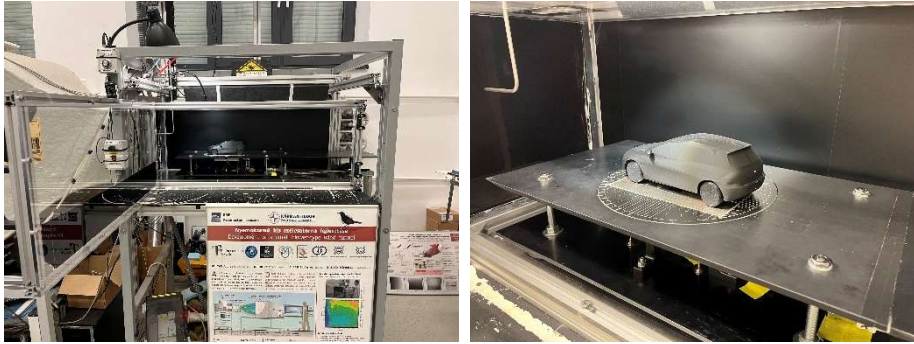
A szél hatásának vizsgálata során két fő eset került megvizsgálásra. Először, a stacionárius járműre ható szélereket vizsgáltam különböző szélirányok esetén. Második esetben már mozgó járműre ható szélereket mértem. A modellezés során az első esetben a jármű pozícióját változtattam az α szög függvényében, míg a második esetben a szél becsapódási sebességének α szögét paramétereztem.

3.1.3 Léghőmérséklet

A léghőmérséklet vizsgálata során az európai országokban előforduló hőmérséklet tartományt vizsgáltam (-20 és 40°C) a Magyarországon leggyakrabban alkalmazott sebességhatárok mellett (50 km/h – városi környezet, 90 km/h – főút; 110 km/h – gyorsforgalmi út; 130 km/h – autópálya). Ezáltal 240 mérési pontból álló vizsgálatot folytattam a léghőmérséklet és a járműre ható ellenállás erő között.

3.2 Szélcsatornás vizsgálatok

A szélcsatornás mérés a BME Áramlástan Tanszék, Rigó I. nevű szélcsatornájában végeztem el. A mérést az Áramlástan Tanszék oktatója vezette. A mérés során $1:20$ méretarányú modellt használtam. A modell 3D nyomtatási technológiával készült, kerekei szoros illesztéssel csatlakoznak. A kerekek érintkező felületéhez $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ méretű neodímium mágneszt illesztettem. Így rögzítettem a szélcsatorna acél lapjához (mérlegéhez). A szélcsatorna 20 m/s -os áramlási sebességet tudott elérni az általunk integrált modellel. Így ez volt a felső határa az áramlási sebességnek. A méréseket 10 m/s -os értékről kezdtem és 2 m/s -os értékkel emeltem. A jármű z tengely menti elforgatását 5° -ként végeztem 0° és 25° -os tartományban. A 3. ábrán látható képek mutatják a méréshez készített modellt és a szélcsatornát.



3. ábra Szélcsatornás mérés összefoglalás (forrás: saját ábra)

4 Eredmények

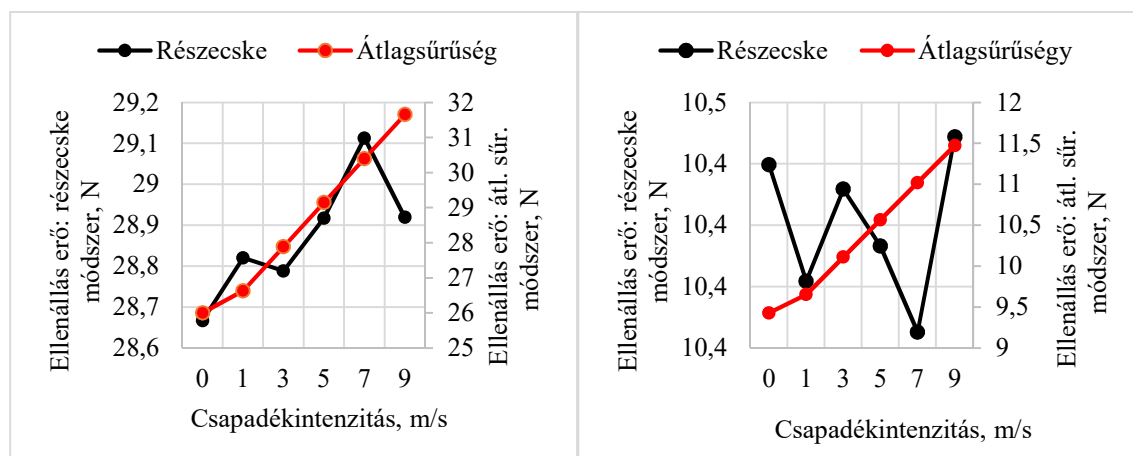
4.1 Csapadék vizsgálat

A csapadék hatásának vizsgálata során az alábbi esetek kerültek megvizsgálásra.

1. táblázat Csapadék hatásának vizsgálata során elemzett esetek

Haladási sebesség [m/s]	Eső becsapódási sebesség		Tömegáram kg/m^3	Átlag sűrűség
	[m/s]	[m/s]		
15, 25	0	0	0	1.225
15, 25	1	1	0.03	1.255
15, 25	3	3	0.09	1.315
15, 25	5	5	0.15	1.375
15, 25	7	7	0.21	1.435
15, 25	9	9	0.27	1.495

A 4. ábrán láthatóak a numerikus eredményeket. Az átlagsűrűséges eset szimulációs környezet megegyezik a szilárd részecskés esetnél részletezett beállításokkal azzal a kivétellel, hogy $k - \omega$ SST turbulencia modell-t használtunk.



4. ábra Ellenállás erő eloszlás különböző intenzitású csapadékozás esetén, jármű haladási sebessége 25 m/s (bal) és 15 m/s (jobb) (forrás: saját ábra)

Egyértelműen látszik, hogy az átlagsűrűsűges eső modellezés esetén a numerikus értékeket stabilabbak, egyenletesebben nőnek az eső intenzitás függvényében. De, mindkét esetben az ellenállás erő nagyságrendileg megegyezik. Ezáltal mindkét eső vizsgálata módszer potenciálisan megfelelő lehet a későbbi matematikai modell integrációja során.

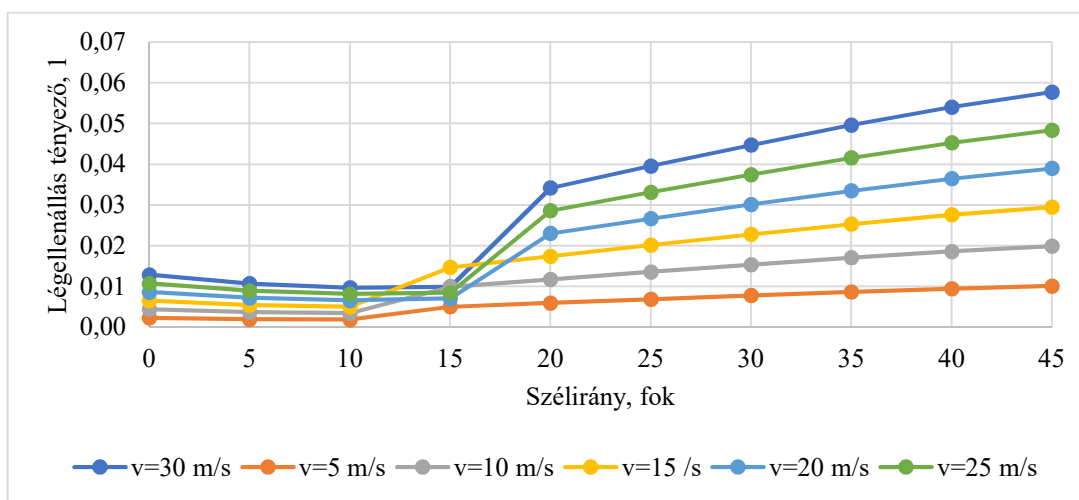
4.2 Szél vizsgálat

A szél vizsgálata során az első vizsgálati esetben (jármű stacionárius helyzetben modellezve) az alábbi esetek kerültek megvizsgálásra, összesen 60 (2. táblázat)

2. táblázat Szél típusú vizsgálatok első típusa során megvizsgált esetek

Szélirány, fok	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45
Szélesség, m/s	5, 10, 15, 20, 25, 30

A szimulációs eredmények diagrammon (légellenállás tényező – szélirány) ábrázolva jellegre megegyeznek. Egyetlen különbség az esetek között, hogy 0 és 15 m/s esett közötti eseteknél a függvényben 10°-nál található egy ugrás, mely a 20 és 30 m/s-os eseteknél 15°-ra tolódik. A szimulációs eredmények a 5. ábrán láthatóak. A vizsgálatokat mozgó járműre ható különböző erősségű és irányú szélhatás esetére is elvégeztem. Az eredmények részletes ismertetését jelen összefoglaló nem tartalmazza.

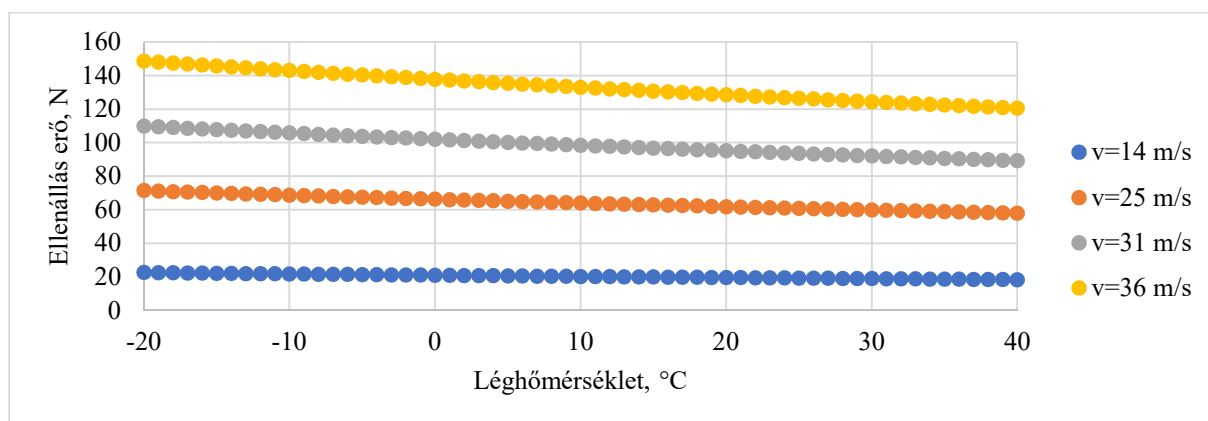


5. ábra Légellenállás tényező eloszlás különböző szélesség és szélirányok esetén (forrás: saját ábra)

4.3 Léghőmérséklet vizsgálata

A vizsgálat során a hőmérsékleti tartománynak a -20 és +40°C-ot választottam. Ez a tartomány megfelelően lefedi a magyarországi és az európai országok hőmérséklet eloszlását. A vizsgálatok során a tartományt 1°C-os lépésközzel osztottam fel, így 60 esetet vizsgáltam sebességként. A jármű haladási sebességének meghatározásakor szintén a globális lefedettség volt a cél. Ezért, a Magyarországon a KRESZ-ben meghatározott 4 fő sebességhatárt

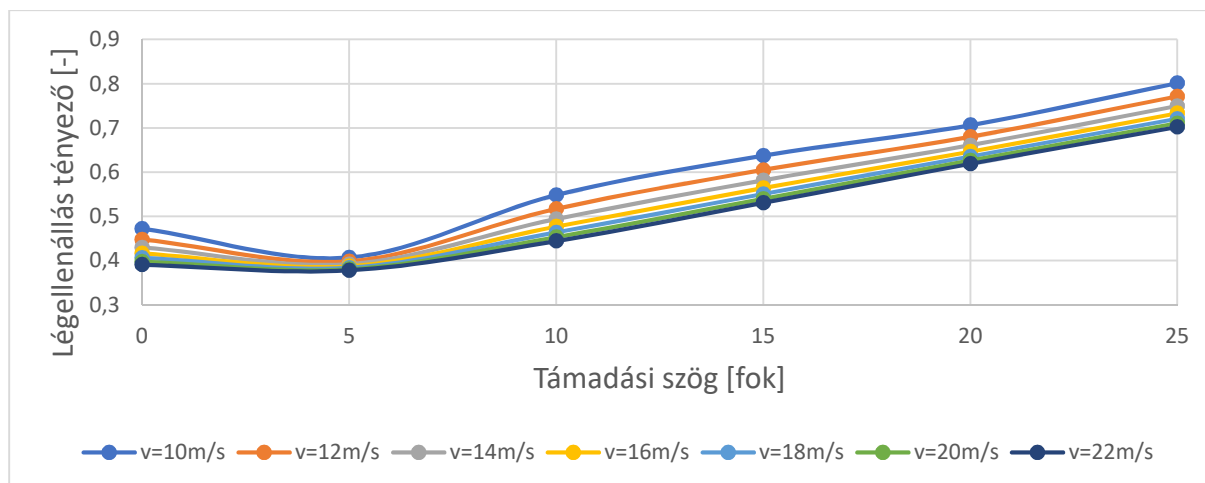
választottam ki: 50 km/h – városi környezet, 90 km/h – főút; 110 km/h – gyorsforgalmi út; 130 km/h – autópálya. Így összesen 240 mérési pontot és adatot kaptam (6. ábra). A szimulációs eredmények alapján egyértelműen kimondható, hogy a szignifikáns hőmérsékletváltozásnak jelentős hatása van a mozgó tárgy aerodinamikájára. Az eredmény megfelel az irodalomkutatás során összegyűjtött információknak. A vizsgált tartomány két végpontján mért ellenállás erő különbség (relatív eltérést számolva) nagyságrendileg 20% minden vizsgált sebesség esetén. Továbbá a légellenállás erő – hőmérséklet közti kapcsolat nagyon jó közelítéssel lineáris. (Az illesztett görbe determinációs együtthatója mind a négy esetben 0,99 felett volt.) Ezek alapján meghatároztam, hogy a hőmérsékletváltozást figyelembe kell venni, ha az időjárási tényezőket vizsgálom a jármű aerodinamikai paramétereire.



6. ábra Ellenállás erő és a léghőmérséklet közti kapcsolat (forrás: saját ábra)

4.4 Szélcsatornás mérés

A szélcsatornás méréseket 7 különböző haladási sebesség mentén végeztem el. A mérések során háromkomponensű mérleg mérte a járműre ható erőket (légellenállási -, oldal- és felhajtó erő). A vizsgálat során az oldalszél hatását is modelleztük kompromisszumokkal. A vizsgálatokat 0 és 25° között végeztem 5°-os lépésekkel. A mért adatokra görbét illesztettük, melynek pontossága megfelelő. A mérési pontokhoz mérési hiba számítása folyamatban van. A 7. ábrán a légellenállás tényező került bemutatásra a támadási szög függvényében. Az eredmények alátámasztják az irodalmi eredményeket azzal, hogy a légellenállás tényező minimuma minden sebesség esetén 5°-os támadási szögnél található.



7. ábra Szélcsatornás eredmények: Légellenállás tényező a támadási szög függvényében 7 különböző áramlási sebesség esetén (forrás: saját ábra)

5 Forrásjegyzék

- Gilli, M., Calcaterra, M., Emmerling, J., Granella, F. (2024) 'Climate change impacts on the within-country income distributions', Journal of Environmental Economics and Management, 127, DOI:10.1016/j.jeem.2024.103012.
- Hang X., Yu L., Jingyuan L., Hanzhengnan Y., Xiaopan A., Kunqi M., Yongkai L., Xi H., Hao Z. (2023) 'Study on the influence of high and low temperature environment on the energy consumption of battery electric vehicles' Energy Reports, 9, 835-842, DOI: 10.1016/j.egy.2023.05.120.
- Grosso, M., Raileanu, I. C., Krause, J., Raposo, M. A., Duboz, A., Garus, A., Mourtzouchou, A., Ciuffo, C. (2021) 'How will vehicle automation and electrification affect the automotive maintenance, repair sector?', Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 12, DOI:10.1016/j.trip.2021.100495.
- Szabó, P. (2023) 'Extrém nyári nagycsapadékokban merülhet el a Nyugat-Dunántúl és Budapest környék a század második felében', Másfél fok, Elérhető: masfelfok.hu/2023/07/04/extrem-nyari-nagycsapadekmagyarorszag-dunantul-budapest-klimavaltozas/ (Hozzáférés dátuma: 2024.08.25.)
- Vigh, P. (2023) 'Szélvihar után az ország – mi várható a jövőben? A klímaváltozás hatása a szélviharokra Magyarországon' Másfél fok, Elérhető: masfelfok.hu/2023/06/24/szelvihar-utan-az-orszag-mivarhato-a-jovoben-a-klimavaltozas-hatasa-aszelviharokra-magyarorszag/ (Hozzáférés dátuma: 2024.08.25.)
- Winkler N., Drugge L., Trigell A. S., Efraimsson G. (2016) Coupling aerodynamics to vehicle dynamics in transient crosswinds including a driver model. Computers & Fluids, 138, 26-34, DOI:10.1016/j.compfluid.2016.08.006.
- Yichan A., Joseph Y.J. C., Soomin W., Jinwoo L. (2025) 'Urban public charging infrastructure planning for electric vehicles: A continuum approximation approach', Transportation Research Part D: Transport and Environment, 141, DOI:10.1016/j.trd.2025.104605.