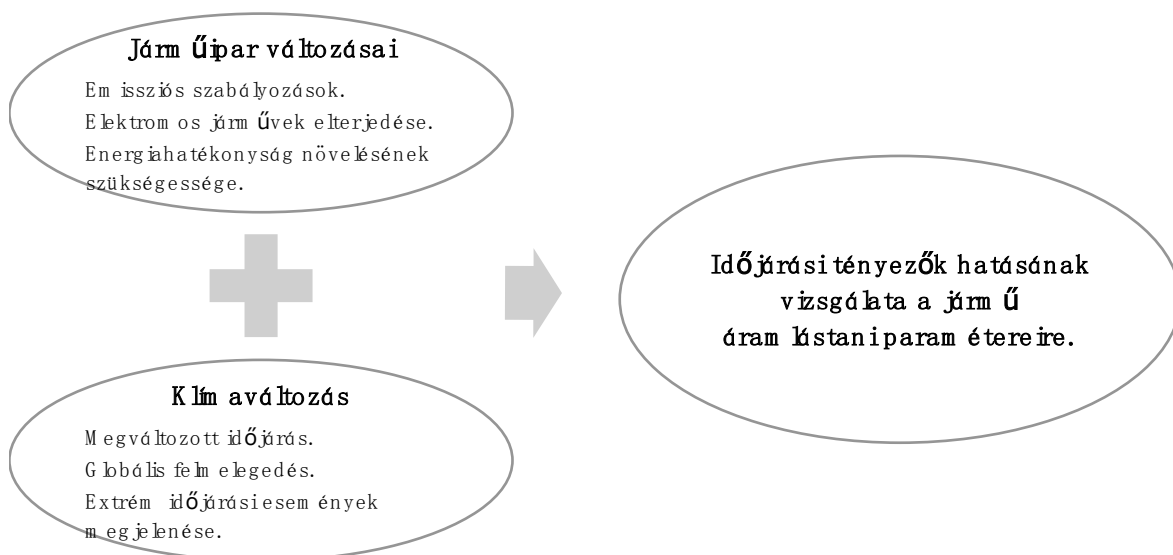


Időjárási viszonyok hatása a jármű aerodinamikai paramétereire

PÉTER BRÚNÓ¹

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

¹ Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Prof. Dr. habil. Lakatos István, egyetemi tanár, Vállalati szakértő: Kardos Péter, MouldTech Systems Kft.

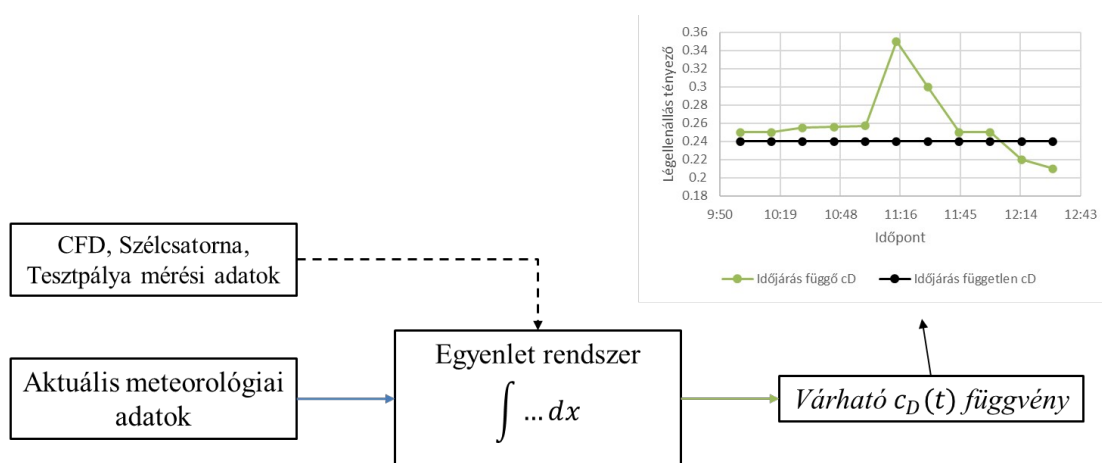
utazási idő ugrásszerű növekedését okozhatják. Így a megállók helyes kiválasztása és minimalizálása fontos tényező az elektromos járműveket használók között (Yichan és mtsi, 2025). A polgári felhasználás mellett az elektromos kamionok is megjelentek, melyek közt még fontosabb az optimális megálló kiválasztása 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 paraméterek számos tényezőtől függenek, de a fejlesztések kulcsa az energiahatékony növelése, és az ezt befolyásoló paraméterek meghatározása, szabályozása. Az energiahatékonyt 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 áramlástan 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 tud 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 Rendelkezésre álló infrastruktúra

A MouldTech Systems, mely a KDP vállalati résztvevője, saját fejlesztésű és gyártású meteorológiai drónnal rendelkezik, mely a 3. ábrán látható. A drónokkal történő időjárási tényezők vizsgálata széleskörben elterjedt, a Meteorológiai Világszervezet (WMO) is támogatja ezt a mérési formát. A Mouldtech Systems cég ezen tevékenysége kiemelkedően fontos a KDP alatt végzett kutatásaim lebonyolításában, mert így valós, saját mérésű időjárási adatokat tudok felhasználni.

A meteorológiai mérődrón 2500 m felszín feletti magasságig képes méréseket végezni. Az eszköz úgy lett kifejlesztve, hogy az előforduló időjárási körülmények között 90%-os kihasználhatósága legyen. Ez lehetővé teszi, hogy szélesspektrumú időjárási adatokat tudjunk vizsgálni. A mérődrón meteorológiai profilozási feladatra készült. Tervezési magassága 3000 m AGL (above ground level), de a gyakorlati tapasztalatok alapján 4500 m AGL-s magasság is biztonságosan repülhető, folyamatos adatközlés mellett. Meteorológiai mérések során a légkör kvantitatív fizikai paramétereit tudjuk meghatározni. Fő paraméterek közé sorolható a csapadékmennyiség, hőmérséklet, légnyomás, páratartalom, napsugárzás, szélesebesség és szélirány.

A 2500 m magas mérés 6 m/s-os emelkedési sebességgel történik és körülbelül 16 percig tart a felszállás. A süllyedési idő is azonos, de nem egyvonalú, hanem spirálpályás ereszkedés a megszokott. A drón energiafogyasztása ilyen mértékű emelkedéskor 5000–7000 mAh, mely a teljes akkumulátor kapacitás 25-35%-a. A töltési idő körülbelül fél óra a

rendelkezésre álló energiaforrás tekintetében. Így 1 órás ciklusidő az előkészületekkel együtt teljesíthető.

Ezentúl az Széchenyi Egyetem és a ZalaZone szoros együttműködése lehetővé teszi, hogy a ZalaZone által nyújtott tesztpályán az egyetemi kutatócsoport járművével és mérőeszközeivel tesztpályás méréseket végezzünk.

Ezzel megteremtve a lehetőséget a szimulációs eredmények ellenőrzésére és a matematikai modell hiteles felállítására.



3. ábra MouldTech Systems saját fejlesztésű meteorológiai mérő drónja (forrás: saját ábra)

4 Kutatás jelenlegi állása

A kutatás jelenleg a CFD szimulációs szakaszban tart. A CFD szimulációs mérések során két időjárási tényező került megvizsgálásra: a csapadék és a szél.

4.1 Csapadék

A csapadékkal kapcsolatos mérések során két különböző típusú CFD szimulációs vizsgálatot végeztünk. Az első típusban az esőcseppeket, mint

szilárd részecske modelleztük. A második típusú vizsgálat során a közeg átlagsűrűségét növeltük.

Az átlagsűrűség elvén működő szimulációs modellt 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 vizsgáltuk a jármű ellenállás erejére. Az első esetben az eső tömegáramát állandónak vettük és a becsapódási sebességet növeltük. A második módszer esetén a tömegáramot növeltük 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 esetben használt becsapódási sebesség növekmény alapján növeltük az eső tömegáramát és ezáltal a közeg átlagsűrűségét. Feltételezve, hogy a tömegáram és az áramlási sebesség hányados állandó,

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

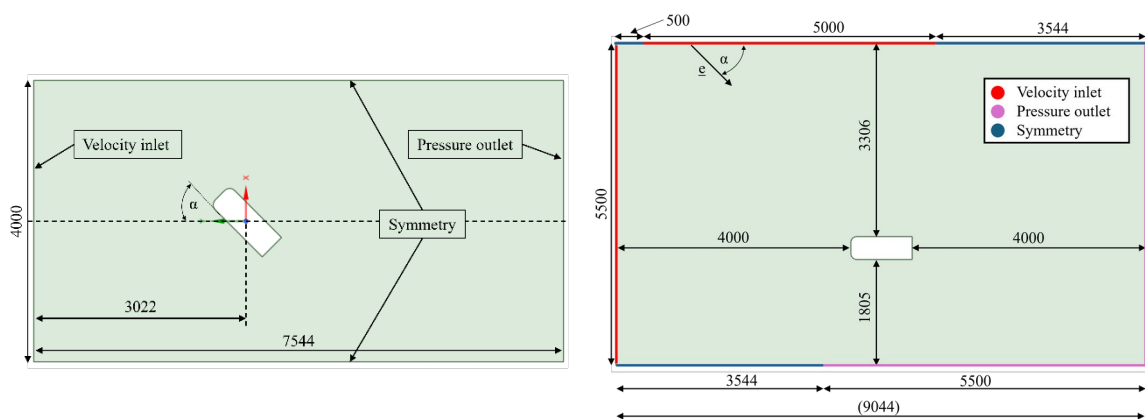
így meghatározhatjuk az előző eset tömegárama alapján a következő eset tömegáramát. Ebből a közeg átlagsűrűsége számolható, mint

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

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

4.2 Szél

A szél hatásának vizsgálata során két fő eset került megvizsgálásra. Először, az stacionárius járműre ható szélerőket vizsgáltuk különböző szélirányok esetén. Második esetben már mozgó járműre ható szélerőket vizsgáltunk. A modellezés során az első esetben a jármű pozícióját változtattuk az α szög függvényében, míg a második esetben a szél becsapódási sebességének a szögét paramétereztük. Az esetek megértését segítő sematikus ábrák a 4. ábrán láthatóak.



4. ábra Szél hatásának modellezési módjai: szél hatásának vizsgálata 0 m/s-os járműsebesség esetén (stacionárius eset) (bal) és szél hatásának vizsgálata haladó jármű konstrukció esetén (jobb) (forrás: saját ábra)

5 Eredmények

Az alább bemutatott eredmények 2D-s szimulációkból származnak. A kutatás következő lépése lesz, hogy a 2D-ben megalkotott szimulációs környezetet implementáljuk 3D-ba.

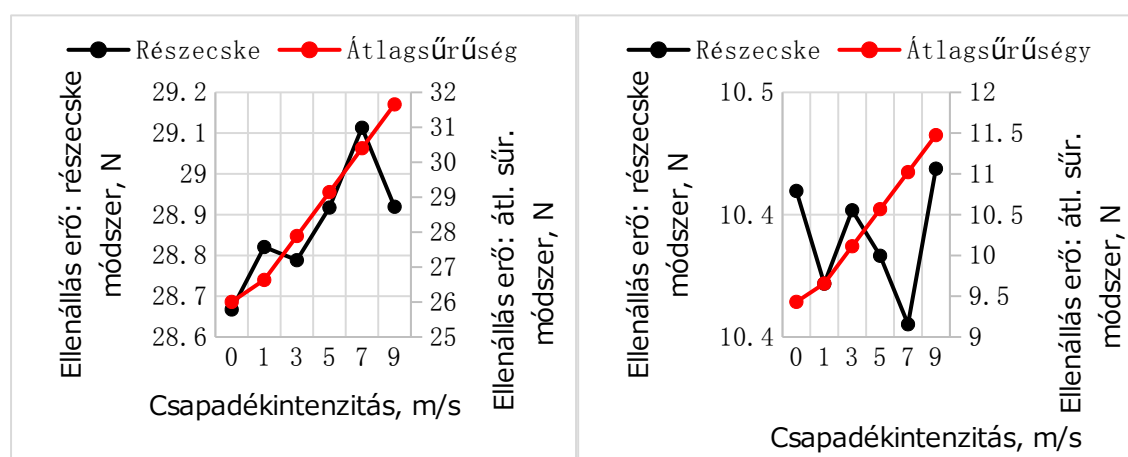
5.1 Csapadék vizsgálat

A csapadék hatásának vizsgálata során az alábbi esetek kerültek megvizsgálásra.

1. táblázat Csapadék hatásának vizsgálata során elemzett esetek

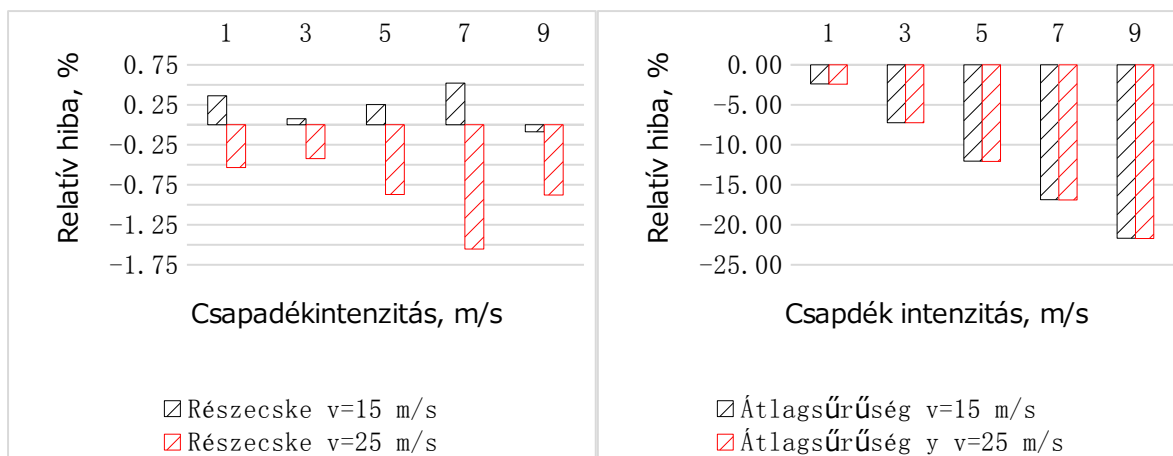
Haladási sebesség [m/s]	Eső becsapódási sebesség [m/s]	Tömegáram kg/m ³	Átlag sűrűség
15, 25	0	0	1.225
15, 25	1	0.03	1.255
15, 25	3	0.09	1.315
15, 25	5	0.15	1.375
15, 25	7	0.21	1.435
15, 25	9	0.27	1.495

Az alábbi diagrammok bemutatják a numerikus eredményeket. Az átlagsűrűséges eset szimulációs környezet megegyezik a szilárd részecskés esetnél részletezett beállításokkal azzal a kivétellel, hogy $k-\omega SST$ turbulencia modellt használtunk.



5. 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 átlagsűrűséges 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.



6. ábra Az ellenállás erő relatív hibájának eloszlás az eső nélküli esethez képest (forrás: saját ábra)

A 6. ábrán feltüntetett diagrammok alapján szintén elmondható, hogy az átlagsűrűséges esetben az adatok eloszlása, az ellenállás erő növekménye konzisztensebb, mint a szilárd részecskés szimuláció esetén. A második eset relatív eloszlása szerint, az átlagsűrűség növelése sokkal nagyobb hatással volt az ellenállás erőre (maximum relatív hiba ~20%), mint a részecskebecsapódási sebesség növelése (maximum relatív hiba ~1,5%). A nagyságrendi különbség okának felderítése kulcsfontosságú lesz a további kutatások során.

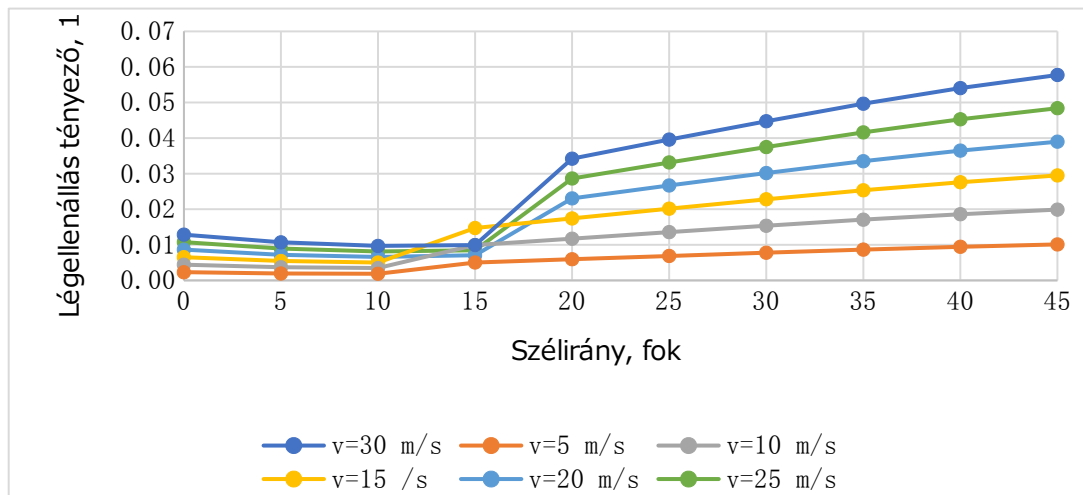
5.2 Szél vizsgálat

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
Szélsebesség, 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 7. ábrán láthatóak.



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

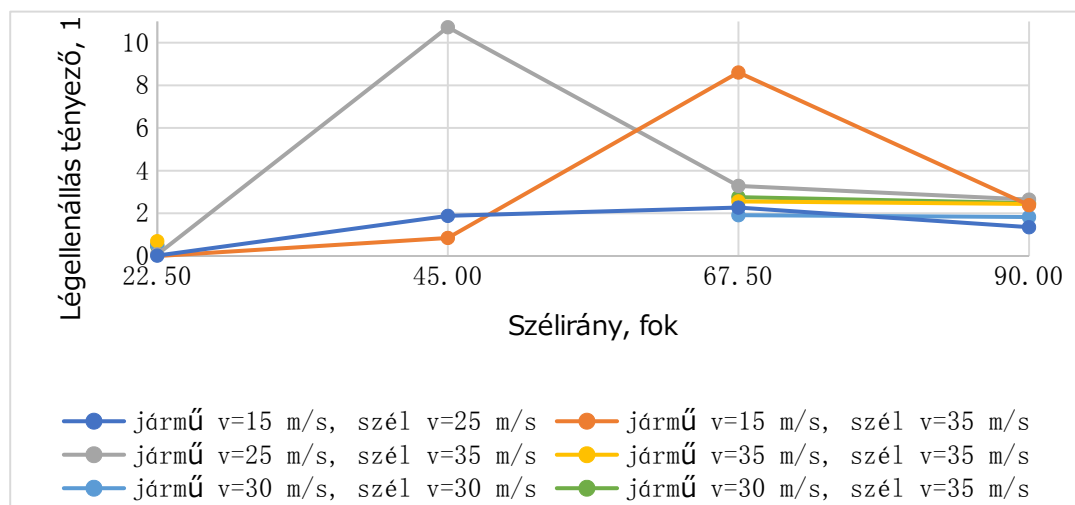
Második esetben a mozgó járműre ható különböző erősségű és irányú szélhatást vizsgáltuk a 3. táblázatban megjelölt esetekben.

3. táblázat Szél típusú vizsgálatok második típusa során megvizsgált esetek

Szélirány, fok	22.5, 45, 67.5, 90
Szélesség, m/s	25, 30, 45
Jármű sebesség, m/s	15, 25, 30, 35

A komplexebb esetben a szimulációk nagyobb bizonytalansággal rendelkeztek, mint az előző esetben. A légellenállás tényező – szélirány függvény nem vett fel egy konstanst emelkedési jelleget. Az alábbi diagramról mérési pontok is hiányoznak melynek oka, hogy esetenként nem valós szimulációs értékeket is kaptunk, melyek eliminálásra kerültek. A szimulációk különösen bizonytalanok voltak amikor a szélesség és a

jármű haladási sebességek megegyezett. Ezek ellenére, nem stabil de emelkedő trend látható a légellenállás tényezőben ahogy a szél becsapódóság sebessége (nő). További mérések során a modell bizonytalanságának okát részletesen fel kell tárni és megszüntetni, ha lehetséges. A 8. ábra mutatja a szélhatások második esetéből származó numerikus eredményeket.



8. ábra Légellenállás tényező eloszlás a szél becsapódási szög függvényében különböző szél és járműhaladási sebességek esetén

6 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.egyr.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', *Másfélök*, Elérhető:

masfelfok.hu/2023/07/04/extrem-nyari-nagy-csapadekmagyarország-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' Másfelfok, Elérhető: masfelfok.hu/2023/06/24/szelvihar-utan-az-orszag-mivarhato-a-jovoben-a-klimavaltozas-hatasa-aszelviharokra-magyarorszagon/ (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.