

Matematikai modell bemutatása az időjárás tényezők közötti járművek légellenállás tényezőjére gyakorolt hatásának vizsgálatára

Péter B.* Lakatos I.** Hlinka J.***

* ZalaZONE InnoTech Nonprofit Kft., 8900 Zalaegerszeg, Magyarország, (Tel: 06307211241; e-mail: peter.bruno@sze.hu).

** Járműfenntartás és Diagnosztika Tanszék, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Széchenyi István Egyetem, 9026 Győr,
Egyetem tér 1., Magyarország, (e-mail:
lakatos@sze.hu)

*** ZalaZONE InnoTech Nonprofit Kft., 8900 Zalaegerszeg, Magyarország (e-mail: jozsef.hlinka@zalazone.hu)

Absztrakt: A közlekedésben résztvevő járművek energiafogyasztását számos tényező befolyásolja pl. járműforma, futóműbeállítás vagy a közlekedéskor fellépő időjárás tényezők. Mind a szél, csapadék vagy szignifikáns léghőmérsékletváltozás (nyár / tél) hatással van az éppen közlekedő járműre. Ezek a hatások különböző területeken okozhatnak változást, mint például járműdinamika, biztonság vagy energiahatékonyság. Jelen tanulmány az időjárás tényezők járműáramlásra gyakorolt hatását vizsgálja. Ezen belül is, hogy milyen matematikai modell állítható az időjárás tényezők és a járműfogyasztás / ellenállás tényező kapcsolatába. A tanulmány célja, hogy bemutassa a kutatási témában eddig gyűjtött adat, az ebből generált egyenletrendszer és az ebbe betáplálható aktuális időjárás adat milyen módon használható fel a jármű vezetésének tájékoztatására.

1. BEVEZETÉS

Jelenlegi autóipari környezetben az egyik legfontosabb terület a járművek energiahatékonysága. Az elektromos járművek elterjedésével az energiafogyasztás a jármű egyik legfontosabb paraméterévé vált. Ez a paraméter számos tényezőtől függ, mint például a jármű össztömege, az akkumulátor típusa, a jármű futóműve vagy a jármű áramlástanai tulajdonságai.

A járműipart érintő szabályozások (elektrifikáció előtérbe helyezése, károsanyag kibocsátás szabályozása) szintén az energiahatékonyságra való törekvést szorgalmazzák.

Ahogy korábban is definiáltuk, az energiahatékonyság különböző paraméterektől függ, melyről számos kutatás készült. Az energiafelhasználás és a regeneratív fékhasználat (Pan et al., 2023), akkumulátor típus (Hang, 2023), levegő hőmérséklet (Dongxu et al., 2023) közti kapcsolatot széles körben tanulmányozták. A levegő hőmérséklet – energiafogyasztás közti kapcsolatot adatalapú módszerrel bizonyították (Dongxu et al., 2023). A levegőhőmérsékleten túl, a közeg páratartalma is hatással van a járműhatásfokra (Hua et al., 2023). A regeneratív fékhasználattal kapcsolatos kutatások pozitív eredményeket (Gwangryeol et al., 2023), míg a komfortot segítő berendezések (fűtés, hűtés, levegőkeringtetés) negatív (Lesage et al., 2024) - mutat.

A járműipari változásokkal párhuzamosan az időjárás trendek is változnak. Ennek egyik oka az emberi tényezők által generált hatások. A változások jól mérhetőek a szél, csapadék és hőmérséklet időjárás paraméterek terén. Kutatások bizonyítják, hogy a szélviharok bekövetkezésének gyakorisága nő (Vigh, 2023). Ezek az események jellemzően a téli

hónapokban észlelhetők, kifejezetten a Dunántúl térségében. A kutatási eredmények azt mutatják, hogy az extrém magas szélsőségek kialakulása összefüggésben van a globális felmelegedéssel. Továbbá a vizsgálatok azt is kimutatták, hogy a széljárások megváltozása hatással van a globális időjárás trendekre is (Gahlot, 2024).

A 20, 30 és 40 mm-t meghaladó intenzív csapadékesemények száma növekvő tendenciát mutat. (Szabó, 2023). Az ilyen típusú esőzések 25 évvel ezelőttig egyáltalán nem volt jellemző Magyarországra. Napjainkban pedig egyre gyakoribb események.

A magas léghőmérsékletű napok száma is növekszik, mely az időjárás trendek változásának eredménye (Nasa Science, N/A). Hatással van a jármű áramlási közegben való haladására, de számos egyéb tényezőt is befolyásol.

E két tényező, járműipari és időjárás változások indokolják a kutatási téma alapját, mely az időjárás tényezők hatását vizsgálja a jármű áramlástanai paramétereire (1. ábra).

Közlekedés közben az időjárás tényezők hatását néhány esetben mi emberek is érzékeljük. Az extrém szél hatását járművezetés közben közvetlenül érezzük. Nagyobb sebesség esetén egy-egy széllelőke hatását ellenkormányzással kell korrigálni, főként nagyobb rakterű járművek esetében. Heves esőzéskor ezt a hatást nem érezzük, de az eső kopogását halljuk. Mely kisebb hatást sugall a fogyasztás szempontjából, de hangkeletkezés miatt biztosan befolyásolja a jármű hatásfokát. Annak érdekében, hogy az időjárás tényezők hatását, azok fizikai eredőjét és járműáramlástanai vonatkozását feltárjuk a következő fejezetekben folytatott vizsgálatokat

végeztük. Kiemelt figyelmet fordítva az időjárási tényezők hatásainak modellezésére.



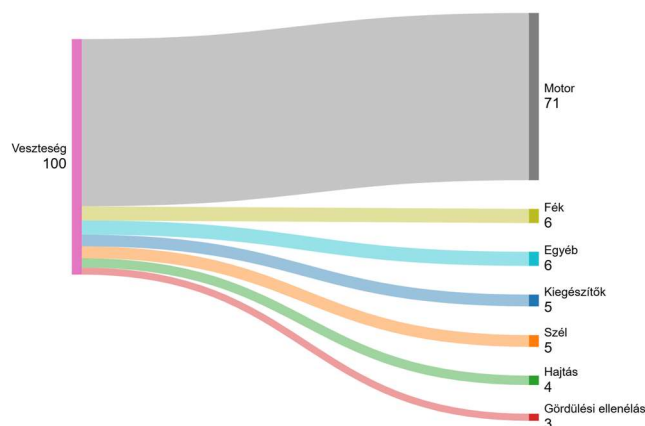
1. ábra Kutatási téma motivációja

2. JÁRMŰVEK ENERGIAFOGYASZTÁS ELOSZLÁSA

Egy jármű energiafelhasználását működés közben különböző tényezők befolyásolják. Belsőégésű, hibrid és elektromos jármű-konstrukció esetén eltérő mértékben. Első lépésként szükséges definiálni, hogy mit nevezünk a rendszer energia vesztességének. Minden járműnek energiahordozóra van szüksége, melyből forgási majd mozgási energiát képes előállítani. Belsőégésű járművek esetén a benzin vagy dízel, míg elektromos járművek esetén az elektromos áram. Az eltérő konstrukciók különböző hatékonysággal alakítják át az energiát. Ahhoz, hogy alátámasszuk a kutatási téma relevanciáját szükséges megvizsgálni, hogy az energiavesztesség mekkora része származik áramlási paramétereiből. Az irodalmi eredmények alapján az alábbi következtetések vonhatóak le.

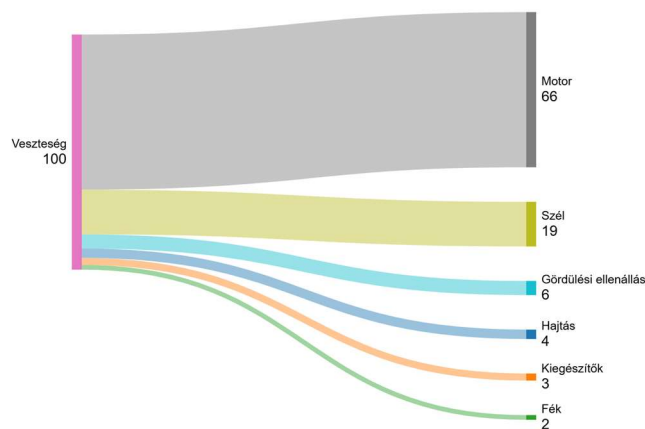
Az 1 – 4. ábrák belsőégésű és elektromos jármű konstrukció energiaceloszlását mutatja városi és autópályás környezetben (National Academy of Sciences) (Fuel Economy a és b). Az ábrák az adott konstrukció veszteség eloszlását mutatják különböző kategóriákban százalékos arányban. Az aerodinamika veszteséget a diagramok a „Szél” szekcióban mutatják.

A 2. ábrán, ahol a belsőégésű jármű városi környezete látható, az aerodinamikai erők hatása mérsékelt. Ennek oka, hogy városi környezetben alacsonyabb sebességgel (50 km/h) haladnak a járművek. De a veszteség 5%-nak csökkentése is mérhető változást okozhat az energia fogyasztásban ezért vizsgálata indokolt.



2. ábra Belsőégésű járművek energiavesztés-eloszlása városi környezetben

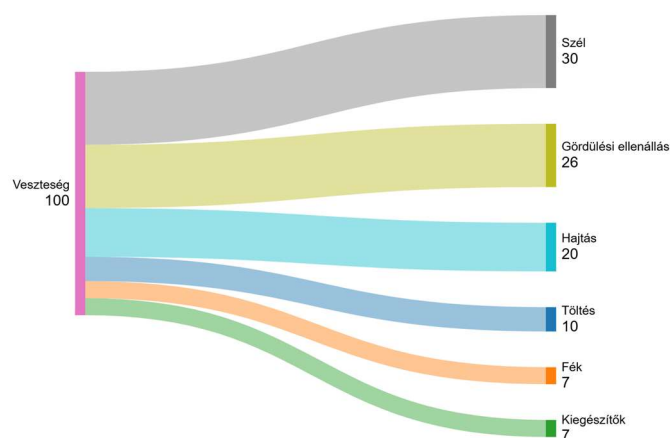
A 3. ábrán szintén a belsőégésű jármű energiaceloszlása látható, autópályás környezetben. Az aerodinamikai erők miatt az energiavesztés ebben az esetben már jelentős. A korábbi 5%-ról 19%-ra emelkedett, mivel az új környezetben közel 3x akkora sebességgel haladnak (~130 km/h). Az energiavesztés közel egyötödének vizsgálata kétségtelenül indokolt, moderálása vagy előrejelzése pedig egyértelműen hasznos a járművezetőknek, fuvar-tervezőknek.



3. ábra Belsőégésű járművek energiavesztés-eloszlása nagysebességű környezetben (autópálya)

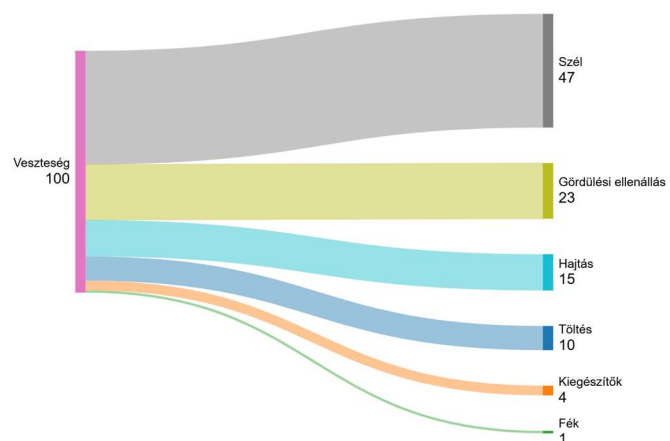
A 4. ábra az elektromotor által hajtott konstrukció energiaceloszlását mutatja be. A belsőégésű modellel ellentétben, ahol 5% volt az áramlási veszteség, itt 30%. Ezáltal elektromos járművek esetén kiemelkedően fontos az aerodinamikai hatásokkal összefüggő energiaceloszlást vizsgálni. A tudomány mai állása szerint az

energiahatékonyság növelése az egyik kulcstényezője az elektromos konstrukció tovább fejlődésének.



4. ábra Elektromos járművek energiaveszteség-eloszlása városi környezetben

Az 5. ábra, ahol az elektromos hajtást autópályás környezetben vizsgálják hasonló jelleget mutat, mint városi környezetben. De az aerodinamikai erők hatása tovább nő. Az össz-energiaveszteség majdnem 50%-ért felel. Ez egyértelműen bizonyítja, hogy elektromos hajtás esetén elengedhetetlen, de belsőégésű konstrukció esetén is hasznos az áramlástanai veszteségekből származó okok feltárása, moderálása és előrejelzése.



5. ábra Elektromos járművek energiaveszteség-eloszlása nagysebességű környezetben (autópálya)

Fontos megjegyezni, hogy a míg az elektromos járműveket hajtó motor hatékonysága ~70% addig a belsőégésű járműveké ~20%. Ezért a korábban tett összehasonlítások a szél hatására vonatkozóan relatívan értendők. Ha figyelembe vesszük a különböző típusok motorjainak hatékonyságát akkor a szél abszolút hatása az energiafogyasztásra a következőképpen alakul. Városi körülmények között a hagyományos motorral

hajtott jármű energiaveszteség 4%-t, a környezetbarátabb jármű 9%-t teszi ki. Magas sebesség (autópályás környezet) esetén a különbség kiegyenlítődik. Nagyságrendileg 14-15% energiaveszteségért felelnek az időjárási tényezők mindkét motortípus esetén.

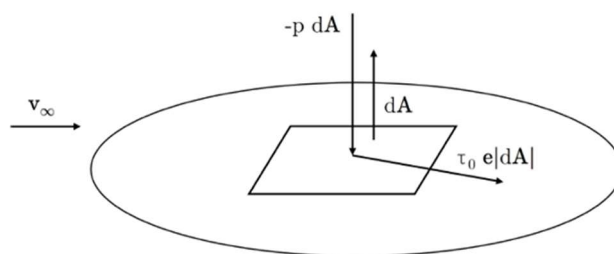
3. IDŐJÁRÁSI TÉNYEZŐK HATÁSA A KÖZLEKEDÉSRE JÁRMŰÁRAMLÁSTANI SZEMPONTBÓL

Az előző fejezetben áttekintettük a relevanciáját annak, hogy az időjárási tényezők hatással vannak a jármű energiafelhasználására. Következő lépésként szükséges megvizsgálni, hogy ezt milyen módon teszik és ennek mi a fizikai háttere. Ennek tudatában lehetséges további műveleteket végezni annak érdekében, hogy az aerodinamikai hatásokat mérjük, előrejelezzük és esetlegesen mérsékeljük.

Áramlási térbe helyezett testre erő hat (Lajos, 2019). Ezt az erőt aerodinamikai erőnek nevezzük. Az erő (aerodinamikai) két komponensből tevődik össze. Fő része a nyomáskülönbségből származik (1. egyenlet első tagja), míg második része a csúszató feszültségből (1. egyenlet második tagja). Az egyenletben használt változók az alábbiak: p – lokális nyomás, p_{∞} – zavartalan áramlási tér nyomása, τ_0 – nyíró feszültség, $\vec{e}$ – irányvektor és $\underline{A}$ – egységnyi felület.

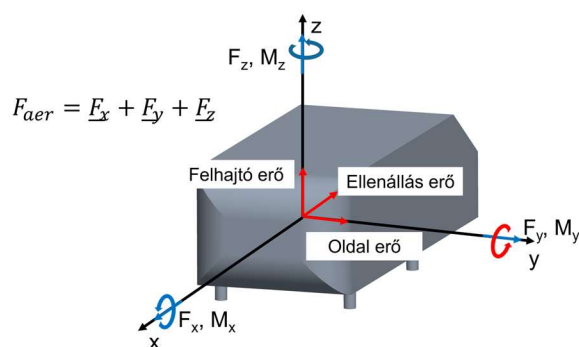
$$F_{aero} = - \int_A (p - p_{\infty}) d\underline{A} + \int_A \tau_0 \vec{e} |d\underline{A}| \quad (1)$$

Az aerodinamikai erő komponenseinek irányultsága a 6. ábrán látható.



6. ábra Aerodinamikai erő egységnyi felületen történő ábrázolása

Járműáramlástanai szempontból az eredő erőt három komponensre érdemes felbontani a 7. ábra szerint. A haladás irányában helyezük el az x tengelyt, melynek negatív irányába mutat az ellenállás erő. Energiafogyasztás szempontjából a legfontosabb paraméter. Erre merőleges helyezkedik el az y tengely rajta az oldal erővel és végül a z tengely – felhajtó erő páros. Motorsportban gyakran a felhajtó erővel ellentétes irányú leszorító erőt alkalmaznak. Továbbá, minden tengelyen az erőkön túl egy-egy nyomtaték is hat.



7. ábra Aerodinamikai erő komponensei

A jármű energiafogyasztás szempontjából az ellenállás erő komponens releváns számunkra. Az időjárási tényezők közül három paraméter hatását vizsgáljuk meg elméleti szinten. A haladási iránnyal ellentétes orientációjú szél erőt fejt ki a járműre mellyel gátolva előrehaladását. A szél sebessége, iránya és jellege (egyenletes, impulzív stb.) is befolyásolja a hatását. A csapadékos időjárás az áramlási közeg sűrűségét növeli, illetve heves esőzésekor az esőcseppek becsapódásakor is energiacsere történhet. Az áramlási közeg (esetünkben levegő) sűrűsége pedig hőmérséklet függő. Így különböző léghőmérséklet idején eltérő mértékben gátolja a jármű előrehaladását.

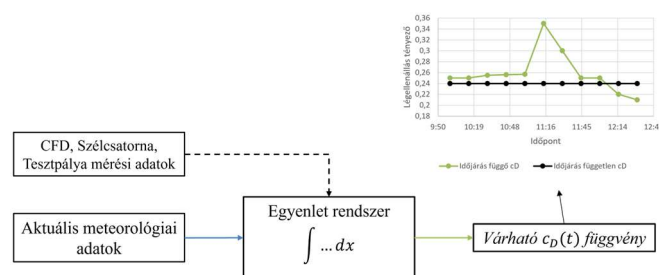
Ezek alapján felállítható egy rendszer, mely képes kezelni az időjárási tényezőkből származó a járműre ható aerodinamikai erőket. Ebből pedig konklúziókat levonva továbbítani a jármű vezetője felé.

4. MATEMATIKAI MODELL

A 8. ábra mutatja a sematikus felépítését annak a modellnek mely az aktuális és előrejelzett meteorológiai adatok, időjárási tényezőkből származó erőhatások és azok eredményeit feldolgozó és hasznosító információkat fogja össze. A rendszer fő eleme az egyenleteket és egyenletrendszereket tartalmazó egység. Ennek felépítése az előzetesen végzett áramlástani szimulációk, szélesatornás – és teszt pályás mérések eredményein alapul. A mérések során a lehető legtöbb esetet megvizsgálva, a különböző mérési módszereket összehasonlítva a lehető legtöbb időjárási tényező hatását írjuk le matematikai vonatkozásban. Például a szél esetén szükséges különböző szélesebségekre és szélirányukra megvizsgálni a hatásokat. Ezekre az eredményekre görbét vagy felületet illetve hozzuk létre az egyenleteket és -rendszerket. Ezáltal a modell képes arra, hogy beletáplálva az aktuális és előrejelzett meteorológiai adatokat kiszámolja, hogy az aktuális vagy várható időjárás adott helyen, adott járműmodellre milyen hatással lesz energiafelhasználás szempontjából.

A rendszer szintén fontos eleme az időjárási adatokat gyűjtő egység. Elengedhetetlen, hogy az egységnek mindig rendelkezésre álljanak a legfrissebb és pontosabb időjárási adatok. Ezen adatok begyűjtése történhet saját állomásról pl.

teszt pályás mérések során kihelyezhető mobil vagy telepített mérőállomás. Ez a megoldás főként a tesztidőszakban alkalmas amikor a kötött pályán történnek a mérések. A közúton haladó járművek információ ellátására globális megoldás szükséges. Az ipari környezetben a hagyományos telepített adatgyűjtő állomások mellett megtalálhatóak drónokat alkalmazó mérőmódszer is. A repülő járművel történő adatgyűjtés előnye, hogy nem csak egy adott magasságban tud mintavételezést végezni, ezáltal nagyobb mennyiségű adat áll rendelkezésre a légkörből. Ezeket az adatokat felhasználva pedig hatékonyabb az előrejelzés. Az adatgyűjtés mellett a pontos, lokációhoz kötött időjárás előrejelzés is nagyon fontos. Megfelelően előrejelzett adatokat felhasználva nem csak akkor lehet értesíteni a jármű vezetőjét mikor az esemény már bekövetkezett vagy éppen tart, hanem előre lehet jelezni neki, hogy várhatóan mire számíthat. Ezzel megteremtve a választási lehetőséget.



8. ábra Matematikai modellt leíró sematikus ábra

A kutatás jelenlegi állása szerint rendelkezünk áramlástani szimulációs eredményekkel, melyekre a görbeillesztések megtörténtek. Három paraméterrel kapcsolatosan végeztünk vizsgálatokat melyek a szél, a csapadék és a hőmérséklet, melyből az első kettő hatása kerül bemutatásra a cikkben. Fontos kiemelni, hogy az elvégzett mérések egyszerűsített modellel kerültek elvégzésre. Ezért, az eredmények még nem a valós hatásokat mutatják a jármű ellenállástényezőjére. De jellegre helyes, ezért a matematikai modell működése tesztelhető vele. Továbbá még egy egyszerűsített alkalmaztunk. A szimulációk külön-külön vizsgálták az egyes paraméterek hatását az áramlástani tulajdonságokra. Tehát, nem végeztünk olyan szimulációt, ahol egyidőben több paraméter is aktív (egyidejű eső és szél hatását nem tanulmányoztuk egy vizsgálaton belül). Jelen modell feltételezi, hogy a paraméterek hatásai külön-külön mérhetők és hatásuk összeadódik az ellenállás tényezőre nézve.

A modell bemenő adatként az alábbi paraméterekkel dolgozik: időpont (nap, óra, perc), szélesebség (m/s), szél támadási szög (°), csapadék intenzitás (m/s). Ezeket az adatokat a következő fejezetekben bemutatott egyenletbe behelyettesítve megkapjuk az időjárásfüggő ellenállási tényezőt.

Csapadék esetén a mérési adatokra lineáris egyenest illesztettünk, mellyel az alábbi egyenletet kaptuk.

$$c_{D,eső} = 0.421 \cdot v_{csapadék} + 8.8999 \quad (2)$$

ahol, $v_{csapadék}$ a csapadék sebessége.

A szél esetén a sebesség és támadási szög alapján illesztettünk polinomot. Az illesztett egyenletet a 3. egyenlet mutatja.

$$c_{D,szél} = 0,0018 \cdot v_{szél}^2 - 0.0024 \cdot \varphi^2 + 0.0047 \cdot v_{szél} \cdot \varphi + 0.1764 \cdot \varphi - 4.7894 \quad (3)$$

ahol, $v_{szél}$ a szél sebessége és φ a szél támadási szöge. Így meghatározható az időjárási tényezőktől függő ellenállási tényező mint,

$$c_D = c_{D,haladás} + c_{D,eső} + c_{D,szél} \quad (4)$$

ahol, c_D az időjárásfüggő -, $c_{D,haladás}$ a haladásból származó -, $c_{D,eső}$ és $c_{D,szél}$ pedig az eső és szél hatásából származó ellenállási tényező.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során megvizsgáltuk az autóiparban jelenleg folyó változásokat, elemeztük az elektromos és belsőégésű konstrukciók közti különbségeket. Kiemelt figyelmet fordítva a két különböző típus energiavesztésének típusaira: mekkora mértékben befolyásolják az időjárási tényezők az energiavesztésüket százalékos formában. Elemeztük az időjárási tényezők változásának kiváltó okait és meghatároztuk, mely időjárási paraméterek befolyásolják egy jármű energiahatékonyaságát. Az aerodinamikai erő segítségével fizikailag is alátámasztottuk, hogy egy-egy tényező hogyan hat a jármű fogyasztására. Végezetül pedig ismertettük a matematikai modellt. Első lépésként az egyenletek és egyenletrendszerek kialakítását tanulmányoztuk. A kutatás során áramlástan szimulációs, szélszámítás – és tesztelés méréseket végeztünk és fogunk végezni, mely adatokra trendvonalakat és felületeket célszerű illeszteni. A matematikailag leírható formák segítségével szolgálnak egy-egy paraméter (időjárási) hatásának általánosítására. Ezáltal a meteorológiai adatok betöltve az egyenletrendszerekbe hasznos információkkal tudunk szolgálni a jármű vezetőjének arról, hogy a várható vagy éppen történő időjárási esemény (pl. erős vihar mely során konstans szembeszél és heves csapadékmennyiség észlelhető) milyen energiafogyasztás növekedést fog okozni. Ezáltal például tudjuk jelezni egy elektromos járművet használó vezetőnek, hogy a betervezett töltési pontját nem fogja elérni, mert a vihar miatt nagy mértékben nőtt az energiafogyasztása. A rendszer ezt jelzi részére és opcionális töltési pontot ajánl fel.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tudományos közleményben bemutatott kutatás az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program (EKÖP) keretén belül valósult meg. A projekt megvalósítását a Kulturális és Innovációs Minisztérium és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap finanszírozta.

HIVATKOZÁSOK

- Dongxu Y., Hai L., Menghan L., Hang X., (2023) „Data-driven analysis of battery electric vehicle energy consumption under real-world temperature conditions”, Journal of Energy Storage, 72, DOI: 10.1016/j.est.2023.108590.
- Fuel Economy a. Elérhető: www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml (Hozzáférés dátuma: 2025.07.17.)
- Fuel Economy b. Elérhető: www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml (Hozzáférés dátuma 2025.07.17.)
- Gahlot, S., (2024) „Climate Change and Wind Power: The Winds of Change” Swiss Re Institute, Elérhető: www.swissre.com/institute/research/topics-and-riskdialogues/climate-and-natural-catastrophe-risk/climatechange-wind-power.html (Hozzáférés dátuma: 2024.08.10.)
- Gwangryeol L., Jingeun S., Jungwon H., Yunsung L., Suhan P., (2023) „Study on energy consumption characteristics of passenger electric vehicle according to the regenerative braking stages during real-world driving conditions”, Energy, 283, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128745>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.120>
- Hua Z., Kunqi M., Yu L., Jingyuan L., Hanzhengnan Y., Xiaopan A., Yongkai L., Hang X., Xi H., Hao Z., (2023) „Research on the influence of soak in the cold environment on the energy consumption of electric vehicles” Energy Reports, 9, 656-661. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.113>
- Lajos T., (2019) Áramlástan alapjai, 6. kiadás, Budapest, Magyarország, ISBN 978-963-12-2885-4.
- Lesage, M., Chalet, D., Migaud, J., Krautner, C. (2024) "Optimization of air quality and energy consumption in the cabin of electric vehicles using system simulation", Journal of Environmental Management, 358, 120861. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120861>
- Nasa Science (s.a.), 'Extreme Weather and Climate Change', Elérhető: science.nasa.gov/climate-change/extremeweather/ (Hozzáférés dátuma: 2024.08.02.).
- National Academy of Sciences - Transportation Research Board *Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy*, 1.kiadás.; Washington, 226 D.C, United States of America, 2006. pp. 39–42.
- Pan, Y., Fang, W., Zang, W. (2023) "Development of an energy consumption prediction model for battery electric vehicles in real-world driving: A combined approach of short-trip segment division and deep learning", Journal of Cleaner Production, 400, 136742. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136742>

Szabó, P. (2023) „Extrém nyári nagycsapadékokban merülhet el a Nyugat-Dunántúl és Budapest környéke a század második felében”, Másfél fok, Elérhető: masfelfok.hu/2023/07/04/extrem-nyari-nagy-csapadekmagyarorszag-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-oroszag-mivarhato-a-jovoben-a-klimavaltozas-hatasa-aszelviharokra-magyarorszagon/ (Hozzáférés dátuma: 2024.08.25.)



CAETS

„XIX. IFFK 2025“

Online: ISBN 978-615-82688-0-6

Paper 3

Copyright 2025 Budapest, MMA.

Editor: Dr. Péter Tamás