

## Az időjárás tényezők és a közúti járművek aerodinamikájának kapcsolata

Péter Brúnó\* Lakatos István\*\*

\*MouldTech Systems Kft., 8700 Zalaegerszeg

Magyarország (Tel: 0630 721 1241; e-mail: peter.bruno@sze.hu).

\*\*Közúti és Vasúti Járművek Tanszék, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar  
Magyarország (e-mail: [lakatos@sze.hu](mailto:lakatos@sze.hu)).

**Absztrakt:** A tanulmány az időjárás tényezők közúti járművekre való hatását vizsgálja áramlástan szempontról. Az első járművek megjelenése óta az autók formája sokat változott. A dolgozat vizsgálja a járművek formájának fejlődését és bemutatja a négy fő korszakát. Ezt követően megvizsgálja az áramlásba helyezett testre ható erőket és kivetíti a járművek esetére. Bemutatja az aerodinamikai vizsgálatok szempontjából releváns erőket, nyomatékokat, állandókat. A bemutatott fizikai hatások és az időjárás tényezők lehetséges kapcsolatát definiálja és magyarázza. Végezetül gyakorlati példával igazolja az időjárás tényezők hatását a jármű aerodinamikájára és részletezi a potenciális vizsgálati területeket és módokat.

### 1. BEVEZETÉS

A közúti járművek energiahatékonyságának növelése a jelenkor járműiparral kapcsolatos kutatási területeinek egyik legfontosabb tényezője. A járművek energiafelhasználásának optimalizálása számos területen lehetséges, mint például a hajtástípus, tömeg vagy a jármű formája. A járművek külső elemeinek megtervezése során számos paramétert figyelembe vesznek, melyek közül, különösen az elektromos hajtással rendelkező járművek esetén az energiahatékonyságnak is kiemelkedő szerepe van.

Az energiahatékonyság növeléséhez kapcsolódó jelenlegi kutatások számos paramétert vizsgálnak. A kutatások főként elektromos járművek energiahatékonyságát vizsgálják. A tanulmányok széles körben foglalkoznak az elektromos autók akkumulátoraival, mint például a levegő hőmérsékletének hatása az akkumulátor hatásfokára (Hang, 2023) kihegyezve extrém időjárás körülményekre is (Hua és mtsi., 2023). Az akkumulátor energiavisszanyerő lehetőségei is széles körben vizsgáltak. A regeneratív fékezés energia visszatöltő hatásfokát periodikus gyorsítás és lassítás közben Gwangryeol (2023) vizsgálta. Az eredmények szerint a regeneratív fék által visszatöltött energia mértéke egyértelműen nőtt, de összességében a gyakori gyorsítás-lassítás kombináció miatt az akkumulátor energiaszintje csökkent.

A jármű energiahatékonyságának optimalizálása különböző módokon lehetséges, melyeket széles körben. Ezek közül az egyik az optimalizáló algoritmusokon alapuló kutatások. A valós közlekedési adatokon alapuló algoritmusok széles körben használtak (Yingjiu és mtsi., 2023). Az optimális járműút vonalak meghatározása az egyik kulcstényezője a hatékony elektromobilitásnak (Jeong és mtsi., 2024). Valós

idejű időjárás adatok használata is számos alkalommal megjelenik a tanulmányokban, mert az akkumulátorok hatásfoka nagyban függ a környezeti hatásoktól (Dongxu és mtsi., 2023). Az energiahatékonyság növelésére használt optimalizált algoritmusok közé tartozik az ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) rendszer, mely alacsony számítási kapacitás mellett képes optimális döntéseket hozni. De a komplexebb, nemlineáris problémák megoldására kevésbé alkalmas (Sahwal és mtsi., 2024). A mesterséges neurális háló modellek is hatékonyan elemzik és optimalizálják az elektromos járművek energiafelhasználását, például inverz függvénymodellek használatával (Bukola, 2023).

A jármű konstrukciós kialakításai mellett az energiahatékonyság járműáramlástan oldalról is sokoldalúan vizsgált. Az aerodinamikai elemek pozitív hatással bírnak a járműstabilitásra, de növelik a fogyasztást (Hitoshi, és mtsi., 1995). A vizsgálatok során sok esetben használnak CFD (Computational Fluid Dynamics) szimulációkat, úgy, mint Juhee (2018) aki a fölhajtást vizsgálta, vagy Winkler és társai (2016) aki az erős kereszt szél hatását tanulmányozta tranziens szimulációkkal. Teszt pályán és szélesatornában mért eredmények is elérhetőek a szakirodalomban. A járművek energia- vagy tüzelőanyag-fogyasztásának méréséről (Hanzhengnan, 2022) vagy a jármű ellenállástényezőjének szélesspektrumú körülmények közti meghatározásáról (Watkins, 2008) is széleskörben találhatóak eredmények.

A járműforma kialakítása során számos tényezőt figyelembe kell venni ahhoz, hogy az egység megfelelően működjön. Járműdinamikai szempontból megfelelő leszorítóerő szükséges, közúti járművek esetén jellemzően minimális negatív előjelű leszorítóerő (felhajtó erő) megtartása a cél. Az

ellenállás tényező optimális, minél kisebb értéken tartása az energiahatékonyság szempontjából fontos. A jármű idomelemei a piacon való érvényesülés fontos része. Ezen paraméterek összessége határozza meg, hogy egy jármű milyen formát ölt.

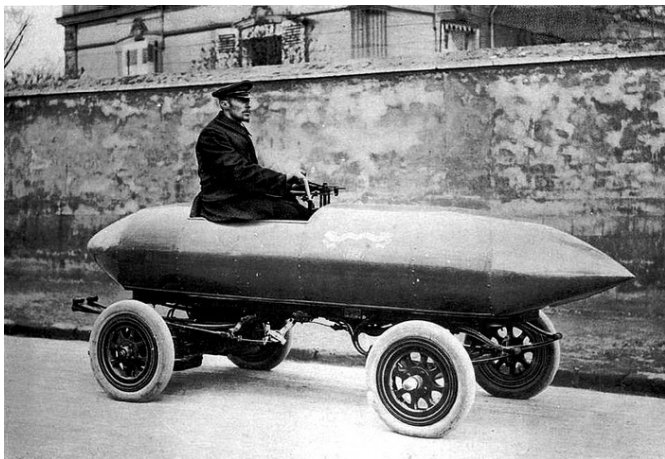
Jelen kutatás azt vizsgálja, hogy a járművek adott formájára, milyen hatással vannak a különböző időjárési tényezők aerodinamikai szempontból. Vizsgált időjárési tényezők közé tartozik a szél, a csapadék vagy a hőmérsékletváltozás. Az alábbi tényezők vizsgálatával a járművek aktuális hatótávjának optimalizálását érhetjük el.

## 2. JÁRMŰÁRAMLÁSTAN KORSZAKAI

A járműfejlesztés áramlástanai szempontból a 20. század elején kezdődött (Suda 2022). A fejlesztési folyamat a kezdettől napjainkig négy fő korszakra bontható: borrowed shape (kölcsonzött forma), streamlining (áramvonalasítás), detail optimization (részlet optimalizáció) és shape optimization (forma optimalizáció).

### 2.1 „Borrowed shape” – kölcsonzött formák korszak

Az első korszak 1900 és 1930 között zajlott (Suda 2022). A borrowed shape vagyis kölcsonzött forma korszakban, ahogy a nevéből is adódik más iparágakban használt termékek formáit hasznosították. Egyik legszeleesebb körben használt forma a torpedó volt, melynek a hadipar volt az alapja. Ez a konstrukció áramlástanai szempontból nem megfelelő, a jármű alatt nagy üres tér helyezkedik el, mely dinamikai instabilitást okoz. A leghíresebb torpedó alakú jármű a La Jamais Contente. Ez volt az első jármű, ami önerejéből elérte a 100 km/h-s sebességet. Az elektromos hajtással rendelkező járművet 1899-ben mutatták be Belgiumban. Az 1. ábrán látható az említett jármű formája.



1. ábra La Jamais Contente - torpedó forma alapján megtervezett jármű (Renault, 2018)

A torpedó forma mellett számos egyéb alakot is hasznosítottak más iparágból. Például a hajóforma, mely esetben a jármű hátulja olyan alakú volt, mint a hajóké. Az Audi Type C, melyet 1912-ben mutattak be, ezen a formán alapul.

Napjainkban alkalmazott autóformákra a legjobban a léghajó formán alapuló autó hasonlít. Ebből a formából is sok híres autó született, mint például a Siluro Ricotti. A jármű az olasz származású Castagna műve volt, melyet 1914-ben mutattak be.

### 2.2 „Streamlining” – áramvonalasítás korszak

A Streamlining vagyis áramvonalasítás korszak az 1921 és 1955-ös évek között zajlott (Suda 2022). A korszak fő célja az volt, hogy az autók formája olyan alakot öltösson, mely sokkal áramvonalasabb. Ebben az esetben a levegő könnyebben és simábban tud áramlani a felületeken, kevesebb turbulenciát termelve. Fontos megemlíteni a korszak egyik legfontosabb szereplőjét, Járay Pált, magyar származású mérnököt, repülőgép tervezőt, aki megalkotta a Járay formát.

A Járay forma alapja, hogy az autók felső fele íves, itt a levegő könnyedén, turbulenciamentesen tud áramlani. A járművek alja egyenes, közel helyezkedik el a talajhoz, így ki tud alakulni a „ground effect”. A „ground effect” kifejezés akkor alakul ki, amikor a jármű alatt a levegő felgyorsul, így lokális nyomáscsökkenés alakul ki, így a nyomáskülönbség a járművet a földhöz tapasztja. Ezzel a megoldással nagyobb kanyarsebesség és járműdinamikai szempontból stabilabb konstrukció érhető el. A Járay forma pozitív hatásai mellett negatív tulajdonságokkal is bír a járművekre. A felső íves forma miatt az autó súlypontja feljebb került, mely csökkentette a leszorító erőt. A sok esetben borítás nélküli forgó kerekek, pedig nagy turbulenciát generáltak, mely az autó energiahatékonyságát befolyásolták.

A korszak által kialakult új járműforma innovatív autók megjelenését eredményezte. Ezek közül a legelterjedtebb a Ley T6, Tatra T78, Rumpler vagy a Schlörwagen. A Schlörwagen jármű alakja a Járay formán alapul, mely a 2. ábrán látható.

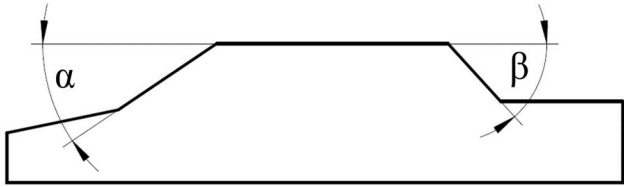


2. ábra A Járay formán alapuló Schlörwagen jármű (Ism., 2021)

### 2.3 „Detail optimization” – Részlet optimalizálás korszak

A „Detail optimization” korszak az 1970-es években kezdődött és napjainkig tart (Suda 2022). A részlet optimalizálás célja, hogy finom hangoljuk a jármű formáit és kis alakváltoztatásokkal szignifikáns változásokat érjünk el a

jármű aerodinamikai és menetdinamikai paramétereiben. A finomhangolás során eszközölt változtatások például az autó sarkainak megfelelő mértékű lekerekítése, mely akár 5%-os ellenállástényező csökkenést is eredményezhet. Az autó első és hátsó szélvédőjének optimális dőlésszögének meghatározása is jelentős pozitív változásokat tud okozni (2. ábra).



2. ábra Egy jármű első és hátsó szélvédőjének szögpárja ( $\alpha$  és  $\beta$ ).

### 2.3 „Shape optimization” – Forma optimalizáció korszak

A járművek formájának optimalizációja az 1980-as években kezdődött (Suda 2022). A korszak célja, hogy optimalizálja a jármű burkolati elemeit vagy új elemeket is hozzáadjon a járműhöz annak érdekében, hogy a jármű aerodinamikai és egyéb paramétereit pozitív irányba változzanak. Forma optimalizációhoz tartozik a padlólemez alkalmazása, mely hatására a jármű alján a levegő simábban áramlik, kisebb turbulenciát generálva. A simább padlólemez lehetővé teszi, hogy a korábbi fejezetben részletezett „ground effect” hatékonyabban jöjjön létre, ezáltal extra leszorító erőt termelve. A kerekeken található dísz tárcsa megléte vagy formájának megfelelő kialakítása is ebbe a kategóriába tartozik. A forgó kerekek nagymértékű turbulenciát okoznak, melyek növelik a jármű ellenállás tényezőjét. A megfelelő dísz tárcsák alkalmazása csökkenteni tudja az adott járműre ható ellenállás erőt, így növelve az energiahatékonyságát.

### 3. JÁRMŰRE HATÓ ERŐK, NYOMATÉKOK, ÁLLANDÓK

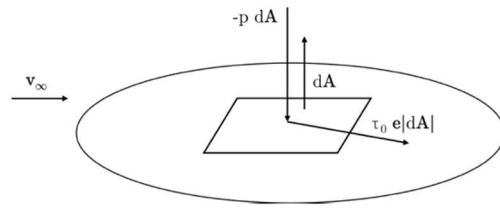
Az alábbi fejezet azokat az erőket, nyomatókakat és állandókat definiálja, melyek relevánsak az időjárási tényezők hatásainak vizsgálatánál.

#### 3.1 Áramlásba helyezett járműre ható erők, nyomatók

A közúti járművekre különböző típusú, irányú és nagyságú erők hatnak. Annak érdekében, hogy az autóra ható erőket meg tudjuk határozni, meg kell határozni az áramlásba helyezett testre ható erőket.

Áramlásba helyezett testre erő hat, ha a súrlódást nem hanyagoljuk el (Lajos, 2019). A testre ható erő két részből tevődik össze: a nyomáskülönbségből – és a nyírófeszültségből adódó erőből. Ezek a deformáció sebességéből és a viszkozitásból származnak. Az erőknek az egységnyi felületre vett hatását az a 3. ábra mutatja. A nyírófeszültségből adódó erő eredője párhuzamos az

egységnyi felület irányával és az 1. egyenlet alapján határozható meg. A normál irányú komponens a normál feszültségből adódik, mértéke meghatározható a jármű körüli nyomáskülönbségből, melyet a 2. egyenlet részletez.



3. ábra Áramlásba helyezett test egységnyi felületére ható erő

$$F_s = \int_A \tau_0 \vec{e} |dA| \quad (1)$$

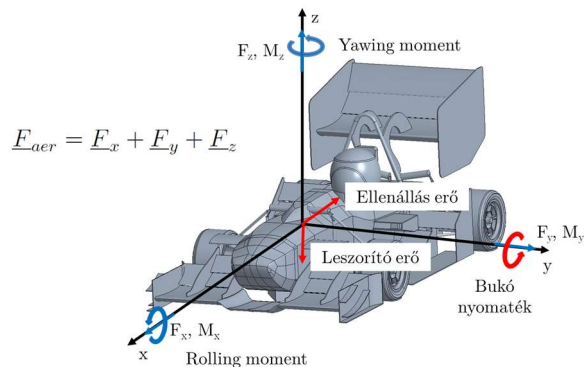
ahol,  $\tau_0$  a helyi nyíró feszültség,  $\vec{e}$  az egységvektor, mely az erő irányát határozza meg.

$$F_{\Delta p} = - \int_A (p - p_\infty) dA \quad (2)$$

ahol,  $p$  a lokális nyomás és  $p_\infty$  a szabad áramlási zóna nyomása. Ezek alapján meghatározható az aerodinamikai erő a 3. egyenlet szerint.

$$F_{aer} = \int_A \tau_0 \vec{e} |dA| - \int_A (p - p_\infty) dA$$

A járművekre ható aerodinamikai erőket komponensekre szokták bontani. A komponensek a járműáramlásban használatos koordináta rendszer határozza meg, mely a 4. ábrán látható. A koordináta rendszer úgy épül fel, hogy a haladási irány egybeesik az x tengellyel és talaj által meghatározott felülettel párhuzamos. Az x tengelyre merőleges tengelyt jelöljük y-al és a két eddig meghatározott tengelyre merőlegest z-vel. Ezek alapján az aerodinamikai erők az alábbi módon oszlanak el. Az x tengellyel ellentétes irányba hat az ellenállás erő, az y tengellyel párhuzamosan az oldal erő, és z tengellyel ellentétes irányban a leszorító erő. Az erők mellett a járműre ható nyomatók is mérhetőek a 4. ábra szerint.



4. ábra Jármű koordináta rendszere és az arra ható erők, nyomatók.

### 3.2 Jármű áramlástani szempontjából fontos állandók

Az erők és nyomatékok definiálása után az ellenállás tényező meghatározása is elengedhetetlen, hogy az időjárás tényezők szempontjából releváns aerodinamikai hatásokat teljeskörűen áttekintsük.

Az ellenállás tényező egyértelműen meghatározható az ellenállás erőből a 4. egyenlet szerint (Lajos, 2019).

$$c_D = \frac{F_D}{0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^2} \quad (2)$$

ahol,  $F_D$  az ellenállás erő,  $\rho$  az áramlási közeg sűrűsége,  $A$  a vetítési sík, mely az áramlási irányra merőleges síkról vett jármű sziruet felületét adja meg és  $v$  a jármű haladási sebessége. Az ellenállás tényezőtől a jármű energiafogyasztása számolható különböző közlekedési típusokara.

### 4. Időjárás tényezők hatása a jármű aerodinamikájára

A járműre ható erő definiálása megmutatta, hogy egy járműre közvetlen hatással van a közlekedés során mutatkozó időjárás. Erős széllekedések, heves csapadékozás vagy a szélsőséges hőhullámok befolyásolják a jármű aerodinamikai paramétereit. A szélsőséges időjárás körülmények egyre gyakoribbak napjainkban. Ennek fő okozója a klímaváltozás (Péter and Lakatos, 2024). A klímaváltozás erősödésével az erős széllekedések (Vigh, 2023), felhőszakadások (Szabó, 2023) és hőhullámok (Nasa Science, s.a.) megjelenésének száma nő. Ezért szükséges megvizsgálni elméleti szinten is, hogy az egyes időjárás tényezők, hogyan és milyen hatással lehetnek az aerodinamikai paraméterekre.

A hőhullámok során, szélsőséges hőmérsékletemelkedést észlelünk. A levegő hőmérséklete kapcsolatban áll a sűrűségével, mely pedig az ellenállás tényezővel. Minél nagyobb hőmérsékletű a levegő annál nagyobb lesz a légellenállástényezőre gyakorolt hatása. A légellenállástényező pedig az energiahatékonyságot befolyásolja. Így elméleti szinten a hőmérséklet emelkedés negatív hatással van a járművek hatékonyságára. A negatív hatás mértékének meghatározására vizsgálatok szükséges elvégezni. A két legalkalmasabb mérési módszer erre a CFD vagyis áramlástani szimulációk és tesztpályán végrehajtott mérések. A vizsgálatokkal egyértelműen megállapítható lesz, hogy adott hőmérséklet emelkedés mekkora hatással van az energiahatékonyságra és hogy a hatás mértéke meghaladja-e azt a szintet, nagyságrendileg tized százalék, hogy szükséges további vizsgálatokat végrehajtani.

A viharos széllekedések és fokozódó szélerősség egyértelmű hatással van a járműre. Nagyobb széllekedések az utazások során is észlelhetőek. A széllekedések vizsgálatára az áramlástani szimulációk, a szélesatornás mérések és a tesztpályán végrehajtott mérések is egyaránt alkalmasak. A vizsgálatok során érdemes megvizsgálni a folytonos szélességű hatás mellett, a pulzáló periodikus és nem periodikus széllekedéseket

is. A szél hatásából adódó rezgések vizsgálata is hasznos információt nyújthat a jármű aktuális áramlástani paramétereiről, mely információk birtokában tovább pontosítható a szél hatásának vizsgálata.

Az eddig vizsgált időjárás tényezők hatása fizikailag egyértelműen levezethető. Viszont a heves csapadékozás hatásának vizsgálata és bizonyítása kevésbé egyértelmű. A feltételezés alapja az, hogy az esőcseppek becsapódásakor olyan ütközés lép fel a jármű és az esőcsepp között, mely során energiaátadás történik. Az esőcsepp becsapódáskor mozgási energiával rendelkezik, mely a becsapódáskor megszűnik és más energiákká alakul át. A vizsgálat során a kérdés az, hogy az átadott energia mekkora részét nyeli el a jármű mozgási energiája. Annak érdekében, hogy ezt megvizsgáljuk először áramlástani majd tesztpályán történő méréseket szükséges végezni és az adatokat összevetve kiértékelni, hogy van-e mérhető hatása az esőcseppeknek az energiahatékonyságra.

### ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során a járművek formájának kialakulása megvizsgálásra került a járművek külső burkolatára ható erők számításának módja mellett. Ezt követően definiáltuk azokat az időjárás tényezőket, melyek hatással lehetnek a jármű energiahatékonyságára, majd egyszerű fizikai gondolkodásmód mellett levezettük, hogy az adott időjárás hatások milyen módon befolyásolhatják egy jármű aerodinamikai paramétereit. Az egyes időjárás hatások mellett a mérési módszereket is megvizsgáltuk és javaslatot tettünk a tényezők vizsgálatának módjára. A kutatás során megvizsgált elméleti alapok szerint további mérések szükségesek, hogy a feltételezett összefüggések bebizonyításra kerüljenek és hatásukat számtani eredményekkel is alátámaszthassuk.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az Európai Unió támogatásával az Autonóm rendszerek Nemzeti Laboratórium (RRF-2.3.1-21-2022-00002) keretrendszeren belül valósult meg.

### HIVATKOZÁSOK

- Bukola P. A. A multivariable output neural network approach for simulation of plug-in hybrid electric vehicle fuel consumption. *Green Energy and Intelligent Transportation* 2023, 2, DOI: 10.1016/j.geits.2023.100070.
- Dongxu Y., Hai L., Menghan L., Hang X. Data-driven analysis of battery electric vehicle energy consumption under real-world temperature conditions. *Journal of Energy Storage* 2023, 72, DOI: 10.1016/j.est.2023.108590.
- 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, DOI: 10.1016/j.energy.2023.128745.
- Hang X., Yu L., Jingyuan L., Hanzhengnan Y., Xiaopan A., Kunqiang 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.
- 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.
- Hanzhengnan Y., Yu L., Jingyuan L., Kunqi M., Yongkai L., Hang X., 2022, Investigations on fuel consumption characteristics of heavy-duty commercial vehicles under different test cycle. *Energy Reports*, 8, 102-111, DOI: 10.1016/j.egy.2022.10.261.
- Hitoshi F., Kazuo Y., Hiroshi C., Kunio N., 1995, Improvement of vehicle aerodynamics by wake control. *JSAE Review*, 16, 151-155, DOI: 10.1016/0389-4304(95)00007-T.
- Ism. (2021) 'Schlörwagen: The bizarre German car that was super-aerodynamic but very impractical, 1939' Elérhető: [rarehistoricalphotos.com/schlorwagen-photographs-1939/](http://rarehistoricalphotos.com/schlorwagen-photographs-1939/) (Hozzáférés dátuma: 2024.08.20.)
- Jeong J, Ghaddar B., Zufferey N., Nathwani, J. Adaptive robust electric vehicle routing under energy consumption uncertainty *Transportation Research Part C. Emerging Technologies* 2024, 160, DOI: 10.1016/j.trc.2024.104529.
- Juhee L, 2018, Computational analysis of static height stability and aerodynamics of vehicles with a fuselage, wing and tail in ground effect. *Ocean Engineering*, 168, 12-22, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.08.051.
- Lajos, Tamás (2019) *Az áramlástan alapjai*, 6. kiadás, Egyetemi tankönyv, ISBN:9789631228854.
- Nasa Science (s.a.), 'Extreme Weather and Climate Change', Elérhető: [science.nasa.gov/climate-change/extreme-weather/](https://science.nasa.gov/climate-change/extreme-weather/) (Hozzáférés dátuma: 2024.08.02.).
- P., Wenpeng F., Wenshan Z. Development of an energy consumption prediction model for battery electric vehicles in re-al-world driving: A combined approach of short-trip segment division and deep learning. *Journal of Cleaner Production* 2023, 400, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136742.
- Péter, Brúnó és Lakatos István (2024) *Időjárás és klímaváltozás hatása a közlekedésre, Innováció és fenntartható felszíni közlekedés.*
- Renault Alex (2018) 'La Jamais Contente' Elérhető: [lautomobileancienne.com/la-jamais-contente-1899/](http://lautomobileancienne.com/la-jamais-contente-1899/) (Hozzáférés: 2024.08.21.)
- Sahwal C. P., Sengupta S., Dinh T. Q. Advanced Equivalent Consumption Minimization Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Cleaner Production* 2024, 437, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140366.
- Suda, Jenő M. (2022) „Járműáramlástan 3. rész – Történelem” *Áramlástan Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem.*
- Szabó, P. (2023) 'Extrém nyári nagycsapadékokban merülhet el a Nyugat-Dunántúl és Budapest környéke a század második felében', Másfélfok, Elérhető: [masfelfok.hu/2023/07/04/extrem-nyari-nagy-csapadek-magyarorszag-dunantul-budapest-klimaltozas/](https://masfelfok.hu/2023/07/04/extrem-nyari-nagy-csapadek-magyarorszag-dunantul-budapest-klimaltozas/) (Hozzáférés dátuma: 2024.08.25.)
- Vigh, P. (2023) 'Szélvihar után az ország – mi várható a jövőben? A klímaváltozás hatása a szélviharokra Magyarországon' Másfélfok, Elérhető: [masfelfok.hu/2023/06/24/szelvihar-utan-az-orszag-mi-varhato-a-jovoben-a-klimaltozas-hatas-a-szelviharokra-magyarorszag/](https://masfelfok.hu/2023/06/24/szelvihar-utan-az-orszag-mi-varhato-a-jovoben-a-klimaltozas-hatas-a-szelviharokra-magyarorszag/) (Hozzáférés dátuma: 2024.08.25.)
- Watkins S., Vino G., 2008, The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1232-1239, DOI: 10.1016/j.jweia.2007.06.042.
- 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.