



Elektromos járművek többlettömegének hatása a közlekedésbiztonságra

Effect of additional mass of electric vehicles on road safety

^{1,2}Kertész József, ³Dr. Kovács Tünde Anna

¹Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola, Óbuda, Magyarország,
kertesztjosef90@gmail.com

²Debreceni Egyetem Műszaki Kar Légi – és közúti járművek Tanszék, Debrecen, Magyarország,
kerteszt.jozsef@eng.unideb.hu

³Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás

Elektromos járművek tekintetében a környezetvédelmi és felhasználói követelményeknek az egyidejűleg történő kielégítéséhez a gyártóknak kompromisszumot kell kötni, amely kompromisszum a jármű tömegében jelenik meg leginkább. Sajnos a tudomány jelenlegi állása alapján a hatótáv növelésének egyik leghatékonyabb eszköze még mindig az akkumulátorok számának vagy méreteinek növelése, ami természetesen magával vonja a járművek önsúlyának növekedését. A nagyobb önsúly nagyobb mozgási energiát és lendületet jelent a jármű használata során, amely egyértelműen negatívan hat az esetleges ütközés során keletkező ütközési energiákra és a baleset következményeire. Jelen tanulmány ezért az elektromos járművek közutakon való fokozódó jelenlétének hatását vizsgálja a ütközésbiztonság tekintetében sérülési valószínűségi mutatókat használva.

Kulcs szavak: ütközésbiztonság, elektromos jármű, passzív biztonság, frontális ütközés

Abstract (Abstract címsor stílus)

In order to meet environmental and user requirements simultaneously for electric vehicles, manufacturers have to make trade-offs, which are most evident in the weight of the vehicle. Unfortunately, based on the current state of science, one of the most effective means of increasing range is still to increase the number or size of batteries, which of course, entails an increase in the weight of the vehicle. Increased unloaded weight means more kinetic energy and momentum during vehicle use, which clearly has a negative impact on the collision energy and the consequences of an accident. The present study, therefore, investigates the impact of the increasing presence of electric vehicles on public roads, using injury probability indicators for crash safety.

Keywords: crash safety, electric vehicle, passive safety, frontal impact

1. Bevezetés

A közlekedésbiztonság mértékét alapvetően meghatározza a közlekedésben részt lévő járművek átlagéletkora. Az ezzel kapcsolatos vizsgálatok elsősorban az aktív és passzív biztonsági rendszerek

hiányát vagy esetleges elavultságát tekintik a legnagyobb problémának ha az autók átlagéletkorát vizsgálják közlekedésbiztonság szempontából [1-2]. Több európai országban, ahogy Magyarországon is a járművek átlagéletkora 10 és 15 év közé tehető, ez azt jelenti, hogy a közlekedésben részt vevő járművek többsége 2007 és 2010 közötti gyártású. Az ekkor gyártott autók jelentős része az Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) által 4-5 csillagos minősítést nyert el, technikájuk már kiforrott, megbízhatóak, és az ezt követő évtizedben gyártott modellek ütközésbiztonsági minősítése csak javult. Ennek ellenére Európában a közúti baleseteken elhunytak száma az elmúlt 10 évben nem fordítottan arányosan csökkent az egyre biztonságosabb járművek terjedésével, sőt még rosszabb eredményekről olvashat a statisztikai felméréseket elemezve [3-4]. Az NCAP által végzett töréstesztek igyekeznek a lehető legpontosabban azonosulni a valós baleseti körülményekkel ezért a töréstesztek alapján kalkulált minősítést a vásárlók jogosan tekinthetik a biztonság garanciájának. A magas minősítés ellenére egyre több komoly vagy az élettel összeegyeztethetetlen személyi sérüléssel járó baleseteket jegyez a közlekedésbiztonsági statisztika. A közlekedésben résztvevő járművek átlagos önsúlyával foglalkozó kimutatások eredményét még tovább rontja az a tény, hogy a legnagyobb kereslett SUV-k iránt van, ezért az egyre népszerűsítő elektrifikáció ebben a jármű kategóriában mutatkozik meg a leginkább. Ezt azt jelenti, hogy a hagyományos járművekhez viszonyítva az alából nagyobb önsúllyal rendelkező városi crossoverek elektromos változatai még nagyobb tömeget és ezáltal nagyobb ütközési energiát jelent egy közlekedési balesetben. A következő táblázat néhány népszerűbb márka hagyományos és elektromos hajtáslánccal rendelkező változatait hasonlítja össze az önsúly tekintetében.

1. táblázat Hagyományos és elektromos hajtáslánccal rendelkező modellek önsúlya

| Márka | 2010 (ICE*) | 2022 (ICE) | 2022 (PHEV*/BEV*) | Elektromos változat többlet súly |
|-----------------------|----------------|---------------|----------------------|--|
| BMW X5 | 2105 kg | 2265 kg | 2510 kg | +245 |
| Opel Astra | 1373 kg | 1332 kg | 1603 kg | +271 |
| Renault Megane | 1235 kg | 1238 kg | 1711 kg | +473 |
| Audi Q7 | 2295 kg | 2165 kg | 2535 kg | +370 |
| BMW 7 series | 1875 kg | 2030 kg | 2715 kg | +685 |
| Mitsubishi Outlander | 1655 kg | 1475 kg | 1910 kg | +435 |
| Mercedes-Benz E-class | 1825 kg | 1855 kg | 2355 kg | +500 |
| Volvo XC 60 | 1869 kg | 1898 kg | 2113 kg | +215 |

*ICE: Internal Combustion Engine: belsőégésű motor

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle: Hálózatról is tölthető hibrid jármű

BEV: Battery Electric Vehicle: Teljesen elektromos jármű

2. Az ütközés végkimenetelét meghatározó tényezők

Ahogy a bevezetőben kifejtésre került a töréstesztek célja mindig a valóság lehető legpontosabb leképzése, hogy az erre alapuló biztonsági minősítési rendszer a sérülések és azok súlyosságának valószínűségét a legpontosabban fejezze ki. Azonban egy tényleges ütközési szituációban a laborkörülményekhez képest rengeteg változó paraméter lehet. Ilyen változó az ütközésben többek között a részt vevő járművek tömege, a tömegük különbsége, passzív és aktív biztonsági rendszerek teljesítménye, az út, a környezeti vagy akár a személyi viszonyok. A baleset végső kimenetelét nem csak a balesetet megelőző paraméterek (sebesség, járműtömeg, ütközési szög és átfedés) de az ütközés alatti (lassulás mértéke és időbeli lefolyása) és az ütközés utáni paraméterek (pördülés,

borulás) is meghatározzák. Ezt az összefüggést írja le a Haddon-mátrix, amely egyértelműen alátámasztja, hogy miért csak százalékos valószínűségben fejezhető ki egy jármű ütközésbiztonsági minősítése és nem egzakt módon [5-6].

| | Ütközés előtt | Ütközés alatt | Ütközés után |
|----------------------|--|---------------|--------------|
| Emberi viszonyok | Technikai és személyi sérülés mértéke | | |
| Környezeti viszonyok | | | |
| Jármű viszonyok | | | |

1. ábra Haddon-matrix [7]

3. Mutatószámok a személyi sérülések leírására

Ütközés során a jármű haladási sebessége a másodperc töredéke alatt redukálódik nullára, vagy akár az ütközés mértékétől függően negatív értéket is felvehet. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a jármű kvázi leptattan és az ütközés maradványsebesség értékével az ellenkező irányba halad. Ez még egy intenzív fékezés esetéhez képest is sokszoros lassulást jelent. A járműben utazók azonban a tehetlenség miatt a lassulással ellentétes, de azonos nagyságú gyorsulást szenvednek el. Az ütközési situációtól függően ezeknek a gyorsulási vektoroknak Y-irányú, vagyis oldalirányú komponense is lehet. Az ilyen mértékű hossz és keresztirányú gyorsulásoknak a belső szervek és az azok rögzítő szövetei már nem képesek elviselni, és részleges vagy teljes leszakadásukra kerülhet sor, amely intenzív belső vérzést vonhat maga után. Ezért a járművek biztonsági minősítése a létfontosságú szervek által elszenvedett gyorsulás értékeken alapszik, és súlyosságuk leírásukhoz, vizsgálatukhoz mutatószámok bevezetése volt szükséges. Ezek közül a legfontosabbak a mellkasi terhelést leíró CIC (Chest Injury/Impact Criteria), a fej tehetlenségű mozgásából adódó sérülések valószínűségét kifejező HIC (Head Injury/Impact Criteria), és a ASI (Acceleration Severity Index) amelyet az ütközés intenzitására használnak [8]. A tanulmány az elektromos járművek nagyobb önsúlyára visszavezethető HIC érték növekményére fókuszál, ezért ennek részletezésére a következő fejezetben kerül sor.

3.1 Fej-sérülésikritérium (HIC)

A HIC (Head Injury Criteria) fej-sérülési kritérium az alábbiak szerint kifejezhető:

$$HIC(\Delta t_{max}) = \max_{t_1}^{t_2} \left[\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \hat{a} dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right] \quad (1)$$

ahol a $t_2 - t_1 \leq \Delta t_{max}$ feltétel teljesülése szükséges. A t_1 a vizsgált intervallum kezdeti a t_2 pedig a záró időpontja milliszekundumban kifejezve. Az \hat{a} a fej gyorsulását jelöli, mértékegysége G. Az így kapott eredmény jelölése HIC₁₅, ha a $\Delta t_{max}=15$ ms, és HIC₃₆, ha a $\Delta t_{max}=36$ ms. Fontos megjegyezni, hogy az \hat{a} -nál fent említett G mértékegységet a $\hat{a}=a/g$ módon értelmezzük, ahol az "a" a fej gyorsulása a g pedig a gravitációs gyorsulás bármilyen, de azonos mértékegységben használva. A prefereált mértékegység a m/s² Ezek alapján az \hat{a} leírására a normalizált fej-gyorsulás kifejezését használjuk. A normalizált fej-gyorsulás tehát egy mértékegység nélküli számként jelenik meg a képletben, vagyis a végső HIC mértékegysége másodperc lesz. A képletben szereplő 2.5 index egy – számtalan kutatáson és emberi és állatkísérletekkel megállapított - tapasztalati szám a fejre és koponyára vonatkozóan. Természetesen más testrészek SI értékének meghatározásához más érték

kerül behelyettesítésre. A HIC-t általában a kritikus periódusra, vagyis az ütközést követő 30-60 ms közötti időintervallumra határozzuk meg történi, ahol a gyorsulás csúcsok jelentkeznek [9].

4. Önsúly hatása a lassulás mértékére

Az Eurostat által vezetett statisztika szerint ma Magyarországon újonnan forgalomba helyezett járművek átlagos önsúlya 1350 kg [10]. Ezért a tanulmányban frontálisan ütköztetett egyik vizsgálati járműnek ezt a tömeget választjuk meg, amelyet „A” karakterrel jelölünk. Az összehasonlítás érdekében az ütközési számpéldában szereplő másik járműnél egy olyan modellre esett a választás, amelyből elérhető tisztán elektromos és hagyományos belsőégésű motorral szerelt változata is. A választott modell hagyományos motorral szerelt változata 2030 kg, amíg elektromos változata 2715 kg önsúllyal bír. Ezen felül fontos szempont volt, hogy a lehető legmagasabb biztonsági minősítéssel rendelkező márkákat válasszuk mindkét járműnél, hogy kapott eredmények alkalmasak legyenek a többlet tömeg negatív hatásának elemzésére. A teljes átfedéses frontális ütközésre kapott jellemző paramétereket a következő táblázat foglalja össze különböző ütközési sebességekre meghatározva:

2. táblázat Hagyományos és elektromos hajtással rendelkező modellek önsúlya

| Jármű önsúly [kg] | | Ütközés pillanatbeli sebesség ($v_A=v_B$) [km/h] | Mozgási energia [MJ] | | Ütközés utáni maradvány sebesség [km/h] | Elszenvedett átlagos lassulás ($t=0.12s$) [G] | |
|-------------------|---------|--|----------------------|---------|---|---|---------|
| A jármű | B jármű | | A jármű | B jármű | | A jármű | B jármű |
| 1350 | 2030 | 50 | 0.13 | 0.197 | 10.05 | 14.16 | 9.42 |
| | 2715 | | | 0.261 | | 16.72 | 15.73 |
| | 2030 | 70 | 0.25 | 0.383 | 14.41 | 19.91 | 13.11 |
| | 2715 | | | 0.513 | | 23.5 | 22.06 |
| | 2030 | 90 | 0.42 | 0.640 | 18.52 | 25.61 | 16.68 |
| | 2715 | | | 0.848 | | 30.22 | 28.36 |

A táblázat értékei alapján látható, hogy nagyobb sebesség tartományban az elektromos változattal való ütközés egyre nagyobb lassulás többletet eredményez az „A” vizsgálati jármű tekintetében. 50 km/h ütközési sebességet feltételezve az elektromos változattal történő ütközés mindössze 1.57 G többletlassulást jelent. Ugyanez az érték 70km/h-nál 2.15 G, 90 km/h-nál pedig már 2.75 G különbözetet eredményez az „A” jármű esetébe azonos ütközési körülményeket feltételezve. Az ütközés teljes lefolyási idejét 0.12 másodpercre választottuk meg.

5. A HIC változásának mértéke

Annak érdekében, hogy a járművek tömegének személyi sérülés mértékére vett hatását tudjuk elemezni, mindkét ütközés esetében azonos passzív és aktív biztonsági rendszert feltételezünk, azonos környezeti feltételek mellett, ezért a gyorsulás karakterisztikáját is azonos lefutásúnak választjuk meg, azok csak a lokális maximumaiban térnek el. A HIC érték változását a legkritikusabb tartományra vonatkoztatjuk, hiszen számos kutatás igazolja, hogy a személyi sérülések jelentős része ebben a periódusban keletkezik. Első lépésként a vizsgált tartomány átlagos gyorsulás értékét szükséges meghatározni [9]. Ehhez a lassulásfüggvények két kitüntetett határérték közötti integrál kiszámítása, vagyis a görbe alatti terület meghatározása szükséges, amelyhez a következő képletet használjuk:

$$\bar{a}(t_1 - t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) \quad (2)$$

Jelen tanulmány a HIC érték változását vizsgálja az ütközésben résztvevő járművek tömegeire fókuszálva, ezért a konkrét passzív és aktív biztonsági rendszerek teljesítményének hiányában a számítás a HIC %-os változására fókuszál és nem azok konkrét számszerű értékeinek kifejezésére. A HIC változás meghatározása a 2. táblázatban szereplő lassulásértékek figyelembevételével történik az (1) és (2) képletben való behelyettesítéssel. Az így kapott eredményeket pedig a 3. táblázatban foglaltuk össze.

3. táblázat HIC növekmény elektromos változattal való ütközés esetén [Szerzők]

| Jármű önsúly [kg] | | Ütközés pillanatbeli sebesség ($v_A=v_B$) [km/h] | „A” járműre számított HIC %-os növekmény |
|-------------------|---------|--|--|
| A jármű | B jármű | | |
| 1350 | 2030 | 50 | + 19 % |
| | 2715 | | |
| | 2030 | 70 | +21 % |
| | 2715 | | |
| | 2030 | 90 | + 22% |
| | 2715 | | |

A kapott eredmények alapján kijelenthető, - azonos ütközési paramétereket feltételezve – hogy minden plusz 500 kg tömeg differencia esetén 19%-os HIC érték növekedést jelent 50 km/h-s bemeneti sebesség esetén. Ennek a többlet tömegnek a hatása fokozódik magasabb sebesséstartományban, hiszen 90 km/h-s ütközési sebességet feltételezve - ugyan azon 685 kg tömegdifferencia esetén - a HIC már 22%-os növekményt mutat. Az átlagos 20%-os növekedés hatásának érzékeltetéséhez az AIS (Abbreviated Injury Scale) sérüléstartományok definiálása szükséges.

6. AIS – sérülés skála

Az AIS (Abbreviated Injury Scale) egyszerűsített sérülés skála egy anatómia alapú számkarakteres leíró módszer, amelyet a személyi sérülések súlyosságának osztályozására és leírására használhatunk, beleértve a sérüléshez kapcsolódó életveszélyt is. Az AIS az egyik leggyakrabban alkalmazott traumás sérüléseket skálázó módszer. A skála első változata 1969-ben jelent meg, azóta többször is jelentősebb átdolgozásokon vagy frissítéseken esett át. Az AIS a sérülés három aspektusát definiálja: típusát, helyét és súlyosságát. Az AIS súlyossági skálája 1-től 6-ig terjed, ahol az 1 a könnyű sérülés megfelelője. A 6-os AIS súlyosság nem ekvivalens az életvesztéssel, azonban már olyan sérüléseket is magába foglalhat, amelyek bizonyos esetekben az élettel összeegyeztethetetlenek. Az AIS kódok tartalmát a 4. táblázat foglalja össze [11].

4. táblázat A fejsérülés mértéke AIS kód alapján [12]

| HIC | AIS | Sérülés típusa | Fejsérülésre vonatkozó leírás | AIS % elhalálozási valószínűség |
|-----------|--------|----------------|---|---------------------------------|
| 135-519 | MAIS-1 | minimális | Fejfájás vagy szédülés | 0 |
| 520-899 | MAIS-2 | mérsékelt | Eszméletvesztés (<1 óra), lineáris törés | 1-2 |
| 900-1254 | MAIS-3 | komoly | Eszméletvesztés (1-6 óra), koponya depresszív sérülés | 8-10 |
| 1255-1574 | MAIS-4 | fokozott | Eszméletvesztés (6-24 óra), koponya nyílt sérülés | 5-50 |
| 1575-1859 | MAIS-5 | kritikus | Eszméletvesztés (>24 óra), nagyterjedésű hematóma | 5-50 |
| >1860 | MAIS-6 | maximum | Gyakorlatilag nem túlélhető | 100 |

7. Következtetés

A fenti táblázat alapján, ha a HIC értékére 1000-t kapunk, akkor az ütközés AIS rendszer szerinti besorolás alapján a 3. kategóriába lenne sorolható. Ezt számszerűen kifejezve azt jelenti, hogy megközelítőleg a balesetben résztvevők 10%-a vesztene életét. Ezt a valószínűséget nem úgy kell értelmezni, hogy a fennmaradó 90%-nak semmilyen sérülése nem keletkezne, hanem hogy az általuk elszenvedett sérülés mértéke még az élettel összeegyeztethető. Egyébiránt hasonló lefutású diagram használható a CIC (Chest Injury Criteria) vagyis mellkas lassulására visszavezethető terhelésekre is [12]. A 4. táblázat első oszlopában található az egyes AIS kódok-hoz tartozó HIC tartomány. Ezeknek a tartományoknak a terjedelme az AIS kódok növekedésével egyre csökkennek. Amíg ASI3-hoz tartozó HIC tartomány 354, addig a következő ASI4 csoportban már csak 319. Ez azt jelenti, hogy a tanulmányban végzett számítások alapján egy elektromos változattal történő ütközés esetén jelentkező átlagos +20%-os HIC növekmény már egy következő ASI fokozatba történő besorolást von maga után, ami alapján egyértelműen kijelenthető a komolyabb, akár az élettel összeegyeztethetetlen személyi sérülések valószínűségének növekedése. A fenti számításból egyértelműen kiderül, hogy a tömegoptimalizáció nem csak a jármű energia hatékonyságához járulhatna hozzá, hanem az ütközésbiztonság mértékéhez is.

8. Összefoglalás

A lokálisan emissziómentesnek tekinthető elektromos autók hozzá járulhatnak a fenntarthatóbb jövőképehez, hogy milyen mértékben arra jelen tanulmány nem tér ki, azonban számuk egyértelműen növekszik. A tényszerű adatok viszont azt igazolják, hogy az egyes márkák elektromos változatai átlagosan 4-500 kg-mal nagyobb önsúllyal rendelkeznek. Ez a többletsúly az akkumulátorcsomag és az azok védelme érdekében kialakított konstrukcióban keresendő. Ezt a hipotézist a 2. táblázatban összefoglalt számítási eredmények is alátámasztják. Egy elektromos változattal való ütközés esetén a baleseti kisebb tömeggel rendelkező jármű jelentősen nagyobb lassulást szenved az ütközés pillanatában. Rosszabb esetben a közel 500 kg többlet maradványsebességet is eredményezhet. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a könnyebb jármű sebessége nem csak nullára csökken a másodperc töredéke alatt, hanem ellenkező irányba (hátrafelé) gyorsulni kezd, amely még drasztikusabb lassulást eredményez. A ütközés során jelentkező lassulás időbeli lefolyása nem lineáris, amely a gyűrődő zóna nem egyenletes deformációjára vezethető vissza. Az ütközés időtartamát tekintve a 30 és 60 milliszekundum közötti periódus a

legdrasztikusabb, hiszen ahogy az a második ábrán szereplő diagramon is látható itt éri el a lassulás a maximum értékét. Erre a tartományra határoztuk meg a HIC növekményt különböző sebességtartományokban összehasonlítva a hagyományos és elektromos változattal való ütközés esetét. A fejsérülési mutatószám átlagosan 20%-al mutatott nagyobb értéket a könnyebb jármű utasainál, elektromos változattal való ütközés esetén. Ez a növekmény határértéktől függően már egy nagyobb AIS csoportba való besorolást vonhat maga után, ezáltal jelentősen növelve a súlyos sérülés vagy elhalálozás valószínűségét. Az elektromos járművek a töréskereszteken kiemelkedő eredményeket érnek el a hatékonyabb gyűrődő zóna kialakítás végett. Azonban a közutakon való jelenlétük a hagyományos és különösen kisebb tömegű járművekre nézve nagyobb veszélyforrást jelent. Ezért azok tényleges tömegoptimalizációja nem csak energia hatékonyabb felhasználást jelentene, hanem a közlekedésbiztonság fokozására is pozitív hatással lenne.

9. Hivatkozások

- [1] Griškevičius, P., & Žiliukas, A. (2003). The crash energy absorption of the vehicles front structures. *Transport*, 18(2), 97-101.
- [2] Golubović-Bugarški, V., Petković, S., & Globočki-Lakić, G. (2021). 1. The effect of corrosion on a structural integrity and vehicle safety
- [3] Cabrera-Arnau, C., & Bishop, S. R. (2021). Urban population size and road traffic collisions in Europe. *PLoS one*, 16(8), e0256485.
- [4] European Union Mobility and Transport - https://transport.ec.europa.eu/2021-road-safety-statistics-what-behind-figures_en (2022.10.04.)
- [5] Aghayari, Hossein, et al. (2021). "Mobile applications for road traffic health and safety in the mirror of the Haddon's matrix." *BMC medical informatics and decision making* 21.1, 1-12.
- [6] Mahdinia, I. (2021). Exploring potential impacts of connected and automated vehicle technologies
- [7] Gyula, K., & Ferenc, I. (2011). Utasmozgás vizsgálata gépjárművek ütközésénél. *Biomechanica Hungarica*, 4(1).
- [8] Doecke, S. D., Dutschke, J. K., Baldock, M. R., & Kloeden, C. N. (2021). Travel speed and the risk of serious injury in vehicle crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 161, 106359.
- [9] Dalong Gao & Charles W. Wampler, (2009). On the Use of the Head Injury Criterion (HIC) to Assess the Danger of Robot Impacts, Manufacturing Systems Research Laboratory General Motors R&D Center MC 480-106-359 Warren, MI 48090, USA
- [10] <https://data.europa.eu/data/datasets/d1qgy5f48gznlucqxtuhw?locale=en> (2022.09.14.)
- [11] Halari, M. M., Charyk Stewart, T., McClafferty, K. J., Pellar, A. C., Pickup, M. J., & Shkrum, M. J. (2022). Injury patterns in motor vehicle collision-pediatric pedestrian deaths. *Traffic injury prevention*, 1-6.
- [12] Wilde, K., Tilsen, A., Burzyński, S., & Witkowski, W. (2019). On estimation of occupant safety in vehicular crashes into roadside obstacles using non-linear dynamic analysis. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 285, p. 00022). EDP Sciences.