

# Alternatív hajtású autóbuszok nagyvárosi közösségi közlekedésben

## Alternative propulsion buses in the metropolitan public transport

*Prof. Dr. habil LAKATOS István\*, Dr. SZAUTER Ferenc, PUP Dániel*

Széchenyi István University, Győr, Hungary

\* lakatos@sze.hu

### Abstract

*The lecture is analyzing the possibility of an optimal energy mix through the example of a Hungarian metropolis. Using the city bus routes, we analyze and compare the traditional Diesel, CNG, and electric propulsion. An optimal energy mix is provided by using SWOT analysis.*

**Keywords:** CNG, electric powertrain

### Kivonat

*Az cikk egy magyarországi nagyváros példáján elemzi a helyi tömegközlekedésben alkalmazható optimális energiamix lehetőségét. A városban ellátandó viszonylatokra megvizsgáljuk a hagyományos dízel üzemű autóbuszokkal összevetve a CNG-hajtást és az elektromos hajtást is. SWOT analízissel és gazdasági elemzéssel alátámasztva fogalmazzunk meg optimalizált energiamixet.*

**Kulcsszavak:** CNG, elektromos hajtás

## 1. BEVEZETÉS

A cikk főként a CNG alapú közúti közlekedés fejlesztési lehetőségeit tárja fel. Emellett azonban szerepet kapott a különböző hajtási módok vizsgálata is. Az alternatívák közül kiemelt szerepet kapott a tisztán elektromos hajtás, illetve a jövőbe mutató technológiák közül a hidrogén.

A különböző alternatív meghajtású járművek üzemeltetéséhez különböző infrastrukturális rendszerek szükségesek, ezért az elemzések során kitértünk a töltőállomások és a fenntartóbázisok kialakítására is. A tanulmány alapvetően a közösségi közúti közlekedésre fókuszál, de az elemzéseknel beemeltük a kisebb személy- és haszongépjárművekhez tartozó kimutatásokat, elemzéseket is, mivel a töltőállomások használata adott esetben megosztható az egyéb közlekedési eszközök számára is.

A tanulmány szerkezetileg a következő logikát követi:

- a műszaki-technológiai alapok,
- kapcsolódó gazdasági szempontok:
  - CNG,
  - tisztán elektromos hajtás,
  - összehasonlítási alap: dízel üzem.

Az összehasonlító, illetve a SWOT elemzések bázisaként alapvetően a dízel hajtási technológia jelenik meg, mivel a közösségi busz közlekedésben erre a legelterjedtebb hajtási módra kerestük az alternatívákat.

A különböző alternatívákat a műszaki paraméterek és technológiai jellemzők mellett az üzemeltetési, üzemanyagellátási és jogi – szabályozási környezet szempontjából is bemutatjuk.

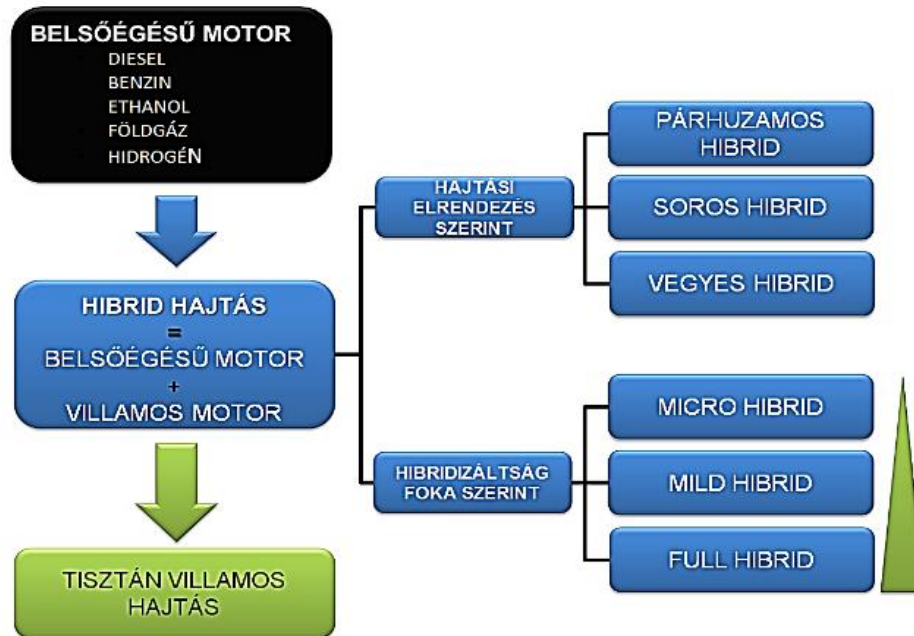
Az elemzésben kitértünk a hidrogén - mint üzemanyag - hasznosíthatósága, illetve az üzemanyagcellás hajtástechnológia jelenlegi alkalmazhatóságára.

A második fejezetben Győr közösségi járműparkjának CNG üzemeltetésére történő átállításának lehetőségeit elemeztük. Először a jelenlegi járműflottát, a közlekedési hálózatot és a releváns városszerkezeti jellemzőket vettük górcső alá.

## 2. BELSŐÉGÉSŰ MOTOROK CNG, DÍZEL ÉS ELEKTROMOS ÜZEMÉNEK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA KÖZÖSSÉGI KÖZLEKEDÉSBEN FUTÓ AUTÓBUSZOK KAPCSÁN MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGI SZEMPONTOK SZERINT

Ebben a fejezetben a CNG, valamint a tisztán elektromos hajtást hasonlítjuk össze műszaki és gazdasági szempontok alapján, SWOT elemzésekkel [1, 2, 3, 4].

Az 1. ábra a különböző hajtási lehetőségeket foglalja rendszerbe.



1. ábra Különböző hajtási módok áttekintése

Fontos kiemelni, hogy a gazdasági szempontok és a károsanyagkibocsátás mellett nem lehet figyelmen kívül hagyni a teljes életciklusra vonatkozó környezeti terhelést. Ha a környezeti terhelésből a CO<sub>2</sub> kibocsátást nézzük, akkor a használati termék-életcikluson kívül az azt megelőző nyersanyag előállítás, a gyártás, illetve a végén az újrahasznosítás, megsemmisítés alatti környezeti terhelést is figyelembe kell venni (2. ábra) [5, 11].

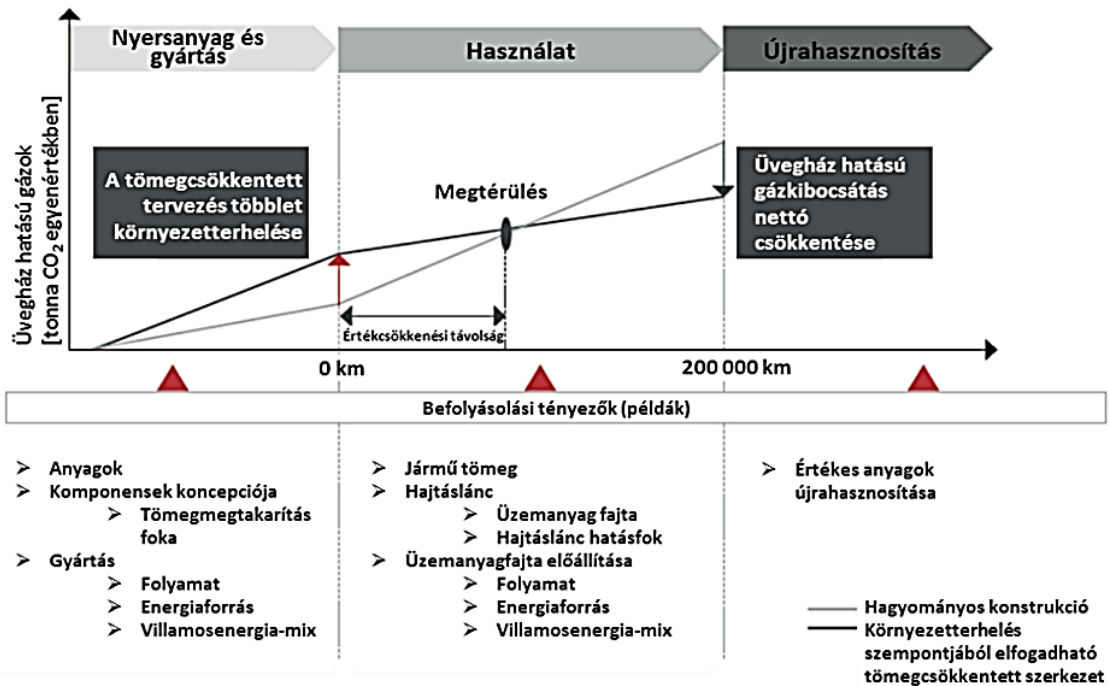
### 2.1 A CNG, mint alternatív üzemanyaggal történő hajtás elemzése

A belsőégésű motorok hatékonyan, környezetbarát és gazdaságos módon üzemeltethetők földgázzal vagy biogázzal. A földgáz üzem két általánosan elterjedt módja a CNG (Compressed Natural Gas) és az LNG (Liquified Natural Gas). A haszongépjárműveknél a gázolaj mellett sokkal gyakrabban alkalmaznak földgáz alapú üzemanyagokat, mint LPG-t. Ennek oka, hogy az üzemanyagellátási logisztika egyszerűbben biztosítható [10].

A földgáz jellemzőiből adódóan elsősorban „kényszergyújtású”, benzinmotoros üzemanyagként alkalmazható [6, 7].

Az autógáz úgynevezett „száraz gáz”, amely nem keni a dugattyúgyűrűk és a henger egymáson elmozduló felületeit oly mértékben, mint a benzin levegő keverék. Emiatt fokozottabb az elhasználódás. A kenési feladatokat ellátó kenőolaj minősége az élettartam függvényében viszont a gázüzemnél kevésbé romlik, és elmarad benzinnel történő felhígulás is [12].

## Különböző jármű koncepciók teljes életciklus-elemzése (Life Cycle Assessment, LCA)



2. ábra Különböző járműkonceptiók hatása a teljes termék életciklus alatti CO<sub>2</sub> kibocsátásra [5]

A jármű teljes költségének a legnagyobb hányada a változó költségekből adódik, amelynek jelentős részét képezi a jármű üzemanyag költsége. Ennek kapcsán a dízel járművekhez viszonyított előnyök:

1. A CNG jármű beszerzési árak 6%-kal magasabb, mint a dízel járműé.
2. A CNG jármű karbantartási és javítási költségei 2,4%-kal magasabb, mint a dízel járműé.
3. A CNG jármű üzemanyagköltsége körülbelül 20-25 %-kal alacsonyabb, mint a dízel járműé.
4. A CNG járműnek nincs AdBlue fogyasztása.
5. Így összesítve a CNG jármű összköltsége az adott futásteljesítmény mellett alacsonyabb, mint a dízel járműé.

CNG járművek alkalmazásának további előnyei:

1. Bizonyítottan megbízható a technológia,
2. Gazdaságos és kényelmes alternatíva a dízel járművek kiváltására,
3. Összehasonlítva más alternatív üzemanyag megoldásokkal napjainkban, a leggazdaságosabban használható.
4. Különleges beavatkozások nélkül teljesíti a korszerű alacsony kibocsátási előírásokat.
5. A CNG jármű 100%-ban képes biogáz üzemanyaggal történő működésre.
6. A CNG jármű zajcsökkentése 50-75%
7. A Föld gáz tartalékai nagyobbak, mint a fosszilis üzemanyagoké (biogáz hatalmas kiegészítő tartalékok)

### 2.1.1. A CNG üzem műszaki jellemzői

A CNG-t Otto-motorokban (benzinüzemű), valamint Diesel-motorokban is lehet használni. A szegény keveréket felhasználó dízel-motorok nagyobb hatásfokot tudnak elérni a sztöchiometrikus Otto-motorokkal összehasonlítva, magasabb NO<sub>x</sub> és szénhidrogén kibocsátás árán.

A megfelelően kialakított sűrített földgázzal működő motor a benzinmotorral összehasonlítva a magasabb effektív teljesítményt nyújt, mert a sűrített földgáz oktánszáma magasabb, mint a benziné.

A CNG tartályok alacsony nyomáson (úgynevezett „lassú töltés”), vagy magas nyomáson (úgynevezett „gyors töltés”) tölthetők fel. A különbséget a töltőállomáson érvényes ár és a töltési idő jelenti.

A CNG-tartályok típusai és tömeg - térfogat arányuk:

Európa 27 tagállamában 2007-től nőtt intenzíven a forgalomban lévő CNG járműszám, négy év alatt több mint másfélszeresére emelkedett a nyilvántartás. 2014. szeptembertől 1-től kizárólag Euro 6 követelményeket teljesítő gépjárművek helyezhető forgalomba.

## 2.1.2. CNG-üzem SWOT analízise

A CNG üzem SWOT elemzését az 1-es táblázat mutatja be [6, 7, 8]. Helyi, elővárosi és helyközi tömegközlekedést biztosító buszok esetében a töltőállomás infrastruktúra szűkössége nem okoz problémát, mert ezekhez dedikált CNG töltőállomásokat lehet építeni a koncentrált felhasználásra alapozva.

CNG SWOT analízis

1. táblázat

A CNG-üzem erősségei	A CNG-üzem gyengeségei	A CNG-üzem lehetőségei	Veszélyek
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olcsóbb, mint bármelyik másik üzemanyagfajta,</li> <li>• Jelentős tartalékok állnak rendelkezésre (hazánkban is),</li> <li>• A gázolajhoz képest jóval stabilabb az ára,</li> <li>• Környezetvédelmi szempontból számos kedvező tulajdonsággal rendelkezik: alacsonyabb CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> és gyakorlatilag nulla a korom kibocsátás,</li> <li>• Lényegesen kisebb zajterhelés,</li> <li>• Megújuló formában is létezik: ez a biogáz (zéró CO<sub>2</sub> kibocsátás),</li> <li>• 2018-ig az EU területén jövedéki adó mentességet élvez,</li> <li>• CNG-vel üzemelő járművek a legkedvezőbb környezetvédelmi osztályba vannak sorolva (súlyadó, környezetvédelmi zónák, stb.),</li> <li>• Közúti személy- és teherszállításban versenytársa a dízel-üzemű járműveknek, Egyre több üzemeltetői tapasztalat áll rendelkezésre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A CNG-üzemű járművek választéka még viszonylag szűk a hagyományoshoz képest.</li> <li>• Ma már speciálisan CNG üzemhez fejlesztenek motorokat (ezek nem alkalmasak dízel üzemre).</li> <li>• A CNG-s járművek valamivel drágábbak, mint a dízel vagy benzin üzeműek.</li> <li>• Korlátozott tartálméretük miatt kisebb hatótávolságúak, mint a hasonló dízel-üzemű járművek.</li> <li>• Az üzemanyagpiac vezető cégeinek konkurenciát jelent, jelentős nemzetközi lobbis tevékenység zajlik ellene.</li> <li>• Magas a költsége egy CNG töltőállomás létrehozásának.</li> <li>• Több hatósági és törvényi rendelkezést kell teljesíteni az üzemeltetés és a karbantartás területén is: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Szakvizsgák (járművezető, kútkezelő, karbantartó személyzet részére),</li> <li>▪ Speciális (robbanás biztos) szerszámok, Szivárgás detektorok, szellőztetés.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jelenleg magas költséggel üzemelő járművek kiváltása olcsóbbakkal.</li> <li>• Folyamatosan emelkedő gázolaj és benzinárak.</li> <li>• Növekvő ökológiai tudatosság a lakosság és a vállalkozók körében.</li> <li>• Új munkahelyek teremtése.</li> <li>• Az európai energia és klímapolitikai célok kedveznek a metán alapú termékeknek (földgáz, biogáz).</li> <li>• Szigorodó környezetvédelmi szabályozások: pl. dízel járművek leállítása szmog esetén.</li> <li>• CNG és biogáz népszerűsítő projektek futnak.</li> <li>• Új beruházási támogatási lehetőségek a kormányzat és az EU részéről.</li> </ul> <p>Csökkenő energiafüggés, főként a biogáz esetén.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A földgáz árak emelésének veszélye a kormány által.</li> <li>• Változó adópolitika és politikai irányok (jövedéki adó emelése).</li> <li>• A rossz szabályozás miatt ellenőrizetlenül terjed az otthoni töltés: balesetek esetén a közvélemény elfordulhat a CNG-től.</li> </ul>

Az állami szektor általános támogatása (nem csak a buszokra és meghatározott területekre értve) az egyik legfontosabb tényező a CNG és bio-CNG terjeszkedésének jelenlegi fázisában (természetes gázhajtású járművek, szabályozás, adózás, infrastruktúra, közvetlen támogatás, átmeneti juttatás a magas vételárú járművekre stb.).

A versenyképesség érdekében kiemelten fontos lenne:

- A töltési infrastruktúra mérettől független (otthoni, vállalati és nyilvános) kiterjesztése szükséges, a CNG előállítás és töltési hatékonyság növelésével egyetemben.
- A szabályozási akadályok csökkentés, kutatás támogatása.
- Az üzemanyagok a „well-to-wheel” potenciál szerinti értékelése.
- Szorosabb együttműködés a jármű- és töltő technológia-gyártó és gázipari vállalatok között, közös kutatás és fejlesztési (K+F) irányvonalak.

### 2.1.3. A tisztán elektromos hajtás elemzése

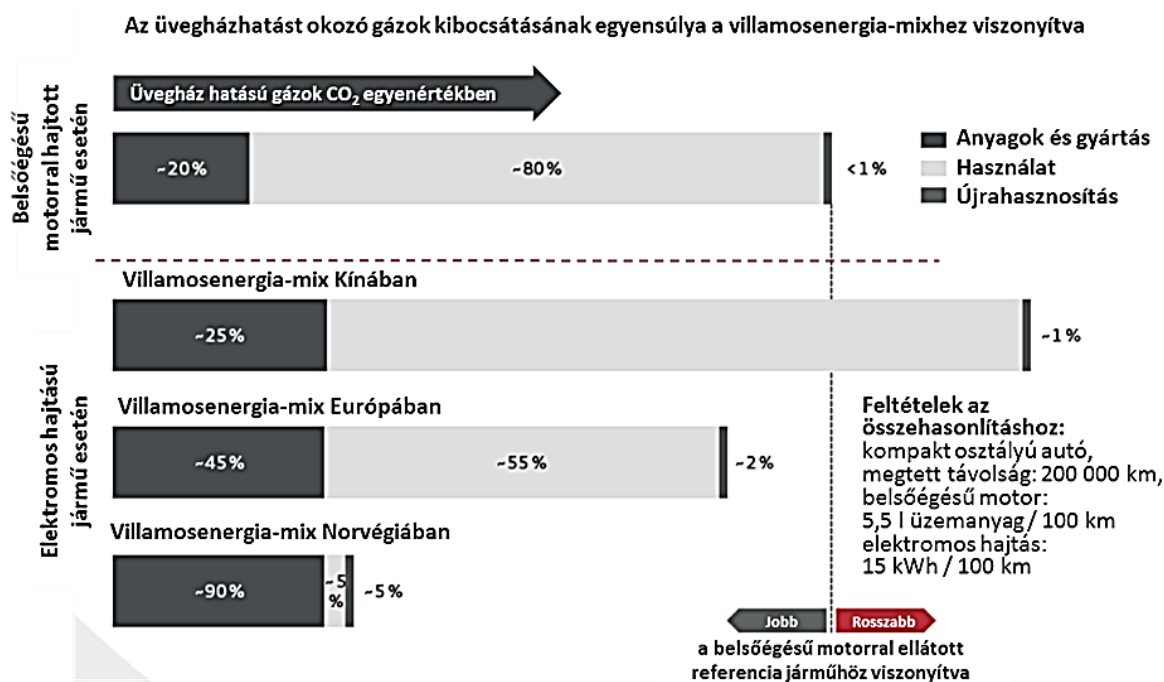
A villamos motorok használata a belső égésű motorok helyett kiváló lehetőséget nyújt az elérhető hatásfok növeléséhez. Egy hagyományos, belső égésű motor hatásfoka 25–30 százalék körüli, ami azt jelenti, hogy a rendelkezésre álló energia 70–75 százaléka elvész hő formájában. A belső égésű motorokkal szemben egy elektromos motorral akár 70–80 százalékos hatásfok is elérhető.

A belsőégésű motorokkal ellentétben az elektromotorok már a legkisebb fordulatszám esetén is le tudja adni a motor a maximális nyomatékát, míg a motor teljesítménye a fordulatszám növekedésével lineárisan nő. Ez a tendencia a névleges teljesítményig igaz, utána a teljesítmény állandó értéket vesz fel.

Ugyanakkor az akkumulátorok jelentősen befolyásolják a járműben lezajló energiaátalakítás hatásfokát. A legtöbb elektromos autóra már komplett energiatároló rendszert építenek be, amely számos különböző kémiai anyagból készülhet.

*A járművek használata során felhasznált villamosenergia és a villamosenergia-mix figyelembevétele a környezetterhelés számításakor*

Ahogy az az alábbi összehasonlításban is látható, a tisztán elektromos meghajtású járművek környezetszennyezés szempontjából nem feltétlenül előnyösebbek a belsőégésű motoros járművekhez képest, mivel a közlekedéshez szükséges energiát a villamos hálózatról való töltéssel nyerik.



3. ábra Az elektromobilitás CO<sub>2</sub> egyenértékű környezeti összehasonlítása az energiamix tükrében [5]

A járművek teljes életciklusa alatt, különösen az elektromos töltéssel üzemeltethető járműveknél nagy jelentősége van az adott országra jellemző villamosenergia mixének, ami megmutatja, hogy a villamosenergia milyen energiahordozókból áll elő százalékosan (nukleáris energia, megújuló energia, földgáz, szén stb.) [9].

A különböző energiahordozókból előállított elektromos áram mögött, a különböző erőműveknél jön létre a környezeti terhelés nagy része (továbbá önmagában a nyersanyag kibányászására is ökológiai lábnyomot számolhatunk) (3.ábra).

Magyarországon, ahogy Európában is, üvegházhatású gázok szempontjából javulóban van az elektromos áram előállításának környezeti terhelése. A tervek szerint egyre nagyobb teret nyer a megújuló energia és a nukleáris energia. Ezzel az elektromos meghajtású járművek teljes élettartamra számított környezeti terhelése (kiemelten a használati idő alatti), a jelenlegihez képest is jóval előnyösebb lehet. További

fontos szempont, hogy milyen napszakban töltjük a járműveket és akkor milyen a pillanatnyi villamosenergia-mix [4].

Az akkumulátorok jellemzői: Az akkumulátor a villamos hajtású járművek alapvető energiaforrása. Tulajdonsága, hogy kémiai energia formájában tárolja a villamos energiát. Alapvetően kijelenthető, hogy jelenleg az elektromos autók elterjedésének legfőbb korlátja az akkumulátortechnológia fejlettségi szintje, pontosabban az, hogy minden típusnak jelenleg lényegesen alacsonyabb a fajlagos energiasűrűsége, mint a folyékony tüzelőanyagoké. Ennek eredményeképp azonos hatótáv megtételéhez lényegesen nagyobb tömegű akkumulátorcsomagot kell beépíteni a járműbe, mint amennyi folyékony tüzelőanyagból szükséges volna, ezáltal az egész jármű tömege megnő, ami negatívan hat a menetdinamikára és a helykínálatra.

## **2.2 A tisztán elektromos hajtás összefoglaló SWOT elemzése**

Az alábbiakban első sorban az elektromos jármű hajtási mód általános SWOT elemzését mutatjuk be, majd a következő alfejezetekben két nagyvárosban megvalósult elektromos busz mintaprojekt, valamint ugyanúgy tömegközlekedési fókusszal az európai szintű technológiai-piaci SWOT elemzéseket ismertetjük [4].

### **2.2.1. Erősségek**

Az elektromos technológia fejlődésével egyre olcsóbban gyárthatóak, az energia tárolására és szállítására alkalmas rendszerek, egyre olcsóbbak, tároló kapacitásuk egyre nagyobbak, valamint az akkumulátorok töltési terhelhetősége is jelentősen megnőtt. Ennek eredményeként az elektromos autók „tankolása” is rövidebb időt vesz igénybe, amely azt eredményezi, hogy sokkal nagyobb hatótávolságra lehet ezeket a gépjárműveket alkalmazni. Az akkumulátor fejlődésével egy időben növekedett az egy telepvisoport élettartamán belüli töltési ciklusok száma, így a gépjárművekbe épített akkumulátorok hosszabb időn keresztül használhatóak csere szükségessége nélkül. Az elektromos járművek előnye továbbá, hogy nagyobb hely marad a járműben, mivel kevesebb helyet foglal az egész rendszer, mint egy belsőégésű jármű hajtása. A technológia kiforrása közben előkerülhet más fajta töltési módok, mint például az indukciós töltési mód vagy töltés helyett az akkumulátor csomag teljes cserélése. Ezen fejlesztésekkel próbálják növelni az élettartamot, hatótávolságot és letisztultabbá tenni az elektromos hajtásnak a technológiáját.

### **2.2.2. Gyengeségek**

A technológia nagy léptekkel fejlődik, de korántsem veszélytelen. A töltés fajtájától függően lehet magas áramerősség vagy nagy feszültség. Ilyen esetben a járműveket biztonságosra kell tervezni, mivel érintés védelemmel és biztosítékokkal kell ellátni a rendszert. Ezen védelmek érvényesek a járműre és a töltőállomásokra. A töltés módja alapvetően meghatározza a várakozási időt, ami a túl hosszú várakozó idő mellett profit kieséshez vezethet. Az elektromos járművek további hátránya egy esetleges szerviz esetén jön elő, mivel az ilyen típusú autókat, olyan szakszerviz vagy szakember tudja elvégezni, akinek ilyen képesítése van. Jelenleg ilyen szervizekből és szakemberekből kevés van hazánkban és képzésük hosszabb időt vesz igénybe. Egy ilyen járműbe az akkumulátorok nagyobb helyet foglalnak el, mint bármelyik más alternatív hajtás esetén. Az jármű súlyát tovább növeli az, hogy ezeket az akkumulátorokat megerősített részbe vagy rekeszbe kell elhelyezni esetleges sérülés esetén. A jövőbeli fejlesztések segítik az elektromos jármű elterjedését, de egy ilyen technológia drága a jelenlegi kedvezményekkel is. Az akkumulátor csere, mint „töltési” mód sok problémát hoz előtérbe. Egy adott jármű, ami új milyen akkumulátort kapjon esetleges cserénél és egy kevésbé új jármű megkaphatja az újabb csomagot vagy hasonlóan öreg akkumulátort. Egy elektromos gépjárműnek a hang vagy zaj szempontjából minimális a kibocsátása, de ennek a hátránya is van, mivel előtérbe kerülhet, hogy egy csendben haladó jármű, sérülést okoz egy járókelőben, aki nem hallotta a közeledő autót. A kutatás fejlesztés költsége jelenleg magas egy eladott járműre számítva, ezért átlagosan magasabb vételárral kell számolni egy elektromos jármű esetén.

### **2.2.3. Lehetőségek**

Elektromos járművek elterjedését világszerte támogatják, köztük hazánkba is. Lényeges kedvezményeket élvezhetnek az elektromos autók üzemeltetői. Anyagi, adózási kedvezményeket kapnak. Nincs az elektromos járművekre regisztrációs adó, ami minden más gépjárművet érint, és nem kell utánuk a tulajdonosnak vagy az üzemeltetőnek gépjárműadó más néven teljesítmény adót fizetnie. Szintén nem kell cégaadóadót fizetnie, azoknak a vállalkozásoknak, akik elektromos hajtású járművet üzemeltetnek. A zöld

rendszámot a 326/2011. (XII. 28.) Korm. rendelet 60. paragrafusában leírt módon a tisztán elektromos gépjárművek kaphatják meg.

#### 2.2.4. Veszélyek

Ugyan az elektromos töltő infrastruktúra folyamatosan fejlődik, de ezek még mindig nem elegendőek a biztonságos, hosszú távú 2-300 km-s távok megtételére. Emellett az elektromos járművek fokozatos elterjedését nagyon nehezen fogja tudni követni a töltőhálózat infrastruktúra. Az elektromos járművek főleg kis hatótávolságú, helyben történő közlekedésre használhatóak, ahol az indulási helyen (telephelyen) éjszaka fel lehet tölteni a járművet, majd kevesebb, mint 100-150 km belül ismét a telephelyen újra lehet tölteni.

### 3. PILOT ELEMZÉS EGY MAGYARORSZÁGI NAGYVÁROS KÖZÖSSÉGI KÖZLEKEDÉSÉNEK AUTÓBUSZ FLOTTÁJÁRA

Az elemzést vállalatirányítási rendszerekből exportált pontos, egész éves üzemeltetési, fenntartási adatok alapján végeztük el.

#### 3.1 A helyi autóbusz közlekedé jellemzői

A vizsgált város síkvidéki domborzattal rendelkezik, ami miatt sűrű kerékpáros forgalom is jellemző. A várost a 70-es évekig a „kerékpárosok városának” is nevezték, azonban a motorizáció elterjedésével a kerékpárosok száma átmenetileg csökkent. A gépjárművek közlekedése miatt felvetődő környezeti kérdések, valamint az elmúlt évtizedben végbemenő kerékpáút-építések miatt napjainkban újra nőni kezdett a kerékpározási kedv. A közösségi közlekedés problémáira azonban más eszközökkel lehet felelni.

A helyi önkormányzat által működtetett tömegközlekedési szolgáltatásokat Közlekedési Központ végzi.

A közösségi közlekedés fejlesztése csökkentheti a motorizáció negatív társadalmi hatásait, mint pl.

- az egyéni gépjármű-közlekedés okozta zsúfoltságot,
- a belvárosi közlekedés szűk keresztmetszetét, és
- a környezetszennyezés növekedését.

A buszflotta korszerűsítése és a közösségi közlekedés támogatása mellett a szűk belvárosi utak és utcák zsúfoltsága korlátozó intézkedések bevezetésével valósítható meg, mint például a fizető parkolóhelyek növelése és a gyalogosövezetek kijelölése.

A városi tömegközlekedés lebonyolítását jelenleg 102 db dízel üzemű autóbusz végzi. Ezek megoszlása 51 csuklós és 51 szóló busz.

Átlagosan napi 126 km-t futottak a vizsgált lezárt 2018-as évben, ez évente 46 000 km-t jelent.

A busz állományt 1983 és 2010 között gyártott buszok teszik ki, ami átlagosan 20 éves életkort jelent, tehát nem beszélhetünk egy fiatal buszparkról.

A napi minimum futás 125 km, a maximum 259 km, ami évente a menetidők közötti eltérések miatt 22,9 ezer minimum, 80,0 ezer maximum km-t jelent. A buszok teljes futása 467 ezer és 2,19 millió km közötti.

A 2018. év átlagos napi buszhasználatát is megvizsgáltuk, ami napi 8,14 óra menet és 6,3 óra állásidőt jelentett. Ez az adat azért fontos, mivel a gazdasági számításnál elektromos buszokat is vizsgáltunk és itt az állásidő töltésre használható fel a frekvenciált helyekre telepített töltőkkel.

A telephelyek mellett a város konkrét járatait/viszonyait, közlekedését is vizsgáltuk. A belvárosi körzetben található törzshálózaton csúcsidőszakban a követési idők jellemzően 10-15 perc között alakulnak, ami tanítási napokon akár 5-10 perc is lehet. Csúcsidőn kívül ennél hosszabb, 20-30 perces időtávokról beszélhetünk a buszok indulása között, ami munkaszüneti napokon akár 1 órára is kitolódhat. Hasonló követési időről beszélhetünk a külső városrészekben közlekedő buszok esetében. A közösségi közlekedés vonzerejét növeli a megállóhelyeken és a fedélzeten működő utastájékoztató korszerűsége, valamint a járművek tisztasága. Az új buszállomány bevezetése a külföldi megvalósítások példájára való tekintettel mindenképp e vonzerő növekedését fogja jelenteni.

A városi hosszú távú közlekedési koncepcióban több alternatíva is felmerülhet, amelyek közül a buszflotta modernizálása jelenthet komolyabb költségelőnyt, emellett a közösségi közlekedést a lakosok számára is vonzóbbá teheti.

Területi és buszhálózati szempontból megfigyelhető, hogy az ipari park fejlődésével és a piaci szereplők által teremtett forgalom miatt a külső területek közösségi közlekedési infrastruktúrája felzárkózott a belvároséhoz.



Kiemelt figyelmet fordíthatunk a belvárosban működő autóbusz vonalakra. A díjmentesen igénybe vehető buszvonala 2011 októberétől üzemel, 7,2 km-es vonalhosszal és 29 perces menetidővel rendelkezik. A CITY körjárat 15 percenként indul, majd 19 megállót ejt útba.

Jelenleg 9-17 év közötti CREDO BC 11 normál padlós, és BN 12 alacsony belépésű modellekkel fut.

### 3.2 A jelenlegi üzemeltetési jellemzők elemzése (futásteljesítmények, karbantartási rendszer, gazdasági tényezők)

A város közlekedésének és buszállományának összefoglalása után kezdtük meg a részletes költségelemzést, melynél a kiindulási adatok a következők voltak:

- A buszok száma: 102 db (a kalkulációban az összevethetőség miatt szóló buszokkal számoltunk)
- Üzemeltetési időszak: 10 év
- Buszok beszerzési költsége
- A nem dízel buszok esetében kalkuláltunk műhely átalakítással, és szerelő képzés költségeivel is
- Használt buszok esetében SAP rendszerből lehívott üzemeltetési költségekkel kalkuláltunk, ami gyakorlatilag minden ráfordítást tartalmaz. Figyelembe vettük a karbantartási, javítási költség anyagköltségét és munkadíjat egyaránt, ami megadta a teljes élettartam alatti üzemeltetési költségét
- Az üzemeltetési költség számításnál új buszok esetében három fő kategóriát vettünk figyelembe. Ezek összege adja a teljes élettartam költségét a jármű oldaláról (gumiabroncs, műszaki vizsgadíjakat a számítás nem tartalmaz):
  - karbantartás (pl. olajcsere, szűrő cserék),
  - megelőző javítás (pl. DPF filter, fékbetét, féktárcsa, ékszíj csere),
  - javítás (a meghibásodások várható valószínűsége alapján pl. motor, sebességváltó, AdBlue rendszer, motor elektronika javítások);
- A futásteljesítmény
- Üzemanyag az áram és a CNG ára tartalmazza a töltőhálózat kialakításának költségét is.
- A kapott adatok esetében mindenhol a 2018-as teljes lezárt évet vettük figyelembe

#### 3.2.1. CNG üzemeltetés elemzése

A dízel a CNG- és elektromos buszokhoz való hasonlításánál – mivel 102-es darabszámú flottáról beszélhetünk – a beszerzési ár nagy jelentőséggel bír. Forrásunk alapján a CNG buszok beszerzési ára 8 millió Ft-tal meghaladja a dízel buszokét, így a flotta teljes költsége 816 millió Forinttal magasabb, amelyet 30 millió Forint műhelyátalakítási és szerelőképzési díj egészít ki (2. táblázat).

Dízel-CNG bekerülési költség összehasonlítás

2. táblázat

Bekerülési költség számítás	Új dízel busz	Új CNG busz	Mérték-egység
Beszerzési költség	80 000 000	88 000 000	Ft/db
Buszok száma	102	102	db
Teljes beszerzési költség	8 160 000 000	8 976 000 000	Ft
Beszerzési költség növekmény dízelhez képest (új és jelenlegi értékek szétválasztva)		816 000 000	Ft
Műhelyátalakítás és szerelőképzés	0	30 000 000	Ft

Az üzemeltetés terén a CNG a dízelhez képest költségesebbnek bizonyul. A karbantartási/javítási költségek anyag- és személyi jellegű részei 1 km-re vetítve 71,28 Ft értékűek az új dízel buszok 68,0 Ft-os egységköltségéhez képest. A 3. táblázat alapján a teljes flottával számolva ez 152 millió Ft költség növekményt jelent a 10 éves időszak alatt.

Dízel-CNG üzemeltetési költség összehasonlítás

3. táblázat



Üzemeltetési költség számítás	Új dízel busz	Új CNG busz	Mértékegység
Teljes élettartam üzemeltetési költség	<b>0,21</b>	<b>0,22</b>	EUR/km
Teljes élettartam üzemeltetési költség	68,04	71,28	Ft/km
Futás teljesítmény (2018-as átlag)	46 000	46 000	km/év
Átlagos napi futásteljesítmény (2018-as átlag)	126	126	km/nap
Buszok száma	102	102	db
Üzemeltetési időszak	10	10	év
Teljes élettartam költség	3 192 436 800	3 344 457 600	Ft
Karbantartási költség növekmény dízelhez képest		152 020 800	Ft/10 év

A CNG hajtás által felhasznált sűrített földgáz ára forrásunk alapján kilogrammonként 210 Ft-ba kerül, amelyet a dízel literenként megközelítőleg 60 Ft-tal meghalad. A két üzemanyag típus fogyasztási adatai nagyjából megegyezők. A CNG előnyei az üzemanyagköltség területén már megjelentek, mivel a 100 km megtételéhez szükséges hajtógáz több, mint 3 000 Ft-tal kevesebbe kerül, vagyis átlagosan 25,6%-kal olcsóbb. Így a teljes 10 éves üzemeltetési időszakot és 102 nagyságú flottát nézve több mint 1,53 milliárd Ft megtakarítást eredményeznek (4. táblázat).

Dízel-CNG üzemanyagköltség összehasonlítás

4. táblázat

Üzemanyagköltség számítás	Új dízel busz	Új CNG busz	Mértékegység
Fogyasztás (SORT1)	44,10	43,60	kg/100 km;
Egységár	279,18	210,00	Ft/l; Ft/kg;
Egység üzemköltség	12 312	9 156	Ft/100 km
AdBlue	100	0	Ft/100 km
Összesen	12 412	9 156	Ft/100 km
Fajlagos km költség	124,12	91,56	Ft/km
Üzemanyagköltség megtakarítás		3 256	Ft/100 km
Buszok száma	102	102	db
Futásteljesítmény	46 000	46 000	km/busz/év
Összes megtakarítás dízelhez képest (új és jelenlegi értékek szétválasztva)		1 527 639 190	Ft/10 év

A teljes birtoklási költség (TCO) számítása folyamán az utóbbi költségelemeket összegeztük. Míg a 10 éves üzemeltetési időszak alatt egy új dízel busz teljes költsége 168,4 millió Ft, a CNG buszok esetében ez 5,2 millió Forinttal kevesebb. Az értéket a teljes flottára vetítve a számítás szerint 529,6 millió Ft megtakarításról beszélhetünk, így a teljes dízel buszflotta CNG hajtásra cserélése 10 év alatt jelentős előnyöket hoz (5. táblázat).

Dízel-CNG 10 éves TCO összehasonlítás

5. táblázat

Teljes birtoklási költség (10 éves üzemeltetés mellett)	Új dízel busz	Új CNG busz	Mértékegység
Buszok száma	102	102	db
Teljes beszerzési költség	8 160 000 000	8 976 000 000	Ft
Műhelyátalakítás és szerelőképzés	0	30 000 000	Ft
Javítás, karbantartás	3 192 436 800	3 344 457 600	Ft
Üzemanyag költség	5 823 634 390	4 295 995 200	Ft
Teljes birtoklási költség	17 176 071 190	16 646 452 800	Ft
Teljes birtoklási költség / busz	168 392 855	163 200 518	Ft
Megtakarítás a teljes időtartam alatt dízelhez képest (új és jelenlegi értékek szétválasztva)		529 618 390	Ft/10 év

### 3.2.2. Tisztán elektromos üzemeltetés elemzése

Az új elektromos buszok beszerzési költségükben meghaladják a dízel buszokat, azonban az egy buszra jutó 144 millió Forint értékű beszerzés 20%-os állami támogatás mellett 115,2 millió Forintra csökken. A számolt adatok szerint ez alapján 44%-os, 35,2 millió Ft értékű többletköltséggel számolhatunk. 102 busz esetében ez összesen meghaladja a 3,59 milliárd Ft költségnövekményt, amely 5 millió Ft műhelyátalakítási és képzési költséggel egészül ki (6. táblázat).

Dízel-elektromos bekerülési költség összehasonlítás

6. táblázat

Bekerülési költség számítás	Új dízel busz	Új elektromos busz	Mértékegység
Beszerzési költség	80 000 000	115 200 000	Ft/db
Buszok száma	102	102	db
Teljes beszerzési költség	8 160 000 000	11 750 400 000	Ft
Beszerzési költség növekmény dízelhez képest (új és jelenlegi értékek szétválasztva)		3 590 400 000	Ft
Műhelyátalakítás és szerelőképzés	0	5 000 000	Ft

A magas beszerzési árakat a többi költségelem ellensúlyozza, amely a tervezett karbantartási költségekben is megnyilvánul. Egységnyi km-re a dízel 68 Ft-os értékéhez képest csupán 35,64 Ft jut, ami 102 busszal, és a 10 éves üzemeltetési időszakkal számolva eléri az 1,52 milliárd Ft megtakarítást (7. táblázat).

Dízel-elektromos üzemeltetési költség összehasonlítás

7. táblázat

Üzemeltetési költség számítás	Új dízel busz	Új elektromos busz	Mértékegység
Teljes élettartam üzemeltetési költség	0,21	0,11	EUR/km
Teljes élettartam üzemeltetési költség	68,04	35,64	Ft/km
Futás teljesítmény (2018-as átlag)	46 000	46 000	km/év
Átlagos napi futásteljesítmény (2018-as átlag)	126	126	km/nap
Buszok száma	102	102	db
Üzemeltetési időszak	10	10	év
Teljes élettartam költség	3 192 436 800	1 672 228 800	Ft
Karbantartási költség növekmény dízelhez képest		-1 520 208 000	Ft/10 év

Az elektromos buszok legnagyobb költségelőnye az üzemanyagként használt áram kedvező árában rejlik. A fenti táblázatot két részre osztottuk, az elsődlegesen számolt áram egységköltségét 63 Ft/kWh-ban határoztuk meg, ami a töltő kiépítésének fajlagos költségét tartalmazza; a kalkuláció további részében is ezzel az adattal számoltunk. A 100 km megtételéhez szükséges áram 63 Ft-os egységköltséggel is kiemelkedő, 2,04 milliárd Ft-ot meghaladó megtakarításhoz juttatja a fenntartót az üzemanyag terén (8. táblázat).

A fenti táblázat az elektromos buszflotta fenntartásának teljes birtoklási költségét összesítve tartalmazza. Az buszok javítási és karbantartási költségei, valamint üzemanyagköltségei önmagukban a teljes időszak alatt több mint 3,56 milliárd Forint megtakarítást eredményeznek, ami kiegészül a dízelnél magasabb beszerzési árak okozta 3,59 milliárd Forint költségnövekménnyel. 10 éves használat mellett a teljes birtoklási költség csupán 35,2 millió Ft növekménnyel jár (9. táblázat).

Üzemanyagköltség számítás – Forrás szerint meghatározott áram árak	Új dízel busz	Új elektromos busz	Mérték-egység
Fogyasztás (SORT1)	44,10	128,00	kWh/100 km
Egységár	279,18	63,00	Ft/kWh
Egység üzemköltség	12 312	8 064	Ft/100 km
AdBlue	100	0	Ft/100 km
Összesen	12 412	8 064	Ft/100 km
Fajlagos km költség	124,12	80,64	Ft/km
Üzemanyagköltség megtakarítás		4 348	Ft/100 km
Buszok száma	102	102	db
Futásteljesítmény	46 000	46 000	km/busz/év
Összes megtakarítás dízelhez képest (új és jelenlegi értékek szétválasztva)		2 040 005 590	Ft/10 év

Teljes birtoklási költség (10 éves üzemeltetés mellett)	Új dízel busz	Új elektromos busz	Mértékegység
Buszok száma	102	102	db
Teljes beszerzési költség	8 160 000 000	11 750 400 000	Ft
Műhelyátalakítás és szerelőképzés	0	5 000 000	Ft
Javítás, karbantartás	3 192 436 800	1 672 228 800	Ft
Üzemanyag költség	5 823 634 390	3 783 628 800	Ft
Teljes birtoklási költség	17 176 071 190	17 211 257 600	Ft
Teljes birtoklási költség / busz	168 392 855	168 737 820	Ft
Megtakarítás a teljes időtartam alatt dízelhez képest (új és jelenlegi értékek szétválasztva)		-35 186 410	Ft/10 év

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A későbbiekben hosszú távon, ha már megtérült az elektromos töltőhálózat kiépítése, a buszok üzemeltetése egy új dízel vagy CNG buszhoz képest jelentős megtakarítást eredményezhet.

Ennek ellenére a járművek alacsony, 120-150 km-es hatótávolsága miatt Győrben való alkalmazhatóságuk csak a kisebb napi futású járatokra teszik alkalmassá őket.

A hidrogén hajtású buszok közép-hosszú távon jelenthetnek majd jó alternatívát a CNG és elektromos buszok mellett. A jelenleg magas beruházási költségek és a töltő infrastruktúra hiánya miatt ez a technológia jelenleg még nem alkalmazható egy az egyben a közforgalmú közlekedés komplett cseréjére. Ennek ellenére látva a politikai és a technikai fejlődési irányokat, fel kell készülni a hidrogén meghajtású buszok üzemeltetésére, fenntartására és tankolására egyaránt. Ez nemcsak az emissziós előírások betartása miatt lehet fontos, hanem amiatt is, mert ez egy környezetbarát technológia, mely lokálisan zéró emisszióval rendelkezik.

A fentieket figyelembe véve a jelenlegi flotta kiváltására az alábbi javaslatot tesszük:

- 90-95 db CNG busz (szóló, csuklós vegyesen),
- 2 db E-busz (szóló): Jellemzően a belvárosi (City) járatokra,
- 2 db H<sub>2</sub> busz (szóló): Közép-hosszú távon gondolkodva üzemeltetési, karbantartási tapasztalatok gyűjtése céljából.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] CNG Europe, <http://cngeurope.com/>
- [2] CNG Port, <http://www.cngport.hu/>
- [3] Tudnivalók járművek CNG-s átalakításáról, <http://www.cngport.hu/tudastar/tudnivalok-jarmuvek-cng-s-atalakitasarol.html>
- [4] Fehér Könyv – Útiterv az egységes európai közlekedési térség megvalósításához – Úton egy versenyképes és erőforrás-hatékony közlekedési rendszer felé (2011, COM).
- [5] Audi AG LCA szakmai anyagok
- [6] Bloomberg New Energy Finance
- [7] <https://www.vda.de/en/services/Publications/automation.html>
- [8] <https://e-mobi.hu/hu/map>
- [9] Dr. Strobl Alajos előadásanyag 2014. – magyarországi energiamix
- [10] Zöldy M, Holló A, Bereczky Á, Krajnik K, Lengyel A: Investigation of Diesel Oil–LPG Content Fuel Utilization in Heavy Duty Diesel-Engines with Common Rail System, International Journal Of Heavy Vehicle Systems (2019 Forthcoming papers)
- [11] Zöldy M, Török Á: A forgalomba belépő gépjárművek többlet károsanyag kibocsátásának számítása a nemzetközi határértékek figyelembevételével, Közlekedéstudományi Szemle 55 pp. 336-339, 4 p. (2005)
- [12] Zöldy M: Potential future renewable fuel challenges for internal combustion engine, Járművek és Mobil Gépek 2 : 4 pp. 397-403, 7 p. (2009)

# Hosszirányú járműmodell fejlesztése elektromos járművek hatótáv becslésére

## Longitudinal vehicle model development for range estimation in electric vehicles

*NYERGES Ádám\*, Dr. ZÖLDY Máté*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék  
Magyarország, 1111 Budapest, Stoczek utca 6.

[www.gjt.bme.hu](http://www.gjt.bme.hu)

\* [adam.nyerges@gjt.bme.hu](mailto:adam.nyerges@gjt.bme.hu)

### Abstract

*One of the main properties of up-to-date electric vehicles is their range. The energy analysis of the vehicle and its powertrain allows range estimation by simulation. In this paper a basic longitudinal electric vehicle and powertrain model will be presented for range estimation. Besides, by an example the powertrain energetics will also be presented.*

**Keywords:** electric vehicles, range estimation, vehicle energy, modelling

### Kivonat

*A korszerű elektromos hajtású közúti járművek egyik legfontosabb fejlesztendő tulajdonsága a hatótávolság. A jármű és a hajtáslánc energetikai vizsgálata lehetővé teszi a hatótávolság egyszerű szimulációjával történő becslését. Jelen cikkben bemutatásra kerül egy egyszerű hatótáv becselő modell fejlesztése, amely segítségével, egy példán keresztül a hajtáslánc energetikai viszonyai megismerhetők.*

**Kulcsszavak:** elektromos járművek, hatótáv becslés, járműenergetika, modellezés

## 1. BEVEZETÉS

A közúti közlekedés története során az új, kedvezőbb tulajdonságokkal bíró műszaki megoldások keresése mindig is fontos volt. Napjainkban az akkumulátoros elektromos járművek újra elterjedőben vannak, elsősorban a lokálisan alacsony emissziója, az egyszerű felépítése, jó térkihasználása és a csendes üzeme miatt. Mindezek mellett az emissziós szabályozások is nagy mértékben elősegítik az elektromos gépjárművek terjedését [1].

A lokálisan alacsony emisszióval összefüggésben jelentős előnye még az elektromos járműveknél a hajtáslánc magas energetikai hatásfoka. A névleges hatásfoka lényegében minden fontos hajtáslánc elemnek 90% fölött van. Szintén nagy előny a hagyományos hajtásláncú járművekhez képest, hogy a mechanikai fékezés nagymértékben kiváltható villamos fékezéssel, azaz energia visszatáplálással az akkumulátorokba. A korszerű lítium-ion akkumulátorok töltése szintén igen magas hatásfokú, közel 99%-os [2].

Az elektromos hajtásláncok szabályozása lényegesen kisebb reakcióidővel rendelkezik mint a belsőégésű motorral szerelt járművéké. A hajtáslánc nyomaték szabályozása a villamos gép áramerősségének szabályozásával sokkal gyorsabb mint a belsőégésű motorok töltetcsere szabályozása. Mindezeknek köszönhetően a jármű menetdinamikai szabályozása is fejlettebb lehet elektromos járműveknél.

A járműben történő energiatárolás lényegesen nagyobb kihívás akkumulátorokban, mint tüzelőanyag tartályokban. Az elektromos járművek újbóli megjelenését az utóbbi évtizedben az akkumulátorok fejlődése tette lehetővé. Jelentősen növekedett a fajlagos energiasűrűségük (mind tömegre, mind térfogatra vonatkoztatva) és emellett az előállítási költségük is csökkenő tendenciát mutat. Ugyanakkor a hagyományos hajtásláncú járművekkel összehasonlítva az akkumulátorok fajlagos energiasűrűsége jelentősen kisebb, töltési ideje pedig jelentősen nagyobb. A töltési teljesítmény növelésével a kiszolgáló infrastruktúra kerül nagy

kihívás elé. Mindezen műszaki kihívások jelenleg azt eredményezik, hogy az elektromos járművek tömege lényegesen nagyobb, hatótávolságuk viszont kisebb, mint a belsőégésű motorral hajtott járműveké.

Az utóbbi években a trendek az elektromos járműhajtás gyors térhódítását mutatják, abszolút értékben viszont még csak kis számban vannak jelen a közutakon. A jövőbeni elterjedésüket sok, műszaki tudományokon kívül álló tényező is befolyásolja. A hagyományos járműhajtásnál megszokott szempontok figyelembe vételével az elektromos hajtásláncok vizsgálata viszont műszakilag fontos új tudományterület. Jelen cikkben egy hosszirányú járműmodell menetciklusban való vizsgálatának a segítségével bemutatásra kerül az elektromos hajtású járművek energetikája és hatótáv becslése.

## 2. ELEKTROMOS JÁRMŰVEK FELÉPÍTÉSE

Az elektromos járművek egyik fontos előnye a hagyományos hajtásláncú járművekkel szemben a konstrukció egyszerűsége. Ez nemcsak a részegységek kevesebb számát jelenti, hanem a kompaktságot és a könnyebb kialakítás valamint a jobb megbízhatóság lehetőségét is [3].

A korszerű elektromos járművek akkumulátora jellemzően a jármű hasa alatt helyezkedik el a két tengely között. Az akkumulátor nagy tömege ugyan rontja a menetdinamikai képességeit, viszont az alacsony súlypont jelentősen csökkenti a járműbólintó és dőlő mozgását. A két tengely között az akkumulátorok jól védve vannak sérülések ellen is.

A járművek hajtására leggyakrabban állandó mágnesű szinkronmotorokat alkalmaznak [4]. Ennek a működtetésére a teljesítményelektronika (inverter) az akkumulátor egyenfeszültségét váltakozó árammá alakítja. A villamos gép nyomatékának a szabályozása az áramerősség szabályozásával történik. A villamos gépek jellegzője négy móddal rendelkezik: előremenet-hátremenet, hajtás-visszatöltés [5].

A villamos gép tengelye és a hajtott kerekek között rendszerint egy egyfokozatú hajtómű teremti meg a kapcsolatot [6]. A hajtáslánc egy véghajtóművel, egy differenciálművel és a tengelyhajtásokkal zárul. Elektromos járműveknél jelenleg nincs egyértelmű előnye sem az elsőkerék-, sem a hátsókerék hajtásnak.

A hajtásláncban a teljesítményelektronika, a villamos gép és a hajtómű egy egységnek minősül. Ezen hajtóegység hatásfokát szokás egy jellegzővel is közelíteni, egyesítve a három részegység karakterisztikáit. A hajtóegység hűtése is közös szokott lenni.

## 3. ELEKTROMOS JÁRMŰVEK AKKUMULÁTOR KAPACITÁSA ÉS HATÓTÁVOLSÁGA

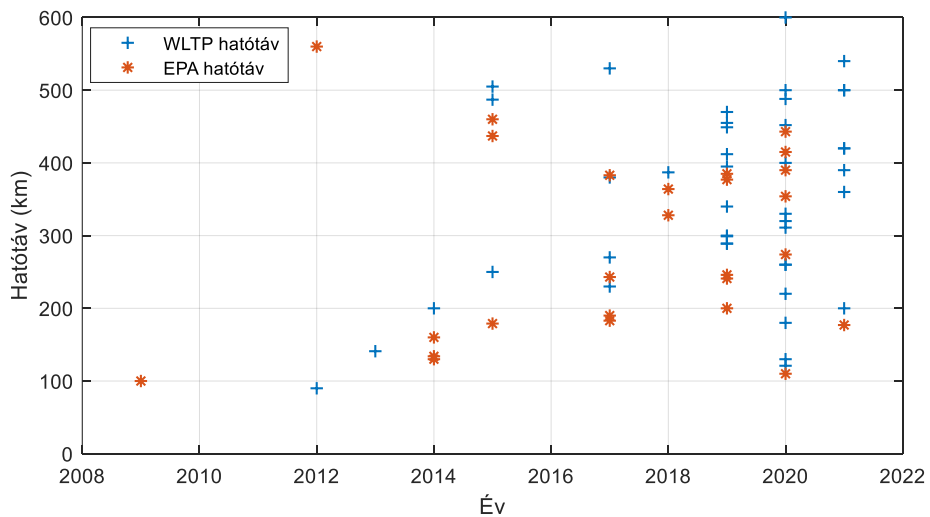
Az elektromos járművek hatótávolságát alapvetően két dolog határozza meg: az akkumulátor kapacitása és a járműhajtás teljesítményigénye. Ezek mellett jelentős hatása lehet még a járműben lévő fogyasztók teljesítményigényének és a külső környezeti körülményeknek is (például az akkumulátor kapacitás hőmérsékletfüggésének) [7].

Közvetlenül meghatározó még az akkumulátorok fajlagos energiasűrűsége, mivel ez korlátozza a járműben elhelyezhető akkumulátor méretét és tömegét. Ehhez hasonlóan szintén meghatározó még az alkalmazott akkumulátor technológia ára is, ami a jármű eladhatóságán keresztül korlátozza a beépíthető akkumulátor méretét.

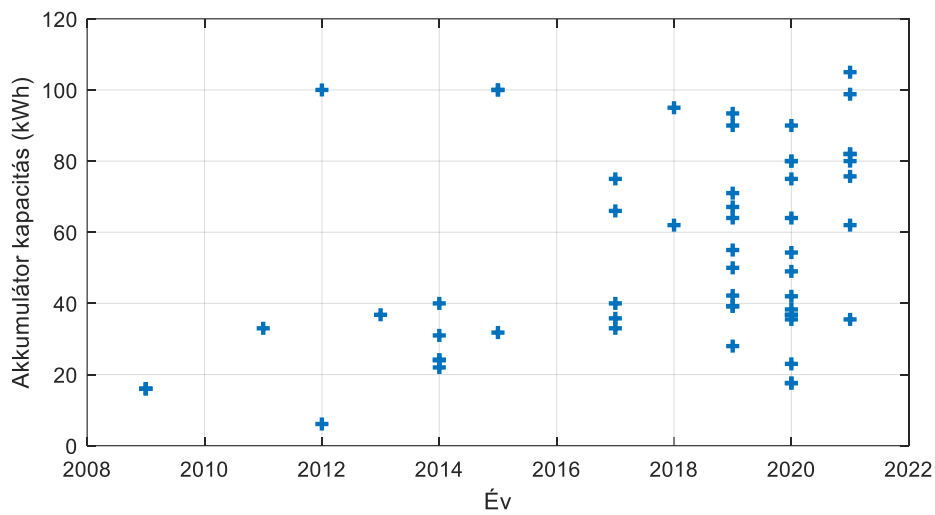
Az 1. ábrán az utóbbi években megjelent elektromos járművek hatótávolsága látható a megjelenési évük függvényében. A nagyobb hatótávolságú elektromos járművek 2014-2015 környékén kezdtek megjelenni. Azóta a fejlődés töretlen, jelenleg igény és árszínvonal szerint széles skálán mozog az eladásra kínált elektromos autók hatótávolsága.

A 2. ábrán ugyanezen járművek akkumulátor kapacitása látható ugyanúgy a megjelenési évük függvényében. A tendencia hasonló. Az akkumulátor kapacitás és a hatótávolság természetesen összefüggnek. Ez látható a 3. ábrán is: a két mennyiség között a kapcsolat lineáris.

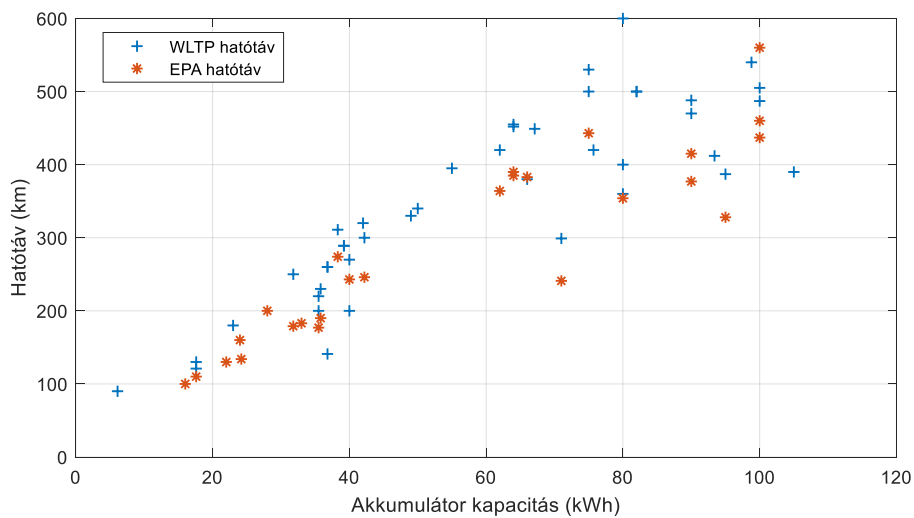
Az elektromos járművek hatótávolságát szabványos menetciklusokkal határozzák meg. Az Európai Unióban a WLTC (World harmonised Light vehicles Test Cycle) menetciklus hatályos. Az Amerikai Egyesült Államokban az EPA (United States Environmental Protection Agency) ciklus a szabványos, ez némiképp szigorúbb követelményeket támaszt a járművekkel szemben. Emiatt az EPA szerinti hatótáv rendre kisebb a WLTC hatótávnál, ahogyan ez a 3. ábrán is megfigyelhető.



1. ábra A gyártásban lévő elektromos hajtású járművek hatótávolságának fejlődése



2. ábra A gyártásban lévő elektromos hajtású járművek akkumulátor kapacitásának növekedése



3. ábra A gyártásban lévő elektromos hajtású járművek hatótávolsága az akkumulátor kapacitásának fejlődése



## 4. JÁRMŰMODELL FELÉPÍTÉSE

A modellezés célja a jármű menetciklus során a hasznos és veszteségteljesítmények meghatározása. Jármű szinten ezek kezelése egyszerű, hiszen hajtáslánctól függetlenül a szokásos összefüggéseket lehet alkalmazni.

Menet közben a járműre az útellenállás és a légellenállás hat. Az útellenállás felbontható gördülési ellenállásra és emelkedési ellenállásra. A gördülési ellenállás a következőképpen fejezhető ki:

$$F_g(t) = fmg \cos \alpha(t). \quad (1)$$

A légellenállás becslésének a szokásos módja pedig a következő:

$$F_l(t) = \frac{1}{2} \rho_l c_d A v^2(t). \quad (2)$$

Menetciklus szimuláció esetén magasságváltozás nincs definiálva, ezért az ellenállásereket a gördülési ellenállás és a légellenállás összegével lehet becsülni:

$$F_{ell}(t) = F_g(t) + F_l(t). \quad (3)$$

Amennyiben az emelkedési ellenállást is figyelembe kell venni, akkor az útellenállás a következőképpen fejezhető ki:

$$F_{út}(t) = mg(\sin \alpha(t) + f \cos \alpha(t)). \quad (4)$$

Tranziens ciklus esetén a jármű tehetetlenségét is figyelembe kell venni. Hajtás esetén a menetciklus sebességprofiljának teljesítéséhez szükséges vonóerő a tehetetlenségi erő és az ellenálláserekek összegéből adódik:

$$F_v(t) = \lambda ma(t) + F_{ell}(t). \quad (5)$$

Fékezés esetén az ellenálláserekek segítenek a jármű lassításában. Ilyenkor a gyorsulás negatív előjelű, így a szükséges fékerő az ellenálláserekek és a tehetetlenségi erő előjeles összegeként adódik:

$$F_f(t) = -\lambda ma(t) - F_{ell}(t). \quad (6)$$

A szimulációs modell bemenete a menetciklus sebességprofilja. Amennyiben szükséges, az útemelkedés szögének karakterisztikája is beállítható.

## 5. HAJTÁSLÁNC MODELL FELÉPÍTÉSE

A hajtáslánc modellben minden részegység esetén különböző módon kell figyelembe venni a hajtás és a visszatöltés esetét. Az adott részegység hatásfoka hajtás és visszatöltés esetén is mindig csökkenti a rajta áthaladó teljesítmény mértékét. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy hajtás-visszatöltés váltás esetén az adott részegység hatásfoka az összefüggésekben a reciprokára vált.

Az elektromos járművek hajtóműve általában egyfokozatú. A hajtómű összetétele általában két lépcsőben van megvalósítva. A szimulációs modell szempontjából ez egy összetételként kezelhető. Az összetétel és a kerék gördülőköri sugarának az ismeretében a villamos gép szögsebessége:

$$\omega_m(t) = v_j(t) \frac{i_{hl}}{r_g}. \quad (7)$$

A villamos gép leadott nyomatékának becsléséhez figyelembe kell venni a hajtómű mechanikai hatásfokát. Hajtás esetén a villamos gép leadott nyomatéka:

$$M_m(t) = F_v(t) \frac{r_g}{i_{hl} \eta_{mech}}. \quad (8)$$

Lassítás és visszatöltés esetén pedig:

$$M_m(t) = F_v(t) \frac{r_g \eta_{mech}}{i_{hl}}. \quad (9)$$

A hajtómű mechanikai hatásfoka sok tényezőtől függ mint például a konstrukció összetettsége, az alkalmazott kenőanyag tulajdonságai, a hőmérséklet, a csapágy- és szimeringsúrlódás vagy a hajtómű pillanatnyi üzemiállapota. Az (10) összefüggés a konstrukció összetettségét veszi csak figyelembe [8]:

$$\eta_{mech} = 0,98^a 0,97^b 0,99^c. \quad (10)$$

A villamos motor által leadott és a hajtómű által felvett teljesítmény a következőképp számolható:

$$P_m(t) = M_m(t)\omega_m(t). \quad (11)$$

A villamos gép hatásfoka nagy mértékben függ a villamos gép pillanatnyi üzemiállapotától, elsősorban a fordulatszámától és a terheléstől. A villamos gép által felvett teljesítmény hajtás esetén (12) összefüggésnek megfelelően becsülhető:

$$P_{m\_vill}(t) = M_m(t)\omega_m(t) \frac{1}{\eta_m(M_m\omega_m)}. \quad (12)$$

A villamos gép által felvett teljesítmény visszatöltés esetén pedig:

$$P_{m\_vill}(t) = M_m(t)\omega_m(t)\eta_m(M_m\omega_m). \quad (13)$$

Generátor üzemben a villamos gépek hatásfoka nagyon kis teljesítmény igény esetén drasztikusan lecsökken. Emellett, igen nagy fékezés esetén a villamos gép névleges teljesítménye kevés lehet a szükséges fékezési teljesítmény megvalósítására. Ezekben az esetekben szükséges a hagyományos, mechanikus fékrendszert alkalmazni. A gyakorlatban 10-15km/h alatt a fékezést már elsősorban a mechanikus fékrendszer végzi.

A korszerű teljesítményelektronikák nagyon jó hatásfokkal üzemelnek. Ahogyan a korábbi esetekben is, az inverter hatásfokának a teljesítményfolyamat csökkentenie kell. Így az inverter által felvett teljesítmény hajtás esetén:

$$P_{inv}(t) = P_{m\_vill} \frac{1}{\eta_{inv}}. \quad (14)$$

Az inverter által felvett teljesítmény visszatöltés esetén pedig:

$$P_{inv}(t) = P_{m\_vill}\eta_{inv}. \quad (15)$$

## 6. AKKUMULÁTOR MODELL

Mivel az akkumulátor az elektromos járművek tulajdonságait leginkább meghatározó és emellett a legdrágább alkatrésze is, ezért komplex felügyeleti rendszerekre van szükség a hatékony és biztonságos működésének a garantálásához. A korszerű lítium-ion akkumulátorok tulajdonságai jelentősen függenek a környezeti körülményektől. A kapacitás hőmérsékletfüggése mellett nagyon fontos tulajdonság az adott állapotban alkalmazható töltési teljesítmény. Az akkumulátorokat magas töltöttség esetén nem lehet nagy áramerősséggel tölteni. Ez egyben azt is jelenti, hogy feltöltött akkumulátor esetén a generátor üzemi visszatöltés sem lehet olyan jó hatásfokú mint alacsonyabb töltöttség esetén. Az akkumulátor pillanatnyi töltöttségét SOC-vel szokás jelölni (state of charge).

A cikkben bemutatásra kerülő modellben egy ideális akkumulátor modell került alkalmazásra, mely az inverter teljesítményfelvételét vagy teljesítményleadását teljes mértékben képes leadni vagy fölvenni. Ahogyan korábban is említésre került, a korszerű akkumulátorok töltése közel 100%-os hatásfokú [7], így az akkumulátor modelljében sem lett implementálva töltési hatásfok.

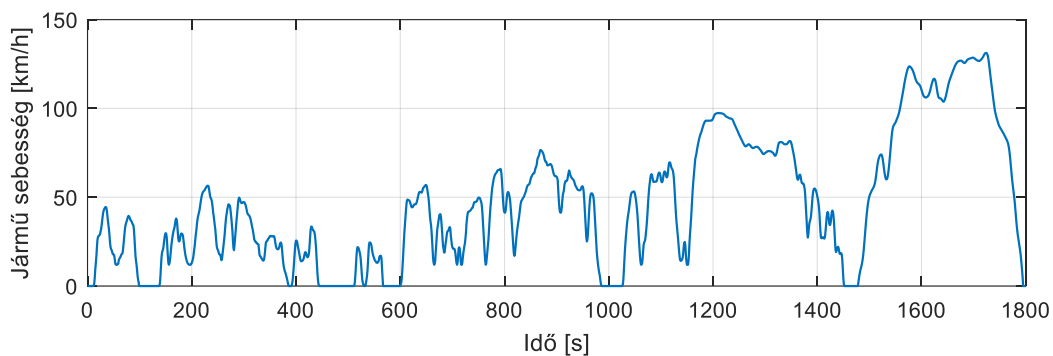
Az akkumulátor pillanatnyi töltöttsége a (16) összefüggésnek megfelelően közelíthető:

$$SOC = \frac{C_0 - \int_0^t P_{inv}(t)dt}{C_0}. \quad (16)$$

## 7. ELEKTROMOS JÁRMŰVEK HATÓTÁVOLSÁGA

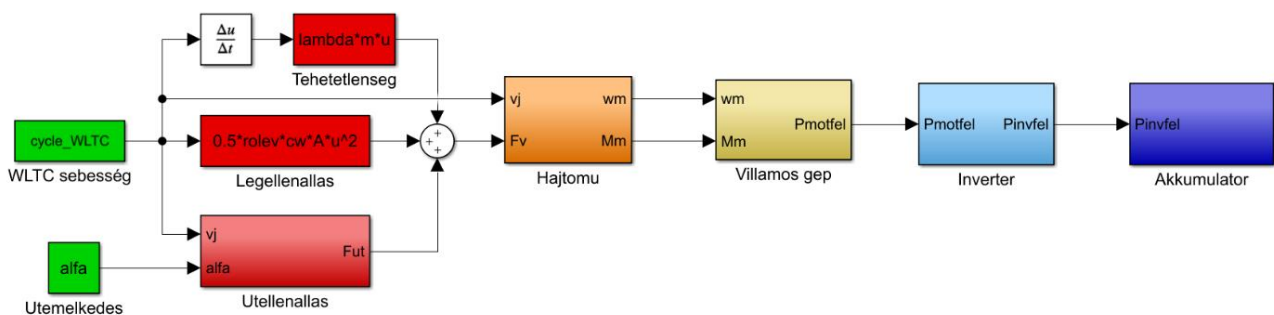
A korábbi fejezetekben bemutatott összefüggések segítségével megépíthető a hatótáv becslő modell. A vizsgálat bemenete egy sebességprofil, melyre kézenfekvő megoldás egy szabványos menetciklust választani. Jelen cikkben a korszerű WLTC került kiválasztásra [1]. A WLTC menetciklus elődje, az NEDC (New European Driving Cycle) menetciklus, elektromos járműveknél kevésbé használatos (és mellette korszerűtlennek is számít). A WLTC menetciklus sebességprofilja látható a 4. ábrán. A ciklus városi, országúti és autópálya üzemnek megfelelő tartományokat is tartalmaz.

A jármű pillanatnyi hatótávolságának becslése alapvető feladata a jármű fedélzeti diagnosztikai rendszerének. Ezt az információt a járművezető számára is meg kell jeleníteni. A pillanatnyi hatótáv mellett a jármű pillanatnyi (vagy adott útszakaszra átlagolt) energiafogyasztását is meg szokás adni. Ennek a mértékegysége általában kWh/100km. Ezen kívül jellemző még az energiafogyasztást valamilyen tüzelőanyag fűtőértékével egyenértékű l/100km-es fogyasztásban is megadni. Ez utóbbi érték rendszerint jól demonstrálja a villamos hajtáslánc lényegesen jobb hatásfokú működését.



4. ábra A WLTC menetciklus sebesség-idő függvénye [1]

A szimulációs környezetben megépített modell látható az 5. ábrán. A modell „visszafelé számol”, azaz a sebességprofilból számolja vissza a teljesítményviszonyokat. Komplexebb járműmodellek rendszerint az akkumulátortól indulva számolnak, ebben az esetben viszont szabályzó beépítésére van szükség a megvalósítandó sebességprofil lekövetésére. Mivel a szabályzó mindig rendelkezik némi követési hibával, ezért a visszacsatolás nélküli, analitikus modell a hatótáv becslésére jelen esetben egyszerűbb megoldás.



5. ábra A hatótáv becslő modell felépítése

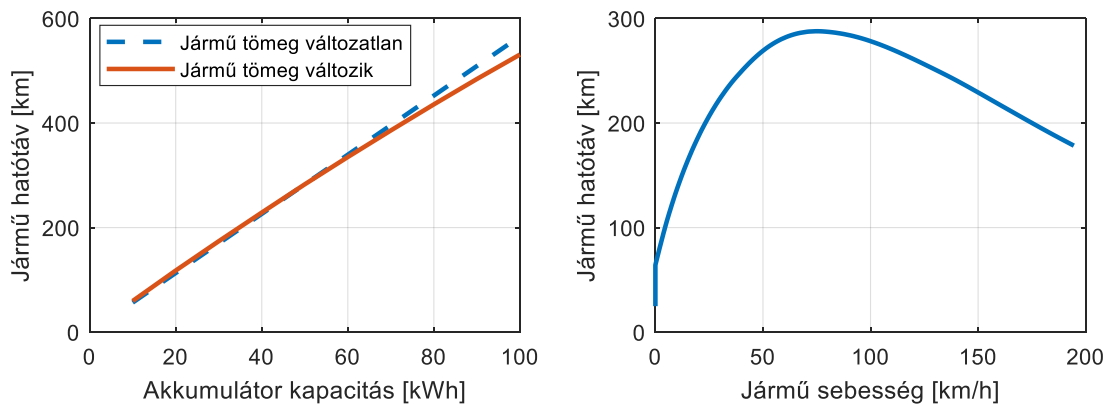
A modell verifikálására egy közepkategóriába tartozó elektromos jármű paraméterei lettek beállítva. A beállított paraméterek megtalálhatók a fejezet végén az 1. táblázatban. Alapesetben a járműben lévő akkumulátor 50kWh kapacitású. Ekkora akkumulátorral a jármű hatótávolsága 282km-ra adódik. Amennyiben nem történne fékezéses energia visszatáplálás, a jármű hatótávolsága 242km lenne. Azaz a visszatöltésnek köszönhetően a hatótáv 40km-rel, megközelítőleg 16%-kal nő.

Az akkumulátor kapacitásának a függvényében megvizsgálható a hatótáv változása. Ez látható a 6. ábra bal oldali diagramján. A változás a vártnak megfelelően közel lineáris. Az akkumulátor kapacitásának növelésével a jármű tömege is jelentősen változik, így pontosabb becsléshez ezt is figyelembe kell venni. A tömegváltozás figyelembe vételéhez a lítium-ion akkumulátorok átlagos sűrűsége lett felhasználva [3]. A diagram folytonos görbéje mutatja, hogy a jármű tömegnövekedése némiképp rontja a jármű hatótávolságát. Visszatöltés nélküli esetben az a hatótáv romlás jelentősebb lenne.

Hagyományos hajtásláncú járműveknél jellemző, hogy a jármű fogyasztása (és így a hatótávolsága is) országúti sebességnél a legalacsonyabb. Városi üzennél, kisebb terhelésen a motor kisebb hatásfokkal üzemel, így a fogyasztás romlik. Autópálya üzennél pedig az ellenállásérők jelentősebbek, ami szintén növeli a jármű fogyasztását.

Elektromos járműveknél tapasztalható, hogy városi üzemből a legjobb a jármű energiafogyasztása (és hatótávolsága), országúti és autópályaüzemből viszont jelentősen csökken a hatótávolság. Ez annak köszönhető, hogy városi üzemből a járműre ható ellenállásérők kicsik, a fékezéses visszatáplálás pedig jelentősen javítja a jármű energia gazdaságosságát (hagyományos hajtású járművek esetén a fékezés lényegében a jármű mozgási energiájának az „elpazarlása”).

A 6. ábra jobb oldali diagramja mutatja az elektromos jármű modell hatótávolságát a jármű sebességének a függvényében (azaz itt egyenletes sebességgel halad a jármű, nem menetciklusban). Kis sebességeknél a hatótáv romlik, mivel a villamos gép kis terhelésen egyre rosszabb hatásfokkal üzemel. 60-70km/h környékén vagy egy optimuma a hatótávnak, előttről pedig újra romlik a hatótáv a légellenállás növekedése miatt.



6. ábra A elektromos járművek hatótávolságának függése az akkumulátor kapacitástól és a jármű sebességétől

A modellben alkalmazott járműmodell paraméterei

1. táblázat

Akkumulátor kapacitás	C	-	kWh
Forgó tömeg tényező	$\lambda$	1,1	-
Gördülési ellenállási tényező	f	0,01	-
Hajtáslánc mechanikai hatásfoka	$\eta_{\text{mech}}$	0,97	-
Hajtómű áttétele	$i_{\text{hl}}$	10	-
Homlokfelület	A	2,5	m <sup>2</sup>
Teljesítményelektronika hatásfoka	$\eta_{\text{inv}}$	0,99	-
Jármű tömeg	m	1600	kg
Kerék gördülő sugár	$r_g$	0,3	m
Légellenállási együttható	$C_d$	0,25	-
Levegő sűrűsége (20C)	$\rho_{\text{lev}}$	1,188	kg/m <sup>3</sup>
Nehézségi gyorsulás	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Tapadási tényező	$\varphi$	0,97	-
Terhelt homlokfogaskerekek száma	a	2	-
Terhelt kúpogaskerekek száma	b	0	-
Terhelt tengelycsuklók száma	c	2	-
Útemelkedési szög	$\alpha$	0	°
Villamos gép maximális fordulatszáma	$n_{\text{max}}$	16000	1/min
Villamos gép maximális nyomatéka	$M_{\text{max}}$	250	Nm
Villamos gép maximális teljesítménye	$P_m$	100	kW

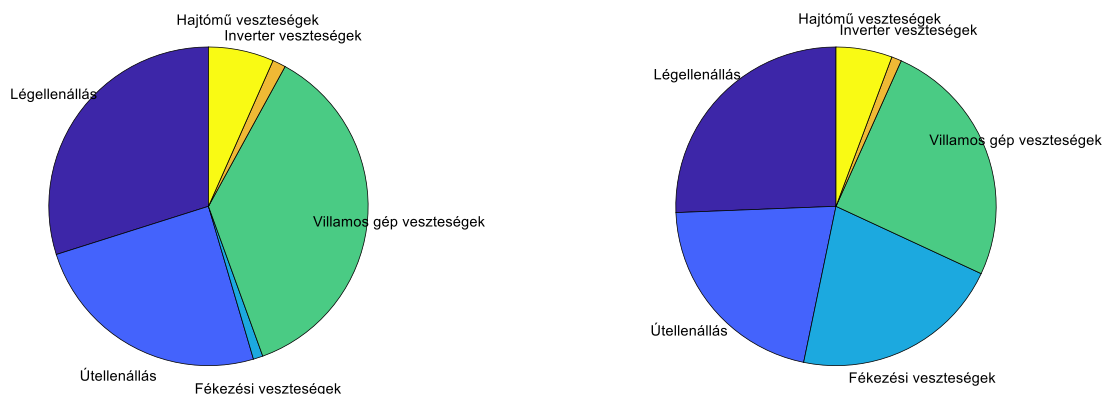
## 8. ELEKTROMOS JÁRMŰVEK ENERGETIKÁJA

Összefoglalva a korábbi fejezetben taglaltakat, az akkumulátorban tárolt kémiai energia az alábbi módokon kerül felhasználásra a járműben:

- teljesítményelektronika veszteségei,
- villamos gép veszteségei,
- hajtómű veszteségei,
- légellenállás legyőzésére fordított vonóerő,
- útellenállás legyőzésére fordított vonóerő,
- fékezési veszteségek (mechanikus fékrendszerrel),
- jármű fedélzeti fogyasztók energiafelhasználása (jelen cikkben nem kerül tárgyalásra).

A jármű gyorsítására (mozgási energiájának növelésére) fordított energia és az útemelkedés legyőzésére (jármű helyzeti energiájának növelésére) fordított energia összegezve egy menetciklusban nullára adódik, feltételezve hogy a menetciklus elején és végén a jármű áll és a helyzeti energiája sem változik. Ez azt jelenti, hogy az akkumulátorban tárolt energia a menetciklus közben ideiglenesen a jármű mozgási és helyzeti energiájaként kerül „tárolásra”, ami később a korábban felsorolt veszteségekké fog alakulni.

A 7. ábrán látható körcikk diagramokon a WLTC menetciklus szimuláció energiamérlegei láthatók. Az energiamérleget az egyes veszteségteljesítmények idő szerinti integrálásával lehet megkapni a menetciklus alatt. A diagramokon látható, hogy a legnagyobb „fogyasztók” a légellenállás, az útellenállás és a villamos gép veszteségei. Jelentős eltérést mutat a fékezési veszteségek aránya, ami regeneratív fékezéses esetben szinte elhanyagolható, visszatöltés nélkül viszont az egyik legjelentősebb veszteség lenne. Ez annak köszönhető, hogy a WLTP menetciklus során nincs olyan erőteljes fékezés, amit a villamos gép ne tudott volna megvalósítani. Mechanikus fékre csak 15km/h alatti sebességeknél van szükség a szimulációban.

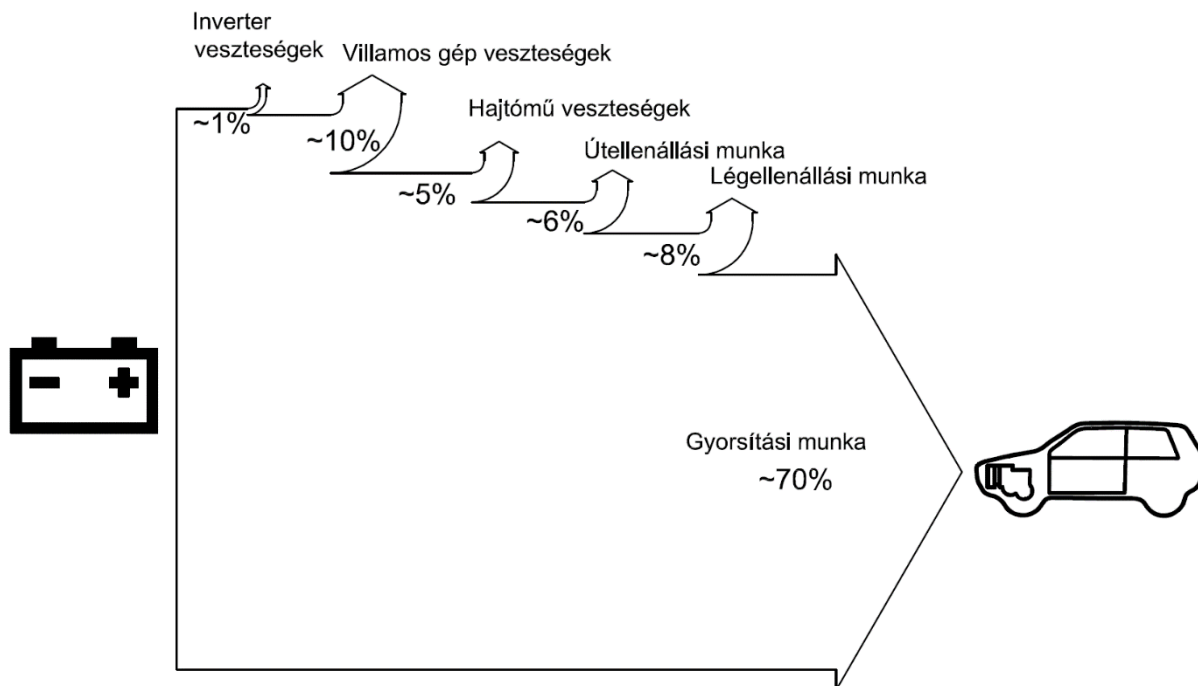


7. ábra A példaként alkalmazott elektromos jármű energiamérlege WLTC menetciklusban fékezési visszatöltéssel és visszatöltés nélkül

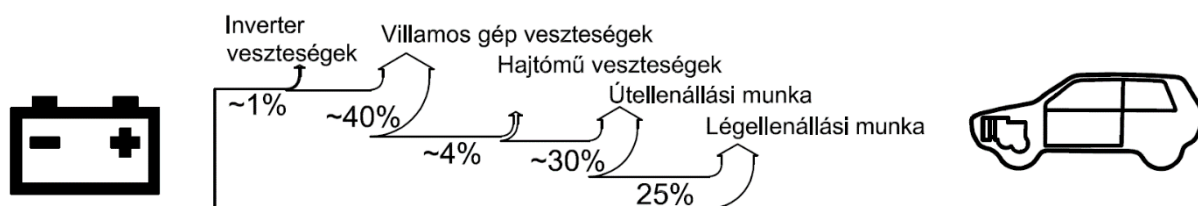
A körcikk diagram nem ad információt az egyes részarányok abszolút mennyiségéről, így célszerű megvizsgálni más szemszögből is a hajtáslánc energetikáját. A 8. a 9. és a 10. ábra ezt mutatja Sankey diagramok segítségével mértékhelyesen ábrázolva.

A 8. ábrán a jármű gyorsítása folyamata közben látható a teljesítményfolyamok elágazása. A gyorsítás 0-120km/h-ra történik egyenletes gyorsulással. Látható, hogy legnagyobb energiaigénnyel a jármű mozgási energiájának növelése rendelkezik. Bár eddig veszteségként volt definiálva, de hasznos munkának számít még a gördülési ellenállás és a légellenállás legyőzése is, hiszen ez alapfeltétele a jármű hajtásának (bár a csökkentésük természetesen jobb hatékonyságot eredményezne). Kevésbé hangsúlyos a villamos gép veszteségeinek leágazása. Viszont ez a kis mérték épp azt jelenti, hogy nagyobb terhelésen a villamos gép jó hatásfokkal üzemel (90% fölött). A hajtómű hatásfokát épp ellentétesen befolyásolja a nagy terhelés, ilyenkor nagyobb veszteséggel működik.

A 9. ábrán egyenletes, 120km/h-s sebességű haladás közben látható a jármű energiamérlege. A menetellenállások továbbra is jelentős veszteségek. A legnagyobb szembejövő változás a villamos gép veszteségeinek nagy mértékű növekedése, ami a részterheléses, alacsonyabb hatásfokú üzemnek köszönhető. A hajtómű veszteségei pedig épp a kis terhelés miatt, egyenletes haladásnál jelentősen lecsökkennek.

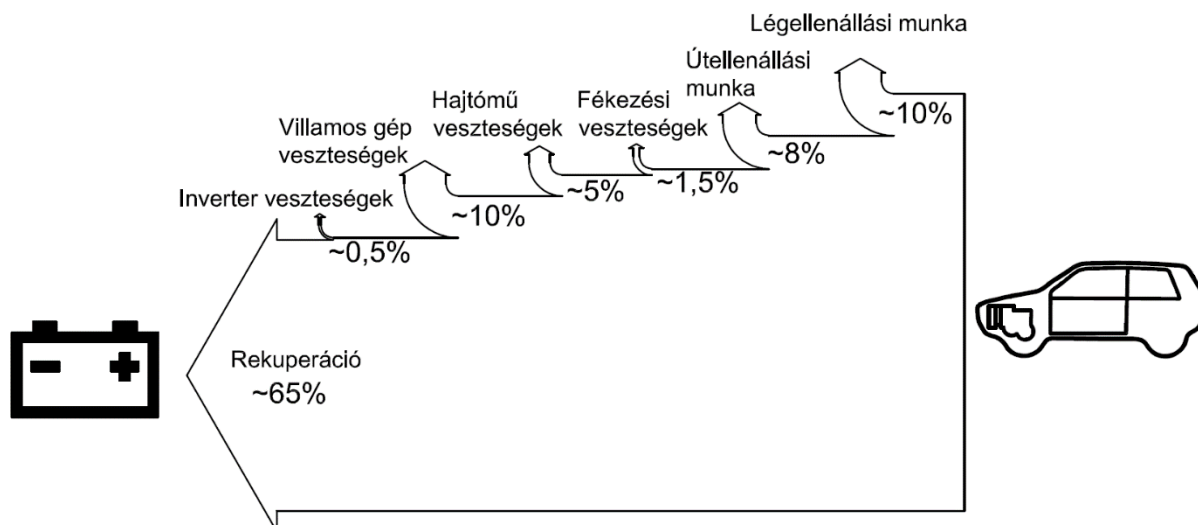


8. ábra A példaként alkalmazott elektromos jármű energiamérlege egyenletes gyorsítás közben



9. ábra A példaként alkalmazott elektromos jármű energiamérlege egyenletes haladás közben (120km/h)

Végül a 10. ábra a 120 km/h-ról történő egyenletes lassulás energiamérlegét ábrázolja. A lassulás azonos ütemű a 8. ábrán bemutatott gyorsulásával, azaz a fékezési teljesítmény nem haladja meg a villamos gép névleges teljesítményét. 15km/h alatt már csak mechanikus fékezés történik. A veszteségek aránya hasonló a gyorsulásnál lévőkhoz: a villamos gép nagyobb terhelésen (generátorüzemben) újra jó hatásfokkal működik. A jármű mozgási energiájának megközelítőleg 65%-a visszanyerhető az akkumulátor töltésére. Ez az arány a valóságban természetesen az akkumulátor töltöttségétől nagyban függhet.



10. ábra A példaként alkalmazott elektromos jármű energiamérlege egyenletes lassítás közben

## 9. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elektromos hajtású járművek terjedése új műszaki kihívások elé állítja a konstruktőröket. A konstrukciós kialakításoknál még sok a kreatív lehetőség, a hagyományos hajtásláncokhoz szokott mérnökök sok esetben még csak ismerkednek az új hajtáslánc tulajdonságaival és követelményeivel.

Jelen kutatás célja egy átlagos paraméterekkel bíró elektromos hajtásláncú jármű energetikai és a hatótávolságával kapcsolatos tulajdonságainak a megismerése volt. A vizsgálat szimulációs környezetben történt. A cikk bemutatta egy egyszerű hosszirányú jármű és hajtáslánc modell megépítéséhez szükséges összefüggéseket valamint az akkumulátor kapacitás és a hatótáv összefüggését. A modell segítségével el lehet kezdeni a hajtáslánc elemeinek méretezését. Ezután részletesen bemutatásra került WLTP menetciklusban és különböző üzemállapotokban a jármű energetikája.

A bemutatott hosszirányú járműmodell megépítésének további célja új kutatási lehetőségek megalapozása. A modell úgy került megépítésre, hogy a részegységek modelljei tovább fejleszthetők legyenek részletesebb vizsgálatok céljából.

A cikkben bemutatott eredmények alapján a következő területeken lehet folytatni a kutatást:

- paraméterérzékenységi vizsgálat a fejlesztendő területek feltárására,
- villamos gép modell továbbfejlesztése, a villamos gép szerkezeti kialakításának hatása a hatásfok térképének jellegére,
- a villamos géphez hasonlóan a többi részegység működése is mélyebben megvizsgálandó,
- jármű gyorsulás vizsgálata,
- a bemutatott analitikus modell átalakítása járművezető-szabályozóval rendelkező modellé,
- szabványos menetciklusok összehasonlítása, valós forgalmi szituációkban rögzített menetciklusok definiálása,
- jármű energiafogyasztásának új, szemléletesebb mértékegységekben való kifejezése, összehasonlítás a hagyományos hajtásláncú járművek energetikájával.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Çeven, S., Albayrak, A., Bayır, R.: Real-time range estimation in electric vehicles using fuzzy logic classifier. *Computers and Electrical Engineering* 83, 2020
- [2] Frieske, B., Kloetzke, M., Mauser, F.: Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles. EVS27 Barcelona, Spain, November 17-20, 2013
- [3] Kádár, L., Varga, F., Kőfalusi, P.: Közúti járműrendszerek szerkezetana. BME MOGI 2014 [http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/kozuti\\_jarmurendszerek\\_szerkezetana/book.html](http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/kozuti_jarmurendszerek_szerkezetana/book.html)
- [4] Kubaisi, R., Gauterin, F., Giessler, M.: A Method to analyze driver influence on the energy consumption and power needs of electric vehicles. 978-1-4799-6075-0/14/\$31.00 ©2014 IEEE, 2014
- [5] Nyerges, Á., Zöldy, M.: Elektromos járművek hajtáslánc tervezésének járműdinamikai lépései. XXVIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2020
- [6] Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V.: Design of rotating electrical engines (Second edition). ISBN: 978-1-118-58157-5, 2014
- [7] S. P. Nikam, B. G. Fernandes (2014) Low cost electric drivetrain for conversion of ICE vehicle into an electric vehicle, 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)
- [8] United Nations Global technical regulation No. 19; 25 August 2017



# Zajdiagnosztikában rejlő lehetőségek felhasználása jármű fedélzeti diagnosztikában

## Utilizing the potential of noise diagnostics in vehicle on-board diagnostics

ŐRI Péter\*, Prof. Dr. habil LAKATOS István

Széchenyi István University, Győr, Hungary

\* lakatos@sze.hu

### Abstract

Noise diagnostics is a very common and proven method in the industry to determine the lifetime and maintenance needs of machines. Typically, a component is critical to the operation of the machine, but its service life cannot be determined precisely. Maintenance based on operating time or mileage is increasingly being replaced by on-demand maintenance, which is more economically and environmentally friendly. Vehicles are also being equipped with more and more monitoring sensors to give control units a more accurate picture of the condition of the components. Electronic self-diagnostics have been developed for electronic components, but the detection of mechanical failures during operation is still a problem. In our research, we examine the methods and tools that can be used to supplement on-board diagnostics with noise measurement.

**Keywords:** noise diagnostics, noise, vibration, drive chain, microphone, on-board diagnostics

### Kivonat

A zajdiagnosztika az iparban nagyon elterjedt és bevált módszer a gépek élettartamának és karbantartási szükségletének megállapítására. Jellemző, hogy egy-egy alkatrész kritikus a gép működését tekintve, de élettartama nem határozható meg pontosan. Az üzemidő vagy futásteljesítmény szerinti karbantartást egyre inkább felváltja az igény szerinti karbantartás, ami gazdaságilag és a környezet szempontjából is kedvezőbb. A járműveket is egyre több felügyelő érzékelővel látják el, hogy az alkatrészek állapotáról pontosabb képet kapjanak a vezérlőegységek. Az elektronikai alkatrészekhez megfelelő elektronikus öndiagnosztika épült ki, viszont a mechanikus meghibásodások feltárása menet közben még mindig problémába ütközik. A kutatásunk során azt vizsgáljuk, hogy – főleg az önvezető autók előkapujában – milyen módszerekkel és eszközökkel lehet a fedélzeti diagnosztikát zajméréssel kiegészíteni.

**Kulcsszavak:** zajdiagnosztika, zaj, rezgés, hajtáslánc, mikrofon, fedélzeti diagnosztika

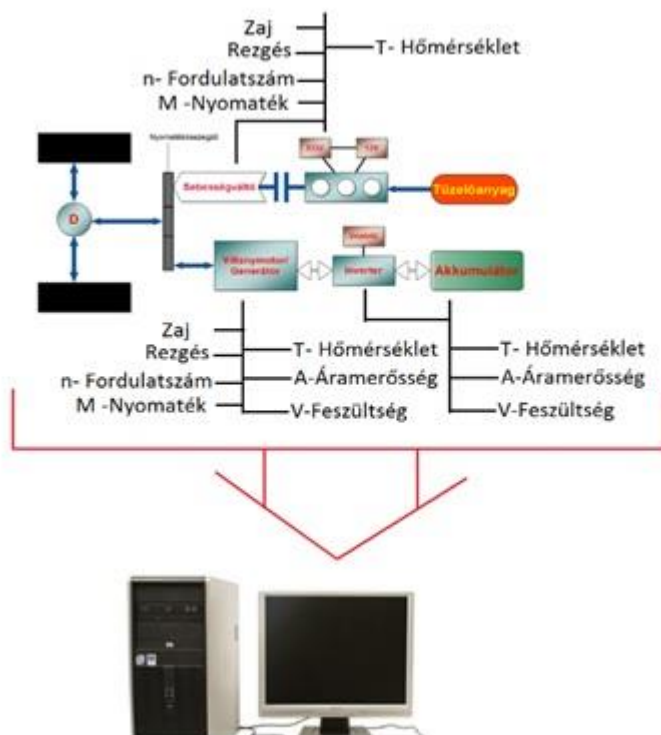
## 1. BEVEZETÉS

A kutatási munkát a vizsgálni kívánt járműtípusok kiválasztásával kezdtük. Elektromos és hibrid járműveket választottunk ki, mivel eladási számuk nagymértékben növekszik, halkabb üzemeltetésük pedig jobban felismerhetővé teszi a meghibásodásokat. A hibrid járművek megbízhatóságának vizsgálatára egy kérdőívet készítettünk, melyet magyar és külföldi márkaszervizek is kitöltöttek. A kérdőívre adott válaszok alapján leginkább azok a kopó vagy a belső égésű motoros járművekben is megtalálható alkatrészek mennek tönkre, melyek vizsgálata nem kizárólag az elektromos és hibrid járművek sajátosságai, ezért is terjesztettük ki a vizsgálatokat hajtáslánc-függetlenné.

## 2. HIBRID ÉS ELEKTROMOS JÁRMŰVEK HAJTÁSLÁNCAINAK GYAKORI MEGHIBÁSODÁSAI

Az elektromos és hibrid járművek akusztikai vizsgálata során először meg kell ismerni a gyakori meghibásodási lehetőségeket, hogy a mérések során valós problémákra koncentrálhassunk. Ehhez egy kérdőívet állítottunk össze, amelyben 50 magyar és 50 német márkaszervizt kérdeztünk meg az elektromos és hibrid járművekkel kapcsolatos gyakorlati tapasztalatokról.

A hajtáslánccal kapcsolatosan kevés meghibásodási tapasztalatról számoltak be a márkaszervizek. Legfőképp a kopó alkatrészek cseréje gyakori az elektromos hajtáslánccban. Hibrid járművek esetén a belső égésű motorok jelentik a fő hibaforrást, így azok vizsgálatára érdemes hardveres és szoftveres eszközöket fejleszteni.



1. ábra Mérési lehetőségek hibrid járműveken

### 3. AZ ÖNDIAGNOSZTIKAI LEHETŐSÉGEK ALAPJA

A zajmérés nagy előnye, hogy úgynevezett „contactless” vagyis érintés nélküli vizsgálatot tesz lehetővé. Nem kell a nehezen hozzáférhető alkatrésze csatlakozni, nem szükséges azt kiszerezni és nem jár semmiféle roncsolással a mérés kivitelezése, ellentétben például az emissziós vizsgálatokkal [1].

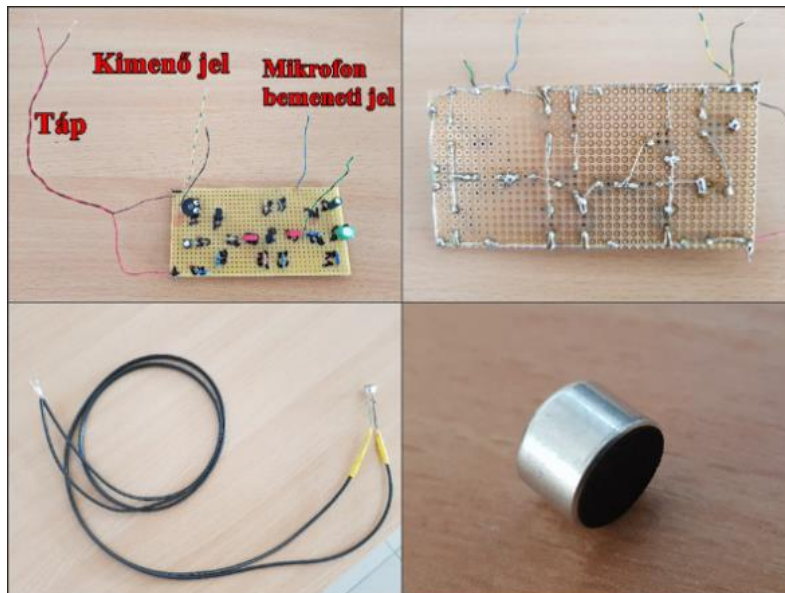
Bohn kutatásaiban a motor-fogaskerék hajtómű-forgattyús hajtómű kapcsolatát vizsgálta. Bizonyította, hogy a komplexum testhangjának amplitúdója és frekvenciája az olajfilm tulajdonságaitól is függ [2].

Jindal kutatásaiból kiderül, hogy a különböző üzemanyagok fajtája is befolyással van a motorok rezgésjellemzőire [3].

A gépjárművekben az alkatrészek nagyrésze valamilyen forgó vagy alternáló mozgást végez, tehát működésükben periodikusság figyelhető meg. A zajmérésből kapott, valamilyen ismétlődést mutató jelek így társíthatók az adott alkatrészhöz. A hajtáslánccban számos olyan hibalehetőség rejlik, ami a szokásostól eltérő zajkibocsátást eredményez. Ezek közül felsorolunk néhány példát: kiegyensúlyozatlanság, excentricitás, tengelygörbülés, tengelykapcsoló-hiba, siklócsapágyak túlzott kopása, kenéshiány, gördülőelemes csapágyak hibái, hajtómű-meghibásodások, fogaskerék-problémák, lánchajtások hibái, szíjhajtások hibái, szivattyú-meghibásodások, ventilátor-problémák, villamos gépek hibái, rezonancia jelenségek, folyadékok és gázok áramlásával kapcsolatos problémák. A járművek egyre növekvő automatizáltsága mellett kiemelt fontosságú a fedélzeti diagnosztika fejlesztése [4].

Ha öndiagnosztikáról beszélünk, akkor nagy sorozatgyártásban alkalmazható, gazdaságos eszközök alkalmazására kell fókuszálni. Az akusztikai vizsgálatoknál az első feladat a mikrofon és a mérőrendszer kiválasztása [5]. Így esett a választásunk egy egyszerű kondenzátormikrofonra, melyhez az erősítőt magunk készítettük el [6,7] (2. ábra).

A mérés célja az volt, hogy a gazdaságos rendszerrel hibát detektáljunk, így a járművekben széria felszerelésként az akusztikai öndiagnosztika funkció alkalmazhatóságát vizsgáljuk.



2. ábra A saját készítésű erősítő és a kondenzátor mikrofon

Az első méréseket teljesítménymérő görgős padon végeztük el. A mikrofont a járművön kívül helyeztük el, hogy közvetlenül a generált hiba közelében tudjunk mérni. Ezzel az üzem közbeni mérés két zavaró tényezőjét ki tudtuk szűrni: a szélzajt és a karosszéria szigetelés okozta zajcsökkenést [8,9]. Természetesen a görgők újabb zajforrást visznek a mérésbe, viszont a fordulatszámok ismerete miatt az abból adódó zajok és mérési csúcsok kiszűrhetők [10].

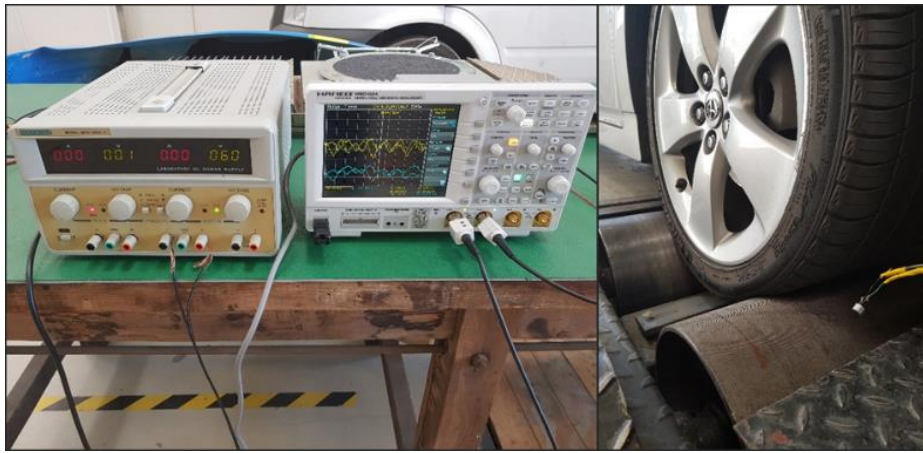
#### 4. A GAZDASÁGOS MIKROFONNAL VÉGZETT MÉRÉSEK ELLENŐRZÉSE

A méréseket a saját fejlesztésű, gazdaságos mérőrendszerrel végeztük, és az eredményeket egy Pico NVH típusú műszerrel ellenőriztük. Ennek révén azt szeretnénk volna megtudni, hogy milyen érzékenységi különbségek vannak az öndiagnosztikai mérésekre alkalmazható kondenzátor mikrofon és egy professzionális NVH-kit között.

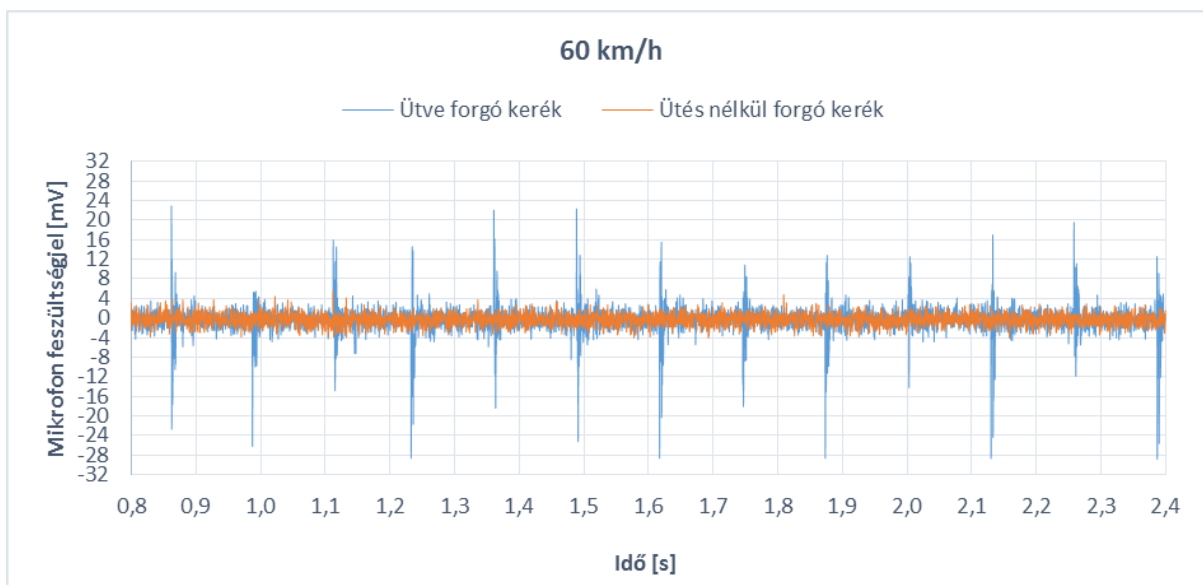
A méréshez az alábbi eszközöket használtuk fel:

- Görgős járműfékpad
- Járművet rögzítő heveder
- Kondenzátormikrofon
- Saját készítésű mikrofon előerősítő áramkör
- Árnyékolt kábelek
- MATRIX MPS-3005L-3 labortáp
- HAMEG HMO1024 digitális oszcilloszkóp
- Pendrive (a mért adatok rögzítési helye)
- Pico NVH kit

Az első mérések pozitív eredményt mutattak, mivel a mikrofon erősítőjének kimenetén jól kivehető amplitúdóként jelentkezett a mesterséges hiba. Állandó menetsebesség tartása mellett végeztünk méréseket, hogy a fordulatszám ingadozás okozta frekvenciaváltozás ne nehezítse a kiértékelést (4. ábra). Az elemzés célja megfigyelni a kondenzátormikrofon feszültségjeleit a hibamentes és hibás üzemállapotban. A 4. ábrán jól láthatók a kék görbe kiugró feszültségintéjjei.

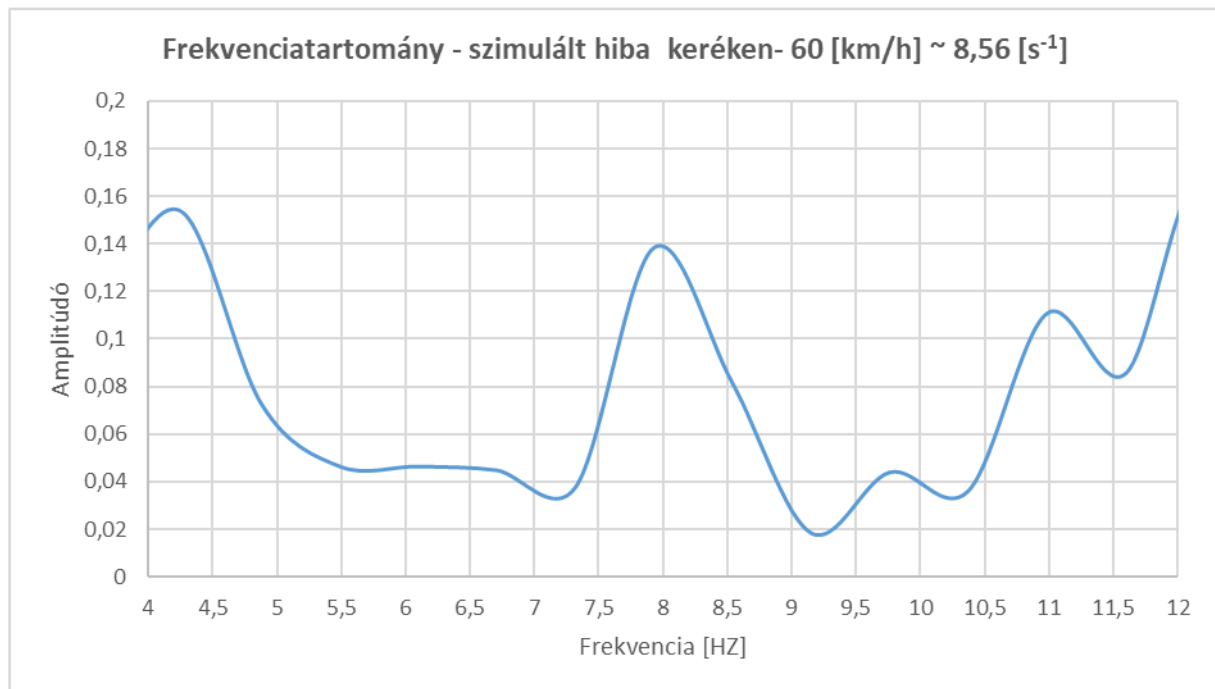
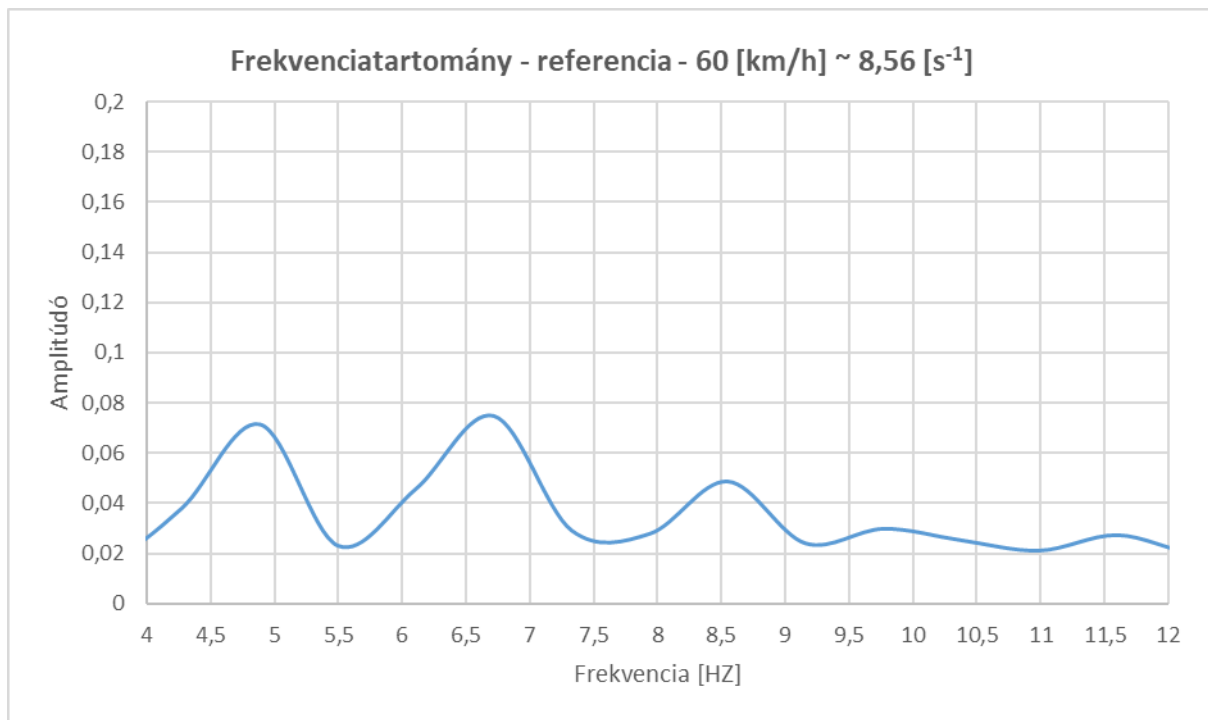


3. ábra A mérőadatgyűjtő rendszer a saját fejlesztésű, gazdaságos mikrofonhoz.



4. ábra Görgős padi mérés 60 km/h-val, hibával és hiba nélkül, időtartományban

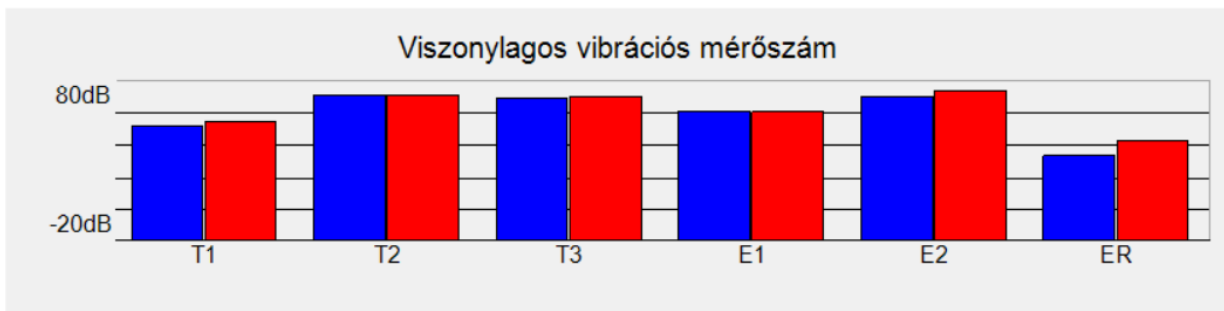
A periodikus mozgás miatt az adathalmazt FFT-analízisnek vetettük alá, hogy a zajforrást frekvenciatartományban is megvizsgálhassuk. A jellemző frekvencia meghatározása segít a zajforrás azonosításában, hiszen a periodikus mozgást végző alkatrészek fordulatszámából meghatározott alap frekvenciát és felharmonikusait össze tudjuk vetni a mérés során tapasztalt zaj frekvencia komponenseivel.



5. ábra: Görgős padi mérés 60 km/h-val, hibával és hiba nélkül, frekvenciatartományban

Amikor a mérést két darab ipari, kívül elhelyezett mikrofonnal végeztük, szintén megfigyelhetővé vált a leragasztott, ezáltal radiális ütessel forgó kerék hatása. A 6. és 7. ábrán látható ezen mérések eredménye. A 6. ábra a referencia mérés, a 7. ábrán pedig a radiális ütessel forgó kerékkel végzett mérés eredményei láthatóak. Mindegyik mérésnél két mikrofont használtunk. A Pico NVH szoftver egy OBD-csatlakozón keresztül tudta mérni a jármű keréksebességét és a motor fordulatszámát, így a frekvencia-tartománybeli vizsgálatoknál rögtön ki tudja venni az abronchhoz és a motorhoz tartozó frekvencia értékeket. Jól látható, hogy a hiba nélküli állapotban a motorzaj erősebb volt a kerékzajnál, majd a hiba fennállásakor a kerékzaj 16-17 dB-lel erősödött, zajosabb lett, mint a motor.

## Rezgésjelentés



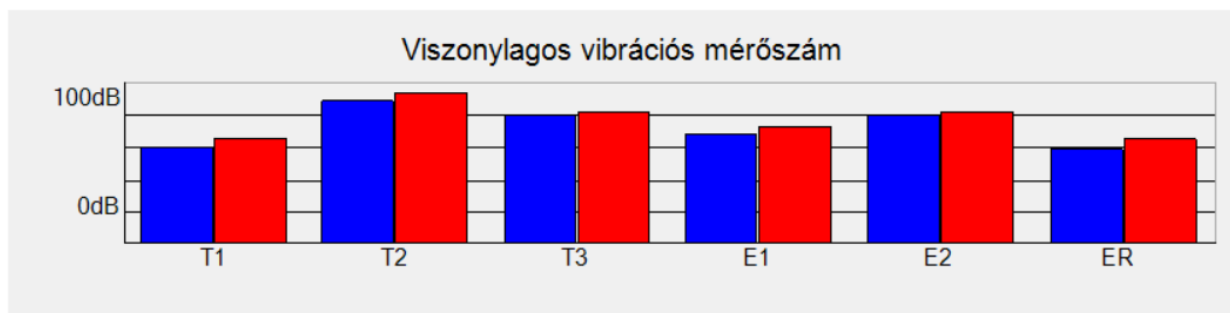
Vibráció	Frekvencia	ChA	ChB
Abronszrezgés (1)	12,0 Hz	54,6 dB	57,3 dB
Abronszrezgés (2)	24,0 Hz	77,6 dB	78,3 dB
Abronszrezgés (3)	36,0 Hz	75,5 dB	76,8 dB
Motorfordulatszám (1)	20,2 Hz	65,2 dB	65,8 dB
Motorfordulatszám (2)	40,4 Hz	76,6 dB	80,8 dB
Egyéni rezgés (1)	100,0 Hz	33,4 dB	43,4 dB

Csatorna A: TA144 Mikrofon

Csatorna B: TA144 Mikrofon

6. ábra: Görgős padí mérés hiba nélkül, frekvenciatartományban – Pico NVH kit

## Rezgésjelentés



Vibráció	Frekvencia	ChA	ChB
Abronszrezgés (1)	11,7 Hz	50,5 dB	58,1 dB
Abronszrezgés (2)	23,4 Hz	89,9 dB	95,9 dB
Abronszrezgés (3)	35,1 Hz	76,7 dB	81,6 dB
Motorfordulatszám (1)	28,5 Hz	61,2 dB	67,9 dB
Motorfordulatszám (2)	57,0 Hz	77,0 dB	80,1 dB
Egyéni rezgés (1)	100,0 Hz	49,3 dB	58,0 dB

Csatorna A: TA144 Mikrofon

Csatorna B: TA144 Mikrofon

7. ábra: Görgős padí mérés hibával, frekvenciatartományban – Pico NVH kit

## 5. MÉRÉSEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A kiértékelést a kerékfordulatszám kiszámításával kezdtük, amely a következő módon határozható meg:  $n = \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$ , ahol  $\omega = \frac{v}{r}$ ,  $v$  a kerületi sebesség,  $r$  pedig a kerék gördülési sugara.

A méréshez használt Toyota Prius esetében  $r = 310,15\text{mm}$ , a mérés közben  $v = 30\text{ km/h}$ , tehát  $n = 256,58$  fordulat/perc.  $60\text{ km/h}$  sebességnél ez értelemszerűen a kétszerese,  $513,16$  fordulat/percenként. A hiba már az idő-feszültség függvényből is látszott, mivel közvetlenül a kerék mellett mérve a többi zajkeltő tényező, mint a motorzaj, elenyésző volt.

Mivel a Pico mérésfrekvencia függvényénél az y tengely értékei dB-ben, hangnyomásban vannak megadva, itt viszont feszültségjelként, vagy amplitúdóként szerepel, ezért a következő képlet használata szükséges az átszámításhoz:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0},$$

ahol  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ . Ezt az egyenletet az alábbiak szerint rendezve:

$$\frac{p}{p_0} = 10^{\frac{L_p}{20}}$$

A maximum és a minimum pontok hányadával össze lehet hasonlítani a két mérési eredményt, mivel a hangnyomás és a feszültségjel arányosak egymással.

A programból pontosan kiolvasható, hogy ütés nélkül forgó kerék esetén, 60 km/h-nál a maximális hangnyomás 78,9 dB, a minimális pedig 15,8 dB. Átszámítva, tehát:

$$\frac{p}{20 * 10^{-6}} = 10^{\frac{78,9}{20}}$$

$$p = 0,17621 \text{ Pa};$$

$$\frac{p}{20 * 10^{-6}} = 10^{\frac{15,8}{20}}$$

$$p = 0,000123 \text{ Pa}$$

Radiális ütéssel történő mérés esetén a maximális hangnyomás értéke 87 dB, a minimális pedig 20,2 dB, így:

$$\frac{p}{20 * 10^{-6}} = 10^{\frac{87}{20}}$$

$$p = 0,44774 \text{ Pa};$$

$$\frac{p}{20 * 10^{-6}} = 10^{\frac{20,2}{20}}$$

$$p = 0,000205 \text{ Pa}$$

Az összehasonlítást a feszültségfüggvényekkel végeztük el. Az első mérésből adódó feszültség adatokból kerestük ki a minimum és maximum értékeket, majd ezeknek vettük az arányát. Az új mérés feszültségadatait, pedig egy másik fájlba konvertáltuk (természetesen az adott sebességen és közel azonos fordulatszámra), és hasonlóképpen elvégeztük a fent leírt műveleteket. Az így kapott eredmények összehasonlíthatók lettek. Az eredményeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

*Feszültség- és nyomásjelek összehasonlítása*

1. táblázat

60 km/h	Max.	Min.	Arány
Feszültség, radiális ütés, Pico nélkül	22,34 mV	0,137 mV	163,18
Feszültség, radiális ütés nélkül, Pico nélkül	5,537 mV	0,137 mV	40,45
Nyomás, radiális ütés, Pico-val	11,11 Pa	0,0047 Pa	2340,48
Nyomás, radiális ütés nélkül, Pico-val	8,3199 Pa	0,0047 Pa	1752,55

Látható a két mikrofon érzékenysége közötti különbség. Az adathalmazban az is észrevehető, hogy míg a PicoDiagnostics 50 kHz mérési frekvenciával rögzítette az egyes nyomásjeleket, addig az oszcilloszkóp csak 2,5 kHz frekvenciával jegyezte le a feszültségjeleket, tehát jóval kevesebb adat került rögzítésre. A Shannon mintavételezési törvény alapján a gazdaságos mikrofon összeállítás csak az 1250 Hz frekvencia alatti komponensek észlelésére alkalmas.



## 6. KÜLSŐ HATÁSOK VIZSGÁLATA

A referenciamérésekhez alkalmazott ipari mikrofon készlettel további méréseket végeztünk, ahol azt vizsgáltuk, hogy a mikrofon utastérben belüli és kívüli elhelyezése között milyen jelszint különbségeket tapasztalunk. Az utastér körüli szigetelés és a menet közben felmerülő külső zajok okozta zavarás felmérése volt a célunk. Ezen vizsgálatokat valós környezetben, mozgó járművel célszerű elvégezni, mivel a szélzajt csak így lehet figyelembe venni a mérés során. A korábbi mérésekhez alkalmazott járművel forgalmi méréseket nem végezhattünk, ezért másik járművön tudtuk a vizsgálatokat folytatni.

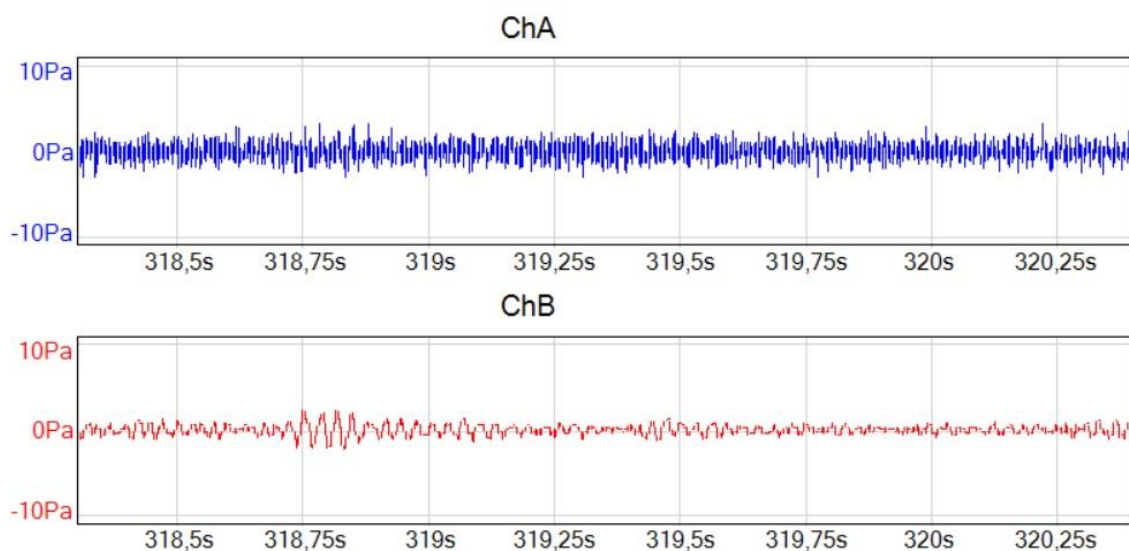
Az elektromos hajtás kis alapzajszintje a kezdeti méréseknél könnyebbé teszi a feladatot, mivel a két mérés közötti különbség jobban megfigyelhető.



8. ábra Ipari mikrofon elhelyezése az utastérben

A 9. ábra mutatja a mikrofon elhelyezések közötti különbséget. A kívül elhelyezett mikrofon a motorháztető alatt kapott helyet, hogy valamelyest védve legyen a menetszélről, és így közelebb kerülhet a hajtáslánchoz.

### Rezgésjelentés



Csatorna A: TA144 Mikrofon

Csatorna B: TA144 Mikrofon

Hely: Motortér

Hely: Utasfülke

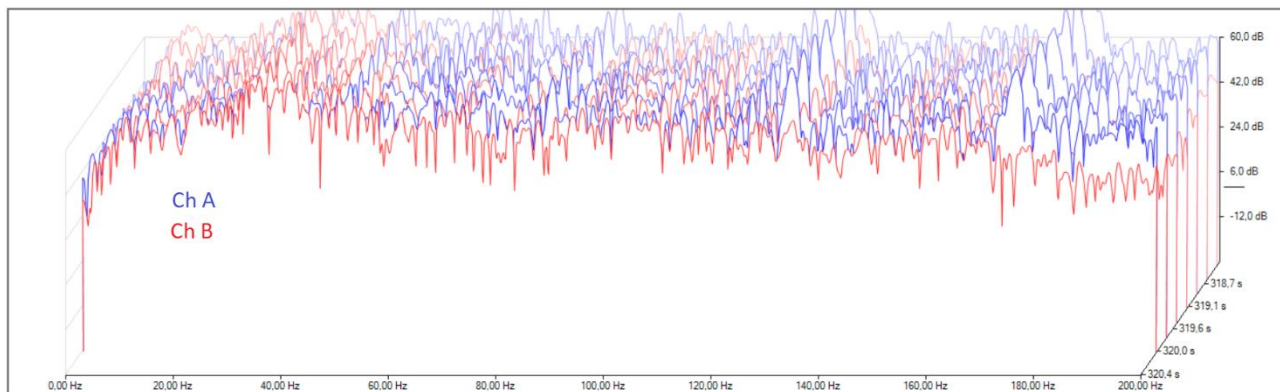
Megjegyzések:

Megjegyzések:

9. ábra Az utastérben és a motorháztető alatt elhelyezett mikrofonnal végzett mérések közötti különbség

A kék görbe jelöli a motortérben elhelyezett mikrofon jelét, a piros pedig az utastérben mért zaj. Az időtartományban mutatott jelekből jól kivehető, hogy a motortérben az elektromos hajtás nagyfrekvenciás zajt generál, amit az utastérben már nem érezni a szigetelés miatt. A kisfrekvenciás zajok bejutnak az utastérbe, a futómű által átadott rezgések eljutnak a karosszériára a csatlakozó pontokon keresztül. A kivett mérési részletben nem volt úthiba, így csak a menetszél, a gördülési zaj és a hajtáslánc volt releváns.

A 10. ábrán egyszerre tudjuk idő- és frekvenciatartományban vizsgálni a zajokat. Itt jól látható, hogy a nagy frekvenciás zajok esetében a kék görbék nagyobb amplitúdót mutatnak, ráadásul a forgó gép és a kerék fordulatszámának megfelelő frekvenciákon lokális csúcsok is láthatók.

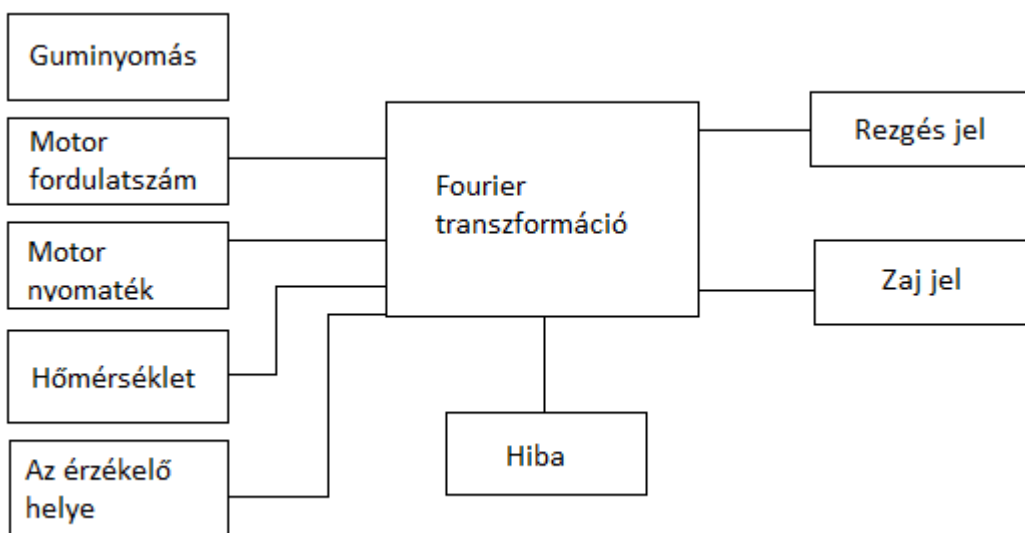


10. ábra: Az utastérben és a motorháztető alatt elhelyezett mikrofonnal végzett mérések kiértékelése idő- és frekvenciatartományban

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az eddigi mérések alapján akár kis költségű mikrofonnal is lehet detektálni hibákat a jármű haladása közben, ami lehetőséget ad a fedélzeti diagnosztikába való bekötésre.

A mikrofon elhelyezésének vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy az utastérben elhelyezett mikrofon a jármű szigetelése ellenére is jól felhasználható, az utastéren kívüli mérések pedig a szélzaj miatt körülményesek.



11. ábra: A mérőrendszer és a hozzá tartozó hatások, zavarások.

További mérések elvégzése szükséges, hogy a mikrofonok számának és elhelyezésének hatását is elemezni tudjuk. Feltételezzük, hogy több mikrofonnal a zajforrás helye jobban detektálható, valamint a mikrofonok elhelyezése fontos szerepet játszik egy-egy hiba észlelésében. A közúton végzett

referenciamérések segítenek az alap zajszint meghatározásához, ami a jármű normál működését jellemzi, illetve a külső zajforrások, lehetséges zavaró zajok felismerésében.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Zöldy M, Török Á: A forgalomba belépő gépjárművek többlet károsanyag kibocsátásának számítása a nemzetközi határértékek figyelembevételével, Közlekedéstudományi Szemle 55 pp. 336-339, 4 p. (2005)
- [2] Bohn, P.: Wechselwirkungen von Schwingungen zwischen Motor-Getriebe-Verbund und Kurbeltrieb als Grundlage für Körperschallanalysen, „PhD disszertáció”: Technische Universität Berlin, V - Verkehrs- und Maschinensysteme, 2006.
- [3] Jindal, S.: Vibration signatures of a biodiesel fueled CI engine and effect of engine parameters. International Journal of Energy & Environment, 3. kötet, 1. kiadás, 151-160. oldal, 2012.
- [4] Derenda T, Zanne M, Zöldy M, Török Á (2018): Automatization in road transport: a review, Production Engineering Archives 20 : 20 pp. 3-7. , 4 p. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.01>
- [5] Van Riesen D., Schlensok C., Henrotte F., Hameyer K.: “Acoustic measurement for detecting manufacturing faults in electrical machines”, 17th International Conference on Electrical Machines ICEM, (2006)
- [6] Dr. Bánlaki P.: Gépjármű hajtáslánc fődarabok rezgés- és zajdiagnosztikai végellenőrző rendszereinek továbbfejlesztése „PhD disszertáció”: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, 2014.
- [7] ÓRI Péter, Prof. Dr. habil LAKATOS István: Kis költségű mikrofon alkalmazási lehetőségei akusztikai öndiagnosztikára (2019)
- [8] Verma S. P.: “Noise and vibrations of electrical machines and drives; their production and means of reduction”, International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, Vol. 2, pp.1031,
- [9] M. Janda, O. Vitek, M. Salka: Noise diagnostic of induction machine - The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010
- [10] Byoung-Hoo Rho, Dae-Gon Kim & Kyung-Woong Kim: Noise Analysis of Cylindrical Roller Bearings Operating Under Zero External Load

# Dízel égésfolyamatok vizsgálata 3D szimuláció segítségével

## Investigation of combustion processes in a diesel engine using 3D simulation

VASS Sándor\*, KOVÁCS Máté

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék  
Magyarország, 1111 Budapest, Stoczek utca 6.

[www.gjt.bme.hu](http://www.gjt.bme.hu)

\* [sandor.vass@gjt.bme.hu](mailto:sandor.vass@gjt.bme.hu)

### Abstract

*Exhaust gas recirculation is used for a long time now to reduce raw NO<sub>x</sub> emissions of an internal combustion engine. The aim of this work is to analyse the combustion process of a four-cylinder, medium-duty diesel engine with common-rail direct injection system. The analysis is carried out with the aid of a 3D simulation tool and data from an engine test bench measurement is compared with the results of the simulation. The simulation is performed using the AVL FIRE combustion simulation software. With the help of this, it can be seen how the exhaust gas recirculation affects the combustion process and pollutant formation.*

**Keywords:** diesel engine, exhaust gas recirculation, NO<sub>x</sub>, simulation, 3D, emission reduction

### Kivonat

*A kipufogógáz visszavezetést már hosszú ideje használják a belsőégésű motorok nyers NO<sub>x</sub> kibocsátásának csökkentésére. Eme vizsgálat célja egy négyhengeres, common-rail rendszerű, közvetlen befecskendezéses medium-duty dízelmotor égésfolyamatának vizsgálata 3D szimuláció segítségével. Az ezen végrehajtott motorfékpadi mérésből származó adatsorok kerülnek összehasonlításra a szimuláció eredményeivel. A szimuláció az AVL FIRE célszoftverrel kerül megvalósításra, melynek révén képet kaphatunk arról, hogy a kipufogógáz- visszavezetés mértéke miként hat az égésfolyamatra, illetve hogyan befolyásolja a kipufogógáz károsanyag-tartalmát.*

**Kulcsszavak:** dízelmotor, kipufogógáz visszavezetés, NO<sub>x</sub>, szimuláció, 3D, emisszió csökkentés

## 1. BEVEZETÉS

A dízel égésfolyamatok vizsgálata napjainkban különösen fontos téma, ugyanis az utóbbi évtizedekben egyre inkább előtérbe került a belsőégésű motorok által kibocsátott károsanyagok környezetre és élővilágra gyakorolt hatása [1]. Ezen belül kiemelt figyelmet kap az emisszió által erősen terhelt – túlnyomóan városi – területeken élő emberek egészségének kérdése, illetve hogy a romló tendencia milyen mértékben írható a közlekedés számlájára [2]. Manapság elsősorban a dízelmotorokat érik erős kritikák ezen a téren, különösképpen azért, mert a szikragyújtású motorokhoz képest sokkal magasabb a szilárd részecske és NO<sub>x</sub> kibocsátásuk [3]. Gyakori vélemény, miszerint a következő évtizedekben a konstrukciónak nincs létjogosultsága, azonban a jelenleg gyártott motorokban alkalmazott rendszerek beiktatásával már közel sem olyan kritikus a helyzet, mint elődjeik esetében. Másrészt a haszongépjárművek területén támasztott követelmények szempontjából – magas literteljesítmény, nyomaték, élettartam, gazdaságos üzemeltetés - a dízelmotorok továbbra is fenntartják egyeduralgoló szerepüket. Világszerte különböző szabályozások léteznek a maximálisan megengedett kibocsátás tekintetében. Az Európai Unió tagországaiban az EURO normák érvényesek. A kompressziógyújtású motorok legmodernebb változatai az évek során egyre szigorodó kibocsátási normáknak maradéktalanul megfelelnek, a jelenlegi határértékeket tekintve egyértelműen felveszik a versenyt szikragyújtású társaikkal. [4]. Ebben nagy szerepet játszik a nagyarányú kipufogógáz visszavezetés (EGR), mely jelentősen csökkenti a NO<sub>x</sub> kibocsátást [5].

Az motorikus folyamatok vizsgálata történhet közvetlen mérés (motorfékpadi indikálás) útján, illetve számítógépes szoftverek segítségével. Az utóbbi módszer használata a járműiparban napjainkban széleskörben elterjedt, hiszen szimulációs eljárásokkal jelentős költséget, kapacitást és időt takaríthatunk meg. A modell

módosítása a virtuális térben sokkal rugalmasabb és gyorsabb, mint egy felépített mérőrendszer esetében, nem beszélve arról, hogy lehetőség nyílik olyan mennyiségek mérésére, amelyeket nehézkes, vagy egyáltalán nem lehetséges kimérni. Motorikus szimulációt végezhetünk erre a célra kifejlesztett szimulációs környezetben [6], vagy ha kifejezetten az égésfolyamatok modellezése a cél, akkor 3D áramlástanai szimulációval, mint jelen munka esetében is. Az egyes vizsgálati módszerek egymást kiegészítve a leghatékonyabbak, valamint így adják a legpontosabb eredményeket.

Jelen munka célja egy közepes haszonjármű dízelmotor égésszimulációjának verifikációja motorfékpadai mérések alapján, különböző EGR értékek esetében.

## 2. A MÉRŐRENDSZER ÉS A MÉRÉSEK

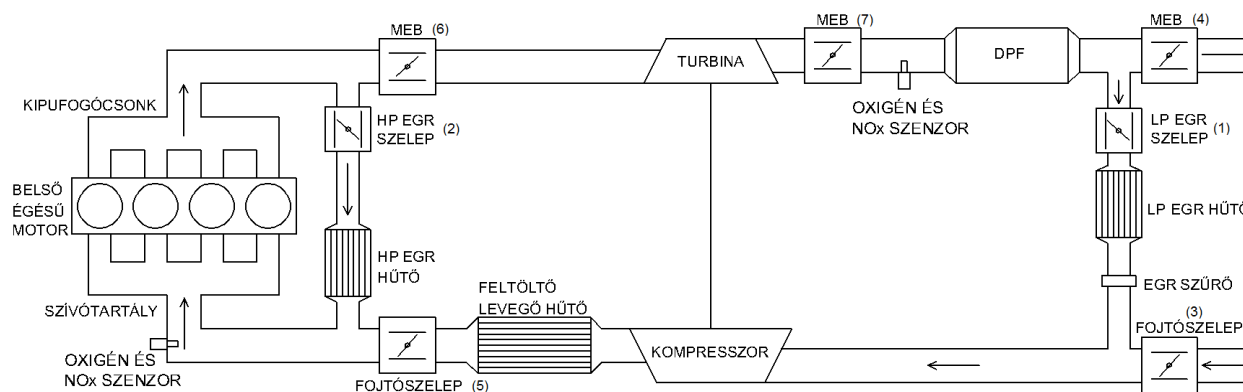
A vizsgált motor egy Cummins ISBe 170 30 típusú, soros, négyhengeres, medium-duty haszongépjármű dízelmotor Common-Rail befecskendezéssel. A motor turbófeltöltött, töltőlevegő hűtővel, alacsony és magas nyomású kipufogógáz visszavezetéssel rendelkezik, paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

A visszavezetett kipufogógáz mennyiségének szabályozása a szívó- illetve kipufogócsatornában elhelyezett fojtószelepek segítségével történik [7], melynek elrendezését az 1. ábra mutatja.

A vizsgált motor paramétereit

1. táblázat

Konstrukció	Soros, 4 hengeres turbódízel
Maximális teljesítmény	125 kW (2500 1/min)
Maximális nyomaték	600 Nm (1200-1600 1/min)
Lökettérfogat	3,9l
Löket/furat arány	1,176
Kompresszióviszony	17,3
Maximális feltöltőnyomás	2,5 bar



1. ábra A vizsgált motor szívó- és kipufogórendszerének elrendezése [7]

A kísérleti motor egy Borghi-Saveri FE350S típusú örvényáramú fékpadhoz volt kapcsolva, az indikálás AVL IndiCom rendszerrel történt, még a NO<sub>x</sub> értékeket UniNox szenzor mérte.

A mérés során 1500 1/min-es fordulatszám és 60 Nm-es fékezőnyomaték mellett négy különböző kipufogógáz-visszavezetési érték beállításával történt az adatok rögzítése. A visszavezetett kipufogógáz-mennyiségek az EGR-szelepek és a kipufogófelek segítségével kerültek beállításra. A mért adatok között volt többek között a szívó- és kipufogó oldali NO<sub>x</sub> és O<sub>2</sub> koncentráció, a befecskendezett tüzelőanyag tömegáram, nyomások és hőmérsékletek több pontban a szívó és kipufogó rendszerben.

A visszavezetett kipufogógáz tömegarányának meghatározása (1) segítségével történt:

$$x_{EGR} = \frac{c_{O_2\text{levegő}} - c_{O_2\text{szívó}}}{c_{O_2\text{levegő}} - c_{O_2\text{kipufogó}}}, \quad (1)$$

ahol:  $c_{O_2\text{levegő}}$  a környezeti levegő,  $c_{O_2\text{szívó}}$  a szívóoldali,  $c_{O_2\text{kipufogó}}$  a kipufogóoldali oxigénkoncentrációt jelöli, melyek mérése UniNO<sub>x</sub> szenzorral történt. Az egyes mérési pontokban rögzített adatokat a 2. táblázat tartalmazza.

MP	MEB pozíció [%]	cO <sub>2szívó</sub> [%]	cO <sub>2kipuf</sub> [%]	cNO <sub>xkipuf</sub> [ppm]	cNO <sub>xszívó</sub> [ppm]	B <sub>t</sub> [g/s]	p <sub>lev</sub> [bar]	T <sub>lev</sub> [K]
1.	0	18,16	12,3	175,5	32,2	0,922	0,9	298
2.	70	16,57	10,64	86,5	26,6	0,934	0,89	298
3.	83,5	13,24	6,54	21,6	8,2	1,014	0,87	298
4.	84,5	12,88	6,15	20,7	7,5	1,072	0,86	298

Az egy hengerbe egy munkaciklus alatt befecskendezett tüzelőanyag tömege (dózisadag):

$$m_{dos} = \frac{B_t}{\frac{n}{60 \cdot 2^z}}, \quad (2)$$

ahol:  $B_t$  a tüzelőanyag-fogyasztás,  $n$  a motorfordulatszám,  $z$  a hengerek száma (esetünkben  $z = 4$ ).

Az így meghatározott értékek a 3. táblázatban találhatók.

EGR hányad és dózis értékek

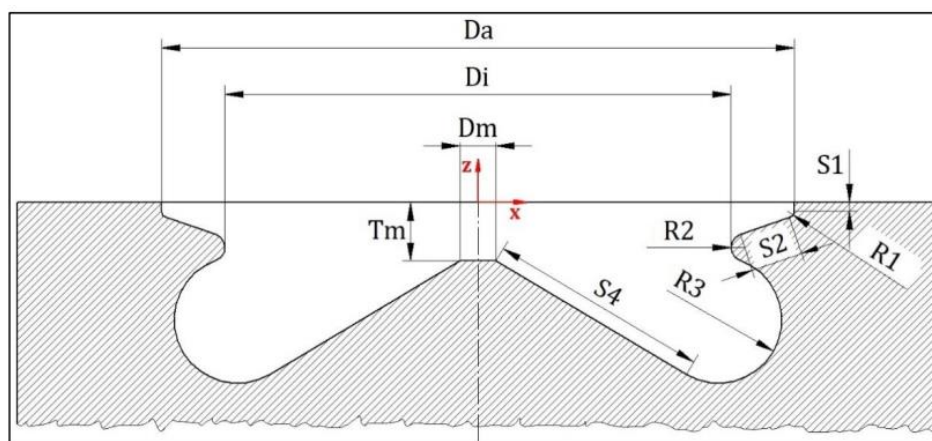
3. táblázat

MP	X <sub>EGR</sub> [-]	m <sub>dos</sub> [mg]
1.	0,33	18,444
2.	0,43	18,674
3.	0,54	20,28
4.	0,55	21,44

### 3. SZIMULÁCIÓS PARAMÉTEREK

Az égésszimuláció az AVL FIRE [8] szoftver ESE Diesel (Engine Simulation Environment Diesel) komponensével került megvalósításra. Ez a CFD modul specifikusan dízel égésszimulációk gyors elvégzésére készült.

Az égéstér dugattyúba süllyesztett, forgásszimmetrikus,  $\omega$ -kialakítású. Az égéstér paramétereit a 2. ábra szemlélteti, a paraméterek értékei a 4. táblázatban vannak feltüntetve. A motorba beépített befecskendező egy Bosch CRIN 1 típusú, 8 furatos, haszongépjárművekben alkalmazott injektor [9].

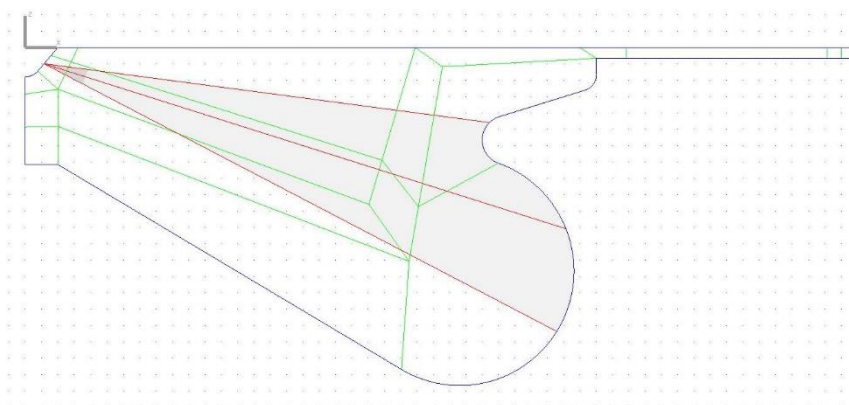


2. ábra A dugattyú égéstér paramétereit

A hálózás alapvető elrendezését a hálózási blokkstruktúra alakja határozza meg. Ezen területek határai a 3. ábrán látható zöld vonalak, az elemek méretéhez igazodóan kell őket elrendezni. Fontos szempont még, hogy a befecskendezési sugárral minél kisebb szöget zárjanak be, ugyanis a túl nagy szögeltérés a hálóban divergenciát okozhat. A beporlasztott tüzelőanyag sugár a piros vonallal határolt szürke terület, látható a befecskendezés szöge, illetve hogy a fúvókafurat félkúpszögéből adódóan hogyan terül szét a tüzelőanyag.



<b>Da, [mm]</b>	70	<b>R1, [mm]</b>	1
<b>Di, [mm]</b>	56	<b>R2, [mm]</b>	1,5
<b>Dm, [mm]</b>	4	<b>R3, [mm]</b>	7
<b>Tm, [mm]</b>	6,5	<b>R1 X, [mm]</b>	34
<b>S1 [mm]</b>	1	<b>R2 X [mm]</b>	29,5
<b>S2 [mm]</b>	5,48	<b>R2 Z [mm]</b>	5
<b>S3 [mm]</b>	0	<b>R3 X [mm]</b>	26,63
<b>S4 [mm]</b>	24,49	<b>R3 Z [mm]</b>	13



3. ábra A hálózási blokkstruktúra

A háló átlagos cellamérete 0,92 és 1,02 mm között került beállításra, ez viszonylag egyenletes eloszlást eredményezett. Az így létrejött elemszám 117.876 db cella kellően finom hálózást biztosít a vizsgált térben. Körkörösén az égéstér 45°-os szelete lett vizsgálva, amely 17 egyenlő cikkre került felosztásra a számításhoz.

A vizsgálat egy munkapontban, 1500 1/min-es motorfordulatszám mellett történik, a vizsgált tartomány 560 – 850 ft°, ahol 720 ft°-ot tekintjük a befecskendezési felső holtpontnak.

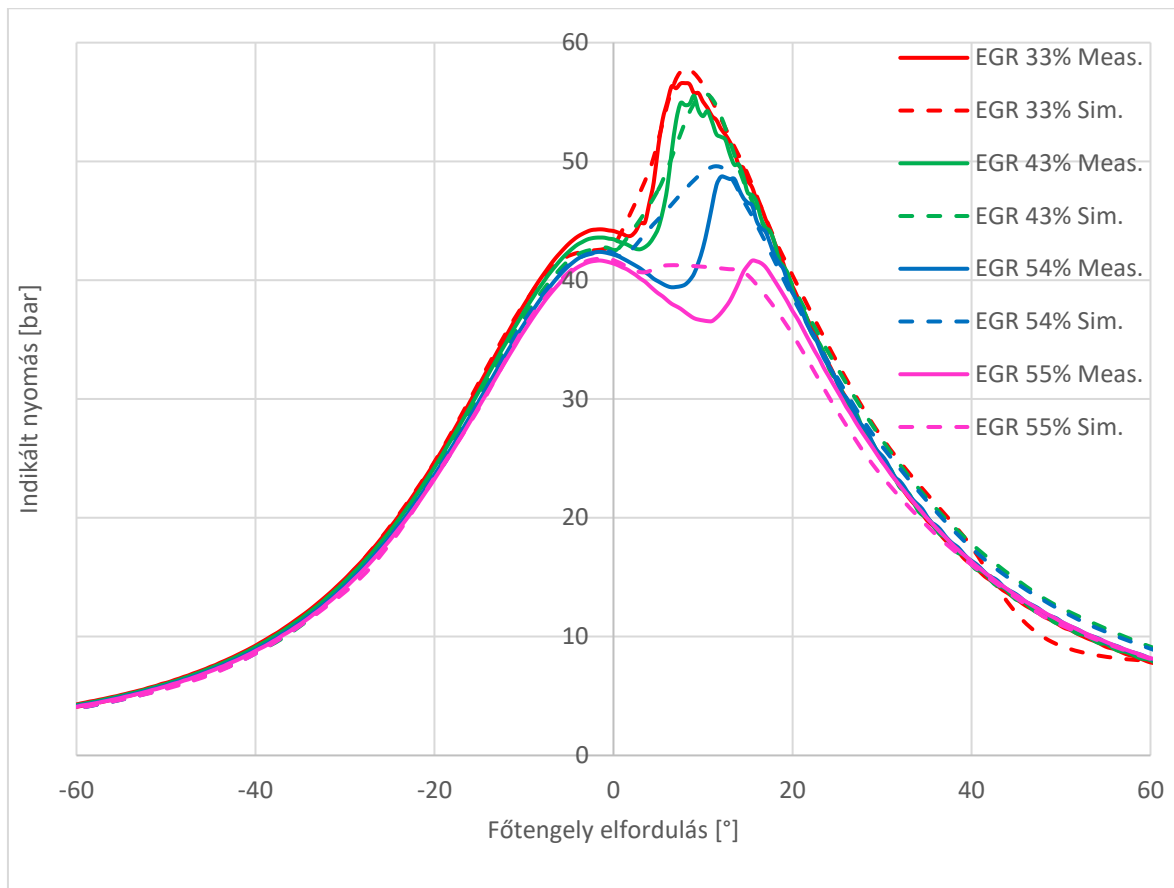
A felületi hőmérsékletek a henger felső pereme, a hengerfej és a dugattyú esetében a terhelés és a motorfordulatszám függvényében változnak, mérésük nehezen kivitelezhető üzem közben. A vizsgált mérés során erre a mérőrendszer kialakításából adódóan nem is volt lehetőség így az 5. táblázatban szereplő tapasztalati értékek kerültek beállításra [10].

<b>Határfelület</b>	<b>Falhőmérséklet, [K]</b>
Henger felső pereme	470,15
Hengerfej	570,15
Dugattyú	570,15

## 4. SZIMULÁCIÓ VERIFIKÁCIÓ

A 4. ábrán a szimulált görbéket szaggatott, míg a mért nyomáslefutást folytonos vonal ábrázolja. Itt látható, hogy a visszavezetett kipufogógáz mennyiségének növelésével az égés során kialakuló nyomásértékek csökkennek, a nyomásmaximumok pedig hátrébb tolódnak. Ennek oka, hogy a kipufogógázzal megnövelt mennyiségű töltet felmelegítésére nagyobb égéshő-hányad fordítódik. Az égés sebessége csökken a kisebb O<sub>2</sub> koncentráció miatt, aminek következtében a nyomás és hőmérséklet is alacsonyabb lesz. Ez kedvező a NO<sub>x</sub> képződés csökkentése szempontjából, megfelel az előzetes várakozásoknak.



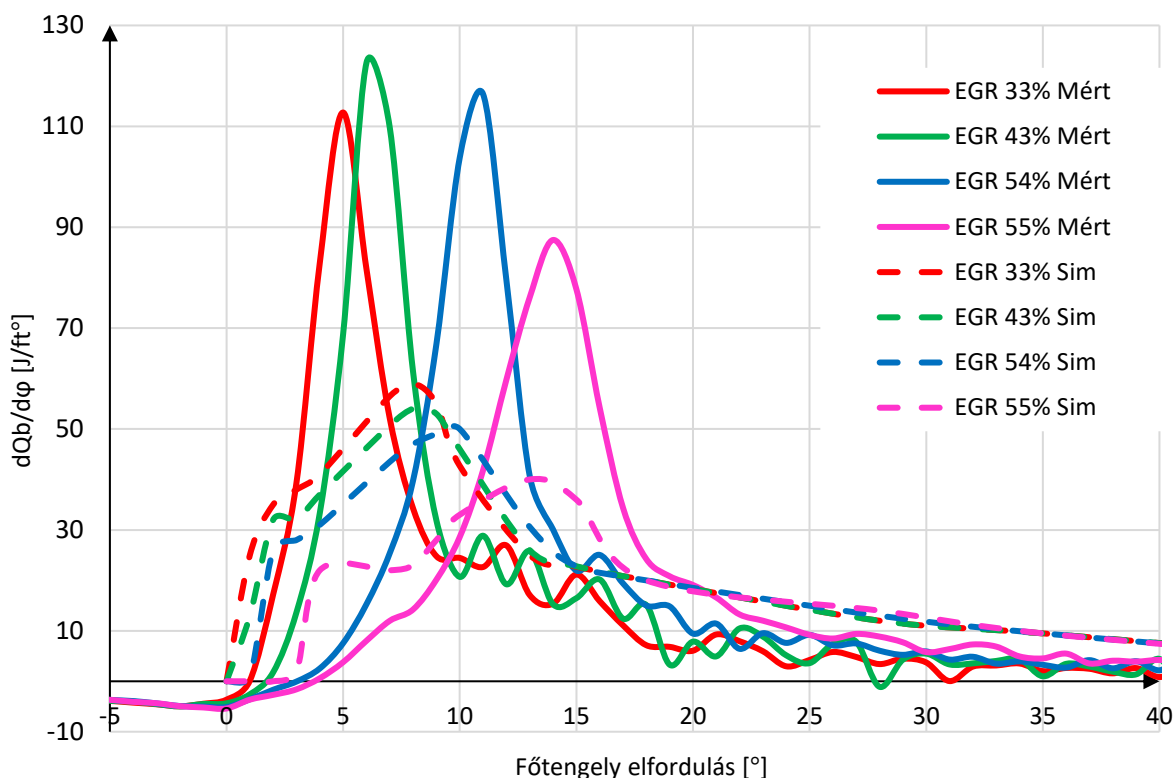


4. ábra Mért és szimulált nyomáslefutások különböző EGR értékeknél

A diagramról az is leolvasható, hogy a szimulációk jól követik a mért nyomásgörbéket. Legnagyobb eltérés a gyulladási késedelemben látható. A mért értékek esetében ez jelentősen nő az EGR arány növekedésével, a szimulációk ezt csak a hőfelszabadulás lassulásával modellezik. 33%-os és 43%-os EGR ráták esetében illeszkedik legjobban a szimuláció a mérésekkel, a kipufogógáz visszavezetés növekedésével a hiba is nő. Emellett kijelenthető, hogy a modellek alapvetően jól jelzik a várható nyomásértékeket, a gázkompozíció miatt megváltozó kompressziós görbét is pontosan követik. A gyulladás és égés folyamatait azonban nem írja le kellő pontossággal.

Ez látható az 5. ábrán is, ahol a mért és szimulált égésfüggvények szerepelnek a különböző kipufogógáz visszavezetésekkel. Amit rögtön látni lehet az ábrán az az, hogy a mért görbék esetében az előkevert égés nem különül el a fő égésfolyamattól. A nagy EGR arány miatt a gyulladási folyamat elhúzódik, így az égés kezdetére már nagy mennyiségű előkevert gázolaj-levegő áll rendelkezésre, amely igen nagy sebességgel ég el. Látható az is, hogy az EGR arány növelésével a gyulladási késedelem  $4^\circ$ -kal nő, míg az égésfolyamat felfutása is jelentősen lelassul. 54%-os EGR rátánál a legnagyobb hőfelszabadulás már több, mint  $10^\circ$ -kal hátrébb kerül, ami a hatásfok jelentős csökkenését vetíti előre a  $\text{NO}_x$  csökkenés mellett.

A szimulált görbéknél nem jelentkezik ekkora mértékű gyulladási késedelem, a számítások szerint csak a hőfelszabadulás lassul le jelentősen. A mért értékekkel ellentétben megmarad az előkevert lángfront, majd a mért görbéknél jelentősen lassabb hőfelszabadulás tapasztalható, magasabb utóégési fázissal. Ez előrevetíti a  $\text{NO}_x$  értékek alacsonyabb szintjét is.



5. ábra Mért nyomáslefutások különböző EGR értékeknél

A 6. táblázatból látható, hogy a kipufogógázban mérhető  $\text{NO}_x$  koncentráció a mérés során rögzített adatok alapján is csökkenő jelleget mutat, vagyis a kipufogógáz-visszavezetés hatása itt is egyértelműen megmutatkozik. Azonban az értékek jelentősen kisebbek, főként amiatt, hogy az alacsonyabb hőfelszabadulási sebességek miatt alacsonyabb lokális hőmérsékletek jelentkeznek, így kevesebb nitrogén-oxid keletkezik.

Mért és szimulált  $\text{NO}_x$  koncentrációk

6. táblázat

EGR	Mért kipufogóoldali $\text{NO}_x$ koncentráció, [ppm]	Szimulált kipufogóoldali $\text{NO}_x$ koncentráció, [ppm]
33%	175,5	52
43%	86,5	46
54%	21,6	17
55%	20,7	1

A mérés, illetve szimuláció segítségével meghatározott eredmények között eltérés tapasztalható az égésfüggvények és ezen keresztül a  $\text{NO}_x$  értékekben. A verifikációs mérések eredményei alapján elmondható, hogy a szimuláció részben jó eredményeket hozott, így alkalmas volt a valós mérésekből levont következtetések megerősítésére. Azonban szükséges a paramétereinek revíziója és az új paraméterekkel további futtatások végrehajtása a mérési eredményekkel szorosabb korreláció elérése érdekében.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a munka az AVL Fire szimulációs környezetben készült, melyért köszönet illeti az AVL List GmbH-t a szoftver rendelkezésre bocsátásáért.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] AVL FIRE Product Description, AVL FIRE Main program. 2018.
- [2] AVL FIRE, Application Example: Engine Simulation Environment (ESE) Tutorial ESE Diesel (922), Edition 02/2013, 2013.
- [3] Heywood J.B.: Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill Publishing; 1988, ISBN 007028637X.

- [4] Ladommatos N, Abdelhalim SM, Zhao H, Hu, Z.: The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions– Part 4: Effects of Carbon Dioxide and Water Vapour. 1997. SAE Technical Paper Series 971660’.
- [5] Lakatos, I.: Modeling of a Naturally Aspirated Gasoline Engine in the GT-suite Software Environment. IAT 2012 - Innovative Automotive Technology, 2012, pp. 77–94.
- [6] Lakatos, I, Nagyszokolyai, I: Gépjármű-környezetvédelmi technika és diagnosztika I. Győr, Magyarország : Minerva-Sop Bt. (1997) , 132 p. ISBN: 9639056154.
- [7] Nyerges, Á., Zöldy, M.: Kettős kipufogógáz visszavezetés hatásvizsgálata haszongépjármű dízelmotoron, XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019, Nagyvárad, Románia: EMT, (2019) pp. 392-395.
- [8] Vass S., Németh H.: Sensitivity analysis of instantaneous fuel injection rate determination for detailed Diesel combustion models. Periodica Polytechnica-Transportation Engineering 41 : 1, pp. 77-85., 2013.
- [9] Török, Á., Zöldy, M.: Energetic and economical investigation of greenhouse gas emission of Hungarian road transport sector, POLLACK PERIODICA: 5:3 pp. 123-132. , 10 p. (2010) [10.1556/Pollack.5.2010.3.10](https://doi.org/10.1556/Pollack.5.2010.3.10)
- [10] Zöldy, M.: Potential future renewable fuel challenges for internal combustion engine. Járűvek és Mobil Gépek, vol. II.évf., no. No.IV., pp. 397–403, 2009.

# Fogyasztásmérések fejlesztése tesztpályás mérésekhez

## Development vehicle test procedure for proving ground measurements

ZSOMBÓK Imre

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék  
Magyarország, 1111 Budapest, Stoczek utca 6.

[www.gjt.bme.hu](http://www.gjt.bme.hu)

[imre.zsombok@auto.bme.hu](mailto:imre.zsombok@auto.bme.hu)

### Abstract

*In recent years, autonomous vehicles which can be driven without human action have become widespread and demand in the market of autonomous vehicles is getting higher. This demand attracts the attention of automotive manufacturers and increases their investments in this field. Although the primary purpose of autonomous vehicles is to reduce human-caused accidents and to maximize safety in traffic, energy consumption is also an important topic of discussion in this context. Changes in the demands of costumers and governments are being caused to the production of more powerful batteries, more environmentally friendly fuels and the production of autonomous vehicles. These changes in the demands of consumers also lead to big changes in the planning of the manufacturing companies. When fuel/energy consumption is considered, hybrid vehicles could be taken into as an alternative solution of reducing fuel consumption and carbon emission. The aim of this study is investigating rural road effect on fuel consumption.*

**Keywords:** consumption reduction, efficiency, autonomous transport

### Kivonat

*A járművek hajtáslánca egyre összetettebb az elmúlt évek fejlesztéseinek hatására. Az utóbbi években a bizonyos szintig autonóm járművek, amelyek emberi fellépés nélkül vezethetők, elterjedtek, és azok piacán is egyre növekszik a kereslet. Ez a kereslet felkeltette a gépjárműgyártók figyelmét és folyamatosan növeli beruházásaikat ezen a területen. Noha az autonóm járművek elsődleges célja az ember okozta balesetek csökkentése és a közlekedés biztonságának maximalizálása, az energia felhasználása szintén fontos beszédtema. A vásárlók és a kormányok igényeinek változása a nagyobb kapacitású akkumulátorok, a környezetbarátabb üzemanyagok és az autonóm járművek, azaz a fejlődő technológia az oka. A fogyasztói igények változása a gyártó vállalatok jövőtervezésében is nagy változásokhoz vezet. Az üzemanyag / energiafogyasztás figyelembevételkor a hibrid járműveket, mint egy kedvező alternatív megoldásként lehet figyelembe venni az üzemanyag-fogyasztás és a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése érdekében. A tanulmány célja a vidéki utak üzemanyag-fogyasztásra gyakorolt hatásainak vizsgálata.*

**Kulcsszavak:** fogyasztáscsökkentés, hatékonyság, autonóm közlekedés

## 1. BEVEZETÉS

Manapság az energiahatékonysági és energiatakarékosági kérdések népszerűvé váltak az olajkészletek csökkenése és a környezetvédelmi szempontok előretörése miatt [1]. A közúti közlekedés mellett mind a tengeri közlekedés energia ellátása és környezetszennyezése, mind a légi közlekedés energetikai és kibocsátási kérdései is egyre nagyobb hangsúlyt kapnak [2]. A kibocsátási előírások, a jogi követelményeknek való megfelelés [3] a hatékonyabb járművek gyártásának szükségessége, mint a globális verseny szükségessége, arra készteti a járműgyártókat, hogy új megoldásokat hozzanak létre a hagyományos rendszerekben és az alternatív technológiákban. Az önvezető járművek terjedésekor kellő figyelmet kell fordítani azok energia menedzsmentjére, az üzemanyag fogyasztásra és az energiahordozó pótlásának megfelelő megtervezésére. Kutatásunk arra irányul, hogy miként lehet mérni és modellezni az egyes járműfogyasztásra ható tényezőket, hogy majd azokat a jármű energiamedzsmentjének döntéseibe integrálhassuk.

## 2. HAJTÁSLÁNC HATÁSA A FOGYASZTÁSRA

Az elektromos és hibrid járművek alkalmazása a közúti közlekedésben az energiaforrások felhasználásának hatékonyabb szükségességéből adódott, amelyet elősegített a környezettudatosság erősödése, a városi légszennyezés csökkentésének igénye [4] és az üvegházhatást okozó gázok globális kialakulásának megakadályozása [5] valamint a fosszilis tüzelőanyagok kimerülésének közeledő időpontja [6].

A hibrid járművek szerepe jelentősebbé vált, mivel energiahatékonyabb járművek szerepe fontosabbá vált mint a hagyományos meghajtással rendelkező járművéké. A járművön különféle módon gazdaságosan tárolt elektromos energiának köszönhetően az elektromos hajtásrendszer a kipufogógáz-kibocsátás és az üzemanyag-fogyasztás költség/km szempontjából kiemelkedő előnyökkel bír a hagyományos járművekhez képest [7]. Az elektromos motorok hatásfoka magasabb, mint a belső égésű motorokban, mivel az elektromos motorokban az elektromos energia közvetlenül hasznos munkává alakítható. A hibrid járművek hajtáslánca egyszerre rendelkezik elektromos és a belsőégésű motor előnyeivel. A hibrideknél általában csak az elektromos motor indul és mozdítja meg a járművet így a legnagyobb fogyasztású üzemi fázist kiváltja [8].

A plug-in hibrid járművek (PHEV) a hagyományos hibrid járművek külső áramforrásból újratölthető verziói. A PHEV-k általában nagyobb akkumulátorkapacitással bírnak, ami hosszabb, egy töltéssel megtehető utakra biztosít lehetőséget. Az elektromos motort akkor kell használni jellemzően, ha a jármű intenzíven gyorsul. A PHEV esetében az akkumulátor kapacitása, az elektromos motor mérete a jármű tervezési paraméterei, amelyek befolyásolják a fosszilis üzemanyag és az áramfogyasztást. A vezetési stílus az üzemanyag-fogyasztás további jelentős befolyásoló tényezője, amely lehet az utazás hossza vagy az utazás során eltelt idő. E két tényező mellett a töltési tulajdonságok harmadik tényezőként is besorolható. A töltési teljesítmény, időtartam és elhelyezkedés befolyásolhatja a PHEV-k üzemanyagmix-fogyasztását.

A tölthető hibrid járművek tüzelőanyag-fogyasztásra gyakorolt hatásának megállapítása érdekében egy tanulmányt [9] készítettek. A vizsgálat kulcsfontosságú lépése az adatgyűjtés. A 7860 jármű vett részt a tesztben, kezdve a hagyományos járművektől, az elektromos járműveken át egészen a hibrid elektromos járművekig. Minden nap beszámoltak az utazási információkról, például az utazás hosszáról, a helyről és az időről. A 7860 járművek mindegyike Matlab szimulációval volt modellezve, a járművek paramétereit PHEV-ekkel lehetett helyettesíteni. A tanulmány eredménye alapvetően azt mutatta, hogy a hagyományos és a hibrid elektromos járművek fogyasztása között körülbelül 45% -os különbség mutatkozik.

A PHEV töltése sok országban továbbra is problémát jelent a töltőállomások hiánya miatt. A töltés időtartama nagyon sok időt vesz igénybe, és nem könnyű megtalálni az ingyenes töltőállomásokat sem. A tanulmány [9] eredményei azt mutatják, hogy a járművek átlagos otthoni tartózkodási ideje 10 óra, míg átlagosan 6 óra a munkahely környékén. Ha az akkumulátor mérete megnő, a töltési idő szükséglet is nő, de egyidejűleg az üzemanyag-fogyasztás csökken. A tanulmány egy másik eredménye bebizonyította, hogy ha figyelembe vesszük az átlagos akkumulátor méretet (8kWh), az otthoni és munkahelyi töltés 14% -val csökkenti a benzinfogyasztást. Ha a töltési helyet tetszőleges helyre tesszük, azaz, a járművet otthonról és munkahelyről, vagy nyilvános helyeken, például étterem, iskola, szupermarket parkolóhelyén is lehet tölteni, az üzemanyag-csökkentés akár 25% -kal nő.

Az akkumulátor kapacitása nem befolyásolja az üzemanyag-fogyasztást, ha a járművet csak otthon töltik. Amint az a 3. ábrából látható, az otthoni töltés csak kevesebb, mint 5% -kal csökken, ha az akkumulátor mérete 1,44 kW-ról 7,2 kW-ra növekszik. A hosszú, otthoni, körülbelül 10 órás tartózkodási idő miatt az üzemanyag felhasználás hatékonysága kissé változik. Ha a töltési helyet az otthonival és munkahelyivel kombinálják, az üzemanyag-fogyasztás csökkentése nagyobb mértékű, mint a kizárólag az otthoni töltésnél. Azt is kimutatták, hogy a töltési teljesítmény növelése közvetlenül arányos az üzemanyag-fogyasztás csökkentésével.

Egy másik valódi teszt-alapú kutatáson alapuló cikk [10], mely a hibrid és benzin járművek közötti városi belüli üzemanyag fogyasztás különbséget vizsgálta. A Toyota Yaris Hybrid, Prius Hybrid és Yaris 1.5 benzinjárműveket öt különböző városi úton használták. Az egyes járművek fizikai specifikációi hasonlóak egymáshoz, mint például a tömeg, a motorok kompressziós aránya, kibocsátási besorolás, gumibroncsok stb. A tesztet különböző forgalmi helyzetekben végezték el.

Nyilvánvaló, hogy a hibrid járművek esetében nagymértékű üzemanyag-megtakarítást mértek alacsony sebességnél (10 km / h – 20 km / h). Másrészt, az a hagyományos benzinmotor, amely az Atkinson ciklus elvén működik, körülbelül 13 l / 100 km-t fogyaszt alacsonyabb sebesség. A Yaris és a Prius, a két hibrid jármű esetében kimutatható volt, hogy a jobb fékerő-visszanyerő rendszer alacsonyabb sebességnél akár 2L / 100 km-re képes csökkenteni az üzemanyag-fogyasztást.

A hibrid hajtóművek további előnye a városi területeken az, hogy alacsonyabb sebességnél, ZEV (Zero Emission Vehicle) üzemmódban tudnak menni, ami szintén csökkenti az atmoszférában az üvegházhatást

okozó gázok kibocsátását. Amikor a vezető fékez, a jármű villamos motorja generátor üzemmódra vált. Ezután a kerekek a fékezés következtében a kinetikus energiát a generátorba továbbítják. Ezen művelet során a generátor a kinetikus energia egy részét elektromos energiává alakítja és az akkumulátorban tárolja.

A teszt eredményeként a hibrid járművek jelentősen csökkenthetik az üzemanyag-fogyasztást a városokban, különösen az alacsony sebességű forgalomban. Különösen az alacsonyabb és közepes sebességnél akár 50% -ot lehet megtakarítani. Nagyobb sebességnél (több mint 90 km / h) mind a Yaris 1,5 L benzin, mind a hibrid Yaris üzemanyag-fogyasztása azonos. Sőt, ha összehasonlítjuk a két hibrid járművet, a Prius Hybrid és a Yaris Hybrid járműveket, akkor a Prius összességében 17%-kal kevesebb üzemanyagot fogyaszt, mivel a Prius jobb fékerő-visszanyerő funkcióval rendelkezik.

### 3. FOGYASZTÁSI PARAMÉTEREK

Számos tényező befolyásolja az autók üzemanyag-fogyasztását. Ezek a tényezők magukban foglalják a különféle belső vagy külső paramétereket, mint például az éghajlati viszonyok, útviszonyok [13] és a légkondicionálás, a jármű gyártásának éve, a gumiabroncsok állapota, sebességváltó típusa, a jármű tömege stb. Az autó alkatrészei, például a motorblokk, a légszűrők, a gyújtógyertya idővel elhasználódhat, és ez a degradáció az autó üzemanyag-fogyasztásának növekedéséhez vezethet [11]. Ezek hatása a fogyasztásra fontos az autonóm járművekre váró kihívásoknál [14], különösen az útvonaltervezésénél [15] és tesztelésénél [16].

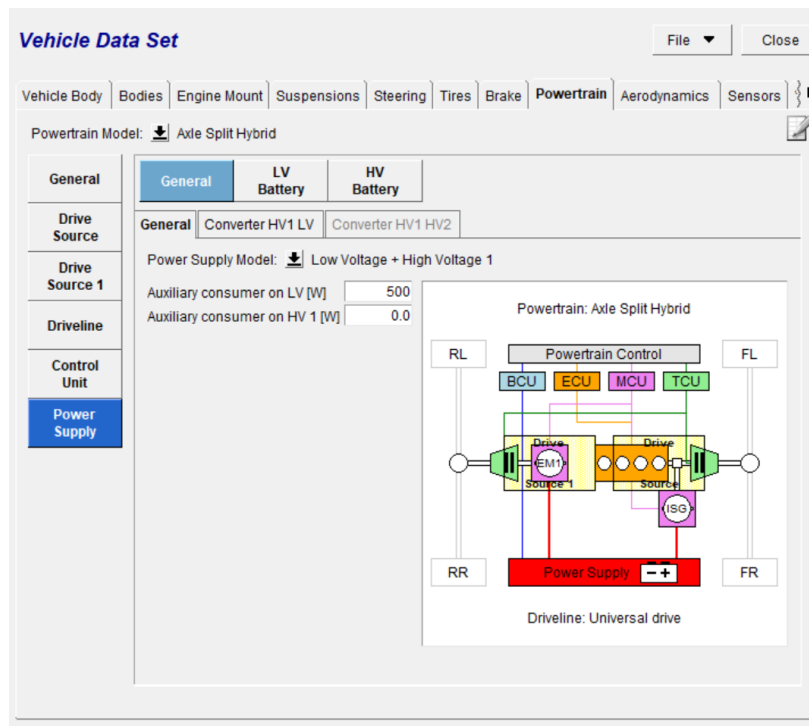
A klimatikus viszonyok közvetlenül és közvetetten befolyásolják az üzemanyag-fogyasztást. Hideg és meleg időben a légkondicionálást a sofőr használja. A légkondicionáló természetesen befolyásolja az üzemanyag-fogyasztást, ez a hatás a jármű sebességének, a külső hőmérsékletnek, a jármű típusának és a motor teljesítményének függvényében változik. Például nyáron, meleg időben, állandó sebességgel hajtott járművel, és amikor a légkondicionáló bekapcsol, a motor terhelése növekszik. Nagyobb sebességű körutazás esetén azonban a légkondicionáló bekapcsolása kisebb fogyasztásnövekedést eredményezhet, mintha az ablakokat húznák le [12]. Lehúzott ablakoknál az aerodinamikai egyensúly megváltozik, és a jármű több üzemanyagot fogyaszt. De ha alacsony sebességgel halad az autó, akkor olcsóbb lesz ablakokat kinyitni a légkondicionálók használata helyett, különösen a forgalmas városi forgalomban, ahol gyakori megállás.

A jármű légkondicionáló rendszerének olyan alkatrészei vannak, mint a kompresszor, kondenzátor, fűvő, párologtató és még sok más. A légkondicionáló működési elve a légkondicionáló hűtőközeg sűrítésével kezdődik, és amikor összenyomódik, az azt jelenti, hogy a rendszerben magas hőmérsékletű gáz van. Ezután a sűrített és nyomás alatt álló levegőt a kondenzátorba továbbítják a gáz hűtésére. A folyékony hűtőközeg is áthalad a párologtatón, és térfogata nagyobb lesz, és ismét gázfázisúvá válik. Az utolsó lépés a lehűtött gáz fűjása a jármű belsejébe. Ez a folyamat növeli az üzemanyag-fogyasztást. Mivel a kompresszor a forgattyútengelyről veszi energiáját, ami azt jelenti, hogy a motorteljesítményt használja a jármű hűtéséhez.

Ebben a szimulációban a különböző légkondicionáló szakaszokat/szinteket megkíséreljük megvizsgálni, hogy a fogyasztó milyen hatást gyakorol az üzemanyag-fogyasztásra. A fogyasztói adatokat 3000W-ra állították, amelyet maximálisnak feltételeznek, és az üzemanyag-fogyasztás elemzését megfigyelték (1. ábra).

A jármű energetikai adatiból egyértelműen meghatározható, hogy milyen fogyasztók üzemelnek a fedélzeten. Külön követhető az alacsony feszültségű és a nagyfeszültségű akkumulátor állapota, amelynek paraméterei beállíthatók vagy megváltoztathatók a szimulációban.

Az 1. táblázatban összegeztük korábbi munkánkban a fogyasztásra ható legfontosabb tényezőket. Ezek közül, a nagy hatásúakra fókuszálva, választottunk egyet, amely a teszteljárás fejlesztésének az alapját jelenti. A megvalósíthatóság és visszamérhetőség alapján a választásunk a vezetői stílusra esett, amelyet a váltó fokozat megválasztásával reprezentálunk.



1. ábra Fogyasztói adatok az IPG CarMaker alkalmazásban

Az autó fogyasztására ható külső tényezők csoportosításának mintája [11]

1. táblázat

	alacsony		közepes		magas	
környezeti hatások	vizes útburkolat	0,7%	nedves útburkolat	1,7%	szél	6,6%
jármű állapottól függő hatások	első vagy hátsókerék meghajtás	0,6%	újrafutóztott kerék	1,8%	négykerék meghajtás	3,3%
	guminyomás alacsony	0,2%			kerék összetartás	5,9%
vezetőtől függő hatások			fékezések gyakorisága	1,4%	egyenletes vezetési stílus	5,0%
			gyorshajtás	2,6%	klíma	3,0%
útvonal és autótűt hatásai	anyag	0,5%	felület	1,2%	könnyű vagy nehéz útvona	6,6%
					városi környezet	33,0%

## 4. MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK

### 4.1 Tesztjármű

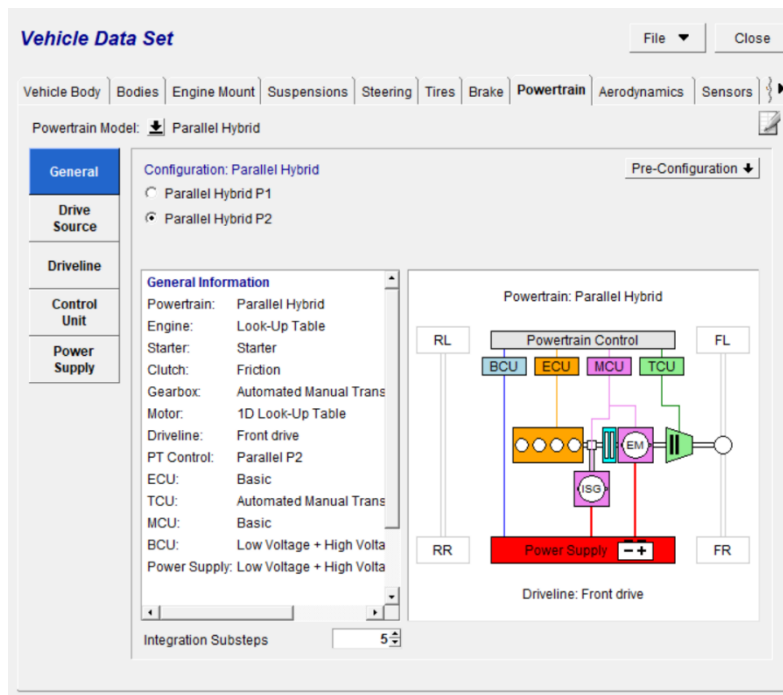
A Honda CR-Z 1.5 Hybrid 1497 CC-es benzinmotorjával és elektromos motorjával rendszerszinten éri el a 124 lóerőt és 174 Nm nyomatékot. Ezt az energiát 6 sebességes kézi sebességváltóval továbbítják az első kerekekhez. A jármű bruttó súlya 1155 kg, össztömege körülbelül 1520 kg. A jármű 6 sebességes kézi sebességváltóval rendelkezik. Az üzemanyag-fogyasztást az Euro 5 szabványok határozzák meg. A gyári értékek alapján a jármű városi tüzelőanyag-fogyasztása 6,1 l / 100 km, átlagosan 5 l / 100 km.

A 2. táblázat adatai alapján a Honda CRZ külső karosszériáját az IPG CarMaker modellezi. A jármű részletes paraméterei integrálhatók a járműmodellekbe. Az általános hajtáslánc-paraméter-beállításokat a 2. ábra mutatja. Ez a modell magában foglalja a Párhuzamos Hibrid P2 rendszert, amelyet automatikus kézi sebességváltó hajt, elülső hajtóművel.

Tesztjármű adatai

2. táblázat

Honda CR-Z Hybrid	Mérték
Saját tömeg	1377 kg
csomagter	262 l
Teljesítmény	124 hp, 84 kW
Üzemanyag tartály	40 l
hossz	4080 mm
szélesség	1740 mm
magasság	1395 mm



2. ábra A Honda párhuzamos hibrid hajtómű általános áttekintése

## 4.2 Tesztleírás

A méréseket a ZalaZONE tesztpálya nagy sebességű kezelhetőségi tesztpályáján végeztük egy Honda CRZ típusú tesztautóval. Az adatokat a jármű CAN-bus segítségével rögzítettük. A mérések során az egyes mérőszorozatokhoz tartozó mérésszámot a következők alapján állapítottuk meg. Ismeretlen eloszlású alapsokaság esetén a Csebisev egyenletek alapján a mintanagyság a következőképpen számítható:

$$P\left(\bar{x} - k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \geq 1 - \alpha. \quad (1)$$

Egyszerű véletlen kiválasztás esetén a (1) formula a következőkre egyszerűsödik:

$$P(\bar{x} - \Delta < M(x) < \bar{x} + \Delta) = 1 - \alpha. \quad (2)$$

A (2) egyenletet átrendezve kapjuk a kívánt pontosság eléréséhez szükséges mintaszámot:

$$n = \frac{t^2 \cdot s_k^2}{\Delta^2}, \quad (3)$$

ahol:

- $n$  – a szükséges mintanagyság
- $t$  – valószínűségi paraméter
- $s_k$  – korrigált empirikus szórás
- $\Delta$  – pontossági tartomány

A (3) képlet alapján az elvégzett mérések száma vizsgálható a megfelelő szórás tartomány szempontjából. Ennek értékeléséhez a szakirodalom alapján állapítottam meg, hogy mekkora szórás tartományok elfogadhatóak az egyes vizsgált paramétereknél az egyes mérési pontokban egy hajtóanyaggal. Az eredményeket mutatja be a 3. táblázat.

*Elvégzendő és elvégzett mérések száma mérési pontonként*

3. táblázat

		Stap.	Sszám.	t	d	n [db]
fogyasztás	l/100 km	0,05	0,002	1,96	0,05	3

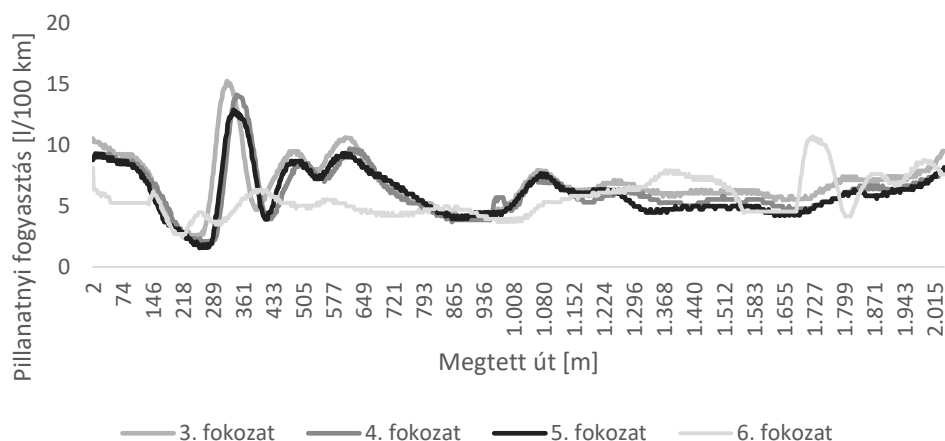
A 3. táblázatban a (3) képlet alapján látszik, hogy az „Sszám” az elvégzett mérésszámból számított szórásérték minden esetben kisebb a szakirodalomban feltüntetett szórásértékeknél, „Stap”-nál, ami a mérés statisztikai robusztusságát jellemzi. Ez alapján a mérések eredményét statisztikailag elfogadhatónak találtuk.



## 5. EREDMÉNYEK

A munkánk során két változó vizsgálatára készítettünk szimulációt és végeztünk el tesztek. Első esetben a váltó fokozat hatását mértük ki a fogyasztásra. Ehhez tempomattal beállított sebességgel haladtunk a teszpályán a Nagysebességű Kezelhetőségi pályán. Minden állapotban 3-3 kört tettünk meg. A bemelegítés után a járművel 70 km/h sebességgel 3. sebességi fokozatban kezdtük el a méréseket, majd ezt követte a 4., az 5. és a 6. sebességfokozat. A teszt célja annak bemutatása volt, hogy a vezetői stílus, esetünkben a helyes fokozatmegválasztás az üzemanyag fogyasztásra ható eszköz, amellyel a jármű újratöltésének modellezésénél számolnunk kell, illetve önvezető autók esetében hatékony beavatkozó eszköz.

A 3. ábra mutatja be azonos útvonalon, azonos sebességi fokozatban, de eltérő váltófokozatban mért körök eredményeit. Az egyes mérési sebességekhez tartozó átlagos profilok hasonló lefutást mutatnak. Az eredmények szórása. A 2. táblázat mutatja meg a sebességi fokozatokhoz és körökhöz tartozó átlagos fogyasztási értéket. Összességében megállapítható, hogy a helyes sebességi fokozat, azaz vezetői stílus akár 20%-val is képes befolyásolni a fogyasztást.



3. ábra Fogyasztás profil alakulása váltófokozat függvényében

Váltófokozat hatása a fogyasztásra állandó járműsebességnél

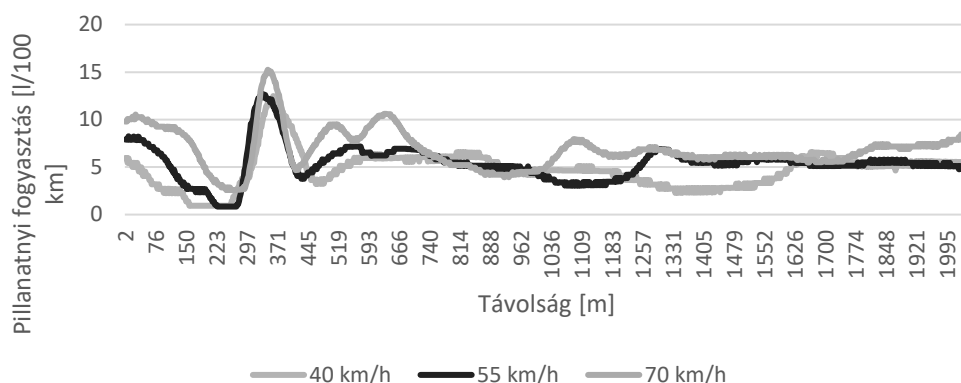
3. táblázat

fokozat	átlag fogyasztás [l/100km]	csökkenés [%]
3.	6,33	0
4.	5,54	12,6%
5.	5,24	17,2%
6.	5,13	19,0%

A 4. ábra az ugyanabban a sebességi fokozatban, de eltérő sebesség melletti fogyasztást mutatja be. Ez a teszt ugyancsak a járművezetői stílus, az optimális sebesség kiválasztásának hatását mutatja meg a fogyasztásra. A pálya jellegzetességéből adódó fogyasztási görbe mindkét ábrán nyomon követhető. A fogyasztásingadozás oka elsősorban a pálya magasságkülönbségeiben másodsorban kanyargós vonalvezetésében keresendő.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az járművek fogyasztása több paraméter által befolyásolt. Ezek közül az egyik, amelyre szinte folyamatosan hatással lehet a jármű vezetője, legyen ez önvezető vagy sofőr által vezetett, a megfelelő sebességfokozat és váltófokozat kiválasztása. Kutatásunk célja annak a megállapítása volt, hogy ezek a szempontok mekkora hatással vannak a jármű fogyasztására, s így áttételesen a fogyasztás előre becslése és az újratöltés kialakítására.



4. ábra Fogyasztás azonos fokozatban, eltérő sebességben

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők megköszönik Osman Yolbulhan és Tóth Bálint elévülhetetlen közreműködését a mérések és a szimuláció lebonyolításában.

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást a Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Mesterséges Intelligencia (BME FIKP-MI/FM) tématerületi programja keretében.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Palevičius V, Podvieszko A, Sivilevičius H, Prentkovskis O. (2018). Decision-Aiding Evaluation of Public Infrastructure for Electric Vehicles in Cities and Resorts of Lithuania. Sustainability. vol 10. pp 904. <https://doi.org/10.3390/su10040904>
- [2] Čokorilo, O. (2008). Risk management implementation in aircraft accident cost analysis. In The 12th Annual World Conference, Air Transport Research Society (ATRS) World Conference, July 6–10, 2008, Athens, Greece.
- [3] Zöldy M. (2018) Investigation of autonomus vehicles fit into traditional type approval process, Proceedings of ICCTE 2018 Beograd, pp 517-521. ISBN 978-86-916153-3-8
- [4] Török Ár., Török Ád.: Macroeconomic analysis of road vehicles related environmental pollution in Hungary, Published Online: 2014-06-27 DOI: <https://doi.org/10.2478/s13531-013-0147-0> (2014)
- [5] Szabó M, Szalmáné Csete M, Pálvölgyi T. (2018) Resilient Regions From Sustainable Development Perspective, European Journal Of Sustainable Development 7: 1 pp. 395-411., 17 p.
- [6] Lakatos, I (2013) Diagnostic measurement for the effective performance of motor vehicles, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 10: 3 pp. 239-249., 11 p.
- [7] Skrucany T, Figlus T, Čupera J, Abramović B, Csiszar Cs. (2019). Influence of Vehicle Aerodynamical Devices on Fuel Consumption Evaluated Using Telematics Tools. 8th International Scientific Conference, CMDTUR 2018. 04-05 October 2018. At: Žilina, Slovakia
- [8] Antonya C., Butnariu S., Beles H.: Parameter Estimation from Motion Tracking Data. In: Duffy V. (eds) Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management: Ergonomics and Health. DHM 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9185. Springer, Cham [https://doi.org/10.1007/978-3-319-21070-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-21070-4_12) (2015)
- [9] Zhang L., Brown T., Samuelsen G S (2011) Fuel reduction and electricity consumption impact of different charging scenarios for plug-in hybrid electric vehicles. California: Elsevier, 2011, Vol. 15
- [10] Orecchini, F and Santiangeli, A and Zuccari, F and Ortenzi, F and Genovese, A and Spazzafumo, G and Nardone, L. Rome: Energy consumption of a last generation full hybrid vehicle compared with a conventional vehicle in real drive conditions.: Elsevier, 2018, Vol. 148.
- [11] Zöldy M., Zsombók I (2018) Modelling fuel consumption and refuelling of autonomous vehicles Horizons of Railway Transport 2018 37, MATEC Web of Conferences 235, 000 <https://doi.org/10.1051/mateconf/2018235000>
- [12] Široký J, Schroder S, Gašparík J (2017) Comparison of operational and economic aspects of direct road transport and continental combined transport. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina. 19. 109-115
- [13] Geiger A., Holló A., Thernesz A., Durgo R., Czibor S., Bartha L, Gergó P. Chemically Stabilized Rubber Bitumen, Proceedings of EEC, Istanbul, Turkey, Volume: ISBN/EAN 978-90-802884-0-9, 1-8. (2012).
- [14] Barabás I., Todoruț A., Cordoș N., Molea A.: Current challenges in autonomous driving, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 252 doi:10.1088/1757-899X/252/1/012096 (2017)

- [15] Derenda T, Zanne M, Zöldy M, Török Á (2018): Automatization in road transport: a review, *Production Engineering Archives* 20: 20 pp. 3-7., 4 p. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.01>
- [16] Szalay, Z., Tettamanti, T., Esztergár-Kiss, D., Varga, I. and Bartolini, C. Development of a Test Track for Driverless Cars: Vehicle Design, Track Configuration, and Liability Considerations, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(1), pp. 29-35. doi: <https://doi.org/10.3311/PPtr.10753> (2018)