

Járműszimulációs modell fejlesztése alternatív motorbenzin károsanyag-kibocsátásának becsléséhez

Development of a vehicle simulation model for estimating pollutant emissions from alternative gasoline fuels

KÁLLAY Benedek Botond¹, NAGY András Lajos PhD²

¹Járműhajtás Technológia és Teljesítményelektronika Tanszék, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Széchenyi István Egyetem, 9026 Győr, Egyetem tér 1. Tel.: +36-96-503-400; fax: +36/96/329-263 kallay.benedek.botond@sze.hu

²Járműgyártás és Technológia Tanszék, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Széchenyi István Egyetem, 9026 Győr, Egyetem tér 1. Tel.: +36-96-503-400; fax: +36/96/329-263 nagy.andras1@sze.hu

Abstract

The aim of this research is that, in addition to the synthetic gasoline testing conducted at the university, a comprehensive vehicle simulation model is implemented using the AVL Cruise M software. The vehicle simulation model makes it possible to test different types of gasoline in a time- and cost-efficient manner under predefined conditions. During the simulations, emitted pollutant values of NO_x can be estimated. The construction of the model started with the development of the main subsystems and their control, as a result of which the digital twin of the examined engine and vehicle was created. After defining the targeted pollutant component and the test conditions, simulations were run with different types of gasoline, and the results were then compared.

Keywords: vehicle simulation, AVL Cruise M, alternative gasoline fuel, NO_x emission, digital twin

Kivonat

A kutatás célja, hogy az egyetemen folyó szintetikus benzin tesztelése mellé, megvalósuljon egy teljes körű jármű-szimulációs modell AVL Cruise M szoftver felhasználásával. A jármű-szimulációs modell lehetővé teszi, hogy idő- és költséghatékonyan lehessen tesztelni különböző benzinfajtákat, előre meghatározott körülmények között. A szimulációk során NO_x kibocsátott károsanyag értékek becsülhetők. A modell felépítése a fő részegységek és azok vezérlésének kialakításával indult, amelynek eredményeként elkészült a vizsgált motor és jármű digitális mása. A célzott károsanyag-komponens és a tesztkörülmények rögzítését követően különböző benzinfajtákkal szimulációk lettek futtatva, majd ennek eredményei kerültek összehasonlításra.

Kulcsszavak: járműszimuláció, AVL Cruise M, alternatív motorbenzin, NO_x emisszió, digitális iker

1. BEVEZETÉS

Az alternatív energiahordozók keresése napjainkban kiemelten fontos a klímaváltozás, a fosszilis energiahordozók kimerülése és az energiafüggetlenség iránti igény miatt. A szintetikus benzin ígéretes megoldás, mivel előállítása megújuló energiaforrásokból is lehetséges, így csökkentheti a szén-dioxid-kibocsátást. Emellett kompatibilis a meglévő belsőégésű motorokkal, így az infrastruktúra jelentős átalakítása nélkül is alkalmazható. Az egyre szigorodó környezetvédelmi szabályozások és a fenntartható mobilitás iránti igények tovább ösztönzik a fejlesztését. Jelenleg a szintetikus üzemanyagok előállítása költséges és jelentős energiaigénnyel jár, ugyanakkor a technológiai fejlődés és a megújuló energiaforrások szélesebb körű alkalmazása hosszú távon versenyképesé teheti őket, elősegítve a klímacélok elérését és a fenntartható közlekedés megvalósítását. Jövőbeli elterjedésüket és fejlődésüket alapvetően az előállítási technológiák további fejlesztése, a nemzeti és nemzetközi szabályozási környezet alakulása, a gazdasági versenyképesség, az infrastrukturális adottságok, valamint a versengő technológiák térnyerése határozza meg [1][2].

A bioetanol-benzin keverékek (E10-E85) alkalmazása belsőégésű motorokban számos előnnyel és hátránnyal jár. A magasabb párolgáshő miatt jobb a hűtőhatása az etalonnak, illetve magasabb oktánszáma miatt csökkenti a motor kopogásveszélyét és lehetővé teszi a nagyobb kompresszióarányt, az említett két előny

együttesen növelheti a teljesítményt és hatékonyságot. Ezzel szemben az etanol alacsonyabb fűtőértéke miatt több üzemanyagra van szükség ugyanannyi energia előállításához, illetve az etanol vizet vonz, ami korróziót okozhat a motorban [1][3].

A szikragyújtású motorokban a NO_x -képződés döntően a Zeldovich-mechanizmuson keresztül, a lángfront és az égéster csúcshőmérséklete és az ott töltött reakcióidő függvényében zajlik. Etanol alkalmazásakor egyszerre érvényesül több, egymásnak ellentétes hatás, a nagy párolgáshő miatti töltethűtés csökkenti a kezdeti és a csúcshőmérsékletet, ugyanakkor az etanol magasabb lamináris lángsebessége és magasabb oxigén tartalma gyorsabb, intenzívebb égést válthat ki. Hogy a NO_x kibocsátás tendencia nettó irány melyik, azt az üzemi és kalibrációs paraméterek határozzák meg, mint például a keverékképzés homogenitása, a lambda (λ) beállítás, a kipufogógáz-visszavezetés (EGR), a gyújtásidőzítés, a terhelés, illetve a szívólevegő- és falhőmérséklet [4][5][6]. Kis terhelésnél (katalizátor előtt) E0 benzinnél 1500-3500 ppm, etanolos keverékeknél jellemzően 1000-3000 ppm várható, EGR/gyújtás/lambda kalibrációtól függően [4][7][8].

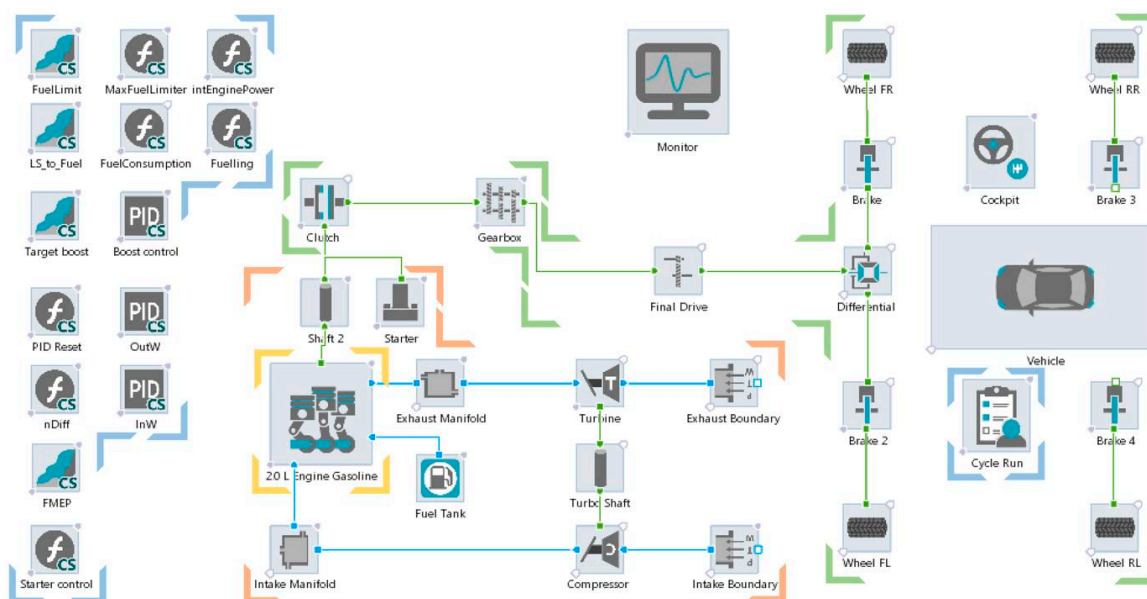
Továbbá az irodalomban NO_x kibocsátás tendencia nehezen meghatározható etanol tartalom növelése mellett. Hiszen ez függ a motor kalibrációtól és az elvégzett különböző tesztek típusától (Fékpád/NEDC/WLTC/RDE). Itt jön szóba jelen tanulmány, mely ehhez a bizonytalan területhez kíván érdemi hozzájárulásként szolgálni az AVL Cruise M környezetben megvalósított NO_x -emisszióbecslő modell fejlesztésével, melyben különböző motorbenzinek összehasonlíthatók, és a motor kalibrációra is lehetőség nyílik. A modellfejlesztés első lépéseként a NO_x -kibocsátás került fókuszba, mivel annak meghatározása a rendelkezésre álló fizikai összefüggések révén megbízhatóbb és jól kalibrálható a többi károsanyag-komponenshez képest.

2. SZIMULÁCIÓS MODELL ÉPÍTÉSE

A szimulációs modell építése az AVL CRUISE™ M környezetben valósult meg, ami egy multidiszciplináris járműrendszer-szimulációs platform, amelyet a hajtáslánc-rendszerek szimulációjára specializáltak. Segítségével fejleszthetők, konfigurálhatók és összehasonlíthatók a különböző hajtáslánc-konceptciók, kiválaszthatók és méretezhetők a komponensek, valamint optimalizálhatók a hajtáslánc-rendszerek olyan területeken, mint a mechanikai hajtáslánc, elektromos hálózatok és hőmenedzsment alrendszerek [9]. A következő részben bemutatásra kerül a jármű-szimulációs modell felépítése.

2.1 Modell felépítésének bemutatása

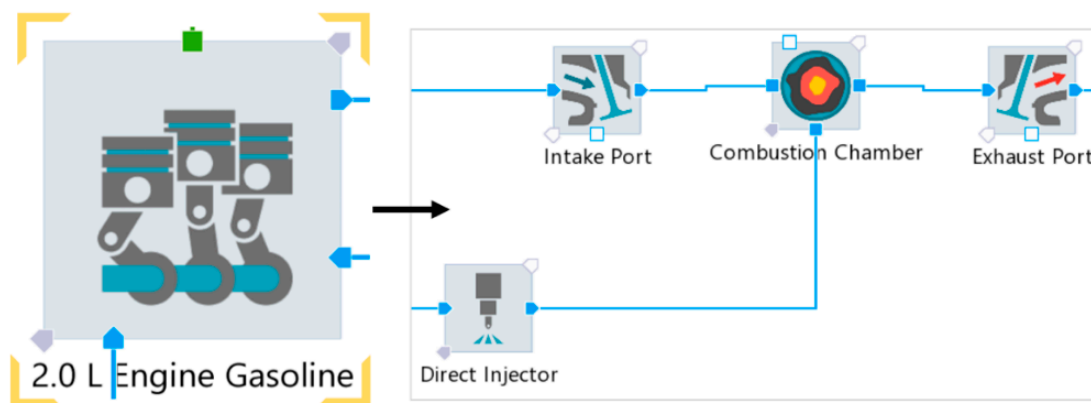
A modell építése négy fő részre osztható: jármű modellre, motor modellre, motorperiféria modellre és a vezérlésre. A jármű modell, a Tanszéken használt Skoda Octaviaáára lett mintázva. Ez a modell ahogyan az 1. ábrán zölddel bekeretezve látható, mechanikai (zöld összeköttetés) és data bus kapcsolatból áll. A tengelykapcsolóba érkezik a motor mechanikai adatátvittele, innen a végső sebességfokozat és a differenciálmű továbbítja a hajtott kerekekbe.



1. ábra. Teljes járműszimulációs modell

A „Vehicle” blokkban beállításra kerültek a valós jármű fizikai adatai. A kimeneti egységekből data bus kapcsolatokkal eljutnak az adatok a kívánt helyekre (pl.: Monitor, Cycle Run és Üzemanyag vezérlési blokkok). A „Cockpit” -ben beállított pedál karakterisztikák szintén data bus kapcsolatokkal befolyásolják a szimulációt.

A motor modell (sárga) egy alrendszerből épül fel, ahol a henger részei találhatóak (2. ábra). A hengerek alrendszerben már a konkrét égéstér, üzemanyag-befecskendezés, lég be- és kiáramlás található. A kék összeköttetések a levegő útját mutatják, egészen a beömlőnyílástól a kipufogó csatornáig. A szívó és kipufogó blokkokban kerültek meghatározásra a csatorna geometriák és a szelep emelési görbék is.



2. ábra: EA888 2.0L Motor modell

Az üzemanyag befecskendezést data bus kapcsolattal az üzemanyag vezérlés irányítja. Szintén az égéstér blokkban számos motor adat lett definiálva. Többek között a henger geometriája. A Skoda Octavia 2 literes turbó benzinmotorral van felszerelve, mely az EA888 motorcsaládhoz tartozik. Ennek megfelelően a motor részletes adatai az EA888 SSP dokumentáció [10] és egyéb belső adatok segítségével került meghatározásra.

A „Direct Injector” blokkban beállításra került a fent említett üzemanyag-befecskendezés mennyiségének korrigálása. Ahogyan az bevezetésben is említésre került, az etanol fűtőértéke alacsonyabb a benzinénél, így az etanoltartalom növelésével emelni kell a befecskendezett mennyiséget is, hogy kompenzálja az elvesztett fűtőértékért, így realisztikus emissziós eredményeket kapva.

Ahogyan az a 1. ábrán pirossal keretezve látható, a motor periféria minden egyéb alkatrész, ami nem szerepel a hengerek környezetében. Tehát a beszívott és kipufogott gáz útja, a turbó, a főtenge, az üzemanyagtartály és az indítómotor.

A gáz áramlását a peremfeltételek megadását követően térfogat-, nyomás- és hőmérsékleti adatok alapján lehet befolyásolni. Az üzemanyagtartályban az adott hajtóanyag hőmérséklete került meghatározásra. A turbóföltőt és az indítómotort, fizikai paramétereinek megadása után, a kontrollereik irányítják. A motor periférián kerültek beállításra az üzemanyag adatai, illetve a károsanyag kibocsátás passzív NO_x részecskéjének mérés pontja.

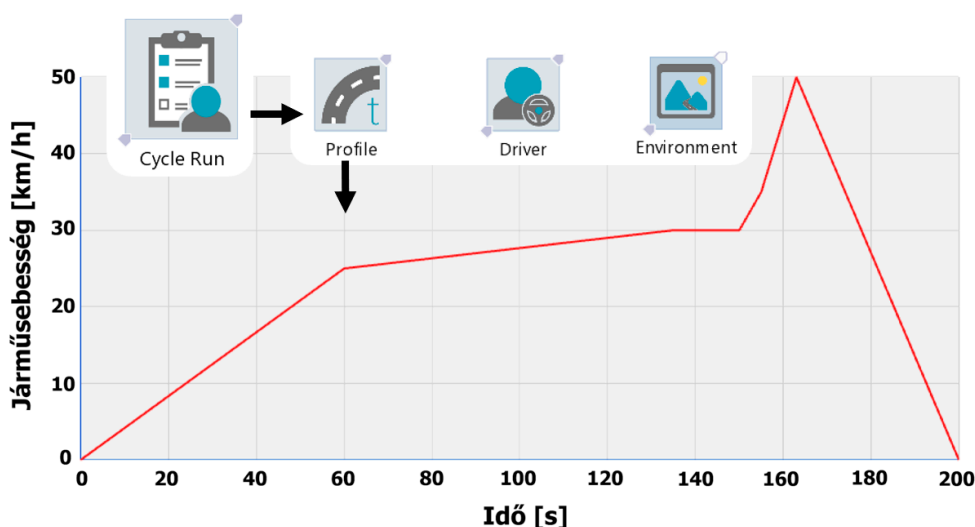
A vezérlés egyszerű függvényekkel, PID kontrollerekkel, illetve nyomás- és üzemanyag térképekkel valósult meg. Az eredmények kimutatására pedig monitor szolgál. A 1. ábrán kék keretezéssel láthatók a vezérlő blokkok.

Az alapjárat fordulatszám blokkok felelnek a megfelelő alapjárat fordulatszám biztosításáért. Eltérések esetén a PID kontrollerek korrigálnak. Az üzemanyag befecskendezést data bus kapcsolattal az üzemanyag vezérlés irányítja. Az üzemanyag vezérlő rendszer látja el a motort az adott pillanatban szükséges üzemanyag mennyiséggel, ezt üzemanyag térképek és függvények segítségével végzi el. Az üzemanyag térképekben szerepel, hogy adott terhelésnél és fordulatszámánál mi a szükséges üzemanyag-mennyiség. Ebben a rendszerben került meghatározásra a valós fogyasztást számoló függvény is. Illetve az üzemanyag adagolást korlátozó függvény is, mely az adagolás maximum értékét korlátozza. A turbó vezérlő blokkok irányítják a turbínát. A turbina pedig mechanikus kapcsolattal van összekötve a kompresszorral, így befolyásolva a szívott levegőt. A turbina túlnyomás-szelepét nyomástérképek segítségével egy PID kontrollert irányítja. Így mindig a kívánt nyomás jelentkezik a turbón. Az adott sebesség igényeket a „Cycle Run” blokk adja le, melyet átalakít „Load Signal”-ra és ez a szignál a vezérlésen keresztül adja le az aktuális terhelést a motorra, mely a kívánt teljesítményt ennek megfelelően adja le a tengelykapcsolónak.

2.2 Mérendő károsanyag és körülményeinek meghatározása

A dolgozat a NO_x kibocsátás becslésére összpontosít. A károsanyag a gázkör bemenő peremfeltételénél lett definiálva, mint passzív részecske. Természetesen értéke itt még nulla. Majd az égéster blokkban az értéke és a termelés sablon modellje került beállításra. Az értéke igaz/hamis, ahol az 1 jelöli a károsanyag képződést, ennek megfelelően az égésterben 1-esre lett állítva a NO_x képződés. A károsanyag-kibocsátás előrejelzése a kipufogócsonknál történik. A NO_x értéke itt 0-ra van állítva, tehát nem képződik károsanyag. A csonkban található NO_x tartalom data bus kapcsolat segítségével a „Monitor” -hoz csatlakozik. Így a kiértékelésnél ezen a monitoron láthatóak a kibocsátási értékek ppm-ben.

A mérési körülmények a „cycle run” alrendszerben lettek létrehozva. Az útprofil a 3. ábrán látható. Ez egy 200 másodperces rövid, egyszerű útvonal leképezés, mellyel alacsony terhelések mellett lehet összehasonlítani a különböző motorbenzinek NO_x emisszióját. A „driver” blokk a pilóta által bevitt impulzusokat számszerűsíti, mint kormány és pedál használat. A futási ciklus harmadik blokkjában (environment) a környezeti tényezők kerültek meghatározásra.



3. ábra: Futási ciklus alrendszer és útprofil

2.3 Benzinfélék módosítása

A modell építésének utolsó lépése a benzinfélék meghatározása. A benzinek tulajdonságai a gázkör bemenő peremfeltételénél kerültek beállításra. A Széchenyi István Egyetem, Járműhajtás Technológiai és Teljesítményelektronika Tanszék szintetikus benzintesztjei bioetanollal adagolt benzinkeverékekkel történnek. Ennek megfelelően a szimulációk négy féle üzemanyaggal lettek futtatva. Így az egyre növekvő etanol tartalommal jól lehet követni a NO_x kibocsátási tendenciát. Az üzemanyagok három főbb tulajdonságát lehet változtatni a szoftverben. Ezek láthatóak a 1. táblázatban.

Üzemanyag adatok [11][12]

1. táblázat

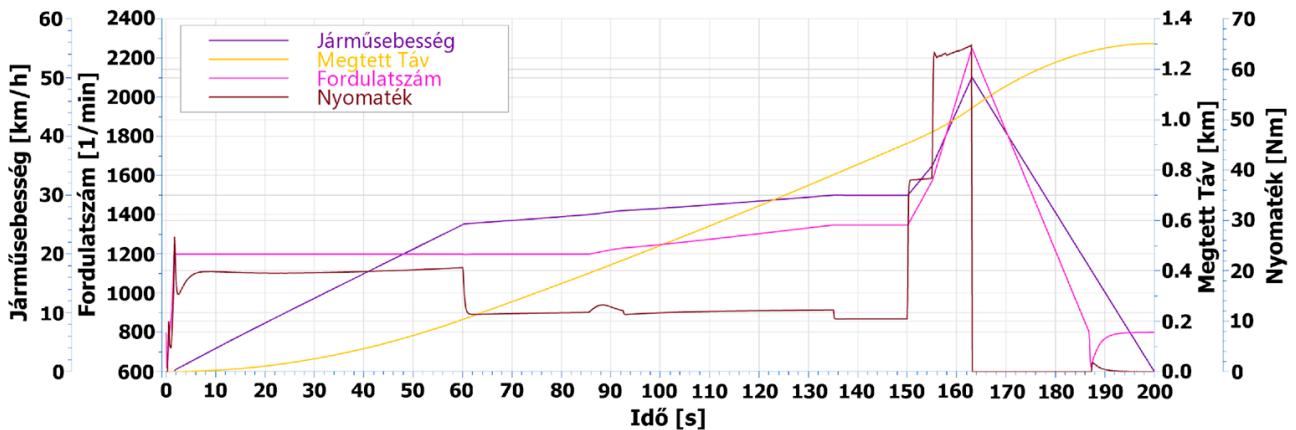
Üzemanyag	Alsó Fűtőérték [kJ/kg]	Levegő/Üzemanyag Tömegarány [-]	Párolgáshő [kJ/kg]
RON95 Benzin	~ 43 500	~ 14,5	~ 346
E10 (10% etanol)	~ 42 000	~ 14,1	~ 360
E20 (20% etanol)	~ 40 600	~ 13,6	~ 400
E30 (30% etanol)	~ 39 300	~ 13,1	~ 450

3. EREDMÉNYEK

A modell építése megtörtént, a szoftver nem jelzett hibát. Így a következő lépés a szimulációk előkészítése volt. A szimuláció és lépésidő beállítása után a szimulátor feladatait kellett kiválasztani. Majd előkészíteni a kívánt adatok kimutatását. Két kimutatás készült. Az első általános adatok szemléltetésére szolgál, mely a modell általános hitelességének ellenőrzésére készült. A második kimutatás a tanulmány fókuszpontja, a kibocsátott NO_x értékek illusztrálására készült.

3.1 Szimulációk eredményeinek hitelessége

Ahogy az imént említésre került, elsőnek a modell hitelességét bizonyító kimutatások kerülnek bemutatásra (4. ábra). Az ábrán négy alapadat látható. Jól megfigyelhető, hogy az útvonal bemenetet (3. ábra) a járműsebesség leköveti. A járműsebességhez pedig a nyomaték és a fordulatszám görbéi szépen igazodnak. Végül sárgával látható a jármű által megtett táv. Fontos megjegyezni, hogy a szimulációkhoz szándékosan lett egyszerű útvonalprofil választva, mivel a szimulációval általános tendenciák lekövetése a cél. A komplexebb mérésekhez további komoly fejlesztésekre van szükség. Összességében a görbéken látható eredmények egymáshoz viszonyítva konzisztensnek és logikusnak mutatkoznak, valamint összhangban állnak a várható tendenciákkal, ezért a modell és a szimulációs eredmények hitelesnek tekinthetők.

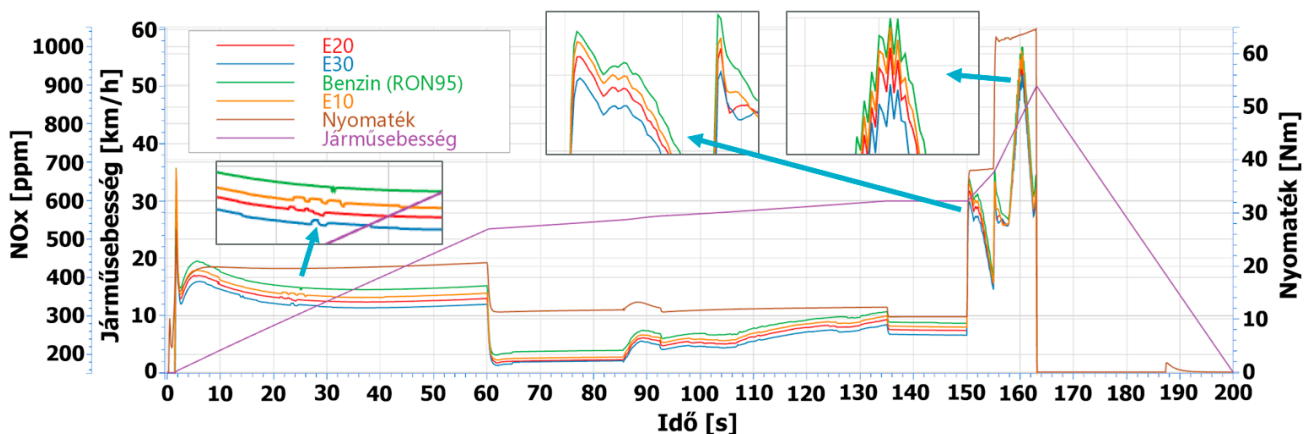


4. ábra. Modell vizsgálati kimutatás

3.2 Különböző üzemanyagok NO_x kibocsátása

A második kimutatásban a 1. táblázatban szereplő benzinek NO_x kibocsátási értékei figyelhetők meg (5. ábra). A kibocsátási értékek mellett a nyomaték és járműsebesség görbék vannak ábrázolva a diagrammon. Az ábrán jól látható, hogy az etanol tartalom növekedésével csökken a NO_x kibocsátás, majdnem minden pillanatban. A járműre ható terheléseknek megfelelően növekszik az emisszió is.

Szintén kivehető a görbékől, hogy a hirtelen terhelés változással magas kibocsátási értékek adódnak. Illetve az egyszerű útvonal karakterisztika miatt a nyomaték és emissziós értékek is hirtelen változnak, komplexebb bemeneti értékekkel kevésbé lennének szögletesek a görbék. Továbbá szimuláció eredményei összhangban vannak az irodalom segítségével meghatározott intervallummal.



5. ábra. Szimuláció NO_x kibocsátásai

4. KONKLÚZIÓ

A tanulmányban megvalósult a célnak kitűzött teljes körű járműszimulációs modell fejlesztése, mely képes NO_x emissziós értékek becslésére.

A szimuláció eredményei a NO_x kibocsátás csökkenését mutatták az üzemanyag etanol tartalmának növelése mellett. Ezek az eredmények összhangban vannak az irodalmi áttekintésben meghatározott emissziós

intervallumokkal. Fontos megjegyezni, hogy az irodalomban található eredményekből nem egyértelműen meghatározható az etanol tartalom hatása a NO_x kibocsátásra. A kapott eredményeket számos tényező befolyásolhatja.

A modellfejlesztés egy korlátozó tényező is felmerült. A szimulációk állandó sebességfokozat mellett voltak futtatva, mivel a váltási fázisok irreális nyomatékcsúcsokat okoztak, melynek a fő oka a durva váltási folyamat lehetett.

A szimulációs modell jövőbeli fejlesztési tervében szerepel az előbb említett korlát leküzdése, továbbá teljes járműciklus szimulációk végzése és országúti validációja, EGR és katalizátor építése, motorbeállítások pontosítása, valamint egyéb károsanyagok mérése.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Széchenyi István Egyetem, valamint az Egyetemi Kutatási Ösztöndíj Program (EKÖP) támogatása alapján valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Ram V., Salkuti S.R. *An Overview of Major Synthetic Fuels*. Energies 2023, 16, 2834.
- [2] Juan G., Segovia H. *Advancing E-fuels production through process intensification: overcoming challenges and seizing opportunities for a sustainable energy future - A critical review*. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, Volume 208, 2025, 110107, ISSN 0255-2701.
- [3] Masum B.M., Masjuki H.H., Kalam M.A., Fattah I.M.R., Palash S.M., Abedin M.J. *Effect of ethanol-gasoline blend on NO_x emission in SI engine*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 24, 2013, Pages 209-222, ISSN 1364-0321.
- [4] Mohamed M., Zhao H., Harrington A., Hall J. *Experimental Investigation of Combustion Characteristics, Performance, and Emissions of a Spark Ignition Engine with 2nd Generation Bio-Gasoline and Ethanol Fuels*. SAE Technical Paper 2023-01-0339, 2023
- [5] Sakthivel P., Subramanian K.A., Mathai R. *Comparative studies on combustion, performance and emission characteristics of a two-wheeler with gasoline and 30% ethanol-gasoline blend using chassis dynamometer*. Applied Thermal Engineering, Volume 146, 2019, Pages 726-737, ISSN 1359-4311.
- [6] İlhan İ.M., Doğan R., Orhan A.S., Kahraman N. *Experimental study on an SI engine fueled by gasoline, ethanol and acetylene at partial loads*. Fuel, Volume 261, 2020, 116148, ISSN 0016-2361.
- [7] Tibaquirá J.E., Huertas J.I., Ospina S., Quirama L.F., Niño J.E. *The Effect of Using Ethanol-Gasoline Blends on the Mechanical, Energy and Environmental Performance of In-Use Vehicles*. Energies 2018, 11, 221.
- [8] Bahattin Celik M. *Experimental determination of suitable ethanol-gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine*. Applied Thermal Engineering, Volume 28, Issues 5-6, 2008, Pages 396-404, ISSN 1359-4311.
- [9] Singh J., Nozari H., Herreros J.M., Tsolakis A. *Synergies between aliphatic bio-alcohols and thermo-chemical waste heat recovery for reduced CO₂ emissions in vehicles*. Fuel, Volume 304, 2021, 121439, ISSN 0016-2361.
- [10] Audi 2.0 ltr. TFSI engine (EA888 evo4 series)
- [11] U.S. Department of Energy: *Fuel Properties Comparison*. Fuels, <https://afdc.energy.gov/fuels/properties> (Utolsó letöltés: 2026.01.22)
- [12] Huang, W., Koichi K., Yohko A., Mitsuharu O., Kotaro T. *Investigation on Fuel Properties of Synthetic Gasoline-like Fuels*. International Journal of Automotive Manufacturing and Materials. 2024, 3(1), 5.