

# 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 befecskendezésű 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 egyeduralguk 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 áramlástan 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 dízel motor égésszimulációjának verifikációja motorfékpad mérés alapján, különböző EGR értékek esetében.

## 2. A MÉRŐRENDSZER ÉS A MÉRÉSEK

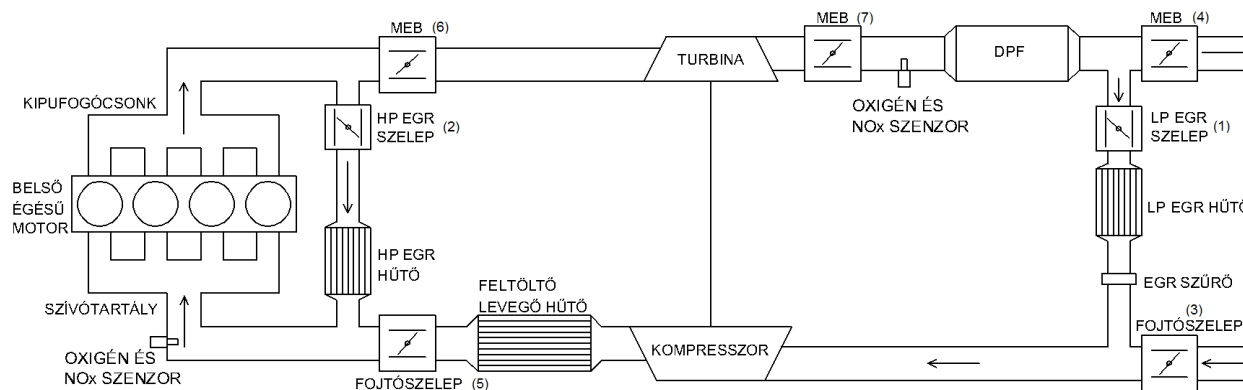
A vizsgált motor egy Cummins ISBe 170 30 típusú, soros, négyhengeres, medium-duty haszongépjármű dízel motor Common-Rail befecskendezéssel. A motor turbófeltöltött, töltőlevegő hűtővel, alacsony és magas nyomású kipufogógáz visszavezetéssel rendelkezik, paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

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 kipufogófekek 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 UniNOx 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

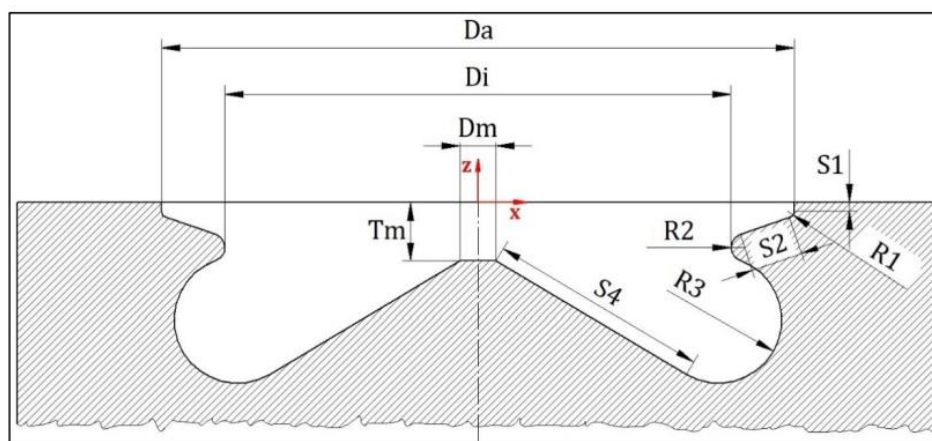
3. táblázat

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.

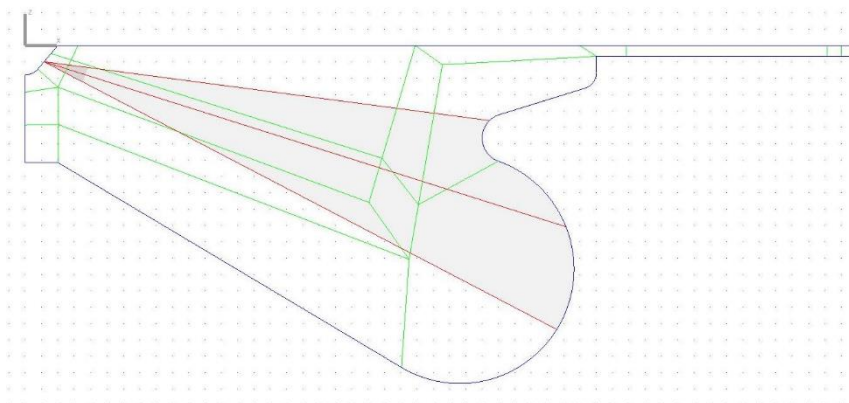
Az égéstér dugattyúba süllyesztett, forgásszimmetrikus,  $\omega$ -kialakítású. Az égéstér paramétereit a 2. ábra szemlélteti, a paraméterek értékei a 4. táblázatban vannak feltüntetve. A motorba beépített befecskendező egy Bosch CRIN 1 típusú, 8 furatos, haszongépjárművekben alkalmazott injektor [9].



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.

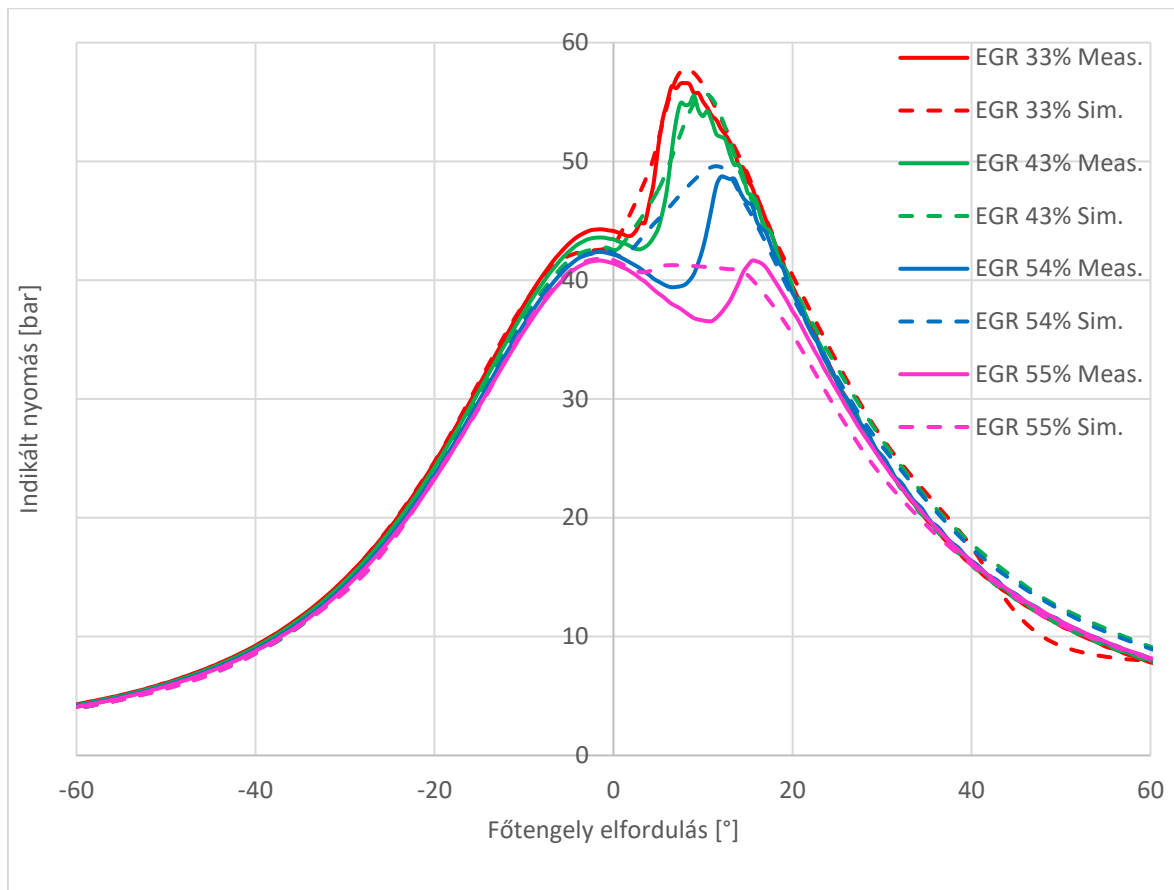
A vizsgálat egy munkapontban, 1500 1/min-es motorfordulatszám mellett történik, a vizsgált tartomány 560 – 850 ft°, ahol 720 ft°-ot tekintjük a befecskendezési felső holtpontnak.

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 tolnak. 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.

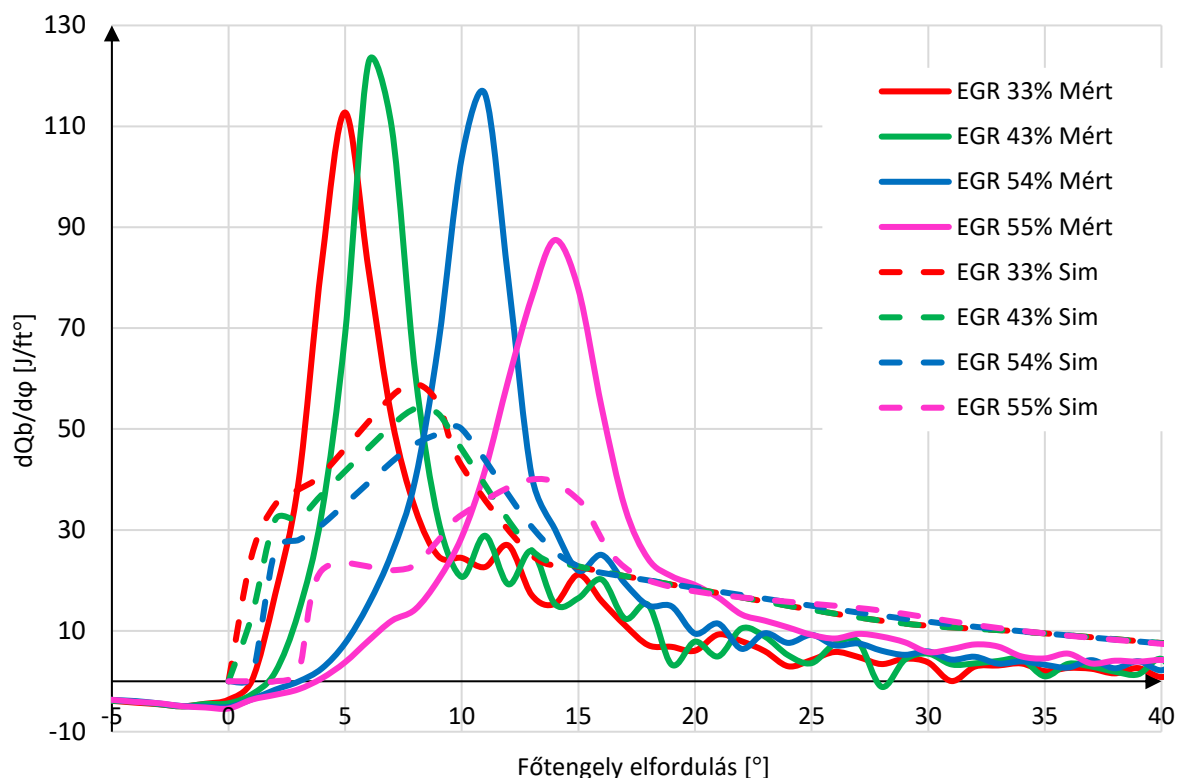


4. ábra Mért és szimulált nyomáslefutások különböző EGR értékeknél

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.