



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

DÍZELMOTOR KIPUFOGÓGÁZOK UTÓKEZELÉSE

DOI: 10.54598/005450

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Biró Norbert

Gödöllő

2024

A doktori iskola megnevezése:

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Tudományága:

Agrárműszaki Tudományok

Vezetője:

Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
Magyar Agrár-és Élettudományi
Egyetem,
Műszaki Intézet

Témavezető:

Prof. Dr. Kiss Péter
egyetemi tanár, PhD
Magyar Agrár-és Élettudományi
Egyetem,
Műszaki Intézet
Járműtechnika Tanszék

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	1
1.BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	2
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége.....	2
1.2. Célkítűzések	3
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	4
2.1. Tesztcella infrastruktúra	4
2.2. Teszt motor.....	5
2.3. Kísérletek tervezése.....	6
2.3.1. WHSC ciklus.....	6
2.3.2. AVL PUMA programozási környezet.....	7
2.4. Kísérleti terv	8
2.5. Emisszió mérő berendezések.....	8
2.5.1. Részecskeszámláló (APC 489).....	8
2.5.2. Gáznemű emisszió mérőgép (AMA i60).....	8
2.6. Adatelemzés lineáris és polinomiális regresszióval	9
3. EREDMÉNYEK.....	9
3.1. Részecskeszámlálási labor berendezések elemzése.....	9
3.2. Részecskeszámláló fejlesztése a kutatáshoz.....	11
3.3. Kísérletek kiértékelése.....	12
3.4. Függvénykapcsolat a 10/23 nm részecskék kibocsátása és a közösnyomócső nyomása között.....	14
3.5. Függvénykapcsolat a 10/23 nm részecskék kibocsátása és kipufogógáz visszavezetésének mértéke között	15
3.6. Függvénykapcsolat a NO _x kibocsátás és a kipufogógáz visszavezetés mértéke között	16
3.7. Függvénykapcsolat a NO _x kibocsátás és a közösnyomócső nyomás között.....	17
3.8. Új tudományos eredmények	18
4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	21
5. ÖSSZEFOGLALÁS	22
6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ PUBLIKÁCIÓK.....	24

JELÖLÉSJEGYZÉK

Alkalmazott jelölések

NO_{xp}	Számított NO_x koncentráció	[g/kWh]
NO_p	Számított NO koncentráció	[g/kWh]
CO_p	Számított CO koncentráció	[g/kWh]
CO_{2p}	Számított CO_2 koncentráció	[g/kWh]
CH_p	Számított CH koncentráció	[g/kWh]
SPN_{10}	Számított 10 nm-es részecske koncentráció	[#/kWh]
SPN_{23}	Számított 23 nm-es részecske koncentráció	[#/kWh]

Rövidítések

<i>APC</i>	AVL részecskeszámláló	[-]
<i>EEPS</i>	Motor kipufogógáz részecskeméretező	[-]
<i>SPN</i>	Szilárd részecskeszám	[#/kWh]
<i>DPF</i>	Dízel részecskeszűrő	[-]
<i>PM</i>	Részecske tömeg	[g/kWh]
<i>RDE</i>	Valós vezetési kibocsátás	[-]
<i>WHSC</i>	Világharmonizált állóciklus	[-]
<i>CPC</i>	Kondenzációs részecskeszámlálók	[-]
<i>CS</i>	Katalitikus párologtató	[-]
<i>ET</i>	Párologtató cső	[-]
<i>PN</i>	Részecskeszám	[-]
<i>UNECE</i>	ENSZ Európai Gazdasági Bizottsága	[-]
<i>CVS</i>	Állandó térfogatú mintavétel	[-]
<i>DOC</i>	Dízel oxidációs katalizátor	[-]
<i>SCR</i>	Szelektív katalitikus redukció	[-]
<i>PND</i>	Részecskeszám-hígító	[-]
<i>MFC</i>	Légtömegáram-szabályozó	[-]
<i>VPR</i>	Illékony vegyület eltávolító	[-]

1.BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

Az emisszió technika 2000-es évek autóiiparának egyik legjobban fejlődő ágazata. Európai és világszinten egyaránt szigorodó emissziós előírások vezérlik az újabb és szofisztikáltabb kipufogógáz utókezelő rendszerek létrehozását. A közelmúlt eseményei miatt (Volkswagen dízel botrány 2015) a lakosság figyelme is fokozottan ráirányult a károsanyag kibocsátás megfelelő mértékben való szabályozására, így manapság minden eshetőséget figyelembe kell venni a tervezőasztalon, hogy csökkenthető legyen a környezetkárosítás. A belsőégésű, azon belül a dízelmotorral szerelt járműveket laikus szemlélőként nézve, hamarosan felváltja az elektromos hajtás. Ezt a felvetést azonban érdemes jobban körül járni, az alternatív hajtású járművek, Battery Electric Vehicle (BEV) – akkumulátorról hajtott jármű és Fuel Cell (F-CELL) –üzemanyag cellás jármű egyelőre és belátható időn belül nem képesek kiváltani a belsőégésű, ezen belül is a dízel technológiát a nehézgépjárművek szektorában. Az emberiség primerenergia-igénye elektromos energia előállítására (18%), fűtésre (20%), közlekedésre (28%) és egyéb ipari célokra (34%) fordítódik. A világon megtermelt összes villamos energia 2016-ban mintegy 25 PWh volt, ennek kétharmada fosszilis energiahordozókból származott, ami súlyosan károsítja az ökoszisztémát, mind az üvegházhatású gázok, mind az egyéb káros anyagok kibocsátása miatt. Az atomerőművek a jelenleg elérhető energiatermelő megoldások közül az egyik legfontosabb szén-dioxid-semleges technológiát jelentik. A világszerte működő 452 blokk összesen 398 GW elektromos kapacitással rendelkezik, ezek a világ villamosenergia-termelésének 10,2%-át adták 2018-ban. Az előbbi adatok arra engednek következtetni, hogy a közvélemény által „tisztának” vélt villamos energia a világ nagy részén nem karbon semleges forrásból származik. Ebből következőképp, a továbbiakban a BEV és F-CELL hajtásokra zérus lokális emissziójúként fogok hivatkozni, hiszen a globális emissziójuk jelentős, egyes tanulmányok szerint, a teljes élettartamra vizsgálva magasabb, mint a belsőégésű motoroké (Gupta et al. 2017). Az előző gondolatból kiindulva, van létjogosultsága a belsőégésű motoroknak, illetve bőven van fejlesztési potenciálja is, elég csak a Bosch-Weichai Power 50% feletti termikus hatásfokú nehézgépjárművekbe szánt dízelmotorjára gondolni (Bosch-presse, 2020), amely sorozatgyártásba is került. Az elkövetkezendő 10-20 év során a személyautók és a haszongépjármű motorok piacán az Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – lágy hibrid elektromos jármű, Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) konnektoros

hibrid elektromos jármű technológia alkalmazásával és kipufogógáz utókezelő rendszerek optimalizálásával mind az Otto- és dízel üzemű járművek emissziótechnikai szempontból kedvezőtlen munkapontjai csökkenthetők.

1.2. Célkitűzések

Doktori kutatásom fő célja, rögzített paraméteres kísérlet sorozattal, motorfékpados laborkörnyezetben meghatározni a dízelmotorok kipufogógázában lévő két fő károsmisszió összetevő, a nitrogén-oxidok és a szilárd részecskék összefüggéseit, a dízelmotor aktuátoraival.

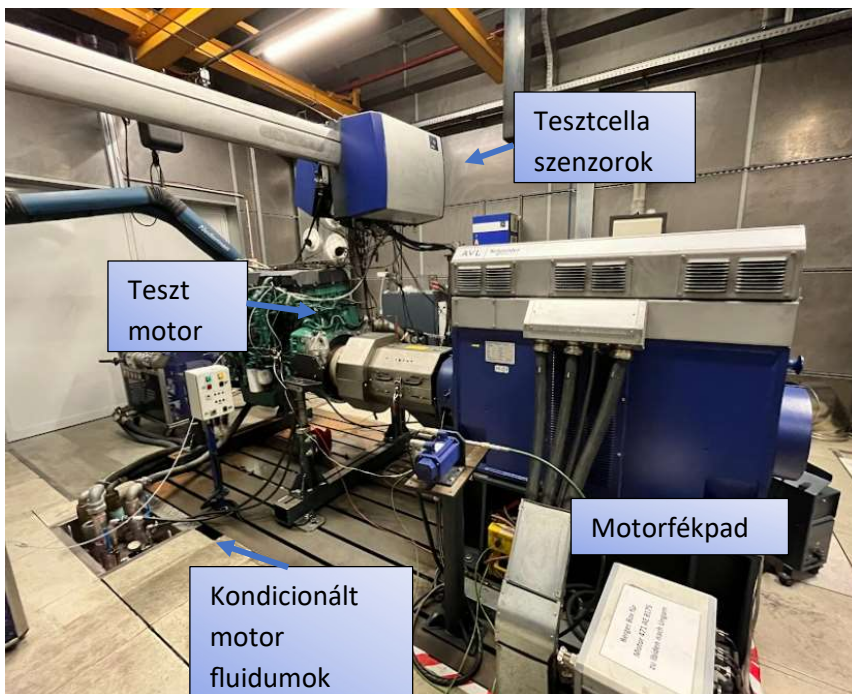
A részletes célkitűzéseim az alábbiakban olvashatóak:

- Vonatkozó emissziótechnikai irodalom feldolgozása és megismerése.
- Részecskemérési elrendezések összehasonlító értékelése a hígítási arány függvényében.
- Új aeroszol előkészítési elv kidolgozása kondenzációs részecskeméréshez.
- Kondenzációs részecskemérőrendszer aeroszol előkészítő egység fejlesztése az előbbi elv alapján.
- PUMA Open TST editor felületen való tesztcella vezérlő programok írása.
- Visual Basic programnyelven motor aktuátorait megismételhetően kontrolláló program írása.
- Rögzített paraméteres motorfékpadi méréssorozat lefolytatása és részletes kiértékelése.
- Függvénykapcsolat meghatározása a 10/23 nm részecskék kibocsátása és a közönsnyomócső nyomása, illetve a kipufogógáz visszavezetésének mértéke között.
- Függvénykapcsolat meghatározása a NO_x kibocsátás és a közönsnyomócső nyomás között, illetve a kipufogógáz visszavezetésének mértéke között.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Tesztcella infrastruktúra

Gáznemű- és folyékony közegek (hűtőfolyadék, olaj, beszívott levegő és töltőlevegő) jelentős hatással vannak a motor viselkedésére. A kondicionáló rendszerek ezen közegeket előre meghatározott hőmérsékleten képesek tartani minden üzemi helyzetben. A nagy pontosságú és megismételhető tesztek elvégzéséhez a rögzített környezeti feltételek nélkülözhetetlenek. A kipufogógáz emisszió mérési tesztek időben eltolva, az egyes tesztek kiértékelése után következnek, így a közegek kondicionálása biztosítja, hogy a tesztelési körülmények összehasonlíthatók maradjanak. Ezen okokból kifolyólag a kondicionáló rendszerek nélkülözhetetlenek a megvalósítani kívánt kísérletekhez. Az Ibsiden Hungary Kft. Dunavarsányi telephelyén található kutatás-fejlesztési központban, amelyben mérnök munkakörben dolgozom és egyben a doktori kutatásaimat is végeztem, rendelkezik az említett kondicionáló berendezésekkel és teljes motorfékpados teszt cellákkal. Melyek közül a 1. ábrán látható nehéz gépjármű motort tartalmazó motorfékpados tesztcellát használtam kísérleteim során.

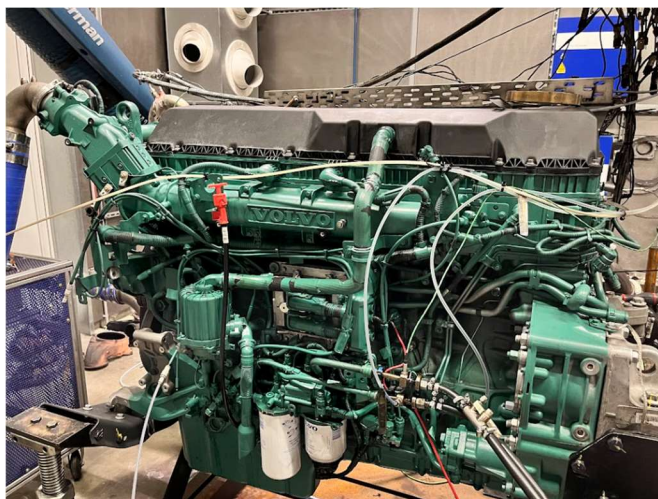


1. ábra Motorfékpados tesztcella az Ibsiden Hungary Kft. Telephelyén (Forrás: Biró Norbert)

A tesztciklusok kiértékeléséhez ugyancsak elengedhetetlen a megfelelő mintavételezési idejű adatfelvétel. Ez az adatfelvételi apparátus tartalmazza a motor üzemi paramétereit (fordulatszám, motornyomaték stb.), a környezeti körülményeket (tesztcella levegő hőmérséklet, beszívott levegő nyomása, páratartalma, hőmérséklete, motor fluidumok hőmérséklete, nyomása stb.), illetve gáznemű és szilárd szennyezőanyagok fajlagos mennyiségét. Továbbá lehetőségem volt a motor on board (OBD) szenzor adatait felvenni, míg az alapvetően a motorvezérlő által szabályzott aktuátorait módosítani.

2.2. Teszt motor

A kísérletekhez egy Volvo gyártmányú, közösnyomócsöves, közvetlenbefecskendezéses dízelüzemű, nehézgépjárművekbe tervezett motort használtam, amely a 2. ábrán látható. A kutatásom során használt motor parametrizálható, a fontosabb jellemzőiben módosítható. Ez lehetővé teszi, hogy motortípustól függetlenül specifikus beállításokat alkalmazzak a motoron, így garantálva, hogy a mérések során a motor alrendszerei rögzített paraméterekkel működjenek, míg vizsgált a paramétert változtatom. Ennek eredményeképpen képes vagyok reprodukálható és a motor típusától független méréseket végezni, ami elősegíti a kutatási eredményeim általánosíthatóságát és ismételhetőségét. A motor adatai a 1. táblázatban találhatóak meg.



2. ábra Volvo D13-TC az Ibiden Hungary Dunavarsányi telephelyén lévő Technical Center-ben, egy AVL HD 500 kW-os motorfékpadra telepítve. (Forrás: Biró Norbert)

1. táblázat Teszt motor specifikációk

Motor specifikációk	
Megnevezés	D13TC TURBO-TC
Típus	közvetlenbefecskendezéses dízel
Furat × löket	131 [mm] × 158 [mm]
Hengerűrtartalom	12800 [cm ³]
Gyújtássorrend	1-5-3-6-2-4
Maximális teljesítmény	372 [kW] @1300-1600 [1/min]
Maximális nyomaték	2840 Nm @900-1300 [1/min]
Kompresszió viszony	18:1

2.3. Kísérletek tervezése

2.3.1. WHSC ciklus

A WHSC (World Harmonized Steady State Cycle) ciklus a globális műszaki szabályozás (GTR) 4. számú rendelete által meghatározott állandó állapotú motor fékpados tesztciklus. Az állandósult motorkondíciókat tartalmazó WHSC, úgy került kifejlesztésre, hogy lefedje az EU, az USA, Japán és Ausztrália jellemző vezetési szokásait. A WHSC tesztciklus, kulcsfontosságú részét képezi annak a komplex tanúsítási keretrendszernek, amely célja a nehéz tehergépjárművek kibocsátásának harmonizálása globális szinten. Ezért választottam kutatásom során a WHSC ciklust, mivel így eredményeim könnyen összehasonlíthatók gyártói és más kutatók adataival.

Az úgynevezett normalizált értékű módok százalékos arányban definiálják a maximális fordulatszámhoz és motornyomatékhoz tartozó értékeket. Ezzel szemben a denormalizált értékek már az adott motorra származtatottak. Az általam használt tesztmotorra denormalizált motorfordulatszám-és nyomatékot az 1. egyenlet segítségével határoztam meg.

Denormalizálási számítás az európai előírások szerint

$$n_{ref} = n_{norm} \cdot (0,45 \cdot n_{lo} + 0,45 \cdot n_{pref} + 0,1 \cdot n_{hi} - n_{alapjárat}) \cdot 2,0327 + n_{alapjárat} \quad (1)$$

ahol:

n_{lo} a legalacsonyabb fordulatszám, ahol a teljesítmény a maximális teljesítmény 55 százaléka

n_{pref} a motor fordulatszáma, ahol a legnagyobb leképezett nyomaték integrálja a n_{idle} és az n_{95h} közötti teljes integrál 51 százaléka

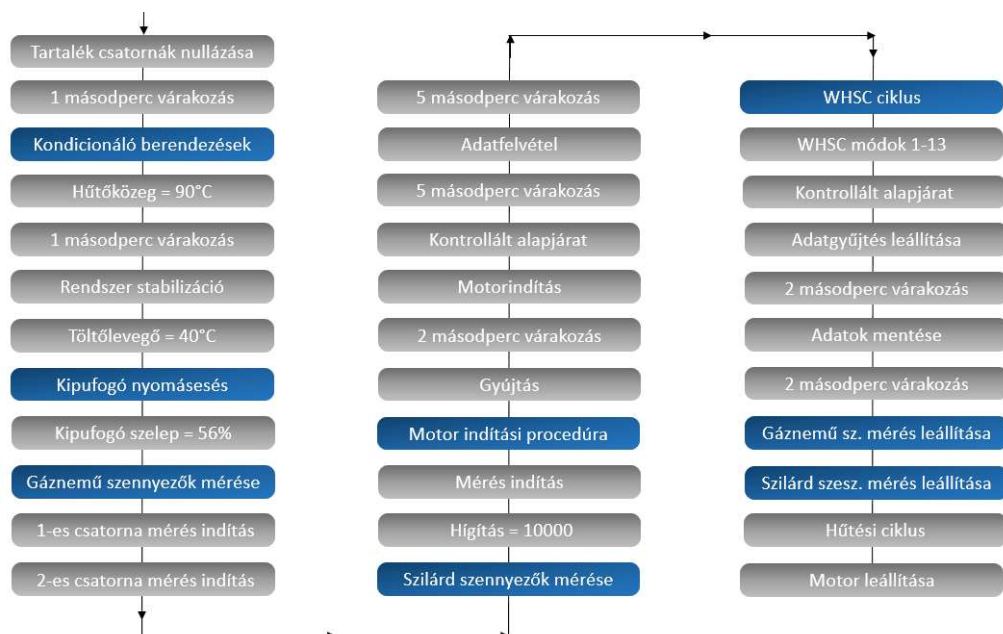
n_{hi} a legnagyobb sebesség, ahol a teljesítmény a maximális teljesítmény 70 százaléka

$n_{alapjárat}$ az alapjárat fordulatszám

n_{95h} a legnagyobb sebesség, ahol a teljesítmény a maximális teljesítmény 95 százaléka

2.3.2. AVL PUMA programozási környezet

Az AVL PUMA szoftver, Az AVL GmbH által gyártott tesztcellákhoz tartozó szoftver. Az egész rendszer az úgynevezett egy szoftver elvet követi, tehát a tesztcellák előtt található vezérlő számítógépről elérhetővé válik az előzőekben ismertetett kondicionáló rendszerek, a motorfékpad, a motor, az emissziómérő berendezések, a hajtóanyagrendszer, adatfelvétel, illetve a teljesítményüzemeltetési szinten található PLC-k irányítása is.



3. ábra WHSC program lépései az AVL Puma programozási felületen (Forrás: Bíró Norbert)

Az általam készített WHSC mód 9 és WHSC tesztprogramok szigorúan rögzített paramétereket biztosítanak a kísérletek során. Minden egyes kísérletet a vezérlőprogram pontosan ugyanabban a szekvenciában és lépésekben hajt végre (3. ábra), ami garantálja az eredmények megbízhatóságát és ismételhetőségét. Ezt a magas szintű precizitást manuális irányítással elérni lehetetlen lenne. A tesztciklusok során alkalmazott konzisztens és szabványosított eljárások révén a kísérletek összehasonlíthatók és reprodukálhatók, amely kulcsfontosságú a megbízható eredmények és következtetések szempontjából a motorvizsgálatokban.

2.4. Kísérleti terv

A kísérleteket az Ibsiden Hungary telephelyén található Technical Centerben hajtottam végre. Előző fejezetekben ismertetett eszközök segítségével. Az általam Visual basic-ben készített motorvezérlő programokat használtam a motor különböző aktuátor értékeinek kényszerített módosítására. Fontos megemlíteni, hogy motor működése során minden paraméter rögzített volt, tehát csak az adott kísérletek során módosított aktuátor értékek tértek el az alapállapottól. Ezt az általam egyedileg készített fékpadi és motorvezérlő felőli automatizált programok szavatolták, hogy minden egyes alkalommal, a kívánt paraméterekben tökéletesen megegyező kísérletek készüljenek. A kísérletekből 24 különböző változatot készítettem, melyeket 3 alkalommal ismételtem meg. Ezáltal 72 teszt széria készült el, illetve mivel minden egyes teszt széria egy WHSC mód 9 és egy WHSC fő programból áll összességében 144 db különálló motorfékpados mérést készítettem. Egy teszt széria pontosan 4,08 órát vett igénybe, tehát 296,76 órába telt a teljes mérési folyamat, amely 8 órás munkanapokkal számolva több mint 7 hétig tartott.

2.5. Emisszió mérő berendezések

2.5.1. Részecskeszámláló (APC 489)

A kondenzációs részecskeszámlálás a legelterjedtebb módszer az aeroszol (minta gáz) részecskeszám koncentrációjának meghatározására. Az aeroszol szilárd részecskéi folyékony butanollal történő kezelésével megnagyobbodnak. Ezek a részecskék egy rendkívül érzékeny érzékelőkamrán keresztülhaladnak, amelyben lézervény és kifinomult fényérzékelő optika található, pontos részecskeelemzéshez és mennyiségi meghatározáshoz tervezve.

2.5.2. Gáznemű emisszió mérőgép (AMA i60)

Az Euro gépjárműemisszió direktívák által szabályozott kipufogógáz komponensek túlnyomó többsége gáznemű szennyezőkből áll. Az AMA i60 kísérletek során

alkalmazott analizátorai széles mérési tartománnyal rendelkeznek, és alkalmazhatók a THC, NO/NO₂/NO_x, CO, CO₂, O₂, N₂O, CH₄, SO₂, NH₃ és H₂O gáznemű szennyezők pontos mérésére. Mivel a különböző gáznemű emisszió komponensek mérési elvei eltérnek egymástól, ezért az aeroszoloikat különböző analizátorokkal kell vizsgálni, amelyek a közös mérőcsőből kerülnek elkülönítésre. A kutatás szempontjából kiemelten fontos az NO_x, mint emisszió komponens, amely méréséhez kapcsolódó analizátor kemilumineszcens mérési elven alapul.

2.6. Adatelemzés lineáris és polinomiális regresszióval

A kiugró értékektől megtisztított adathalmazt polinomiális és lineáris regresszióval elemeztem. A regresszió során a kiugró értékek eltávolítása segített a modell stabilitásának és megbízhatóságának növelésében. Ezen módszerrel a változók kölcsönhatásait és azok hatását a célváltozóra részletesen vizsgálhattam, minimalizálva a kiugró értékek potenciális torzító hatását az elemzés során.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Részecskeszámlálási labor berendezések elemzése

A kísérletek során kiemelt jelentőséggel bírt a részecskeszám mérésének témája. Ennek érdekében, a kísérletsorozat előtt leteszteltem a két általam megtervezett részecskeszámláló kiépítést. Az elvégzett mérések középpontjában a 10 és 23 nanométeres méréstartomány egyszerre történő vizsgálata állt. Ez azért vált különösen fontossá, mivel jelenleg az Euro VI szabvány 23 nanométeres részecskeátmérőtől írja elő a kipufogógázban lévő részecskék számlálásához. Azonban az Euro VII szabvány már a 10 és 23 nanométer közötti átmérőjű részecskék számlálását is kötelezővé teszi.

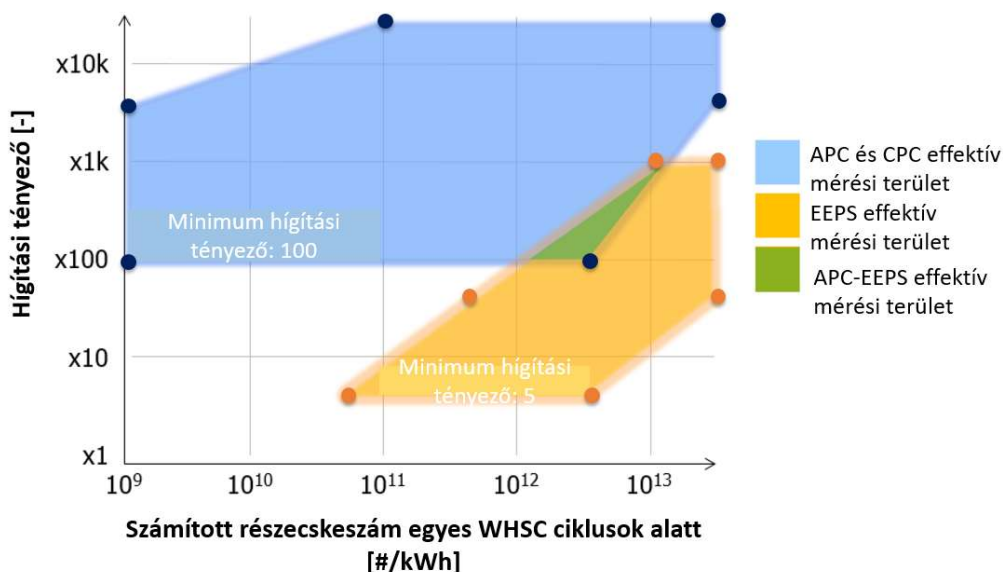
Ezen fejlesztés azért vált fontos lépéssé, mert biztosítja, hogy a kutatási eredményeim ne csak a jelenlegi szabványoknak feleljenek meg, hanem előre tekintve az Euro VII bevezetését követően is relevánsak és hasznosak maradjanak. A 10 nanométeres részecskemérés segít garantálni, hogy a kutatási eredményeim és a részecskekoncentrációval kapcsolatos információim továbbra is értékesek és alkalmazhatók legyenek a jövőben, az új szabványok és követelmények megjelenésével.

Az APC és az EEPS eredendően eltérő mérési elvei miatt kezdeti tesztekre volt szükség annak igazolására, hogy a két készülék képes-e együtt mérni. A validáló méréseket WHSC ciklussal végeztem, amelyek eredményei a 2. táblázatban

láthatóak és a 4. ábrán mutatom be, ahol a hígítási tényezőt az egyes WHSC mérésekhez számított részecskeszám végeredményéhez viszonyítottam.

2. táblázat APC és EEPS részecskeszámlálóval végzett kísérletek eredményei, különböző hígítási tényezővel

Teszt sorszám	APC hígítási tényező [-]	Számított részecskeszám [# / kWh]	EEPS hígítási tényező [-]	Számított részecskeszám [# / kWh]
1	100	$5 \cdot 10^{12}$	5	$5 \cdot 10^{12}$
2	5000	$5 \cdot 10^{13}$	50	$5 \cdot 10^{13}$
3	15000	$5 \cdot 10^{13}$	1000	$5 \cdot 10^{13}$
4	100	$1 \cdot 10^9$	5	$8 \cdot 10^{10}$
5	5000	$1 \cdot 10^9$	50	$5 \cdot 10^{11}$
6	15000	$1 \cdot 10^{11}$	1000	$1 \cdot 10^{13}$



4. ábra Az APC és az EEPS részecskeszám eredményei a hígítási tényező függvényében. APC = AVL részecskeszámláló; CPC = kondenzációs részecskeszámláló; EEPS = motor kipufogógáz részecskeméretező; (Forrás: Bíró Norbert)

A 4. ábrán a zöld terület az, ahol a két eszköz megfelelően együttműködve képes mérni. Az átfedés, ahol mindkét eszköz számlálási hatékonysága elfogadható, meglehetősen kicsi, és nem tekinthető kiterjedt kísérleti munkára megfelelőnek, így az első részecskeszámlálási kialakítást nem tartottam optimálisnak. Ezzel szemben a

második kialakításnál, ahol szinte teljesen megegyező mérési módszerrel dolgozik a két készülék, a teljes kék mezőben mindkét készülék hatékonyan mérhet. Továbbá, mivel a későbbi kísérletek a nyers kipufogógáz mérésén alapulnak, magasabb aeroszol hígításra van szükség a részecskeszámláló berendezések védelme érdekében. Ezen felül az EEPS 100 alatti hígítási kapacitása teljesen szükségtelenné válik, tovább megerősítve a második kialakítás használatát. Az EEPS használata segített volna átfogóbb képet kapni a részecskéképződésről, mivel képes a különböző méretosztályokra osztott részecskék eloszlását meghatározni. Ennek ellenére, az elemzésem eredményeképp elvettem a kísérleteimben való további alkalmazását az EEPS-nek. A kísérletet és annak eredményeit egy impakt faktorral rendelkező nemzetközi folyóiratban is közöltem.

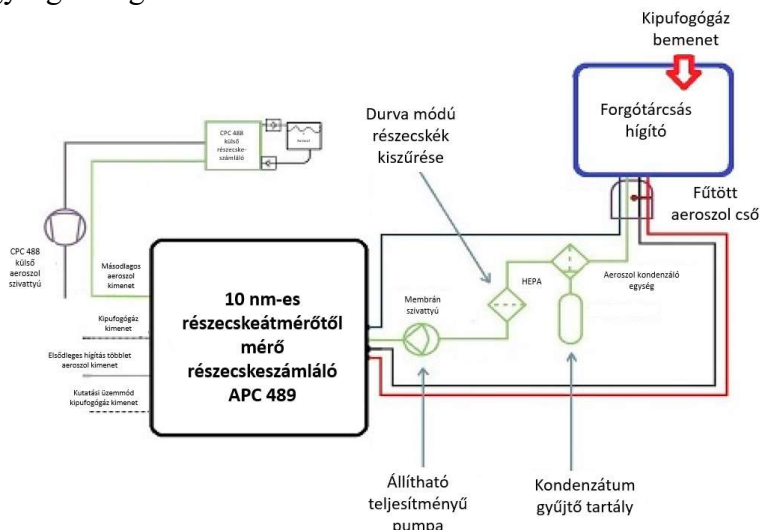
3.2. Részecskeszámláló fejlesztése a kutatáshoz

A tervezett motorfékpadi emissziómérési kísérletsorozat elindítása előtt alaposan foglalkoztam a kondenzációs részecskeméréssel kapcsolatos kihívások megoldásával. Specifikusan, hosszadalmas kísérletsorozatok esetében, amelyek jelentős részecskeszám-koncentrációval és magas relatív páratartalommal rendelkező mérési környezetben zajlanak - tipikusan olyan helyzetekben, ahol az emissziómérő rendszerek utókezelő berendezések nélkül működnek - az aeroszokok (mintagázok) áramlási útvonalainak eltömődése és kondenzátum képződése előfordulhat. Ezek a jelenségek a mérőberendezések meghibásodásához vezethetnek, amely akadályozza a közel 300 órás tervezett kísérletsorozat zavartalan lebonyolítását. Ennek elkerülése érdekében egy új aeroszol előkészítő egységet terveztem, a mintavezetékek eltömődésének és a kondenzátum képződésének megelőzésére, így biztosítva a kísérletsorozat sikeres végrehajtását.



5. ábra Eredeti (balra) és a fejlesztett (jobbra) aeroszol előkészítő egységű kondenzációs részecskeszámláló CAD modellje (Forrás: Bíró Norbert).

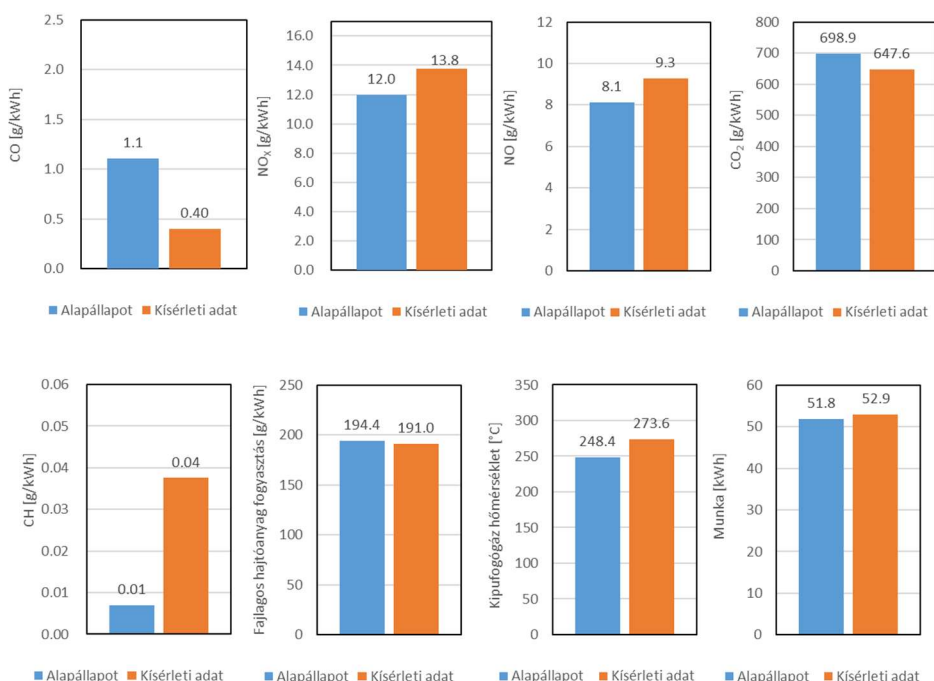
A fejlesztett aeroszol előkészítő egység új alkatrészeket és részegységeket tartalmaz, beleértve a kondenzátum leeresztő egységet, egy dedikált tartályt a kondenzált folyadékok gyűjtéséhez, egy magas hatékonyságú részecskelevegő (HEPA) szűrőt, egy állítható tápegységet és egy membránszivattyút, amint az 5. ábrán látható. A fejlesztett egység mintgázárama a 6. ábrán látható.



6. ábra Az APC 489 folyamatábrája, fejlesztett N-elrendezéssel (Forrás: Bíró Norbert).

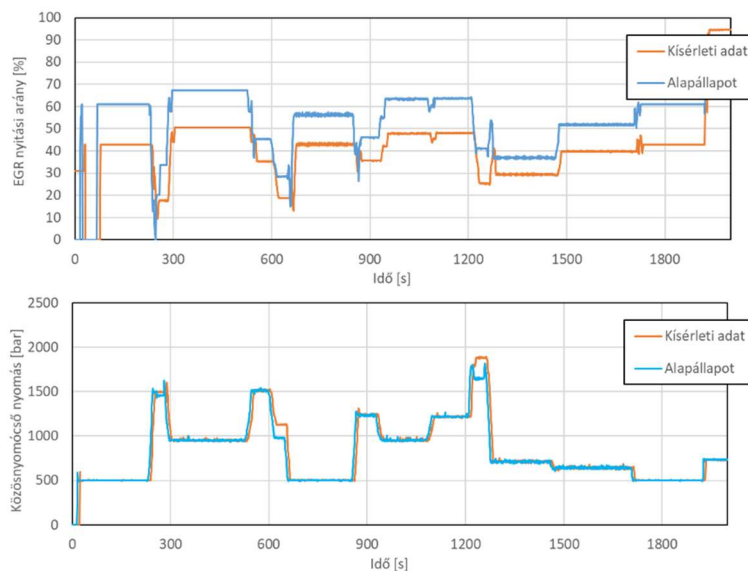
3.3. Kísérletek kiértékelése

A klasszifikációs analízis keretében a tisztított kísérleti adatokat rögzítettem. A kipufogógáz-visszavezetési és a közönsnyomócső nyomás paramétereinek módosításait a kiinduló állapotokhoz képest szimmetrikusan, mínusz 30% és plusz 30% közötti tartományban, 10%-os lépésközzel végeztem el. A fejezet további részében a maradék kísérleti adatok elemzését végzem el. Mivel egyetlen WHSC ciklus során körülbelül 160 000 adatpontot rögzítetek, a 12 kísérlet összesen közel 2 millió adatpont feldolgozását igényelte. Az adatok megbízható kezelése érdekében a automatizált adatfeldolgozó módszert alkalmaztam, amelyet Microsoft Excel formátumban dolgoztam ki. A dolgozat olvashatóságának megőrzése és terjedelmének csökkentése érdekében a 12 kísérlet közül csak egyet mutatok be részletesen.



7. ábra Számított szén-monoxid, nitrogén-oxidok, nitrogén-monoxid, szén-dioxid, szén hidrogének, fajlagos hajtóanyag fogyasztás, kipufogógáz hőmérséklet és elvégzett munka a kísérleti WHSC ciklus alatt, összehasonlítva az alapállapottal (Forrás: Bíró Norbert).

A 7. ábra szemléletesen illusztrálja, hogy a kipufogógáz-visszavezetés mértékének csökkentése jelentős növekedést eredményezett a nitrogén-oxid (NO) és nitrogén-dioxid (NO_x) értékekben, miközben a szén-dioxid (CO₂) szintje csökkent. Ennek oka, hogy a NO_x csökkentésére alkalmazott kipufogógáz-visszavezetési módszer negatívan befolyásolja a motor termikus hatékonyságát. Így, amikor a visszavezetés mértéke a jelen kísérletben 30%-kal csökken, a CO₂ kibocsátás és így a hajtóanyag-fogyasztás is csökken, miközben az elvégzett munka nő, ahogy azt Needham is megállapította.

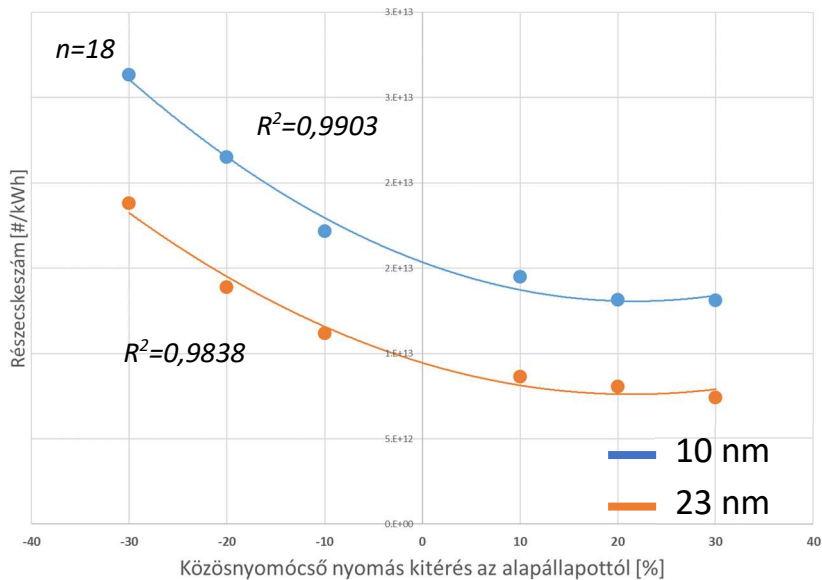


8. ábra Transziens kipufogógáz visszavezetés aránya (EGR) és közösnyomócső nyomás a kísérleti WHSC ciklus alatt, összehasonlítva az alapállapottal (Forrás: Bíró Norbert).

Az értékelés végső szakaszában vizsgálom a ciklus során a közös nyomócsöves rendszer nyomását és a kipufogógáz-visszavezetés (EGR) mértékét. Ezeket a paramétereket az általam készített programkód segítségével irányítom a motor vezérlőrendszerén keresztül. Ebben a kísérletben az EGR nyitási értékét 30%-kal csökkentettem, amit a 8. ábrán egyértelműen nyomon követhetünk.

3.4. Függvénykapcsolat a 10/23 nm részecskék kibocsátása és a közösnyomócső nyomása között

A kutatásom ezen részének célja a dízelmotor kipufogógázában található szilárd részecskék számának vizsgálata volt a közös nyomócső nyomás változtatásának függvényében. A vizsgálat során két részecskeméretet különböztettem meg: a 10 nanométeres és nagyobb, valamint a 23 nanométeres és nagyobb részecskéket. A kapcsolat modellezéséhez a polinomiális regressziót választottam, mivel az adatok között kvadratikusan kapcsolható meg, erre Siebers is utalt kutatásában. A polinomiális regressziós modell lehetővé teszi nem-lineáris mintázatok leírását is. Illetve teljesíti előzetes számításaim alapján a kísérleti adatpontokra való, legalább 97%-os illeszkedésre vonatkozó kitűzött célt. A regressziókat a 9. ábrán mutatom be.

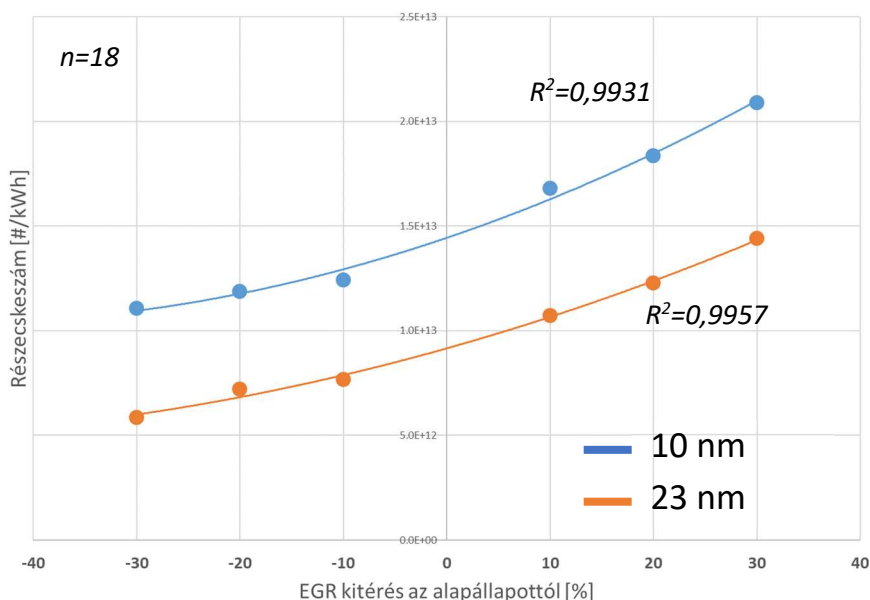


9. ábra 10 és 23 nm-es részecskeszám a közösnyomócső nyomás változtatásának függvényében WHSC ciklus alatt. (Forrás: Biró Norbert)

3.5. Függvénykapcsolat a 10/23 nm részecskék kibocsátása és kipufogógáz visszavezetésének mértéke között

A kutatásom ezen részének célja a dízelmotor kipufogógázában található szilárd részecskék számának vizsgálata volt a kipufogógáz visszavezetés (EGR) százalékos állításának függvényében. A vizsgálat során két részecskeméretet különböztettem meg: a 10 nanométeres és nagyobb, valamint a 23 nanométeres és nagyobb részecskéket. A kapcsolat modellezéséhez a polinomiális regressziót választottam, de ebben az esetben a lineáris regresszió jó közelítéssel működne, az előzetes vizsgálatom alapján, viszont a 3%-os, kitűzött hibahatárt nem tudta teljesíteni.

Az függvényeket és a mérési pontokat a 10. ábrán szemléltetem.

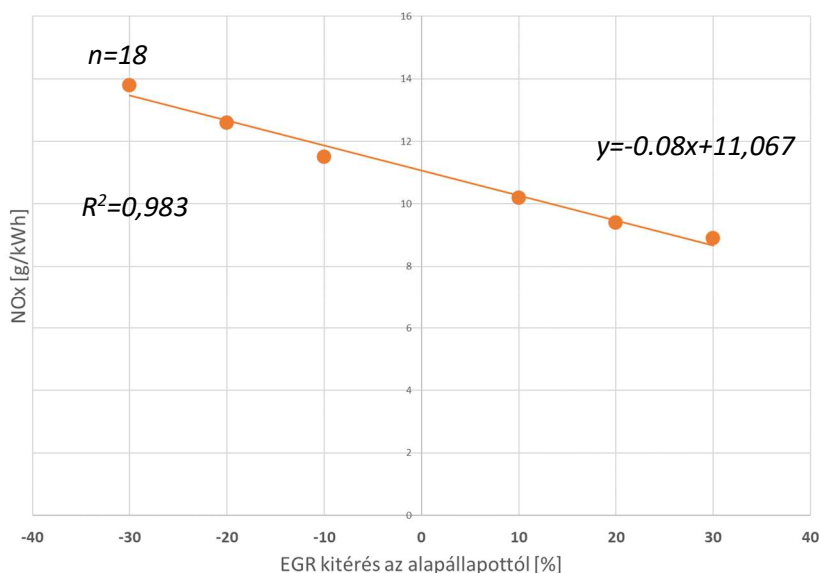


10. ábra 10 és 23 nm-es részecskeszám a kipufogógáz visszavezetés változtatásának függvényében WHSC ciklus alatt. (Forrás: Biró Norbert)

3.6. Függvénykapcsolat a NO_x kibocsátás és a kipufogógáz visszavezetés mértéke között

A kutatás ezen része során a célom az volt, hogy megvizsgáljam a EGR nyitási értékének változása és a dízelmotor nitrogén-oxid kibocsátás (NO_x) közötti összefüggést. A vizsgált motornál változtattam a nyitási beállításokat rögzített mértékben: -30%-tól +30%-ig, 10%-os intervallumokban. Ezzel párhuzamosan rögzítettem a NO_x kibocsátás mértékeit g/kWh-ban. A kapcsolat matematikai modellezéséhez lineáris regressziós analízist végeztem. Illesztettem egy regressziós modellt az adatokra, amely a független változó (x) és a függő változó (y) közötti lineáris kapcsolatot írja le.

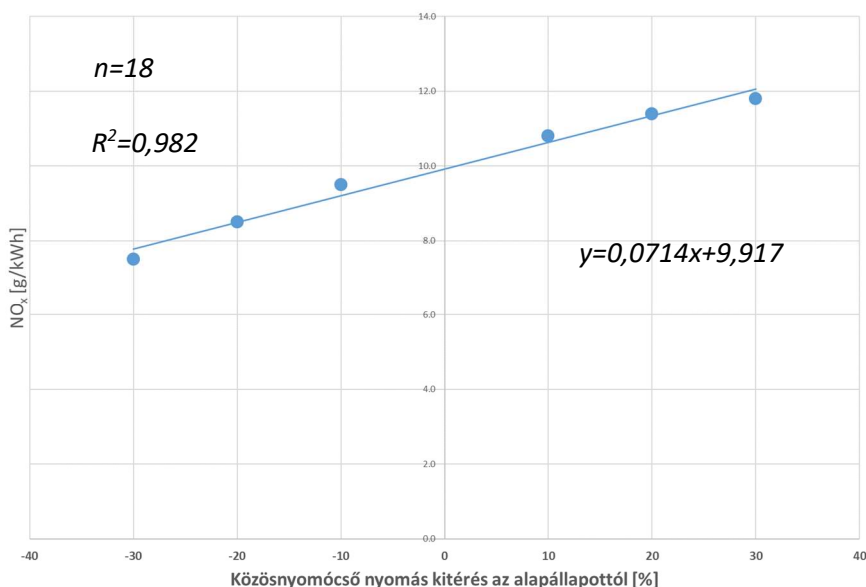
A függvényt vizuálisan az alább látható, 11. ábrán ábrázoltam.



11. ábra NO_x koncentráció a kipufogógáz visszavezetés változtatásának függvényében WHSC ciklus alatt. (Forrás: Biró Norbert)

3.7. Függvénykapcsolat a NO_x kibocsátás és a közösnyomócső nyomás között

A kutatás ezen része során a célom az volt, hogy megvizsgáljam a közös nyomócső nyomásának változása és a dízelmotor nitrogén-oxid kibocsátás (NO_x) közötti összefüggést. A vizsgált motornál változtattam a nyomás beállításokat rögzített mértékben: -30%-tól +30%-ig, 10%-os intervallumokban. Ezzel párhuzamosan rögzítettem a NO_x kibocsátás mértékeit g/kWh-ban. A kapcsolat matematikai modellezéséhez lineáris regressziós analízist végeztem. A regressziót a 12. ábrán mutatom be.

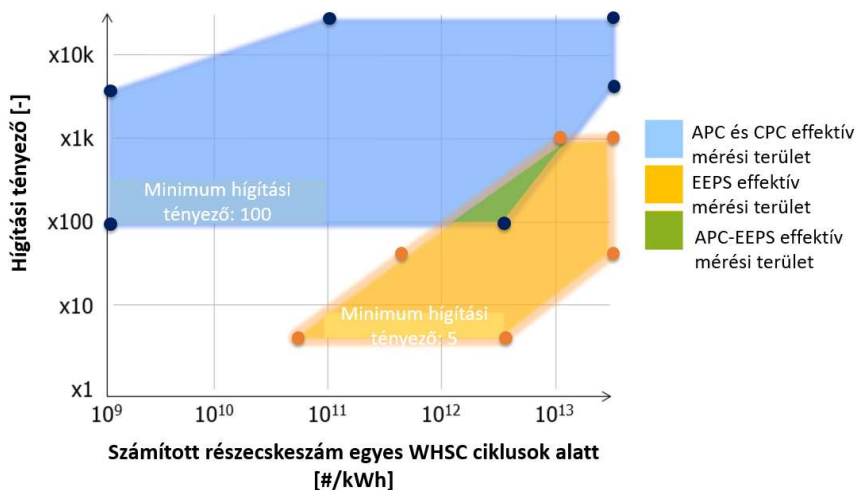


12. ábra NO_x a közösnyomócső nyomás változtatásának függvényében WHSC ciklus alatt. (Forrás: Biró Norbert)

3.8. Új tudományos eredmények

1.Tézis

A kutatásom során megvizsgáltam különböző mérési elveken alapuló részecskeszámlálókat és meghatároztam működési tartományaikat a hígítási tényező függvényében. A feltárt részecszekoncentráció és hígítási tényező közötti kapcsolat az alábbi ábrán látható.



A vizsgálatok során a gyakorlat számára fontos, eddig ismeretlen részecskemérési és hígítási összefüggést tártam fel. A fenti eredményeimet egy Q1-es, impakt faktoros folyóiratban közöltem, melyet Q1-es és Q2-es folyóiratban is idézték.

2.Tézis

Motorfékpad vizsgálataim során megállapítottam a közönsnyomócsőben lévő nyomás és a 10 és 23nm-es részecskeátmérőtől mért és számított részecskeszám közötti polinomiális regressziós analízissel leírt összefüggést. A polinomiális regressziós modellel 3%-os hibahatárral tudtam illeszteni függvényt illeszteni a mérési adataimra, illetve az úgynevezett „overfittinget” is el tudtam kerülni. A kísérletek során alkalmazott tesztmotor egy paraméterevezhető beállításokkal rendelkező motor, amely lehetővé teszi az eredmények általánosítását és reprodukálhatóságát. A kikísérletezett összefüggések kompresszió gyújtású, közönsnyomócsöves hajtóanyagellátórendszerű, EURO VI-d normának megfelelő nehézgépjármű motorokra alkalmazhatóak.

10 nm-es polinomiális regressziós egyenlet.

$$\hat{y}_{Rail;10nm} = 1,54 \cdot 10^{13} - 2,11 \cdot 10^{11}x + 4,87 \cdot 10^9x^2$$

23 nm-es polinomiális regressziós egyenlet.

$$\hat{y}_{Rail;23nm} = 9,46 \cdot 10^{12} - 1,72 \cdot 10^{11}x + 4,02 \cdot 10^9x^2$$

Ahol:

$\hat{y}_{Rail;10nm}$ a 10 nm-es részecskeszám [#kWh];

$\hat{y}_{Rail;23nm}$ a 23 nm-es részecskeszám [#kWh];

x a közönsnyomócső nyomáseltolódás százaléka [%].

3.Tézis

A motorfékpad vizsgálataim során a kipufogógáz visszavezetés mértékének és a 10 és 23 nm-es részecskeátmérőtől mért részecskeszám közötti összefüggést polinomiális regressziós analízissel írtam le. A polinomiális regressziós analízis választásának fő oka az volt, hogy ez a módszer lehetővé teszi a 3%-os hibahatár alkalmazását. Az overfitting elkerülése érdekében olyan modellt választottam, amely elég rugalmas ahhoz, hogy megfelelően illeszkedjen a komplex mérésiadat struktúrákhoz, ugyanakkor elég általános ahhoz, hogy jól használható legyen új

adatokra. A kísérletek során alkalmazott tesztmotor egy paraméterezhető beállításokkal rendelkező motor, amely lehetővé teszi az eredmények általánosítását és reprodukálhatóságát. Az eredmények alkalmazhatóak kompresszió gyújtású, elektronikusan vezérelt kipufogógáz visszavezető rendszerű, EURO VI-d normának megfelelő nehézgépjármű motorok esetében.

10 nm-es polinomiális regressziós egyenlet.

$$\hat{y}_{EGR;10nm} = 1,44 \cdot 10^{13} + 1,67 \cdot 10^{11}x + 1,71 \cdot 10^9x^2$$

23 nm-es polinomiális regressziós egyenlet.

$$\hat{y}_{EGR;23nm} = 9,16 \cdot 10^{12} + 1,39 \cdot 10^{11}x + 1,16 \cdot 10^9x^2$$

Ahol:

$\hat{y}_{EGR;10nm}$ a 10 nm-es részecskeszám [#kWh];

$\hat{y}_{EGR;23nm}$ a 23 nm-es részecskeszám [#kWh];

x a kipufogógáz visszavezetés nyitáseltolódás százaléka [%].

4.Tézis

Vizsgálataim során a kipufogógáz visszavezetés mértékének és a kipufogógázban lévő NO_x koncentráció közötti összefüggést lineáris regressziós analízissel írtam le. Ezt a módszert azért választottam, mert lehetővé teszi a pontos és megbízható modellépítést, a 3%-os hibahatáron belül, elkerülve az overfittinget. Az egyszerűség és a magas R² érték biztosítása mellett a lineáris regressziós modell képes az adatok általános tendenciáit leírni anélkül, hogy a mérési adatokban található minimális zajhoz túlzottan alkalmazkodna. A kísérletek során alkalmazott tesztmotor egy paraméterezhető beállításokkal rendelkező motor, amely lehetővé teszi az eredmények általánosítását és reprodukálhatóságát. Az eredmények relevánsak és alkalmazhatóak a kompresszió gyújtású, elektronikus vezérlésű kipufogógáz visszavezető rendszerű, EURO VI-d normának megfelelő nehézgépjármű motorok esetében.

$$\hat{y}_{EGR;NOx} = -0,08x + 11,06$$

Ahol:

$\hat{y}_{EGR;NOx}$ a NO_x koncentráció [g/kWh];

x a kipufogógáz visszavezetés nyitáseltolódás százaléka [%].

5. Tézis

Motorfékpadi vizsgálataim során megállapítottam a közönsnyomócsőben lévő nyomás és a kipufogógázban lévő NO_x közötti lineáris regressziós analízissel leírt összefüggést. A modellkomplexitás szabályozásával és a 3%-os hibahatár betartásával egy stabil, általánosító képességű modellt hoztam létre, amely nem csak a mért adatokon mutatott kiemelkedő illeszkedést, hanem a prediktív pontosságát is megőrizte új adatok esetén. A kísérletek során alkalmazott tesztmotor egy paraméterezhető beállításokkal rendelkező motor, amely lehetővé teszi az eredmények általánosítását és reprodukálhatóságát. Az így kapott összefüggés alkalmazható a kompresszió gyújtású, közös nyomócsöves hajtóanyagellátórendszerű, EURO VI-d normának megfelelő nehézgépjármű motorokra.

$$\hat{y}_{Rail;Rail} = 0,0714x + 9,917$$

Ahol:

$\hat{y}_{Rail;NOx}$ a NO_x koncentráció [g/kWh];

x a közönsnyomócső nyomáseltolódás százaléka [%].

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A kutatómunkám több területen is jól hasznosítható új tudományos eredményeket hordoz. A műszaki gyakorlat számára támogatást nyújt a részecskeemisszió mérési kísérleteknél a részecskeszámláló berendezések kiválasztásában, egyedülálló módon a hígítási tényező függvényében. Ezen eredményeimet, impakt faktoros nemzetközi tudományos folyóiratban is közöltem, hogy az emisszió mérési terület kutatásaihoz hozzájáruljak. Munkámat az Európai bizottság saját autóiipari kutatás-fejlesztési központjának (Joint Research Center – JRC) és részecske mérési program (Particle measurement programme – PMP) elnöke idézte saját kutatásában, mint összehasonlítási alap. Az előbbieken említett szervezetek tesznek javaslatot az euro direktívák emissziós határértékeire, mint például a hamarosan bevezetésre kerülő Euro 7-re. Ez a pozitív visszacsatolás a munkámat illetően arra enged következtetni, hogy értéket teremtettem a tudományos közösség számára.

Kidolgoztam egy új mintagáz előkészítési elvet részecskeszámláló rendszerekhez, mely alapján először egy modellt készítettem, majd a terveket gyakorlati megvalósítás követte. Az autóiipari emissziókat kutató munkahelyemen (Ibiden Hungary Kft.) a berendezést nem csak a doktori kutatásomhoz használtam fel, hanem immáron éles kísérletekhez is az újító elvű előkészítő egység van hivatalosan használatban. Az elvet részletező tudományos publikációm ugyancsak idézve lett az Európai bizottság vezető kutatója által. A pozitív visszajelzések miatt szabadalmi bejegyzés elindítása mellett döntöttem, melynek ügyintézése jelenleg is folyamatban van.

A motorfékpadi kísérletek során kapott regressziós egyenletek alapján előrejelzéseket végeztem a NO_x és 10/23 nanométeres részecske kibocsátásra különböző kipufogó visszavezetési és közösnyomócső nyomáseltolódási értékek között. Ezek az előrejelzések lehetővé tették számomra, hogy számszerűsítsem az előbbi két aktuátor hatását a NO_x és részecske kibocsátásra, melyeket az emisszió technika jelenleg a két legfontosabb kipufogógáz komponensnek tart.

Az elemzés eredményeképpen megerősítést nyert a kutatási hipotézisem, miszerint a közös nyomócső nyomásának és az EGR nyitási értékének változása jelentősen befolyásolja a dízelmotor NO_x - és részecske kibocsátását. A regressziós modellek és az R^2 érték magas szintje lehetővé teszi a motor működési paramétereinek optimalizálását a kibocsátás csökkentése érdekében. Az elemzés során felmerült statisztikai és matematikai részletek alapos elemzése elengedhetetlen az ilyen típusú kutatásokban, melyek lehetővé teszik a pontos és megalapozott következtetések levonását. Az adatokat és a számításokat gondosan dokumentáltam, hogy a kutatási folyamat átlátható és reprodukálható legyen. A további elemzések során tervezem az adatok bővítését, hogy az eredmények még több adatpont alapján legyenek meghatározva, és hogy kizárjam a véletlen eltérések vagy a nem reprezentatív adatok okozta torzítások lehetőségét. A jövőbeli kutatási tervek között szerepelnek olyan többváltozós modellek készítése is, amelyek figyelembe veszik a motor több különböző paraméterének egyidejű változását, tovább finomítva a NO_x és részecske kibocsátás előrejelzésének pontosságát.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az autóiipar emissziótechnológiája a 2000-es években rohamos fejlődésen ment keresztül, amit az európai és globális szinten egyre szigorodó emissziós normák hajtottak előre. Ezek a szabványok új, egyre összetettebb kipufogógáz-kezelő rendszerek kifejlesztését ösztönözték. A közelmúlt eseményei rávilágítottak a

lakosság számára is a károsanyag-kibocsátás hatékony szabályozásának fontosságára, ami még nagyobb figyelmet követel az innovatív megoldásokra a mérnöki tervezés során a környezeti hatások minimalizálása érdekében.

Doktori kutatásom fő célja, rögzített paraméteres kísérlet sorozattal, motorfékpados laborkörnyezetben meghatározni a dízelmotorok kipufogógázában lévő két fő károsmisszió összetevő, a nitrogén-oxidok és a szilárd részecskék összefüggéseit, a modern dízelmotorok aktuátoraival, mint a hajtóanyag közönsnyomócső, illetve a kipufogógáz visszavezető szelep (EGR). Ebben segítségemre volt a vonatkozó szakirodalom és emissziótechnikai kutatások megismerése. További céljaim között szerepelt egy egyedi kísérleti rendszer kialakítása, mely magában foglalja Visual Basic programnyelven motor aktuátorait megismételhetően kontrolláló program írását és PUMA Open TST editor felületen való tesztcella vezérlő programok írását és az AVL 489 részecskeszámláló gép mérési megbízhatóságának fejlesztését, amely lehetővé teszi nagyszámú kísérleteim során való használatát. Továbbá célul tűztem ki a különböző részecskemérési eljárások összehasonlítását hígítási tényező függvényében.

A kutatásom az Ibsiden Hungary Kft. Dunavarsányi telephelyén található kutatás-fejlesztési központban folytattam le, ahol mérnök munkakörben dolgozom. A kísérleteket motorfékpados laborkörnyezetben végeztem egy teljes mértékben parametrizálható Euro VI-d emissziós normának megfelelő nehézgépjármű dízelmotoron, ezáltal biztosítva a kapott összefüggések általánosíthatóságát. A gáznemű- és folyékony közegek jelentős hatással vannak a belsőégésű motorok emissziójára. A kutatásom során ezért a rögzített paraméteres kísérletek szavatolása miatt hajtóanyag, kenőolaj, töltőlevegő és hűtőfolyadék kondicionáló rendszereket is alkalmazok.

A kutatásom során különös figyelmet fordítottam ezeknek a tényezőknek a komplex elemzésére. Munkám kezdetén számos akadályba ütköztem: a részecskeszámlálók kiválasztásának és hígításfüggő működésének megértése, a hosszú teszt sorozatok során megbízható részecske-méréseket biztosító aeroszol előkészítő egység kialakítása, valamint a precíz irányítást lehetővé tevő aktuátorokat szabályozó programkódok fejlesztése jelentett kihívást. Az ezekre a problémákra kidolgozott újszerű eljárások révén tudtam megkezdeni a több mint 300 órányi, motorfékpadon végzett kísérleteimet, melyek eredményei magas determinációs együtthatóval rendelkező ($R^2 > 0,97$) regressziós modellekkel írhatóak le.

Ezen eredmények kiválóan közelítik meg az új fejlesztésű, kompressziógyújtású, közös nyomócsöves hajtóanyagellátórendszerrel rendelkező, elektronikusan vezérelt

kipufogógáz-visszavezető rendszerrel felszerelt EURO VI normának megfelelő nehézgépjárművek motorjainak két fő emisszió komponensét, a NO_x-ot és a szilárd részecskéket, amint az a közösnyomócső nyomásának és a kipufogógáz-visszavezetés mértékének változásával összefügg. A részecskeszámot tartalmazó regressziók mivel 10 és 23 nm-es méréstartománytól is meghatároztam, így felhasználhatóak lesznek a hamarosan bevezetésre kerülő EURO VII normával kapcsolatos kutatásokban is. Ezáltal az általam kifejlesztett modell nem csak a jelenlegi kutatási célkitűzéseket szolgálja, hanem erős alapot nyújt további, összetettebb modellek létrehozásához is. Ezek a fejlett modellek mélyebb és átfogóbb betekintést nyújthatnak a dízelmotorok emissziós dinamikájába és viselkedésébe, lehetővé téve a tudományos közösség és a mérnöki gyakorlat számára, hogy finomítsák és optimalizálják a motorok teljesítményét a környezeti szabályozásoknak való megfelelés mellett.

6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. Bíró, N., Pillinger, Gy., Kiss, P., Szöllősi, D., Akihiro, O. (2020): Experimental SCR system for engine dynamometer applications, *Hungarian Agricultural Engineering* 38 pp. 56-62., 7 p.
2. Bíró, N., Pillinger, Gy., Kiss, P., Szöllősi, D., Akihiro, O. (2020): Reducing nitrogen oxides in ICE R&D laboratory environment, *Mechanical Engineering Letters: R and D*, Vol. 20, 20 pp. 50-58., 9 p.
3. Bíró, N., Kiss, P., (2021): Reviewing ICE soot filtration in EATS laboratory environment, *Mechanical Engineering Letters: R and D*, Vol. 21, 21 pp. 85-95., 11 p.
4. Bíró, N., Kiss, P., (2022): Comparing pressure hysteresis of DPF filters, *Mechanical Engineering Letters: R and D*, Vol. 22, 22 pp. 109-115., 7 p.
5. Bíró, N., Szöllősi, D., Kiss, P., (2023): Particle Counter Design Upgrade for Euro 7, *Atmosphere*, 14, 1411. <https://doi.org/10.3390/atmos14091411> - **IF 2,9**
6. Bíró, N., Kiss, P., (2023): Emission Quantification for Sustainable Heavy-Duty Transportation. *Sustainability*, 15, 7483. <https://doi.org/10.3390/su15097483> - **IF 3,9**
7. Bíró, N., Kiss, P., (2023): Euro VI-d Compliant Diesel Engine's Sub-23 nm Particle Emission. *Sensors*, 23, 590. <https://doi.org/10.3390/s23020590> - **IF 3,9**

Lektorált cikk magyar nyelven

8. Bíró, N., Pillinger, Gy., (2020): Adblue-adagoló fejlesztése kipufogógáz-kezelő rendszer optimalizálásához, Mezőgazdasági Technika 61: 5 pp. 2-5., 4 p.
9. Szöllősi, D., Bíró, N., Kiss, P., (2020): A dízel részecskeszűrő (DPF) koromszűrési hatékonyságának megállapítása, Mezőgazdasági Technika 61: 9 pp. 2-5., 4 p.
10. Csankó, Cs., Szöllősi, D., Bíró, N., Kiss, P., (2021): Dízelmotor NOx kipufogógáz-emissziójának mérése, Mezőgazdasági Technika 62: 9 pp. 2-5., 4 p.
11. Csankó, Cs., Bíró, N., Szöllősi, D., Kiss, P., (2021): Belső égésű motor részecskeszűrési hatékonyságának változása az üzemóra függvényében, Mezőgazdasági Technika 62:12 pp. 2-5., 4 p.

Nemzetközi konferencia kiadvány

12. Bíró, N., Kiss, P., (2023): Evaluating the pressure performance of DPF filters using engine bench analysis, Proceedings of the 16th European-African Regional Conference of the ISTVS. ISBN:9781942112556

Nemzetközi konferencia absztrakt

13. Bíró, N., Szöllősi, D., (2023): Emission Quantification for Sustainable Heavy-Duty Transportation, The 10th World Sustainability Forum: Basel Hub - Sustainable Transition
p. 31 Paper: sciforum-073454

Hivatkozások

14. Milojević, S.; Glišović, J.; Savić, S.; Bošković, G.; Bukvić, M.; Stojanović, B. Particulate Matter Emission and Air Pollution Reduction by Applying Variable Systems in Tribologically Optimized Diesel Engines for Vehicles in Road Traffic. Atmosphere 2024, 15, 184. **(Hivatkozás a 7. számú publikációmra)**
15. Giechaskiel, B.; Melas, A.; Broekaert, S.; Gioria, R.; Suarez-Bertoa, R. Solid Particle Number (SPN) Portable Emission Measurement Systems (PEMS) for Heavy-Duty Applications. Applied Sciences 2024, 14, 654. **(Hivatkozás az 5. és 7. számú publikációimra)**
16. Gade, C.R.; Wahab, R.S. Conceptual Framework for Modelling of an Electric Tractor and Its Performance Analysis Using a Permanent Magnet Synchronous Motor. Sustainability 2023, 15, 14391. **(Hivatkozás a 6. számú publikációmra)**