



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

DÍZELMOTOR KIPUFOGÓGÁZOK UTÓKEZELÉSE

DOI: 10.54598/005450

Doktori (PhD) értekezés

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	4
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége.....	4
1.2. Célkítűzések	4
2.1. Dízelmotor felépítése.....	6
2.2. Dízelmotor által kibocsátott szennyezők bemutatása	7
2.3. Kibocsátási szabványok.....	9
2.4. Káros emissziók a kialakulási helyük szerint csoportosítva.....	10
2.5. Motor előtti folyamatok – hajtóanyag és kenőolaj	10
2.6. Motorban lejátszódó folyamatok	11
2.6.1. <i>Nitrogén-oxidok és korom részecskék kapcsolata</i>	11
2.6.2. <i>Töltőlevegő menedzsment</i>	13
2.6.3. <i>Hajtóanyag ellátás</i>	18
2.6.4. <i>Égéstér kialakítás</i>	21
2.7. Motor utáni emisszió - kipufogógáz utókezelő rendszer.....	22
2.7.1. <i>Dízel oxidációs katalizátor (Diesel Oxidation Catalyst - DOC)</i>	22
2.7.2. <i>Dízel részecskeszűrő (Diesel Particulate Filter - DPF)</i>	24
2.7.3. <i>Szelektív katalitikus redukció (Selective Catalytic Reduction - SCR)</i>	32
2.8. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	33
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	38
3.1. Tesztcella infrastruktúra	38
3.1.1. <i>Hőcserélő és hűtő egységek</i>	39
3.1.2. <i>Beszívott levegő kondicionáló</i>	40
3.1.3. <i>Motorfékpad</i>	41
3.1.4. <i>Olaj kondicionáló</i>	43
3.1.5. <i>Hűtővíz kondicionáló</i>	44
3.1.6. <i>Hajtóanyag kondicionáló</i>	45
3.1.7. <i>Töltőlevegő kondicionáló</i>	48
3.1.8. <i>Teszt cella szenzorok és adat felvétel</i>	49
3.2. Hajtóanyag.....	51
3.3. Teszt motor.....	51
3.4. Kísérletek tervezése.....	52
3.4.1. <i>WHSC ciklus</i>	52
3.4.2. <i>AVL PUMA programozási környezet</i>	54
3.4.3. <i>Automatizált program felépítése</i>	57
3.5. Kísérleti terv	60

3.6. Kipufogó elrendezés	62
3.7. Motor aktuátorok	63
3.7.1. Motor aktuátorainak bemutatása	63
3.7.2. ATI vision program.....	63
3.7.3. Visual basic programozási környezet	64
3.7.4. Script bemutatása	64
3.7.5. On-board szenzorok és adat felvétel.....	66
3.8. Emisszió mérő berendezések.....	67
3.8.1. Részecskeszámláló (APC 489).....	67
3.8.2. Gáznemű emisszió mérőgép (AMA i60).....	70
3.9. Teszt adat kiértékelő formátum	71
3.10. Kiugró tesztadatok szűrése klaszteranalízissel és interkvartilis terjedelem analízissel	78
3.11. Adatelemzés lineáris és polinomiális regresszióval	78
4. EREDMÉNYEK.....	79
4.1. Részecskeszámlálási labor berendezések elemzése.....	79
4.1.1. 10 és 23 nm-es részecskeszámlálók elemzése	80
4.1.2. Összehasonlító mérések, következtetések.....	81
4.2. Részecskeszámláló fejlesztése a kutatáshoz	86
4.2.1. Részecskeszámláló eredeti kialakítás	86
4.2.2. Fejlesztett N-kialakítás	88
4.2.3. Eredeti és N-elrendezés összehasonlító kísérleti mérések	93
4.3. Motor alapemisszió meghatározása.....	95
4.4. Kísérleti eredmények klasszifikációja és tisztítása.....	98
4.5. Kísérletek kiértékelése.....	99
4.5.1. Kipufogógáz visszavezetés kísérlet kiértékelés (-30%).....	99
4.5.2. Kísérleti eredmények összegzése	102
4.6. Függvénykapcsolat a 10/23 nm részecskék kibocsátása és a közönsnyomócső nyomása között.....	103
4.7. Függvénykapcsolat a 10/23 nm részecskék kibocsátása és kipufogógáz visszavezetésének mértéke között	107
4.8. Függvénykapcsolat a NO _x kibocsátás és a kipufogógáz visszavezetés mértéke között	110
4.9. Függvénykapcsolat a NO _x kibocsátás és a közönsnyomócső nyomás között.....	111
4.10. Új tudományos eredmények	113
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	116
6. ÖSSZEFOGLALÁS	117
7. SUMMARY	119
8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	120
9. IRODALOMJEGYZÉK	121

9.1. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk	128
9.1.1. Lektorált cikk világnyelven	128
9.1.2. Lektorált cikk magyar nyelven	129
9.1.3. Nemzetközi konferencia kiadvány	129
9.1.4. Nemzetközi konferencia absztrakt	129
9.1.5. Hivatkozások	129
10. MELLÉKLETEK	130
M1. Kísérlet kiértékelési diagramok	130
M2. Kísérlet összefoglaló diagramok	148
M3. Kísérletek mérési adatai	149

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]
b_e	Fajlagos hajtóanyag fogyasztás	[g/kWh]
p	Ideális gáz nyomása	[Pa]
T	Ideális gáz hőmérséklete	[K]
V	Ideális gáz térfogata	[m ³]
M	Ideális gáz moláris tömege	[kg/mol]
m	Ideális gáz teljes tömege	[kg]
n	Ideális gáz mólszám	[-]
R	Univerzális gázállandó	[J/molK]
R_s	Ideális gáz specifikus gázállandó	[J/kgK]
W_{WHSC}	WHSC ciklus alatt végzett munka	[kWh]
ρ	Ideális gáz sűrűsége	[g/dm ³]
PN_{10}	Átlagos 10 nm-es részecskeszám	[#/cm ³]
PN_{23}	Átlagos 23 nm-es részecskeszám	[#/cm ³]
$EMF_{óra}$	Óránkénti kipufogógáz tömegáram	[kg/h]
EMF_{mp}	Másodpercenkénti kipufogógáz tömegáram	[kg/s]
EVF	Kipufogógáz térfogatáram	[cm ³ /s]
EVF_{sum}	Kumulált kipufogógáz térfogatáram	[cm ³]
$\Sigma m_{hajtó}$	Kumulált hajtóanyag tömegáram	[g]
$APS_EngineSpeed_TS$	Motorfordulat OBD	[1/perc]
$egd_EgrPosDemand$	EGR OBD	[%]
$ExhaustManifoldPressure$	Kipufogógáz gyűjtőcső nyomás OBD	[kPa]
rpc_Ipart	Hajtóanyag befecskendezés OBD	[mg/ütem]
$rpe_RailPressure$	Rail cső nyomás OBD	[bar]
$se_BoostPres$	Töltlevegő nyomás OBD	[kPa]
$se_BoostTemp$	Töltlevegő hőmérséklet OBD	[°C]
$se_EgrTemp$	EGR hőmérséklet OBD	[°C]
$itvcc_ThrottlePos$	Beszívott levegő szelep OBD	[%]
$mc_EngineModeNoxInterpol$	Motorüzemmód	[-]
$mfv_ExhaustMassFlow$	Kipufogógáz tömegáram OBD	[kg/s]
$se_OilPres$	Olajnyomás OBD	[kPa]
$se_OilTemp$	Olajhőmérséklet OBD	[°C]
$wgd_WgPosDemand$	Wastegate OBD	[%]
$pd_PedalPos$	Pedálszög OBD	[%]
$se_CoolantTemp$	Hűtőközeg hőmérséklet OBD	[°C]
$se_NOxInLevel$	NO_x kimeneten OBD	[-]

<i>se_NOxOutLevel</i>	NO _x bemenetmeneten OBD	[-]
<i>se_TurboSpd</i>	Turbó feltöltő fordulatszám OBD	[1/perc]
<i>tc_TorqueValue</i>	Motornyomaték OBD	[Nm]
<i>asm_SensValEngExhTemp</i>	Kipufogógáz hőmérséklet OBD	[°C]
<i>asm_SensValHcHeatTemp</i>	Hajtóanyag hőmérséklet OBD	[°C]
<i>asm_SensValDpfTemp</i>	Kipufogógáz hőmérséklet a DPF-nél OBD	[°C]
<i>mc_EngineMode</i>	Általános motor üzemmód	[-]
<i>speed</i>	Motorfordulat	[1/perc]
<i>alpha</i>	Pedálszög	[%]
<i>torque</i>	Motornyomaték	[Nm]
<i>P</i>	Motorteljesítmény	[kW]
<i>t_cell</i>	Tesztcella hőmérséklet	[°C]
<i>t_ia</i>	Beszívott levegő hőmérséklet 1	[°C]
<i>t_ia</i>	Beszívott levegő hőmérséklet 2	[°C]
<i>phi</i>	Páratartalom	[%]
<i>GAH</i>	Beszívott levegő tömegáram	[kg/h]
<i>fb_val</i>	Hajtóanyag tömegáram	[kg/h]
<i>t_fuel_i</i>	Hajtóanyag hőmérséklet	[°C]
<i>c_p_fuel</i>	Hajtóanyag nyomás	[kPa]
<i>p_heic_o</i>	Töltőlevegő hűtő nyomás	[mbar]
<i>t_ic_in</i>	Töltőlevegő hűtő hőmérséklet bemenet	[°C]
<i>t_ic_out</i>	Töltőlevegő hűtő hőmérséklet kimenet	[°C]
<i>t_oil</i>	Olajhőmérséklet	[°C]
<i>c_p_oil</i>	Olajnyomás	[kPa]
<i>twi</i>	Hűtőközeg hőmérséklet bemenet	[°C]
<i>two</i>	Hűtőközeg hőmérséklet kimenet	[°C]
<i>t_turb_o</i>	Turbó feltöltő hőmérséklet kimenet	[°C]
<i>t_doc_in</i>	DOC hőmérséklet bemenet	[°C]
<i>t_doc_in</i>	DOC hőmérséklet kimenet	[°C]
<i>t_dpf_in</i>	DPF hőmérséklet bemenet	[°C]
<i>t_dpf_out</i>	DPF hőmérséklet kimenet	[°C]
<i>c_p_turb_o</i>	Feltöltő nyomás kimenet	[kPa]
<i>emersondp</i>	Nyomáskereső a kipufogórendszeren	[kPa]
<i>em_co_1</i>	CO koncentráció a kipufogógázban bemenet	[ppm]
<i>em_col_1</i>	COL koncentráció a kipufogógázban bemenet	[ppm]
<i>em_thc_1</i>	CH koncentráció a kipufogógázban bemenet	[ppm]
<i>em_ch4_1</i>	CH ₄ koncentráció a kipufogógázban bemenet	[ppm]
<i>em_nox_1</i>	NO _x koncentráció a kipufogógázban bemenet	[ppm]
<i>em_no_1</i>	NO koncentráció a kipufogógázban bemenet	[ppm]
<i>c_em_co2_1</i>	CO ₂ koncentráció a kipufogógázban bemenet	[%]
<i>c_em_o2_1</i>	O ₂ koncentráció a kipufogógázban bemenet	[%]
<i>em_co_2</i>	CO koncentráció a kipufogógázban kimenet	[ppm]
<i>em_col_2</i>	COL koncentráció a kipufogógázban kimenet	[ppm]
<i>em_thc_2</i>	CH koncentráció a kipufogógázban kimenet	[ppm]
<i>em_ch4_2</i>	CH ₄ koncentráció a kipufogógázban kimenet	[ppm]
<i>em_nox_2</i>	NO _x koncentráció a kipufogógázban kimenet	[ppm]
<i>em_no_2</i>	NO koncentráció a kipufogógázban kimenet	[ppm]
<i>c_em_co2_2</i>	CO ₂ koncentráció a kipufogógázban kimenet	[%]

<i>c_em_o2_2</i>	O ₂ koncentráció a kipufogógázban kimenet	[%]
<i>pc_codc</i>	Hígítással számított részecskeszám	[p/cm ³]
<i>pc_comw</i>	Nyers részecskeszám	[p/cm ³]
<i>pc_cos</i>	Ideális részecskeszám	[p/cm ³]
<i>pc_ints</i>	Részecskeszám eltérés	[p/cm ³]
<i>pc_pcrf</i>	Részecske hígítási tényező	[-]

Rövidítések

<i>APC</i>	AVL részecskeszámláló	[-]
<i>EEPS</i>	Motor kipufogógáz részecskeméretező	[-]
<i>SPN</i>	Szilárd részecskeszám	[#/kWh]
<i>NMVOC</i>	Nem metán illékony szerves vegyület	[-]
<i>VOC</i>	Illékony szerves vegyület	[-]
<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>CoP</i>	Teljesíteny megfelelése	[-]
<i>HEPA</i>	Nagy hatékonyságú légrészecskeszűrő	[-]
<i>GTR</i>	Globális műszaki szabályozás	[-]
<i>WHDC</i>	Harmonizált nagy teherbírású járművek tanúsítási módszere	[-]
<i>DOC</i>	Dízel oxidációs katalizátor	[-]
<i>EVF</i>	Kipufogógáz térfogatáram	[-]
<i>PMP</i>	Részecskemérési program	[-]
<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 autóiparának 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) (An et al. 2018) 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. Az emberiség primerenergia-igénye elektromos energia előállítására (18%), fűtésre (20%), közlekedésre (28%) és egyéb ipari célokra (34%) fordítódik (Key World Energy Statistics 2017). A világon megtermelt összes villamos energia 2016-ban mintegy 25 PWh volt (Enerdata 2017), 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 (Key World Energy Statistics 2017), 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-pressé, 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 károsemisszió 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. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalmi áttekintés során röviden bemutatom a dízelmotort és a kipufogógázban lévő káros anyagokat, az érvényben lévő európai uniós emissziós előírásokat, illetve a legújabb kipufogógáz utókezelő technológiákat és az emissziók kialakulását. Szakirodalmi összefoglalómat magyar és idegennyelvű publikációk, szabadalmak és kiadványok nyomán készítettem el. Illetve a több mint 7 évet felölelő mérnöki tapasztalatom alapján, melyet a japán gyökerekkel rendelkező Ibiden Hungary Kft. kipufogógáz utókezelőrendszereket vizsgáló, fejlesztő központjában szereztem.

2.1. Dízelmotor felépítése

A termodinamika I. törvénye alapján a hő az energia egyik formája. A belső és külső égésű motorok működési elvük szerint termodinamikai szempontból technikai ciklusok. A ciklus során az energia formája megváltozik, a hőenergia mechanikai munkává alakul.

Ha egy ciklus során az energia formája megváltozik, ezt aktív hőtranszportnak nevezzük. A termodinamika I. törvénye alapján megállapítható, hogy a hőenergia más energiaformává alakítható (munka, mechanikai energia), másrészt a termodinamika II. főtétele szerint ez az átalakulás (megvalósítható, valós ciklusokban) mindig veszteséggel jár, ezért a rendszer entrópiája megváltozik (Beke; 2000). A dízelmotorral érhető el a legnagyobb termikus hatásfok a belsőégésű motorok közül.

A dízelmotorban a kompresszió következtében a levegő erősen felmelegszik (500-700 °C) és ebbe a forró levegőbe bejuttatott hajtóanyag minden további gyújtószerkezet nélkül meggyullad (kompresszió gyújtás).

A fejlett dízelmotorok technológiája – közönsnyomócsöves befecskendezés

A közönsnyomócsöves hajtóanyag-befecskendező rendszer architektúrájának előnyei régóta elismertek. A korai kutatók, köztük Rudolf Diesel, olyan hajtóanyag-rendszerekkel dolgoztak, amelyek tartalmazták a modern közönsnyomócsöves dízel hajtóanyag-befecskendező rendszerek néhány alapvető jellemzőjét. Például 1913-ban szabadalmat adtak ki a nagy-britanniai Vickers Ltd.-nek egy közönsnyomócsöves hajtóanyag-befecskendező rendszerre mechanikusan működtetett befecskendezőkkel (McKechie 1913). Ugyanebben az időben Gaff szabadalmazta az Egyesült Államokban, egy elektromosan működtetett mágnesszelepeket használó, közvetlen befecskendezéses szikragyújtású motor hajtóanyag rendszerét. Az hajtóanyag adagolása a szelepek nyitvatartási idejének szabályozásával történt (Gaff 1913). Az elektromosan működtetett befecskendező szelep közönsnyomócsöves hajtóanyagrendszerű dízelmotorokon való használatának ötletét Walker és Kennedy fejlesztette ki az 1920-as évek végén, és az 1930-as évek kezdetén a kaliforniai Atlas-Imperial Diesel Engine Company alkalmazta dízelmotorra. (Walker et al. 1933) (DeLuca 2010) (Knecht 2004) (Aird 2001).

A modern közönsnyomócsöves befecskendező rendszerekkel kapcsolatos munka úttörője volt az 1960-as években a Societe des Procedes Modernes D'Injection (SOPROMI) (Huber 1969).

A dízel közönsnyomócsöves rendszerek további fejlesztése az 1980-as években kezdődött. 1985-re az egykori kelet-németországi Industrieverband Fahrzeugbau (IFA) közönsnyomócsöves befecskendező rendszert fejlesztett ki W50-es teherautójához, de a prototípus soha nem került sorozatgyártásba, és a projektet néhány évvel később abbahagyták. Körülbelül ugyanebben az időben a General Motors egy

közösnyomócsöves rendszert fejlesztett ki személygépjármű dízel motorjaihoz (Williams; 1982). A 80-as évek közepén azonban a kis teljesítményű dízelprogramjuk megszüntetésével a további fejlesztés leállt.

A Nippondenso továbbfejlesztett egy közösnyomócsöves rendszert haszongépjárművekhez (Miyaki 1988) (Miyaki 1991), amelyet a Renault-tól szereztek be, majd 1995-ben a Hino Rising Ranger teherautókban jelent meg.

1993-ban a Bosch – a Daimler-Benz nyomása miatt – megszerezte az UNIJET technológiát, amelyet eredetileg a Fiat és az Elasis (a Fiat leányvállalata) készítettek el további fejlesztés és gyártás céljából (Stumpp 1996). A Bosch személygépkocsik közösnyomócsöves rendszerét 1997-ben vezették be az 1998-as Alfa Romeo 156 (Jost 1998) és C-osztályú Mercedes-Benz modelljéhez. 2003-ban a Fiat bemutatta a 2. generációs common rail rendszert, amely ütemenként 3-5 befecskendezésre képes (Knecht 2004) (Petruzzelli 2013).

Az 1980-as évek végén, illetve az 1990-es évek elején indult fejlesztési programok célja az volt, hogy hajtóanyagrendszert fejlesszenek ki a jövőbeli dízelmotoros személygépkocsik számára. Az erőfeszítések kezdetén nyilvánvaló volt, hogy a jövőbeli dízelautók közvetlen befecskendezéses rendszert fognak használni, mivel az hajtóanyag-takarékosság és a teljesítménynövekedés egyértelműen előnyösebb volt az akkor elterjedt közvetett befecskendezéses rendszerhez képest. A fejlesztések céljai között szerepelt a benzinüzemű autókéhoz hasonló vezetési kényelem, a jövőbeli károsanyag-kibocsátási határértékek betartása és a jobb hajtóanyag-fogyasztás. A mai kor kipufogógáz utókezelő/tisztító rendszerei csak az elektronikus vezérlésű közösnyomócsöves technológiával valósíthatók meg.

2.2. Dízelmotor által kibocsátott szennyezők bemutatása

Pozitív tulajdonságai ellenére, több hátránya is van a dízel technikának. Ahogy a legtöbb fosszilis hajtóanyag, a dízel hajtóanyag is szén és hidrogén az alapvető összetevője. Ideális termodinamikai egyensúly esetén a dízelmotorban csak széndioxid (CO_2) és vízgőz (H_2O) képződne. Azonban ez a levegő-hajtóanyag arány, az égési hőmérséklet, a gyújtásidőzítés, az égéstérben lévő turbulenciák, a hajtóanyagban lévő szennyezők miatt jelentősen több káros anyag képződik (Cheng et al. 2017). A legjelentősebbek ezek közül a szénmonoxid (CO), a szénhidrogén (HC), a nitrogénoxid (NO_x) és a részecske (PM) kibocsátás, valamint kimutatható a kéndioxid (SO_2) is.

Nitrogén (N_2), Oxigén (O_2)

Az egészségre és a környezetre ártalmatlan összetevők.

Szén-dioxid (CO_2)

A CO_2 a vízzel együtt a hajtóanyag tökéletes égésének terméke. Miután a szén-dioxid törvényszerűen keletkezik a fosszilis hajtóanyagok égésekor, csökkentésének egyetlen módja a hajtóanyag-fogyasztás (felhasználás) csökkentése. A CO_2 levegőben feldúsulva fejfájást, szédülést, gyengeségérzetet, légszomjat, szapora érverést okoz. A megnövekedett légzésszám miatt további kedvezőtlen hatás, hogy megnő az egyéb belélegzett mérgező anyagok mennyisége. Környezetet károsító hatása leginkább abban nyilvánul meg, hogy üvegházhatást okoz, így a Föld felmelegedésének és klímaváltozásának egyik legfőbb kiváltója.

Víz (H₂O)

Önmagában veszélytelen összetevő. A kipufogócső végén távozik, cseppfolyós halmazállapotú víz, azonban számos mérgező komponens hordozó-, megkötő-anyagaként játszik szerepet. Így közvetetten ugyan, de káros hatásával is számolnunk kell.

Szén-monoxid (CO)

A tökéletlen égés eredménye, a nagy légfelesleggel működő dízel motorokban a képződése minimális. Színtelen és szagtalan gáz, a vér oxigénszállításért felelős hemoglobinhoz nagyságrendekkel jobban kötődik, mint az oxigén. Emiatt koncentrációs zavarokat, lelassult reflexeket és zavarodottságot (asphyxiation), végül pedig halált okoz.

Kén-dioxid (SO₂)

A hajtóanyag kéntartalmából keletkezik. A közlekedési SO₂-kibocsátás viszonylag szerény mértékű az egyéb forrásokhoz képest. Tekintettel arra, hogy a hajtóanyag-minőségtől függ, konstrukciós eszközökkel nem befolyásolható. A kén-dioxid színtelen, szúrós szagú gáz, amely könnyen cseppfolyósítható és vízben könnyen oldódik. A SO₂ főleg a légutakat ingerli, görcsös köhögést okoz. Tartós hatás esetén mérgezési tünetek (fulladásérzés, mellkasi fájdalom, hányinger, kötőhártyahurut) lépnek fel. A szabadba jutó SO₂ és SO₃ a savas esők előidézői, a motorban maradék pedig a dugattyúlerakódásokat fokozzák és korróziót okoznak.

Szénhidrogének (CH)

Az elégetlen hajtóanyagból eredeztethető. A motorban az égéstér alacsonyabb hőmérsékletű részein, a nem megfelelően magas hőmérsékletek következtében képződik (Cheng, et al; 2017). A kipufogógáz szénhidrogén összetétele sok motortényezőtől függhet, amely emisszió nagyon változatos, alkánoktól, alkénektől kezdve különböző aromás vegyületekig terjedhet. Hozzájárul a talajközeli ózon koncentrációjának növekedéséhez, ami például gyermekeknél hosszútávon mentális problémákat okozhat.

Korom részecske (PM)

Az égés eredményeképpen a dízel motorok részecske kibocsátása (PM – particulate matter) is jelentős. Különböző részecskék agglomerációjával keletkeznek, melyek a következők lehetnek:

- szén,
- részlegesen elégett hajtóanyag,
- részlegesen elégett kenőolaj,
- hajtóanyagból és kenőolajból származó hamu,
- szulfátok,
- víz,
- fém részecskék.

A sok összetevőnek köszönhetően a részecskék igen komplexek. A fentebb felsorolt anyagok általában szén központi magra adszorbeálódva hozzák létre a jellemzően 15-40 nm nagyságú agglomerátumokat, amiknek hozzávetőlegesen 90 %-a kisebb 1 µm-nél (Gallo, et al; 2016). Ha a részecskékben akarjuk kifejezni a dízel motor 10¹⁴ részecske kibocsátással bír, ami 3 nagyságrenddel magasabb mint egy benzines motor részecske kibocsátása. Az emberi egészségre káros emisszió, tüdő és légúti problémákat okozhat, és a tudomány jelenlegi állása szerint nagymértékben hozzájárulhat a rákos megbetegedések kialakulásához.

Nitrogén-oxidok (NO_x)

Általános esetben az égés során a levegőben lévő nitrogén nem lép reakcióba az oxigénnel, azonban a dízel motorokra jellemző inhomogén égés következményeképpen, 1600 °C-os hőmérséklettől kezdve a nitrogén már reakcióba lép az oxigénnel (Nada et al. 2015) és NO_x emissziót hoz létre. Az NO_x emisszió két fő összetevője az NO és a NO₂. A jelentősen toxikusabb NO normál légköri körülmények között lassan NO₂-vé alakul. A közúti forgalom okozza az antropogén NO_x kibocsátás 40-70 %-át, melynek körülbelül 85%-a pedig a dízel motoros gépjárművekhez köthető. A nitrogén oxidok savas esők és szmog képződését is elősegítik.

2.3. Kibocsátási szabványok

A 2.1 táblázatban bemutatott kibocsátási szabványok minden személygépjárműre vonatkoznak, amely menetkész tömege meghaladja meg a 2610 kg-ot. Az EU szabályozás eltérő emissziós határértékeket vezet be a kompressziós gyújtású (dízel) és a szikra gyújtású (benzin, földgáz, LPG, etanol stb.) járművekre. A dízelmotorok CO-normái szigorúbbak, de magasabb NO_x-szint megengedett. A szikragyújtású járművek az Euro V normáig mentesültek a PM szabványok alól. Az Euro V és VI szabványok esetén már a dízelmotorokkal megegyező PM-tömeg-kibocsátási szabványokat vezettek be a szikragyújtású közvetlen befecskendezésű járművekre is.

2.1. táblázat Nehézgépjárművek emissziós szabványai (Forrás: European Council)

Emissziós norma	Bevezetés dátuma	Teszt ciklus	CO	HC	NO _x	PM	PN	Füst
			g/kWh				#/kWh	-
Euro I	1992	ECE R49	4,5	1,1	8,0	0,61	-	-
Euro II	1996		4,0	1,1	7,0	0,25	-	-
Euro III	2000	ESC, ELR	2,1	0,66	5,0	0,10	-	0,8
Euro IV	2005		1,5	0,46	3,5	0,02	-	0,5
Euro V	2008		1,5	0,46	2,0	0,02	-	0,5
Euro VI	2014	WHSC	1,5	0,13	0,4	0,01	8,0×10 ⁻¹¹	-
Euro VII	2030		-	-	-	-	2,0×10 ⁻¹¹	-

A károsanyag-kibocsátást a Worldwide Harmonized Driving Cycles (WHDC) (European Council 2014), valós használati statisztikák alapján meghatározott fordulatszám és terhelés tartományokon tesztelik, görgősfékpád segítségével. A valós vezetési emissziós (RDE – Real Driving Emission) vizsgálati követelményeket 2017-től fokozatosan vezették be a járművek valós üzemben történő kibocsátásának ellenőrzésére, a laboratóriumi kibocsátási teszteken kívül. Ez a szabvány a sokat támadott, kevésbé a valós felhasználást tükröző (Kamguia et al. 2018) ESC, ELR -t (European Stationary Cycle és European Load Response) váltotta le. Mint ahogy az 2.1. táblázat alapján látszik,

az Euro 6 szabványtól kezdődően jóval szigorúbb és a valós felhasználást minél jobban szimuláló tesztciklusok kerültek bevezetésre minden szabályozási lépcsőnél.

Az előírások minden új iteráció bevezetésével szigorodtak. Ezeknek folyamatos motor és kipufogóutókezelő rendszerfejlesztésekkel lehetett csak megfelelni, ami egyre több és bonyolultabb alkatrész beszerelését is jelentette, részben ez is hozzájárul az új járművek egyre növekvő végfelhasználói árához.

A következő károsanyag kibocsátási előírás – Euro 7 – az eddigi 2025-ös bevezetését előre láthatóan 2030-ra tolták, mivel jelentős mennyiségű új elemet kíván az új szabályozás bevonni többek között gumiabroncskopás és fékpor emissziót vizsgáló ciklusokat, amelyeknek a technológiai és mérés technikai háttere még nem kellően kidolgozott. Az iparági szereplők szerint a jelenlegi - Euro 6d temp – emissziós norma kellően szolgálja a környezetvédelmet (Woodburn et al. 2021), illetve még költséghatékonyan gyártható.

2.4. Káros emissziók a kialakulási helyük szerint csoportosítva

A modern belsőégésű motorokban három helyre csoportosíthatjuk a káros emissziók kialakulását:

- Motor előtti (hajtóanyag és kenőolaj),
- Motorban lejátszódó folyamatok,
- Motor utáni emisszió (kipufogógáz utókezelő rendszer).

A motoron belüli folyamatok magukban foglalják az égésteret, annak alakját és jellemzőit, mint például a töltetösszetételt és a hajtóanyagnyomást. Itt keletkeznek olyan szennyező anyagok, mint az NO_x , CO és PM a hajtóanyag tökéletlen oxidációja révén. Az égésterben zajló eseményeket nagymértékben befolyásolják a különböző rendszerei a motornak, például a töltet nyomásért felelős rendszerek (kompresszor, turbófeltöltő) és a hajtóanyag-befecskendező rendszer. Ezeknek a rendszereknek az elsődleges célja, hogy javítsák az égési folyamatot. Miután a kipufogógáz elhagyja az égésteret, összetétele lényegében nem változik, amíg el nem éri a kipufogógáz-utókezelő rendszert (Exhaust After Treatment System, rövidítve EATS), ahol a károsanyag redukciója és konverziója történik (N_2O , NO_2 és NH_3 , PM).

2.5. Motor előtti folyamatok – hajtóanyag és kenőolaj

A hajtóanyag- és kenőanyag-tulajdonságai közvetlen hatással lehetnek a károsanyag kibocsátásra. Ezeket a hatásokat elsősorban a régebbi motorok esetében kell figyelembe venni, amelyek minimálisan vagy egyáltalán nem használnak utókezelést, ugyanis ott a nyers emisszió közel megegyezik a kipufogócső végén mért emisszióval. Azoknál az újabb motoroknál, amelyek nagymértékben támaszkodnak az utókezelő rendszerekre, hogy csökkentsék a károsanyag kibocsátást, a hajtóanyag tulajdonságainak a károsanyag-kibocsátásra gyakorolt közvetlen hatása kevésbé fontos, inkább az utókezelő rendszer élettartamát befolyásolják.

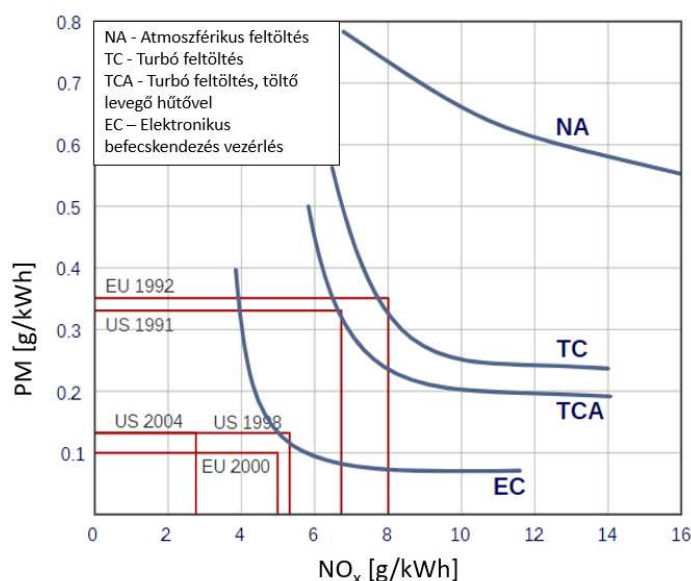
Az utókezelő rendszerek azonban különböző új szempontok megvizsgálását teszik szükségessé a hajtóanyagok és kenőanyagok tekintetében. A szennyező anyagok, például a kén és más szervesetlen elemek magas koncentrációja a hajtóanyagban súlyos negatív hatásokkal járhatnak a kipufogógáz utókezelő rendszerre nézve. Ezek a vegyületek károsíthatják a katalizátorokat, és kén esetén további részecskék képződhetnek szulfát részecskék formájában. A fémes hajtóanyag-adalékok hasonló okok miatt nem vonzóak.

Azokban a motorokban, amelyek részecskeszűrőt használnak a PM kibocsátás szabályozására, korlátozni kell a szűrőben felhalmozódó hamu mennyiségét, hogy a szűrő hatékony maradjon, megakadályozva, hogy a pórusai túl gyorsan teljenek meg hamuval; A hamu felhalmozódása befolyásolja a szűrő nyomásesését és az aktív regenerálás gyakoriságát, amelyek egyaránt befolyásolják az hajtóanyag-fogyasztást. A hamu felhalmozódását elsősorban a motor kenőanyag-fogyasztásának mértéke és a kenőolajban lévő szervesetlen elemek koncentrációja határozza meg. A részecskeszűrővel szerelt motorokat alacsony kenőolaj fogyasztásra kell tervezni, és a hamuképző kenőolaj adalékokat minimalizálni kell. Ishizaki 2018-ban kísérletezett alacsony viszkozitású olajokkal és felállított egy olyan modellt, amiben CO₂ kibocsátás, hamuképződés és költséghatékonyság hármását vizsgálta (Ishizaki 2018).

2.6. Motorban lejátszódó folyamatok

2.6.1. Nitrogén-oxidok és korom részecskék kapcsolata

A dízelmotorban a és PM kibocsátások egyidejű csökkentése különösen nagy kihívást jelent, a kialakulásuk kapcsolata miatt. A hagyományos dízel égési folyamatok során azon motortervezési módszerek, melyek a PM kibocsátás csökkentéséhez vezetnek, növelik a NO_x-kibocsátást, és fordítva. A Nitrogén-oxidok mérése és más motorjellemzőkhöz való kapcsolatát már Jánosi is vizsgálta 1988-as kutatásában (Jánosi & Kiss, 1988). A hajtóanyag befecskendezés időzítése jól ismert példa erre a viselkedésre. A késleltetett befecskendezési időzítés egy gyakori megközelítés volt a NO_x kibocsátás szabályozására olyan motorokban, amelyeknél nincs NO_x-utókezelés. Azonban ez a stratégia csak egy bizonyos pontig volt alkalmazható, Badami és csapata megállapította, hogy azon túl elfogadhatatlanul magas részecskék kibocsátásához vezetett (Badami 2003). A NO_x-PM kapcsolat koncepcióját és a 90-es évek nehéz tehergépjármű-dízelmotorjainak emissziótechnológiai fejlődését bemutató Needham kutatta és hasonlította össze, amely a 2.1. ábrán látható (Needham 1991). A kék görbék azokat a NO_x-PM kibocsátási szinteket jelölik, amelyek elérhetők voltak különböző motortechnológiákkal. A piros vonalak a nehéz tehergépjármű dízelmotorokra vonatkozó emissziós szabványokat jelölik.



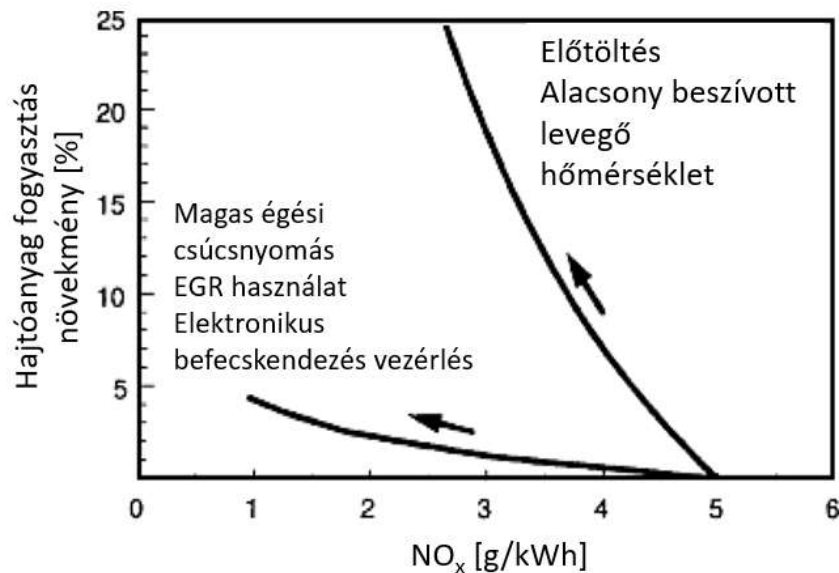
2.1 ábra NO_x-PM kapcsolat (Forrás: Needham, 1991)

A motorok különböző technológiai csoportjai között az alacsonyabb NO_x -kibocsátás érhető el a PM kibocsátás kárára. A fejlettebb motor technológiák görbéket alkotnak, amelyek fokozatosan közelednek a diagram origójához. Például a turbófeltöltött dízelmotorok görbéi (TC a 2.1. ábrán) alacsonyabb NO_x - és PM-kibocsátást mutatnak, mint a feltöltő nélküli (NA) motoroké. További emissziócsökkentés érhető el a turbófeltöltött és utóhűtött dízelmotorok (TCA) bevezetésével és az elektronikus motormenedzsment alkalmazásával. A 2.1. ábrán nem szereplő, még fejlettebb motor technológiák ugyanezen a tendencián alapulnak, és hasonló görbéket eredményeznek, de közelebb helyezkednek el a diagram origójához.

A NO_x -PM emisszió koncepció szintén is fontos szempont a dízelmotorok utókezelési stratégiáival való integrációja során (Bauer 2007). Bauer szerint két lehetséges megközelítés létezik:

- Alacsony NO_x motorkalibrációval, míg a PM emisszió-utókezeléssel történő csökkentése:
A dízelrészecskeszűrő rendszert úgy tervezték, hogy szabályozza az alacsony NO_x -motor-tervezésből származó növekedett PM-kibocsátást. A NO_x -csökkentési potenciál ebben az esetben a motor adott NO_x -PM emisszió görbéjén alapul. Mivel a dízelrészecskeszűrő technológiája jelentősen megbízhatóbb, mint a NO_x utókezelési technológiák, ezt a megközelítést számos könnyű- és nehéz tehergépjármű-motor alkalmazza.
- Alacsony PM motorkalibrációval és NO_x csökkentésre hangolt kipufogógáz utókezelő rendszer: Ez a koncepció egy NO_x utókezelő eszközt foglal magában, kombinálva egy alacsony PM/magas NO_x motor-kalibrációval. Erre a megközelítésre az Euro V-t alkalmazó nehéz tehergépjárművek szolgálnak például, amelyek karbamid alapú NO_x -szabályozó rendszert alkalmaznak PM utókezelés nélkül.

A motor kalibráció változtatása a NO_x -PM görbe mentén nemcsak az emissziókat, hanem más motorparamétereket is érint, ideértve a hajtóanyagfogyasztást is (Wall 1997). Wall már 1997-ben megállapította, hogy a túlzott NO_x csökkentésre hangolt motorvezérlési stratégiák nemcsak megnövekedett PM kibocsátással járnak, hanem a motor termikus hatékonyságát is negatívan befolyásolják, ezáltal növelve a hajtóanyag fogyasztást. Az hajtóanyag-hatékonyság romlását minimalizálhatják egyes NO_x -szabályozási stratégiák, ahogyan azt a 2.2. ábra is szemlélteti, amely a késleltetett befecskendezési időzítés és az EGR alapú NO_x -szabályozás hajtóanyag fogyasztás növekedéseit mutatja be.



2.2. ábra NO_x -csökkentő technológiák hatásai a hajtóanyag fogyasztásra (Forrás: Wall 1997)

2.6.2. Töltőlevegő menedzsment

A szívócsőbe jutó töltőlevegő menedzsment elsősorban a következőkkel foglalkozik:

1. A töltőnyomás szabályozásával,
2. A töltőlevegő hőmérséklet csökkentésével, valamint
3. A töltet összetételének szabályozásával.

A turbónyomás növelés a leggyakoribb módja annak, hogy növeljük a szívócsőnyomást, de lehetséges a kompresszoros feltöltés is, akár motormeghajtású, akár elektromosan meghajtott kompresszorral. A turbófeltöltő használata a töltésnyomás növelésére kihívásokat is felvet, például a turbófeltöltő késleltetése és az alacsony fordulatszámú nyomaték, amelyeket figyelembe kell venni. Emellett a szívócsőnyomás növelése miatt szükség lehet egy hőcserélőre a kompresszor után, hogy korlátozza a szívócső hőmérsékletét.

A hajtóanyag-égéstermék visszavezetése a kipufogógázból a leggyakoribb módszer a töltetösszetétel változtatására, de más megközelítések, például a víz befecskendezése is lehetséges.

Töltőnyomás

A modern motorok többsége turbófeltöltővel rendelkezik, ami lehet fix vagy változtatható geometriájú. A vezérlés célja a szívócsőnyomás fenntartása, az EGR-szabályozás, és a szívási veszteségek csökkentése.

A fix geometriájú turbófeltöltők áramlás-nyomás arányának nemlineáris jellege miatt alacsony motorteljesítménynél gyakran nem elegendő levegőáramot biztosítanak, ami csökkentett nyomatékhöz és növelt emisszióhoz vezethet. A problémát általában a turbina közepes motorfordulatnál adódó beszívott levegő tömegáramához tervezésével oldják meg, míg egy waste

gate (megkerülő) szelep használatával a magas motorfordulatnál felmerülő problémák küszöbölhetőek ki.

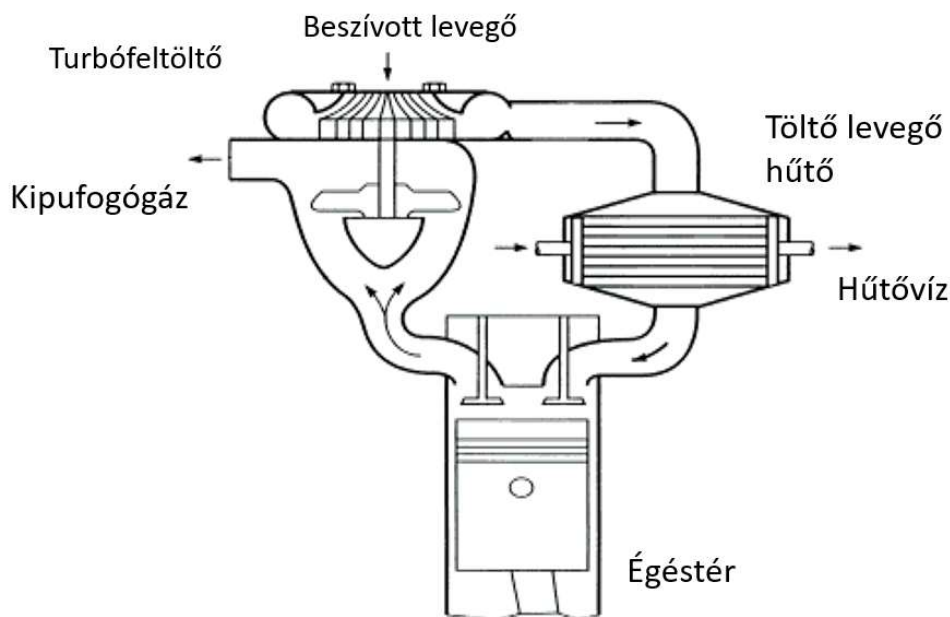
A waste gate-t pneumatikusan vagy elektromosan lehet működtetni. A pneumatikus működtetés főként a túlzott töltőnyomás vagy a turbófeltöltő túlterhelésének elkerülése érdekében használatos nagy terhelés mellett. Az elektromos waste gate függetlenül működik a szívócsőnyomástól, csökkentve a részterhelésű szivattyúzásveszteségeket, lehetővé téve a kipufogógáznak a turbina megkerülését.

A változtatható geometriájú turbófeltöltők (VGT) főként dízelmotorokban használatosak, ahol a magas nyomású EGR használata mellett különösen előnyösek. Emissziótechnikai szempontból ezek a feltöltők a legfontosabbak mivel nemcsak a jobb keverékképződést segítik elő, ezáltal csökkentve a PM emissziót, de képesek EGR működéséhez állítani töltőnyomást, ezzel a NO_x emissziót is kontrollálni. Először Dollmeyer és társai folytatták le az első független kutatást, melyben feltárta a VGT turbófeltöltők emissziótechnikai vonatkozásait (Dollmeyer et al. 2007). Későbbiekben jelentős mennyiségű tanulmány született a turbófeltöltők szabályozástechnikai finomhangolása és ennek emissziótechnikai vonatkozásai között, ezt a területet Yin és kutatócsapata tárta fel mélyebben 2022-ben (Yin et al. 2022).

Az elektromos rásegítésű turbófeltöltők olyan opciót jelentenek, amelyek elektromosan hajtott kompresszorral segítik a turbófeltöltőt vagy a turbófeltöltő teljesen elektromos hajtású és függetlenítve van a kipufogógáztól. Ebben az esetben a töltőnyomás késleltetés és az alacsony fordulatszámon jelentkező nyomatéki problémák csökkenthetőek. A kölni és bath-i tudományegyetem kutatói közösen vizsgálták meg az elektromos feltöltő lehetőségeit és kihívásait 2017-ben (Dimitriou et al. 2017). A kutatások mind emisszió, mind teljesítmény szempontjából előre mutatónak ítélte meg a technológiát, viszont gyártás gazdaságossági szempontból még aggályosnak tartotta a használatát. A mai kor személyautóiban lévő 12V-os elektromos rendszer már nem lenne képes kiszolgálni egy ekkora áramfelvételű segédberendezést. A 48V-os ajánlott rendszer viszont azt vonná maga után, hogy a jármű összes berendezését 48V-os rendszerűre kellene cserélni, amit az autóiipari beszállítói hálózat teljes termékpalettájának átalakítását kívánná meg. A másik lehetőség párhuzamosan két rendszer kiépítése, egy 12V-os és egy 48V-os. Gazdaságossági szempontok alapján egyik sem előnyös.

Töltőlevegő hűtés

A töltőlevegő hűtés egy gyakori eljárás a modern turbótöltésű dízelmotorokban, hogy szabályozzák a szívócső hőmérsékletét. A töltőlevegő-hűtők, más néven utóhűtők vagy közbenső töltőlevegő hűtők, hőcserélőként működnek, és lehűtik a turbótöltés során összesűrített szívólevegőt. Ennek első hatásait emissziótechnikai szempontból M.K.Khair vizsgálta (Khair 1993).

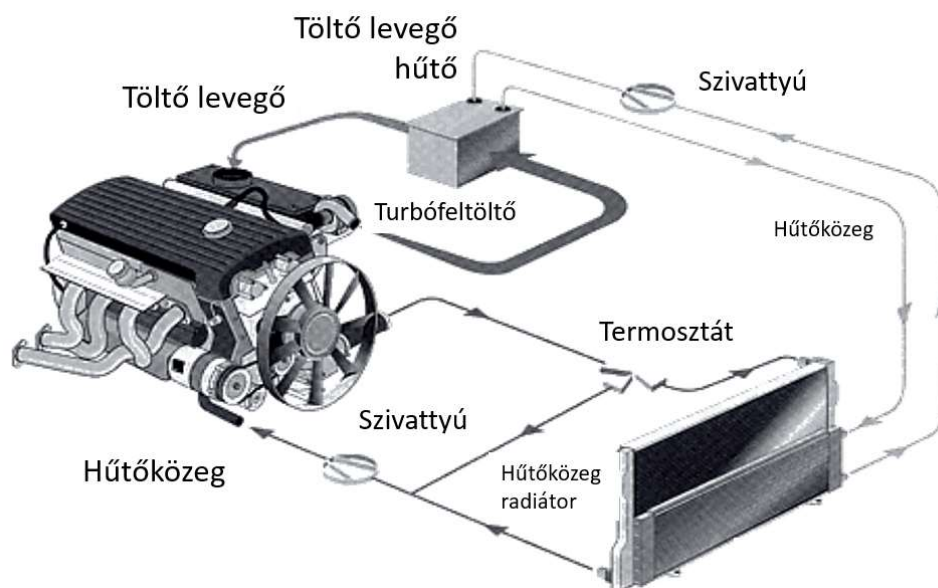


2.3. ábra Töltőlevegő hűtés (Forrás: Khair 1993)

A növelt töltőnyomás és az EGR együttes alkalmazása jelentős mértékben emeli a töltőlevegő hőmérsékletét. A sűrítés során keletkező veszteségek minimalizálása érdekében elengedhetetlen a töltőlevegő hőmérsékletének hatékony csökkentése. Ezért különféle hűtési stratégiák és technológiák alkalmazása válik szükségessé, amelyek lehetővé teszik a motor hatékonyabb működését, csökkentve ezzel a sűrítés által okozott veszteségeket és optimalizálva a teljes teljesítményt. A töltőlevegő hőmérsékletének kontrolált csökkentése révén a motor teljesítménye javul, miközben minimalizáljuk a környezetkárosító NO_x és PM kibocsátásokat és növeljük az hajtóanyaganyag-hatékonyságot. Ezen kívül az optimalizált hőmérsékleti viszonyok kialakítása lehetővé teszi a motor számára, hogy hatékonyan alkalmazkodjon a különböző üzemi feltételekhez és terhelési viszonyokhoz. A 2.3. ábrán egy széleskörben alkalmazott közbelső töltőlevegő hűtővel felszerelt motor sematikus ábrája látható.

A legtöbb esetben nem a környezeti levegőt használják közvetlenül a töltőlevegő hűtéséhez egy levegő-levegő hőcserélőben, hanem egy alacsony hőmérsékletű folyadék hűtőkört alkalmaznak, ami elkülönül a motortól (lásd a 2.4. ábra). Ez lehetővé teszi, hogy a töltőlevegőt olyan hőmérsékletre hűtsék, ami hasonló a hagyományos levegő-levegő hűtővel elért hőmérsékletekhez. Bár ez a megközelítés növeli a töltőlevegő-hűtési rendszer költségét és bonyolultságát, csökkenti a nyomásvesztéseket a töltőlevegő-hűtési rendszerben. Pantow és Krueger vizsgálta az első fejlett vezérlésű levegő-folyadék hőcserélővel rendelkező rendszereket (Pantow 2001) (Krueger 2008).

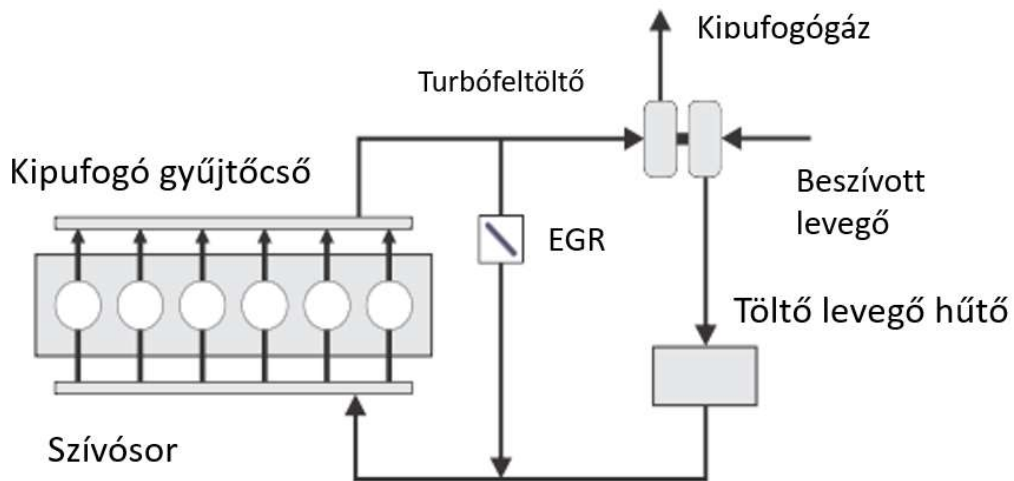
2021-ben Yu (Yu et al, 2021) állított fel egy modellt melyben a folyadékhűtéses töltőlevegő hűtő és a dízelmotor kipufogógáz emisszióinak kapcsolatát vizsgálta. A modell megállapította, hogy 8%-os hatékonyság növelés érhető el emisszió csökkentésben vízhűtéses töltőlevegő visszahűtővel a léghűtéseshez képest.



2.4. ábra Levegő-folyadék hőcserélővel ellátott töltőlevegő visszahűtő (Forrás: Krueger 2008)

Kipufogógáz visszavezetés

Az hajtóanyagok égése során keletkező nitrogén-oxid (NO_x) kibocsátásának csökkentésére régóta ismert és jól bevált módszer az úgynevezett kipufogógáz visszavezetés (EGR – Exhaust Gas Recirculation) mind a szikrázó gyújtású, mind pedig a dízelmotorok esetében. Az első független, EGR-t érintő emissziótechnikai kísérleteket Ropke végezte 1995-ben (Ropke 1995). A hűtött EGR és a karbamid alapú katalizátorok (SCR) együttes használata már megfelelő NO_x csökkenést idéz elő, hogy az Euro VI-os előírásnak is megfeleljenek az egyes motorok. A két rendszer együttes NO_x hatásait már Verbeek és csapata is vizsgálta 2001-ben (Verbeek et al. 2001). Az EGR rendszer vázlata egy turbófeltöltött motor esetében látható a 2.4. ábrán. A kipufogógáz egy része visszavezetésre kerül, és összekeveredik a motor töltőlevegőjével. A rendszer egy magasnyomású EGR rendszer, ami azt jelenti, hogy a visszavezetett gáz a turbófeltöltő előtti területről kerül ki, majd összekeveredik a tömörített töltőlevegővel a töltőlevegő hűtő után (Ford 2002) (Ford 2006). Egy alacsony nyomású EGR rendszer is alkalmazható, ahol az EGR a turbó utáni területről van visszavezetve, majd alacsony nyomású levegővel keveredik. Sok magasnyomású EGR rendszer tartalmazhat EGR hűtőt is. Ez csökkentheti a töltőlevegő hűtő méretét, viszont egyértelműen növeli a gyártási költségeket. 2020-ban Piqueras 6 munkaponton hasonlította össze a kis és nagynyomású EGR rendszereket, melyek között kis különbséget vélt felfedezni NO_x csökkentés tekintetében (Piqueras et al. 2020).



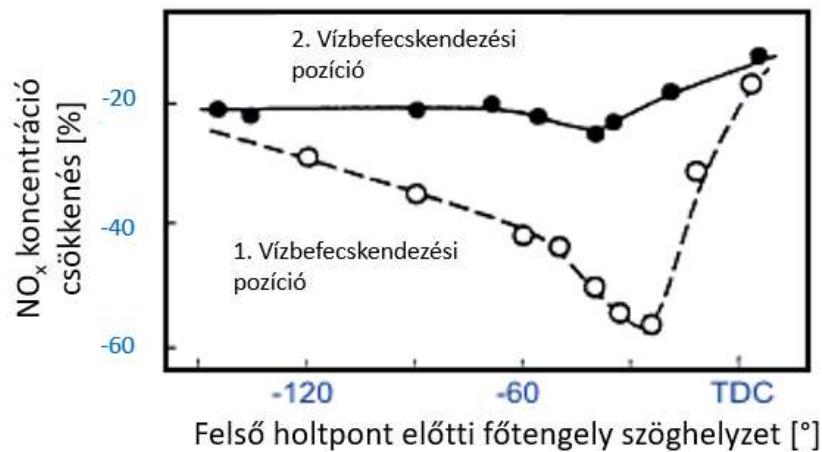
2.4. ábra Nagynyomású EGR rendszer (Forrás: Piqueras et al. 2020)

Víz befecskendezés

A víz hozzáadása a szívócsövön keresztül a töltőlevegő összetételének megváltoztatására is használható. Hasonlóan az EGR-hez, a víz befecskendezése egy viszonylag inert anyagot vezet be a szívócsőbe, amely hőt von el a égési hőmérséklet csökkentése érdekében. A folyékony víznek az a további előnye is, hogy viszonylag magas párolgáshővel rendelkezik, amelyet ki lehet használni elpárolgatáskor. A vízbefecskendezést mind a dízel-, mind a benzinmotorokban alkalmazzák, bár különböző céllal. A dízelmotorokban a vízbefecskendezést elsősorban a NO_x képződésének csökkentésére használják. A vizet a motorhengerbe az alábbi módszerek egyikével lehet bevezetni:

- Közvetlen befecskendezés,
- Szívócső befecskendezés,
- Víz-hajtóanyag emulzió.

Habár mindhárom rendszer elérhető kereskedelmi forgalomban, bonyolultságuk és bekerülési árak miatt sosem terjedtek el a személy és nehézgépjárműveknél. Miyamoto 1995-ben kezdte kutatni a közvetlen víz befecskendezés és a NO_x emisszió kapcsolatát (Miyamoto et al, 1995). Megállapította, hogy a megfelelő főtengelyszögben történő befecskendezéssel, akár felére csökkentheti a NO_x emissziót, eredményei a 2.5. ábrán láthatóak.



2.5. ábra A vízbefecskendezés hatása a NO_x emisszióra (Forrás: Miyamoto et al, 1995)

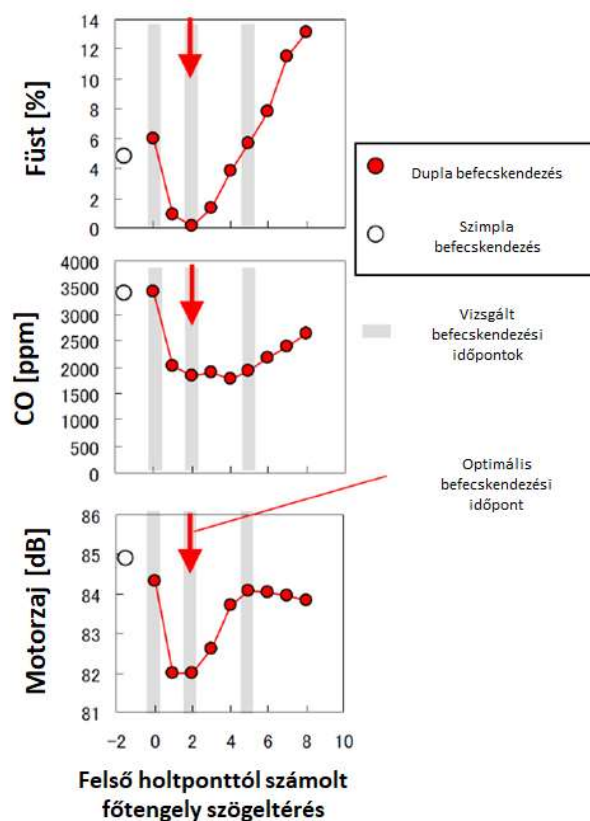
Szőllősi D. 2023-ban folytatta a vízbefecskendezés kipufogógáz emisszióra gyakorolt hatásainak kutatását (Szőllősi & Kiss 2023). Kísérletei során nem csak NO_x -t, hanem a gáznemű és szilárd szennyezők teljes spektrumát mérte. Eredményei alapján a vízbefecskendezés fontos szerephez juthat a jövő kipufogógáz csökkentési stratégiái során.

2.6.3. Hajtóanyag ellátás

A modern dízelmotorok hajtóanyag-befecskendező rendszerei elsősorban közösnyomócsöves típusúak, ahol a hajtóanyagot egy magas nyomású cső osztja le az injektorokhoz. Az injektorokat a motor vagy hajtáslánc vezérlő egysége (ECU) működteti, és mágnesszelep vagy piezoelektromos aktuátoros szórófejekként működnek. Ezen rendszerek nagyon rugalmasak, különféle többszörös injekciós stratégiákat tesznek lehetővé, melyek hozzájárulhatnak a kipufogógáz emissziók további csökkentéséhez.

Befecskendezési időzítés

A NO_x és PM kibocsátások csökkentése jelentős technológiai/gazdasági kihívások elé állítja az autóipart. A szennyező anyagok redukcióját hatékony motorvezérlési stratégiákkal és kipufogógáz utókezelő rendszerrel lehet elérni. A hengerben történő égési folyamatok optimalizálásával elérhető korom és szén-monoxid csökkentését az égéstermékben már 2014-ben is vizsgálta a Toyota központi kutatás-fejlesztési laborja (Fuyuto et al. 2014). A kettős főbefecskendezéssel elérhető pozitív eredményeket már az elő tanulmányt jegyző Kuzuyama és kutató csapata (Kuzuyama et al. 2012) is bizonyította. Kuzuyama azonban a kettős befecskendezés legnagyobb gyengeségének az időzítésre való érzékenységet nevezte meg. Két évvel később Fuyuto a számítástechnika háttér fejlődése miatt ki tudott fejleszteni egy olyan rendszert, mely képes a tökéletes időzítésre, ezzel befejezve Kuzuyama kísérletét. Fuyuto végül $\sim 3^\circ$ főtengely szög eltolással határozta meg a két befecskendezést, illetve nem várt eredményként a motor zajt is sikerült csökkenteni, melyek a 2.6. ábrán láthatóak.



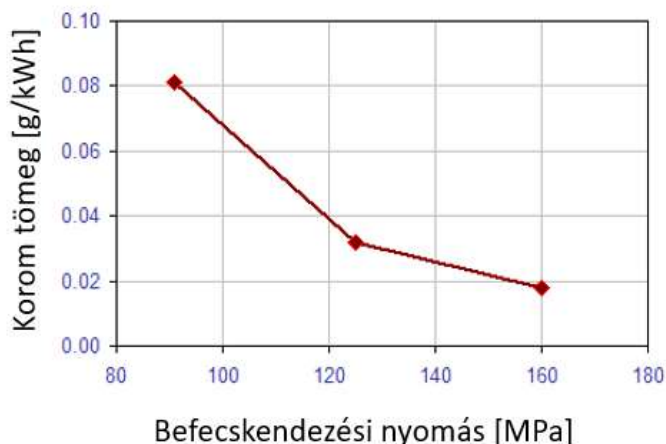
2.6.ábra Befecskendezési időpontok meghatározása (Forrás: Fuyuto, 2014)

Égetéssel történő csökkentésére irányuló egyesített erőfeszítések módosítása, valamint a kipufogógáz utókezelő berendezések csak megkönnyítenék a kívánt kibocsátási célok elérését. A szelektív katalitikus redukciós technológia kötelező rendszer, amely a karbamid vizes oldatából ammóniát használ reakcióba lép NO_x -al, nem mérgező melléktermékeket képezve. Az SCR-rel való redukálás is nagy mennyiségű ammóniát igényel. Ezért elengedhetetlen az Adblue ésszerű felhasználása az SCR rendszer üzemeltetési költségeinek csökkentése érdekében. SCR hatékonyság arányosan növekszik a kipufogógáz hőmérsékletével, illetve egy minimális hőmérséklet alatt a NO_x redukció nem valósul meg. 2019-ben Muthusamy megállapította (Muthusamy et al. 2019), hogy olyan körülményekhez, mint a hidegindítás és az alacsony üzemi hőmérsékletű felhasználás, előfordulhat, hogy az SCR nem hatékony, mivel $200\text{ }^\circ\text{C}$ -os kipufogógáz hőmérséklet alatt a termolízis nem tud végbe menni, így redukciós hatékonysága meglehetősen alacsony (Hawley et al. 1998). Az égés optimalizálása (Shrivastav et al. 2002) az egyetlen módja a NO_x csökkentésének ilyen esetekben. Ennek elérésére a hajtóanyag nyomócső nyomás és a kipufogógáz visszavezető szelep különböző munkapontokon való NO_x kibocsátásra gyakorolt hatásait már O'Connor és Inagaki is vizsgálta (O'Connor et al. 2014) (Inagaki et al. 2011), kutatási eredményeiket áttekintve egyértelműen látszik, hogy jelentős NO_x redukció érhető el. Habár nem térnek ki arra, illetve nem lett megkülönböztetve, hogy az NO vagy NO_2 koncentráció csökken, ami pedig különösen fontos aspektus a DPF passzív regenerációja kapcsán.

Befecskendezési nyomás

A modern dízel hajtóanyag-befecskendező rendszerek rendkívül magas befecskendezési nyomásokat alkalmaznak; néhány esetben jóval 200 MPa felett is (Breitbach 2002). A magas nyomás különösen fontos a közvetlen befecskendezésű motorokban, hogy a hajtóanyag beporlasztás megfelelően kis

átmérőjű cseppekben történjen meg a jobb keverékképződés, majd az égés után kisebb mennyiségű korom égéstermék eléréséhez. A befecskendezési nyomás és a PM kibocsátás kapcsolata a 2.7. ábrán látható.



2.7.ábra Befecskendezési nyomás hatása a PM kibocsátásra (Forrás: Siebers 1998)

Ellentétben azzal a széleskörben elterjedt megállapítással, hogy a hajtóanyag befecskendezési nyomás növelésével a PM emisszió fordítottan arányosan változik. Siebers már 1998-ban bizonyította, hogy bár egy bizonyos szintig szinte lineárisan csökken PM, nagyjából 160 MPa nyomásnál szaturálódik a nyomásnövelés hatása a PM emisszióra (Siebers 1998). Az esetleges további finomítások az hajtóanyagpermet szétesésében és atomizálásában, amelyeket a magasabb befecskendezési nyomások eredményezhetnek, csak másodlagos fontosságúak lennének azokhoz képest, amelyek az hajtóanyag és a levegő tömeges keveredésének javulásából származnak. Az hajtóanyag-befecskendezési nyomás változásai más paraméterek, például az hajtóanyag-befecskendezési sebesség és az injektálási időtartam változásait is eredményezhetik (Senecal et al. 2000) (Senecal et al. 2002).

Az emelkedő befecskendezési nyomások egyik fő hajtóereje az EGR használata a NO_x -kibocsátás csökkentéséhez. Ahogy a motorok egyre magasabb EGR-szinteket használnak, a relatív oxigéntartalom csökken, és magasabb befecskendezési nyomások szükségesek a tüzelőanyag és a levegő/EGR magasabb szintű keveredésének eléréséhez. A növekvő keveredés biztosítja, hogy elegendő oxigén jut az égő hajtóanyagpermetbe annak érdekében, hogy kiegyenlítse a potenciális koromkibocsátás növekedését. 2019-ben Kim és kutatócsapata igazolta több dízel hajtóanyag típussal, hogy a nyomásnöveléssel a CO és PM szintek csökkennek, míg a NO_x növekszik, nem számottevően befolyásolva a dízelolaj bioanyag tartalmától (Kim et al. 2019). Ez fontos megállapítás, hiszen az európai piacon 7%-os energiatartalomig bioanyagot kell tartalmazzon minden kereskedelmi forgalomban kapható dízelolaj.

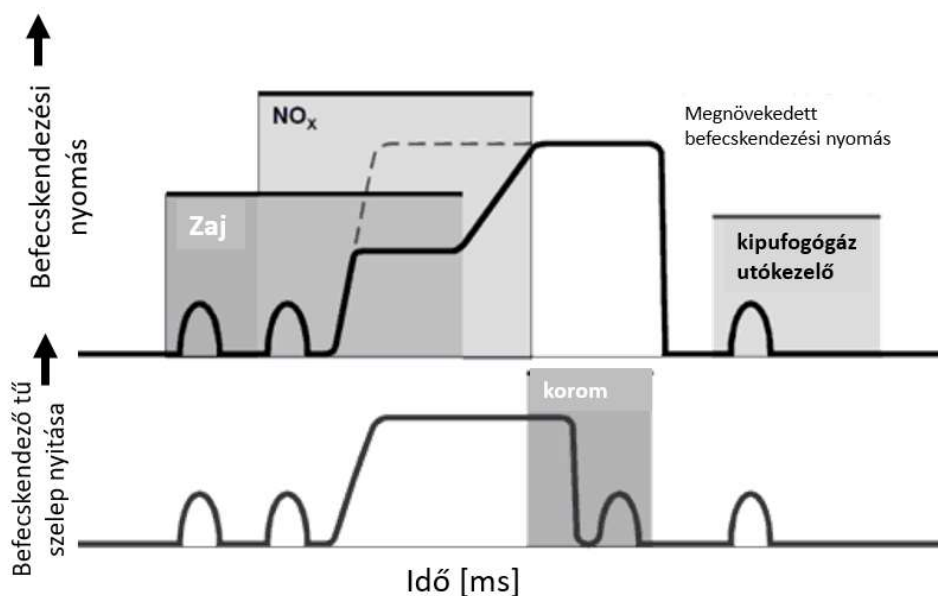
Többszörös befecskendezés

Az elektronikus hajtóanyag-befecskendező rendszerek nemcsak lehetőséget biztosítanak több befecskendezésre egy ütem során, hanem lehetővé teszik az hajtóanyagbefecskendezés sebességének változtatását befecskendezés közben is. Mahr foglalta össze egy 2002-es tanulmányban az

elektronikus befecskendezés vezérlés előnyeit az emissziótechnikában (Mahr 2002). Egy példát, amely összefoglalja a lehetséges opciókat, a 2.8. ábrán láthatunk.

A különböző befecskendezési stratégiák és hatásuk a különböző emisszió komponensekre:

- Egy vagy két előbefecskendezés alacsony nyomáson a zaj és a NO_x -kibocsátás csökkentése érdekében.
- A NO_x -kibocsátás további csökkentése érdekében nyitott befecskendező szelep mellett növelhető a befecskendési nyomás.
- Utóbefecskendezéskor a hajtóanyag nem az égéstérben, hanem az oxidációs katalizátorban ég el, ezzel megnövelve a kipufogógáz hőmérsékletét, javítva a DPF regenerációs hatékonyságát. Az előbbi megoldás csak személyautóknál terjedt el, nehéz gépjárművek külön befecskendező szelepet alkalmaznak a kipufogórendszerben.



2.8.ábra Többszörös befecskendezés hatása a káros emissziókra

Mei 2021-ben megállapította, hogy míg az egyszeri előbefecskendezés nagy mennyiségű hőképződéshez és ezáltal NO_x emisszió növekedéshez vezetett, míg 2 gyors egymás utáni befecskendezés mind a NO_x , mind a PM emissziót képes csökkenteni (Mei et al. 2021).

2.6.4. Égéstér kialakítás

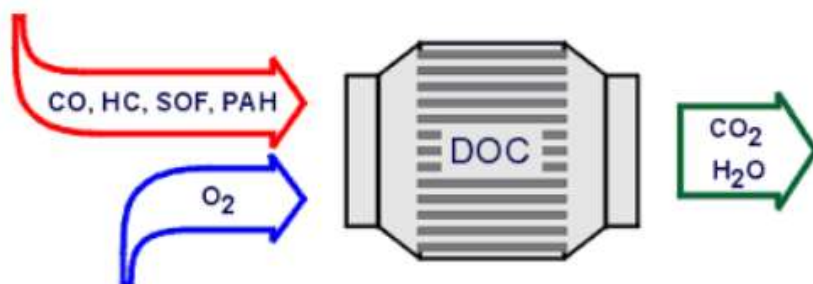
Az égéstér geometriájának kialakítása kiemelt jelentőséggel bír a dízelmotorok károsanyag kibocsátásának és hatékonyságának tervezése során. A megfelelő keverék kialakításához az égés kezdetén nemcsak kritikus, hanem az optimális hajtóanyag-égés szempontjából is elengedhetetlen. Az égéstér alakjának meghatározó szerepe van abban, hogy a hajtóanyag égése ideális módon történjen, és a koromképződés minimalizálódjon azáltal, hogy az égés befejeződése előtt a keletkező korom oxidálódik. Durrett 2008-ban 3 különböző dugattyú kialakítást hasonlított össze, hogy

megállapítsa CFD modellezés segítségével az alacsony PM kibocsátás szempontjából a legelőnyösebbet (Durrett 2008). Továbbá fontos elkerülni a kenőolaj égéstérbe jutását, mivel bizonyos fémes adalékai az égés során hamuvá alakulnak. Amelyek nem éghetőek ezáltal leülepednek DPF-ben, jelentősen csökkentve az élettartamát. Ezért szükséges a dugattyúgyűrűket, a szívó- és kipufogószelepszárazakat, a turbófeltöltőt és a kartergáz szellőztetést is ennek megfelelően tervezni. Gehrke nyitott és zárt kartergáz szellőztetővel nyers emissziós kísérleteket végzett, amely átlagosan 3-5%-os PM emisszió növekedést mutatott zárt szellőztetéssel, ezzel is bizonyítva a kartergáz emissziótechnikai jelentőségét (Gherke, 2009). A N_2 gáz alapvetően inert, csak különösen nagy hőmérsékleten és nyomáson oxidálódik és alakul nitrogén-oxiddá. Ezért kiemelt jelentőségű a motorvezérlési stratégia kialakításakor a 2200 K feletti hőmérsékleti zónák kialakulásának elkerülése. Reitz 2009-ben vizsgálta az alacsony hőmérsékletű zónák milyen arányban befolyásolják a dízelmotor termikus hatékonyságát (Reitz et al. 2009).

2.7. Motor utáni emisszió - kipufogógáz utókezelő rendszer

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek a most sorozatgyártásban lévő dízel kipufogógáz utókezelő rendszerek katalizátorai.

2.7.1. Dízel oxidációs katalizátor (Diesel Oxidation Catalyst - DOC)

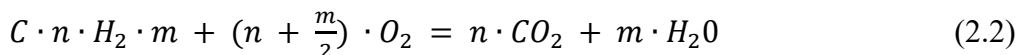


2.9.ábra Dízel oxidációs katalizátor, bemenő és redukált, kimenő gáz komponensek (Russell, 2011)

A dízel oxidációs katalizátor (DOC) elnevezését annak köszönheti, hogy elősegíti a kipufogógáz-alkotóelemei oxidációját, amely nagy mennyiségben van jelen a dízel kipufogógázban, legnagyobb részben a káros szénhidrogének ártalmatlanításában szerepe. Az oxidációs katalizátoron áthaladva a szén-monoxid (CO), a gázfázisú szénhidrogének (HC), a dízel részecskék oldható szerves frakciói (SOF) Solvable Organic Fraction, valamint a nem szabályozott kibocsátások, például aldehidek vagy policiklusos aromás szénhidrogének (PAH) Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, ártalmatlan végtermékké oxidálódhatnak a DOC segítségével. A modern dízel kipufogógáz utókezelő rendszerekben a DOC egyik legfontosabb feladata a nitrogén-monoxid (NO) nitrogén-dioxiddá (NO₂) oxidálása - ami olyan gáz, amely az NO_x redukciójához használt dízel részecskeszűrők és SCR katalizátorok maximális teljesítményének eléréséhez szükséges. A DOC reakcióit, reakciókinetikáját és az NO → NO₂ konverziójának hatásait Ambs és kutatócsapata átfogóan vizsgálta (Ambs et al. 1993).

A dízel oxidációs katalizátor reakciójának mechanizmusa azzal magyarázható, hogy a katalizátor hordozó felületén aktív katalitikus bevonat található, amelyek képesek oxigént adszorbeálni. A katalitikus oxidációs reakció általában a következő három lépést tartalmazza:

Oxigén kötődik egy katalitikus felülethez, a reagensek, mint például a CO és a szénhidrogének, diffundálnak a felszínre és reagálnak a megkötött oxigénnel, és reakciótermékek, például CO₂ és vízgőz de-adszorbeálódik a katalitikus felületről és diffundálnak a kipufogógáz egy részébe. A szénhidrogének és a CO dízel-emissziójának oxidációja a következő kémiai reakciókkal írható le:



A szénhidrogéneket oxidálva szén-dioxiddá és vízgőzzé alakulnak, amint azt az (2.1) reakció vagy - sztöchiometrikusan - az (2.2) reakció írja le. Valójában az (2.1) és (2.2) reakció két folyamatot képvisel: a szénhidrogének gázfázisú oxidációját, valamint a vegyületek szerves frakcióinak oxidációját. A (2.3) reakció leírja a szén-monoxid szén-dioxiddá történő oxidációját. Mivel a szén-dioxidot és a vízgőzt ártalmatlannak tekintjük, a fenti reakciók nyilvánvaló káros emisszió csökkenéssel járnak (Russel, et al., 2011). A szénhidrogének oxidációja a dízel kipufogógáz jellegzetes szagának csökkenését is eredményezi.

Az oxidációs katalizátor azonban elősegíti az összes redukáló jellegű vegyület oxidációját; az oxidációs reakciók némelyike nem kívánt melléktermékeket képes előállítani, és valójában kontraproduktív lehet a katalizátor céljával szemben (Russel et al. 2011). A kén-dioxid kén-trioxiddá történő oxidációja, ami a (2.4) és (2.5) reakcióban leírt kénsav (H₂SO₄) képződését vonja magával, ez a legkárosabb ezen folyamatok közül.



Amikor a kipufogógázok a kipufogócsőből távoznak és levegővel keverednek, a környezetben a hőmérsékletük csökken. Ilyen körülmények között a gáz halmazállapotú H₂SO₄ vízmolekulákkal és koromrészecskékkel kombinálva hidratált kénsavból álló részecskéket képez. Ez az anyag, az úgynevezett szulfát részecskék hozzájárulnak a motor teljes részecske kibocsátásához. A szulfátok katalitikus képződése, különösen a magas kén tartalmú dízelhajtóanyagokkal együtt, jelentősen megnövelheti a teljes PM-emissziót (Allansson et al. 2004) és ezáltal a katalizátor igénybevétele túlságosan megnövekedhet.

Az NO oxidációja NO₂-re elengedhetetlen a modern dízel-kibocsátás-szabályozó rendszerek működéséhez, ahol a DOC egy kiegészítő katalizátor, amely támogatja az egyéb típusú - az oxidációs katalizátor mögött elhelyezkedő - katalizátorok teljesítményét, amelyek megnövelt NO₂/NO arányt igényelnek, ahogy a (2.6) egyenletben látható.



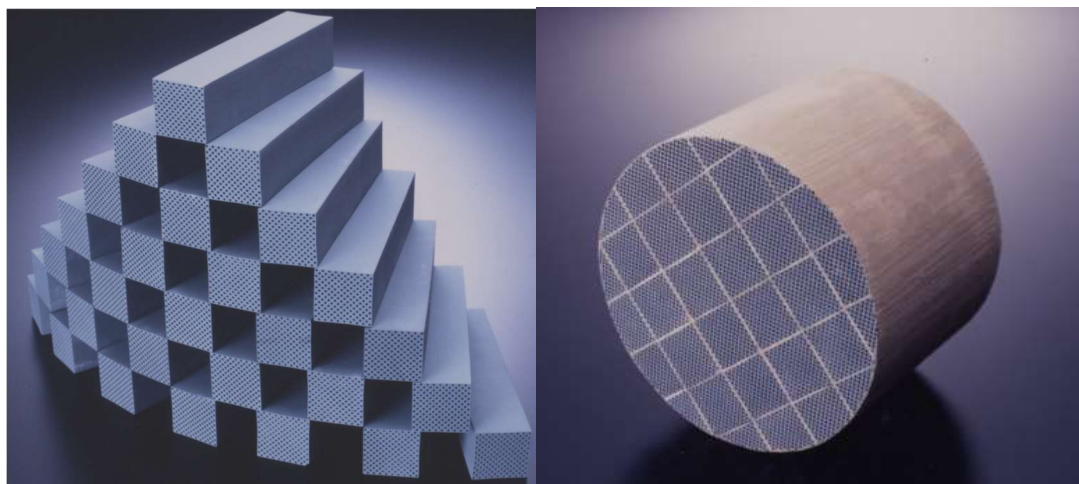
A nitrogén-dioxidra többféle SCR katalizátor teljesítményének fokozásához, valamint a dízel részecske-szűrők (DPF) passzív regenerációjának elősegítéséhez van szükség. A DPF/SCR alkalmazásokban használt DOC-kat általában a magas NO₂-termelésre (Cooper, et al. 1989) optimalizálják. Cooper az amerikai Johnson Matthey vegyipari gyártó- és kutató vállalat alkalmazásában szabadalmaztatta az erre épülő nemesfémes bevonatot tartalmazó technológiáját,

melyet bő két évtizeddel a megalkotása után tömegesen kezdtek alkalmazni az autóipari beszállítók (Cooper et al. 1990).

Az oxidációs katalizátorokkal megnövekedett NO_2/NO arány - bár elengedhetetlen a dízel utókezelő rendszerek működéséhez - szintén viták forrása. A NO_x -kibocsátás két komponense közül az NO_2 nagyobb toxicitást mutat, mint az NO . Egyes alkalmazásokban a megnövekedett NO_2 -kibocsátás hozzájárulhat a levegőminőség problémáihoz (Russel et al. 2011). Összefoglalva, amennyiben a kipufogógáz áramlási irányában lévő további katalizátorok jól vannak beállítva, abban az esetben a megnövelt NO_2 koncentráció pozitív hatású ugyanis mind a DPF mind az SCR működéséhez elengedhetetlen. Viszont amennyiben rosszul optimalizált a rendszer, a megnövekedett NO_2 kibocsátás a környezeti levegőbe, súlyos környezet és egészségkárosodást okozhat. Egyes kutatások arra engednek következtetni (Russel et al. 2011), hogy a kipufogócsőből távozó NO , a környezeti levegő oxigén tartalmának és közvetlen napfénynek köszönhetően oxidálódhat, mely hatására, ahogy az (2.5) egyenletben látható NO_2 keletkezik.

2.7.2. Dízel részecskeszűrő (Diesel Particulate Filter - DPF)

A dízel részecskeszűrők (DPF) Diesel Particulate Filter, olyan eszközök, amelyekben akkumulálódnak a dízel kipufogógázban lévő koromrészecskék, hogy megakadályozzák a légkörbe történő kibocsátásukat. Dízel részecskeszűrők magas szűrési hatékonyságúak, meghaladják a 90% - ot kordierit anyag esetén, míg R-SiC – rekrisztallizált szilícium karbid esetében a 99%-ot, valamint jó mechanikai és hőállósággal rendelkeznek. A japán Ibiden fejlesztő központját vezető Ohno, számos kísérletet végzett, amelyek során a fent említett tulajdonságait vetette össze az Ibiden által fejlesztett R-SiC anyagú szűrőnek más fejlesztési irányú megoldásokéval (Kazushige 2006).

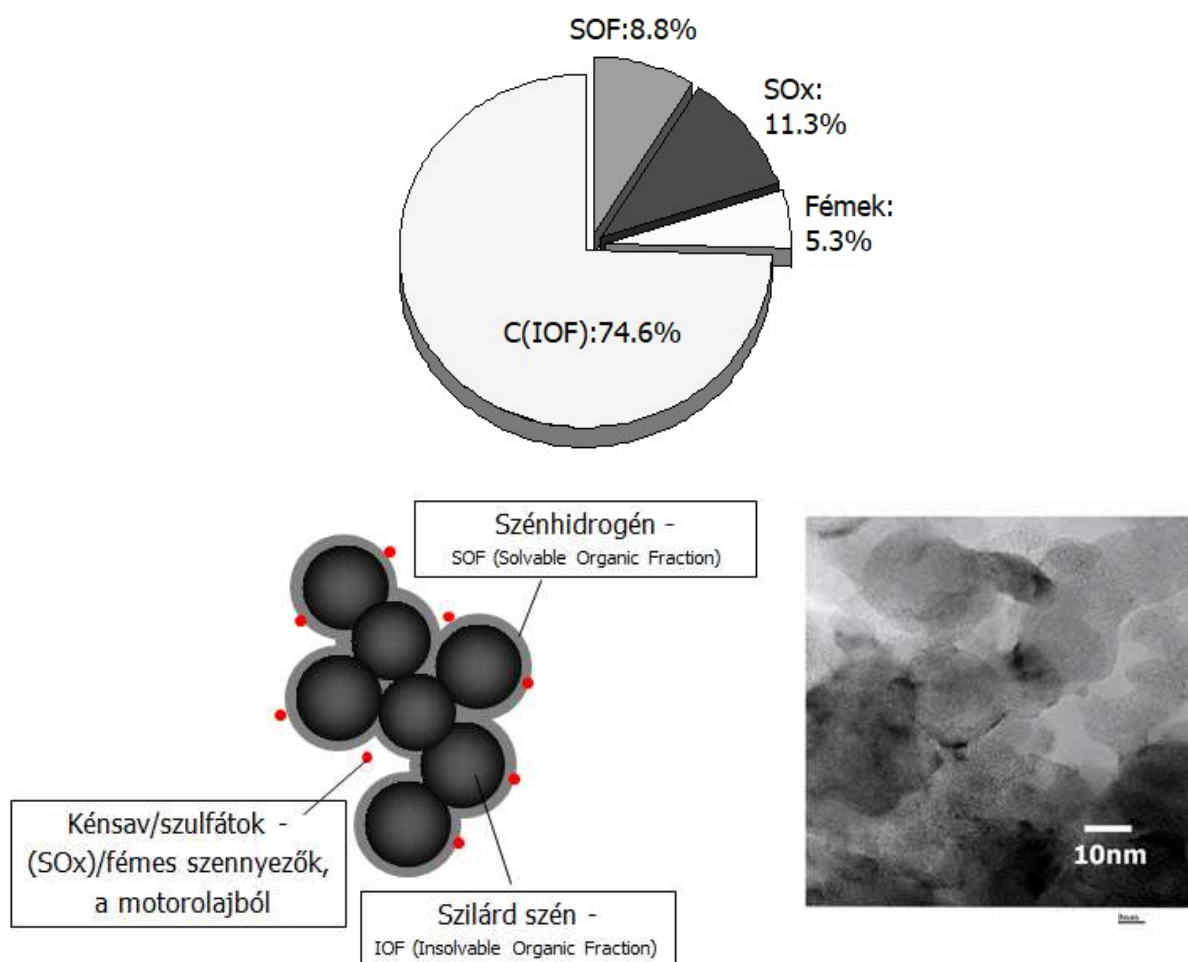


2.10. ábra IBIDEN rekrisztallizált- szilícium karbid (R-SiC) DPF (jobb) és a részeit képező extrudált unit-ok (bal) (Forrás: IBIDEN Hungary Kft.)

Az eredmények egyértelműen arra utalnak, hogy habár az R-SiC szűrő előállítási költsége jelentősen magasabb a versenytársakéhoz képest, mind szűrési hatékonyság mind, élettartam szempontjából kedvezőbb eredményeket produkál.

Össességében a dízel részecskeszűrők a leghatékonyabb technológiává váltak a dízel részecskékibocsátás csökkentésében.

A DPF hatékonyan képes szabályozni a dízel részecskék szilárd részét, beleértve az elemi szenet (korom) és a kapcsolódó fekete füst kibocsátást. A szűrők hatékonysága korlátozott, vagy teljesen hatástalan lehet a részecske (PM) – Particulate Matter kibocsátás nem szilárd frakcióinak - a szerves frakció és szulfát részecskék – csökkentésében (Czerwinski et al. 2015).



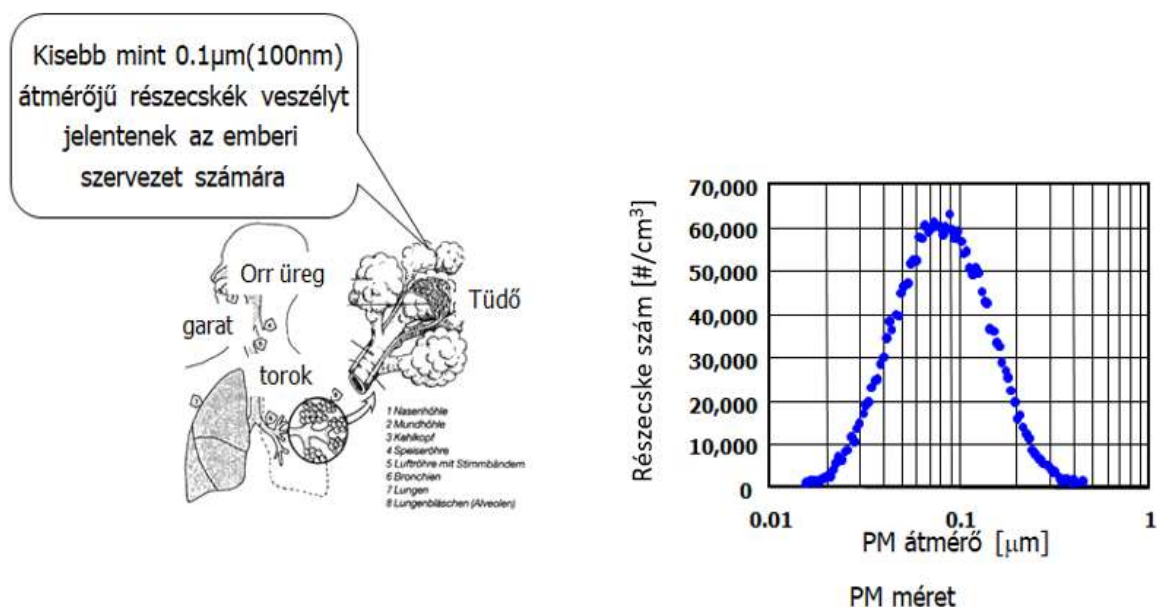
2.11. ábra PM alkotórészei (bal), PM transzmissziós elektronmikroszkóp felvételen (jobb) és PM alkotóinak eloszlása (fent) (Forrás: IBIDEN Hungary Kft. Technical Center)

Sztöchiometrikusan tökéletes égés esetén a szénhidrogének hő hatására reakcióba lépnek a töltetben lévő oxigénnel, így széndioxid és tiszta víz jönne létre, lásd. (2.1) képlet. Azonban a valóságban tökéletlen égés eredményeképpen, a dízel motorok részecske kibocsátása jelentős (Keenan 2017). Ezek különböző részecskék felhalmozásával keletkeznek, melyek a következők lehetnek:

- szén,
- részlegesen elégett hajtóanyag,
- részlegesen elégett kenőolaj,
- hajtóanyagból és kenőolajból származó hamu,
- szulfátok,
- víz,

- fém részecskék.

A sok összetevőnek köszönhetően a részecskék igen komplexek. A fentebb felsorolt anyagok általában szén központi magra adszorbeálódva hozzák létre a jellemzően 15-40 nm nagyságú agglomerátumokat, amiknek hozzávetőlegesen 90 %-a kisebb 1 μm -nél. Ha részecskékben akarjuk kifejezni a dízel motor 10^{14} részecske kibocsátással bír, ami 3 nagyságrenddel magasabb, mint egy benzines motor részecske kibocsátása. Az emberi egészségre káros emisszió, tüdő és légúti problémákat okozhat, és a tudomány jelenlegi állása szerint nagymértékben hozzájárulhat a rákos megbetegedések kialakulásához. A dízel részecskék környezeti levegőbe jutásának megakadályozása a humán egészségmegőrzés szempontjából kiemelten fontos. Azon dízel részecskék melyek 100 nm (0,1 μm) alatti átmérővel rendelkeznek könnyűszerrel bejutnak a tüdőn keresztül az emberi szövetekbe ezáltal a szilárd szén magon felhalmozódott szennyezők könnyűszerrel kioldódnak. A nyers kipufogógázban a dízel részecskék fele 100 nm alatti, vagyis potenciálisan bejuthat a szervezetbe, lásd 2.12. ábra.



2.12. ábra Emberi légzőrendszer, koromrészecske átmérő szerinti eloszlás diagramja (Forrás: IBIDEN Hungary Kft. Technical Center)

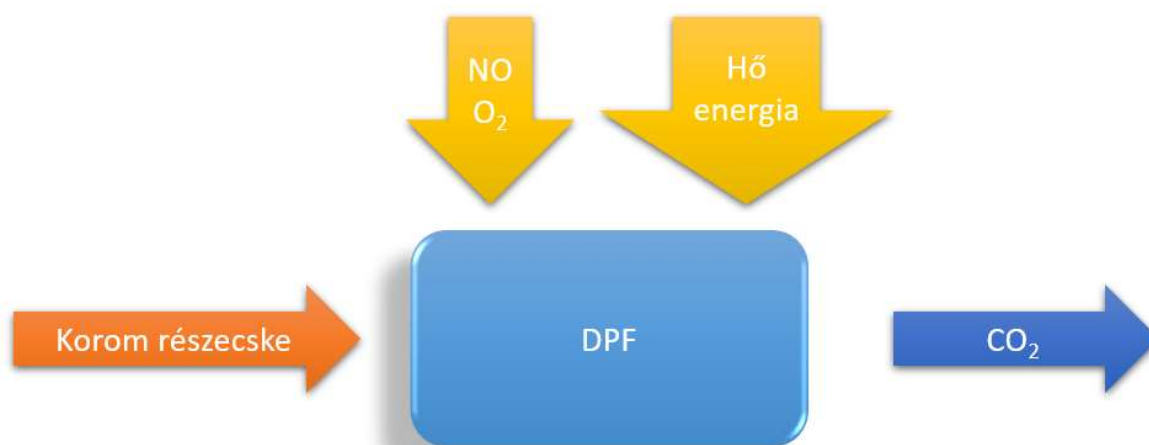
A „dízel részecskecsapda” kifejezést néha a „dízel részecskeszűrő” szinonimájaként használják, különösen a régebbi irodalomban.

A „csapda” kifejezés a részecske-elválasztó eszközök tágabb osztályára terjed ki. Az ipari porelválasztó berendezésekben a szűrésen kívül számos részecske lerakódási mechanizmust alkalmaznak. Ilyen például a gravitációs ülepítés, a centrifugális elválasztás vagy az elektrosztatikus csapda. A dízel-korom kis részecskemérete és alacsony sűrűsége miatt ezen technikák egyike sem alkalmazható a dízel részecske kibocsátásának csökkentésére.

Megjegyezhetjük, hogy a részecske-oxidációs katalizátorok (POC) - Particulate Oxidation Catalyst - amelyeket részleges szűrőknek is neveznek - képesek megfogni a dízel részecskéit is, de sokkal alacsonyabb összhatékonyságot nyújtanak, mint a dízel részecskeszűrők. Általános kialakításuk

szerint a POC-k a részecskéket csak az áramlás töredékéből veszik fel, míg a dízel részecskeszűrőkben a kipufogógáz teljes egészében meg van szűrve (Decse 2000).

A dízel részecskék alacsony térfogatsűrűsége miatt, amely jellemzően $0,1 \text{ g/cm}^3$ alatt van (Wade et al. 1981) részecskeszűrők jelentős mennyiségű kormot képesek felhalmozni. Naponta több liter korom gyűjthető össze egy idősebb nagy teherbírású munkagép vagy busz motorjából. Az összegyűjtött részecskék végül túl magas kipufogógáz-nyomáscsökkenést okoznának a szűrőben, ami negatívan befolyásolná (fojtaná) a motor működését (Ohno 2006). Ennek elkerülésére a dízel részecskeszűrő rendszereknek lehetőséget kell biztosítaniuk a részecskék eltávolítására a szűrőből a koromgyűjtő képesség helyreállítása érdekében. Ezt a részecskék eltávolításának, a szűrő regenerálásának nevezik, vagy folyamatosan, a szűrő rendszeres működése közben, vagy periodikusan, egy előre meghatározott korommennyiség felhalmozódása után. Mindkét esetben a szűrőrendszerek regenerálódásának „láthatatlannak” kell lennie a jármű vezetője / kezelője számára, és az ő beavatkozása nélkül kell végrehajtani. A dízel részecskeszűrők termikus regenerálását általában akkor alkalmazzák, amikor az összegyűjtött részecskéket - oxigénnel és / vagy nitrogén-dioxiddal - gáznemű termékekké, elsősorban szén-dioxiddá oxidálják. A 9. ábrán sematikusan bemutatott termikus regenerálás a legelterjedtebb módszer a dízel részecskeszűrők nyomáscsökkenésének kontrollálására.



2.13. ábra Termikus korom regeneráció hatásmechanizmusa (Forrás: Biró Norbert)

Annak érdekében, hogy a részecskék megfelelő sebességgel oxidálódjanak, a szűrőnek a reakcióhoz megfelelő hőmérsékleten kell működnie. Egyes szűrőrendszerekben a hőforrás maga a kipufogógáz biztosítja (Ohno 2006). Ebben a típusú passzív szűrőnek nevezett szűrőrendszerben a szűrő folyamatosan regenerálódik a motor működése során. A passzív szűrők általában valamilyen katalitikus bevonatot tartalmaznak, amely a korom oxidációs hőmérsékletét olyan szintre csökkenti, amelyet a jármű működése során a kipufogógázok elérhetnek. Egy másik megközelítés, amelyre szükség lehet a megbízható regenerálás megkönnyítése érdekében, számos aktív stratégiát foglal magában a szűrő hőmérsékletének növelésére (hajtóanyag-égés a kipufogórendszerben, elektromos fűtőberendezések). Az ilyen, aktív szűrőként ismert eszközök regenerálását általában időszakosan, a jármű motorvezérlőrendszere határozza meg.

DPF kialakításai

A katalitikus kerámia szűrők célja a korom oxidációs hőmérsékletének csökkentése és a passzív DPF regeneráció megkönnyítése. Az aktív regenerálás helyett a passzív regenerálást részesítik előnyben, mivel alacsonyabb hőmérsékleten történik (jótékony hatással van a szűrő tartósságára), és csökken az hajtóanyag felhasználás (Szöllősi et al. 2020). Három alapvető konfiguráció lehetséges, a katalizátor helyétől függően:

Katalitikus bevonattal ellátott dízel részecskeszűrő (C-DPF)

Oxidációs katalizátor + katalizálatlan DPF

Oxidációs katalizátor + C-DPF

A passzív és az aktív regenerációt egyaránt hasznosító szűrőrendszerekben katalitikus szűrők találhatóak. A legtöbb utólag beépített DPF rendszerben kizárólag a passzív regeneráció lehetséges. Az OEM alkalmazásokhoz használt szűrőrendszerekben a passzív regenerálás nagy motorterhelés mellett történik, míg a hőkezelés különféle eszközeit általában a kipufogógáz hőmérsékletének növelésére és a megbízható, aktívan támogatott regeneráció biztosítására alacsonyabb motorterhelések mellett használják.

Az aktív és passzív szűrőrendszerekben a katalizátor szerepe, a koromégés aktivációs hőmérsékletének csökkentése mellett, a korom oxidációs sebességének felgyorsítása. A rövidebb időtartamú regenerálás minimálisra csökkenti a szűrő meghibásodását, növeli a motor élettartamát és csökkenti az hajtóanyagfogyasztást.

Katalitikus bevonattal ellátott DPF

A katalizált dízel részecskeszűrőben egy katalizátort visznek fel a szűrőközegre, hogy elősegítse a kémiai reakciókat a gáz komponensei és a szűrőben összegyűlt korom között. A katalizátor fő célja a szűrő passzív regenerálásának megkönnyítése azáltal, hogy lehetővé teszi a széntartalmú részecskék oxidációját a motor/jármű rendszeres működése során keletkező kipufogógáz-hőmérsékletén, jellemzően a 300-400 °C tartományban. Katalitikus bevonat hiányában a részecskék érzékelhető sebességgel csak 550-650 °C körüli hőmérsékleten oxidálhatók, ami csak teljes terhelés mellett fordulhat elő a dízelmotorban, és a legtöbb esetben a való életben ritkán észlelhető.

A DPF porózus falai a katalitikus anyaggal vannak bevonva (Hawker et al. 1997), így a DOC és DPF funkcióját egy szűrő látja el. Amint a dízel kipufogógáz-aeroszol áthatol a falakon, a koromrészecskék lerakódnak a fal pórushálózatán és a bemeneti csatorna felületén. A katalitikus bevonat a későbbiekben tárgyalt NO₂ és oxigén alapú reakciómechanizmusok kombinációjával megkönnyíti a PM oxidációját alacsony hőmérsékleti körülmények között a dízel kipufogógázban.

Katalitikus bevonat nélküli DPF + DOC

Ebben a kétlépcsős DPF-konfigurációban egy katalizálatlan szűrőt regenerálunk a szűrő előtt elhelyezkedő dízel-oxidációs katalizátoron (DOC) képződött NO₂ felhasználásával. Az NO₂ felhasználásával a dízel korom oxidálásához a szűrőket viszonylag alacsony kipufogógáz-hőmérsékleten lehet regenerálni. Megfelelő alkalmazásoknál ez a típusú szűrő képes akár 250-300 °C-os hőmérsékleten is passzív regenerálódásra.

A szűrőrendszer két alkatrészből áll - egy oxidációs katalizátorból és egy kerámia faláramú diesel szűrőből. Ezt a kétlépcsős DPF konfigurációt CRT szűrőnek is nevezik. Manapság a legelterjedtebb konfiguráció.

A „CRT” - a „Continuously Regenerating Technology” kereskedelmi név rövidítése, amelyet eredetileg „Continuously Regenerating Trap” néven vezettek be – a Johnson Matthey bejegyzett védjegye, amelynek kutatói először ismertették az NO₂ korom oxidációjára való felhasználását (Allansson et al. 2002). A CRT-szűrőt a Johnson Matthey szabadalmaztatta az Egyesült Államokban (Allansson et al. 2002) és más országokban (Allansson, et al. 2004) . A szabadalmak lejártával ez a típusú szűrő számos beszállítótól, többek között a munkáltatómtól – az IBIDEN Co Ltd.-től is elérhetővé vált.

A kipufogógáz NO_x: PM aránya és az hajtóanyag kéntartalma - a kipufogógáz hőmérsékletén kívül - fontos tényezők, amelyek befolyásolják a szűrő regenerálódását, valamint a kibocsátási teljesítményt. A passzívan regenerált CRT szűrő alkalmazási határai a következők voltak:

Kipufogógáz NO_x: PM arány: 20:1 - 25:1 (tömeg szerint, minimum) - az NO_x: PM arány jelentősége egyértelmű; Az NO_x a CRT regenerálásához szükséges NO₂ forrása.

Az hajtóanyag kéntartalma: 50 ppm (maximum) - a CRT-szűrőnek rendkívül alacsony kéntartalmú hajtóanyagok szükségesek, mivel a kén blokkolja az NO → NO₂ konverziót az oxidációs katalizátorban.

Kipufogógáz hőmérséklet: 275 °C (minimum).

Meg kell jegyezni, hogy a fenti alkalmazási határértékek példák a korai utólagos felszerelésre. A később bevezetett OEM szűrőrendszerek sokkal magasabb NO_x:PM arányokat és /vagy magasabb kipufogógáz-hőmérsékletet igényelhetnek, hogy csak a passzív regenerációra támaszkodjanak. Ezek a különbségek oka lehet az eltérő motortechnika és a motor kioltott PM-szintje, valamint az a tény, hogy a sok utólag beépített DPF-ben megfigyelt maximális nyomáscsökkenés nagyobb volt, mint ami elfogadható lenne az OEM-motoroknál.

A magas kén tartalmú hajtóanyagokkal történő üzemeléssel deaktivált szűrők visszanyerik regenerálódási képességüket, ha bizonyos ideig rendkívül alacsony kén tartalmú hajtóanyagokkal működnek (Cooper et al. 1990). Időszakos, magas hőmérsékletnek való kitettség szintén helyreállíthatja a katalizátor aktivitását. A NO konverziós arányának lassú regenerálódáshoz vezető fokozatos romlása a kénnek tulajdonítható hosszú ideig alacsony kipufogógáz-hőmérsékletű alkalmazásokban, például a városi buszokban, még az alacsony kén tartalmú hajtóanyagok esetében is (Cooper et al. 1989).

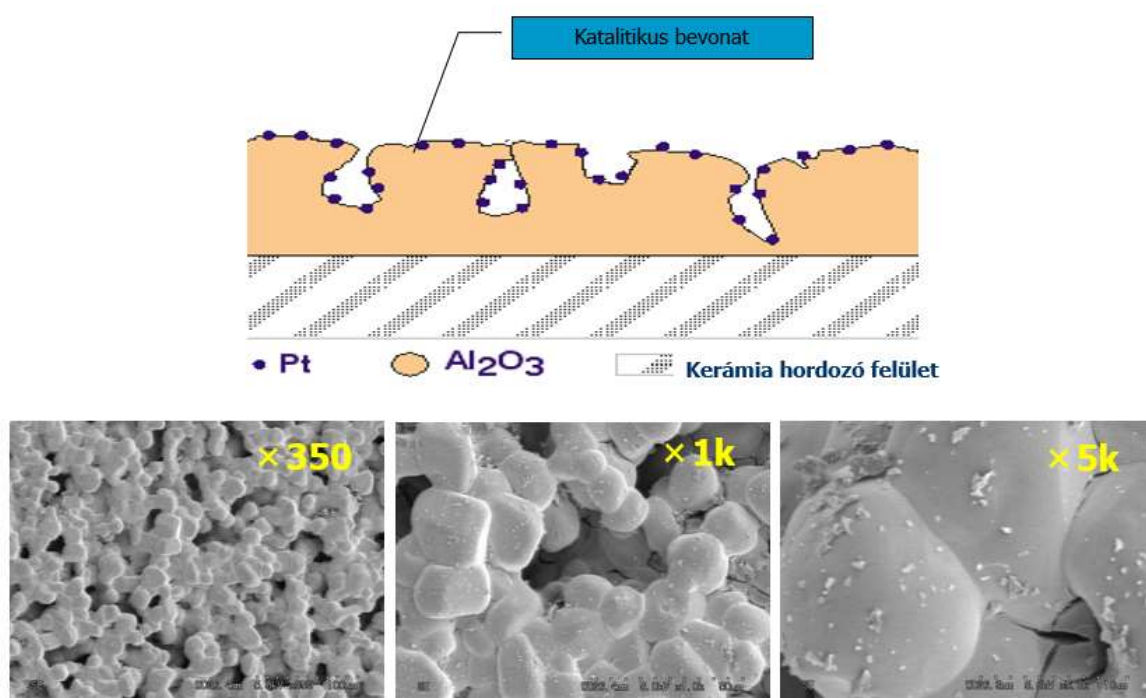
Amíg rendkívül alacsony kén tartalmú hajtóanyagot használnak, a DOC + DPF konfigurációnak egyensúlyi hőmérséklet-előnye van a katalizált szűrővel szemben. A tanulmány (Hilite Germany GmbH, 2012) viszonylag magas, 60 ° C-os átlagos egyensúlyi hőmérséklet-előnyt talált. Sokkal kisebb, csupán 15 ° C-os előnyről számolt be Cooper 1990-ben (Cooper et al. 1990). Mivel az egyensúlyi hőmérséklet számos motor- és utókezelési jellemzőtől függ, az általánosítás nehéz.

Korom oxidáció hatásmechanizmusa

A dízel részecskeszűrők termikus regenerálása magában foglalja a szilárd részecskék oxidálódását gáz halmazállapotú végtermékekké, leginkább széndioxiddá. A DPF rendszer kialakításától és a motor működési körülményeitől (kipufogógáz hőmérsékletétől) függően a dízel koromban lévő szén oxidációja oxigénnel vagy nitrogén-dioxiddal történő reakció révén történhet.

Az oxigén üzemi körülmények között magas koncentrációban van jelen a dízel kipufogógázban. Viszonylag magas hőmérsékletekre van azonban szükség ahhoz, hogy az O_2 -vel való érzékelhető regenerációs sebességet elérjük (Campbell et al. 1995). Az oxigén alapú regeneráció leginkább aktív DPF rendszerekben tapasztalható.

A nitrogén-dioxid-alapú regenerálás alacsonyabb hőmérsékleten hajtható végre, mint az oxigén-regenerálás. Az NO_2 koncentrációkat azonban növelni kell, ami jellemzően az NO katalitikus oxidációjával valósul meg (vagyis az NO_2 és NO arány NO_x -ban történő növelésével). A korom NO_2 által történő oxidációja a passzív DPF regeneráció domináns mechanizmusa.



2.14. ábra Passzív regenerációt elősegítő katalitikus DPF bevonat (Forrás: IBIDEN Hungary Kft. Technical Center)

Más, még aktívabb oxidálószer is lehetségesek. Az ózon (O_3) (Hirata et al. 2011) ugyancsak oxidálja a koromrészecskéket, amely lehetővé teszi a regenerálódást még az NO_2 -nál alacsonyabb hőmérsékleten is. Az ózonregeneráció használatához fedélzeti ózongenerátorra lenne szükség, így ez a megoldás nem terjedt el.

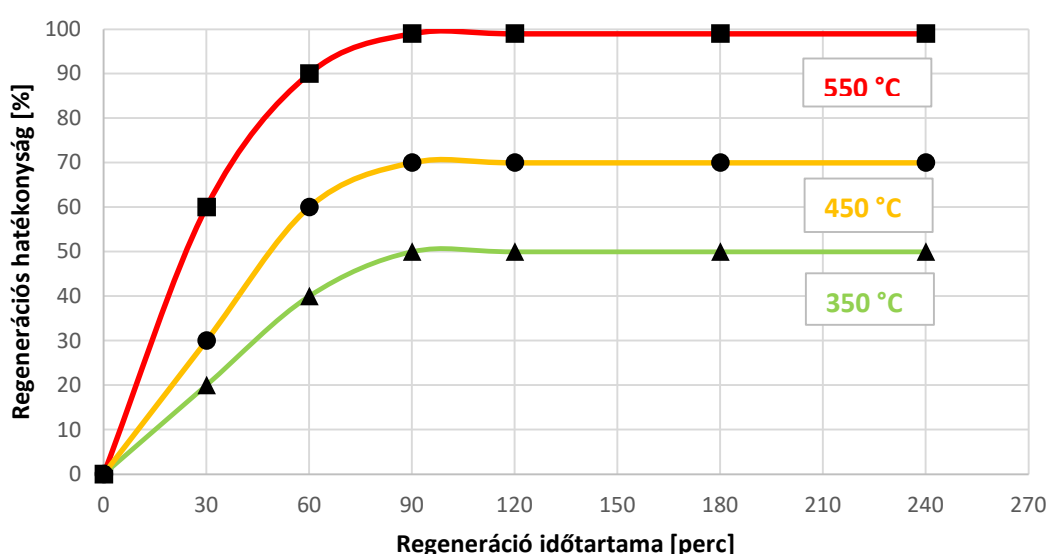
A koromrészecske széndioxiddá történő oxidációja a (2.7) és (2.8) reakcióegyenletek egyikével írható le:





ahol C (szén) a dízel PM éghető részét jelenti. A szén-dioxid az előnyös termék, de megnövekedett szén-monoxid-kibocsátás léphet fel, ha az oxigén kimerül a reakciózónában (Szöllősi, et al.,2020)

A termikus regeneráció sebességét a korom oxidációjának kinetikája korlátozza. A koromoxidáció sebessége lényegesen alacsonyabb, mint a gáznemű kipufogógáz-szennyező anyagok, például a szén-monoxid oxidációjának sebessége. Ez az egyik oka annak, hogy a széntartalma részecskék nem oxidálódnak az áteresztő katalizátorokban (Pl.: DOC), amelyekben viszonylag rövid ideig tartózkodnak a részecskék. A korom oxidációjához dízelszűrőkre van szükség, amelyek meghosszabbítják a tartózkodási időt a részecskék fizikai befogásával.



2.15. ábra PM oxidáció a hőmérséklet arányában (Forrás: Biró Norbert)

A dízel-korom oxidációs sebességét oxigén segítségével az 11. ábra mutatja. Az oxidált korom tömegarányát különböző hőmérsékleteken az oxidációs idő függvényében láthatóak. Alacsony hőmérsékleten (350 °C, 450 °C) az oxidációs sebesség nagyon lassú és a regeneráció nem teljes. A korom csak körülbelül 550 °C (és magasabb) hőmérsékleten képes gyorsan és teljesen oxidálódni. Bármely adott hőmérsékleten az oxidációs sebesség a minta DPF szűrőben lévő korom mennyiségével változik.

Passzív regeneráció

A dízel kipufogógáz terheléstől függően 200-300°C hőmérsékletű, viszont a korom részecskék 600 °C hőmérsékleten égnek ki.

A megoldást az angliai Johnson Matthey cég fejlesztette ki (Cooper et al. 1990). Katalitikus bevonattal látják el a szűrő bemenő oldalát mely aktiválja a koromrészecskék oxidálását 250-300 °C hőmérsékleten.

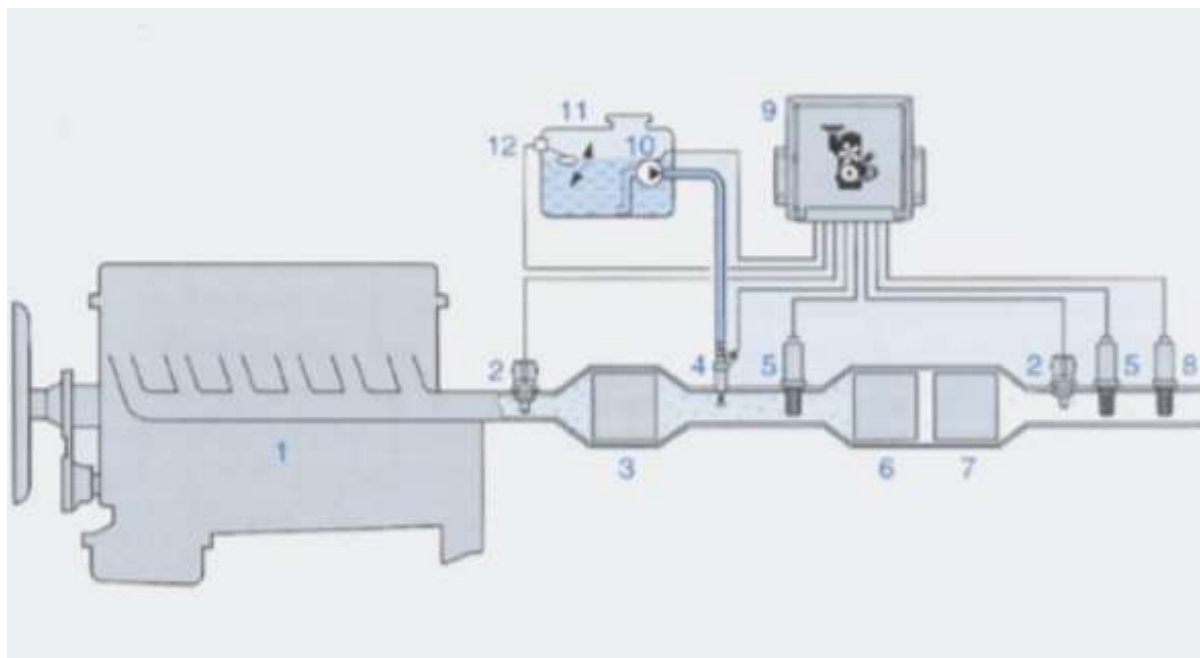
Hasznos újítás bár hozzá kell tenni, hogy önmagában nem elegendő, a lerakódott korom mindössze 5-10 %-át égeti ki.

Aktív regeneráció

Említve lett a 2.1.2.2 fejezetben, hogy 550-600°C-on ég ki a leghatékonyabban a korom, ennek elérése érdekében alkalmazzák az utóbefecskendezést. Lényegében a kipufogási ütemben is fecskendez be hajtóanyagot a motorvezérlő utasítására az injektor, amely nem az égéstérben hanem az oxidációs katalizátorban ég el. Ezzel a megoldással 100%-os hatékonysággal regenerálható a DPF filter (Ohno, 2006).

2.7.3. Szelektív katalitikus redukció (Selective Catalytic Reduction - SCR)

A szelektív szó arra utal, hogy a redukálóanyag oxidációja nem a kipufogógáz O_2 -tartalmával, hanem a NO_x oxigénjével megy végbe (Robert Bosch GmbH., 2015), annak ellenére, hogy a kipufogógáz jelentős mennyiségű oxigént tartalmaz. Redukálóanyagként ammóniát (NH_3) használnak, amely ebben a vonatkozásban a legnagyobb szelektivitással bír (Akiyoshi et al. 2011). A működéshez azonban a járművön mérgező ammóniát kellene tárolni, ami biztonsági okból meggondolandó. Ezért más módon oldják meg az ammónia használatát. Ezt az anyagot elő lehet állítani nem mérgező vegyületekből, mint például a karbamid ($(NH_2)_2CO$), amelynek vizes oldata egyszerűen és pontosan adagolható a kipufogógázhoz (Zheng et al. 2014). A karbamid 32,5 tömegszázalékos vizes oldatának a fagyáspontja $-11\text{ }^\circ\text{C}$, itt eutektikumot képez, miáltal a keverési arány megváltozása a fagyás miatt ki van zárva. A redukálóanyag adagolására kifejlesztett rendszer fagyálló kivitelű, legfontosabb részei fűthetőek, hogy az adagolás a hidegindítás után már rövid idővel megkezdődhessen (Robert Bosch GmbH 2010). A karbamid német neve Harnstoff, a vizes oldat német rövidítése HWL, ezzel a megnevezéssel is lehet találkozni a szakirodalomban, ma ezt az anyagot AdBlue márkanéven forgalmazzák.



2.16. ábra Szelektív katalitikus redukció; 1-dízelmotor, 2-hőmérséklet-jeladó, 3-oxidációs katalizátor, 4-redukálóanyag-adagoló fűvóka, 5- NO_x szenzor, 6-SCR katalizátor, 7- NH_3 záró katalizátor, 8- NH_3 szenzor, 9-motorirányító elektronika, 10-Adblue szivattyú, 11-Adblue tartály, 12-szintjelző (Forrás: Keuper 2011)

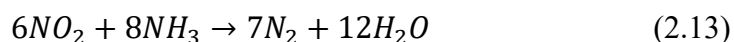
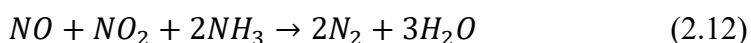
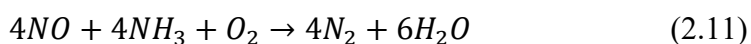
A tulajdonképpeni katalitikus reakció előtt az AdBlue-ból ammóniát kell felszabadítani. Ez két lépésben történik, amelyet összefoglalóan hidrolízis reakciónak neveznek (Kruttsch et al. 1998) Először termolízis folyamatban ammónia (NH_3) és izociánsav (HNCO) keletkezik (Birkhold et al. 2006), amely a (2.9) reakcióegyenletben látható:



Majd az izociánsav vízzel ammóniává és szén-dioxidá alakul, a (2.10) reakcióegyenletben látható módon:



A folyamat gyors végbemeneteléséhez és a szilárd részek kicsapódásának elkerüléséhez megfelelő katalizátorra és legalább 250 °C hőmérsékletre van szükség (Naseri, M., et al., 2015). A korszerű SCR-katalizátorok egyidejűleg a hidrolízis katalizátorok szerepét is ellátják (Haldor 2003), így elmarad a korábban szükséges előkatalizátor (Seher et al. 2003). A nitrogén-oxidok lebontását (2.11), (2.12) és (2.13) reakcióegyenletek szerint végzi az SCR-katalizátor:



300 °C hőmérséklet alatt az átalakítás túlnyomórészt a (2.12) egyenlet szerint alakul, ezért ilyen körülmények között a legkedvezőbb átalakulási arány eléréséhez „1:1”-es $\text{NO}:\text{NO}_2$ arány lenne szükséges. Ilyenkor az átalakítás már 170–200 °C hőmérsékleten is végbemegy (Theis et al. 2017) A NO oxidálása NO_2 -é az SCR-katalizátor elé helyezett oxidációs katalizátorban megy végbe. Fontos a redukálóanyag pontos adagolása (Biró 2020) (Biró et al. 2020), mivel túladagolás esetén nemkívánatos ammóniakibocsátás lép fel, ami ellen egy, az SCR-katalizátor után elhelyezett oxidációs katalizátort alkalmazhatnak (Henry et al. 2011). Ez oxidálja az esetleg kikerülő ammóniát nitrogénné és vízzé (Gabrielsson 2004). A redukálóanyag adagolásának jellemzője az ANR (Ammonia NO_x Ratio), amelyet α -val jelölnek és a kipufogógázhoz kevert ammónia és a kipufogógázban lévő NO_x tömegének a hányadosát jelenti. Ideális esetben, ha nincs túlzott NH_3 , nincsenek mellék reakciók, ANR értéke arányos a nitrogén-oxidok átalakítási fokával (Dainler-Benz Ag. 1996) (Dainler-Benz Ag. 1998), tehát $\alpha=1$ elméletileg 100%-os NO_x -átalakítást jelent (MAN Nutzfahrzeuge 1993). A mai SCR katalizátoroknál az előzetes hidrolízis reakció miatt 50%-nál nagyobb NO_x -átalakítás csak 250 °C felett jöhet létre (Czerwinski et al. 2015) Optimális átalakítási fok 250–450 °C hőmérséklet-tartományban érhető el. A működési hőmérsékleti ablak kiszélesítése és egyúttal az alacsony hőmérsékleti aktivitás növelése a jelenlegi kutatások tárgya.

2.8. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

Az általam választott kutatási témában fellelhető publikációk száma jelentős. A szakirodalmi összefoglalóban igyekeztem ezt a szerteágazó témát rendszerezni, mely így stabil alapot tudott biztosítani kutatásomhoz:

- Először röviden áttekintettem a modern közönsnyomócsöves dízelmotorok történetét, amely fontos szerepet tölt be a kísérleteimben és működésének elméleti hátterét.

- Ismertettem a dízelmotor káros emisszióit, kialakulásuk és az emberi egészségre káros tulajdonságait, majd ezen emissziókra a jelenleg érvényes európai előírásokat.
- Egyedi módon a kialakulásuk helye szerint csoportosítottam az emissziók kialakulását és tekintettem át más kutatók témába kapcsolódó publikációit.
- Elsőként bemutattam a kenőolajok és hajtóanyagok hatásait az emisszió technikában. A részletes összefoglaló a 2.2. táblázatban látható.
- Majd bemutattattam a motorban lejátszódó folyamatok részletes kapcsolatát a kipufogógáz emissziókkal. A részletes összefoglaló a 2.3. táblázatban látható.
- Végül a motorból távozó nyers emisszió útját a kipufogógáz utókezelő rendszerben. Kitérve a fizikai tulajdonságaikra és a kémia reakciókra, melyek bizonyos szennyezők redukcióját és konverzióját okozzák. A részletes összefoglaló a 2.4. táblázatban látható.

2.2. táblázat Kenőanyagok és hajtóanyagok hatása a kipufogógáz emissziókra

Eszköz	Hatása az emissziókra	Összefoglalás
<i>Kenőolaj</i>	Az égéstérbe bejutva növeli a éghetetlen szilárd részecske emissziót (hamu) és befolyásolja a hajtóanyag fogyasztást.	
<i>Hajtóanyagok</i>	CO ₂ emisszió	A hajtóanyag tisztasága alapvetően befolyásolja az égés után keletkező károsanyagok előfordulását. Például a hajtóanyag kéntartaloma a oxidáció útján kén-dioxid (SO ₂) alakulhat.
<i>Hajtóanyag adalékok</i>	Fémes alkotói az adalékoknak növelik a hamu képződést	Csekély közvetlen emissziónövelő hatást gyakorolnak modern motorokra. Egyes dízel részecskeszűrő rendszerek üzemanyag-adalékokat használnak a részecskeszűrő regenerációjának elősegítésére.

2.3. táblázat A motorban lejátszódó folyamatok hatása a kipufogógáz emissziókra

Eszköz	Hatása az emissziókra	Összefoglalás
Hajtóanyag befecskendezés	A befecskendezési technológiában jelentős javulások kezdődtek a 90-es évek végén, az elektronikus vezérlőrendszerű közösnyomócsöves technológia széles körű bevezetésével, amely változtatható befecskendezési időzítést, nyomást és egyedi befecskendezések időpontokat tettek lehetővé.	
<i>Befecskendezési időzítés</i>	NO _x emisszió csökkentése	A befecskendezés időzítése hatással van a égésre; az égési fázis késleltetése csökkentheti a NO _x kibocsátást.
<i>Befecskendezési nyomás</i>	Korom részecske emisszió csökkentése	Magasabb befecskendezési nyomás csökkentheti a koromkibocsátást, különösen fontos, amikor olyan NO _x -ellenőrző technológiákkal kombinálják, mint az EGR, amelyek egyébként növelnék a koromkibocsátást.
<i>Egy ütemen belül befecskendezések számának növelése</i>	Több emisszió komponens csökkentése	Többszörös befecskendezési stratégiák a NO _x , a korom, az HC és a CO kibocsátást csökkentik. Gyakran alkalmazzák könnyű- és nehéz tehergépjármű-dízelmotorokban.
<i>Kipufogógáz visszavezetés (EGR)</i>	NO _x emisszió csökkentése	A kipufogógáz egy részének visszavezetése a szívóoldalra. Az égéshő és ezáltal az NO _x képződés csökken.
<i>Töltőlevegő nyomás növelés</i>	Korom részecske emisszió csökkentése	A magas szívócsőnyomás növeli a levegő/hajtóanyag arányt adott befecskendezési mennyiség mellett, és csökkenti a koromképződést. Az EGR által okozott megemlekedett korom emisszió ellensúlyozása.
<i>Töltőlevegő hűtés</i>	Több emisszió komponens csökkentése	A növelt töltőnyomás és az EGR használata növeli a töltőlevegő hőmérsékletét. Szükséges a sűrítési veszteségek minimalizálásához a töltőlevegő hőmérsékletének csökkentése.
<i>Égéstér tervezés, emissziós szempontok alapján</i>	Korom részecske emisszió csökkentése	Az égéstér kialakításával javítani lehet a hajtóanyag-töltő levegő keveredését, ezáltal csökkentve a korom részecske formálódását.

2.4. táblázat A kipufogógáz utókezelő rendszerben lejátszódó folyamatok hatása a kipufogógáz emissziókra

Eszköz	Hatása az emissziókra	Összefoglalás
<i>Dízel Oxidációs Katalizátor(DOC)</i>	Nagy arányú redukciója a szénhidrogéneknek és szénmonoxid emisszióknak. Szilárd részecske oxidációja és ezáltal csökkentése viszonylag alacsony. Fontos szerepet tölt be az NO - NO ₂ konverziójában, ezáltal növelve az SCR és DPF katalizátorok hatékonyságát.	Az Euro 2-es normával vált széleskörben alkalmazott technológiává. Modern motorokban ez előkatalizátor szerepét tölti be, legfőképp SCR és DPF alapú kipufogógáz utókezelő rendszerekben. Az NO ₂ generálásával növeli a teljes utókezelő rendszer hatékonyságát.
<i>Dízel Részecske szűrő (DPF)</i>	98-99%-os részecske szám csökkentés	Az egyik legmegbízhatóbb és elterjedtebb katalizátor típus. Megbízhatósága abban rejlik, hogy motorhőfoktól függetlenül, minden körülmények között, legalább 98%-ban csökkenti a részecske emissziót.
<i>Karbamid alapú szelektív katalitikus redukció (SCR)</i>	90% feletti NO _x koncentráció csökkentés	Az egyik legelterjedtebb NO _x csökkentő katalizátor típus. Amennyiben a termo és hidrolízishez megfelelő (legalább 200 °C) hőmérsékletű a kipufogógáz, 90%-os NO _x koncentráció csökkentés is elérhető.

Megállapítható, hogy nagyszámú publikáció, kutatás fellelhető az emissziócsökkentés témakörében, azonban rendszerként vizsgálva minden kipufogógáz emisszió csökkentési eljárást, azzal a céllal, hogy a kipufogócső emisszió alacsonyabb legyen, jóval kevesebb alkotás található meg. A legtöbbjüket az ezredfordulón publikálták, mára már sok esetben elavult következtetésekkel (Shrivastav et al. 2002). A gyakorlati hasznosíthatóságot kizárólag autóiipari szereplők (autógyártók, katalizátor gyártók) boncolgatják, a független kutatók, csak egy-egy nagyon specifikus területtel foglalkoznak, mely értelmét önmagában vizsgálva, még szakmabelinek is nehéz kontextusba helyezni, ezáltal nehéz meghatározni a célját.

Visszatérve az autóiipari szereplők publikációira, ezen műveket és a mögöttük álló kutatásokat minden esetben az adott és elkövetkező emissziós szabványoknak való megfelelés vezérelte.

Tehát a „múlt” -ban kiadott járművek fejlesztésével nem foglalkoznak, hiszen erre nincs törvényi előírás, illetve egy profitorientált gazdasági társaságnak ez érthető okokból nem is érdeke.

Kuzuyama kutatása érdekes felvetést feszeget, de csak indirekten határozza meg az emisszió csökkentés mértékét, konkrét próbapadi mérések, hitelesített mérőeszközökkel nem szerepelnek a kutatásban. Ugyancsak hasonló hiányosságokat találtam Inagaki és Fuyuto hasonló irányultságú kutatásaiban. Azonban a hasonló „rész” kutatásokból kinyert információk számomra hasznos alapot

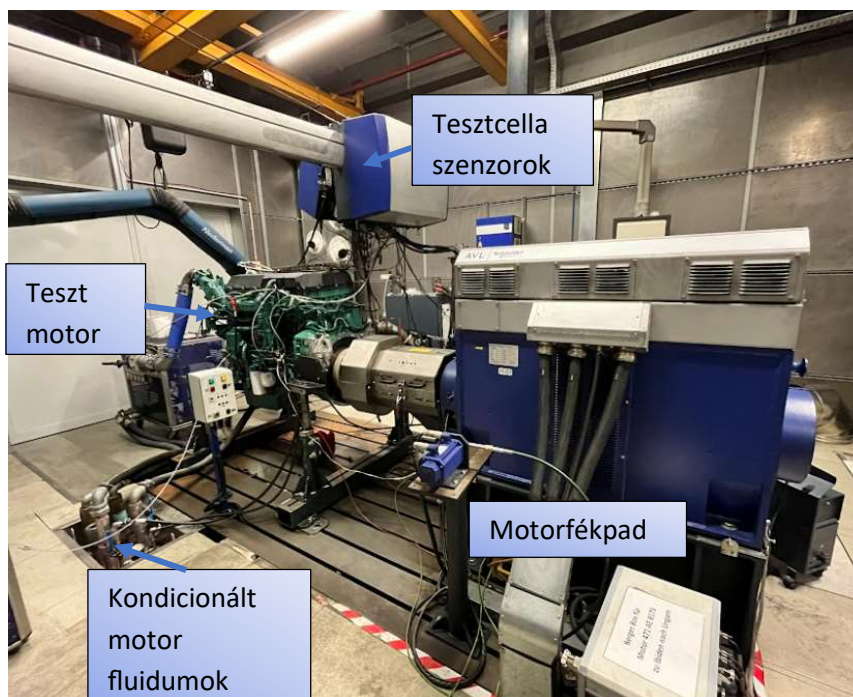
fognak nyújtani, a nem csak elméleti, hanem az erősen gyakorlati szemléletű értekezésem hipotéziseinek validációja során.

Ezek alapján úgy ítélem meg, hogy kutatásom hiánypótló lehet, ugyanis nem csak egy cégcsoport termékeire fognak vonatkozni a kutatási eredményeim, hanem egy emissziós generációra. A kutatási eredmények alapján akár az ISC (In-service conformity) teszteken nem megfelelt nehézgépjárművek emissziós finomhangolására is sor kerülhet, így hasznos élettartamuk meghosszabbítható.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. 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 3.1-es ábrán látható nehéz gépjármű motort tartalmazó cellát használtam kísérleteim során.



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

A motorfékpad képes szélsőséges vezetési körülményeket szimulálni (pl.: motorterhelés hirtelen változása), így a kondicionáló rendszereknek képesnek kell lenniük ennek a gyors lekövetésére. A fékpad hatékonyságának növelése érdekében gyorsan kell kialakítani a kezdeti körülményeket. Az olaj- és hűtőfolyadék-kondicionáló rendszerek gyorsan lehűtik a motort minden tesztciklus végén, ami segít növelni a tesztek számát időegységenként (például hidegindítási tesztek). Ezáltal lehetővé válik a motor teljesítményének és stabilitásának hatékonyabb értékelése még kivételes körülmények között is.

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.

3.1.1. Hőcserélő és hűtő egységek

Az előző fejezetben említett kondicionáló berendezések, pontosabban a hőcserélői és hűtőkör kondenzátorai, két elkülönült üzemeltetési szinten találhatók meg, azaz két elkülönült rendszeren belül működnek a tesztcella felett. Ennek az elrendezésnek jelentősége van a tesztek során biztosított pontos hűtési és hőszigetelési feltételek szempontjából. A két szintű működési struktúra elősegíti a hatékonyabb hőelvezetést és az optimális hőmérsékleti körülmények kialakítását a motor körül. A 3.2-es ábrán látható nagyméretű hőcserélő puffertartályok lehetővé teszi akár mind a 4 tesztcella egy időben történő kiszolgálását.



3.2. ábra Hőcserélő puffertartályok (Forrás: Biró Norbert)

Az elválasztott üzemeltetési szintek lehetővé teszik, hogy mindkét rendszer maximális hatékonysággal működjön, ami kulcsfontosságú a tesztek megbízhatósága szempontjából. Ezenkívül ez a rugalmas elrendezés lehetővé teszi a különböző tesztfolyamatokhoz szükséges különböző hűtési profilok alkalmazását, így biztosítva a tesztek sokoldalúságát és pontosságát. A két üzemeltetési szintű rendszer kiemelkedően fontos a modern motorteknológiák fejlesztésében és az emissziómérések során elért pontos eredmények biztosításában. A 3.3-as ábrán láthatóak a hűtőkört kiszolgáló nagyméretű kondenzátor egységek.



3.3. ábra. Hűtőkör kondenzáló egység (Forrás: Biró Norbert)

A létesítmény üzemeltetési szintjén elhelyezkednek a vezérlő PLC-k, amelyeket manuális vezérlőpanelekről is beállíthatunk, és távoli hozzáférést biztosító motorfékpad vezérlő számítógépről is irányíthatjuk. Ez az utóbbi a legalsó szinten található, együtt a motorfékpados tesztcellákkal. Ennek a rendszernek az elrendezése kiemelkedően fontos az egész létesítmény hatékony működése szempontjából. A vezérlő PLC-k által irányított berendezések pontos kezelése manuális vezérlőpaneleken keresztül is lehetséges, így a műveletek finomhangolhatók és optimalizálhatók. Emellett a távoli hozzáférés lehetőséget biztosít a motorfékpad vezérlő számítógépről, ami egy központi rendszerként működve lehetővé teszi a távoli irányítást és monitorozást. Ez az elrendezés magas fokú flexibilitást és rugalmasságot biztosít a tesztelési folyamatokban, és lehetővé teszi a gyors beavatkozást és ami kulcsfontosságú az eredmények pontossága és megbízhatósága szempontjából.

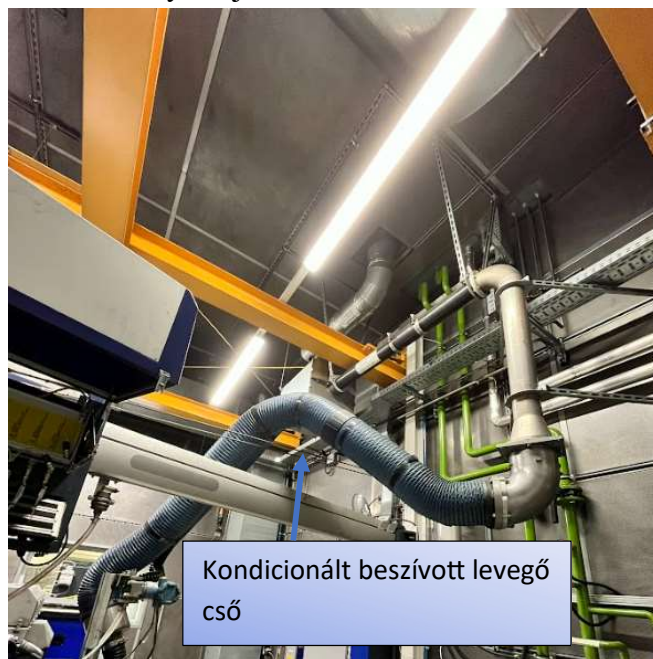
3.1.2. Beszívott levegő kondicionáló

A tesztmotor teljesítménye és emissziója nem csupán a motorban lejátszódó folyamatoktól, hanem a beszívott levegő környezeti paramétereitől is jelentősen függ. Az ilyen jellegű tesztek során a hőmérséklet, páratartalom és nyomás mind kritikus tényezők, amelyek hatással vannak a motor emissziójára és hatékonyságára (Szöllősi., et al., 2020). A 3.4-es ábrán látható kondicionáló berendezés ezen tényezőket képes szabályozni és stabilizálni a próbapadon. Ennek eredményeképpen a motor optimális feltételek között tesztelhető, függetlenül attól, hogy a környezeti viszonyok éppen milyenek. A bypass szelepes felépítés optimális teljesítményt biztosít a motor szívó- és kipufogónyílásainál állandósult állapotban, sőt rendkívül dinamikus motorműködés esetén is. Gyors stabilizációs idővel rendelkezik a készülék, amely azt jelenti, hogy az alapjel bármilyen változása után mind a hőmérsékleti, mind a nyomás paraméterek stabilizálódnak mindössze néhány másodperc alatt. Ez lehetővé teszi a gyors és hatékony tesztelést, valamint az azonnali visszajelzést a változásokról.



3.4. ábra Töltetlevegő előkészítő egység (Forrás: Biró Norbert)

Ezen berendezés kiemelkedő tulajdonsága a magasságszimulációs képesség. Ez azt jelenti, hogy a motor teljesítményét változatos környezeti feltételek között lehet vizsgálni és kiértékelni, beleértve a tengerszinttől kezdve a magas hegyi utakig, mind télen, mind nyáron, a trópusokon, a sivatagokban vagy a sarkvidéki területeken. Mindezen környezeti változások modellezhetők és tesztelhetők, ami kritikus fontosságú a motor teljesítményének és kibocsátásának valós körülmények közötti értékeléséhez. Az emissziós szempontok kiemelt jelentőséggel bírnak, mivel a beszívott levegő paraméterei jelentős mértékben befolyásolják ezeket az értékeket.

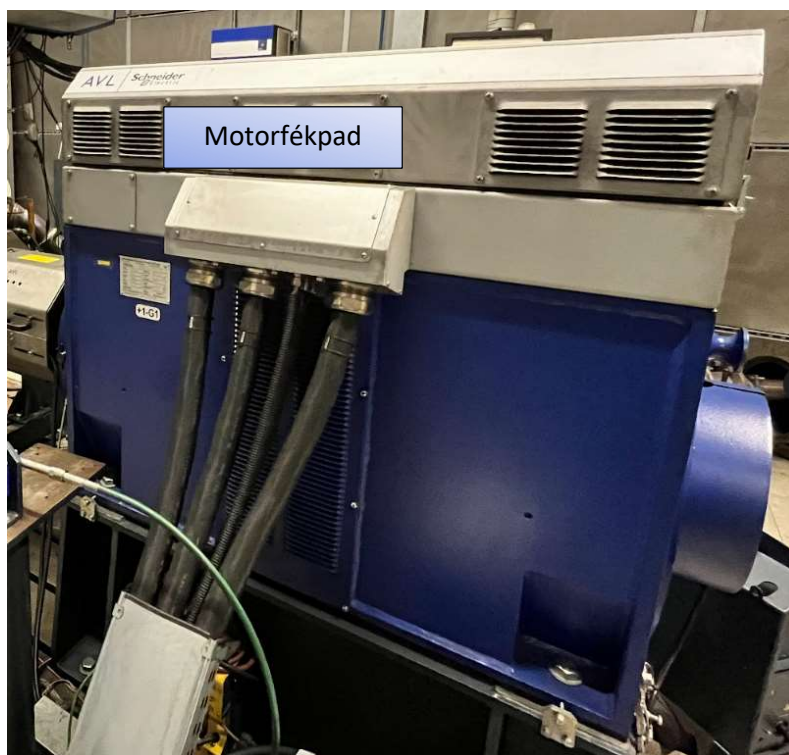


3.5. ábra Beszívott levegő csatlakozás a tesztmotorhoz (Forrás: Bíró Norbert)

Ehhez kiváló példa Szöllősi kutatása, amely a NO_x emissziót vizsgálja a beszívott levegő páratartalmának függvényében (Szöllősi., et al., 2020). Tehát a rögzített paraméteres emisszióméréshez elengedhetetlen tényező a beszívott levegő kondicionálása. A 3.5-ös ábrán látható módon a létesítményüzemeltetési szintről egy flexibilis csövön keresztül került levezetésre kondicionált beszívott levegő a motorba.

3.1.3. Motorfékpad

A motorfékpadok speciális vizsgálóberendezések, amelyek lehetővé teszik a motor különféle paramétereinek (teljesítmény, nyomaték, hajtóanyag-fogyasztás, kartergáz mennyisége stb.) mérését üzem közben. Bizonyos üzemi jellemzők mérésével már Bártfai is foglalkozott 2000-ben lefolytatott kutatásában (Bártfai 2000). Felépítésük lehetővé teszi különböző motorok vizsgálatát; az állítható motorbakok segítségével rögzülnek a pad vázához. A vizsgált motor a pad fékberendezését hajtja át a tengelykapcsolón keresztül (a fékberendezésekről későbbiekben részletesen szó lesz). A motorfékpadok egyik legnagyobb előnye, hogy a motor nyomatéka és teljesítménye közvetlenül a motor főtengelyénél (lendkerekenél) mérhető. A motor üzemeltetési körülményei (például hűtőfolyadék hőmérséklete, beszívott levegő hőmérséklete) könnyebben kontrollálhatóak, mint a görgős fékpadok esetén, így a motor működése szabályozott körülmények között vizsgálható.



3.6. ábra AVL DynoRoad 504/4.6 SL motorfékpad (Forrás: Biró Norbert)

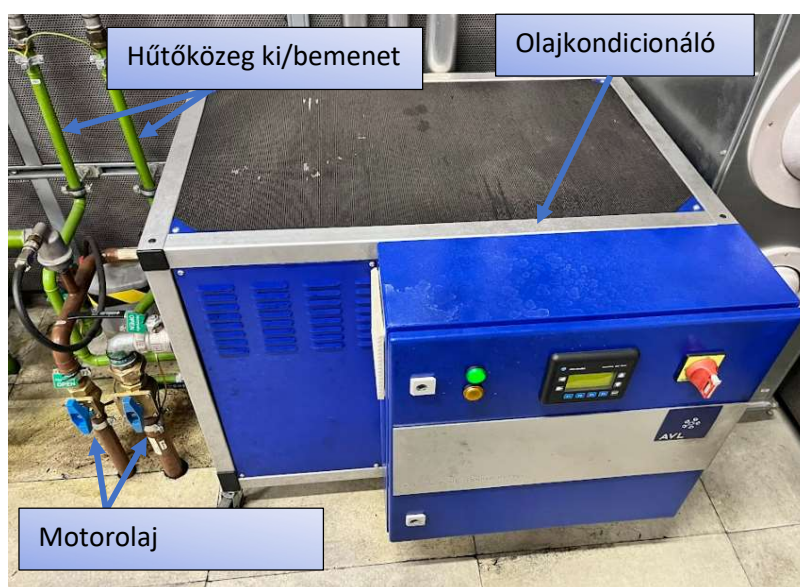
A kísérletsorozathoz a 3.6-os ábrán látható, osztrák AVL GmbH által gyártott DynoRoad 504/4.6 SL típusú motorfékpadot használtam. Ez a fékpad kifejezetten nehézgépjármű-motorokhoz készült, hiszen a maximális motornyomaték eléri a 3000 Nm-t, fordulatszám tekintetében pedig 5000 1/perc fordulattig képes működni. Emellett a maximális fékezhető teljesítménye 500 kW. Mivel a tehetetlenségi nyomaték elérheti a 4.6 kgm²-t, és a motor és a fékpad együttesen volatilis rezgőrendszert hozhat létre, ezért adaptív légpárnás felfüggesztésen helyezkedik el az egész rendszer. Ez az elrendezés a tesztcellát befogadó épület strukturális stabilitása miatt elengedhetetlen. A motorfékpad tulajdonságait a 3.1-es táblázatban foglaltam össze.

3.1. táblázat Fékpad tulajdonságok

Gyártó	AVL
Típus	Load System 500kW
Motorfékpad	DynoRoad 504/4.6 SL
Maximális fordulatszám	5000 1/perc
Maximális nyomaték	3000 Nm
Maximális fékteljesítmény	500 kW
Tehetlenségi nyomaték	4.6 kgm ²

3.1.4. Olaj kondicionáló

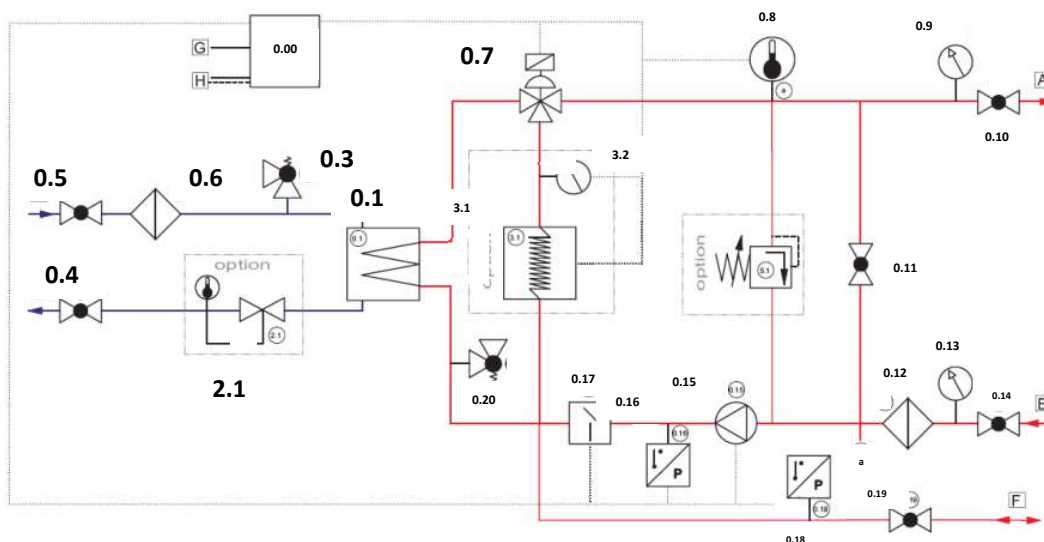
Az olaj hőmérséklete jelentősen befolyásolja a belső égésű motorok termodinamikai és mechanikai működését. Az alkalmazott olaj kondicionálása vagy annak hiánya között mért motorpróbapadi eredmények között jelentős különbségeket lehet megfigyelni. Az olajkondicionáló rendszerek kulcsfontosságú szerepet játszanak ezen különbségek kiegyenlítésében, és nagyban elősegítik a motortesztek összehasonlíthatóságát.



3.7. ábra AVL ConsysLube olajkondicionáló (Forrás: Biró Norbert)

A 3.7-es ábrán látható, a kísérletekhez használt olajkondicionáló rendszer primerköri vezérlése alapvető fontosságú a megismételhető motorfékpados kísérletekhez. Ennek feladatai közé tartozik az olajhőmérséklet szabályozása a próbaüzemek során, ami elengedhetetlen a motor optimális működése és teljesítménye szempontjából. Emellett az olajkondicionáló segítségével az olajat üzemi hőmérsékletre lehet felmelegíteni, amikor a motor nem üzemel. Ez a folyamat biztosítja, hogy az olaj mindig megfelelő hőmérsékletű legyen, még az indítás előtt is, ami kulcsfontosságú a motor tartóssága és hatékonysága szempontjából.

A megfelelő olajhőmérséklet és kondíció elérése és fenntartása olyan tényező, amely hozzájárul a motorok pontos és megbízható teszteléséhez. Az olajkondicionáló rendszerek által nyújtott szabályozás és stabilizáció lehetővé teszi, hogy a motortesztek eredményei összehasonlíthatók legyenek. Ezáltal az olajkondicionálás nemcsak a motorok működését javítja, hanem a teszteredmények megbízhatóságát is biztosítja.



Olajkör	Hűtőkör	Csatlakozási pontok	Elektronika
0.7 szabályzó szelep	0.1 hőcserélő	A motorolaj előremenő	0.00 kapcsolódoboz
0.8 hőmérséklet szenzor	0.3 biztonsági szelep	B motorolaj visszatérő	
0.9 nyomásmérő (előremenő)	0.4 golyóscsap (előremenő)	C hűtőközeg előremenő	2.1 termosztát
0.10 golyóscsap (előremenő)	0.5 golyóscsap (visszatérő)	D hűtőközeg visszatérő	3.1 fűtő rendszer
0.11 golyóscsap (bypass)	0.6 koszfogó		3.2 termosztát
0.12 koszfogó		F olaj leeresztő	
0.13 nyomásmérő (visszatérő)			5.1 nyomásszabályzó szelep
0.14 golyóscsap (visszatérő)			
0.15 szivattyú		G tápfeszültség	
0.16 nyomáskapcsoló (magas)		H sűrített levegő ellátás	
0.17 áramláskapcsoló			
0.18 nyomáskapcsoló (alacsony)			
0.19 golyóscsap (leeresztő)		A Pt100 hőmérséklet szenzor	
0.20 biztonsági szelep			

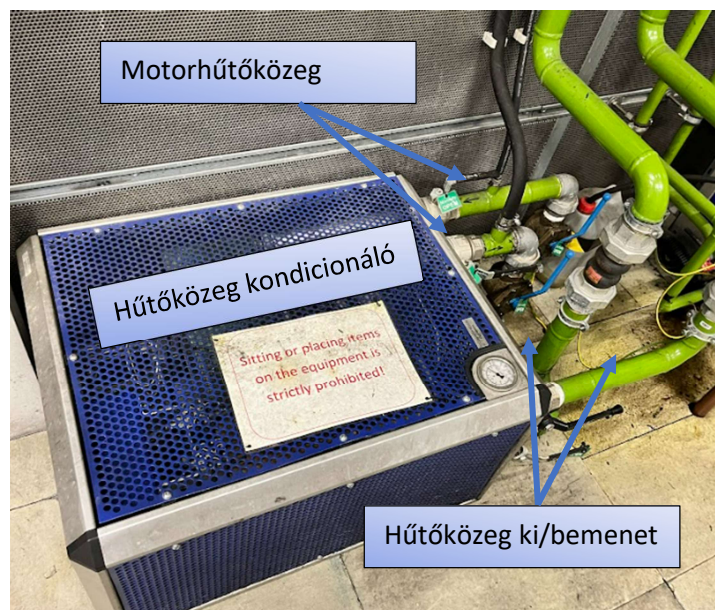
3.8. ábra Az olajkondicionáló hűtőkör hidraulikus kapcsolási rajza (Forrás: AVL List GmbH)

Az olajkondicionáló rendszer rugalmasan alkalmazkodik az adott környezeti feltételekhez a beépített hűtő és fűtő képességek révén. A rendszerben található termosztátszelep lehetővé teszi a visszatérő hűtőközeg hőmérsékletének független szabályozását a hűtési körben.

A beépített 9 kW-os fűtési rendszer kompenzálja a hőveszteségeket. Ezen kívül segít a kenőolaj előmelegítésében, elősegítve az olaj gyorsabb felmelegítését. A fűtési rendszer optimális hőmérsékleti feltételeket biztosít a motor számára, függetlenül attól, hogy milyen környezeti feltételek között működik. Ezáltal a motor mindig az ideális hőmérsékleten üzemelhet, ami kulcsfontosságú a hatékony és megbízható teljesítmény eléréséhez és fenntartásához. A berendezés hidraulikus kapcsolási rajza a 3.8-as ábrán látható.

3.1.5. Hűtővíz kondicionáló

A hűtővíz kondicionáló rendszer szabályozza a motor hűtőközeg hőmérsékletét, és a kísérletkor megadott értéken vagy tartományon belül tartja azt, szabadon beállítható értékeken. Az elektromos fűtési rendszer gyors előmelegítést tesz lehetővé. A rendszer által elérhető magas vezérlési pontosság mind álló, mind dinamikus üzemmódban a tesztkörülmények reprodukálását teszi lehetővé.



3.9. ábra AVL ConsysCool hűtőközeg kondicionáló (Forrás: Biró Norbert)

A rendszer egy ellenirányú hőcserélőt és egy PID (Proportional–integral–derivative controller) szabályzóval kontrollált szelepet tartalmaz. Így a teszt kezelőnek csak a kívánt hőmérsékletet kell beállítania, a szabályzást a berendezés elvégzi. A hűtőközeg kondicionáló a 3.9-es ábrán látható.

3.1.6. Hajtóanyag kondicionáló

Mint ahogy az irodalmi összefoglalóban említve lett, a kipufogócső végi emissziót (tail-pipe emission) befolyásoló tényezőket 3 részre lehet elkülöníteni:

- Motor előtti (hajtóanyag),
- Motorban lejátszódó folyamatok (égés),
- Motor utáni emisszió (nyers emisszió, a kipufogó utókezelő rendszer előtt).

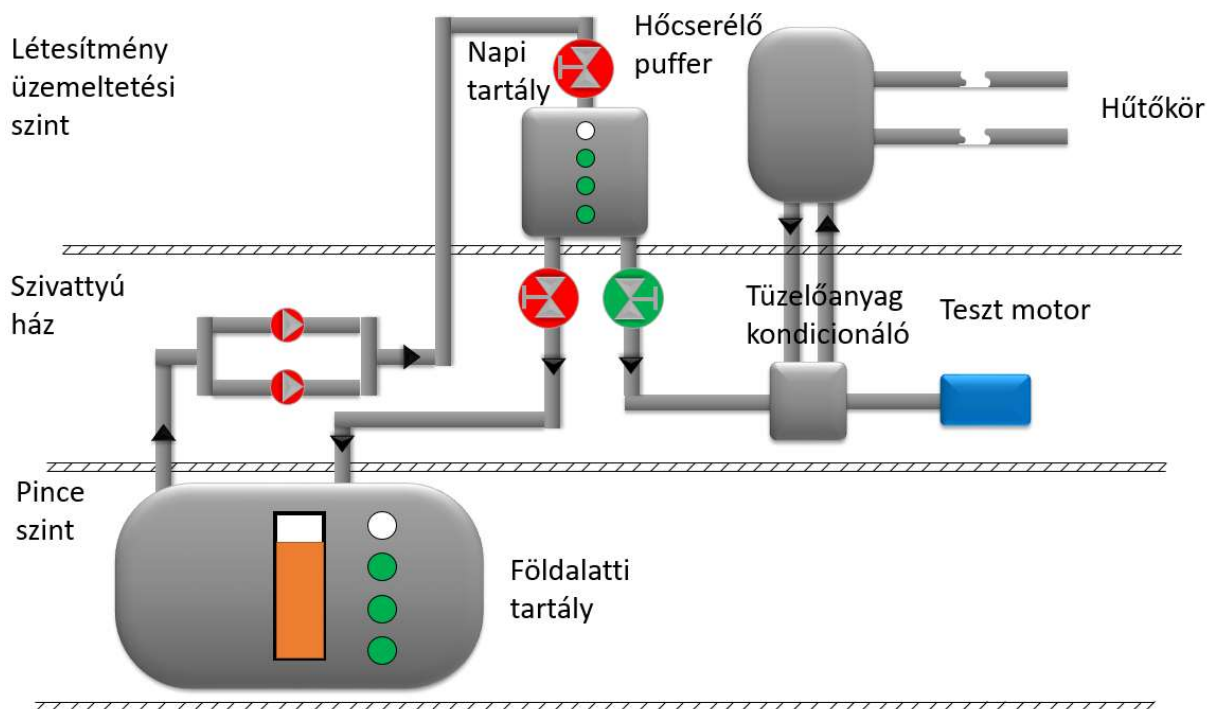
Tehát a megfelelő hajtóanyag kondicionálás és a hajtóanyag tisztaságának fenntartása, kiemelten fontos motor emissziójának összetétele szempontjából. Így ez a berendezés bővebb keretek között kerül bemutatásra.



3.10. ábra AVL KMA 4000 hajtóanyag kondicionáló (Forrás: Biró Norbert)

A hajtóanyag kondicionáló, amely a 3.10-es ábrán látható berendezés csővezetékei rozsdamentes acélból készültek, a hőcsérélők nikkel hegesztettek. Ez a kialakítás lehetővé teszi akár 20%-os biodízel koncentrációval rendelkező hajtóanyag alkalmazását is, habár a jelen teszt sorozatban a kereskedelmi forgalomban használt B7-es, azaz 7%-os biodízel arányt tartalmazó dízel hajtóanyagot alkalmazok.

A rendszer egy 4000 literes földalatti tároló tartályból szivattyúk segítségével juttat az első létesítmény üzemeltetési szinten lévő 100 literes napi tartályba hajtóanyagot. A napi tartályból a hajtóanyag gravitációs elven kerül a tesztcella szinten lévő KMA 4000 típusú olaj kondicionálókhoz. A 3 szinten széttagolt elhelyezkedésű hajtóanyag kondicionáló egységei a 3.11-es összesítő ábrán láthatóak.



3.11. ábra Hajtóanyag ellátó rendszer (Forrás: Biró Norbert)

A hajtóanyag előnyomása (0,5 bar) miatt beáramlik a hajtóanyag bemenetbe, majd a gázbuborék leválasztóba. Az hajtóanyag szivattyú a hajtóanyagot átfolyatja a bemeneti hőcserélőn, finom szűrőn és sűrűségmérőn, ezzel körülbelül 1,4 bar nyomást generál a rendszerben, amelyet a nyomásszabályozó állít be. A fel nem használt hajtóanyag visszafolyik a gázbuborék leválasztó elválasztó bemenetére és onnan vissza az hajtóanyag szivattyúhoz.

A tesztmotor által felhasznált hajtóanyag a folyadékmérőn keresztül és a visszacsapás-nyomás-szabályozón átfolyik a keverési pontig az hajtóanyag visszacsapó szelephez.

Mérési folyamat:

Az hajtóanyag kering a hajtóanyag szivattyún vagy a bypass ellenőrző szelepen keresztül a hajtóanyag kimeneten, illetve a hajtóanyag visszafolyó ágon. Ugyanannyi hajtóanyagot, mint amennyit a motor a keringő mennyiségből felhasznál, újra befecskendez a folyadékmérőn keresztül. A hajtóanyagfogyasztás térfogat alapján rögzítésre kerül. A tömegre vetített fogyasztás aztán kiszámításra kerül a sűrűségmérő és egy logikai vezérlő segítségével.

A logikai vezérlő és a sűrűségmérő közötti hőmérsékletkülönbséget egy PT100 típusú hőmérséklet szenzor érzékeli és használja fel korrekciós tényezőként a tömegre vetített fogyasztás számításában.

Hajtóanyag kondicionálás:

A hőmérsékletszabályozás lehetővé teszi az állítható, állandó hajtóanyaghőmérséklet fenntartását az hajtóanyag kimeneti pontján és a rendszer bemeneti körében. Az hajtóanyaghőmérsékletet az hajtóanyag kimeneti pontján vagy a bemeneti ponton érzékelő szenzorok segítségével méri a készülék. Az hajtóanyag hőmérsékletet a hűtőközeg mennyiségével változik. A szolenoid szelepek a vezérlés által meghatározott ciklusokban nyílnak, így megfelelő mennyiségű hűtőközeg jut el a hőcserélőkhöz. A fűtőkör a hajtóanyag hőmérsékletét a motorhoz történő tényleges hajtóanyag

kimeneti hőmérsékletre vonatkozó nominális értékhez képest kb. 10 °C -al magasabbra szabályozza. A lejjebb elhelyezkedő kimeneti hőcserélőnél a hajtóanyag ismét lehűl.

Gázbuborék érzékelés:

Gázbuborékok a hajtóanyagrendszerben szabálytalan motorműködést okozhatnak. A gázbuborék-érzékelés a gázbuborékok jelenlétét jelzi az hajtóanyag visszatérő vezetékében egy lámpával ellátott visszajelzőn. A gázbuborék érzékelés egy elektronikus fényakadályos eszközzel működik. Ha gázbuborékokat észlel a mérőrendszer, a hajtóanyag nyomás fokozatosan 0.1 barral emelkedik, hogy a gázbuborék leválasztó szelepen fokozatosan kiszoríthassa azokat.

3.1.7. Töltőlevegő kondicionáló

Töltőlevegő-visszahűtés manapság szinte minden feltöltött belső égésű személy- és nehézgépjármű motorban megtalálható. Az égéstérbe bejutó levegő hőmérsékletét a töltet levegő sűrítése és az EGR rendszer használata növeli. A töltőlevegő hűtésével csökkenthetjük az NO_x kibocsátást, mivel ezen a magas hőmérsékleten alakul ki, és javíthatjuk a levegő-hajtóanyag arányt, ami növeli a teljesítményt.



3.12. ábra AVL ConsysBoost töltőlevegő kondicionáló (Forrás: Biró Norbert)

Annak érdekében, hogy a töltőlevegő hűtését minél hatékonyabban végezhessem, az eredeti motoron található töltőlevegő-visszahűtő rendszert kicseréltem egy ipari víz/levegő hőcserélővel, mely a 3.12-es ábrán látható. Ennek az új rendszernek az előnye, hogy széles határok között állíthatom be a töltőlevegő hőmérsékletét, függetlenül a motor üzemi körülményeitől. Ezáltal nagyobb rugalmasság és pontosság érhető el a kísérletek során, lehetővé téve az optimális teljesítmény és emisszió elérését.

Az irányítás a tesztcella vezérlő számítógépen keresztül érhető el, programozható formában is.

3.1.8. Teszt cella szenzorok és adat felvétel

Az OBD (On-Board Diagnostic) rendszer és az azt kiegészítő on-board szenzorok ma már gyakorlatilag minden kereskedelmi forgalomban lévő gépjárművön megtalálhatók. Ezek a szenzorok valós időben mérnek különböző paramétereket, mint például hőmérséklet, nyomás és egyéb adatok, amelyek az autó különböző részeiről származnak. Annak ellenére, hogy ezek a rendszerek elérhetőek, a teszttevékenységem során egyedi szenzorokat alkalmazok. Ennek oka, hogy a kipufogórendszert speciálisan felkészítjük a motorfékpados tesztekhez, így az eredeti szenzorok nem lennének a megfelelő helyen a mérésekhez. Ráadásul az on-board szenzorok, bár rendkívül hasznosak a mindennapi üzemeltetés során, nem mindig felelnek meg a kutatási környezet speciális igényeinek. A mintavételi frekvencia és a kalibráció például nem mindig megfelelő a kísérleteimhez.



3.13. ábra Egyedileg telepített szenzorok analóg-digitális konvertere és bemenete (Forrás: Biró Norbert)

Ennek eredményeként néha előfordulhatnak olyan esetek, amikor azonos paramétereket duplán mérek, például az olajnyomás esetében. A 3.13-as ábrán látható egyedi szenzorok bevetése lehetővé teszi, hogy a motor működését olyan paraméterekkel figyeljem meg, amelyek nem érhetők el az OBD rendszeren keresztül. Például az kipufogógáznyomás mérése esetében az egyedi szenzorok pontosabb eredményeket szolgáltatnak a kipufogórendszer speciális felépítéséből adódóan. Emellett a mintavételi frekvenciát és a kalibrációt is finom hangolhatjuk az egyedi szenzorokkal, így biztosítva a kísérletek megfelelő hitelességét és reprodukálhatóságát.

Ezen kívül az egyedi szenzorok lehetőséget adnak arra, hogy rugalmasan állítsam a szenzorok tulajdonságait a változó tesztkörülményekhez. A kipufogórendszer módosításaihoz való alkalmazkodás mellett az egyedi szenzorok segítségével széles skálán mozgathatjuk a mérési paramétereket, függetlenül a motor aktuális üzemi körülményeitől. Ezáltal a kísérletek során olyan

adatokat gyűjthetünk, amelyek kritikus fontosságúak a motor teljesítményének, hatékonyságának és károsanyag-kibocsátásának pontos elemzéséhez.

3.2 táblázat Mérendő változók listája

Mérendő változók		
Motorfordulat_OBD	Olajhőmérséklet_OBD	Motorfordulat
EGR_OBD	Wastegate_OBD	Pedálszög
Kipufogógáznyomás_OBD	Pedálszög_OBD	Motornyomaték
Hajtóanyag befecskendezés_OBD	Hűtőközeg hőmérséklet_OBD	Motorteljesítmény
Rail cső nyomás_OBD	NO _x kimeneten_OBD	Tesztcella hőmérséklet
Töltőlevegő nyomás_OBD	NO _x bemeneten_OBD	Beszívott levegő hőmérséklet_1
Töltőlevegő hőmérséklet_OBD	Feltöltő fordulatszám_OBD	Beszívott levegő hőmérséklet_2
EGR hőmérséklet_OBD	Motornyomaték_OBD	Páratartalom
Beszívott levegő szelep_OBD	Kipufogógáz hőmérséklet_OBD	Beszívott levegő tömegáram
Motorüzemmód	Hajtóanyag hőmérséklet_OBD	Hajtóanyag tömegáram
Kipufogógáz tömegáram_OBD	Kipufogógáz hőmérséklet a DPF-nél_OBD	Hajtóanyag hőmérséklet
Olajnyomás_OBD	Általános motor üzemmód	Hajtóanyag nyomás_1
Hajtóanyag nyomás_2	DPF hőmérséklet_ki	COL koncentráció a kipufogógázban_ki
Töltőlevegő hűtő nyomás	Feltöltő nyomás_ki	CH koncentráció a kipufogógázban_ki
Töltőlevegő hűtő hőmérséklet_be	Nyomásesés a kipufogórendszeren	CH ₄ koncentráció a kipufogógázban_ki
Töltőlevegő hűtő hőmérséklet_ki	CO koncentráció a kipufogógázban_be	NO _x koncentráció a kipufogógázban_ki
Olajhőmérséklet	COL koncentráció a kipufogógázban_be	NO koncentráció a kipufogógázban_ki
Olajnyomás	CH koncentráció a kipufogógázban_be	CO ₂ koncentráció a kipufogógázban_ki
Hűtőközeg hőmérséklet_be	CH ₄ koncentráció a kipufogógázban_be	O ₂ koncentráció a kipufogógázban_ki
Hűtőközeg hőmérséklet_ki	NO _x koncentráció a kipufogógázban_be	Hígítással kalkulált részecskeszám
Feltöltő hőmérséklet_ki	NO koncentráció a kipufogógázban_be	Nyers részecskeszám
DOC hőmérséklet_be	CO ₂ koncentráció a kipufogógázban_be	Ideális részecskeszám
DOC hőmérséklet_ki	O ₂ koncentráció a kipufogógázban_be	Részecskeszám eltérés
DPF hőmérséklet_be	CO koncentráció a kipufogógázban_ki	Részecske hígítási tényező

A kísérletek során 72 szenzort alkalmaztam, amelyek a 3.2-es táblázatban szerepelnek. Ezen szenzoradatok kulcsfontosságúak voltak az adatgyűjtés során.

3.2. Hajtóanyag

A dízelgázolaj a kompressziógyújtású belsőégésű motorok hajtóanyaga. Ahogy a 3.1.6. fejezetben részletesen bemutatásra került, a hajtóanyag tisztasága és minősége jelentős hatással van a kipufogó emissziójára. Kísérleteim során a Mol Nyrt. Százhalombattai finomítójában előállított, kereskedelmi forgalomban kapható B7 megnevezésű hajtóanyagot használtam, amely 7% energiaarányos bioanyagot tartalmaz. Az üzemanyag pontos összetétele 93-97% gázolaj és 3-7% megújuló forrásból származó metil-észter. A kéntartalma a 10 ppm-es határ alatt van, és minden előírásnak megfelel. A hajtóanyag jellemzőit összefoglaló 3.3-as táblázat alább található, míg a teljes adatlapja a mellékletek fejezetben szerepel.

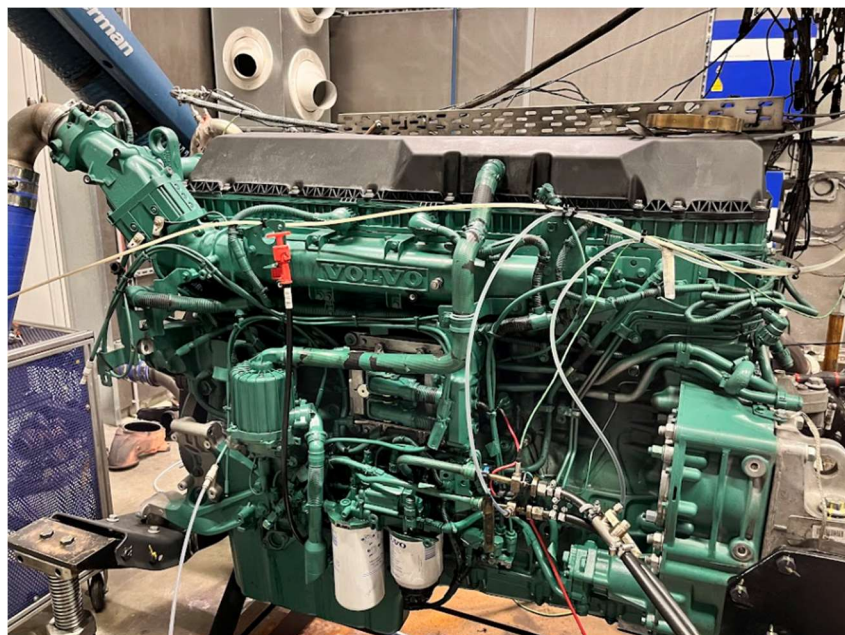
3.3 táblázat A kísérletekhez használt hajtóanyag tulajdonságai

Alkotó elem 1:	Dízel olaj (gázolaj); 93-97%
Alkotó elem 2:	zsírsav metil-észter; 3-7%
Kezdőforrpont:	kb.180°C
Végforrpont:	kb. 370°C
Lobbanáspont:	> 55°C
Gyulladás hőmérséklet:	min. 200°C
Robbanási határok:	alsó: 0,6 tf. %; felső: 6,5 tf. %
Gőznyomás (20°C-on):	<= 10 hPa
Sűrűség (15°C-on):	820 - 845 kg/m ³
Oldhatóság vízben:	nem elegyedik
Kinematikus viszkozitás (40°C-on):	2,0 - 4,5 mm ² /s

3.3. Teszt motor

A kísérletekhez egy Volvo gyártmányú, közösnyomócsöves, közvetlenbefecskendezéses dízelüzemű, nehézgépjárművekbe tervezett motort használtam, amely a 3.14-es ábrán látható, míg az összefoglaló adatlapja 3.4-es táblázatban. 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 hengerűrtartalma 12800 cm³, maximális teljesítménye eléri a 372 kW teljesítményt, míg maximális nyomatéka a 2840 Nm-t. A maximális motornyomatékát alacsony fordulatszám-tartományban, 900-1300 (1/min) között adja le. A maximális teljesítményt ugyancsak alacsony fordulatszám-tartományban, 1300-1600 (1/min) között adja le, ezáltal növelve a motor várható élettartamát. Az új fejlesztésű Volvo VDS 4.5 szabványnak megfelelő 10W-30 viszkozitási osztályú előírt kenőolaj az alacsonyabb oxidációja lévén 88 000 km-es olajcsere periódus tartható a tesztciklusoknak megfelelő vezetési profil mellett. A fix geometriájú turbófeltöltő, az új specifikációjú kenőolaj és az alacsony motorfordulat mellett elérhető nyomaték és teljesítmény miatt a tervezett motorélettartam megközelíti a 2 millió km-t. Az Ibidem

Hungary Kft telephelyén megtalálható Technical Centerben, tesztcélokra 200 000 km ekvivalenciájú üzemórát használtuk a motort. Az eredeti Euro VI-d emissziós direktívának való megfelelését a következő fejezetekben fogom vizsgálni.



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

3.4 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

3.4. Kísérletek tervezése

3.4.1. WHSC ciklus

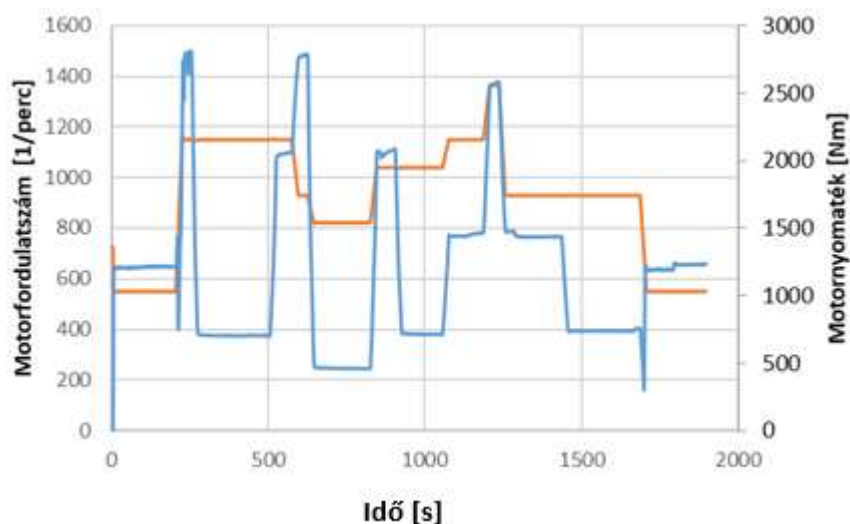
A WHSC (World Harmonized Steady State Cycle) ciklus a globális műszaki szabályozás (GTR) 4. számú rendelete által meghatározott állandó állapotú motor fékpados tesztciklus, amelyet az ENSZ ECE GRPE csoport fejlesztett ki (Európai bizottság 2008) (Európai bizottság 2016). A motor kipufogógáz-kibocsátásának világszerte harmonizált nehéz tehergépjármű tanúsítási eljárását (WHDC) fedi le. 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.

3.5 táblázat A kísérletekhez használt tesztciklus normalizált terhelési pontjai

Mód	Motor fordulatszám (normalizált)	Terhelés (normalizált)	Súlyozási tényező	Időtartam
-	%	%	-	másodperc
0	0	-	0.24	-
1	0	0	0.17/2	210
2	55	100	0.02	50
3	55	25	0.1	250
4	55	70	0.03	75
5	35	100	0.02	50
6	25	25	0.08	200
7	45	70	0.03	75
8	45	25	0.06	150
9	55	50	0.05	125
10	75	100	0.02	50
11	35	50	0.08	200
12	35	25	0.1	250
13	0	0	0.17/2	210
Összesen			1	1895

A WHSC egy fokozatosan növekvő állandósult állapotú tesztciklus, amely tartalmaz egy sor teszt módot, mindegyik mód meghatározott fordulatszám- és nyomatékkritériumokkal, rendelkezik. A WHSC különböző módjainak paraméterei szerepelnek a 3.5-ös táblázatban. Mivel a jelentős számú motor érhető el kereskedelmi forgalomban és összehasonlítható mérési eredményre van szükség ezért két különböző formában érhető el a WHSC ciklus (Európai bizottság 2018). Az úgynevezett normalizált értékű módok (3.5. táblázat) százalékos arányban definiálják a maximális fordulatszámhoz és motornyomatékhoz tartozó értékeket. Ezzel szemben a denormalizált értékek már az adott motorra származtatottak. Az 3.15-ös ábrán az általam használt tesztmotorra denormalizált motorfordulatszám-és nyomaték látható, míg a 3.1. egyenlet a denormalizálási számítást (Európai bizottság 2022) mutatja be.



3.15. ábra Teszt motorra denormalizált WHSC ciklus (Forrás: Biró Norbert)

Denormalizálási számítás az európai előírások szerint

$$n_{ref} = n_{norm} \cdot (0,45 \cdot n_{lo} + 0,45 \cdot n_{pref} + 0,1 \cdot n_{hi} - n_{alapj\acute{a}rat}) \cdot 2,0327 + n_{alapj\acute{a}rat} \quad (3.1)$$

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

$n_{alapj\acute{a}rat}$ az alapjárat fordulatszám

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

3.4.2. 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 3.16. ábrán látható tesztcellák előtt található vezérlő számítógépről elérhetővé válik az előzőekben ismertetett kondicionáló rendszerek, a motorfékpad, a motor, az emissziómérő berendezések, a hajtóanyagrendszer, adatfelvétel illetve a létesítményüzemeltetési szinten található PLC-k irányítása is.



3.16. ábra Tesztcella és létesítményüzemeltetés irányító központ (Forrás: Biró Norbert)

A motorfékpados kísérletek megkezdéséhez 5 különböző paraméter lista definiálása szükséges:

- Rendszer Paraméterek (System Parameters),
- Létesítményüzemeltetési paraméterek (Test Facility Parameters),
- Teszt motor paraméterek (Unit Under Test Parameters),
- Teszt ciklus paraméterei (Test Parameters),
- Vezetési stílus (Driver Parameters).

Rendszer Paraméterek (System Parameters)

A rendszerparaméterek magukban foglalják az adatfelvételi csatornákat, beleértve a tesztcella saját rendszerébe integrált hőmérséklet- és nyomásértékeket is. Ezek közé tartoznak az úgynevezett "normname-k" is, amelyek olyan változók, amelyeket szabadon lehet hozzárendelni fizikailag létező adatfelvételi csatornákhöz, közvetlenül vagy közvetetten. A közvetett módszer során egy vagy több változó függvénykapcsolatát használva határozza meg a rendszer a "normname" értékét. Ezt az eljárást akkor alkalmaztam, amikor a fizikailag létező szenzort nem kalibrálták megfelelő mértékegységre, így az indirekt eljárással kapott valós idejű értéket használtam a végső "normname" értékének meghatározásához.

Létesítményüzemeltetési paraméterek (Test Facility Parameters)

A létesítményüzemeltetési paraméterek olyan összekötő programokat foglalnak magukban, amelyek összehangolják a különböző hőcserélők, kondicionáló rendszerek és PLC-k vezérlését a tesztcella szoftverével. Ezen létesítési üzemeltetési paraméterek segítségével a tesztcella szoftvere teljes összhangban működik a különböző hőcserélők és kondicionáló rendszerekkel, valamint a PLC-k vezérlésével. Ez a harmonizált összekötés biztosítja a zökkenőmentes kommunikációt és optimális együttműködést a rendszerek között, lehetővé téve a hatékony tesztelést a tesztcellában.

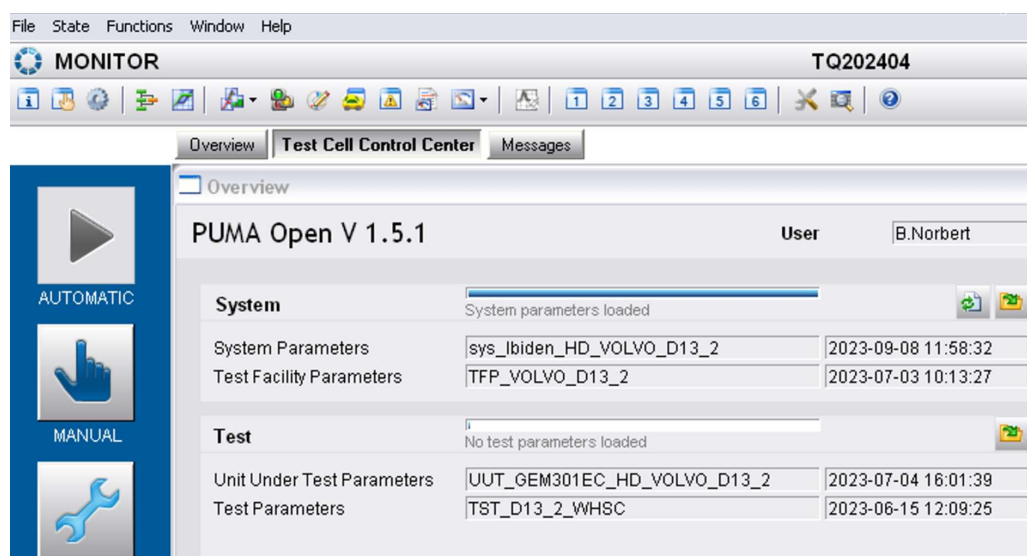
Teszt motor paraméterek (Unit Under Test Parameters)

Mivel a tesztcellában lehetőség van több típusú és teljesítményszintű motor tesztelésére, ezért fontos, hogy minden egyes egység alapadatai szerepeljenek egy paraméter listában. Paraméterek:

- Alapjárat fordulatszám,
- Indítási idő,
- Minimális fordulatszám, amellyel a motor beindítottnak tekinthető,
- Motor karakterisztika (Full Load Curve),
- maximális megengedhető motor fordulatszám,
- maximális megengedhető motor nyomaték,
- Motorfék karakterisztika.

Teszt ciklus paraméterei (Test Parameters)

A tesztciklusok paramétereit a rendszer .tst kiterjesztésű fájlokban tárolja. Ezekben a fájlokban nemcsak a denormalizált motorparaméterek találhatók, hanem a különböző kondicionáló rendszerek tesztciklus-specifikus beállításai, rendszerparaméterekben definiált rendszerváltozók listája, amelyeket a teszt során rögzíteni kívánunk. Emellett tartalmazzák az emissziómérő berendezések beállításait és használati paramétereit is. Ezek a fájlok lehetővé teszik a teszt során rögzített adatok pontos visszakeresését és elemzését. A 3.17. ábrán látható a kísérleti paraméter kezelőfelület.



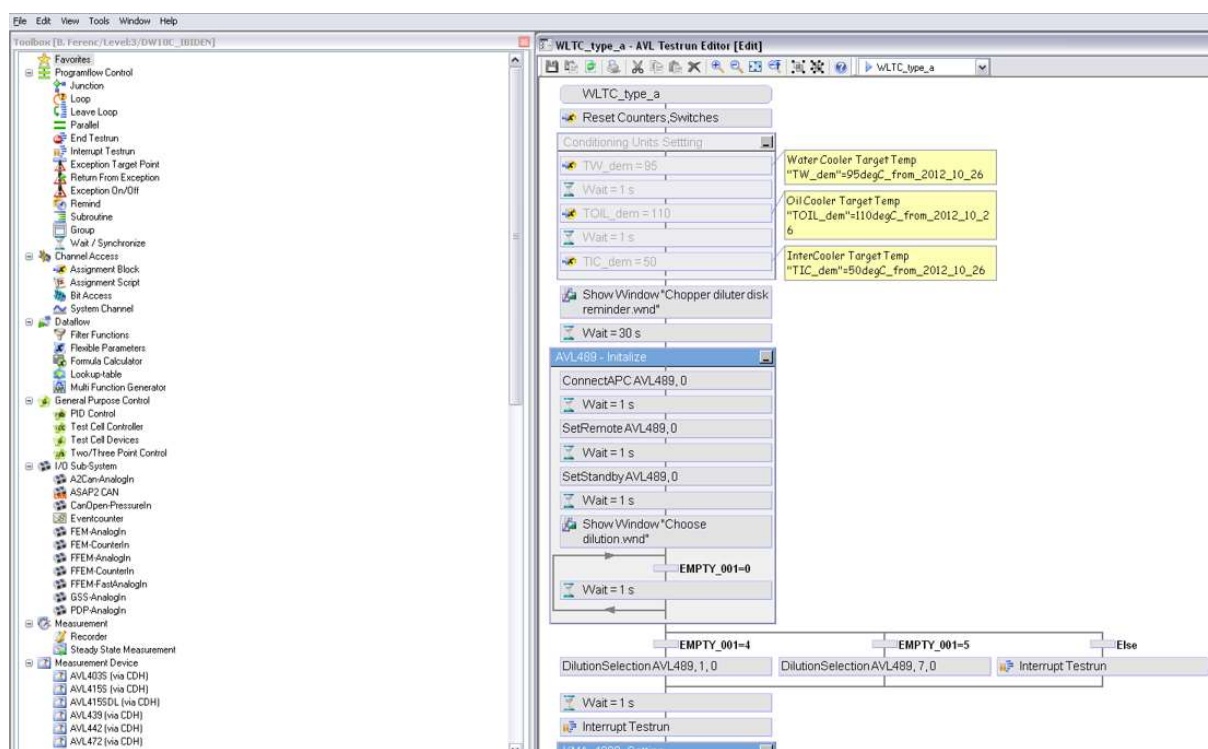
3.17. ábra Kísérleti paraméter kezelőfelület (Forrás: Biró Norbert)

Vezetési stílus (Driver Parameters)

Lehetőség van eltérni az adott tesztciklustól és valós időben különböző vezetési stílusokat szimulálni. Azonban a kísérleteim során nem alkalmaztam ezt az opciót, így minden paramétert az eredeti beállításokon hagytam változatlanul. Ennek következtében az összes mérési adat az alapbeállításokkal történt összehasonlításra került, biztosítva a konzisztens és megbízható eredményeket.

3.4.3. Automatizált program felépítése

Az AVL Explorer nevű felületen keresztül kezeltem a tesztprogramokat. A doktori kutatásom során hangsúlyt fektettem az egyedi tesztprogramok készítésére, hogy biztosítsam a rögzített paraméteres kísérletek magas színvonalú és pontos megismételhetőségét. A TST editor nevű program szerkesztő felhasználásával hoztam létre a szükséges WHSC mode 9 és WHSC programokat, amelyek kulcsfontosságúak voltak azokban a kísérletekben, ahol a motor teljesítményét és kibocsátását értékeltem. Ezen programok pontos végrehajtása lehetővé tette a megbízható eredmények elérését, így alapozva meg a kutatásom eredményeit. A szoftver által nyújtott rugalmasságnak köszönhetően a kísérletek során minden a tesztcella infrastruktúrában elérhető paramétert finomhangoltam, hogy biztosítsam az objektív és összehasonlítható eredményeket. A 3.18. ábrán látható, általam létrehozott tesztprogramok részletes tervezése és pontos végrehajtása lehetővé tették, hogy a WHSC mód 9 és WHSC programokat a kísérleteim alapvető eszközeiként alkalmazzam, segítve ezzel a motor teljesítményének és kibocsátásának alapos elemzését és értékelését. Ez a módszeresség és az egyedi tesztprogramok hatékony alkalmazása hozzájárult ahhoz, hogy megbízható eredményeket érjek el kutatásom során, támogatva ezzel a kutatási eredmények validitását.

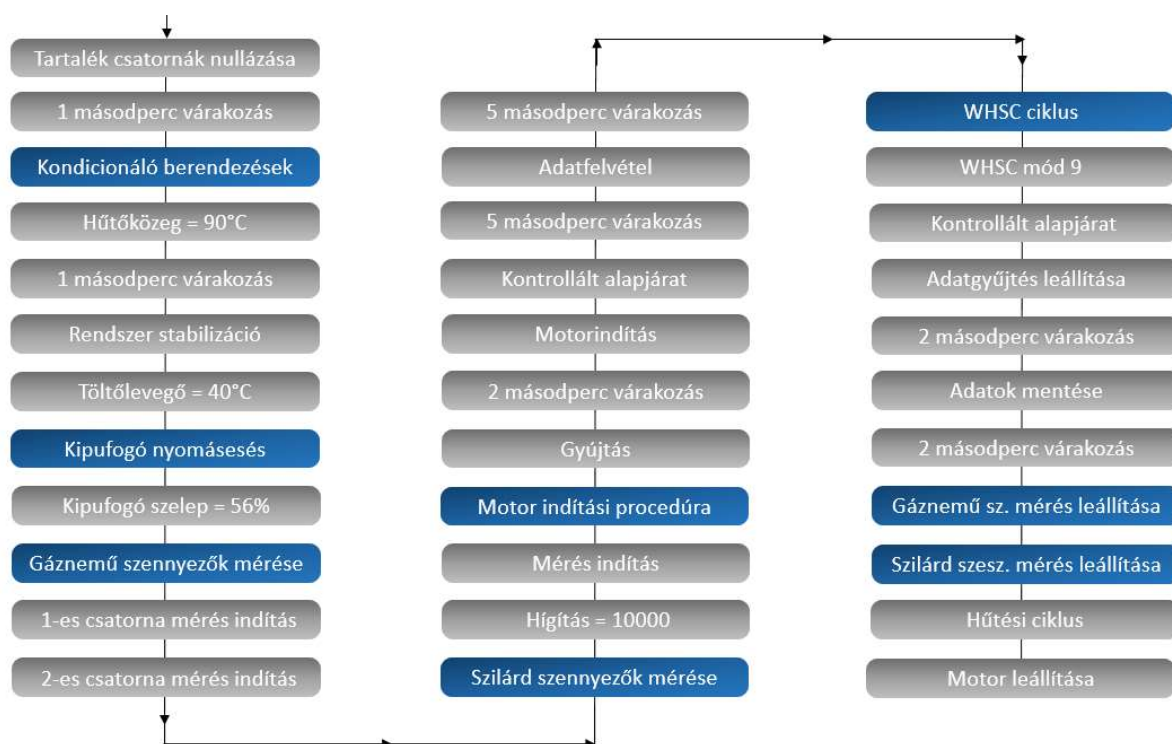


3.18. ábra AVL PUMA programozási felületen általam létrehozott WHSC parancssor (Forrás: Bíró Norbert)

WHSC mód 9

A 3.4.1. fejezetben bemutatott WHSC ciklus 9. módját mint előmelegítési folyamatot használtam, ezzel megfelelően az európai előírásoknak, így eredményeim összevethetővé válnak más kutatók eredményeivel. Első lépésként az átmeneti adattárolásra alkalmas tartalékcsonatornákat nulláztam. Majd 1 másodperc várakozással szavatoltam a rendszer leterheltségének redukcióját. Ezután a kondicionáló egységek állandósult értékre történő beállítása következett. A hűtőközeget 90 °C-ra, majd 1 másodperc után a töltőlevegő kondicionálót 40 °C-ra állítottam. A kipufogó nyomásesés

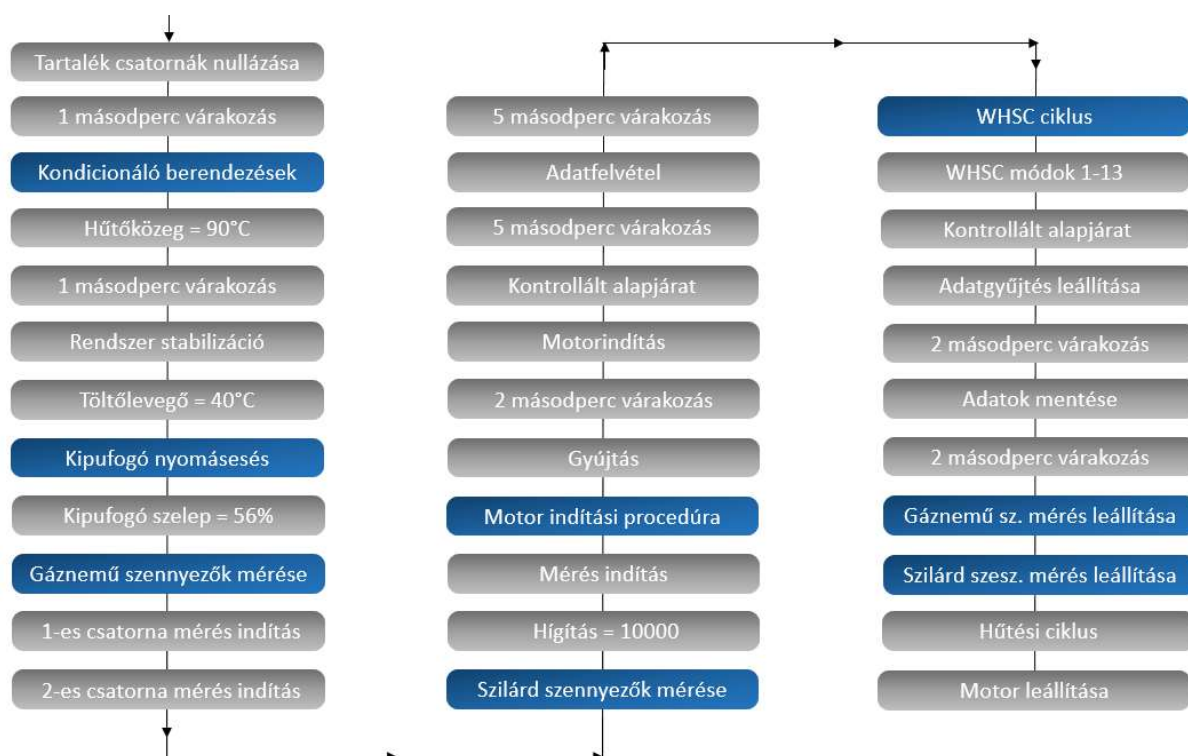
beállításához a kipufogócső végén elhelyezkedő szolenoid szelepet elektronikusan 56%-os nyitási értékre állítottam. Erre azért van szükség mert nem alkalmaztam kipufogó végdobot, ezáltal a nyomásesést, amit okozna szimulálni kell. A 3.7.2 fejezetben ismertetésre kerülő gáznemű szennyezők mérésére használatos AMA i60, ugyancsak az AVL GmbH terméke, így lehetőség nyílt rendszerbe kapcsolni. A mérőcsatornák stabilizálódása miatt a mérést automatikusan indítom a programmal, már a motor indulása előtt. Ezután a szilárd szennyezők (korom) mérése kezdődik meg. A mérés megkezdése előtt hígítást 10000-re állítom a program segítségével. Ez azt jelenti, hogy kipufogócsőből valós időben mintavételezett kipufogógázt 1:10000 arányban hígítva juttatja el az aeroszolt (minta kipufogógáz) a részecskeszámláló egységbe. Erre azért van szükség mert a kísérleteim során megfelelő összehasonlíthatóság miatt nem alkalmazok dízel részecskeszűrőt, így a kipufogógázban lévő részecske koncentráció kirívóan magas, 10^{13} és 10^{14} (#/kWh) tartományban helyezkedik el. A megfelelően megnövelt hígítási aránnyal tudom csökkenteni a részecskeszámláló egység elkoszolódását. A motorindítási procedúra, gyújtás jellel kezdődik, ezután egy 2 másodperces várakozási idő következik, amely során motorvezérlő 24V egyenáramú tápellátást kap. A motorfékpad ekkor villanymotor üzemre vált és a teszt motor paraméterek-ben megadott minimum fordulatszámra állítja a motort. Majd az 550 (1/perc) fordulátú kontrollált alapjárat beállítása következik, melynek a stabilizációjára 5 másodperc várakozási időt számoltam rá. Miután beállt a kontrollált alapjárat, ugyancsak 5 másodperces várakozási idővel megkezdődik az adatfelvétel az összes beállított csatornán. Majd megkezdődik a főprogram futtatása, amely ebben az esetben a WHSC mód 9, az adott motorra denormalizált lépéseit jelenti. Miután a WHSC mód 9 befejeződött a program kontrollált alapjáratra állítja a motort. Majd az adatgyűjtés leállítására 2-2 másodperc van allokálva. Ezután a gáznemű és a szilárd szennyezők mérésére áll le. Végül egy előre meghatározott alacsony terhelésű hűtési ciklusra áll át a motor, majd pedig leáll. Az általam készített WHSC mód 9 program a 3.19. ábrán látható.



3.19. ábra WHSC mód 9 program lépései az AVL Puma programozási felületen (Forrás: Bíró Norbert)

WHSC

A WHSC ciklushoz amely ugyancsak a 3.4.1. fejezetben került bemutatásra, mind a 13 mód szerepel. A 3.20. ábrán látható, általam készített WHSC program lépései hasonlóak a WHSC mód 9-hez. Első lépésként az átmeneti adattárolásra alkalmas tartaléksatornákat nulláztam. Majd 1 másodperc várakozással szavatoltam a rendszer leterheltségének redukcióját. Ezután a kondicionáló egységek állandósult értékre történő beállítása következett. A hűtőközeget 90 °C-ra, majd 1 másodperc után a töltőlevegő kondicionálót 40 °C-ra állítottam. A kipufogó nyomásesés beállításához a kipufogócső végén elhelyezkedő szolenoid szelepet elektronikusan 56%-os nyitási értékre állítottam. A gáznemű szennyezők mérésére használatos AMA i60 mérőcsatornái stabilizálódása miatt a mérést automatikusan indítom a programmal, már a motor indulása előtt ez esetben is. Ezután a szilárd szennyezők (korom) mérése kezdődik meg. A mérés megkezdése előtt hígítást 10000-re állítom a program segítségével. A motorindítási procedúra, gyújtás jellel kezdődik, ezután egy 2 másodperces várakozási idő következik, amely során motorvezérlő 24V egyenáramú tápellátást kap ez esetben is. A motorfékpad ekkor villanymotor üzemre vált és a teszt motor paraméterek-ben megadott minimum fordulatszámra állítja motort. Majd az 550 (1/perc) fordulatu kontrollált alapjárat beállítása következik, melynek a stabilizációjára 5 másodperc várakozási időt számoltam rá. Miután beállt a kontrollált alapjárat, ugyancsak 5 másodperces várakozási idővel megkezdődik az adatfelvétel az összes beállított csatornán. Majd megkezdődik a főprogram futtatása, amely ebben az esetben a WHSC ciklus a teljes 13 módot beleértve. Miután a WHSC befejeződött, a program kontrollált alapjáratra állítja a motort. Majd az adatgyűjtés leállítására 2-2 másodperc van allokálva. Ezután a gáznemű és a szilárd szennyezők mérésére áll le. Végül egy előre meghatározott alacsony terhelésű hűtési ciklusra áll át a motor, majd pedig leáll.



3.20. ábra WHSC program lépései az AVL Puma programozási felületen (Forrás: Biró 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, 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.

3.5. Kísérleti terv

A kísérleteket az Ibsiden Hungary telephelyén található Technical Centerben hajtottam végre. Előző fejezetekben ismertetett eszközök segítségével. A 3.7.4. fejezetben ismertetett általam készített scriptelt motorvezérlő programokat használtam a motor különböző aktuátor értékeinek kényszerített módosítására.

3.6. táblázat Rögzített paraméteres kísérletek listája

Sorszám	Aktuátor	Kitérés az eredeti állapottól	Kísérlet elnevezés	Script elnevezés
1	EGR	-30%	EGR-30%	301
2	Intake	-30%	Intake-30%	302
3	RailP	-30%	RailP-30%	303
4	WGD	-30%	WGD-30%	305
5	EGR	-20%	EGR-20%	401
6	Intake	-20%	Intake-20%	402
7	RailP	-20%	RailP-20%	403

3.6. táblázat Rögzített paraméteres kísérletek listája

8	WGD	-20%	WGD-20%	405
9	EGR	-10%	EGR-10%	501
10	Intake	-10%	Intake-10%	502
11	RailP	-10%	RailP-10%	503
12	WGD	-10%	WGD-10%	505
13	EGR	+10%	EGR +10%	601
14	Intake	+10%	Intake+10%	602
15	RailP	+10%	RailP+10%	603
16	WGD	+10%	WGD+10%	605
17	EGR	+20%	EGR +20%	701
18	Intake	+20%	Intake+20%	702
19	RailP	+20%	RailP+20%	703
20	WGD	+20%	WGD+20%	705
21	EGR	+30%	EGR +30%	801
22	Intake	+30%	Intake+30%	802
23	RailP	+30%	RailP+30%	803
24	WGD	+30%	WGD+30%	805

Fontos megemlíteni, hogy motor működése során minden paraméter rögzített volt, tehát csak az adott számozott kísérletek során módosított aktuátor értékek tértek el az alapállapottól, a teljes lista a 3.6 táblázatban látható, míg a 3.7. táblázatban a vizsgálati tematika. 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 ismételt 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.

3.7. táblázat Vizsgálati tematika

Sorszám	Teszt név	Szilárd részecske mérés	Gáznemű szennyező mérés	Időtartam [óra]
1	Tesztmotor és tesztcella előkészítés			3
2	WHSC mode 9 precondition	X	X	0.5
3	5 perc hűtés			0.08
4	WHSC ciklus	X	X	0.5

3.6. Kipufogó elrendezés

A kísérletek során a manapság szokásos oxidációs katalizátor, dízel részecskeszűrő/szelektív katalitikus redukciós katalizátor kiépítés helyett csak az oxidációs katalizátort alkalmaztam. Mivel ez egy teljesen áteresztő kerámia, így a kipufogó rendszer nyomásesésére minimális hatással van. A kipufogógázban lévő főbb szennyezőkre az oxidációs katalizátor a következő hatással van:

Korom tömeg / szám

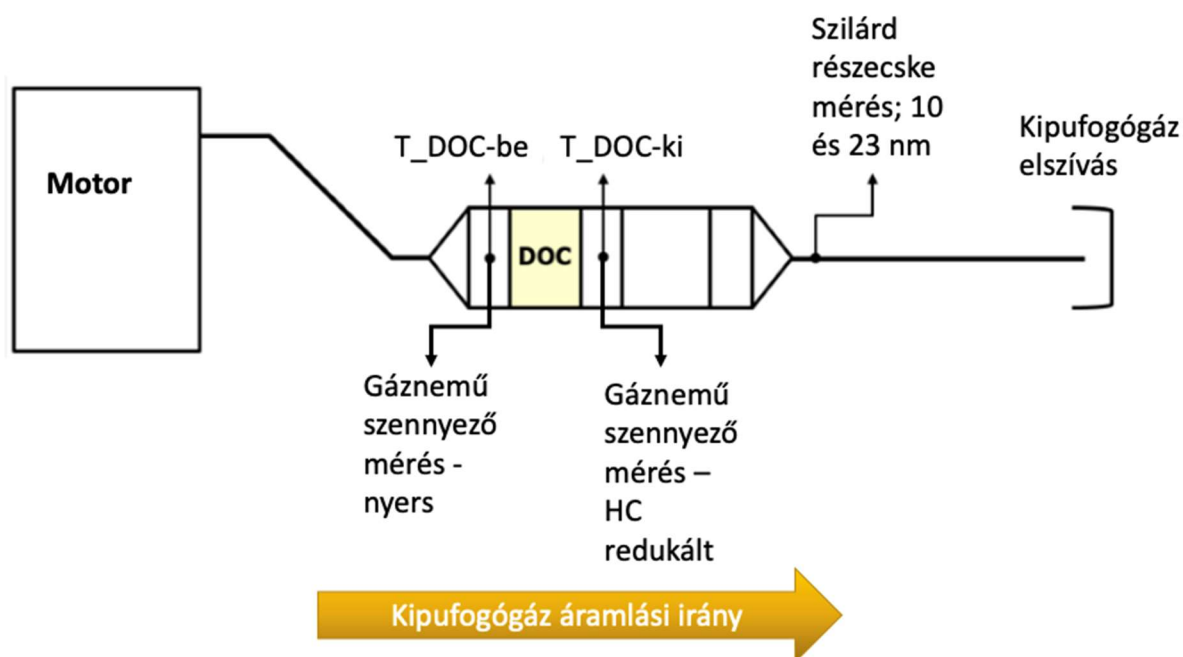
A DOC minimális teljesítményszinten képes a korom oxidálására és kibocsátásának csökkentésére a részecskék katalizátoron belüli elégtelen tartózkodási idejére vezethető vissza. Nagyobb tömegük és méretük miatt a szilárd részecskék kisebb valószínűséggel jutnak be a kerámia pórusaiba, mint a gázmolekulák. Azon ritka esetekben mikor be is jutnak, akkor több időre van szükség a katalitikus reakciók befejezéséhez. Összegezve minimális hatást gyakorol a szilárd részecske emisszióra.

Nitrogén Oxidok

A legtöbb esetben az összes nitrogén-oxid-kibocsátás nem változik a dízel oxidációs katalizátor előtti értékekhez képest.

A dízel oxidációs katalizátorokhoz képest néha kismértékű, általában nem több, mint néhány százalékos NO_x -csökkentést mérhető. Ez annak köszönhető, hogy a kipufogó gázban szabad oxigén molekulák spontán egyesülhetnek a DOC kerámia hordozó felületén a Nitrogén-monoxiddal (NO), NO_2 -t létrehozva. Mivel a NO_x egy gyűjtő kifejezés a nitrogén oxidjaira (NO, NO_2), tehát a Nitrogén-Oxidok nominálisan nem vagy csak minimálisan változnak.

A kipufogó rendszer fizikai sajátosságai miatt a részecske számot csak a DOC kimeneti oldalán tudtam mérni, a gáznemű szennyezők esetén az úgynevezett valós nyers emisszió mérésére is lehetőségem volt. A kísérletekhez használt kipufogórendszer kialakítása a 3.21. ábrán látható.



3.21. A kísérletekhez használt kipufogórendszer felépítése (Forrás: Biró Norbert)

3.7. Motor aktuátorok

3.7.1. Motor aktuátorainak bemutatása

A motor nyers emissziós szintjeinek állításához, széleskörű specifikált cél hardverekre és szoftverekre volt szükségem, melyeket a következő fejezetekben mutatok be. A kísérletek során 4 motor aktuátorra (EGR, közösnyomócső nyomás szelep, beszívott levegő szelep, wastegate) koncentráltam, minden más változót rögzítettem.

EGR:

A kipufogógáz-visszavezetés (EGR) egy olyan kibocsátáscsökkentő technológia, amely jelentős NO_x -kibocsátás-csökkentést tesz lehetővé a legtöbb dízelmotor esetében. A korszerű kereskedelmi forgalomban kapható dízelmotoroknál az EGR alkalmazása az NO_x -csökkentés leghatásosabb és legszélesebb körben használt eszköze.

Közösnyomócső nyomás szelep

A hajtóanyag befecskendezés nyomása, mind a NO_x , mind a részecskeszám mennyiségét befolyásoló tényező.

Beszívott levegő szelep

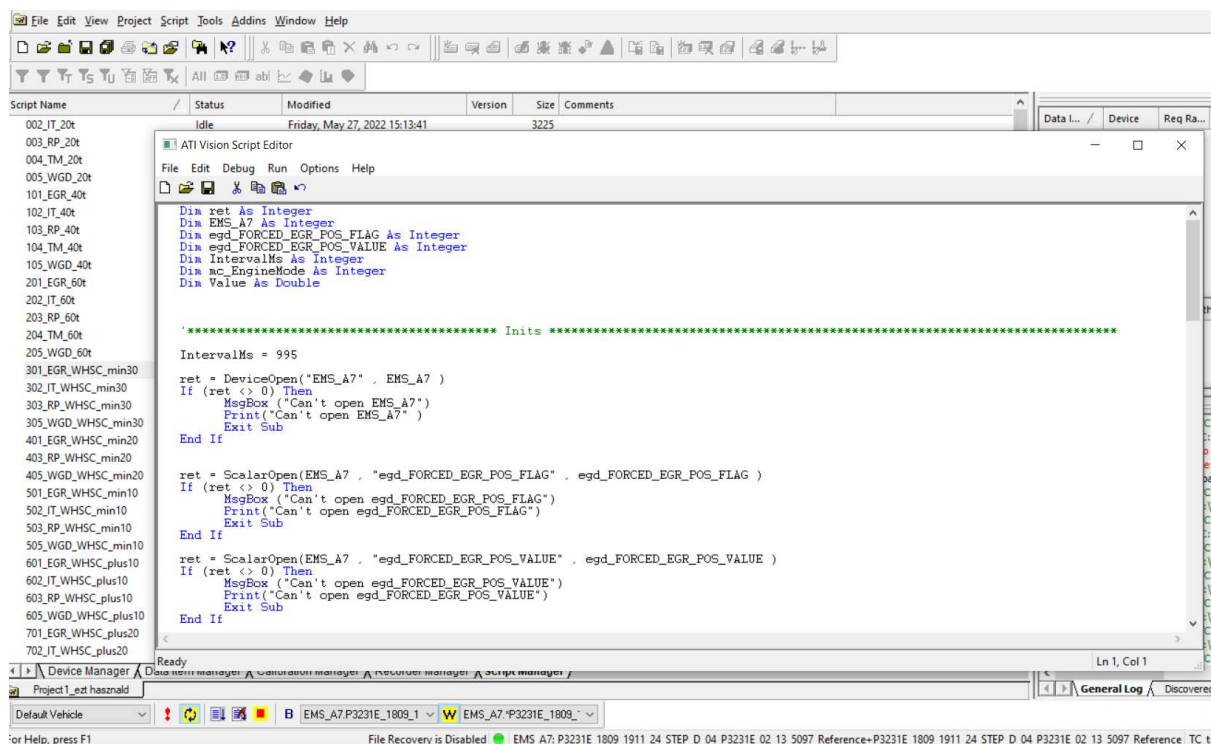
A beszívott töltet kezelése az égés kezdetéig a modern motorok kritikus pontja, és hatással lehet a károsanyag-kibocsátásra, a teljesítményre és az üzemanyag-fogyasztásra. A töltet-kezelés az a folyamat, amelyet annak biztosítására használnak, hogy az égéstérbe szállított töltet minden üzemi körülmény mellett megfelelően számos.

Wastegate

Megkerülő szelep hozzáadása, amely lehetővé teszi, hogy a kipufogógáz egy része megkerülje a turbinát, a fix geometriájú turbinákkal való jobb töltőnyomás-szabályozás általánosabb módja. A legtöbb alkalmazásban ez lehetővé teszi egy kisebb méretű vagy fix geometriájú turbinát, amely kisebb kipufogógáz-áram mellett nagyobb teljesítményt képes biztosítani a kompresszornak, hogy egy adott alkalmazáshoz használjuk.

3.7.2. ATI vision program

A VISION egy nagy teljesítményű átfogó szoftver, amely magában foglalja az adatgyűjtést, az utóelemzést és az ECU-kalibrációt is, motorfékpadi környezetben elvégzett kísérletek során. Egy integrált kalibrációs és adatgyűjtő eszköz összegyűjti az ECU-kból és külső forrásokból származó jeleket és képes adatfelvételre is. Továbbá lehetővé teszi a zárt vezérlőrendszerek valós idejű kalibrálását és módosítását is. Ez a programozási felület a 3.22. ábrán látható. A főbb járműgyártók, köztük az általam használt Volvo gyártmányú tesztmotor globális szoftveres szabványait is támogatja a VISION szoftver és ennek eredményeként könnyen konfigurálható és működtethető volt kísérleteim során, lehetővé téve a motor aktuátorainak valós idejű állítását, programkód alapján. Az ECU-k fizikai eléréséhez a VISION az egyszerű és megbízható USB CAN interfészt alkalmazza, ami számomra kiemelten fontos volt, hiszen nagyszámú kísérletet hajtottam végre.



3.22. ábra ATI Vision programozási környezet (Forrás: Bíró Norbert)

3.7.3. Visual basic programozási környezet

A Visual Basic (VB) egy modern, eszközorientált programozási nyelv, amelyet elsősorban Windows alapú alkalmazások fejlesztésére terveztek. Ez a programozási nyelv lehetővé tette számomra, hogy könnyedén készítsék interaktív alkalmazásokat, minimalizálva a kód hosszúságát és a fejlesztési időt. A Visual Basic egy olyan eszköz, amely a programozást megkönnyíti, így gyorsan és hatékonyan tudtam elkészíteni motor scripteket. Az egyik fő különbség a Visual Basic és más programozási nyelvek között az egyszerűség. A VB egy magas szintű nyelv, ami azt jelenti, hogy kevesebb kódírással is el lehet érni azonos célokat, mint más alacsonyabb szintű nyelveknél.

A Visual Basic alkalmazása egyértelmű előnyökkel járt számomra a program írása során. Először is, a könnyen olvasható és érthető kódok lehetővé teszik a gyorsabb fejlesztést, kisebb hibaszázalékkal. Másodsorban, a vizuális fejlesztői környezet segítségével gyorsan létrehozhattam és tesztelhettem az elkészült programokat.

3.7.4. Script bemutatása

A program scriptem a motorvezérlő rendszerben való működését befolyásolja, vezérli a motor egy aktuátorát és figyeli a motor állapotát. A motorvezérlőbe betáplálni kívánt értékeket egy külön úgynevezett array fájl-ban tárolom. A 4 motor aktuátorhoz (EGR, közösnyomócső nyomás, beszívott levegő szelep, wastegate) összesen 6 array fájl-t készítettem. Melyeket kombinálva 24 db egyedi program scriptet eredményezett. Ezek a program sorok teljes hosszukban megtalálhatóak a mellékletek fejezetben. Az alábbiakban 24 scriptből az EGR szelep eredeti állapotától -30%-os eltérésű változatát mutatom be példaként, mivel a többi 23 db script felépítésében és logikájában megegyezik.

Változók deklarálása:

Az alábbi változókat deklarálom a kódban:

- **ret**: Ebben a változóban tárolom az eszközök vagy fájlok megnyitása/felhasználása után kapott visszatérési értéket.
- **EMS_A7**, **egd_FORCED_EGR_POS_FLAG**, **egd_FORCED_EGR_POS_VALUE**, **mc_EngineMode**: Ezeket a változókat használom az eszközök és jellemzők azonosítására és kezelésére.
- **IntervalMs**: Ebben a változóban tárolom azt az időt, amennyit a program minden lépés után várakozik milliszekundumban kifejezve.
- **Value**: Ebben a változóban tárolom az értékeket, amelyeket különböző funkciókhoz használok fel.

Dim ret As Integer

Dim EMS_A7 As Integer

Dim egd_FORCED_EGR_POS_FLAG As Integer

Dim egd_FORCED_EGR_POS_VALUE As Integer

Dim IntervalMs As Integer

Dim mc_EngineMode As Integer

Dim Value As Double

Eszközök inicializálása:

Beállítom az **IntervalMs** értékét 995 milliszekundóra. Megnyitom az **EMS_A7** eszközt, és ha nem sikerül, hibaüzenetet jelenítek meg és kilépek a programból. Ugyanezt a lépést alkalmazom az **egd_FORCED_EGR_POS_FLAG**, **egd_FORCED_EGR_POS_VALUE** és **mc_EngineMode** jellemzők inicializálására is.

IntervalMs = 995

ret = DeviceOpen("EMS_A7", EMS_A7)

If (ret <> 0) Then

MsgBox("Can't open EMS_A7")

Print("Can't open EMS_A7")

Exit Sub

End If

' ... (Hasonló inicializációk a különböző jellemzőkhöz)

Fő ciklus (Main alprogram):

A **Main** alprogramban a fő ciklusban először beállítom az **egd_FORCED_EGR_POS_FLAG** jellemzőt 1 értékre, majd ellenőrzöm az **mc_EngineMode** jellemző értékét. Amíg az

mc_EngineMode értéke nem 17, addig a program megvárja, amíg az érték el nem éri ezt az értéket. Ezután a program 5 másodpercig várakozik (**SystemSleep(5000)**), majd egy fájlból olvas be értékeket és beállítja az **egd_FORCED_EGR_POS_VALUE** változó értékét. A fájlból való olvasás során a program az időzítést is figyeli, és biztosítja, hogy csak bizonyos időközönként olvassa be az értékeket.

Sub Main

' ... (Változók inicializálása és egyéb műveletek)

Path = "C:\Temp\Scripts\Arrays\WHSC\EGR\WHSC_EGR-30percent.txt"

' Hurok, amely beolvassa és beállítja az értékeket a fájlból

While Not EOF(FileNum)

' ... (Fájlból olvasás, értékbeállítás és várakozás)

Wend

' ... (Egyéb műveletek)

' Kikapcsoljuk az egd_FORCED_EGR_POS_FLAG jellemzőt

Value = 0

ret = ScalarSet(egd_FORCED_EGR_POS_FLAG, Value)

If (ret <> 0) Then

MsgBox("Can't set egd_FORCED_EGR_POS_FLAG")

End If

Print("Done")

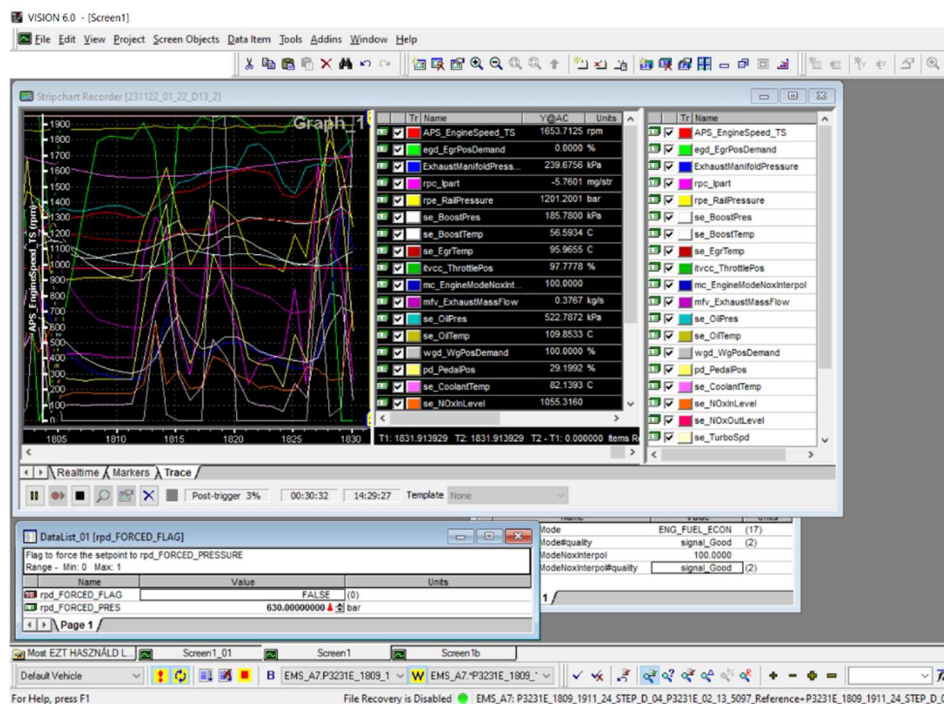
End Sub

Kimenet és befejezés:

Miután az összes fájlból beolvasott értéket feldolgozta, a program kikapcsolja az **egd_FORCED_EGR_POS_FLAG** jellemzőt (beállítja az értéket 0-ra) és kiírja a "Done" üzenetet.

3.7.5. On-board szenzorok és adat felvétel

A teszt motor ECU és az adatfelvételért felelős külső számítógép közötti kapcsolatot a 3.6.2. fejezetben bemutatott Vision szoftver teremti meg, USB kapcsolaton keresztül. A motor OBD (on-board diagnostic) rendszerébe integrált szenzorok adatai kiemelten fontosak, mivel egyrésről vissza ellenőrizhetőek az általam telepített szenzorok mért értékei, illetve egyes szenzor adatok csak innen kinyerhetőek. A felvett változókat tartalmazó teljes lista a 3.2. táblázat első oszlopában látható. Az adatokat, akár a tesztcella szenzorok esetén itt is 1 Hz gyakorisággal vettem fel. Az OBD adatfelvételi felület a 3.23. ábrán látható.

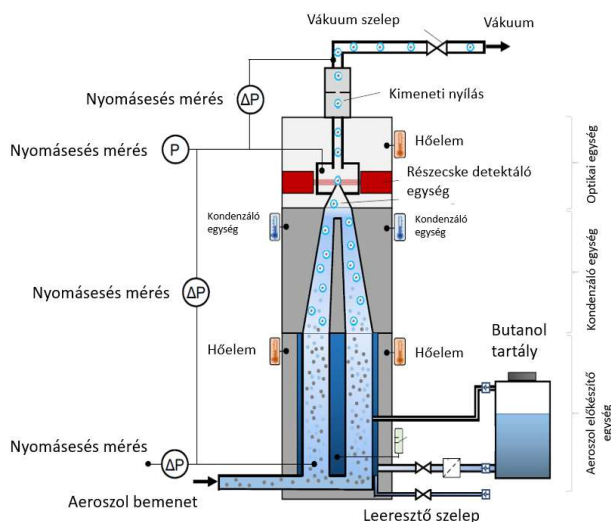


3.23. ábra ATI Vision on-board szenzor adatfelvételi modul (Forrás: Biró Norbert)

3.8. Emisszió mérő berendezések

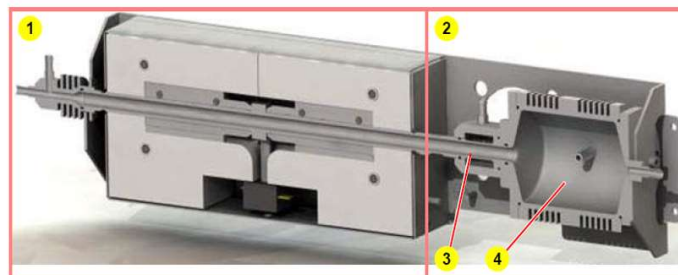
3.8.1. Részecskeszámláló (APC 489)

A kondenzációs részecskeszámlálás a legelterjedtebb módszer a légszennyező aeroszol részecskeszám koncentrációjának meghatározására (Kangasluoma 2019). Az aeroszol szilárd részecskéi folyadék butanollal történő kezelésével megnagyobbodnak. Ezek a részecskék egy rendkívül érzékeny érzékelőkamrán keresztül haladnak át, amelyben lézerfény és kifinomult fényérzékelő optika található, pontos részecskeelemzéshez és mennyiségi meghatározáshoz tervezve (Giechaskiel 2022). Az érzékelőkamrában történő áthaladás során a megnagyobbodott részecskék kihagyásokat okoznak az optikai fényérzékelőben, olyan mérhető jeleket generálva, amelyek lehetővé teszik az aeroszolban lévő részecskék pontos és megbízható megszámlálását. A mérőkamra felépítése a 3.24. ábrán látható.



3.24. ábra Kondenzációs elvű részecskeszámlálás (Forrás: AVL List GmbH)

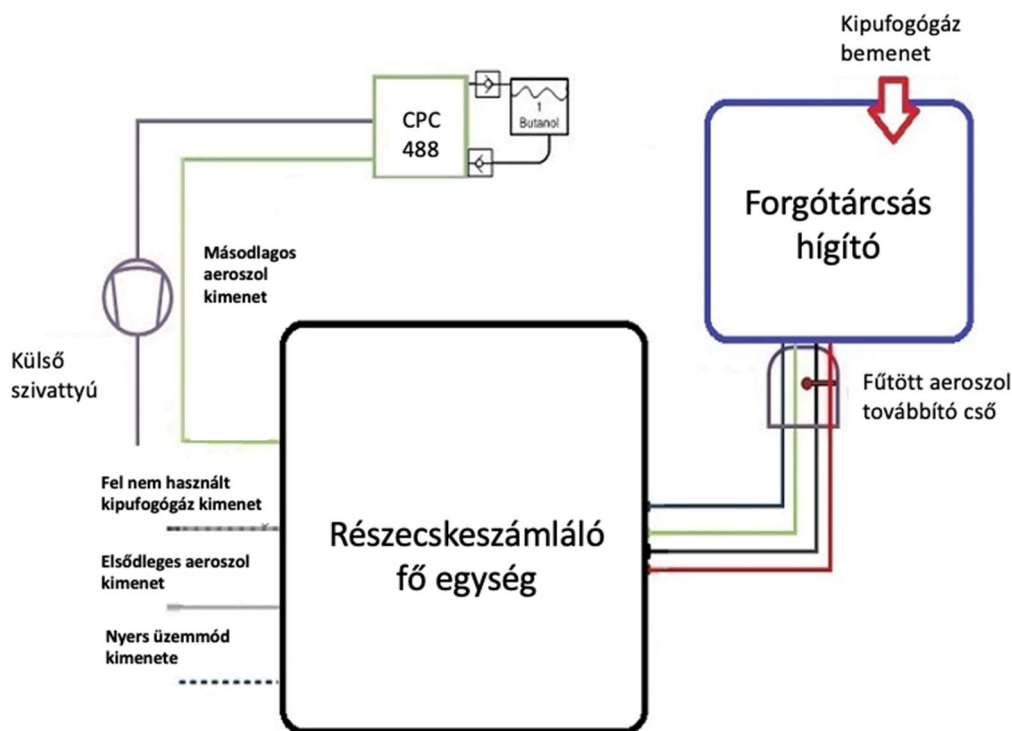
A szilárd részecskék mérése során a mintagáz előkészítése kulcsfontosságú szerepet játszik a pontos és megbízható adatok biztosításában. Különösen fontos azoknak a szilárd részecskéknek az esetében, amelyek átmérője meghaladja a 23 nm-t, hogy az elpárolgató cső (ET) sikeres alkalmazása lehetővé tegye a kívánt méréseket, amint azt a 3.25. ábrán láthatjuk. Másrészt, az 10 nm-nél nagyobb átmérőjű szilárd részecskék méréséhez katalitikus strippert (CS) kell alkalmazni az optimális méréshez (Giechaskiel 2022). Fontos megjegyezni, hogy mind az ET, mind a CS megnöveli a mintavételezett gáz hőmérsékletét (350 °C), így a kipufogógáz visszamaradó folyadécai elpárolgótásra kerülnek, és csak a szilárd részecskék maradnak meg és lesznek elérhetőek a későbbi mérésekhez.



- 1... Párolgató cső (Evaporation Tube)
- 2... Másodlagos hígító (Secondary diluter)
- 3... Porózus hígító (Porous diluter)
- 4... Stabilizációs kamra (Stabilization chamber)

3.25. ábra Párolgató-hígító egység (Forrás: AVL List GmbH)

A PND1 forgótárcsás szivattyú (CVS üzemmódban, vagy venturi/ RAW üzemmódban) működésbe lép. A léptető motor elindul, és a kipufogógáz egy kis része átkerül a hígítás levegővezetékbe. Ezzel egyidejűleg az azonos mennyiségű hígító levegő átkerül a mintavételi vezetékbe. Az átvitt mennyiség a forgótárcsa furataitól függ. A furatok méretének és számának a primer hígítással érhető el, és manuálisan történik. A hígított kipufogógáz felmelegített vezetéken áthalad az ET-ig, majd további hígításra kerül a szekunder hígító egységben. A 3.26. ábra bemutatja az aeroszol útját a mérőberendezésben.



3.26. A részecskeszámláló gép áramlási diagrammja (Forrás: AVL List GmbH)

Az AVL 489 részecskeszámlálót széleskörűen alkalmazzák gépjárművek részecskeemissziójának pontos meghatározására, mivel a "UNECE-R83, Revision 5" és az "UNECE-R49, Revision 6, Annex 4 (Emissions of compression ignition and gas-fueled positive ignition engines for use in vehicles)" irányelveknek megfelel. Ez az előírás meghatározza a részecskeszám emisszió értékeit különböző járműkategóriákban (UNECE 85.GRPE 2022).



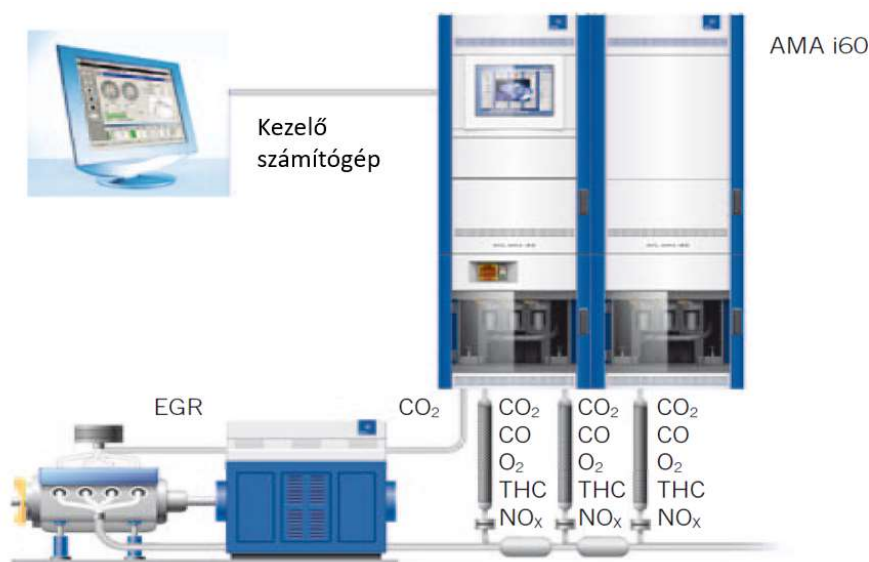
3.27. ábra AVL 489 részecskeszámláló (Forrás: Biró Norbert)

Ezen mérések során a mintavételi eljárás állandó térfogatú mintavételi (CVS) alagút vagy arányos részleges áramlású hígító rendszer alkalmazását foglalja magában. Mindkét mintavételi módszertant széles körben alkalmazzák az autógyártó vállalatok a járművek kipufogógázának hivatalos mérésekor

és a gyártás megfelelőségének (CoP) értékelésekor. Az értekezés során a nyers emissziós vagy másnéven kutatás-fejlesztési módban volt használva a készülék, amely nagyobb szabadságot tesz lehetővé a mérések során.

3.8.2. 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 dinamikus 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 aeroszolatokat (minta kipufogógáz) különböző analizátorokkal kell vizsgálni, amelyek a közös mérőcsőből kerülnek elkülönítésre. A kutatás szempontjából kiemelten fontos az NO_x, mint emisszió komponens, ezért az ehhez kapcsolódó analizátor mérési elve kerül részletes bemutatásra. Előszűrővel kombinálva a 3.28. ábrán látható AMA i60 ideális a belső égésű motorok fejlesztéséhez és emisszió tanúsítási mérésekhez az EPA/ECE/Japán előírásoknak megfelelően.



3.28. ábra AVL AMA i60 felépítése (Forrás: AVL List GmbH)

NO_x analizátor működési elve:

A nitrogén-oxid (NO) oxidációja az ózonnal (O₃) fényt termel 600–3200 nm hullámhosszon, a sugárzási csúcs ~ 1200 nm.

Ez a kemilumineszcens sugárzás, arányos az NO koncentrációval.

Ózon fölösleget egy detektor rögzíti és átalakítja elektromos jellé.

Az NO_x meghatározásához a gázban lévő NO₂-t NO-ra redukálja egy konverter.

Reakció egyenletek:



Az (3.2) részleges reakció után egy bizonyos arányban gerjesztett NO₂ képződik.

Ez alapállapotban (3.4) fényt bocsát ki (elektromágneses sugárzás).

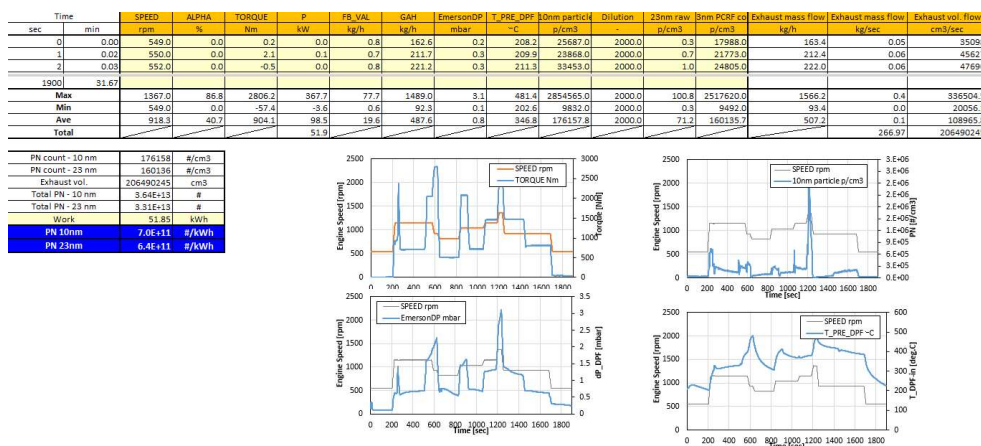


$h^* \cdot v$: Sugárzási energia egy bizonyos hullámhosszon



A gerjesztett NO_2^* energiájának nagy része kinetikus energia formájában nyilvánul meg. Minél kisebb a reakciónyomás, annál nagyobb a valószínűsége, hogy egy gerjesztett NO_2^* molekula fény formájában szabadítja fel energiáját.

3.9. Teszt adat kiértékelő formátum



3.29. ábra Microsoft Excel tesztadat kiértékelő formátum (Forrás: Biró Norbert)

Mind a 144 darab motorfékpados tesztnél a 3.1.8. fejezetben említett 72 darab változó felvételére volt szükség 1 Hz-es gyakorisággal. Mivel egy teszt 1894 másodpercig tartott ez több mint 19 millió (19 636 992) db egyedi adatpontot jelent. Ennek a feldolgozására létrehoztam egy úgynevezett adat kiértékelő formátumot, Microsoft Excel környezetben, amely a 3.29. ábrán látható. Az egyes kísérletek után az ATI Vision szoftverből a motor on-board adatait, míg a PUMA concerto felületéről az általam telepített nyers szenzor adatokat lementem, majd kiértékelő adatformátumban egyesítem. A szenzor adatokat két részre kategorizálom, egyrészt a motor megfelelő működését ellenőrzöm, illetve a rögzített paramétereket, míg a másik csoportba azokat a változókat sorolom, melyek a kísérlet kimenő adatait és az azokhoz szorosan kapcsolódó változókat tartalmazzák. Az utóbbi csoport elemei az 3.28. ábrán látható felületre vannak behivatkozva.

A fő kiértékelő oldalon megtalálható:

- Motorfordulat [1/perc],
- Gázpedálszög [%],
- Motornyomaték [Nm],
- Teljesítmény [kW],
- Hajtóanyag tömegáram [kg/h],
- Beszívott levegő tömegáram [kg/h],
- Nyomáscsökkenés a kipufogó rendszeren [mbar],
- Kipufogógáz hőmérséklet a DPF-nél [°C],
- 10 nm szilárd részecske szám [részecske / cm³],
- 23 nm szilárd részecske szám [részecske / cm³],
- Részecskeszámláló hígítási arány [-],

- Kipufogógáz tömegáram [kg/h],
- Kipufogógáz tömegáram [kg/s],
- Kipufogógáz térfogatáram [cm³/s].

Továbbá megtalálhatóak különböző automatikusan feltöltődő diagrammok, melyek elősegítették kulcs összefüggések gördülékenyebb felfedezését számomra.

Szilárd részecske számítása WHSC ciklusra

A részecske szám meghatározáshoz elengedhetetlen, hogy meghatározzam a kipufogógáz térfogatáramát. Mivel azonban a mért eredmények tömegarányosan kerülnek felvételre, ezért átszámítás szükséges. A számításokat az ideális gázokra érvényes gáztörvény felírásával kezdem, melyet másnéven Clapeyron egyenletnek is neveznek, ami Boyle–Mariotte, Gay-Lussac és Avogadro empirikus törvényeinek kombinációja.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.6)$$

A mól számot behelyettesítem a gáz teljes és moláris tömegének hányadosára.

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (3.7)$$

Majd a gáz nyomására rendezem az egyenletet.

$$p = \frac{m}{V} \cdot \frac{R}{M} T \quad (3.8)$$

Mivel az egyetemes gázállandó és a moláris tömeg hányadosa adja a gázra specifikus gázállandót, ezért az egyenletet az alábbiak szerint egyszerűsíthetem.

$$p = \frac{m}{V} \cdot R_S \cdot T \quad (3.9)$$

A szilárd részecske számításához térfogatáramot kell alkalmazni, ezért térfogat szerint rendezem az egyenletet.

$$V = \frac{m \cdot R_S \cdot T}{p} \quad (3.10)$$

A valós számításhoz először a motor által beszívott levegő töltet és felhasznált hajtóanyag összegét kell meghatároznom tömegáram szerint.

$$EMF_{óra} = GAH + FB_{val} \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (3.11)$$

$$EMF_{mp} = \frac{EMF_{óra}}{3600} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (3.12)$$

A további számításokhoz a levegő specifikus gázállandója szükséges.

$$R_{levegő} = \frac{R}{M} = \frac{8,314}{0,02897} = 287 \left[\frac{J}{kgK} \right] \quad (3.13)$$

Ezután a gáztörvényből levezetett (3.10) egyenlet felhasználásával meghatározom a térfogatáramot.

$$EVF = \frac{EMF_{mp} \cdot R_{levegő} \cdot T}{p} \quad (3.14)$$

Majd behelyettesítem a változókat és átrendezem az egyenletet térfogatáram szerint.

$$EVF = \frac{EMF_{mp} \cdot 287 \cdot 273}{(101,3 \cdot 10^3) \cdot 10^6} \left[\frac{cm^3}{s} \right] \quad (3.15)$$

Végül meghatározom a teljes ciklus hosszára a térfogatáramot.

$$EVF_{sum} = \sum_0^{1894} EVF [cm^3] \quad (3.16)$$

A részecskeszámot 10 és 23 nm-es tartománytól az alábbi képletek segítségével határoztam meg.

$$SPN_{10} = \frac{EVF_{sum} \cdot PN_{10}}{W_{WHSC}} \left[\frac{\#}{kWh} \right] \quad (3.17)$$

Ahol:

EVF_{sum} : kipufogógáz térfogatáram a WHSC ciklus alatt [cm^3],

PN_{10} : átlagos részecskeszám a 10 nm-es tartománytól, WHSC ciklus alatt [$\#/cm^3$],

W_{WHSC} : a WHSC ciklus alatt végzett munka [kWh],

SPN_{10} : Szilárd részecskeszám 10 nm tartománytól [$\#/kWh$].

$$SPN_{23} = \frac{EVF_{sum} \cdot PN_{23}}{W_{WHSC}} \left[\frac{\#}{kWh} \right] \quad (3.18)$$

Ahol:

EVF_{sum} : kipufogógáz térfogatáram a WHSC ciklus alatt [cm^3],

PN_{23} : átlagos részecskeszám a 23 nm-es tartománytól, WHSC ciklus alatt [$\#/cm^3$],

W_{WHSC} : a WHSC ciklus alatt végzett munka [kWh],

SPN_{23} : Szilárd részecskeszám 23 nm tartománytól [$\#/kWh$].

Gáznemű Nitrogén oxidok számítása

Az ideális gázok sűrűségének számításához a (3.19) egyenletet használom fel, sűrűségre rendezve.

$$\rho = \frac{p}{R_s \cdot T} \quad (3.19)$$

Ahol:

ρ : ideális gáz sűrűsége [g/dm^3],

p : ideális gáz nyomása [kPa],

R_s : ideális gáz specifikus gázállandója [J/gK],

T : ideális gáz hőmérséklete [K].

Az európai előírások $\frac{g}{dm^3}$ -ben kifejezve írja elő a gáz komponensek sűrűségének megadását, ezért így fejezem ki én is az eredményeimet. Atmoszférikus nyomással és 273 K hőmérséklettel számolok.

Nitrogén ideális gáz sűrűsége

$$\rho_{N_2} = \frac{p}{R_{N_2} \cdot T} \quad (3.20)$$

$$\rho_{N_2} = \frac{101,325}{0,2968 \cdot 273} = 1,2342 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.21)$$

$$\rho_N = \frac{\rho_{N_2}}{2} = 0,6171 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.22)$$

Oxigén ideális gáz sűrűsége

$$\rho_{O_2} = \frac{p}{R_{O_2} \cdot T} \quad (3.23)$$

$$\rho_{O_2} = \frac{101,325}{0,2598 \cdot 273} = 1,428 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.24)$$

$$\rho_O = \frac{\rho_{O_2}}{2} = 0,714 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.25)$$

A NO_x egy gyűjtőnév, amely a nitrogén oxidjait foglalja össze, mivel az esetek nagyrésztében ez a Nitrogén dioxid-ot jelöli, ezért a mostani számítás során az NO₂ ideális gázsűrűségét adom meg.

$$\rho_{NO_x} = \rho_N + \rho_{O_2} \quad (3.26)$$

$$\rho_{NO_x} = 0,6171 + 1,428 = 2,0451 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.27)$$

A tömegarány számításához szükséges a levegő sűrűsége is, amelyet ugyancsak az előzőekben bemutatott gáztörvény alapján határozok meg.

$$\rho_{\text{levegő}} = \frac{p}{R_{\text{levegő}} \cdot T} \quad (3.28)$$

$$\rho_{\text{levegő}} = \frac{101,325}{0,287 \cdot 273} = 1,2932 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.29)$$

Az előzetesen a (3.29) egyenletben meghatározott NO_x sűrűségét felhasználva kiszámolom a NO_x tömegáramát a kipufogógázban a (3.31) egyenlet felírásával.

$$NO_{x_m} = \frac{EMF_{\text{óra}}}{\rho_{\text{levegő}}} \cdot \frac{\rho_{NO_x} \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.30)$$

$$NO_{x_m} = \frac{EMF_{\text{óra}}}{1,2932} \cdot \frac{2,0451 \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.31)$$

Majd a ciklus teljes hosszában felvett NO_x tömegadatokat összegét veszem.

$$NO_{x_{m\ sum}} = \sum_0^{1894} NO_{x_m} [g] \quad (3.32)$$

Végül az európai szabványoknak megfelelően átalakítom az egyenletet a ciklusmunkára fajlagos formába:

$$NO_{x_P} = \frac{NO_{x_{m\ sum}}}{WW_{WHSC}} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (3.33)$$

Gáznemű Szén-monoxid számítása

Az (3.34) egyenlet szerint határozom meg a gázsűrűséget, a szén-monoxidra jellemző moláris tömeg és gázállandó felhasználásával.

$$\rho_{CO} = \frac{p}{R_{CO} \cdot T} \quad (3.34)$$

$$\rho_{CO} = \frac{101,325}{0,2968 \cdot 273} = 1,2342 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.35)$$

Az előzetesen a (3.35) egyenletben meghatározott CO sűrűségét felhasználva kiszámolom a CO tömegáramát a kipufogógázban az (3.37) egyenlet felírásával.

$$CO_m = \frac{EMF_{óra}}{\rho_{levegő}} \cdot \frac{\rho_{CO} \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.36)$$

$$CO_m = \frac{EMF_{óra}}{1,2932} \cdot \frac{1,2342 \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.37)$$

Majd a ciklus teljes hosszában felvett CO tömegadatok összegét veszem.

$$CO_{m\ sum} = \sum_0^{1894} CO_m [g] \quad (3.38)$$

Végül az európai szabványoknak megfelelően átalakítom az egyenletet a ciklusmunkára fajlagos formába:

$$CO_P = \frac{CO_{m\ sum}}{WW_{WHSC}} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (3.39)$$

Gáznemű Szén-dioxid számítása

Az (3.40) egyenlet szerint határozom meg a gázsűrűséget, a szén-dioxidra jellemző moláris tömeg és gázállandó felhasználásával.

$$\rho_{CO_2} = \frac{p}{R_{CO_2} \cdot T} \quad (3.40)$$

$$\rho_{CO_2} = \frac{101,325}{0,1889 \cdot 273} = 1,939 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.41)$$

Az előzetesen az (3.41) egyenletben meghatározott CO₂ sűrűségét felhasználva kiszámolom a CO₂ tömegáramát a kipufogógázban az (3.43) egyenlet felírásával.

$$CO_{2m} = \frac{EMF_{óra}}{\rho_{levegő}} \cdot \frac{\rho_{NO_x} \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.42)$$

$$CO_{2m} = \frac{EMF_{óra}}{1,2932} \cdot \frac{1,939 \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.43)$$

Majd a ciklus teljes hosszában felvett CO₂ tömegadatokat összegét veszem.

$$CO_{2m\,sum} = \sum_0^{1894} CO_{2m} [g] \quad (3.44)$$

Végül az európai szabványoknak megfelelően átalakítom az egyenletet a ciklusmunkára fajlagos formába:

$$CO_{2P} = \frac{CO_{2m\,sum}}{W_{WHSC}} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (3.45)$$

Gáznemű Nitrogén-monoxid számítása

A (3.20) és (3.23) egyenletek szerint meghatározom meg a gázsűrűséget, először a Nitrogén-re, majd az Oxigénre jellemző moláris tömeg és gázállandó felhasználásával.

Nitrogén ideális gáz sűrűsége

$$\rho_{N_2} = \frac{p}{R_{N_2} \cdot T} \quad (3.20)$$

$$\rho_{N_2} = \frac{101,325}{0,2968 \cdot 273} = 1,2342 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.21)$$

$$\rho_N = \frac{\rho_{N_2}}{2} = 0,6171 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.22)$$

Oxigén ideális gáz sűrűsége

$$\rho_{O_2} = \frac{p}{R_{O_2} \cdot T} \quad (3.23)$$

$$\rho_{O_2} = \frac{101,325}{0,2598 \cdot 273} = 1,428 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.24)$$

$$\rho_O = \frac{\rho_{O_2}}{2} = 0,714 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.25)$$

Majd összegzem a (3.22) és a (3.25) egyenleteket.

$$\rho_{NO} = \rho_N + \rho_O \quad (3.46)$$

$$\rho_{NO} = 0,6171 + 0,714 = 1,3311 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.47)$$

Az előzetesen a (3.47) egyenletben meghatározott NO sűrűségét felhasználva kiszámolom a NO tömegáramát a kipufogógázban az (3.49) egyenlet felírásával.

$$NO_m = \frac{EMF_{óra}}{\rho_{levegő}} \cdot \frac{\rho_{NO} \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.48)$$

$$NO_m = \frac{EMF_{óra}}{1,2932} \cdot \frac{1,2342 \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.49)$$

Majd a ciklus teljes hosszában felvett NO tömegadatok összegét veszem.

$$NO_{m\ sum} = \sum_0^{1894} NO_m [g] \quad (3.50)$$

Végül az európai szabványoknak megfelelően átalakítom az egyenletet a ciklusmunkára fajlagos formába:

$$NO_P = \frac{NO_{m\ sum}}{W_{WHSC}} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (3.51)$$

Gáznemű Szénhidrogének számítása

Az (3.52) és (3.54) egyenletek szerint meghatározom meg a gázsűrűséget, először a hidrogénre-re, majd a szénre jellemző moláris tömeg és gázállandó felhasználásával.

Hidrogén ideális gáz sűrűsége

$$\rho_{H_2} = \frac{p}{R_{H_2} \cdot T} \quad (3.52)$$

$$\rho_{H_2} = \frac{101,325}{4,124 \cdot 273} = 0,09 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.53)$$

Szén ideális gáz sűrűsége

$$\rho_C = \frac{p}{R_C \cdot T} \quad (3.54)$$

$$\rho_C = \frac{101,325}{0,6923 \cdot 273} = 0,5361 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.55)$$

Majd összegzem a (3.53) és az (3.55) egyenleteket.

$$\rho_{CH} = \rho_C + \rho_H \quad (3.56)$$

$$\rho_{CH} = 0,5361 + 0,09 = 0,6261 \left[\frac{g}{dm^3} \right] \quad (3.57)$$

Az előzetesen a (3.57) egyenletben meghatározott CH sűrűségét felhasználva kiszámolom a CH tömegáramát a kipufogógázban az x egyenlet felírásával.

$$CH_m = \frac{EMF_{óra}}{\rho_{levegő}} \cdot \frac{\rho_{NO} \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.58)$$

$$CH_m = \frac{EMF_{óra}}{1,2932} \cdot \frac{1,2342 \cdot 10^6}{3600 \cdot 10^3} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3.59)$$

Majd a ciklus teljes hosszában felvett CH tömegadatok összegét veszem.

$$CH_{m\ sum} = \sum_0^{1894} CH_m [g] \quad (3.60)$$

Végül az európai szabványoknak megfelelően átalakítom az egyenletet a ciklusmunkára fajlagos formába:

$$CH_p = \frac{CH_{m.sum}}{W_{WHSC}} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (3.61)$$

Hajtóanyag fogyasztás számítás

$$b_e = \frac{\sum_{1894}^1 m_{haj \acute{o}}}{W_{WHSC}} \quad (3.62)$$

$$b_e = \frac{10070}{51,8} = \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.8)$$

Ahol:

b_e : Effektív fajlagos fogyasztás [g/kWh],

$\sum_{1894}^1 m_{haj \acute{o}}$: A hajtóanyag tömegáramának összege a WHSC ciklus alatt [g],

W_{WHSC} : A tesztmotor által végzett munka a WHSC ciklus alatt [kWh].

3.10. Kiugró tesztadatok szűrése klaszteranalízissel és interkvartilis terjedelem analízissel

A tesztadatok osztályozásához első lépésként hierarchikus felosztó klaszteranalízist alkalmazok, amely lehetővé teszi az adatok hierarchikus csoportokba rendezését az azok közötti hasonlóság alapján. Ezen csoportok kialakítását követően részletesen vizsgálom az egyes csoportokba tartozó eredményeket, és kiegészítem az elemzést interkvartilis terjedelem analízissel. Az interkvartilis terjedelem analízise lehetővé teszi számomra, hogy mélyebben megértsem és elemezzem az eredmények változatosságát a csoportokon belül, kiszűrve ezzel a kiugró értékeket, és részletesebb betekintést nyerve az eredmények eloszlásába. Ezen analitikus módszerek kombinálása révén nem csupán az adatok csoportokra történő rendszerezése válik lehetővé, hanem az egyes csoportok belső változékonyságának alaposabb feltérképezése is. A hierarchikus felosztó klaszteranalízis által kialakított csoportok az adatok közötti szerves kapcsolatokat tükrözik, míg az interkvartilis terjedelem analízise részletes betekintést nyújt a csoportokon belüli diverzitásról. Ezzel a kombinált megközelítéssel részletes és részletgazdag képet kaphattam a teszteredményekről, miközben lehetőség nyílik az esetleges kiugró értékek kiszűrésére és a statisztikai megbízhatóság növelésére.

3.11. Adatelemzés lineáris és polinomiális regresszióval

A kiugró értékektől megtisztított adathalmazt polinomiális és lineáris regresszióval elemeztem, célul kitűzve azoknak a változóknak az azonosságait és kapcsolatait, amelyek hatással vannak a célváltozóra. 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. Az eljárás során különféle statisztikai mutatókat és modellértékelési kritériumokat alkalmaztam annak érdekében, hogy objektív képet alkothassak a regressziós modell teljesítményéről. Ezen analízis révén képes voltam azonosítani a legjelentősebb magyarázó változókat és értelmezni azok hatását a céltulajdonságra, miközben a kiugró értékek kiszűrésével növeltem az elemzés megbízhatóságát és interpretálhatóságát. A polinomiális és lineáris regresszióval végzett elemzés mélyebb betekintést nyújtott a változók közötti komplex kapcsolatokba, hozzájárulva ezzel a pontosabb és informatívabb következtetések levonásához.

4. EREDMÉNYEK

4.1. Részecskeszámlálási labor berendezések elemzése

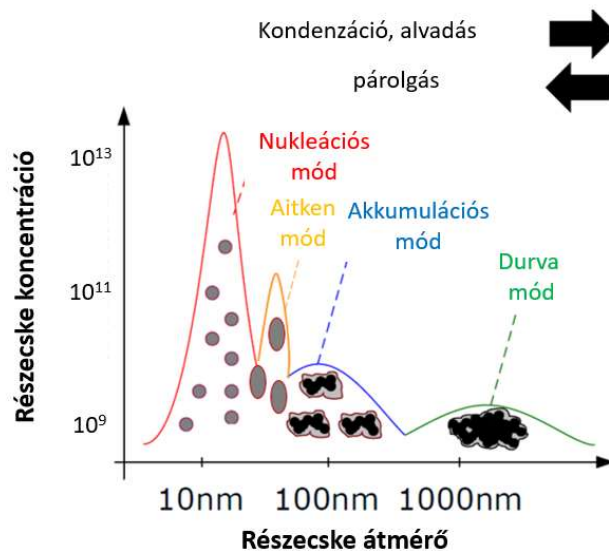
A kísérletek során kiemelt jelentőséggel bírt a részecskeszám mérésének témája. Ennek érdekében, a kísérletsorozat előtt leteresztettem a két általam megtervezett részecskeszámláló kiépítést. Az elvégzett mérések középpontjában a 10 és 23 nanométeres méréstartomány egyszerre történő vizsgálata állt. 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.

Különböző átmérőjű részecskék kialakulása

Az aeroszol részecskék mérete azon kis molekuláris agglomerátumoktól kezdődik, melyek átmérője körülbelül 0,7 nm, egészen a szilárd, koptató hatású, körülbelül 10 μm átmérőjű részecskékig. A részecskeátmérő-eloszlás kialakulása különböző képződési mechanizmusokon alapul, melyeket gyakran "módoknak" neveznek. Ezek a módok és a velük kapcsolatos részecskeméretok kategorizálása folyamatosan változik az idő múlásával, főként az aeroszol dinamikus mikroszkopikus mozgása miatt. Makroszkopikus szinten a termodinamikai állapot állandóan változik és nincs teljes egyensúlyban. Más szóval, a párolgás, a koaguláció és a kondenzáció dominálja az ilyen mód- és átmérőátalakításokat.

A 4.1. ábrán látható egy áttekintés, amely bemutatja a különböző módokat és formációkat. A megkülönböztethető módok a nukleációs mód, az Aitken mód, az akkumulációs mód és a durva mód a méret növekedésének sorrendjében. A nukleációs mód a legkisebb átmérőosztályt jelenti, amelyet részecskévé alakuló gázok alkotnak; ez a mód átmeneti jellegű és általában gyorsan nő nagyobb részecskékre a kondenzáció és a disszipáció hatására. Az Aitken módú részecskeméret 10-50 nm között van, a képződés oka lehet megnövekedett magképző részecskékből vagy nem sztöchiometrikus ideális égésből (pl. koromrészecskék). Az akkumulációs módú részecskeméret 50-100 nm között helyezkedik el, és ebben a módban az átmeneti idő nagyobb, mint az előző módban. Itt a részecskék különböző módú koagulációja, kondenzációja és nem éghető anyagok elégetése (pl. motorolaj) okozhatja a képződést. A durva módú részecskék főként a felhalmozódó részecskék koagulációjával jönnek létre; az átmérőjük 100 nm-től 10 μm -ig terjed, és a súrlódás, kopás jelentősen befolyásolja méretüket.

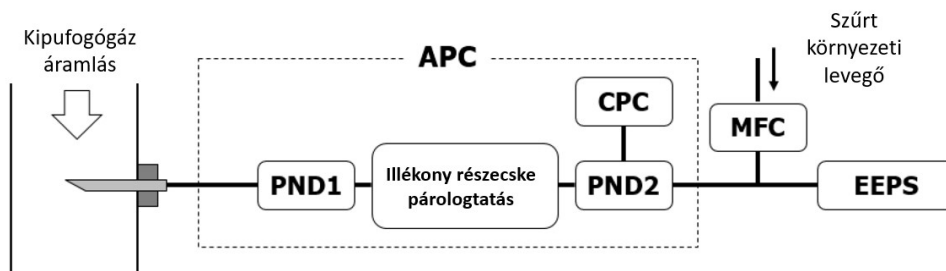


4.1. ábra Részecskeméret eloszlás különböző módok között (Kazushige, 2006)

4.1.1. 10 és 23 nm-es részecskeszámlálók elemzése

Elsőként megfontolt elrendezés

Az AVL kondenzációs részecskeszámláló (APC 489 plus), melyet az AVL List GmbH gyárt (Graz, Ausztria), a 23 nm feletti részecskeméretek méréséhez lett kialakítva. Ezzel párhuzamosan a motor kipufogógáz részecskeméretező (EEPS 3090) (TSI Incorporated, Minneapolis, MN, USA) az 5,6 nm feletti részecskeméretek érzékelésére lett tervezve. Ebben a konfigurációban az AVL kondenzációs részecskeszámláló (APC) végezte el a hígítást és az illékony részecskék eltávolítását (VPR), majd a keletkező felesleges mintagázt továbbította az EEPS-be, ahogyan azt a 4.2. ábra is bemutatja. Az 1. és 2. hígító egységeket PND1 és PND2 néven rövidítették, míg a Mass Flow Controller (MFC) a folyamatban lévő gázáramlást vezérlő eszközt jelöli. A két eszköz szoros együttműködése biztosította a teljes mérési rendszer hatékony és pontos működését a részecskeméretező elrendezésben. Az elrendezés kiemelkedő előnye, hogy az EEPS nem csupán a nagyobb, 5,6 nm-es részecskeátmérőtől valószínűsíthetően kisebb méretű kipufogógáz-részecskéket képes megszámolni, hanem képes pontosan meghatározni a részecskék számát különböző átmérőosztályokban is. Ezáltal az EEPS rendszer kiemelkedő teljesítményt nyújt a részecskeméretek differenciált és pontos észlelésében, lehetővé téve a részletes analízist és a kipufogógáz összetételének részletes feltérképezését. Ezen tulajdonságaival a rendszer hozzájárul a magasabb szintű részecskekarakterizációhoz és a környezeti hatások, illetve az emissziók pontosabb értékeléséhez.



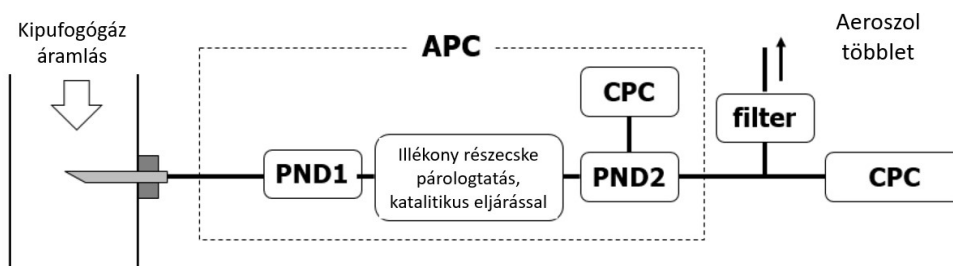
4.2. ábra 23 nm-es APC és 5,6 nm-es részecskeátmérőtől mérő CPC berendezésekből álló kísérleti kialakítás; APC = AVL részecskeszámláló; CPC = kondenzációs részecskeszámláló; PND = részecskeszám-hígító; MFC = tömegáram-szabályozó; EEPS = Motor kipufogógáz részecskeméretező. (Forrás: Biró Norbert)

Másodikként megfontolt elrendezés

Az első elrendezés eredeti koncepciója az volt, hogy az összehasonlíthatóság érdekében mindkét mérőeszköz számára ugyanazt a hígítást és VPR-kezelt aeroszolt alkalmazzam. Annak ellenére, hogy az alapkonceptió helyes volt, az első elrendezés problémái miatt szükség volt egy újra gondolt mérési koncepcióra is. Ennek eredményeként a második elrendezésben mindkét eszköz ugyanazon működési elvet alkalmazza.

A hígítást és az illékony részecskék eltávolítását az APC Plus Advanced 10 nm (AVL List GmbH, Graz, Ausztria) végzi, de itt az APC 10 nm-es mérésekre is alkalmas, és tartalmaz egy katalitikus párologtatót (CS) az illékony részecskék eltávolítása érdekében. A másodlagos eszköz egy önálló AVL kondenzációs részecskeszámláló (CPC 488), ami nem tartalmaz aeroszol előkészítő egységet. A 23 nm-es és nagyobb részecskemérésekhez az ET-t használják a VPR-hez, bár ez konfliktust eredményezhet, mivel a CPC a CS által kezelt aeroszolt kapja meg bemenetként.

Christoph Kandlhofer végzett egy összehasonlító kísérletet, mely arra a következtetésre jutott, hogy a <23 nm-es mérési mintagáz kezelhető mind az ET-ben, mind a CS-ben; az eltérés -6% és +1% között van (Kandlhofer 2020). A 4.3. ábrán bemutatott módon a felesleges mintagáz szűrése után azt a tesztcella környezeti levegőjébe vezetik. Az APC kilépő gáz térfogatárama $9 \text{ dm}^3/\text{perc}$, míg a CPC követelménye csak $1 \text{ dm}^3/\text{perc}$; ennek következtében a túlnyomás elleni védelem érdekében a felesleges levegőt ki kell vezetni. Ezen konfigurációban a mérőműszerek reprodukálható és megbízható eredményeket nyújtottak a kezdeti mérések során.

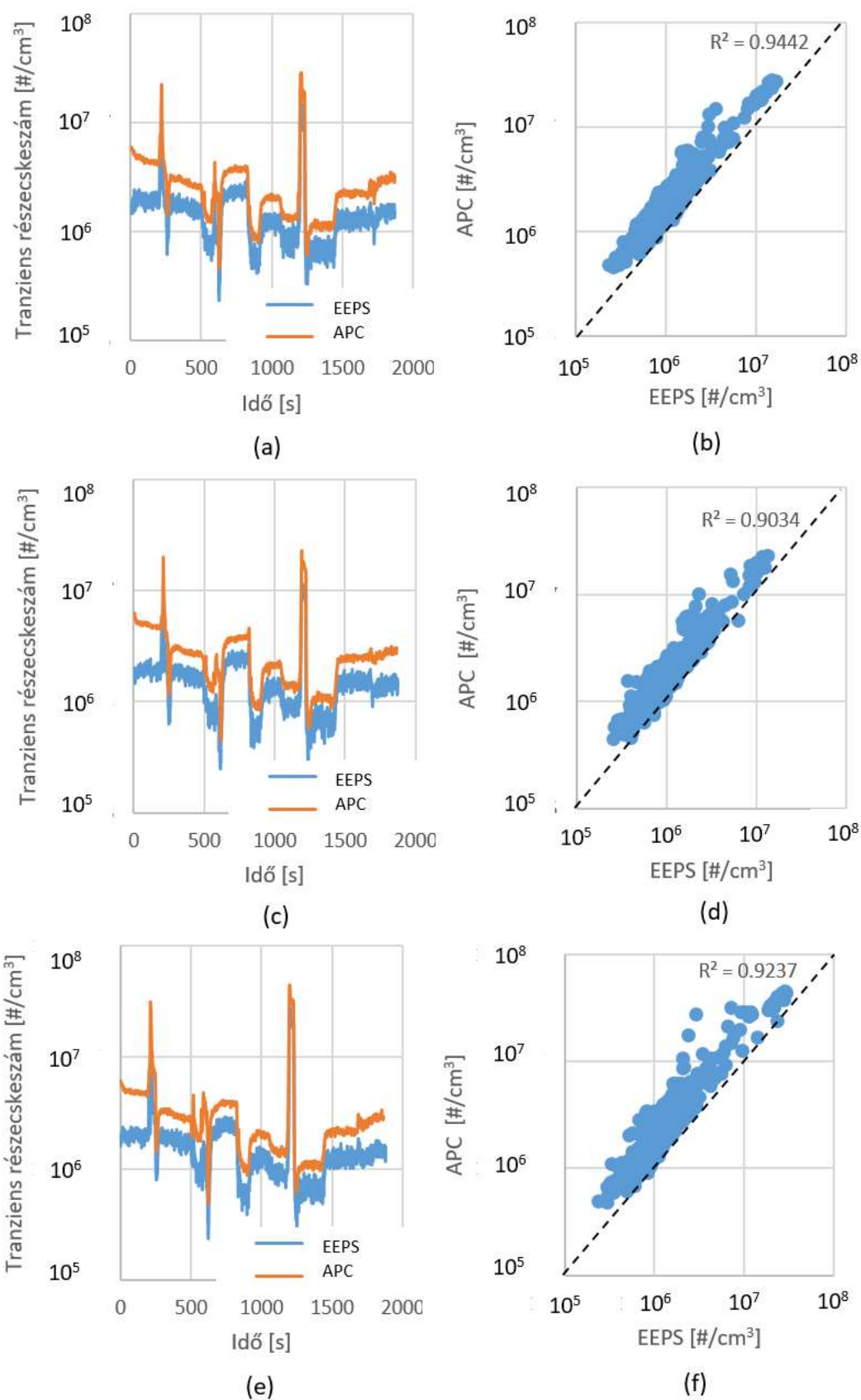


4.3. ábra 10 nm-es APC és 23 nm-es részecskéátmérőtől mérő CPC berendezésekből álló kísérleti kialakítás; APC = AVL részecskeszámláló; CPC = kondenzációs részecskeszámláló; PND = Részecskeszám-hígító. (Forrás: Bíró Norbert)

4.1.2. Összehasonlító mérések, következtetések

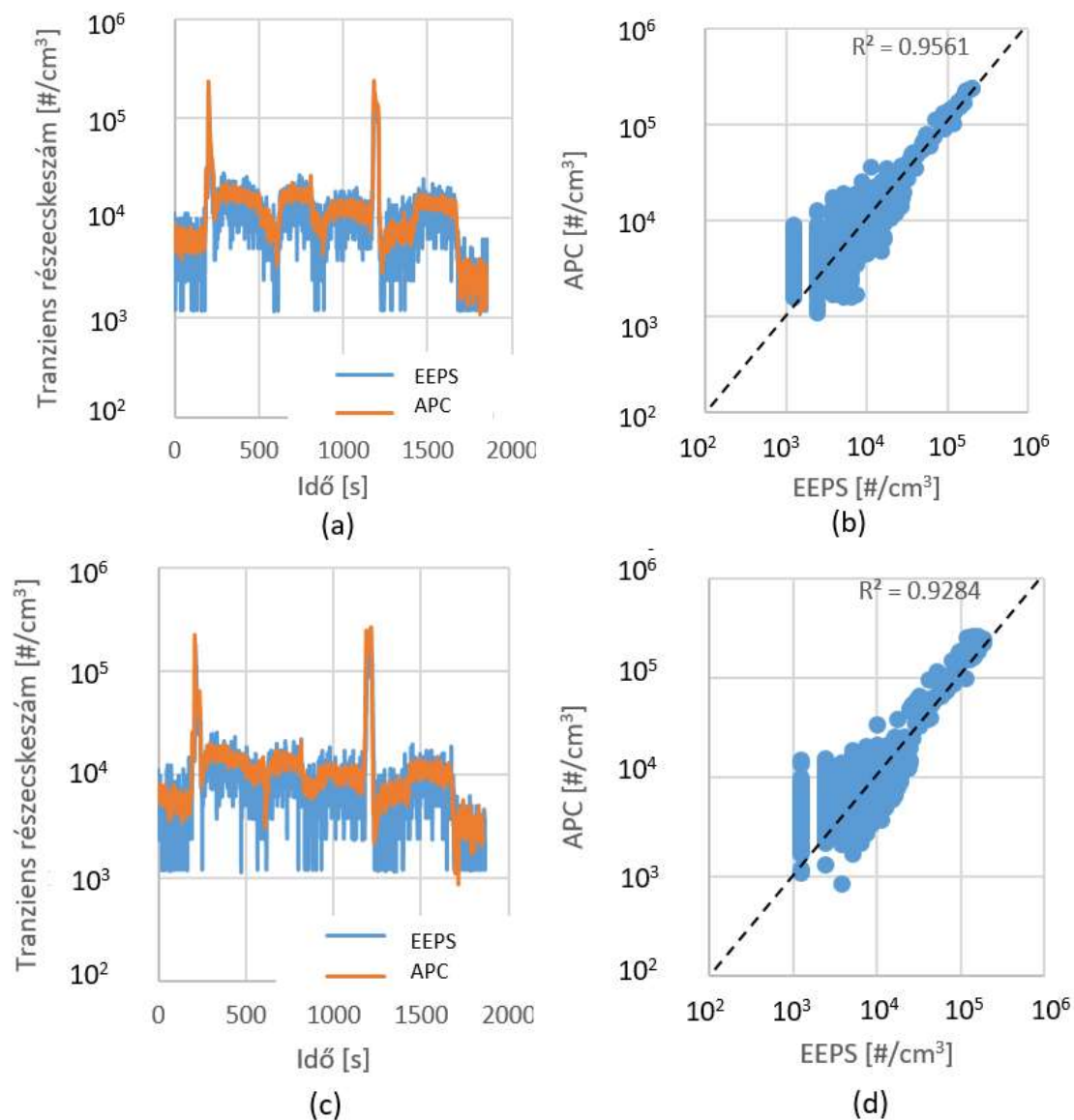
Összehasonlító mérések

Összesen 6 mérést végeztem el az APC és az EEPS aeroszol hígítási tulajdonságainak igazolására. 3 mérést nyers, tisztítatlan kipufogógázzal végeztem (4.4. ábra), így vizsgálva a nagyobb részecskekoncentrációknál adódó pontosságát mindkét készüléknek. Míg 3 mérés esetén kipufogó cső végi (TP) részecskeszámot mértem.

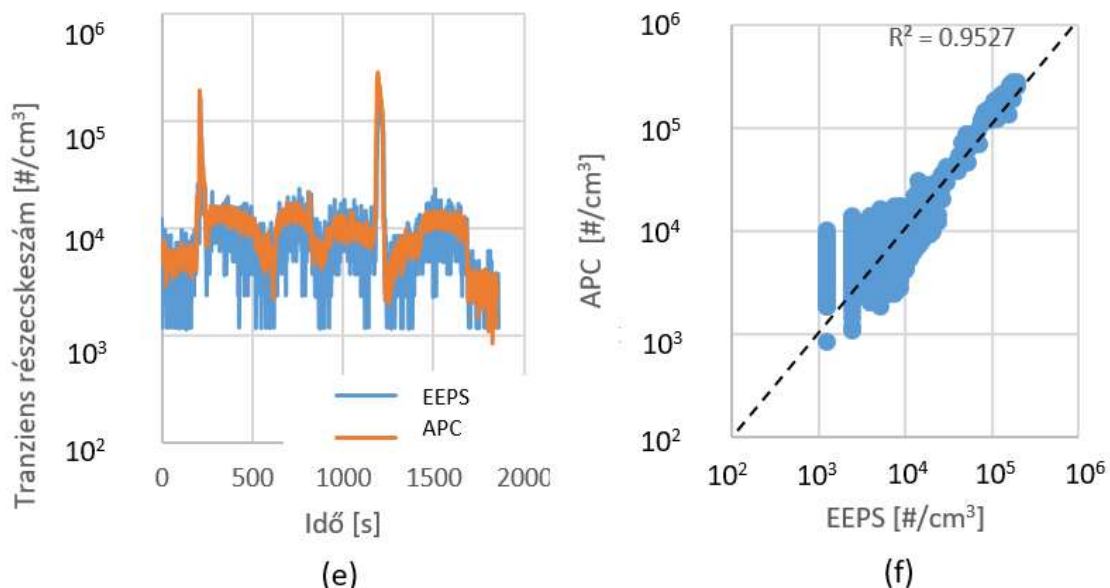


4.4. ábra Tranziens részecskekoncentráció (a), (c), (e) és a részecske adatok lineáris regressziója (b), (d), (f) nagy részecskekoncentrációjú aeroszollal. (Forrás: Bíró Norbert)

Az egyes nagykoncentrációjú tesztek tranziens diagramjain megfigyelhető, hogy míg az APC esetén viszonylag folytonos a görbe, az EEPS mérése zajos. Ez azt jelöli, hogy az EEPS améréstományának határán van, mind aeroszol szilárd részecszekoncentráció, mind a hígítás területén.



4.5. ábra Tranziens részecszekoncentráció (a), (c) és a részecske adatok lineáris regressziója (b), (d) kis részecszekoncentrációjú aeroszollal. (Forrás: Biró Norbert)



4.5. ábra Tranziens részecskekoncentráció (e) és a részecske adatok lineáris regressziója (f) kis részecskekoncentrációjú aeroszollal. (Forrás: Biró Norbert)

A kis részecskekoncentráció esetén már az APC esetén is zajosabb mérési eredményeket is láthatunk a 4.5. ábra (a), (c), (e) diagramjain. Az EEPS esetén láthatóan elérkeztünk a méréshatárhoz a koordináta rendszer másik oldaláról. A korrigált R^2 a lineáris regressziós modellek pontos illeszkedését (modell pontosságát) méri, különös tekintettel a korrigált illeszkedési helyességre. Az mutatja meg, hány százalékát magyarázza el a modell a célmező varianciájának. A 4.4. ábra (b), (d), (f) és a 4.5. ábra (b), (d), (f) diagramjai esetében közel 2000 pont alapján határoztam az R^2 értékét, melyek minden esetben 0,9 felett adódtak. Az ez alatti R^2 értékű kísérleteket nem használtam fel, úgy határoztam, hogy nem volt megfelelő a korreláció az elemzéshez. Az elfogadható kísérleteket eredményeit az anyag és módszer 3.9. fejezetében levezetett (3.17) egyenlettel fejeztem ki.

$$SPN_{10} = \frac{EVF_{sum} \cdot PN_{10}}{P} \left[\frac{\#}{kW} \right] \quad (3.17)$$

Ahol:

EVF_{sum} : kipufogógáz térfogatáram a WHSC ciklus alatt [cm^3],

PN_{10} : átlagos részecskeszám a 10 nm-es tartománytól, WHSC ciklus alatt [$\#/cm^3$],

P : a WHSC ciklus alatt végzett munka [kWh],

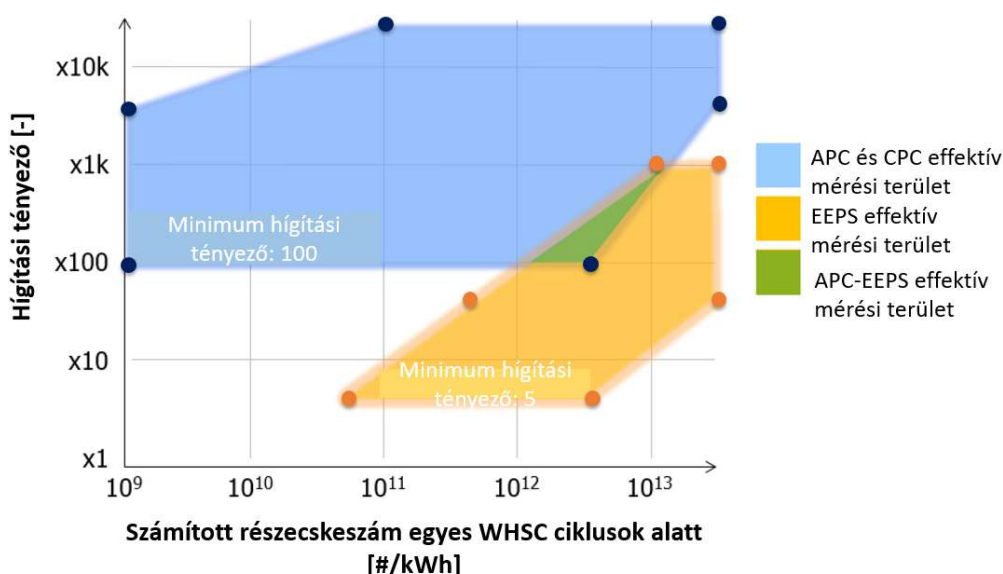
SPN_{10} : Szilárd részecskeszám 10 nm tartománytól [$\#/kWh$].

Következtetések

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 a 3.4.1. fejezetben bemutatott WHSC ciklussal végeztem, amelyek eredményei a 4.1. táblázatban láthatóak és a 4.6. ábrán mutatom be, ahol a hígítási tényezőt az egyes WHSC mérésekhez számított részecskeszám végeredményéhez viszonyítottam.

4.1. 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	$1 \cdot 10^{13}$



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

A 4.6. 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 részecsképződésről, 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 faktoral rendelkező nemzetközi folyóiratban is közöltem (Biró 2023).

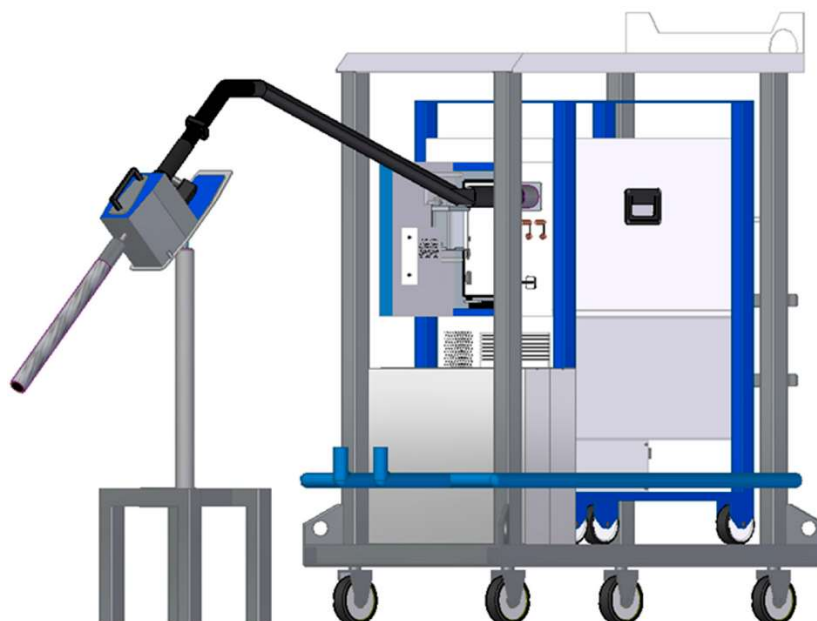
4.2. Részecskeszámláló fejlesztése a kutatáshoz

A részecskeszámlálási technológia kritikus jelentőséggel bír az emissziótechnikai kutatásokban és az ipari alkalmazásokban, különösen a járművek jóváhagyási tesztjeiben, amelyek a szilárd részecskeszámra vonatkozó előírásoknak kell megfeleljenek (Giechaskiel et al. 2012). Az ipari alkalmazásokban, például az autóiparban, az APC 489 (AVL Particle Counter) kulcsszerepet játszik a dízelmotoros járművek EU-szabványoknak való megfelelésének vizsgálatában (Giechaskiel et al. 2018) (Giechaskiel et al. 2022). Az APC képes pontos adatokat szolgáltatni a kipufogógáz szennyezőanyag-kibocsátásra vonatkozó előírásoknak való megfeleléséről. Ugyanakkor a nyers (kísérleti üzemmódú) kipufogógáz mérések esetén a nagyobb átmérőjű szilárd szennyeződések felhalmozódása problémákat okozhat a részecskeszámlálóban, ami a műszer leállításához vezethet. Ennek kiküszöbölése és az APC teljesítményének optimalizálása érdekében egy továbbfejlesztett aeroszol előkészítő egységet terveztem, modelleztem és valósítottam meg. Az előkészítő egység tervezése kondenzvíz-elvezető rendszerből, hűtőventilátorból, HEPA előszűrőből, nyomásszabályozáshoz membránszivattyúból és összekötő csővezetékekből áll. Ez a kialakítás arra szolgál, hogy megakadályozza a nedvesség és a nagyobb részecskék lerakódását az APC rendszerben, így biztosítva a megszakítás nélküli és pontos kipufogógáz méréseket. A fejlesztés jelentősége abban rejlik, hogy javítja a kipufogógáz-kibocsátás mérését, megbízhatóbbá teszi azt, és különböző tudományos és ipari alkalmazások széles skálájához alkalmassá teszi. A kifejlesztett egység elősegíti a károsanyag-kibocsátási előírásokhoz való fejlesztést az autóiparban, valamint szélesebb körű tudományos kutatásokhoz is alkalmazható. Összességében az APC kipufogógáz-elemző teljesítményének optimalizálása és a nem mérhető részecskeszennyeződés minimalizálása, lehetővé téve a pontos és megbízható méréseket a környezeti szabályozásoknak való megfelelés érdekében. A kutatási tervezetem keretében 144 egyedi paraméterrel rögzített motorfékpadai kísérletet alakítottam ki, melyek összességében közel 300 órás mérési időt tesznek ki, ahogy azt részletesen a 3.5 fejezetben ismertettem. Ebben a folyamatban kiemelt jelentőséggel bír, hogy a részecskeszám megbízhatóan és megszakítás nélkül mérhető legyen az egész kísérletsorozat során, hiszen ez az egyik kulcsfontosságú aspektusa motorfékpadai kísérleteimnek. A részecskeszámláló fejlesztéséről kiterjedt publikációt tettem közzé (Biró 2023). Ezen tanulmány az emissziótechnikai tudományokban elismert, impakt faktoros Atmosphere című nemzetközi folyóiratban jelent meg, ahol több nemzetközi cég, köztük a BMW AG és az AVL GmbH, is rendszeresen publikálja a legfrissebb eredményeit.

A részecskeszámlálás jelentőségének további növekedése várható a jövőben, különösen az Euro VII előírás bevezetésével, amely már nem csak a kipufogógáz, hanem a gumiabroncsok és a fékbetétek anyagából levált szilárd részecskék mérését is előírja. Ennek fényében a folyóirat szerkesztőségétől azt az értékes visszajelzést kaptam, hogy érdemes lehet szabadalmaztatni a fejlesztést. A disszertáció írásakor a szabadalmi eljárás folyamatban van.

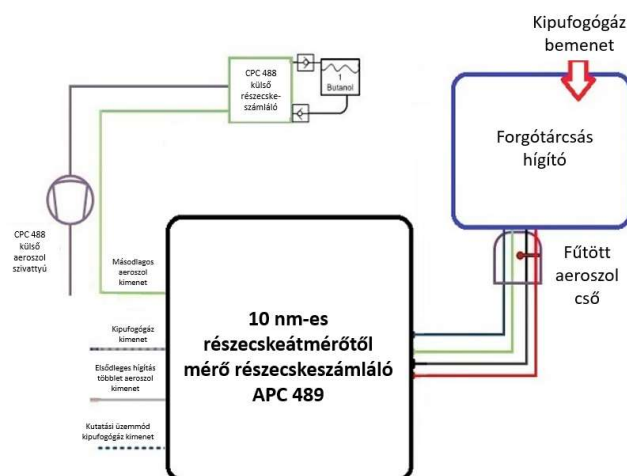
4.2.1. Részecskeszámláló eredeti kialakítás

Az autóipari kutatási szektorban széles körben elterjedt és elismert eszköz az APC (kondenzációs részecskeszámláláson alapuló részecskeszámláló), amelynek működési elve az ábrán látható (4.7. ábra).



4.7. ábra Az AVL részecskeszámláló (APC) 489 CAD modellje eredeti elrendezéssel (Forrás: Bíró Norbert).

A kondenzációs részecskeszámlálás jelenleg a leggyakrabban alkalmazott módszer az aeroszolok részecskeszám-koncentrációjának meghatározására (Kangasluoma 2019). Ebben a módszerben az aeroszol szilárd részecskéi folyékony butanollal történő kondenzálás révén megnagyobbodnak. Ezt követően a megnagyobbodott részecskék egy fotodiódás érzékelőkamrán haladnak át, ahol lézerfény és fejlett fényérzékelő optika segítségével történik a részecskeelemzés és mennyiségi meghatározás (Giechaskiel 2022). Az érzékelő kamrában való áthaladás során a megnagyobbodott részecskék folytonossági zavarokat okoznak a lézeres érzékelő mechanizmusban, ami mérhető jeleket generál. Ezek a jelek lehetővé teszik az aeroszolmintában lévő részecskék pontos és megbízható megszámlálását. A szilárd részecskék mérésével kapcsolatosan az aeroszol előkészítése kulcsszerepet játszik a pontos és megbízható adatok biztosításában. Például, a 23 nm-nél nagyobb átmérőjű szilárd részecskéknél az elpárolgató cső (ET) sikeres alkalmazása elengedhetetlen a mérések megkönnyítéséhez, ahogyan azt a 4.8. ábrán bemutatom. Másrészt, a 10 nm-nél nagyobb átmérőjű szilárd részecskéknél a katalitikus párolgató (CS) alkalmazása szükséges az optimális jellemzés érdekében (Giechaskiel et al. 2019). Fontos megjegyezni, hogy mind az ET, mind a CS esetében a mintavételezett gáz hőmérsékletét 350 °C fölé emeli a készülék, ezáltal elősegítve a későbbi folyadékok elpárolgását és biztosítva, hogy csak a szilárd részecskék maradjanak meg a későbbi mérésekhez.



4.8. ábra Az APC 489 folyamatábrája eredeti elrendezéssel (Forrás: AVL GmbH).

Az AVL részecskeszámológát széleskörben alkalmazzák a jármű részecskeszám-kibocsátásának pontos meghatározására, szigorúan betartva az "UNECE-R83, Revision 5" és az "UNECE-R49, Revision 6, 4. melléklet (Sűrítési gyújtás és gázüzemű kibocsátások) külső gyújtású motorok járművekben való használatra" előírásokat (Amanatidis et al. 2013). Ezek a szabályozási keretek meghatározzák a részecskeszám-kibocsátás szigorú értékelését a különböző járműkategóriákban (UNECE 85 GRPE 2022)

Ezen mérések során a mintavételi eljárás állandó térfogatú mintavételi (CVS) alagút vagy az arányos részarányú hígítórendszer alkalmazását tartalmazza. Mindkét mintavételi módszert széles körben használják az autóiipari vállalatok körében, mivel megfelelően pontosak a járművek kipufogógáz-kibocsátásának tesztelése és gyártási megfelelés (CoP) értékelése során (Khan et al. 2018).

4.2.2. Fejlesztett N-kialakítás

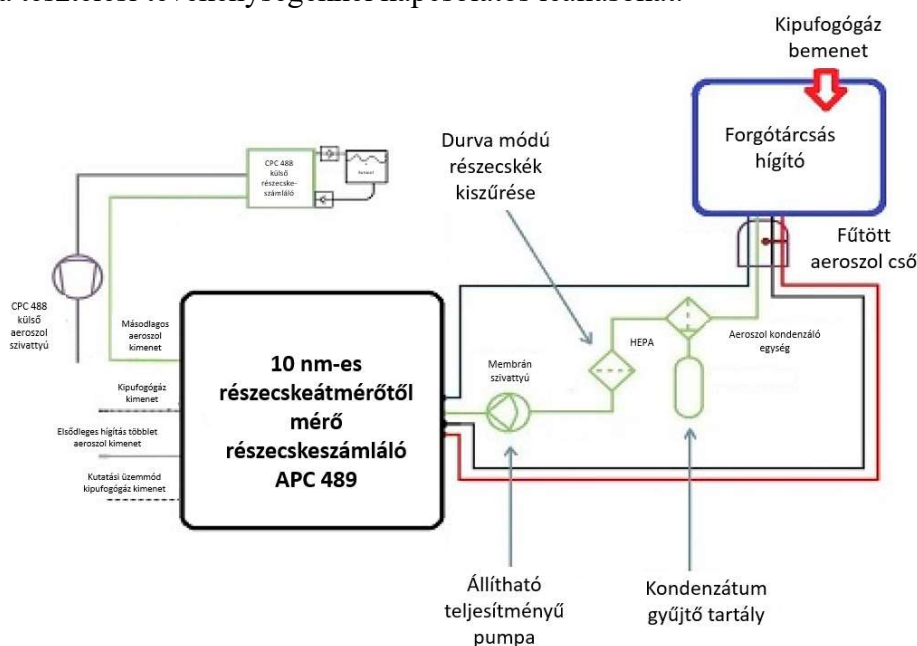
A motor próbapadi méréseivel kapcsolatos kutatás és fejlesztés során gyakran felmerülnek magas kipufogógáz-részecskekoncentrációk. Ilyen helyzetekben a mintavételt a motor utáni kipufogócsőben is elvégezhetjük, ami "nyers" mérési módként ismert. Ezt a módot kifejezetten a durva módú részecskék és a magas koncentrációsintek kezelésére tervezték (Biró 2023). Azonban ezek a részecskék hajlamosak eltömíteni a részecskeszámológó csöveit az aeroszol útján. Emellett magas páratartalmú környezetben páralecsapódás léphet fel az aeroszol útjának hidegebb hőmérsékletű szakaszaiban. A kondenzátum és a szilárd részecskék jelenléte a szárítási folyamatot követően akadályokat eredményezhetnek, amelyek járatok szűküléséhez és a csövekben mérhető nyomásesés növekedéséhez vezethetnek. Ezeket a nyomáseséseket a fedélzeti nyomásérzékelők érzékelik, és önvédelmi mechanizmusokat indítanak el, amelyek megakadályozzák a további méréseket. A rendszeres eltömődések jelentős következményekkel járhatnak, sűrűbb karbantartási eljárásokat tesznek szükségessé, és a kritikus alkatrészek élettartamának csökkenéséhez vezethetnek, mint például a Venturi-szivattyú, a HEPA papírszűrő és az aeroszolcsövek. Fontos megjegyezni, hogy ezek az aeroszol útvonalak és hozzá kapcsolódó részek kizárólag a nyers mérési módban használatosak, mely kifejezetten kutatási célokat szolgál.

A fent említett kihívások hatékony kezelése és mérséklése érdekében egy új, N-elrendezésű konfigurációt dolgoztam ki, amint az a 4.9. ábrán látható.



4.9. ábra Az AVL részecskeszámláló (APC) 489 CAD modellje, fejlesztett N-elrendezéssel (Forrás: Bíró Norbert).

Az N-elrendezés 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 a 4.10. ábrán látható. Ezek az elemek a tervezés során kerültek az N-elrendezésbe, hogy növeljék annak funkcionalitását és teljesítményét. Ennek eredményeként az N-elrendezés elősegíti az eltömődési események megelőzését, enyhíti az alkatrészek élettartamára gyakorolt negatív hatásokat, és minimalizálja a tesztelési tevékenységekkel kapcsolatos leállásokat.

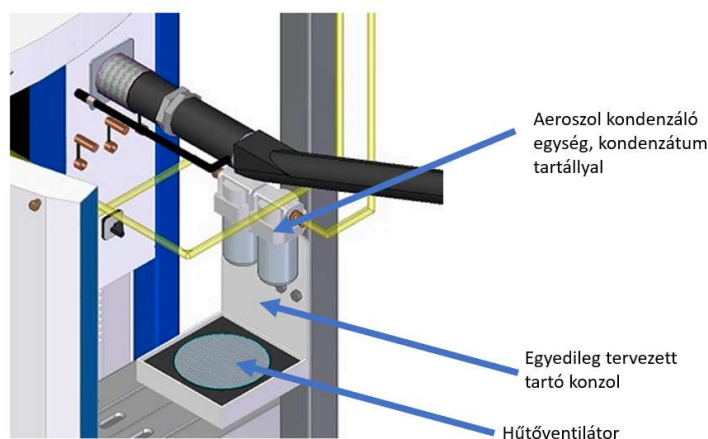


4.10. ábra Az APC 489 folyamatábrája, fejlesztett N-elrendezéssel (Forrás: Bíró Norbert).

Aeroszol kondenzáló egység

A nedvességleválasztó vagy kondenzvíz-elvezető egységet a követelmények figyelembevételével tervezték, hogy optimális teljesítményt nyújtson. Az elsődleges szempont az alacsony karbantartási igény, minimalizálva a beavatkozások gyakoriságát, és lehetővé téve a gyors és hatékony karbantartási eljárásokat. Emellett az egység kialakításának célja a nedvesség hatékonyan való elválasztása az aeroszolmintától, így megakadályozva a részecskeszámláló gép méréseinek nem kívánt beavatkozását (Pamminger et al. 2020).

A tervezés során beépített hűtőventilátor további hűtést biztosít a kondenzátum egység számára, ami növeli a nedvességleválasztás hatékonyságát. A hűtőventilátor 24 V-os egyenáramú tápegységre csatlakozik, amely automatikusan aktiválódik a készülék indításakor. Ez az automatikus üzemmód elősegíti a hatékony és kényelmes használatot, biztosítva a zökkenőmentes működést. A hűtőventilátor használata javítja az előkészítő egység teljesítményét, biztosítva megbízható és pontos méréseket az aeroszolminta nedvességtartalmának leválasztásakor. A hűtési folyamat csökkenti a kondenzáció mértékét, minimalizálva az aeroszol összetételére potenciálisan káros hatásokat, tovább növelve a mérési eredmények megbízhatóságát (Harrison et al. 2018) A hűtőventilátor és a kondenzációs egységet és hozzá egyedileg általam tervezett tartó konzolt a 4.11. ábrán látható CAD rajzomon mutatom be.



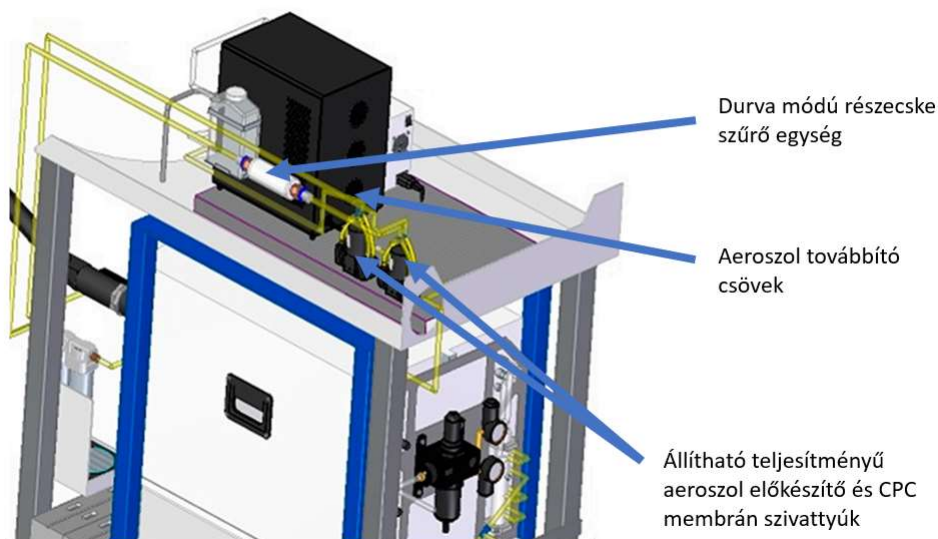
4.11. ábra A kondenzációs egység és a hűtőventilátor CAD modellje (Forrás: Bíró Norbert).

Durva módú részecskeszűrés és állítható aeroszol nyomás szabályzás

A HEPA szűrő kiemelkedő fontossággal bír az aeroszol előkészítő egységben, ahol számos kulcsfontosságú feladatot lát el. A fő célok egyike az, hogy hatékonyan eltávolítsa a nagyobb (0,3 μm -nél nagyobb átmérőjű) részecskéket a rendszerből már a folyamat kezdetén (Bourrous et al. 2016). Ezek a nagyobb részecskék nem relevánsak a mérések szempontjából, de negatívan befolyásolhatják a rendszer stabilitását, ha bejutnak. A HEPA szűrő (Parker, Lancaster NY, USA) alkalmazásával (lásd a 4.12. ábrát) csak a mérések szempontjából fontos részecskék jutnak el a készülékhez, biztosítva a pontos és megbízható eredményeket.

Az aeroszolos rendszer szivattyújának (ahogy a 4.12. ábrán látható) bizonyos jellemzőkkel kell rendelkeznie, hogy megfeleljen az általam tervezett rendszerbe. Először is, alacsony karbantartásigényű kell legyen, minimalizálva az állandó beavatkozások szükségességét. Emellett könnyen cserélhetőnek kell lennie, hogy lehetővé tegye az egyszerű karbantartást. A szivattyúnak

rugalmasságot kell biztosítani az aeroszol áramlási sebességének beállításához a kísérleti követelményeknek megfelelően. Testre szabhatónak és vezérelhetőnek kell lennie, lehetővé téve az egyedi igények alapján adaptálható működést. Ezenkívül ellenálló kell lennie a rendszeren átáramló aeroszolban jelenlévő koptató anyagokkal szemben, biztosítva a tartósságot és a megbízhatóságot a kihívást jelentő környezeti feltételek mellett is. A szivattyú néhány speciális teljesítményszpecifikációja magában foglalja a 16 dm³/perc légáramlást, a 2,2 bar maximális tápnyomás előállítását.

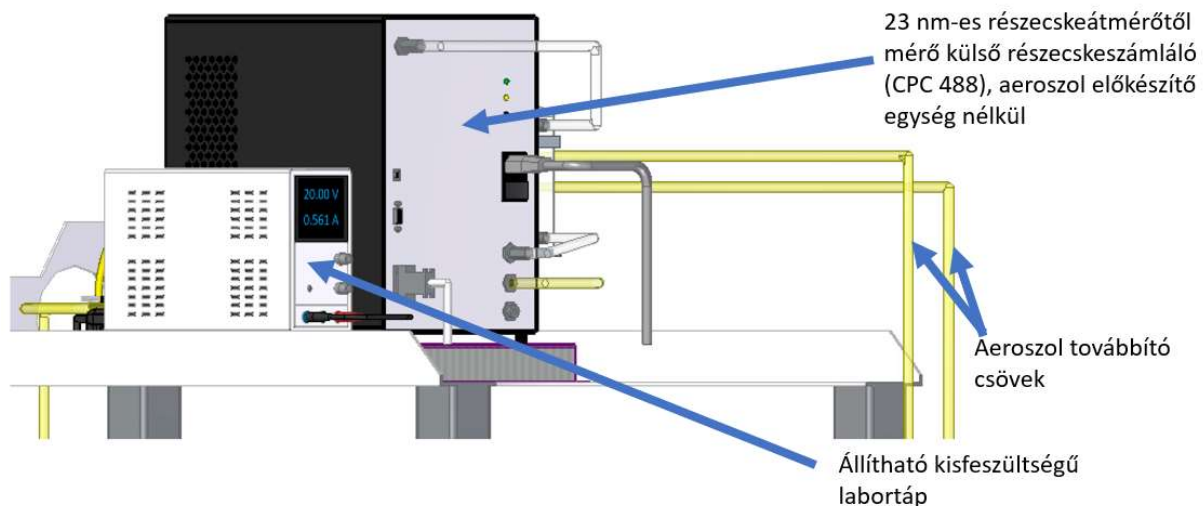


4.12. ábra A membránszivattyúk és a durva módú részecske szűrő CAD modellje (Forrás: Bíró Norbert).

Állítható kismegnyomású táp és a külső részecskeszámláló

Az N-elrendezésben az állítható tápegység kiemelkedő szerepet játszik, lehetővé téve a membránszivattyúk teljesítményének beállítását. Ez a szabályozhatóság különösen hasznos, mivel a kondenzációs egység és a HEPA szűrő alkalmazása ellenére idővel előfordulhat részecskeszennyeződés és eltömődés. Az ilyen eltömődés a nyomáscsökkenés növekedéséhez vezet az aeroszol-előkészítő egységben, ami figyelmeztető jeleket vált ki, és végül leállítja a részecskeszámlálót. A probléma megoldásához az általam kidolgozott szétválasztási eljárás magában foglalja az alkatrészek tisztítását és cseréjét; azonban sürgős helyzetekben az állítható szivattyú gyorsabb átmeneti megoldást kínál. Az állítható tápegység segíthet leküzdeni az eltömődés miatti megnövekedett nyomáscsökkenést a szivattyú teljesítményének növelésével. Sürgős esetekben jelentős leállítás nélkül teszi lehetővé a működést. Fontos megjegyezni, hogy ez csak átmeneti megoldás, mivel a megnövekedett szivattyúteljesítmény hosszú távon potenciális károkat okozhat. Ezért elengedhetetlen a megfelelő karbantartás és a hosszú távú megoldások végrehajtása a szivattyút érő káros hatások elkerülése érdekében. Az állítható tápegység azonban felbecsülhetetlen értékű lehet sürgős helyzetekben, megkönnyítve a megszakítás nélküli kutatási tesztelést az esetleges eltömődési problémák ellenére. Ennek funkciónak sokszor hasznát vettem a közel 300 órás kísérlet sorozatom során. Az állítható tápegység egyszerre táplálja az aeroszol előkészítő membránszivattyút és a CPC membránszivattyút. Ez biztosítja a zökkenőmentes koordinációt a két szivattyú között, elősegítve a hatékony kutatási folyamatokat. A szivattyú teljesítményének figyelése létfontosságú az egyidejű működés során, hogy elkerüljem az olyan problémákat, mint a túlzott nyomáscsökkenés. Az áramellátás és

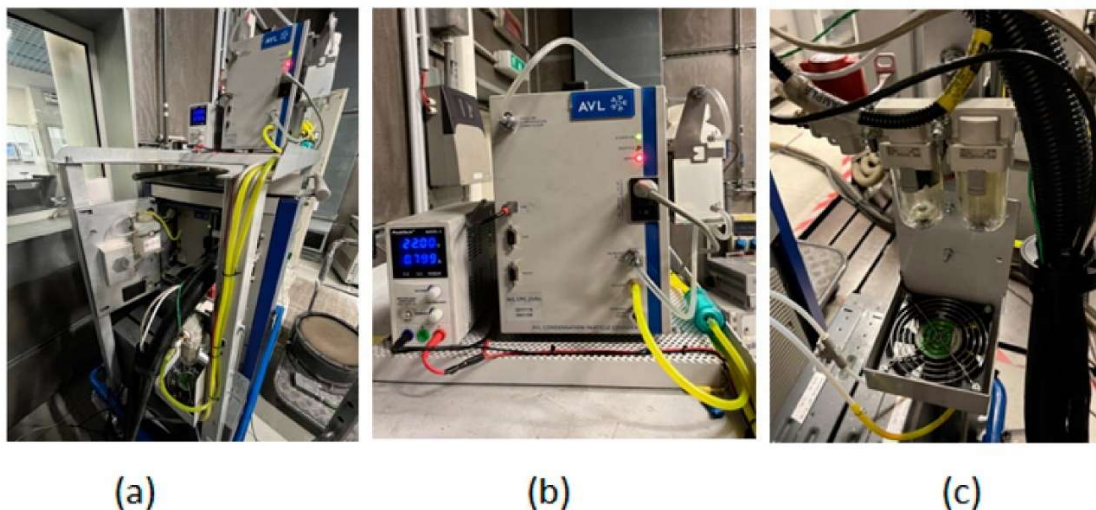
a szivattyúk hatékony kezelése optimalizálja az aeroszol-mintavevő rendszer teljesítményét és megbízhatóságát a különböző kísérletekben. Az N-elrendezésben alkalmazott hígítást és az illékony részecskék eltávolítását egy APC Plus Advanced 10 nm végezte el, amelyet az AVL List GmbH szállított. Ebben a konfigurációban az APC 10 nm-es mérésekre képes, és tartalmaz egy katalitikus párologtatót (CS) az illékony részecske eltávolításának fokozása érdekében (Giechaskiel et al. 2020). Az N-elrendezésben használt 23 nm-es párhuzamos részecskemérések másodlagos részecskeszámlálójaként egy önálló AVL kondenzációs részecskeszámlálót (CPC 488) alkalmaztam, amelyből hiányzik a mintagáz-előkészítő egység, ahogy az a 4.13. ábrán is látható. A 23 nm-es és nagyobb részecskék méréséhez az elpárologtató cső (ET) használatos hivatalosan az illékony részecskék eltávolítására. Ez azonban potenciális ütközést okozhat, mivel az N-elrendezéssel a CPC olyan aeroszolt kap, amelyet a CS már kezelt. Ezen probléma megoldására C. Kandlhofer, az AVL munkatársa összehasonlító kísérletet végzett (Kandlhofer 2020). Az eredmények azt mutatták, hogy a 23 nm alatti méréseknél az aeroszol kezelhető akár az ET-ben, akár a CS-ben, -6% és +1% közötti eltéréssel. Ahogy a 4.13. ábrán látható, a felesleges aeroszol a környezeti levegőjébe kerül a szűrés után. Érdeemes megjegyezni, hogy az APC kilépő gázárama $9 \text{ dm}^3/\text{perc}$, míg a CPC csak $1 \text{ dm}^3/\text{perc}$. Ezért a túlnyomás elkerülése érdekében egy nyomáshatároló szelepet terveztem a rendszerbe.



4.13. ábra Az állítható táp és a külső részecskeszámláló CAD rajza (Forrás: Bíró Norbert).

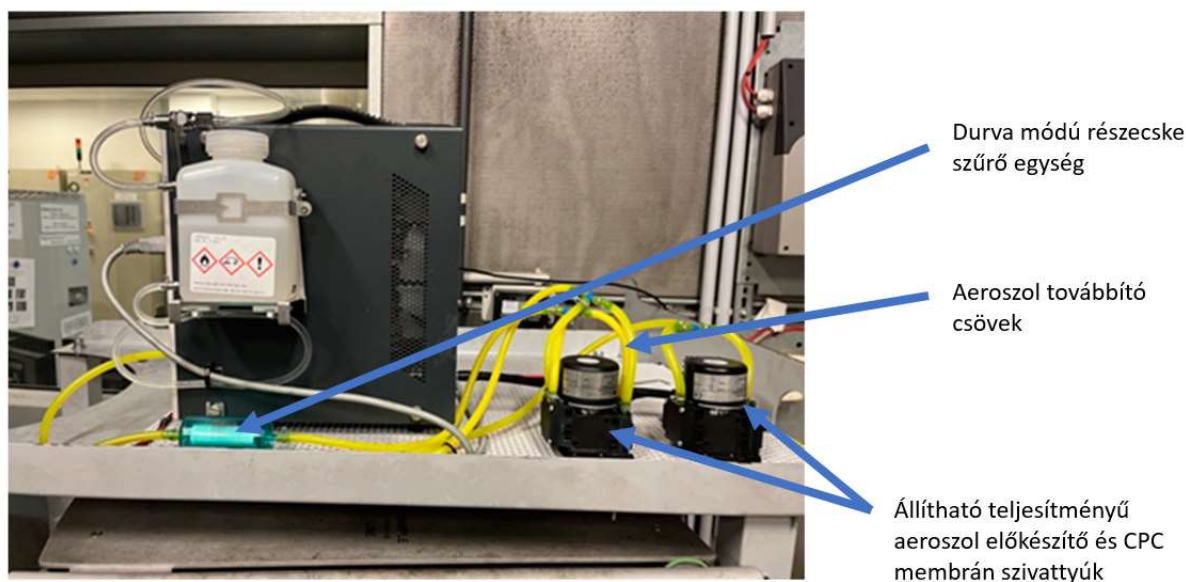
4.2.3. N-elrendezés kivitelezése

A 4.14. ábrán látható N-elrendezés a CAD terveim alapján készült.



4.14. ábra APC 489 N-elrendezéssel (a), CPC 488 és az állítható tápegység (b), valamint kondenzátum egységgel és hűtőventilátorral (c) kivitelezése a CAD tervek alapján (Forrás: Bíró Norbert).

Az N-elrendezés CAD-alapú tervezése biztosította az új kísérleti elrendezés precíz és pontos kivitelezését. Az alkatrészek kialakítása hatékony aeroszol-mintavételt és részecskeszámlálást eredményez és ezáltal megbízható kutatási eredményeket szavatol. Ezen felül a 4.15. ábrán látható a membránszivattyú, amely kulcsfontosságú eleme az N-elrendezésnek. A membránszivattyú jelentős szerepet játszik az aeroszol előkészítő egység teljesítményének biztosításában, esetleges eltömődési problémák esetén is.

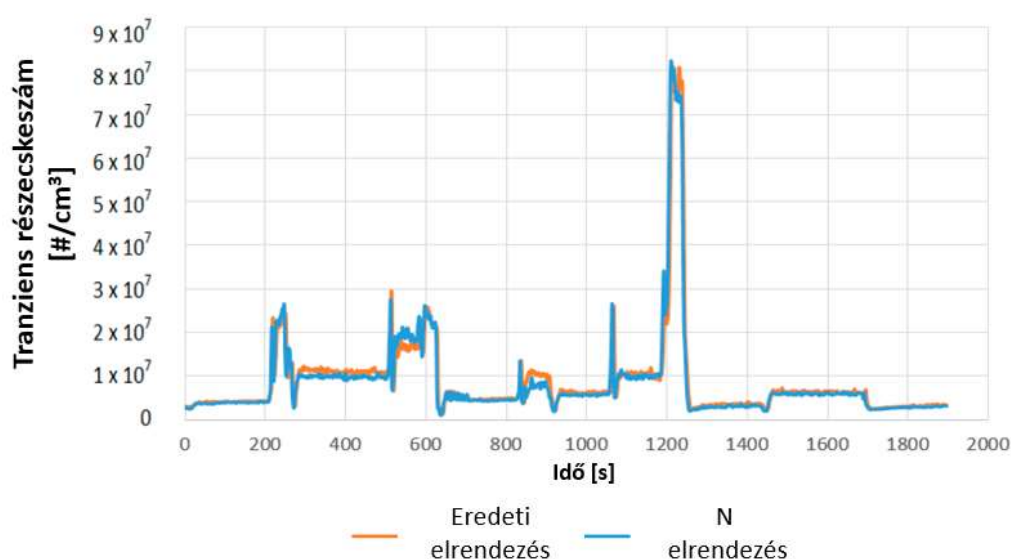


4.15. ábra A membránszivattyú és a durva módú részecske szűrő kivitelezése a CAD tervek alapján (Forrás: Bíró Norbert).

4.2.3. Eredeti és N-elrendezés összehasonlító kísérleti mérések

Az N-elrendezés és az eredeti elrendezés közötti összehasonlítás kiemelt szerepet játszik, mivel az egyhuzamban lefolytatható mérések sorozatának növekedése és a karbantartási igény csökkenése mellett kiemelt fontosságú, hogy a mérési pontosság is megmaradjon vagy javuljon. Az

összehasonlító kísérletek során WHSC ciklusokat alkalmaztam, az anyag és módszer 3.4.1. fejezete alapján. A WHSC-teszt két különálló ciklus köré épül fel: egy melegindítású állandósult állapotú tesztciklusra és egy hidegindítású ciklusra. Ebben az esetben csak a hidegindítást alkalmaztam, mivel ez magasabb károsanyag-kibocsátást eredményez, és emiatt összehasonlítás céljából elegendő (Peng et al. 2020). Ezt a tesztciklust úgy tervezték, hogy szimulálják a különböző régiókban, köztük az EU-ban, az USA-ban, Japánban és Ausztráliában előforduló tipikus vezetési körülményeket. Ez a ciklus állandósult állapotú motorteszt-üzemmódok sorozatából áll, amelyek mindegyikét meghatározott fordulatszám- és nyomatékkritériumok határozzák meg, és előre meghatározott gyorsítások kapcsolják össze ezeket az üzemmódokat. A normalizált üzemmódokat az adott tesztmotorhoz denormalizáltam (3.1) egyenlet alapján. A 4.16. ábrán látható, hogy a 10 nm-es részecskemérés tekintetében nincs szignifikáns különbség a 10 nm-es eredeti és az N-elrendezés között. Ennek fényében a hidegindítású ciklus alkalmazása kiválóan szolgálja a károsanyag-kibocsátás összehasonlítását és elemzését a különböző vezetési körülmények között.



4.16. ábra Transziens részecskeszám WHSC ciklus alatt (Forrás: Bíró Norbert).

Fontos hangsúlyozni, hogy minden kísérletet az aeroszol tranziens részecskekoncentrációinak elemzésével végeztem. Mivel a tesztelési szakaszban kizárólag a 10 nm-nél nagyobb átmérőjű részecskékre összpontosítottam, a részecskekibocsátás szélesebb tartománya állt rendelkezésre az értékeléshez. Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy a kísérlet és annak eredményei az euro VII bevezetésével is használhatóak, aktuálisak maradjanak. Az N-elrendezés konfigurációjával kapott tranziens részecskeszám görbe figyelemre méltó módon, minimális kilengésekkel követte le az eredeti elrendezés görbéjének pályáját. Fontos kiemelni, hogy a konzisztens eloszlási minta megőrzése mellett csak két különálló csúcson figyeltem meg marginális csökkenést, amelyek a 850 és 1200 másodperc közötti intervallumban fordultak elő (4.16. ábra). Ez a változás azonban ésszerűen értelmezhető a normál eloszlás részeként a tesztek kontextusában. Ez a finom eltérés, amely jóval az elfogadható paramétereken belül marad, azt mutatja, hogy az eredmények összehasonlíthatók, és az N-elrendezés alkalmazása elhanyagolható mértékben változtat a mérésen.

A WHSC-ciklus során kapott számított értékek mind az eredeti, mind az N-elrendezés esetében 1,9%-os marginális különbséget mutatnak, amint azt a 4.17. ábra mutatja. Érdemes megjegyezni, hogy ezeket a számításokat az anyag és módszer 3.9. fejezetében levezetett (3.17) egyenlettel fejeztem ki.

$$SPN_{10} = \frac{EVF_{sum} \cdot PN_{10}}{P} \left[\frac{\#}{kWh} \right] \quad (3.17)$$

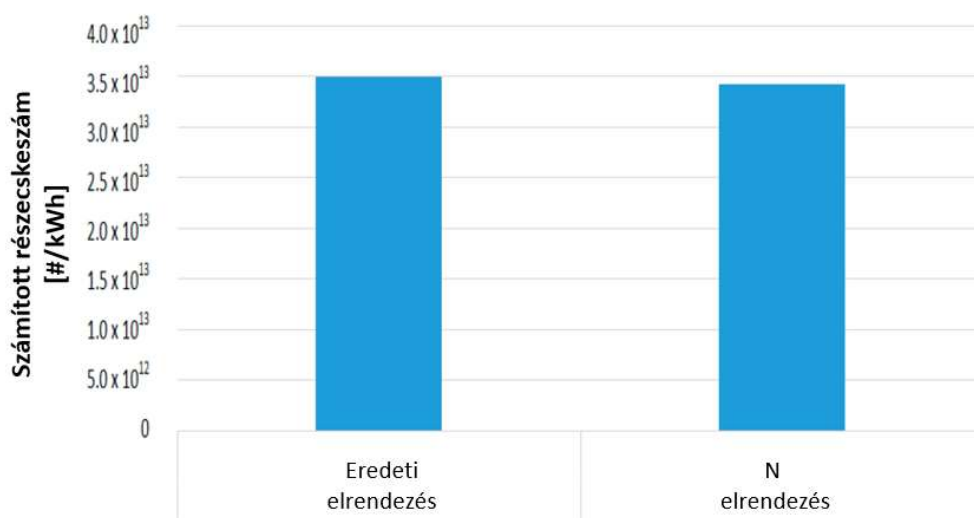
Ahol:

EVF_{sum} : kipufogógáz térfogatáram a WHSC ciklus alatt [cm^3],

PN_{10} : átlagos részecskeszám a 10 nm-es tartománytól, WHSC ciklus alatt [$\#/cm^3$],

P : a WHSC ciklus alatt végzett munka [kWh],

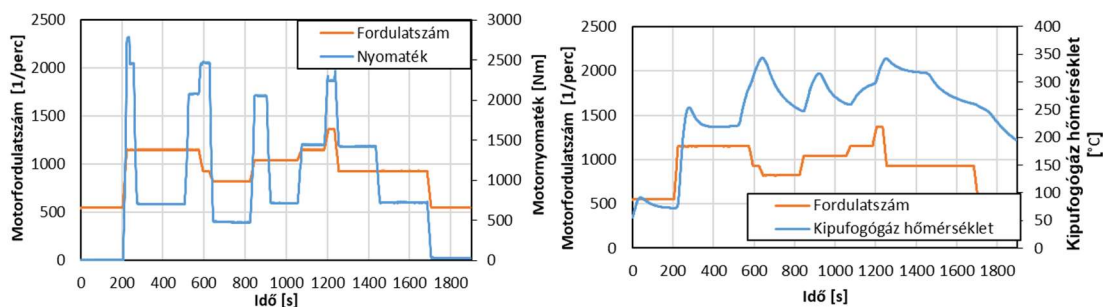
SPN_{10} : Szilárd részecskeszám 10 nm tartománytól [$\#/kWh$].



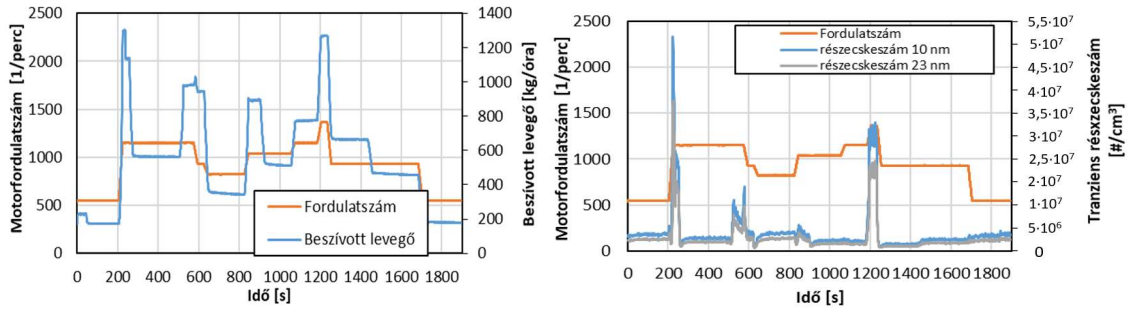
4.17. ábra Számított részecskeszám WHSC ciklus alatt (Forrás: Bíró Norbert).

4.3. Motor alapemisszió meghatározása

A méréseim elvégzésekor prioritást élvezett a pontos és jól dokumentált alapemisszióval való összehasonlítás. Az alapállapot méréseit az ECU (Motorvezérlő Egység) alapbeállításai mellett végeztem. A 4.18. és 4.19. ábrán elemzés alá vettem a tranziens motorjellemzőket és a részecsk kibocsátást. Ezt követően kiszámítottam a WHSC (World Harmonized Stationary Cycle) ciklusra vonatkozó emissziókat és a fajlagos üzemanyag-fogyasztást, az anyag és módszer 3.9 fejezetének módszertanát alkalmazva.



4.18. ábra Tranziens motorfordulat, motornyomaték WHSC ciklus alatt (Forrás: Bíró Norbert).



4.19. ábra Tranziens kipufogógáz hőmérséklet, beszívott levegő tömegáram és részecskeszám WHSC ciklus alatt (Forrás: Bíró Norbert).

Az alábbiakban az anyag és módszer 3.9. fejezetében levezetett képletek alapján meghatározom a motor WHSC ciklus alatt adódó emisszióit. Fajlagos részecskeszám a 10 és 23 nm-es tartománytól az európai szabványok szerint számolva.

$$SPN_{10} = \frac{EVF_{sum} \cdot PN_{10}}{W} \quad (3.17)$$

$$SPN_{10} = \frac{226860098 \cdot 3864412}{51,8} = 1,7 \cdot 10^{13} \left[\frac{\#}{kWh} \right] \quad (4.1)$$

Ahol:

EVF_{sum} : kipufogógáz térfogatáram a WHSC ciklus alatt [cm^3],

PN_{10} : átlagos részecskeszám a 10 nm-es tartománytól, WHSC ciklus alatt [$\#/cm^3$],

P : a WHSC ciklus alatt végzett munka [kWh],

SPN_{10} : Szilárd részecskeszám 10 nm tartománytól [$\#/kWh$].

$$SPN_{23} = \frac{EVF_{sum} \cdot PN_{23}}{W} \quad (3.18)$$

$$SPN_{23} = \frac{226860098 \cdot 2705089}{51,8} = 1,2 \cdot 10^{13} \left[\frac{\#}{kWh} \right] \quad (4.2)$$

Ahol:

EVF_{sum} : kipufogógáz térfogatáram a WHSC ciklus alatt [cm^3],

PN_{23} : átlagos részecskeszám a 23 nm-es tartománytól, WHSC ciklus alatt [$\#/cm^3$],

P : a WHSC ciklus alatt végzett munka [kWh],

SPN_{23} : Szilárd részecskeszám 23 nm tartománytól [$\#/kWh$].

Fajlagos szén-monoxid kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

$$CO_P = \frac{CO_{m sum}}{W_{WHSC}} \quad (3.39)$$

$$CO_P = \frac{57,2}{51,8} = 1,11 \left[\frac{g}{kW} \right] \quad (4.3)$$

Ahol:

CO_P : Fajlagos szén-monoxid kibocsátás [g/kWh],

$CO_{m\ sum}$: Szén-monoxid kibocsátás a WHSC ciklus alatt [g],

W_{WHSC} : A tesztmotor által végzett munka a WHSC ciklus alatt [kWh].

Fajlagos nitrogén-oxid kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

$$NOx_P = \frac{NOx_{m\ sum}}{WW_{WHSC}} \quad (3.33)$$

$$NOx_P = \frac{621}{51,8} = 11,99 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.4)$$

Ahol:

NOx_P : Fajlagos nitrogén-oxid kibocsátás [g/kWh],

$NOx_{m\ sum}$: Nitrogén-oxid kibocsátás a WHSC ciklus alatt [g],

W_{WHSC} : A tesztmotor által végzett munka a WHSC ciklus alatt [kWh].

Fajlagos nitrogén-monoxid kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

$$NO_P = \frac{NO_{m\ sum}}{WW_{WHSC}} \quad (3.51)$$

$$NO_P = \frac{421,3}{51,8} = 8,13 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.5)$$

Ahol:

NO_P : Fajlagos nitrogén-monoxid kibocsátás [g/kWh],

$NO_{m\ sum}$: Nitrogén-monoxid kibocsátás a WHSC ciklus alatt [g],

W_{WHSC} : A tesztmotor által végzett munka a WHSC ciklus alatt [kWh].

Fajlagos szén-dioxid kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

$$CO_{2P} = \frac{CO_{2\ m\ sum}}{WW_{WHSC}} \quad (3.45)$$

$$CO_{2P} = \frac{36207}{51,8} = 699 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.6)$$

Ahol:

CO_{2P} : Fajlagos szén-dioxid kibocsátás [g/kWh],

$CO_{2\ m\ sum}$: szén-dioxid kibocsátás a WHSC ciklus alatt [g],

W_{WHSC} : A tesztmotor által végzett munka a WHSC ciklus alatt [kWh].

Fajlagos szén-hidrogén kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

$$CH_P = \frac{CH_{m\ sum}}{WW_{WHSC}} \quad (3.61)$$

$$CH_P = \frac{0,4}{51,8} = 0,01 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.7)$$

Ahol:

CH_P : Fajlagos szén-hidrogén kibocsátás [g/kWh],

$CH_{m\ sum}$: szén-hidrogén kibocsátás a WHSC ciklus alatt [g],

W_{WHSC} : A tesztmotor által végzett munka a WHSC ciklus alatt [kWh].

Effektív fajlagos fogyasztás (1 kW effektív teljesítményhez szükséges hajtóanyag fogyasztás):

$$b_e = \frac{\sum_{1894}^1 m_{hajtó}}{W_{WHSC}} \quad (3.62)$$

$$b_e = \frac{10070}{51,8} = \left[\frac{g}{kW} \right] \quad (4.8)$$

Ahol:

b_e : Effektív fajlagos fogyasztás [g/kWh],

$\sum_{1894}^1 m_{hajtó}$: A hajtóanyag tömegáramának összege a WHSC ciklus alatt [g],

W_{WHSC} : A tesztmotor által végzett munka a WHSC ciklus alatt [kWh].

4.4. Kísérleti eredmények klasszifikációja és tisztítása

A kutatás során a 3.6. táblázatban felsorolt kísérleteket hajtottam végre. A kísérleti adatokat interkvartilis klaszter analízissel szűrtem és kategorizáltam, hogy csak a legmegbízhatóbb adatok kerüljenek be a végső értékelésbe. Az elemzési folyamat első lépése a lineáris determinációs együtthatók meghatározása volt mind a négy aktuátor eredményeihez. Ezután kvartilisek segítségével értékeltem az adatokat. Az analízis során kiderült, hogy a beszívott levegő és a megkerülő szelep eredményei az alsó kvartilisbe esnek, így nem biztosították azt a megbízható alapot, amely szükséges lenne egy matematikai modell illesztéséhez és az eredmények közötti összefüggések megfogalmazásához. Emiatt a további elemzésre a kipufogógáz-visszavezető szelep és a közönsnyomócső 12 kísérletére összpontosítok. Az elemzés részletes leírását az M2 elektronikus melléklet tartalmazza.

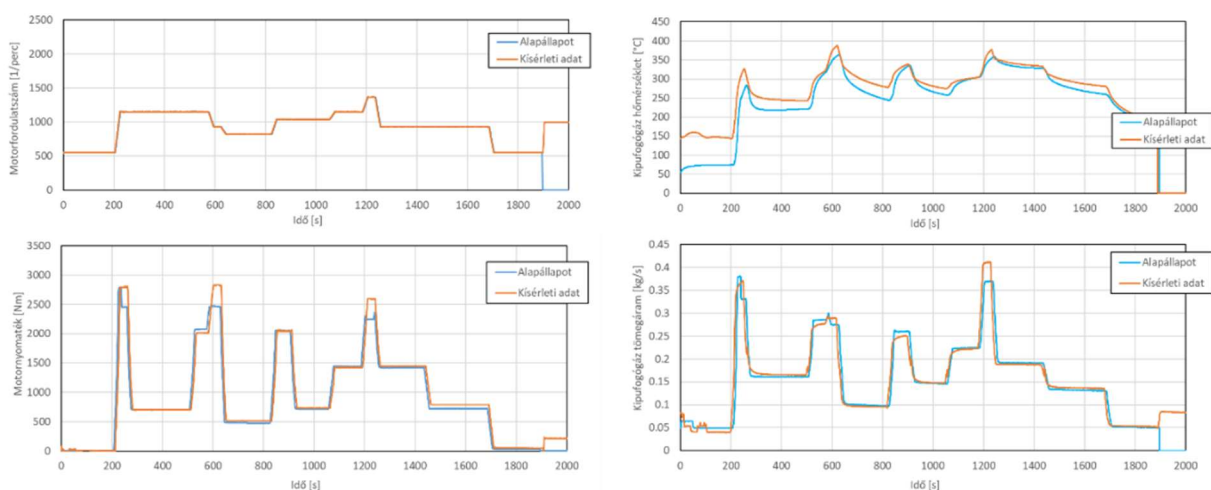
4.5. Kísérletek kiértékelése

4.2. táblázat Tisztított rögzített paraméteres tesztek listája

Sorszám	Aktuátor	Kitérés az eredeti állapottól	Kísérlet elnevezés	Script elnevezés
1	EGR	-30%	EGR-30%	301
2	RailP	-30%	RailP-30%	303
3	EGR	-20%	EGR-20%	401
4	RailP	-20%	RailP-20%	403
5	EGR	-10%	EGR-10%	501
6	RailP	-10%	RailP-10%	503
7	EGR	+10%	EGR +10%	601
8	RailP	+10%	RailP+10%	603
9	EGR	+20%	EGR +20%	701
10	RailP	+20%	RailP+20%	703
11	EGR	+30%	EGR +30%	801
12	RailP	+30%	RailP+30%	803

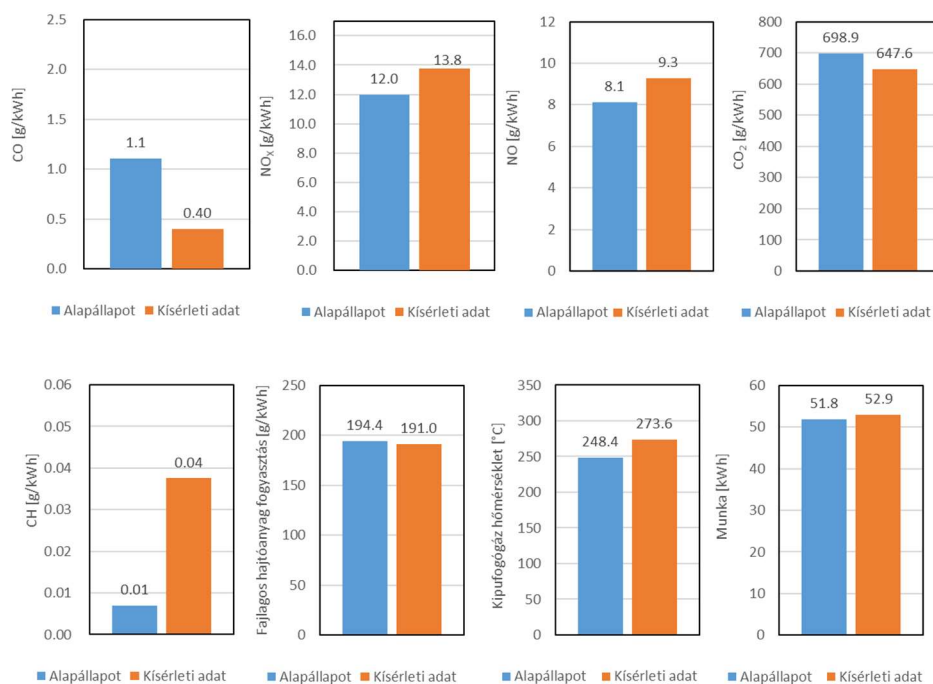
A klasszifikációs analízis keretében a tisztított kísérleti adatokat a 4.2-es táblázatban rögzítettem. A kipufogógáz-visszavezetési és a közönsnyomócső nyomás paramétereinek módosításait a kiinduló állapotokhoz képest szimmetrikusan, mínusz 30% és plusz 30% közötti tartományban, 10%-os lépésközzel végeztem el. A fejezet további részében a maradék kísérleti adatok elemzését végzem el. Mivel egyetlen WHSC ciklus során körülbelül 160 000 adatpontot rögzíttek, a 12 kísérlet összesen közel 2 millió adatpont feldolgozását igényelte. Az adatok megbízható kezelése érdekében a 3.9-es fejezetben ismertetett 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. A többi kísérlet elemzési diagramjai a mellékletben találhatóak.

4.5.1. Kipufogógáz visszavezetés kísérlet kiértékelés (-30%)



4.20. ábra Tranziens motorfordulat, motornyomaték, kipufogógáz hőmérséklet, beszívott levegő tömegáram a kísérleti WHSC ciklus alatt, összehasonlítva az alapállapottal (Forrás: Bíró Norbert).

Az első lépésben a kísérleti motor jellemzőit hasonlítottam össze az alapállapottal, amelyeket a 4.20. ábrán lehet megtekinteni. Ezzel az összehasonlítással azt akartam megállapítani, hogy az adatok alkalmasak-e az elemzésre, és hogy nem történt-e hiba a motor vagy a teszt cella részéről. Ebből kiderült, hogy bár vannak bizonyos különbségek, például a motorfordulatszám 1800 másodperc utáni szakaszában, ahol a kísérleti adatok szerint a motor még futott. Ezt a változást azért hajtottam végre, hogy a motor – a nagy igénybevételt jelentő WHSC ciklus után – le tudjon hűlni a leállítás előtt. Viszont ezt a részt az emisszió kiértékelésből kihagytam, hogy ne torzítsa az eredményeket.



4.21. 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 4.21-es 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 (Needham, 1991). Az alábbiakban kiszámítom az egyes emisszió komponenseket, a munka és az átlagos kipufogógáz hőmérséklet adott, mivel a teszt cella vezérlő számítógép minden ciklusra meghatározza.

Fajlagos részecskeszám a 10 és 23 nm-es tartománytól az európai szabványok szerint számolva.

$$SPN_{10} = \frac{226914847 \cdot 2575205}{52,9} = 1,1 \cdot 10^{13} \left[\frac{\#}{kWh} \right] \quad (4.9)$$

$$SPN_{23} = \frac{226914847 \cdot 1360977}{52,9} = 5,8 \cdot 10^{12} \left[\frac{\#}{kW} \right] \quad (4.10)$$

Fajlagos szén-monoxid kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

$$CO_P = \frac{21,1}{52,9} = 0,4 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.11)$$

Fajlagos nitrogén-oxid kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

$$NO_{xP} = \frac{728,9}{52,9} = 13,8 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.12)$$

Fajlagos nitrogén-monoxid kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

$$NO_P = \frac{490}{52,9} = 9,3 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.13)$$

Fajlagos szén-dioxid kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

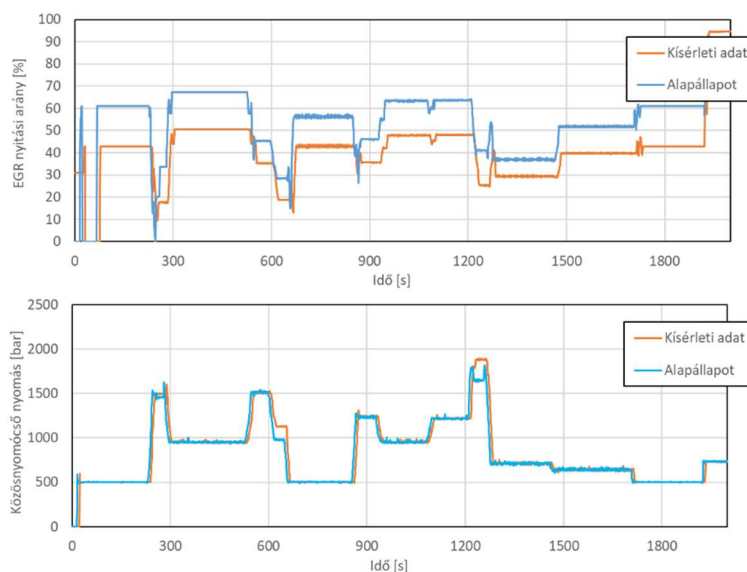
$$CO_{2P} = \frac{34246}{52,9} = 647,6 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.14)$$

Fajlagos szén-hidrogén kibocsátás az európai szabványok szerint számolva.

$$CH_P = \frac{2}{52,9} = 0,04 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.15)$$

Effektív fajlagos fogyasztás (1 kW effektív teljesítményhez szükséges hajtóanyag fogyasztás):

$$b_e = \frac{10098}{52,9} = 191 \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (4.16)$$



4.22. ábra Tranziens 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 nyomócsőves rendszer nyomását és a kipufogógáz-visszavezetés (EGR) mértékét. Ezeket a paramétereket a 3.7.4 fejezetben bemutatott, általam készített programkód segítségével irányítom a motor vezérlőrendszerén keresztül. Ebben a kísérletben az EGR nyitási értékét 30%-kal csökkentettem, amit a 4.22. ábrán egyértelműen nyomon követhetünk.

4.5.2. Kísérleti eredmények összegzése

4.3. táblázat Számított eredményei a kipufogógáz visszavezetést módosító kísérleteknek

Kísérleti beállítás	EGR (-30%)	EGR (-20%)	EGR (-10%)	EGR (+10%)	EGR (+20%)	EGR (+30%)
CO [g/kWh]	0,40	0,49	0,56	1,02	1,26	1,64
CH [g/kWh]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
NO _x [g/kWh]	13,8	12,6	11,5	10,2	9,4	8,9
CO ₂ [g/kWh]	647,6	656,8	655,4	656,5	665,2	662,9
NO [g/kWh]	9,3	8,5	8	7	6,5	6,3
b _e [g/kWh]	191,0	190,6	190,7	191,0	190,9	191,7
t _{kipufogógáz} [°C]	273,6	269,2	278,0	277,6	280,5	286,9
Munka [kWh]	52,9	53,1	53,2	53,4	53,6	53,6
PN ₁₀	1,1·10 ¹³	1,2·10 ¹³	1,2·10 ¹³	1,7·10 ¹³	1,8·10 ¹³	2,1·10 ¹³
PN ₂₃	5,8·10 ¹²	7,2·10 ¹²	7,7·10 ¹²	1,1·10 ¹³	1,2·10 ¹³	1,4·10 ¹³

A kipufogógáz visszavezetésének módosításával kapcsolatos kísérletek eredményei (4.3. táblázat) azt mutatják, hogy az üzemi paraméterek, mint például a ciklus munkavégzése és a hajtóanyag-fogyasztás, viszonylag egyenletesek maradtak az egész kísérletsorozat alatt. A NO_x és a NO koncentrációja az előzetes várakozásoknak megfelelően, a kipufogógáz visszavezetés mértékével fordítottan arányosan alakult. Érdekes megfigyelés a kipufogógáz hőmérsékletét illetően, amely a kipufogógáz visszavezetés mértékének növekedésével arányosan csökkent. A kipufogógáz visszavezetése rontja a motor termikus hatékonyságát, így a hajtóanyag belső energiájából kevesebb lesz a mozgási energia és több a hőenergia. Ez a jelenség a kísérletsorozat hőmérsékleti adataiban is következetesen megfigyelhető. Az EGR nyitási arányának emelése csökkenti az oxigén koncentrációját az égéstérben, ami nem sztöchiometrikus (nem ideális arányú) égést eredményez, ezáltal növelve a részecske emissziót. Ez az összefüggést a teljes kísérletsorozat során következetesen megfigyelhető. Összességében az EGR nyitását befolyásoló kísérletek kiértékelésekor mind a hat kísérlet megfelelt az előzetes elvárásaimnak.

4.4. táblázat Számított eredményei a közönsnyomócső nyomást módosító kísérleteknek

Kísérleti beállítás	RailP (-30%)	RailP (-20%)	RailP (-10%)	RailP (+10%)	RailP (+20%)	RailP (+30%)
CO [g/kWh]	0,27	0,97	0,93	0,98	0,98	1,08
CH [g/kWh]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
NO _x [g/kWh]	7,5	8,5	9,5	10,8	11,4	11,8
CO ₂ [g/kWh]	654,2	658,8	660,6	665,9	663,2	666,7
NO [g/kWh]	5,2	5,9	6,5	7,7	8,3	8,7
b _e (g/kWh)	191,7	191,3	191,3	191,9	192,2	192,5
t _{kipufogógáz} [°C]	284,5	283,5	281,2	285,7	284,5	278,1
Munka [kWh]	53,4	53,7	53,4	53,9	53,8	53,6
PN ₁₀	2,6·10 ¹³	2,2·10 ¹³	1,7·10 ¹³	1,4·10 ¹³	1,3·10 ¹³	1,3·10 ¹³
PN ₂₃	1,9·10 ¹³	1,4·10 ¹³	1,1·10 ¹³	8,6·10 ¹²	8,2·10 ¹²	7,4·10 ¹²

A közönsnyomócső nyomását befolyásoló kísérletek eredményei ugyancsak (4.4. táblázat) azt mutatják, hogy az üzemi paraméterek, mint például a ciklus munkavégzése és a hajtóanyag-

fogyasztás, viszonylag egyenletesek maradtak az egész kísérletsorozat alatt. Itt egy érdekes összefüggés tárul fel, a NO_x szint számottevően csökken a közösnymócső nyomásának csökkentése során, ami az égéshő csökkenésével magyarázható. A részecskeszám tekintetében viszont a közösnymócső nyomásának növelésével direkt arányosság figyelhető meg. Ezt Siebers (Siebers, 1998) kutatásai is megerősítik, azonban az én kutatásaim során a nyomás 60%-os növelése a részecskeszám felére csökkentését eredményezte, míg Siebers esetében a negyedére. Ez arra utal, hogy a részecskeszám és a nyomás közötti kapcsolat nem lineáris, továbbá, hogy a magas nyomásokon jelentkező részecskeszám-kibocsátási viselkedés eltér az alacsonyabb nyomásokon megfigyelhetőtől. Összességében a közösnymócső nyomását befolyásoló kísérletek kiértékelésekor mind a hat kísérlet megfelelt az előzetes elvárásaimnak.

4.6. Függvénykapcsolat a 10/23 nm részecskék kibocsátása és a közösnymócső 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 kvadrátikus kapcsolat figyelhető meg, erre Siebers (Siebers, 1998) 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.

Az általam használt polinomiális regressziós modell általános formája a következő volt:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot x^2 + \epsilon \quad (4.17)$$

Ahol:

y a függő változó, jelen esetben a részecskeszám;

x a független változó, a közösnymócső nyomáseltolódás százaléka;

β_0 az y -tengelymetszet;

β_1 és β_2 polinom első és második fokú tagjainak együtthatói;

ϵ a modell hibatagja.

A legkisebb négyzetek módszerével becsültem a β_0 , β_1 és β_2 együtthatókat. Ez a módszer az összes megfigyelt pont és a modell által előre jelzett pontok közötti vertikális távolságok négyzetösszegét minimalizálja. A becslés során a következő egyenletrendszert oldottam meg.

Az első egyenlet az összes y érték összegét kapcsolja az összes x és x^2 értékek összegéhez.

$$\sum y = n \cdot \beta_0 + \beta_1 \cdot \sum x + \beta_2 \cdot \sum x^2 \quad (4.18)$$

A második egyenlet az x és y értékek szorzatainak összegét kapcsolja az x és x^2 értékek összegéhez.

$$\sum x \cdot y = \beta_0 \cdot \sum x + \beta_1 \cdot \sum x^2 + \beta_2 \cdot \sum x^3 \quad (4.19)$$

A harmadik egyenlet az x^2 és y értékek szorzatainak összegét kapcsolja az x^2 és x^3 értékek összegéhez.

$$\sum x \cdot y = \beta_0 \cdot \sum x^2 + \beta_1 \cdot \sum x^3 + \beta_2 \cdot \sum x^4 \quad (4.20)$$

Ahol n a megfigyelések száma, és a szummák az összes megfigyelt érték összegét jelentik az adott hatványon. A fenti egyenletek megoldásával kaphatjuk meg a β_0 , β_1 és β_2 együtthatókat.

Ezeket az egyenleteket a normálegyenleteknek nevezik, és mátrixokat használva oldom meg őket, ami egy hatékony módszer a normálegyenletek által meghatározott lineáris egyenletrendszer megoldására. Ebben az esetben a megoldás a következő alakban írható le:

$$X^T X \beta = X^T y \quad (4.21)$$

A tervezési mátrix (X).

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Ez a mátrix tartalmaz egy oszlopot az elsőfokú taghoz (a közönsnyomócső nyomáseltolódás értékei), egy második oszlopot a másodfokú taghoz (a közönsnyomócső nyomáseltolódás értékeinek négyzetei), valamint egy oszlopot az y -tengelymetszet számára, amely minden sorban 1-es értéket tartalmaz, hogy figyelembe vegyük a konstans a modellben.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -30 & 900 \\ 1 & -20 & 400 \\ 1 & -10 & 100 \\ 1 & 10 & 100 \\ 1 & 20 & 400 \\ 1 & 30 & 900 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

A tervezési mátrix és saját transzponáltjának szorzata ($X^T X$).

$$X^T X = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 2800 \\ 0 & 2800 & 0 \\ 2800 & 0 & 1960000 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

A tervezési mátrix transzponáltjának és önmagának a szorzata fontos a normálegyenletek megoldásában. A diagonálisokon kívül az összes elem nulla, mivel a közönsnyomócső nyomáseltolódás értékeinek összege nulla (szimmetrikus eloszlású változások -30%-tól +30%-ig). Ez az előnyös tulajdonság jelentősen leegyszerűsíti a számításokat.

A tervezési mátrix transzponáltja és a 10 nm-es részecskeszám vektor szorzata ($X^T \cdot y$) a 10 nm-es részecskeszám esetén.

$$X^T y_{10nm} = \begin{bmatrix} 1,06 \cdot 10^{14} \\ -5,91 \cdot 10^{14} \\ 5,26 \cdot 10^{16} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

A tervezési mátrix transzponáltja és a 23 nm-es részecskeszám vektor szorzata ($X^T \cdot y$) a 23 nm-es részecskeszám esetén.

$$X^T_{y23nm} = \begin{bmatrix} 1,06 \cdot 10^{14} \\ -5,91 \cdot 10^{14} \\ 5,26 \cdot 10^{16} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

A tervezési mátrix és saját transzponáltjának szorzatának az inverze $(X^T X)^{-1}$.

$$(X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} 5 \cdot 10^{-1} & 0 & -7,14 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 3,57 \cdot 10^{-4} & 0 \\ -7,14 \cdot 10^{-4} & 0 & 1,53 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Ez a mátrix az együtthatók becsléséhez szükséges, és a normálegyenletek megoldásának részeként kapjuk meg. A mátrix elemei jelentik az egyes bázisvektorok közötti kapcsolatot és befolyást az együtthatók meghatározására.

Az (4.21) egyenletet rendezem β együtthatóra.

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \quad (4.27)$$

Innen viszonylag könnyen meghatároztam a 10 és 23 nm-es együtthatók értékeit.

10 nm-es együttható mátrix.

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,54 \cdot 10^{13} \\ -2,11 \cdot 10^{11} \\ 4,87 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

23 nm-es együttható mátrix.

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,46 \cdot 10^{12} \\ -1,72 \cdot 10^{11} \\ 4,02 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Behelyettesítve az együtthatókat az (4.17) általános egyenletbe, megkapjuk a 10 és a 23 nm-es polinomiális regressziós egyenleteket.

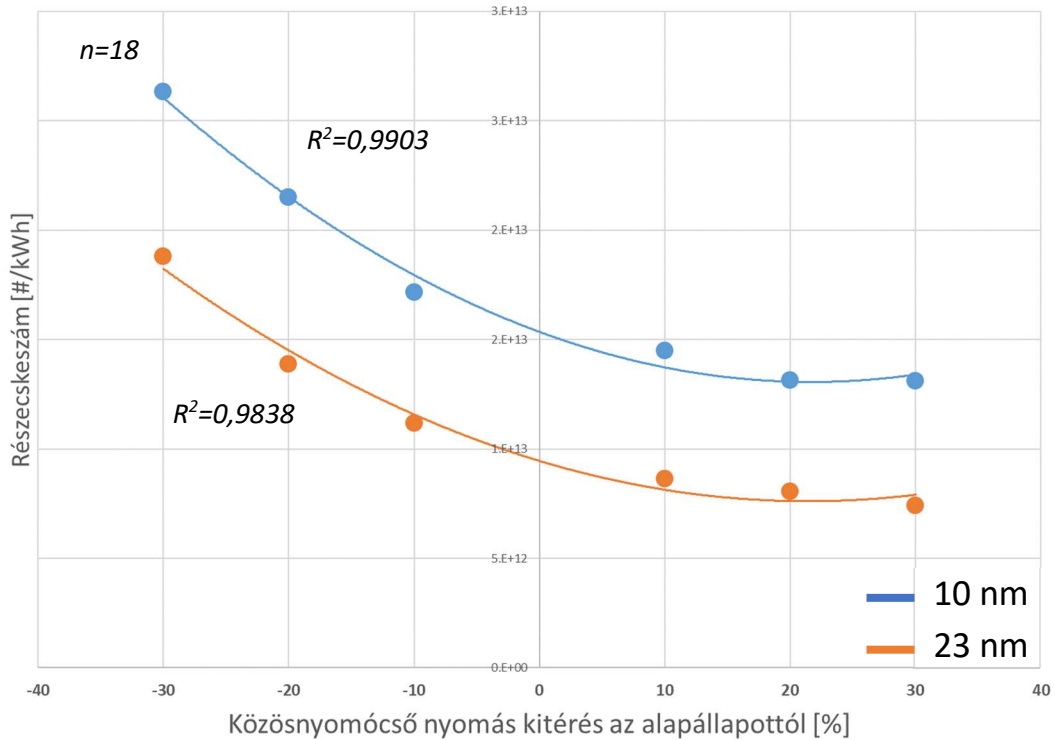
10 nm-es polinomiális regressziós egyenlet.

$$\hat{y}_{Rail;10nm} = 1,54 \cdot 10^{13} - 2,11 \cdot 10^{11}x + 4,87 \cdot 10^9 x^2 \quad (4.30)$$

23 nm-es polinomiális regressziós egyenlet.

$$\hat{y}_{Rail;23nm} = 9,46 \cdot 10^{12} - 1,72 \cdot 10^{11}x + 4,02 \cdot 10^9 x^2 \quad (4.31)$$

Ezek az egyenletek írják le a közönsnyomócső nyomáseltolódás és a 10 és a 23 nm-es részecskeszám közötti kapcsolatot a regressziós analízisem alapján. Az egyenleteket és a mérési pontokat a 4.23. ábrán szemléltetem.



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

A determinációs együttható R^2 levezetésekor a célom az, hogy megmérjem, mennyire jól illeszkedik a lineáris modellem az adatokhoz. Az R^2 érték a teljes szórásnégyzet összeg (SS_{tot}) és a reziduális szórásnégyzetösszeg (SS_{res}) arányát fejezi ki, kivonva ezt az arányt 1-ből.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (4.32)$$

Ahol:

SS_{res} a reziduális szórásnégyzet összeg, ami az egyes megfigyelési pontok és a regressziós vonal közötti eltérések négyzetösszege.

SS_{tot} a teljes szórásnégyzet összeg, ami a megfigyelt értékek és azok átlagértékének eltérései négyzetösszege.

A SS_{res} kiszámításához minden megfigyelt értékre kiszámítom a különbséget a megfigyelt érték és a modell által becsült érték között, majd ezt a különbséget négyzetre emelem és az összes négyzetösszeget összeadom:

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.33)$$

Itt y_i az i -edik megfigyelt érték, $\hat{y}_i$ pedig az i -edik becsült érték a modell alapján.

A SS_{tot} kiszámításához minden megfigyelt értékre kiszámítom a különbséget a megfigyelt érték és a megfigyelt értékek átlaga között, majd ezt a különbséget négyzetre emelem és az összes négyzetösszeget összeadom:

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.34)$$

Ahol $\bar{y}$ a megfigyelt értékek átlaga.

A fenti matematikai levezetés alapján, amikor az R^2 értékeket a valós részecskeszám adatokkal számoltam ki mind a 10 nm-es, mind a 23 nm-es részecskeszámokra, kivételesen magas értékeket kaptam: 0,9903 a 10 nm-es és 0,9838 a 23 nm-es részecskeszámokra. Ezek az eredmények azt jelentik, hogy a regressziós modelljeim kiválóan illeszkednek az adatokhoz és jelentős részét képesek magyarázni a részecskeszám variabilitásának mindkét méretkategóriában.

Ez azt sugallja, hogy a nyomáseltolódás százalékos változása jelentős prediktor a részecskeszámok számára a vizsgált dízelmotor esetében. A magas R^2 értékek azt mutatják, hogy a modellek jól képesek leírni a nyomáseltolódás és a részecskeszám közötti kapcsolatot, és hatékonyan használhatók a részecskeszámok előrejelzésére különböző nyomásbeállítások mellett. Ezek az eredmények fontosak lehetnek a motor működési paramétereinek optimalizálása és az emissziók csökkentése szempontjából.

4.7. 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.

A tervezési mátrix (X).

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \\ 1 & x & x^2 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Ez a mátrix tartalmaz egy oszlopot az elsőfokú taghoz (az EGR nyitáseltolódás értékei), egy második oszlopot a másodfokú taghoz (a az EGR nyitáseltolódás értékeinek négyzetei), valamint egy oszlopot az y-tengelymetszet számára, amely minden sorban 1-es értéket tartalmaz, hogy figyelembe vegyük a konstans a modellben.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -30 & 900 \\ 1 & -20 & 400 \\ 1 & -10 & 100 \\ 1 & 10 & 100 \\ 1 & 20 & 400 \\ 1 & 30 & 900 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

A tervezési mátrix és saját transzponáltjának szorzata ($X^T X$).

$$X^T X = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 2800 \\ 0 & 2800 & 0 \\ 2800 & 0 & 1960000 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

A tervezési mátrix transzponáltjának és önmagának a szorzata fontos a normálegyenletek megoldásában. A diagonálisokon kívül az összes elem nulla, mivel az EGR százalékos értékeinek összege nulla (szimmetrikus eloszlású változások -30%-tól +30%-ig). Ez az előnyös tulajdonság jelentősen leegyszerűsíti a számításokat.

A tervezési mátrix transzponáltja és a 10 nm-es részecskeszám vektor szorzata ($X^T \cdot y$) a 10 nm-es részecskeszám esetén.

$$X^T_{y10nm} = \begin{bmatrix} 9,14 \cdot 10^{13} \\ 4,69 \cdot 10^{14} \\ 4,38 \cdot 10^{16} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

A tervezési mátrix transzponáltja és a 23 nm-es részecskeszám vektor szorzata ($X^T \cdot y$) a 23 nm-es részecskeszám esetén.

$$X^T_{y23n} = \begin{bmatrix} 5,80 \cdot 10^{13} \\ 3,89 \cdot 10^{14} \\ 2,79 \cdot 10^{16} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

A tervezési mátrix és saját transzponáltjának szorzatának az inverze $(X^T X)^{-1}$.

$$(X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} 5 \cdot 10^{-1} & 0 & -7,14 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 3,57 \cdot 10^{-4} & 0 \\ -7,14 \cdot 10^{-4} & 0 & 1,53 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Ez a mátrix az együtthatók becsléséhez szükséges, és a normálegyenletek megoldásának részeként kapjuk meg. A mátrix elemei jelentik az egyes bázisvektorok közötti kapcsolatot és befolyást az együtthatók meghatározására.

Az (4.21) egyenletet rendezem β együtthatóra.

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \quad (4.41)$$

Innen viszonylag könnyen meghatároztam a 10 és 23 nm-es együtthatók értékeit.

10 nm-es együttható mátrix.

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,44 \cdot 10^{13} \\ 1,67 \cdot 10^{11} \\ 1,71 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

23 nm-es együttható mátrix.

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,16 \cdot 10^{12} \\ 1,39 \cdot 10^{11} \\ 1,12 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Behelyettesítve az együtthatókat az (4.17) általános egyenletbe, megkapjuk a 10 és a 23 nm-es polinomiális regressziós egyenleteket.

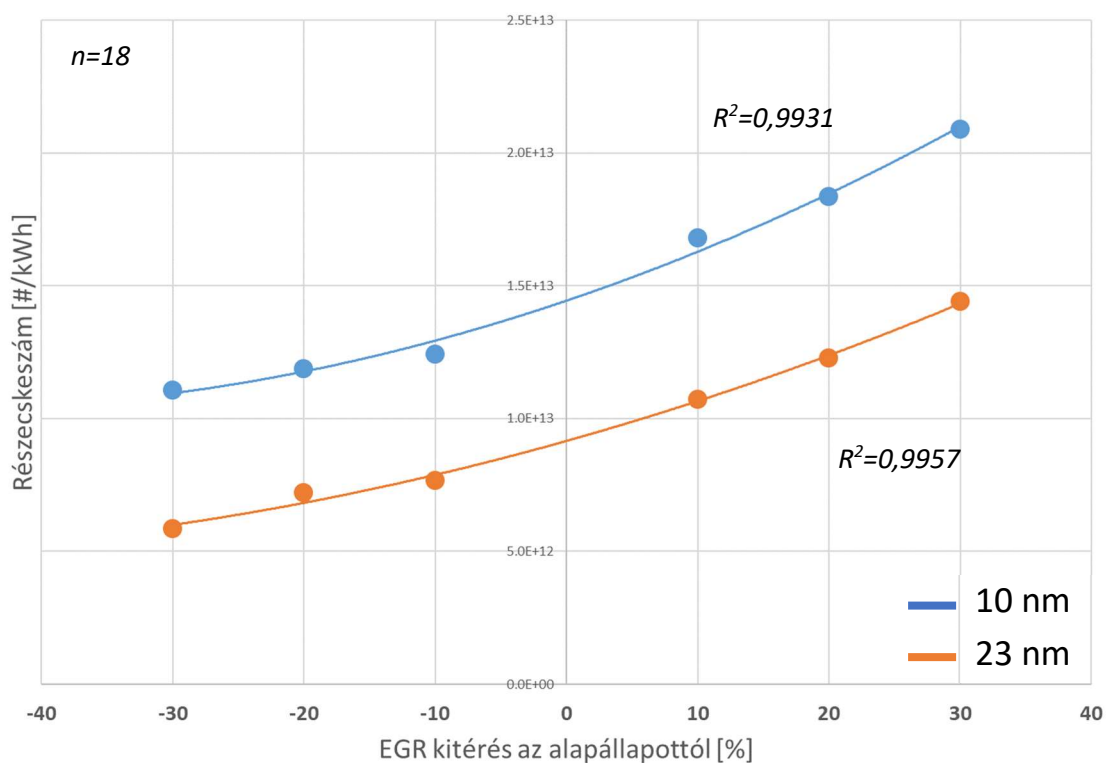
10 nm-es polinomiális regressziós egyenlet.

$$\hat{y}_{EGR;10nm} = 1,44 \cdot 10^{13} + 1,67 \cdot 10^{11}x + 1,71 \cdot 10^9x^2 \quad (4.44)$$

23 nm-es polinomiális regressziós egyenlet.

$$\hat{y}_{EGR;23nm} = 9,16 \cdot 10^{12} + 1,39 \cdot 10^{11}x + 1,16 \cdot 10^9x^2 \quad (4.45)$$

Ezek az egyenletek írják le a EGR százalékos nyitási eltolását és a 10 és a 23 nm-es részecskeszám közötti kapcsolatot a regressziós analízisem alapján. Az függvényeket és a mérési pontokat a 4.24. ábrán szemléltetem.



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

Mivel ebben az esetben a lineáris regresszió is viszonylag jól illeszthető a mért pontokra ezért elkészítettem az R^2 kalkulációt a lineáris eredményekre is. Az alábbi eredmények a (4.32) egyenlettel kerültek meghatározásra.

A lineáris modell R^2 értéke a 10 nm-es részecskeszámokra: 0,9696.

A lineáris modell R^2 értéke a 23 nm-es részecskeszámokra: 0,9810.

A polinomiális modell R^2 értéke a 10 nm-es részecskeszámokra: 0,9931.

A polinomiális modell R^2 értéke a 23 nm-es részecskeszámokra: 0,9957.

Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a polinomiális modell jobban illeszkedik az adatokhoz mindkét részecskeméret esetében, mivel magasabb R^2 értékeket produkált, ami arra utal, hogy több variabilitást képes magyarázni. Az R^2 érték jelentős javulása azt jelzi, hogy a polinomiális modell jobban képes leírni az EGR változásának és a részecskeszámok közötti kapcsolatot.

4.8. 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. Az illesztés során a legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam, amely a következő egyenlet alapján történik:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_0 + \beta_1 \cdot x_i))^2 \quad (4.46)$$

Ahol:

y_i az i -edik megfigyelt NO_x érték (13,8; 12,6; 11,5; 10,2; 9,4; 8,9),

x_i az i -edik EGR nyitási érték (-30, -20, -10, 10, 20, 30),

β_0 az y -tengelymetszet,

és β_1 a meredekség.

A meredekség a következő képlet alapján kerül kiszámításra:

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.47)$$

Ahol:

$\bar{x}$ az x értékek átlaga, $\bar{x} = 0$,

és $\bar{y}$ az y értékek átlaga, $\bar{y} = 11,067$.

Ez a képlet azt a meredekséget adja, amely a legjobban illeszkedik az adatokhoz a legkisebb négyzetek módszerének értelmében.

Miután meghatároztam a meredekséget, a y -tengely metszetet a következő képlet alapján számolom ki:

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \cdot \bar{x} \quad (4.48)$$

Itt a $\bar{x}$ és $\bar{y}$ az átlagos NO_x kibocsátás, illetve átlagos EGR nyitási értékei. Az előző lépésekben meghatározott β_1 és β_0 értékek segítségével összeállítottam a regressziós egyenletet.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x \quad (4.49)$$

A (4.47) és a (4.48) számú egyenlet alapján meghatároztam a:

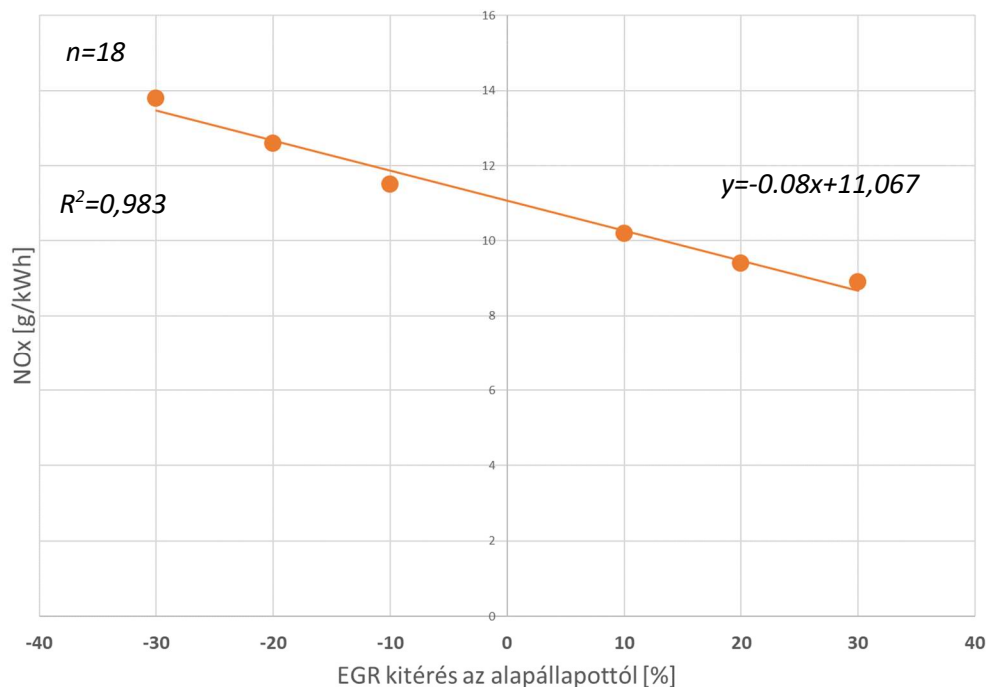
$\beta_1 = -0,08$, ami azt mutatja, hogy minden egységnyi növekedés az EGR nyitásakor, a NO_x kibocsátást 0,08 egységgel csökkenti.

$\beta_0 = 11,07$, amely a NO_x -kibocsátás értékét adja meg, amikor az EGR módosítási százalék nulla.

A fentieket behelyettesítve a (4.49) egyenletbe, a következőt kapjuk:

$$\hat{y}_{EGR;NOx} = -0,08x + 11,067 \quad (4.50)$$

Ez az egyenlet a regressziós függvényt adja meg, amelyet a NO_x kibocsátás és az EGR nyitási értékek közötti kapcsolat modellezésére használunk. A függvényt vizuálisan az alább látható 4.25. ábrán ábrázoltam.



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

A determinációs együttható R^2 levezetésekor a célom az, hogy megmérjem, mennyire jól illeszkedik a lineáris modellem az adatokhoz. Az R^2 érték a teljes szórásnégyzet összeg (SS_{tot}) és a reziduális szórásnégyzetösszeg (SS_{res}) arányát fejezi ki, kivonva ezt az arányt 1-ből.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = \frac{0,313}{18,233} = 0,983 \quad (4.51)$$

Az R^2 érték, ami a modell magyarázó erejét méri, 0,983. Ez azt jelenti, hogy a modellem magyarázó ereje nagyon magas, és a változások 98,3%-át képes magyarázni az EGR szelep %-os eltérése és a NO_x kibocsátás közötti összefüggésben.

4.9. 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. Illesztettem egy regressziós modellt az adatokra, amely a független változó (x) és a függő változó (y) közötti lineáris kapcsolatot írja le.

A (4.47) és a (4.48) számú egyenlet alapján meghatároztam a:

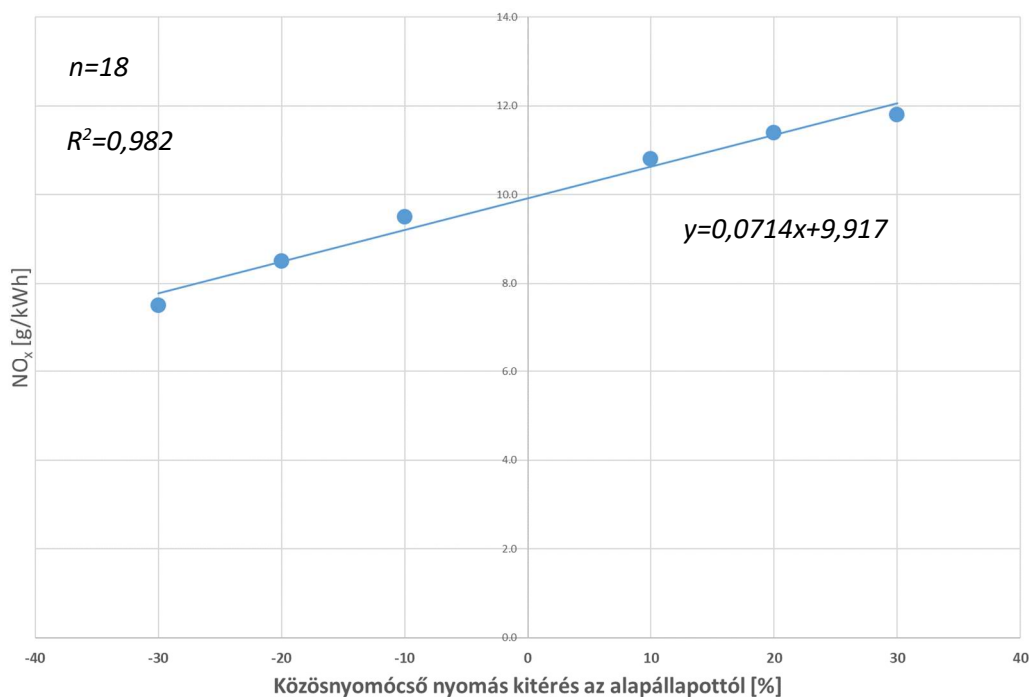
$\beta_1=0,0714$, ami azt mutatja, hogy minden egységnyi növekedés a nyomáseltolódásban, a NO_x kibocsátást 0,0714 egységgel növeli.

$\beta_0=9,917$, amely a NO_x -kibocsátás értékét adja meg, amikor a nyomáseltolódás nulla.

A fentieket behelyettesítve a (4.49) egyenletbe, a következőt kapjuk:

$$\hat{y}_{EGR;Rail} = 0,0714x + 9,917 \quad (4.52)$$

Ez az egyenlet a regressziós függvényt adja meg, amelyet a NO_x kibocsátás és a nyomáseltolódás közötti kapcsolat modellezésére használlok. A függvényt vizuálisan az alább látható 4.26. ábrán ábrázoltam.



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

A determinációs együttható R^2 levezetésekor a célom az, hogy megmérjem, mennyire jól illeszkedik a lineáris modellem az adatokhoz. Az R^2 érték a teljes szórásnégyzet összeg (SS_{tot}) és a reziduális szórásnégyzetösszeg (SS_{res}) arányát fejezi ki, kivonva ezt az arányt 1-ből.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = \frac{0,263}{14,548} = 0,982 \quad (4.53)$$

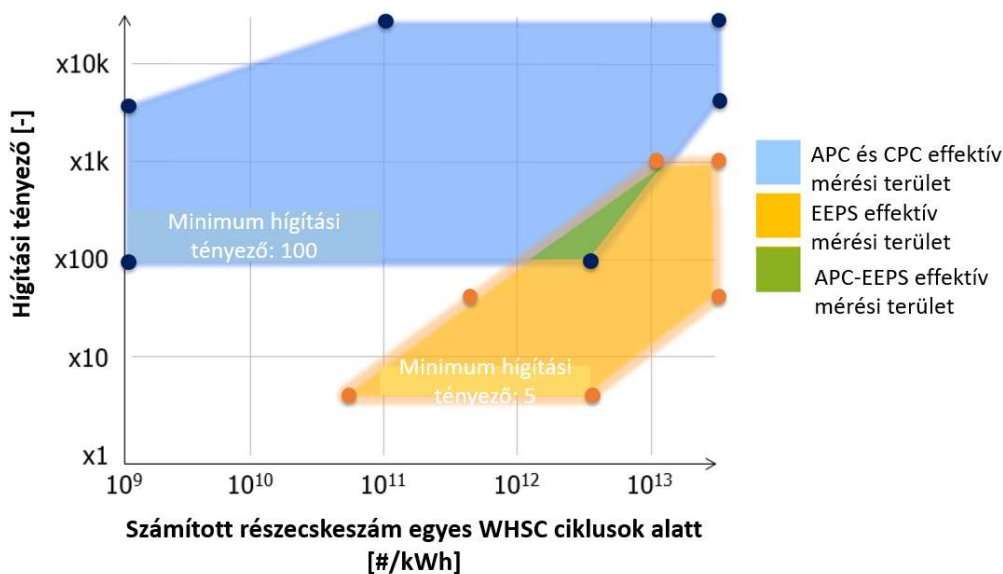
A fenti matematikai levezetés alapján, amikor az R^2 értéket a valós NO_x kibocsátási adatokkal számoltam ki, egy nagyon magas értéket, 0,982-t kaptam, ami azt jelenti, hogy a regressziós modellem kiválóan illeszkedik az adatokhoz és jelentős részét képes magyarázni a NO_x kibocsátás

variabilitásának. Ez azt jelenti, hogy a nyomásetolódás százalékos változása jelentős prediktor a NO_x-kibocsátás számára a vizsgált dízelmotor esetében.

4.10. Új tudományos eredmények

1.Tézis

A kutatásom során megvizsgáltam különböző mérési elveken alapuló részecskeszámlálókat és meghatároztam működési tartományaikat a hígítási tényező függvényében. A feltárt részecskekoncentráció 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

Motorfékpadi vizsgálataim során megállapítottam a közösnymócsőben 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 paraméterezhető beállításokkal rendelkező motor, amely lehetővé teszi az eredmények általánosítását és reprodukálhatóságát. A kikísérletezett összefüggések kompresszió gyújtású, közösnymócsőves 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 közösnyomócső nyomáseltolódás százaléka [%].

3.Tézis

A motorfékpadai 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 gyűjtású, 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 nyitáseeltolódás 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 gyűjtású, elektronikus vezérlésű kipufogógáz visszavezető rendszerű, EURO VI-d normának megfelelő nehézgépjármű motorok esetében.

$$\hat{y}_{EGR;NOx} = -0,08x + 11,067$$

Ahol:

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

x a kipufogógáz visszavezetés nyitáseltolódás százaléka [%].

5.Tézis

Motorfékpadi vizsgálataim során megállapítottam a közösnymócsőben 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 közösnymócső nyomáseltolódás százaléka [%].

5. 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 nyomásetolódási értékek mellett. 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 alap 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.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az autóipar 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 károsemisszió 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 Ibsen 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 részecskeméréseket 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 közönsnyomócső 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.

7. SUMMARY

Automotive emission industry underwent a rapid development in the 2000s, driven by increasingly stringent emission standards at both European and global levels. These standards spurred the development of new, more complex exhaust gas treatment systems. Recent events have highlighted the importance of effective pollutant emission regulation to the public, demanding even greater attention to innovative solutions in engineering design to minimize environmental impacts.

The primary goal of my doctoral research, through a series of fixed-parameter experiments conducted in a dynamometer laboratory environment, is to determine the correlations between the two main harmful emission components found in the exhaust gas of diesel engines, namely nitrogen oxides and particulate matter, in relation to the actuators of modern diesel engines, such as the common rail fuel system and the exhaust gas recirculation (EGR) valve. In this endeavor, I was aided by the study of relevant literature and knowledge of emission technology research. Additional objectives included the development of a unique experimental system that encompasses the creation of a program in Visual Basic programming language for the repeatable control of engine actuators, writing control programs for the test cell on the PUMA Open TST editor interface, and enhancing the measurement reliability of the AVL 489 particle counter machine, enabling its use throughout numerous experiments. Furthermore, I aimed to compare different particulate measurement procedures based on the dilution factor.

This research was conducted at the Research and Development Center of Ibsiden Hungary Kft. in Dunavarsány, where I work as an engineer. The experiments were performed in a motor test bench laboratory environment using a Volvo D13 Euro VI-d emission standard compliant heavy-duty diesel engine. Gaseous and liquid media significantly affect the emissions of internal combustion engines. Therefore, to ensure the fidelity of fixed-parameter experiments, I also employed fuel, lubricating oil, charge air, and coolant conditioning systems.

Special attention was given to the complex analysis of these factors throughout my research. I encountered several challenges at the start, including understanding the selection and dilution-dependent operation of particle counters, designing an aerosol preparation unit that ensures reliable particle measurements during long test series, and developing program codes for actuators to allow precise control. Innovative procedures developed in response to these challenges enabled me to commence over 300 hours of experiments on the motor test bench, the results of which can be described by regression models with high determination coefficients ($R^2 > 0.97$).

These results accurately approximate the two main emission components, NO_x and PN, of new development heavy-duty vehicles equipped with compression ignition, common rail fuel injection systems, electronically controlled exhaust gas recirculation systems meeting the Euro VI standard, as related to changes in common rail pressure and the extent of exhaust gas recirculation. With regressions determined for particulate number concentrations across measurement ranges of 10 and 23 nm, these can be utilized in upcoming research related to the soon-to-be-introduced EURO VII standard. Thus, the model I developed serves not only the current research objectives but also provides a solid foundation for the creation of more complex models. These advanced models can offer deeper and more comprehensive insights into the emission dynamics and behavior of diesel engines, enabling the scientific community and engineering practice to refine and optimize engine performance while complying with environmental regulations.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Hálámat szeretném kifejezni Dr. Kiss Péter egyetemi tanárnak, témavezetőmnek, aki kaput nyitott számomra a tudomány világába, és utat mutatott a tudományos kihívások útvesztőjében.

Köszönet illeti az Ibsen Hungary Kft.-t, a munkahelyemet, amiért biztosították a kutatásomhoz szükséges mérési infrastruktúrát.

Köszönetemet fejezem ki Akihiro Ohira-nak, egykori felettesemnek, akinek érdeklődése és éleslátó kérdései értékes iránymutatásként szolgáltak tudományos munkám során.

Külöm köszönetem fejezném ki édesapámnak, aki idejét nem sajnálva segített az értekezés olvashatóságának finomításában.

Végezetül, de nem utolsósorban, szeretném megköszönni családomnak és a barátnőmnek a támogatást és megértést, amit ebben a megpróbáltatásokkal teli időszakban nyújtottak számomra.

9. IRODALOMJEGYZÉK

1. Aird, F., (2001): "Bosch Fuel Injection Systems", In: *HP Books, ISBN: 1-55788-365-3*
2. Akiyoshi, T., Torisaka, H., Yokota, H., Shimizu, T. et al., (2011) : Development of Efficient Urea-SCR Systems for EPA 2010-Compliant Medium Duty Diesel Vehicles. In: *SAE Technical Paper 2011-01-1309*, <https://doi.org/10.4271/2011-01-1309>.
3. Allansson, R., Blakeman, P.G., Cooper, B.J., Hess, H., Silcock, P.J., Walker, A.P., (2002): "Optimising the Low Temperature Performance and Regeneration Efficiency of the Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter (CR-DPF) System", In: *SAE Technical Paper 2002-01-0428*, [doi:10.4271/2002-01-0428](https://doi.org/10.4271/2002-01-0428)
4. Allansson, R., C. Goersmann, M. Lavenius, P.R. Phillips, A.J. Uusimaki and A.P. Walker, (2004): "The Development and In-Field Performance of Highly Durable Particulate Control Systems", In: *SAE Technical Paper 2004-01-0072*, [doi:10.4271/2004-01-0072](https://doi.org/10.4271/2004-01-0072)
5. Amanatidis, S.; Ntziachristos, L.; Giechaskiel, B.; Katsaounis, D.; Samaras, Z.; Bergmann, A. (2013): "Evaluation of an oxidation catalyst ("catalytic stripper") in eliminating volatile material from combustion aerosol." In: *J. Aerosol Sci. 2013, 57, 130–145*.
6. Ambs, J.L., B.T. McClure, (1993): "The Influence of Oxidation Catalysts on NO₂ in Diesel Exhaust", In: *SAE Technical Paper 932494*, [doi:10.4271/932494](https://doi.org/10.4271/932494)
7. An, Qi & Christensen, Morten & Ramachandran, Annith & Mukkamala, Raghava Rao & Vatrupu, Ravi. (2018): "Volkswagen's Diesel Emission Scandal" In: *Analysis of Facebook Engagement and Financial Outcomes. 10.1007/978-3-319-94301-5_20*.
8. Badami, M., et al., (2003): "Experimental investigation on the effect of multiple injection strategies on emissions, noise and brake specific fuel consumption of an automotive direct injection common-rail diesel engine", In: *Int. J. Eng. Res., 4(4), 299-314*, [doi:10.1243/146808703322743903](https://doi.org/10.1243/146808703322743903)
9. Bauer, S., et al., (2007): "Diesel engine for passenger car and EU6: Entirely system approach for development of fuel injection system, air/EGR path and emission aftertreatment", In: *Proceedings of the 28th Vienna Motor Symposium, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Germany*
10. Bártfai Z. (2000): "Belsőégésű motorok folyamatos, üzemközbeni hajtóanyag-fogyasztás- és teljesítmény mérése", In: *Mezőgazdasági Technika: 12 pp. 2-3., 2 p.*
11. Beke J., (2000): *Műszaki hőtan mérnököknek Budapest, Magyarország, Szaktudás Kiadó Ház, 541 p.*
12. Birkhold, F., Meingast, U., Wassermann, P., Deutschmann, O., (2006): Analysis of the Injection of Urea-Water-Solution for Automotive SCR DeNO_x-Systems: Modeling of Two-Phase Flow and Spray/Wall-Interaction. In: *SAE Technical Paper 2006-01-0643*, <https://doi.org/10.4271/2006-01-0643>.
13. Biró N., (2020): Egyedi Adblue befecskendező rendszer tervezése és tesztelése, In: *Diplomadolgozat, Szent István Egyetem*
14. Bíró, N., Pillinger, G., Kiss, P., Szöllősi, D., Akihiro, O., (2020): Experimental SCR system for engine dynamometer applications, In: *Hungarian Agricultural Engineering 38 pp. 56-62., 7 p.*

15. Bíró, N., Pillinger, G., Kiss, P., Szöllösi, D., Akihiro, O., (2021): Reducing nitrogen oxides in ICE R&D laboratory environment, In: *Mechanical Engineering Letters: R And D: Research And Development* 20 pp. 50-58. , 9 p.
16. Bíró, N., Pillinger, Gy., (2020): AdBlue-adagoló fejlesztése kipufogógáz-kezelő rendszer optimalizálásához. In: *Mezőgazdasági Technika 2020. május : LXI. Évfolyam..* 2-5.p
17. Bíró, N.; Kiss, P. (2023): “Euro VI-d Compliant Diesel Engine’s Sub-23 nm ParticleEmission” In: *Sensors* 2023, 23, 590. <https://doi.org/10.3390/s23020590>
18. Bíró, N.; Kiss, P.(2023): “Emission Quantification for Sustainable Heavy-Duty Transportation” In: *Sustainability* 2023, 15, 7483p.
19. Bíró, N.; Szöllösi, D.; Kiss, P. (2023): “Particle Counter Design Upgrade for Euro7” In: *Atmosphere* 2023, 14, 1411. <https://doi.org/10.3390/atmos14091411>.
20. Bosch-presse. (2020): Bosch and Weichai Power increase efficiency of Weichai truck diesel engines to 50 percent. In: *Bosch Media Service* 218880 <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/bosch-and-weichai-power-increase-efficiency-of-weichai-truck-diesel-engines-to-50-percent-218880.html>
21. Bourrous, S.; Bouilloux, L.; Ouf, F.X.; Lemaitre, P.; Nerisson, P.; Thomas, D.; Appert-Collin, J.C. (2016): “Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles. In: *Powder Technol.* 2016, 289, 109–117p
22. Breitbach, H., (2002): “Fuel Injection Systems Overview”, In: *Delphi Corporation, March 2002*; <https://www.scribd.com/document/240649349/Common-Rail-Fuel-Injection>
23. Campbell, L.E., et al., (1995): “Process for the reaction and absorption of gaseous air pollutants, apparatus therefor and method of making the same”, *Szabvány: US5451558A*
24. Cheng, A. and Mueller, C.,(2017): "Conceptual Investigation of the Origins of Hydrocarbon Emissions from Mixing-Controlled, Compression-Ignition Combustion," In: *SAE Int. J. Engines* 10(3):1228-1237, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-0724>.
25. Cooper, B.J., H.J. Jung and J.E. Thoss, (1990): “Treatment of Diesel Exhaust Gases”, *Szabvány: US4902487A*
26. Cooper, B.J., J.E. Thoss, (1989): “Role of NO in Diesel Particulate Emission Control”, In: *SAE Technical Paper* 890404, [doi:10.4271/890404](https://doi.org/10.4271/890404)
27. Czerwinski, J., Zimmerli, Y., Mayer, A., Lemaire, J. et al., (2015): "Investigations of SDPF -Diesel Particle Filter with SCR Coating for HD-Applications," In: *SAE Technical Paper* 2015-01-1023, , <https://doi.org/10.4271/2015-01-1023>.
28. Daimler-Benz Ag. (1996): Process and apparatus for selective catalyzed no-reduction in oxygen-containing exhaust gases. *Szabvány: US-8850802-B1*
29. Daimler-Benz Ag. (1998): Method and device for operating an internal combustion engine with low nitrogen oxide emissions. *Szabvány: US-6742326-B2*
30. DECSE, (2000): “Phase I Interim Data Report No. 4: Diesel Particulate Filters”, In: *U.S. DOE, January 2000*, [doi:10.2172/755351](https://doi.org/10.2172/755351), <http://www.nrel.gov/docs/gen/fy00/interim4.pdf>
31. DeLuca, F., (2010): “History of fuel injection”, In: *website, viewed 25-May-2010*, <http://www.disa.it/pdf/01HistoryOfDieselFuelInj.pdf>

32. Dimitriou, P.; Burke, R.; Zhang, Q.; Copeland, C.; Stoffels, (2017): "H. Electric Turbocharging for Energy Regeneration and Increased Efficiency at Real Driving Conditions." In: *Appl. Sci.* 704350. <https://doi.org/10.3390/app7040350>
33. Dollmeyer, T. A., et al., (2007): "Meeting the US heavy-duty diesel emission standards - designing for the customer", In: *SAE Technical Paper 2007-01-4170*, [doi:10.4271/2007-01-4170](https://doi.org/10.4271/2007-01-4170)
34. Enerdata: Global Energy Trends (2017): In: *Enerdata yearbook*, <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html>
35. Európai Bizottság (2022): Emissions in the automotive sectors https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive-industry/environmental-protection/emissions-automotive-sector_en
36. Európai Bizottság, Bizottsági Rendelet (EU) 2016/646 (2016): Emission Regulation Directive In: *EUR-Lex 2016-04-20* ; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32016R0646> ;
37. Európai Bizottság, Bizottsági Rendelet (EU) 2018/1832 (2018): Emission Regulation Directive In: *EUR-Lex 2018-11-05* ; <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/1832/oj>
38. Európai Bizottság, Bizottsági Rendelet (EU) 692/2008 (2008) : Emission Regulation Directive In: *EUR-Lex 2008-05-18*; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008R0692> ;
39. Ford Global Technologies, Inc. (2002): Method and system for NOx reduction. *Szabvány: US-5609026-A*
40. Ford Global Technologies, Llc. (2006): Exhaust gas aftertreatment systems. *Szabvány: US-6928806-B2*
41. Fuyuto, T., Taki, M., Ueda, R., Hattori, Y. et al., (2014): "Noise and Emissions Reduction by Second Injection in Diesel PCCI Combustion with Split Injection," In: *SAE Int. J. Engines* 7(4), doi:10.4271/2014-01-2676.
42. Gabrielsson Par L.T. (2004): Process for controlled addition of a reducing agent into nitrogen oxides containing exhaust gas. *Szabvány: US-5842341-A*
43. Gaff, T.T., (1913): "Explosion-engine", *Szabvány: US1059604A*
<http://www.google.com/patents/US1059604>
44. Gallo, Y., Li, Z., Richter, M., and Andersson, O., (2016): "Parameters Influencing Soot Oxidation Rates in an Optical Diesel Engine," In: *SAE Int. J. Engines* 9(4):2044-2055, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-2183>.
45. Giechaskiel, B.; Mamakos, A.; Woodburn, J.; Szczotka, A.; Bielaczyc, P. (2019): "Evaluation of a 10 nm Particle Number Portable Emissions Measurement System (PEMS)". In: *Sensors* 2019, 19, 5531p.
46. Giechaskiel, B.; Mamakos, A.; Woodburn, J.; Szczotka, A.; Bielaczyc, P. (2019): "Evaluation of a 10 nm Particle Number Portable Emissions Measurement System (PEMS)." In: *Sensors* 2019, 19, 5531

47. Giechaskiel, B.; Mamakos, A.; Andersson, J.; Dilara, P.; Martini, G.; Schindler, W.; Bergmann, A (2012): "Measurement of Automotive Nonvolatile Particle Number Emissions within the European Legislative Framework: A Review." In: *Aerosol Sci. Technol.* 2012, 46, 719–749p.,
48. Giechaskiel, B.; Melas, A. (2022): "Comparison of Particle Sizers and Counters with Soot-like, Salt, and Silver Particles." In: *Atmosphere* 2022, 13, 1675
49. Giechaskiel, B.; Melas, A.D.; Lähde, T.; Martini, G.(2020): "Non-Volatile Particle Number Emission Measurements with Catalytic Strippers: A Review" In: *Vehicles* 2020, 2, 342–364p
50. Giechaskiel, B.; Schwelberger, M.; Delacroix, C.; Marchetti, M.; Feijen, M.; Prieger, K.; Andersson, S.; Karlsson, H. (2018): "Experimental assessment of solid particle number Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) for heavy-duty vehicles applications" In: *Aerosol Sci.* 2018, 123, 161–170.p.
51. Gupta, M., Rafat, Y., and Alam, M., (2017): "Well to Wheel Cum Tailpipe Emission Analysis: ICE vs xEV," In: *SAE Technical Paper 2017-26-0107*, <https://doi.org/10.4271/2017-26-0107>.
52. Haldor Topsoe A/S.(2003): Process for the reduction of SCR NO_x emissions and apparatus therefore. *Szabvány: US-8062617-B2*.
53. Harrison, R.M.; MacKenzie, A.R.; Xu, H.; Alam, M.S.; Nikolova, I.; Zhong, J.; Singh, A.; Zeraati-Rezaei, S.; Stark, C.; Beddows, D.; et al. (2018): "Diesel exhaust nanoparticles and their behaviour in the atmosphere. In: *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2018, 474-492p
54. Hawker, P., et al., (1997): "Experience with a New Particulate Trap Technology in Europe", In: *SAE Technical Paper 970182*, [doi:10.4271/970182](https://doi.org/10.4271/970182)
55. Hawley, J.G., C.J. Brace and F.J. Wallace, (1998): "Combustion-Related Emissions in CI Engines", In: *"Handbook of Air Pollution..."*, Editor: E. Sher, Academic Press, Boston, 1998, 280-357p
56. Henry, C., D. Langenderfer, A. Yezerets, M. Ruth, H.-Y. Chen, H. Hess, M. Naseri, (2011): "Passive Catalytic Approach to Low Temperature NO_x Emission Abatement", In: *Directions in Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference, October 3-6, 2011 Detroit, MI, USA*, https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2011/tuesday/presentations/deer11_henry.pdf
57. Hilite Germany GmbH. (2012): SCR exhaust gas aftertreatment device. *Szabvány: US-8875502-B2*
58. Hirata, H., M. Kakinohaha, M. Ibe, (2015): "Exhaust gas purification system utilizing ozone", *Szabvány: US20150360177A1*
59. Huber, R., (1969): "Electromagnetic fuel-injection valve", *Szabvány: US3464627* <http://www.google.com/patents/US3464627>
60. Inagaki, K., Mizuta, J., Fuyuto, T., Hashizume, T. et al.,(2011): "Low Emissions and High-Efficiency Diesel Combustion Using Highly Dispersed Spray with Restricted In-Cylinder

- Swirl and Squish Flows,” In: *SAE Int. J. Engines* 4(1):2065-2079, doi:10.4271/2011-01-1393.
61. Ishizaki, K., M. Nakano, (2018): “Reduction of CO2 Emissions and Cost Analysis of Ultra-Low Viscosity Engine Oil”, In: *Lubricants*, 6(4), 102, doi:10.3390/lubricants6040102
 62. Jánosi, L., Kiss, P. (1988): Belsőégésű motorok nitrogénoxid kibocsátásának követése más motorjellemzőkből. *MTA-MÉM Agrár-Műszaki Bizottság kutatási és fejlesztési konferencia Gödöllő, Magyarország, MÉM Műszaki Intézet*, 34-36.p
 63. Jost, K., (1998): “New common-rail diesels power Alfa's 156”, In: *Automotive Engineering*, January 1998, 36-38p
 64. Kamguia Simeu, S. and Kim, N.,(2018): "Standard Driving Cycles Comparison (IEA) & Impacts on the Ownership Cost," In: *SAE Technical Paper 2018-01-0423*, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0423>.
 65. Kandlhofer, C. (2019): “. Particle number 10 vs. 23nm cut off comparison: Influence of Catalytic stripper” In *AVL List GmbH Headquarters, Graz, Austria, Személyes előadás 2020*.
 66. Kandlhofer, C.(2020): “Particle Number 10 vs. 23 nm Cut Off Comparison: Influence of Catalytic Stripper. In: *AVL List GmbH Headquarters, Graz, Austria, Személyes előadás*.
 67. Kangasluoma, J.; Attoui, M. (2019): “Review of sub-3 nm condensation particle counters, calibrations, and cluster generation methods.” In: *Aerosol Sci. Technol.* 2019, 53, 1277–1310.p.
 68. Kazushige O., (2006): A Study on performance of Performance of Particulate filters Using R-SiC Porous Materials for Diesel Vehicles. In: *Scientific textbook. 2.1 – 3.45 Hozzáférhető: Ibsiden Hungary*
 69. Keenan, M.,(2017): "Exhaust Emissions Control: 60 years of Innovation and Development," In: *SAE Technical Paper 2017-24-0120*, doi:10.4271/2017-24-0120.
 70. Keuper, A., Unger, H., Huang, J., Bressler, H. et al. (2011): Investigations to Achieve Highest Efficiencies in Exhaust Gas After-Treatment for Commercial Vehicles using an SCR System. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*.(2011) 145-155p.
 71. Key World Energy Statistics (2017): *International Energy Agency* <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>
 72. Khair, M.K., (1993): “Diesel Engine Technology”, In: *SAE Seminar ID#93014*
 73. Khan, M.Y.; Sharma, S.; Liew, C.M.; Joshi, A.; Barnes, D.; Scott, N.; Mensen, B.; Cao, T.; Li, Y.; Shimpi, S.A.; et al. (2018): “Comparison of Full Flow Dilution, Partial Flow Dilution, and Raw Exhaust Particle Number Measurements.” In: *Emiss. Control Sci. Technol.* 4, 103–112p
 74. Kim, H.Y.; Ge, J.C.; Choi, N.J. (2019): “Effects of Fuel Injection Pressure on Combustion and Emission Characteristics under Low Speed Conditions in a Diesel Engine Fueled with Palm Oil Biodiesel.” In: *Energies* 2019, 12, 3264. <https://doi.org/10.3390/en12173264>
 75. Knecht, W., (2004): “Some historical steps in the development of the common rail injection system”, In: *Trans. Newcomen Soc.*, 74, 89-107p, doi:10.1179/tns.2004.005

76. Krueger, U., Deuter, T., (2008): "Tech Crawl", In: *Behr GmbH, Stuttgart, Germany Personal communication 2008*
77. Krutzsch, B., et al., (1998): "Reduction of NO_x in Lean Exhaust by Selective NO_x-Recirculation (SNR-Technique). Part I: System and Decomposition Process", In: *SAE Technical Paper 982592*, [doi:10.4271/982592](https://doi.org/10.4271/982592)
78. Kuzuyama, H., Machida, M., Kawae, T., Tanaka, T. et al.,(2012): "High Efficiency and Clean Diesel Combustion Concept using Double Premixed Combustion: D-SPIA," In: *SAE Technical Paper 2012-01- 0906*, [doi:10.4271/2012-01-0906](https://doi.org/10.4271/2012-01-0906).
79. Man Nutzfahrzeuge Ag. (1993): Catalytic nitrogen oxide(s) redn. appts. for vehicles - comprises flow mixer urea evaporator hydrolysis catalyst, for exhaust gas treatment. *Szabvány: WO2009118195A1*
80. McKechnie, J., (1913): "Improvements in and relating to the injection of liquid fuel in internal combustion engines", *Szabvány: GB191224127A*
<https://patents.google.com/patent/GB191224127A/en>
81. Miyaki, M., et al., (1988): "Fuel injection system", *Szabvány: US4777921A*
<http://www.google.com/patents/US4777921>
82. Miyaki, M., et al., (1991): "Development of new electronically controlled fuel injection system ECD-U2 for diesel engines", In: *SAE Technical Paper 910252*, [doi:10.4271/910252](https://doi.org/10.4271/910252)
83. Miyamoto, N., et al., (1995): "Significant NO_x Reductions with Direct Water Injection into the Sub-Chamber of and IDI Diesel Engines", In: *SAE Technical Paper 950609*, [doi:10.4271/950609](https://doi.org/10.4271/950609)
84. Muthusamy, A., Shangar Ramani, V., Sinha, P.K., Giftson, J. et al. (2019): "Optimized In Cylinder NO_x Reduction Strategy for MeetingBSVI Emission Limits," In: *SAE Technical Paper 2019-26-0142*, [doi:10.4271/2019-26-0142](https://doi.org/10.4271/2019-26-0142).
85. Nada, Y., Komatsubara, Y., Pham, T., Yoshii, F. et al.,(2015): "Evaluation of NO_x Production Rate in Diesel Combustion Based on Measurement of Time Histories of NO_x Concentrations and Flame Temperature," In: *SAE Int. J. Engines* 8(1):303-313, <https://doi.org/10.4271/2014-32-0133>.
86. Naseri, M., Aydin, C., Mulla, S., Conway, R. et al., (2015): "Development of Emission Control Systems to Enable High NO_x Conversion on Heavy Duty Diesel Engines", In: *SAE Technical Paper 2015-01-0992*, [doi:10.4271/2015-01-0992](https://doi.org/10.4271/2015-01-0992)
87. Needham, J., (1991): "Engine Experience and EPA Regulations", In: *University of Minnesota Short Course "Diesel Particulate Matter", October 1991*
88. O'Connor J, Musculus M. (2014): "Effects of exhaust gas recirculation and load on soot in a heavy-duty optical diesel engine with close-coupled post injections for high-efficiency combustion phasing." In: *International Journal of Engine Research*. 2014;15(4):421-443p [doi:10.1177/1468087413488767](https://doi.org/10.1177/1468087413488767)
89. Pamminger, M.; Wang, B.; Hall, C.M.; Vojtech, R.; Wallner, T. (2020): "The impact of water injection and exhaust gas recirculation on combustion and emissions in a heavy duty compression ignition engine operated on diesel and gasoline" In *Int. J. Engine Res.* 2020, 21, 1555–1573p

90. Pantow, E., et al., (2001): "Impact of US02 and Euro4 emission legislation on power train cooling challenges and solutions for heavy duty trucks", In: *SAE Technical Paper 2001-01-1716*, [doi:10.4271/2001-01-1716](https://doi.org/10.4271/2001-01-1716)
91. Peng, Y.; Nix, A.; Li, H.; Johnson, D.; Heltzel, R.(2017): "Derivation of a Representative Engine Duty Cycle from on-Road Heavy-Duty Vehicle Driving Data" In: *J. Transp. Technol.* 2017, 7, 376–389p
92. Petruzzelli, A.M., (2013): "A Story of Breakthrough: The Case of Common Rail Development", In: *35th DRUID Celebration Conference 2013, Barcelona, Spain, June 17-19*, [doi:10.1142/S1363919615500346](https://doi.org/10.1142/S1363919615500346)
93. Piqueras, P.; Morena, J.D.I.; Sanchis, E.J.; Pitarch, R.(2020): "Impact of Exhaust Gas Recirculation on Gaseous Emissions of Turbocharged Spark-Ignition Engines" In: *Appl. Sci.* 2020, 10, 7634. <https://doi.org/10.3390/app10217634>
94. Robert Bosch GmbH. (2010): Procedure for checking the functionality of a metering valve of a NOx-reduction system of a combustion engine. *Szabvány: US20090192732A1*
95. Robert Bosch GmbH. (2015): Vehicle SCR system and its reducing agent supplying device. *Szabvány: WO2009089936A1*
96. Ropke, S., G.W. Schweimer and T.S. Strauss, (1995): "NOx Formation in Diesel Engines for Various Fuels and Intake Gases", In: *SAE Technical Paper 950213*, [doi:10.4271/950213](https://doi.org/10.4271/950213)
97. Russell, A., Epling, W.S., (2011): "Diesel Oxidation Catalysts", In: *Cat. Rev. - Sci. Eng.*, 53(4), 337-423; [doi:10.1080/01614940.2011.596429](https://doi.org/10.1080/01614940.2011.596429)
98. Seher, D., Reichelt, M., and Wickert, S., (2003): Control Strategy for NOx - Emission Reduction with SCR. In: *SAE Technical Paper 2003-01-3362*, <https://doi.org/10.4271/2003-01-3362>.
99. Senecal, P. K. and Reitz, R. D.,(2000): "Optimization of Diesel Engine Emissions and Fuel Efficiency using Genetic Algorithms and Computational Fluid Dynamics", In: *Eighth ICLASS, Pasadena, CA., July 2000*.
100. Senecal, P. K., Pomraning, E. and Richards, K. J.,(2002): "Multi-Mode Genetic Algorithm Optimization of Combustion Chamber Geometry for Low Emissions", In: *SAE Technical Paper 2002-01-0958*,
101. Shrivastav, R., Hessel, R. and Reitz, R. D., (2002): "CFD Optimization of DI Diesel Engine Performance and Emissions Using Variable Intake Valve Actuation with Boost Pressure, EGR and Multiple Injections", In: *SAE Technical Paper 2002-01-0959*
102. Siebers, D.L., (1998): "Liquid-phase penetration in diesel sprays", In: *SAE Technical Paper 980809*, [doi:10.4271/980809](https://doi.org/10.4271/980809)
103. Stumpp, G., Ricco, M., (1996): "Common rail, an attractive fuel injection system for passenger car DI diesel engines", In: *SAE Technical Paper 960870*, [doi:10.4271/960870](https://doi.org/10.4271/960870)
104. Szöllösi D.; Kiss P.:(2023): "Effects of humidity on the emissions of the diesel engines" In: *Proceedings of the 16th European-African Regional Conference of the ISTVS Hanover (NH), US: International Society for Terrain-Vehicle Systems (2023) Paper: 4816*

105. Szöllősi, D., Bíró, N., Kiss, P., (2020): A dízel részecskeszűrő (DPF) koromszűrési hatékonyságának megállapítása. In: *Mezőgazdasági Technika 2020. szeptember : LXI. évfolyam* 2-5.p
106. Theis, J., Lambert, C., (2017): "The Effects of CO, C₂H₄, and H₂O on the NO_x Storage Performance of Low Temperature NO_x Adsorbers for Diesel Applications", In: *SAE Technical Paper 2017-01-0942*, [doi:10.4271/2017-01-0942](https://doi.org/10.4271/2017-01-0942)
107. UNECE 85.GRPE (2022) . "Emissions of compression ignition and positive ignition (LPG and CNG) engines" *Informal document GRPE-85-28*:
<https://unece.org/sites/default/files/2021-12/GRPE-85-28e.pdf>
108. Verbeek, R., et al., (2001): "DAF Euro-4 heavy-duty diesel engine with TNO EGR system and CRT particulate filter" In: *SAE Technical Paper 2001-01-1947*, [doi:10.4271/2001-01-1947](https://doi.org/10.4271/2001-01-1947)
109. Wade, W.R., et al., (1981) : "Diesel particulate trap regeneration techniques", In: *SAE Technical Paper 810118*, [doi:10.4271/810118](https://doi.org/10.4271/810118)
110. Walker, B., Kennedy, H.E., (1933): "Magnetic valve", *Szabvány: US1892917A*
<http://www.google.com/patents/US1892917>
111. Wall, J.C., (1997): "Heavy-Duty Diesel Manufacturers Perspective on the Viability of Diesel as the Powerplant For PNGV", In: *Presentation at the Sixth Technical Symposium, Partnership For a New Generation of Vehicles, U.S. DOE, July 23, 1997*
112. Williams, D.L., (1982): "Electromagnetic diesel fuel injector", *Szabvány: US4360163A*
<http://www.google.com/patents/US4360163>
113. Woodburn, J., Bielaczyc, P., Pielecha, J., Merkisz, J. et al., (2021): "Exhaust Emissions from Two Euro 6d-Compliant Plug-In Hybrid Vehicles: Laboratory and On-Road Testing," In: *SAE Technical Paper 2021-01-0605*, <https://doi.org/10.4271/2021-01-0605>.
114. Yin, Sheng, Jimin Ni, Houchuan Fan, Xiuyong Shi, and Rong Huang. (2022): "A Study of Evaluation Method for Turbocharger Turbine Based on Joint Operation Curve" In: *Sustainability* 14, no. 16: 9952. <https://doi.org/10.3390/su14169952>
115. Yu, C.; Zhang, W.; Xue, X.; Lou, J.; Lao, G. (2021): "Analysis of Water-Cooled Intercooler Thermal Characteristics." In: *Energies* 2021, 14, 8332p <https://doi.org/10.3390/en14248332>
116. Zheng, G., Wang, F., Zhang, S., Zhang, J. et al. (2014): Development of Compact SCR Systems with Closely Coupled Injector Configurations In: *SAE Technical Paper 2014-01-1546*, <https://doi.org/10.4271/2014-01-1546>.

9.1. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

9.1.1. 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**

9.1.2. 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.

9.1.3. 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

9.1.4. 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

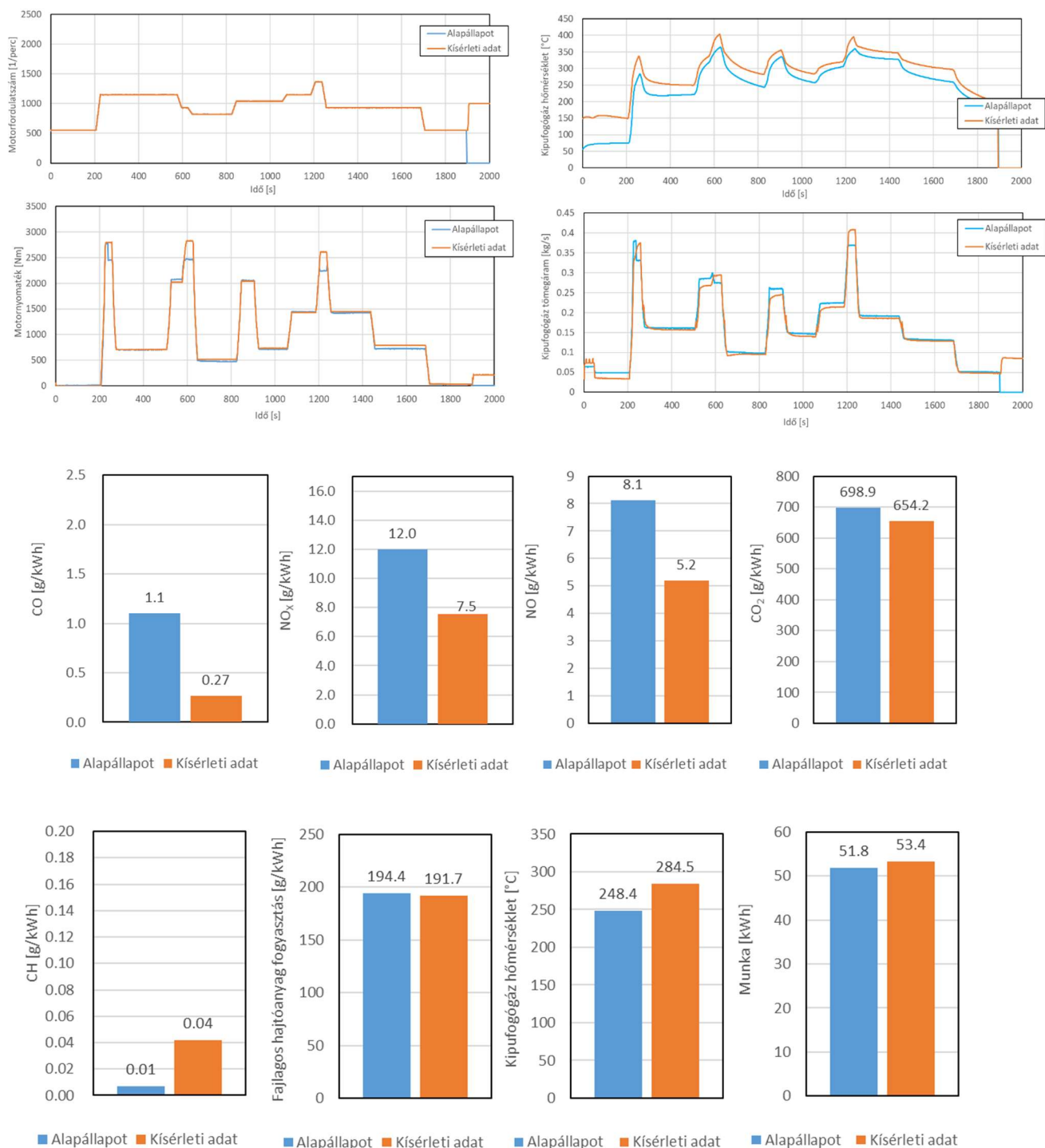
9.1.5. Hivatkozások

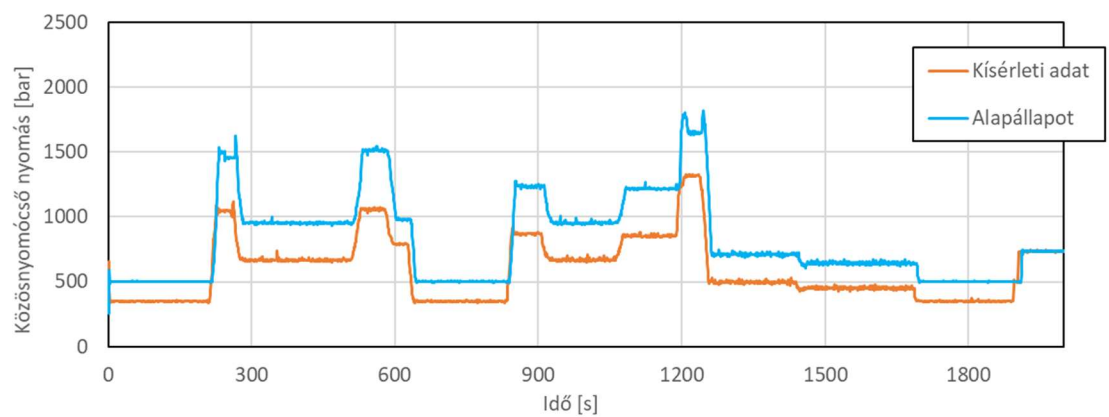
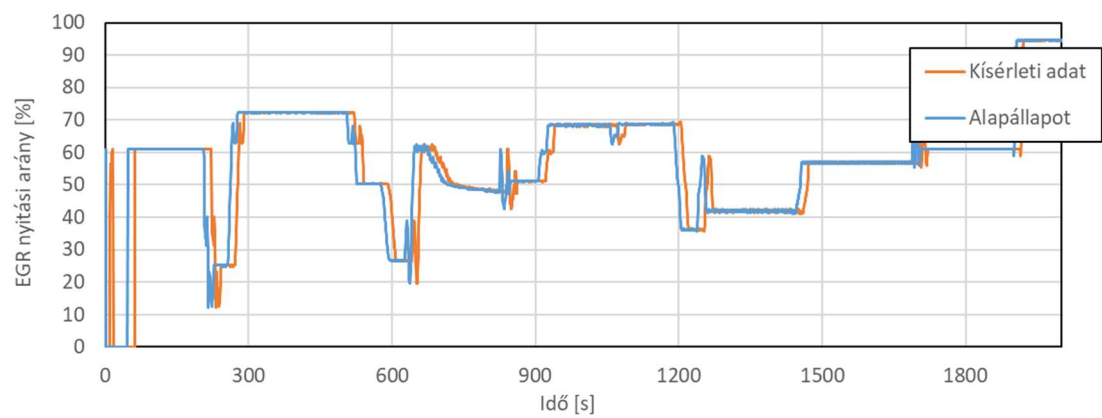
14. Milojević, S.; Glišović, J.; Savić, S.; Bošković, G.; Bukvić, M.; Stojanović, B. Particulate Matter Emission and Air Pollution Reduction by Applying Variable Systems in Tribologically Optimized Diesel Engines for Vehicles in Road Traffic. Atmosphere 2024, 15, 184. **(Hivatkozás a 7. számú publikációmra)**
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 publikációmra)**
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)**

10. MELLÉKLETEK

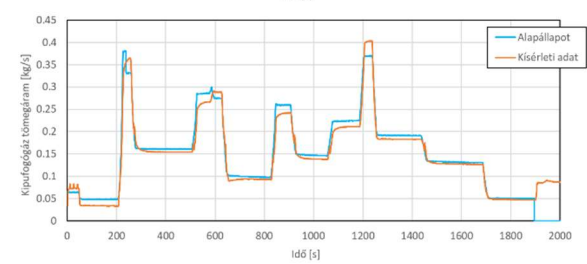
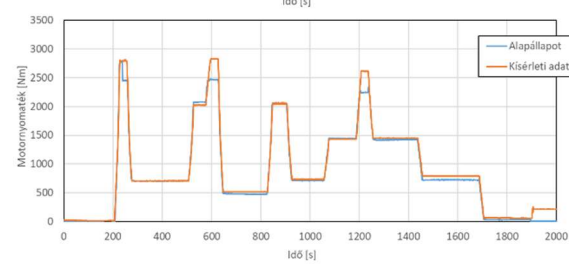
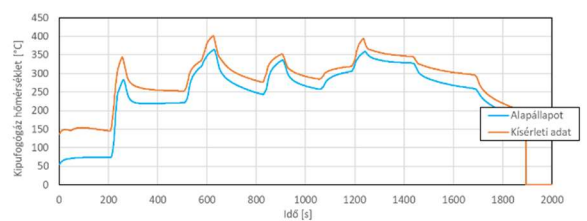
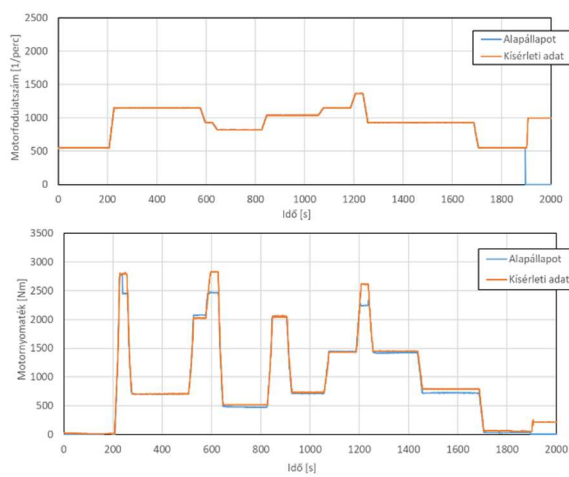
M1. Kísérlet kiértékelési diagramok

303

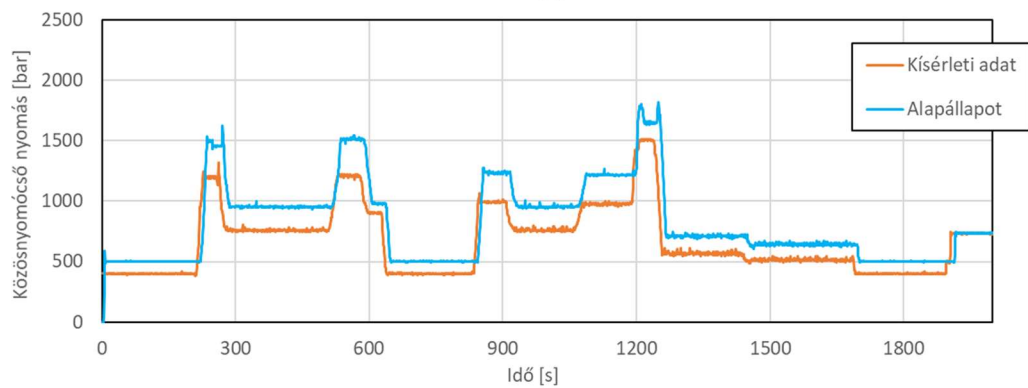
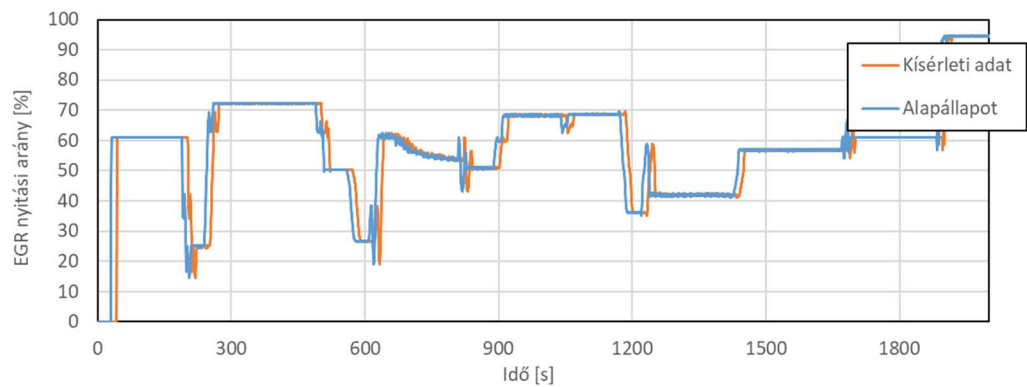
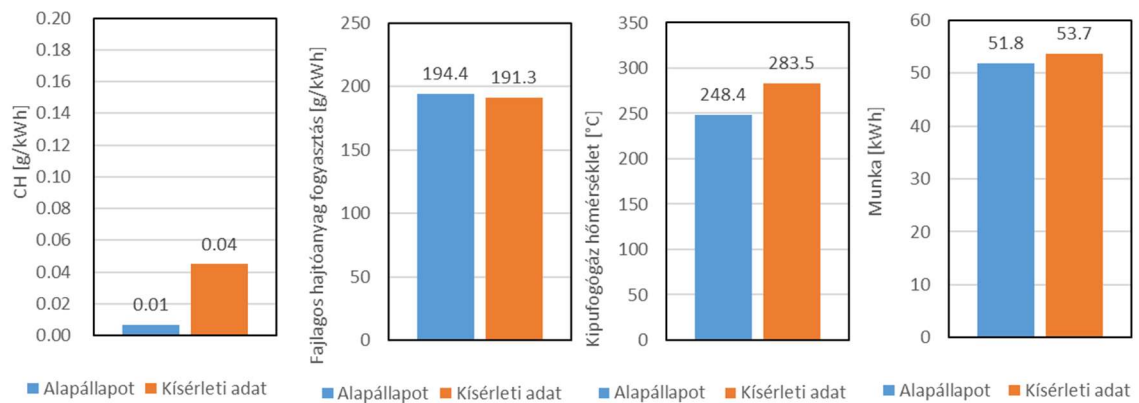
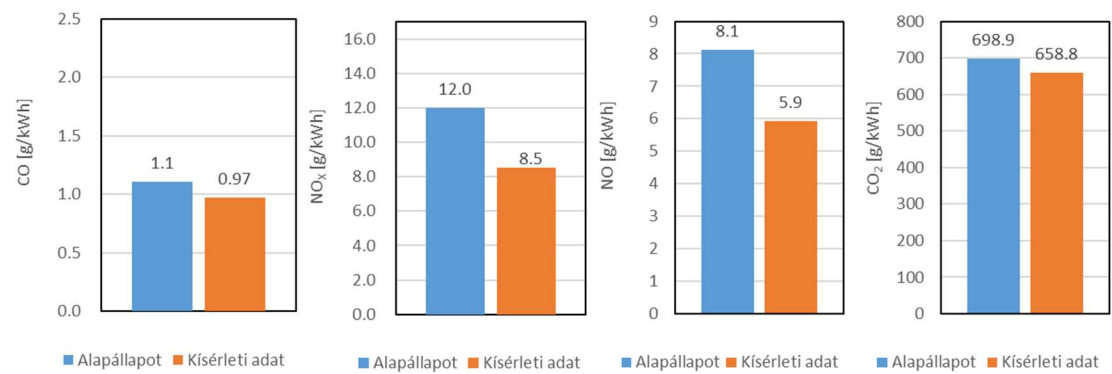


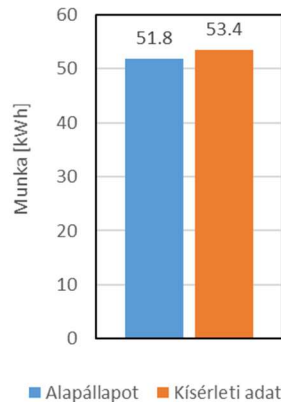
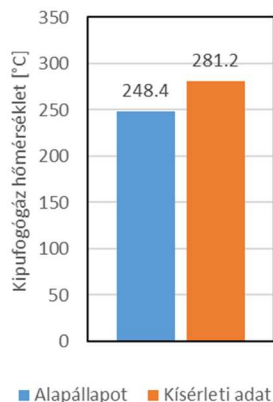
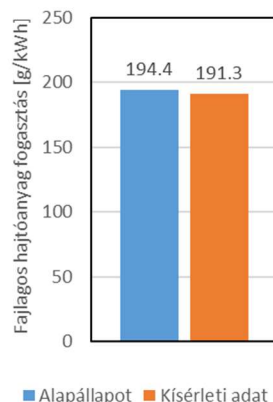
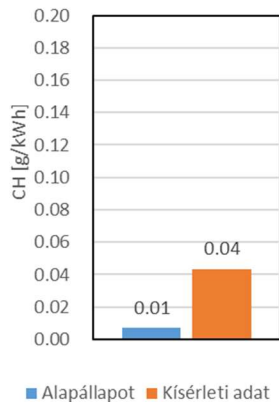
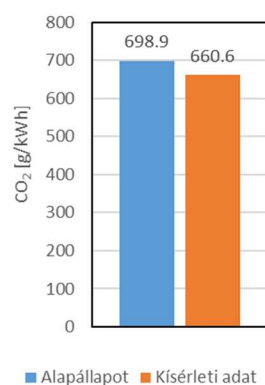
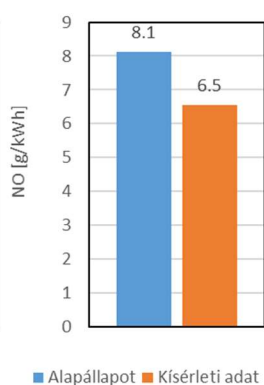
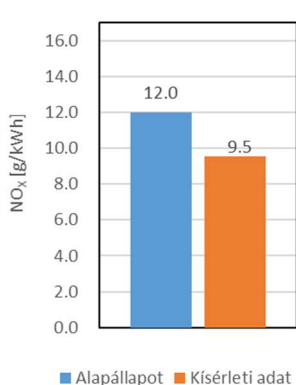
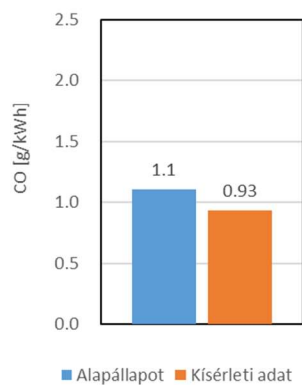
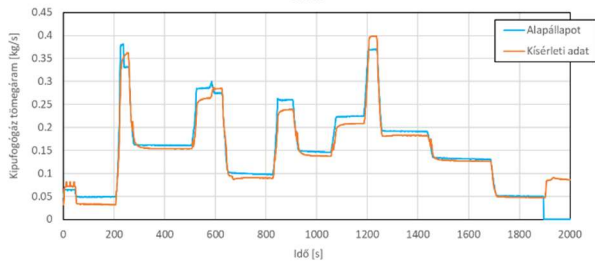
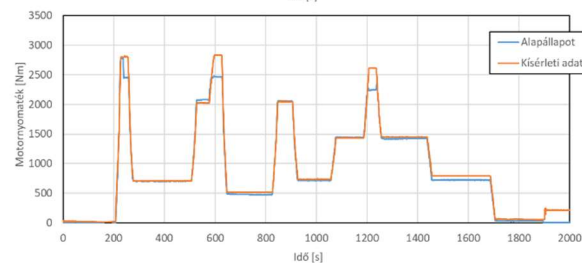
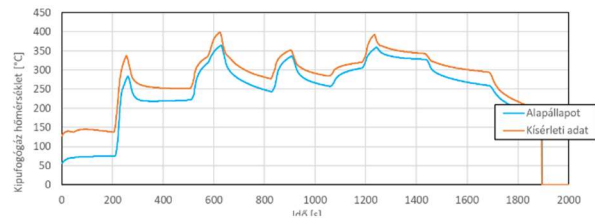
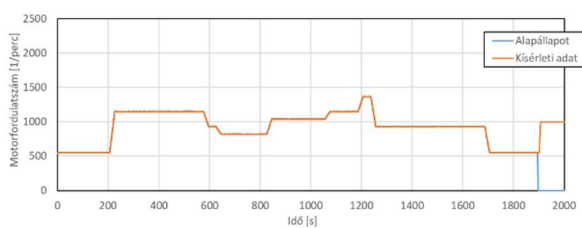


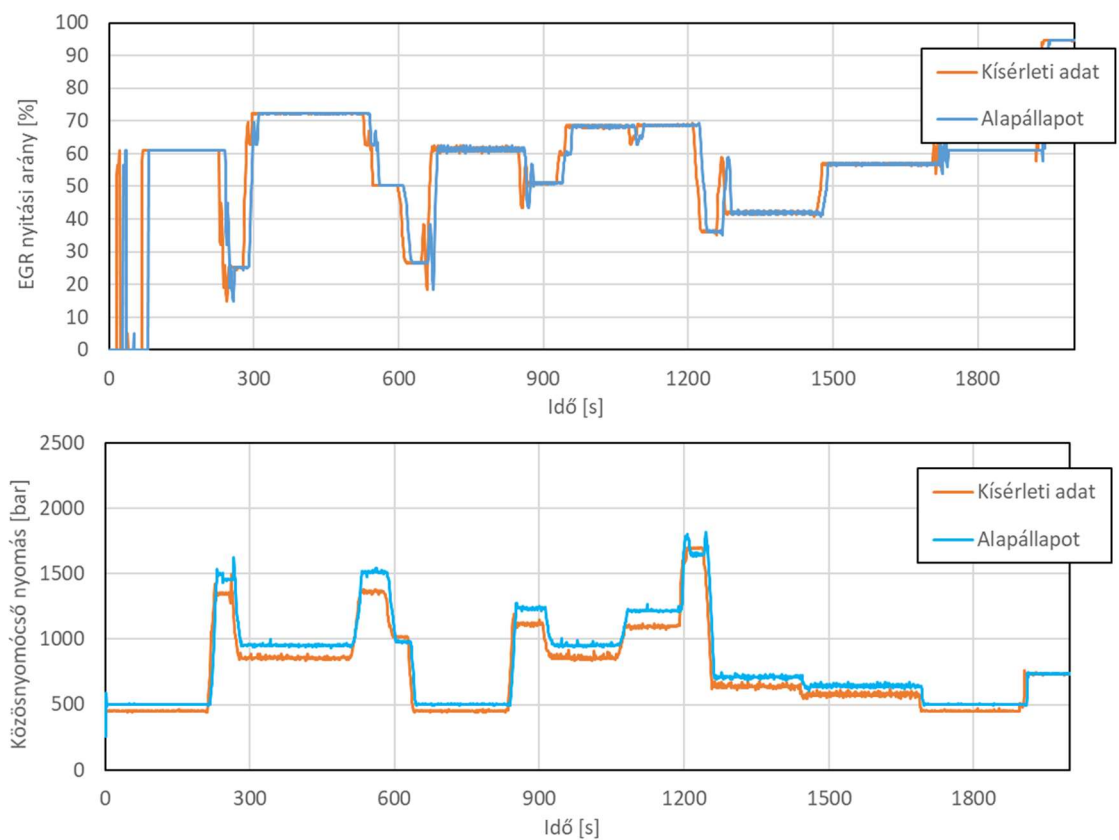
403



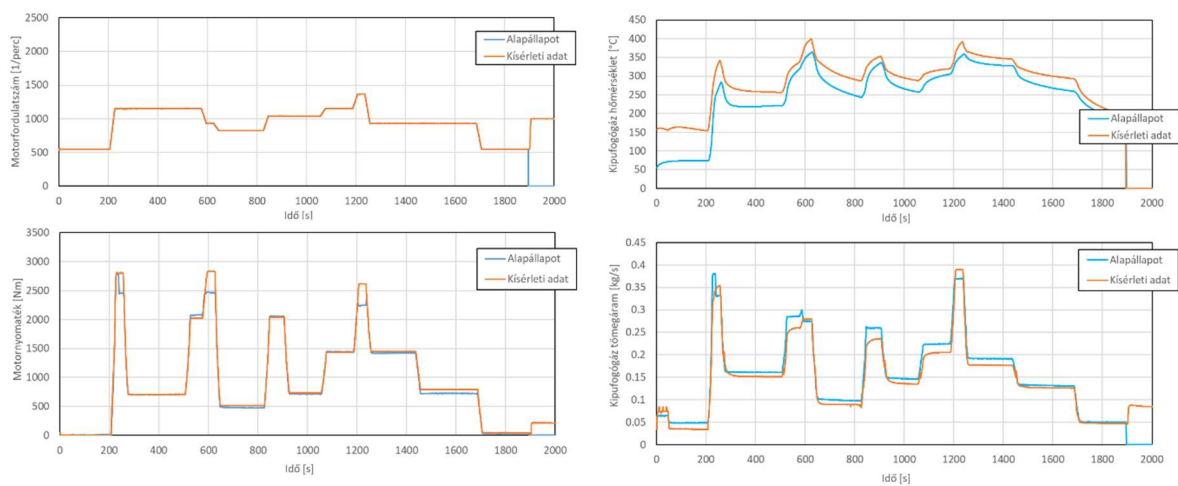
131

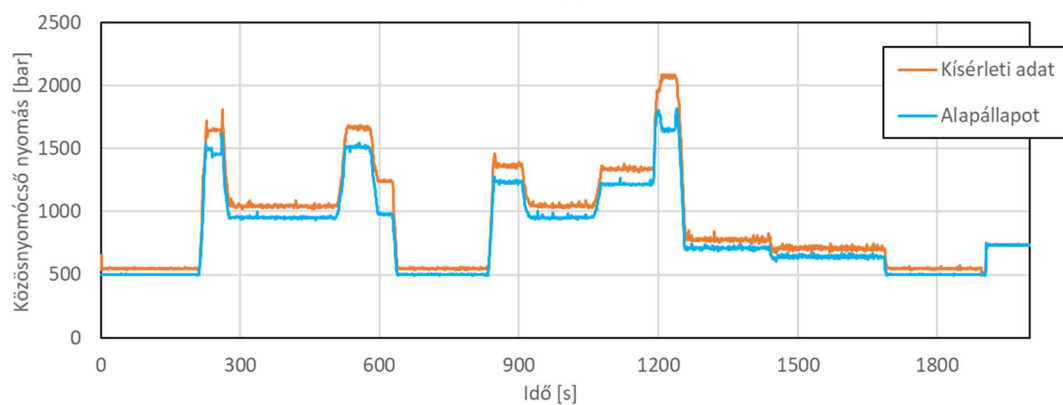
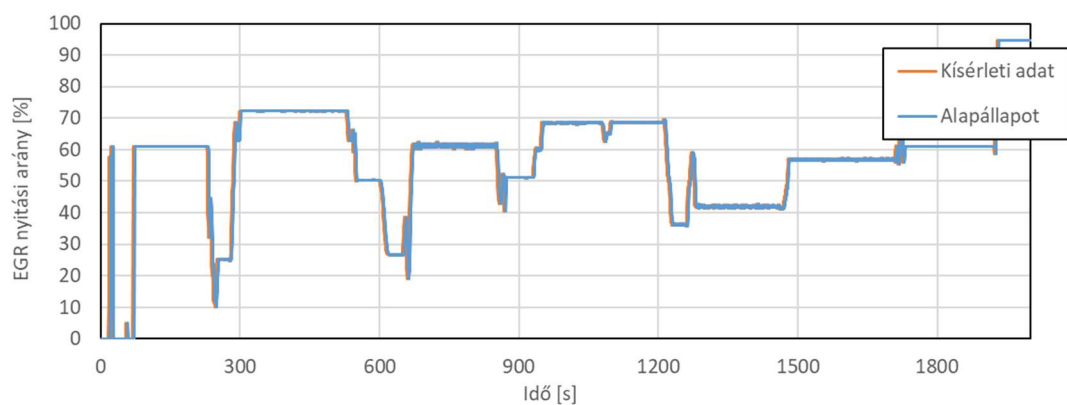
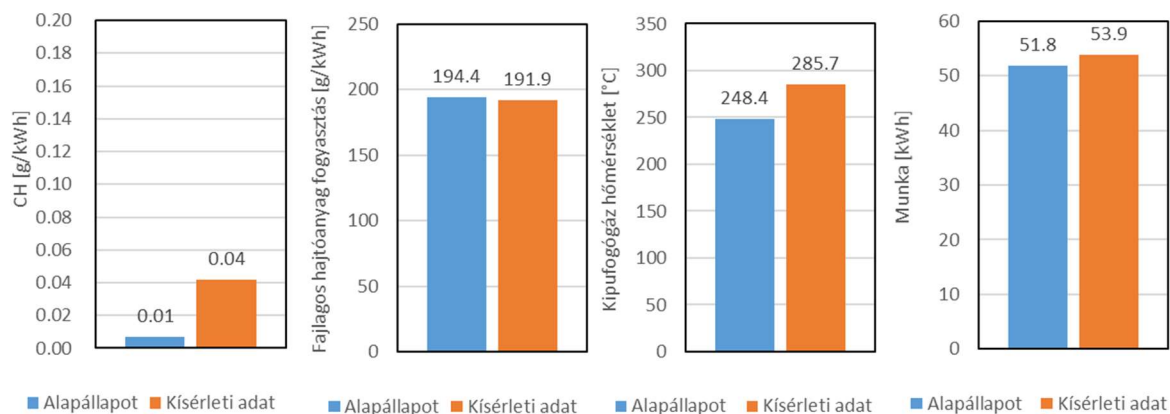
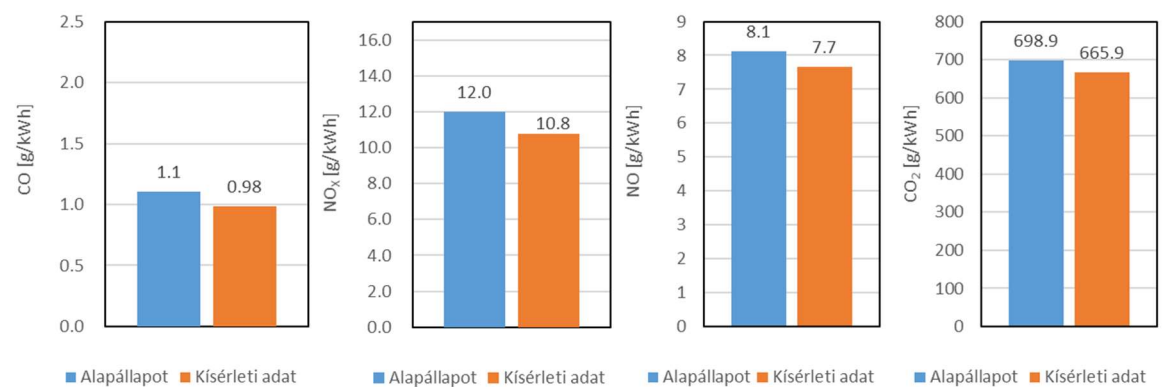


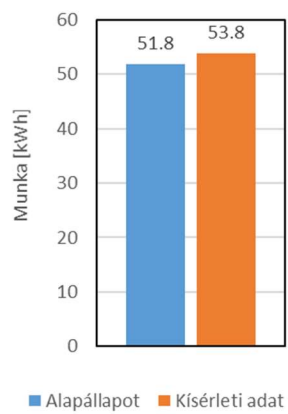
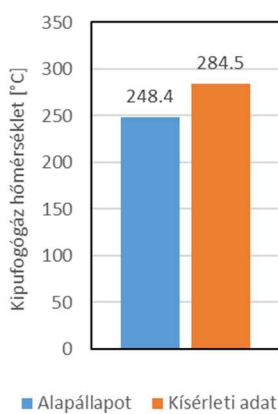
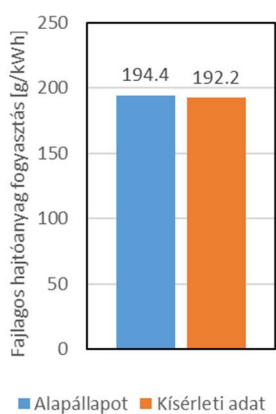
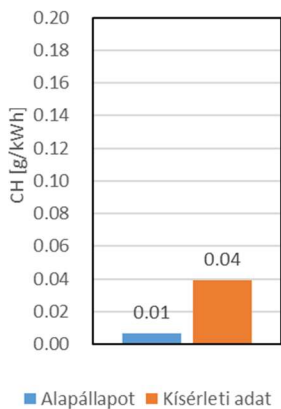
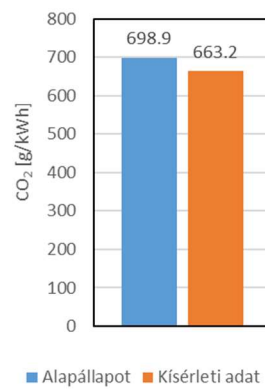
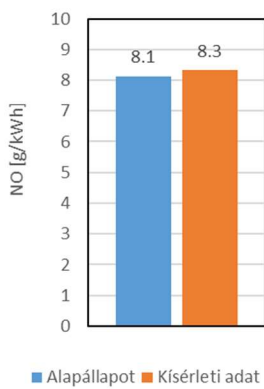
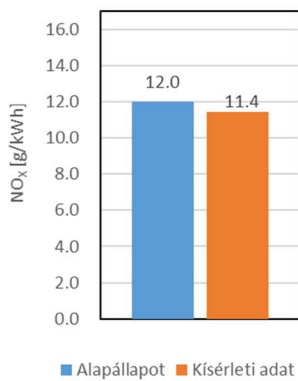
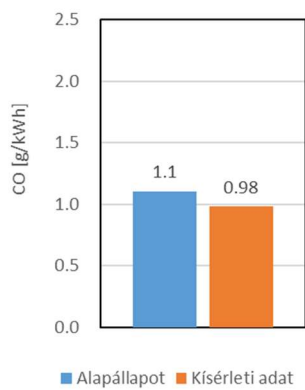
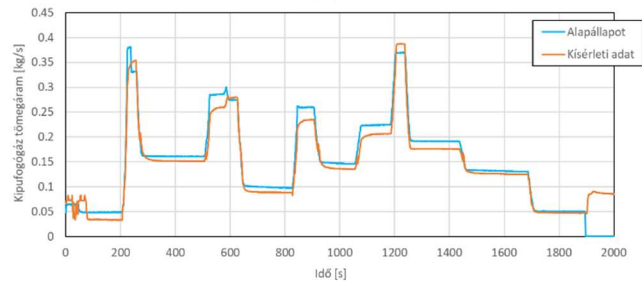
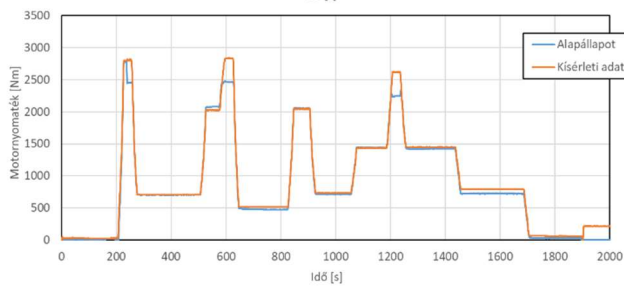
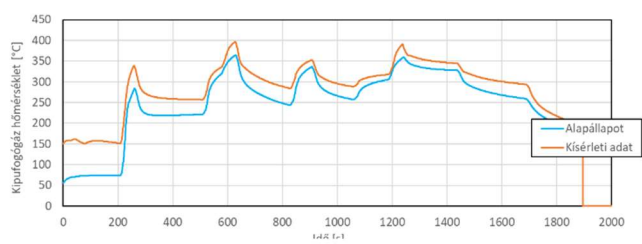
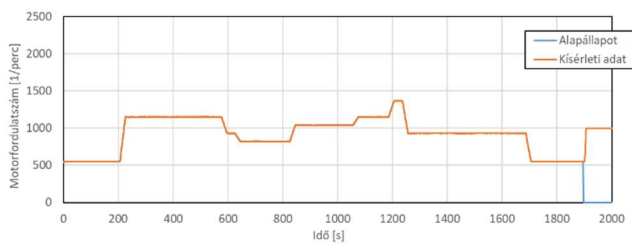


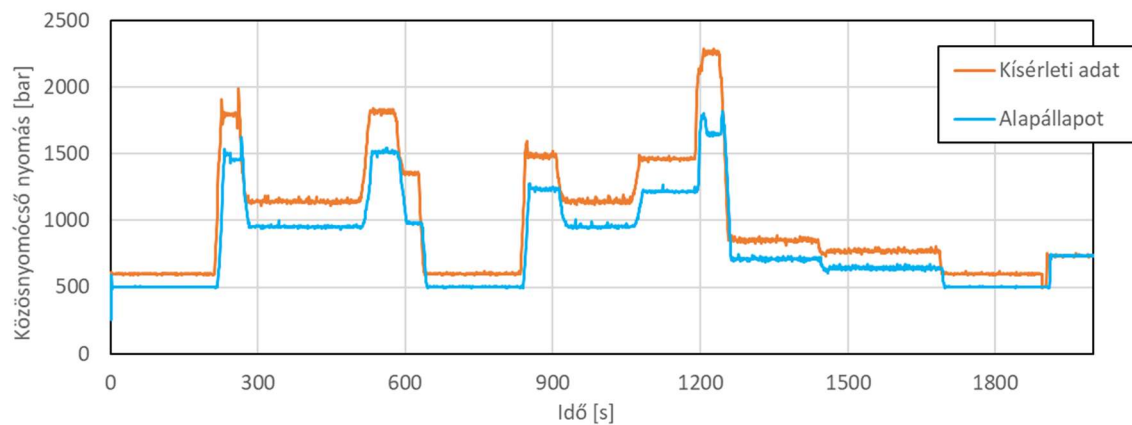
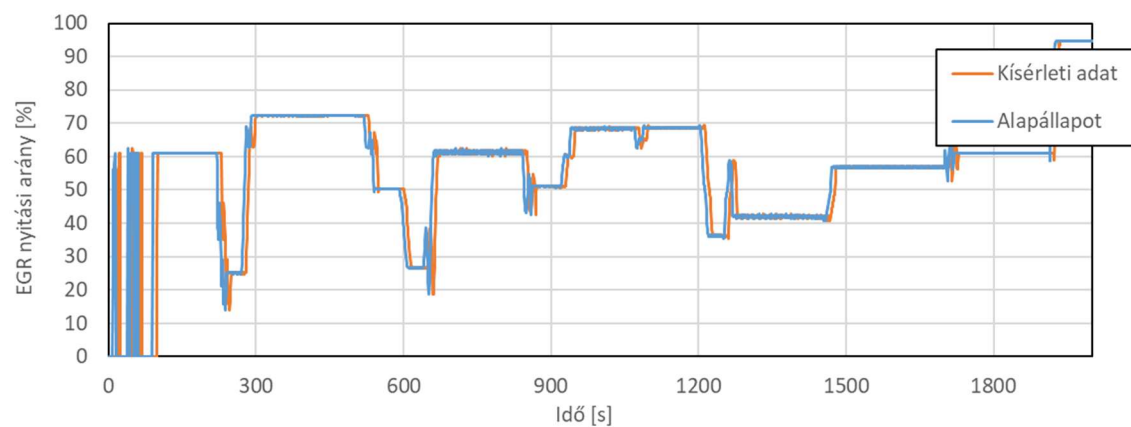


603

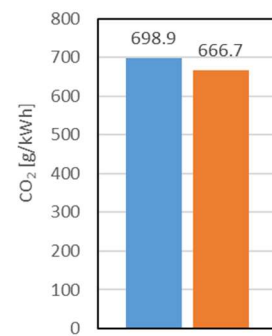
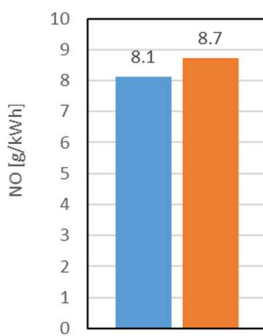
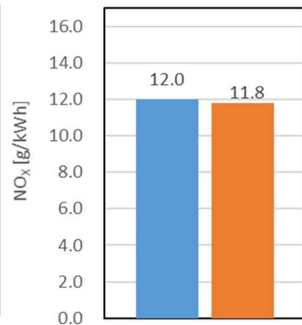
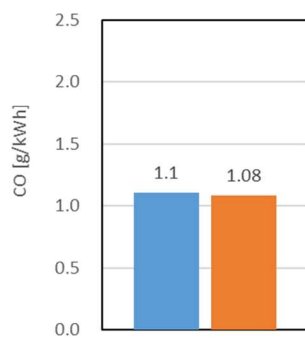
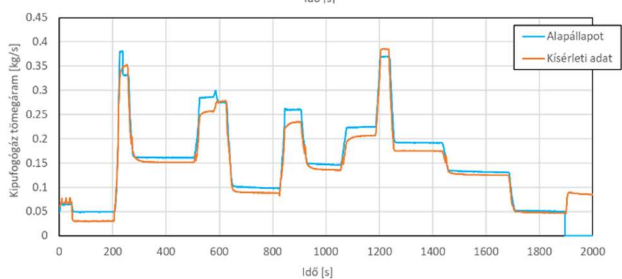
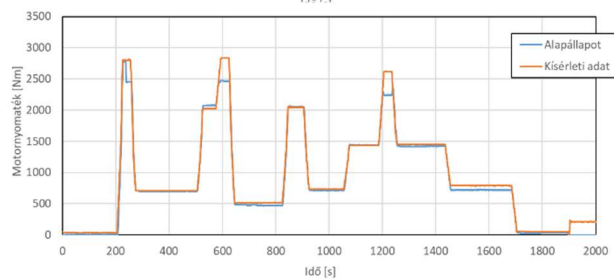
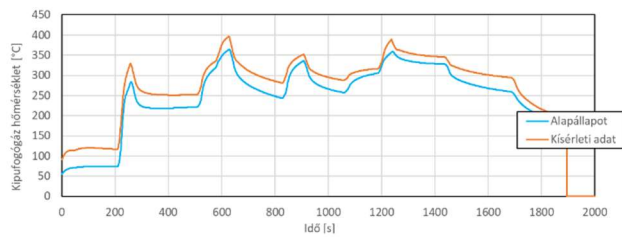
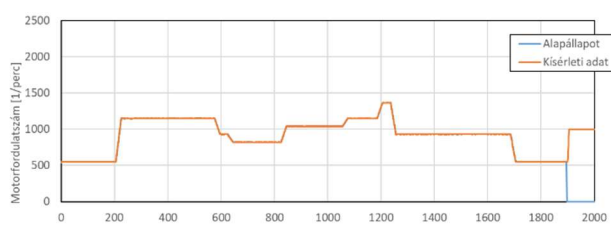








803

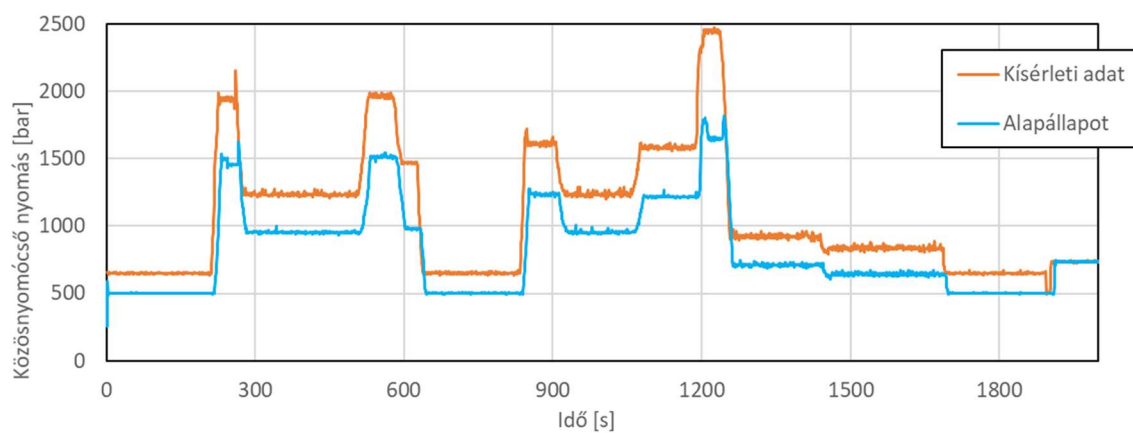
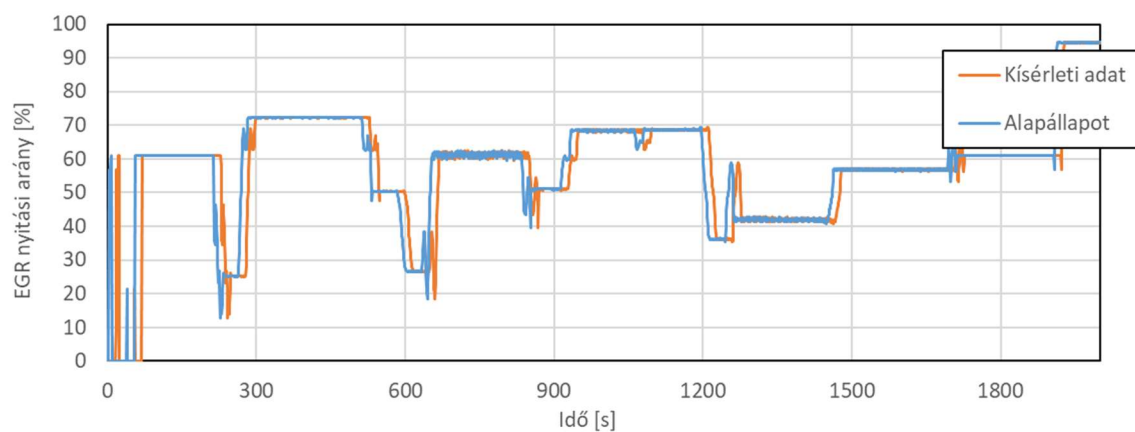
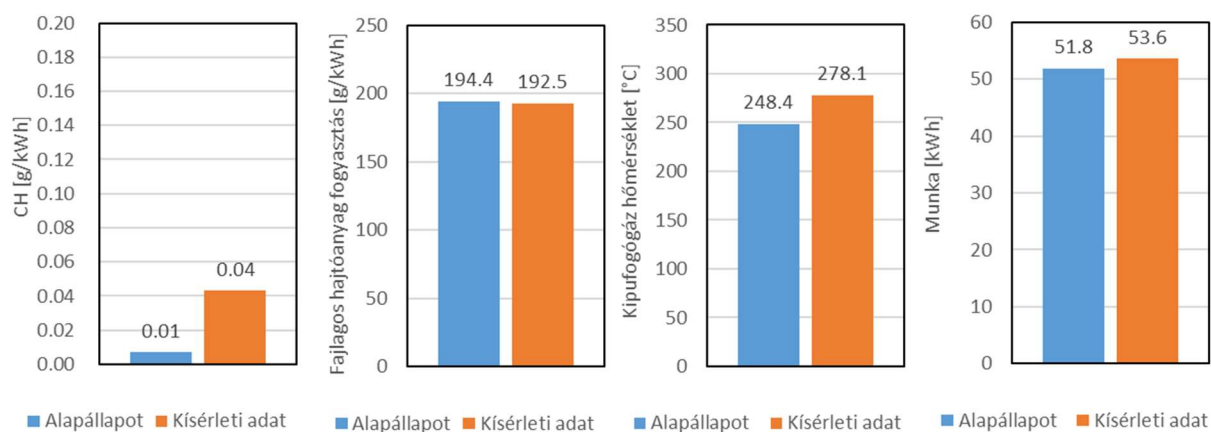


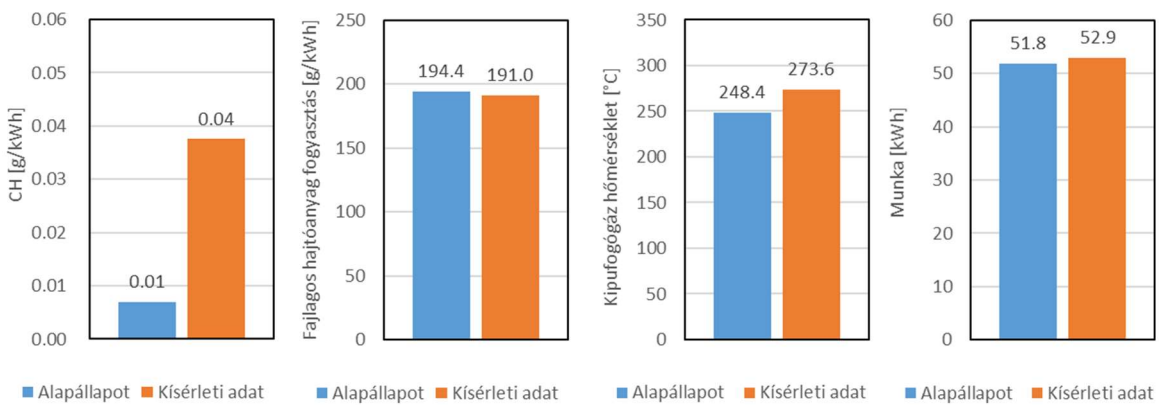
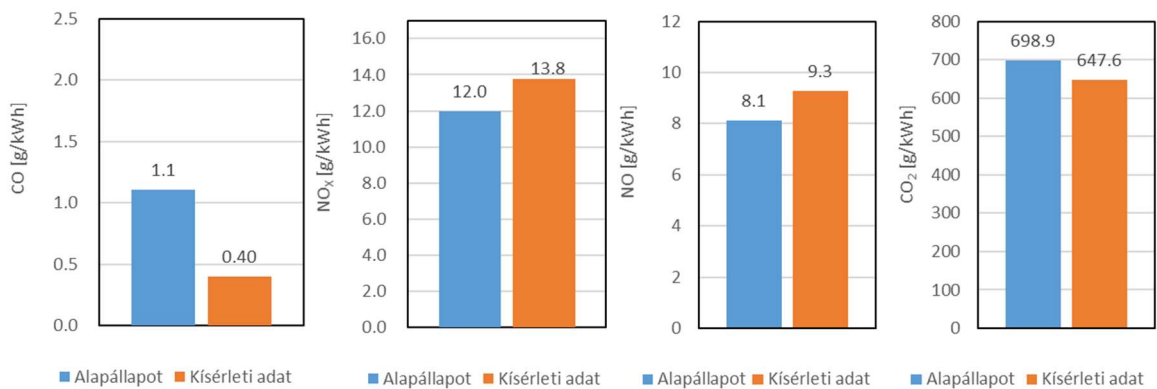
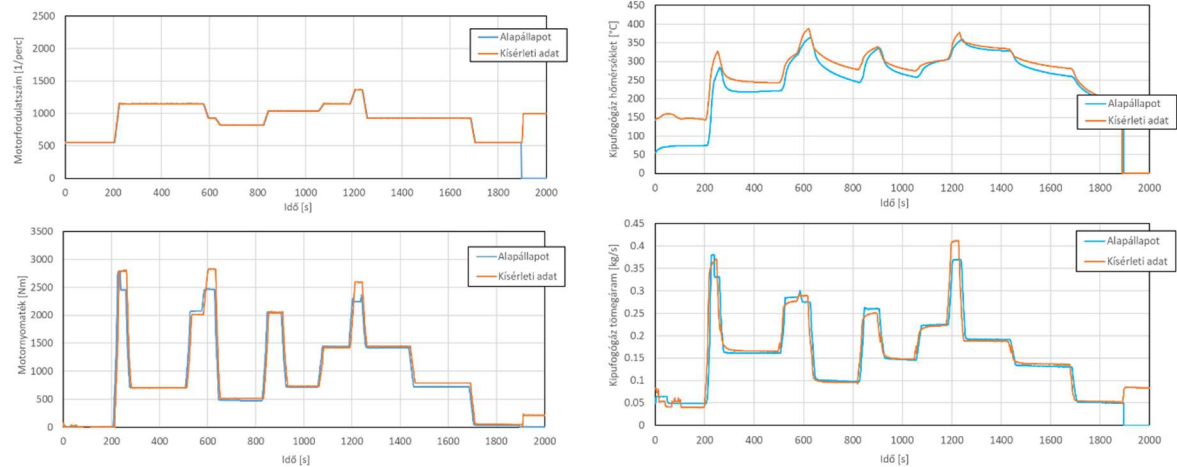
Alapállapot Kísérleti adat

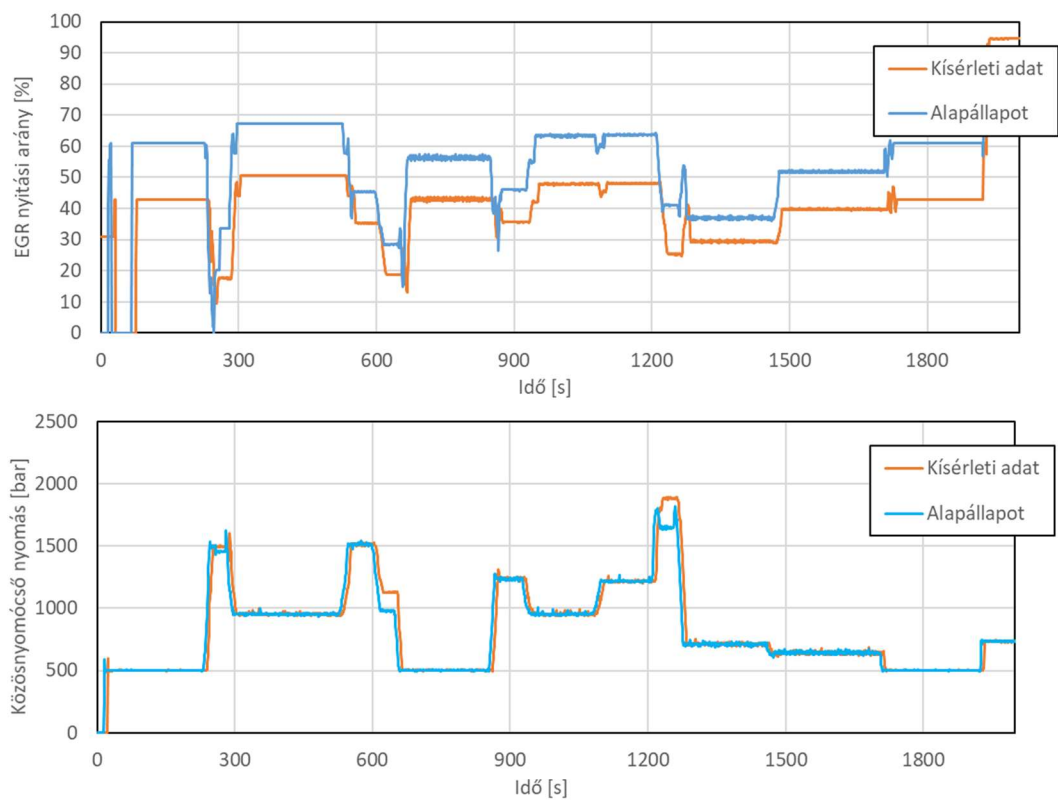
Alapállapot Kísérleti adat

Alapállapot Kísérleti adat

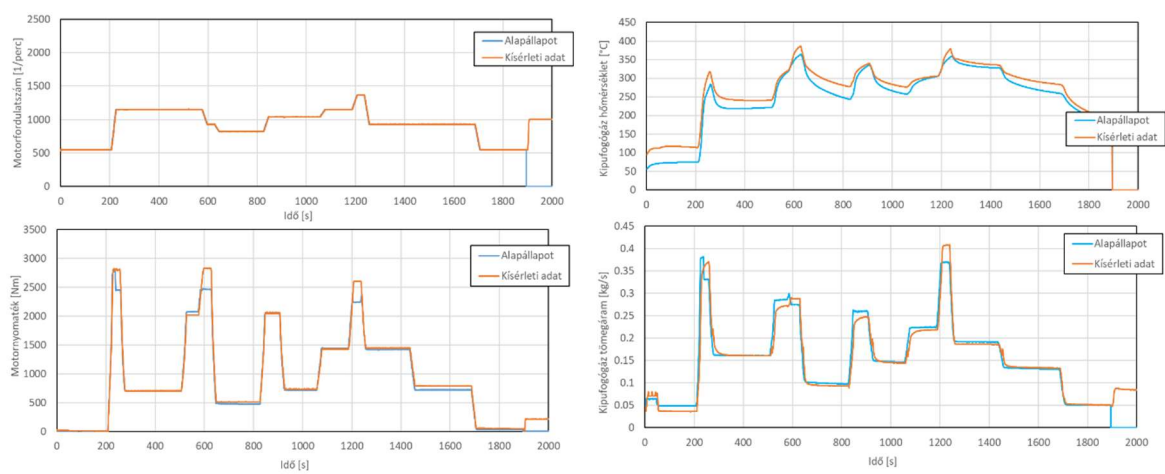
Alapállapot Kísérleti adat

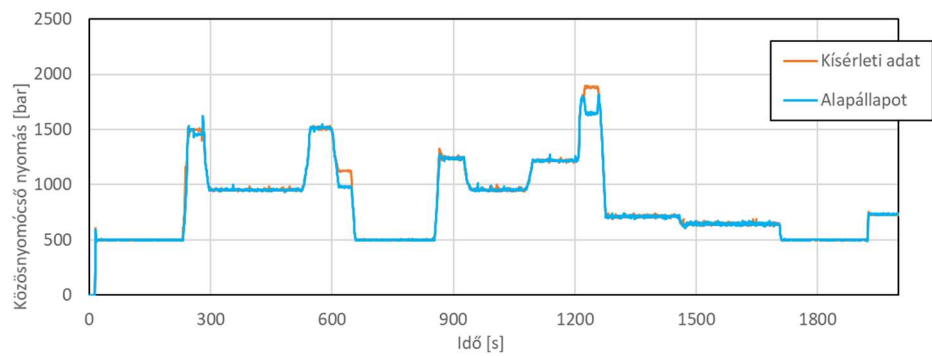
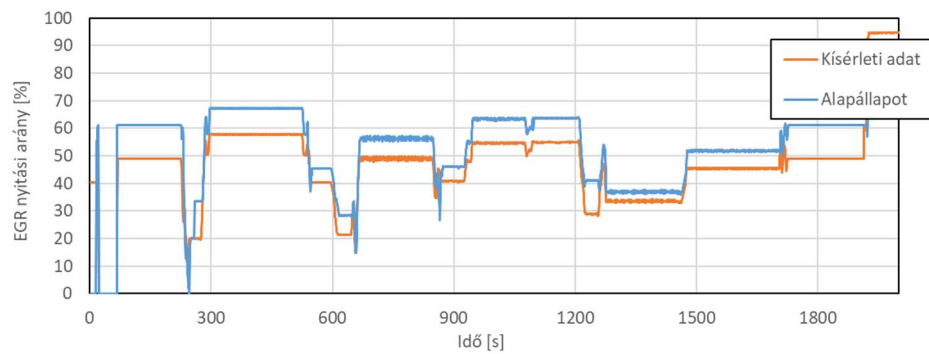
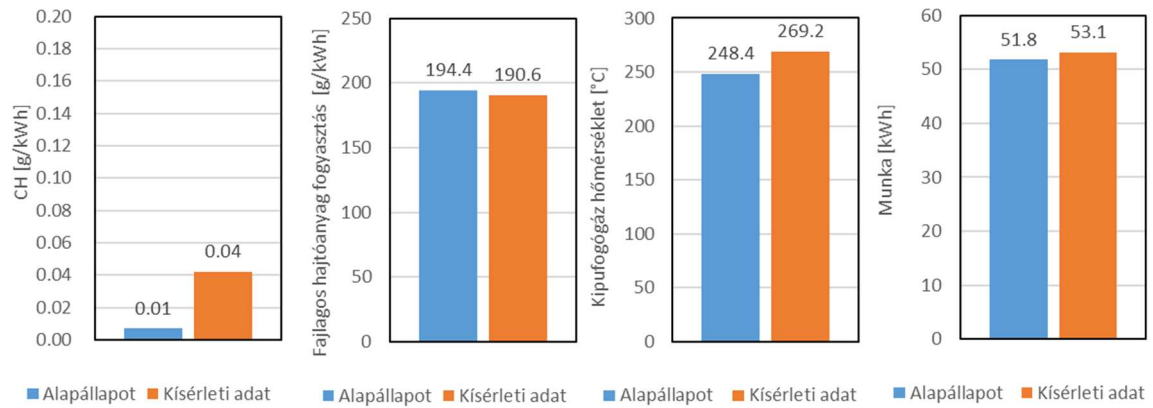
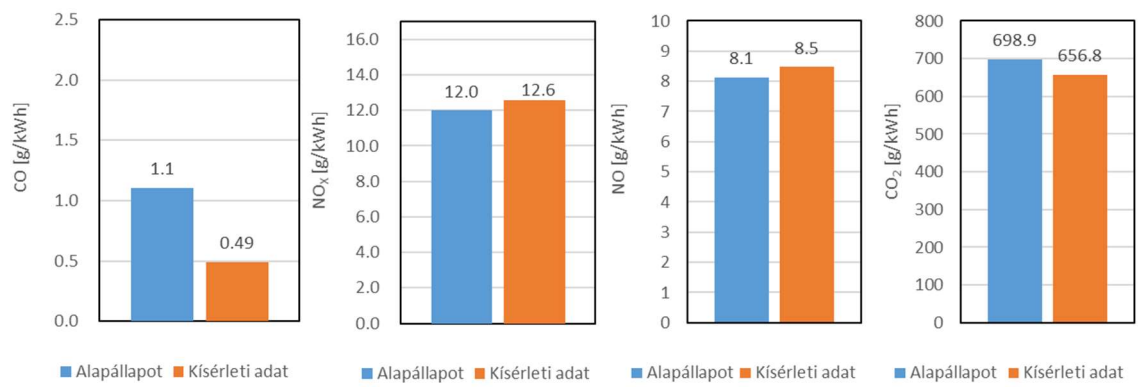


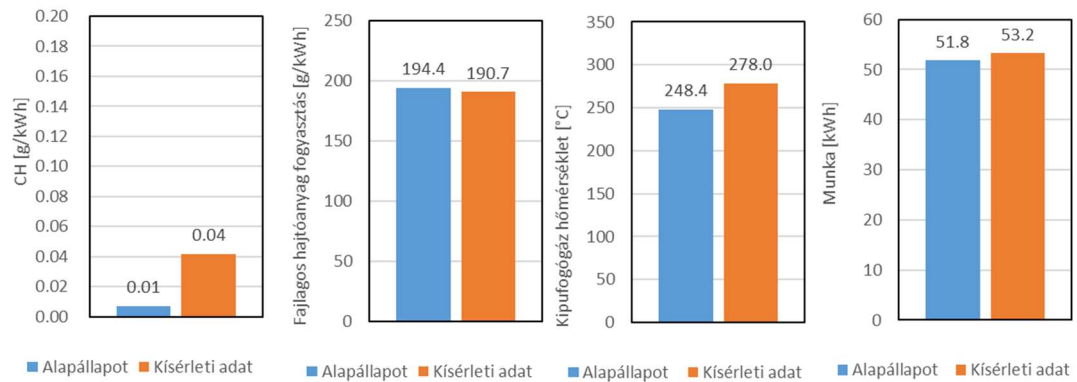
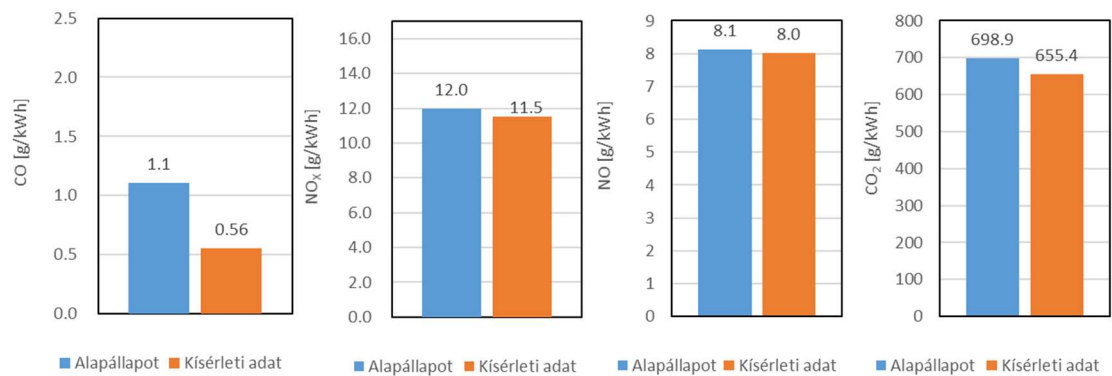
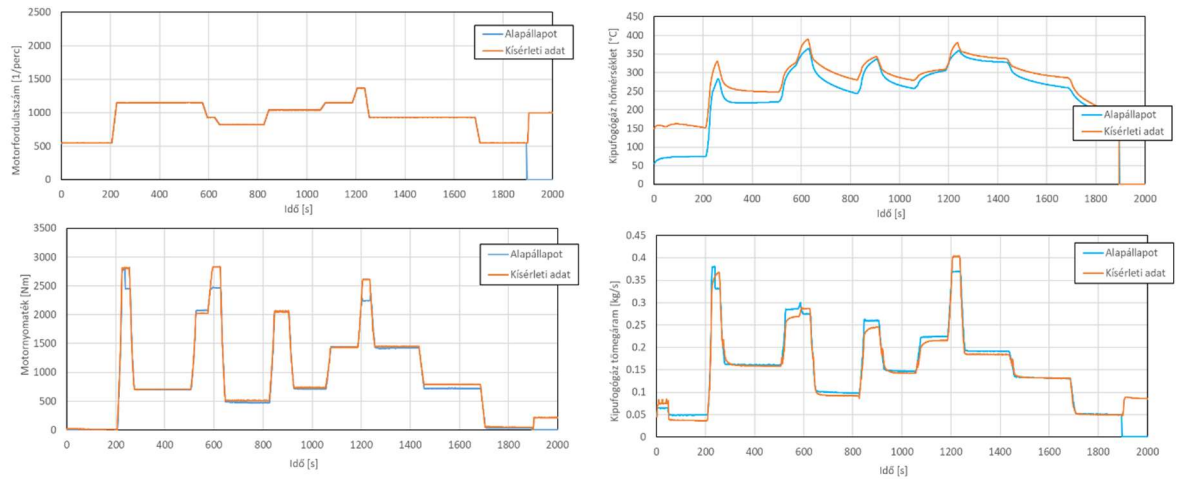


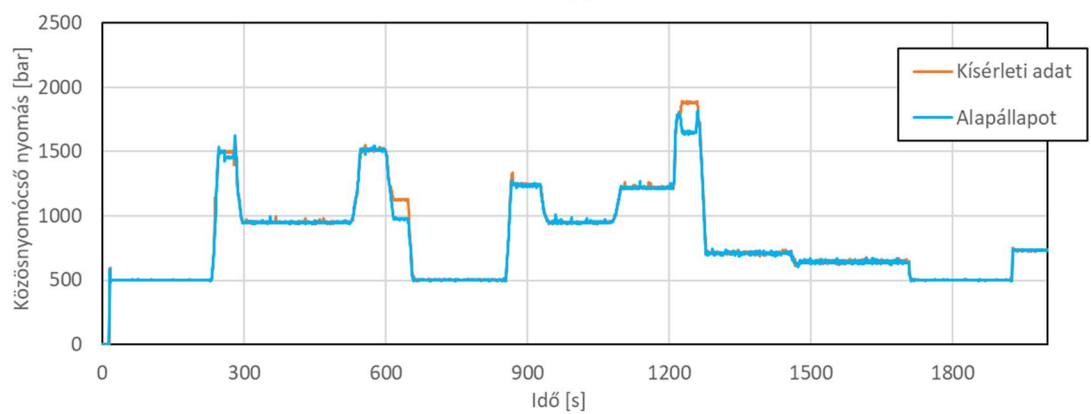
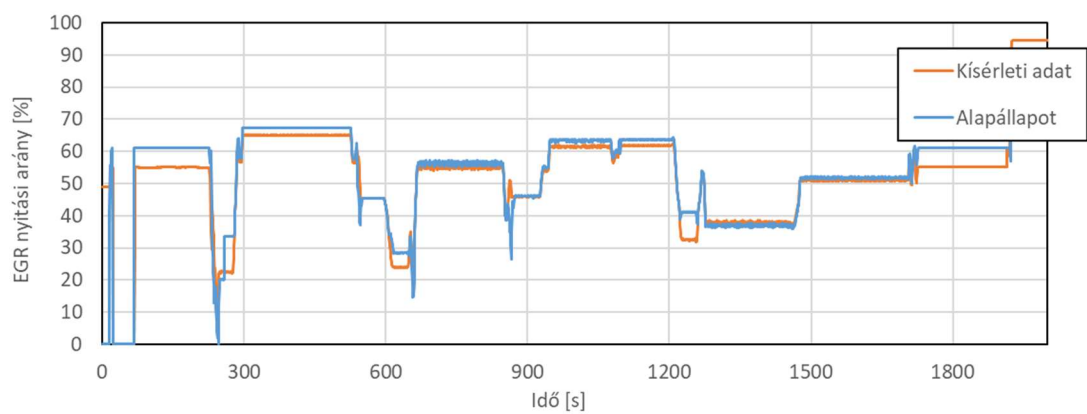


401

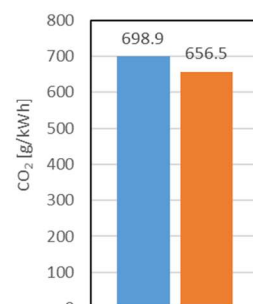
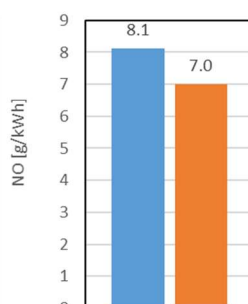
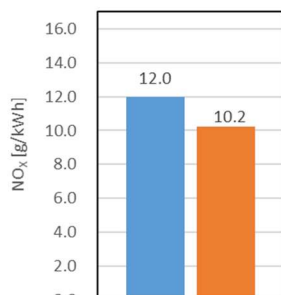
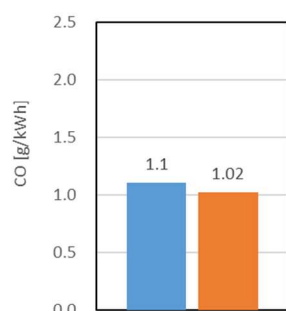
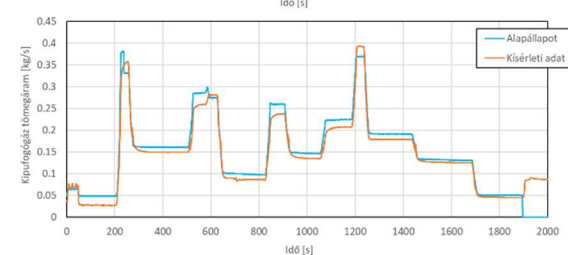
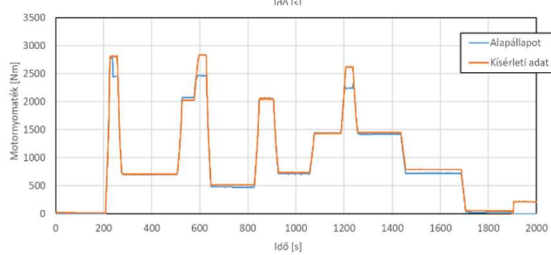
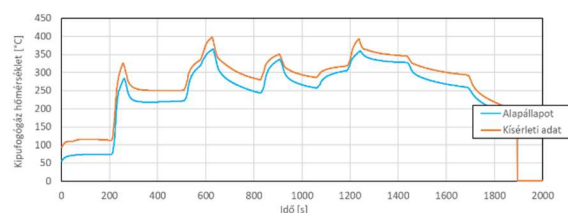
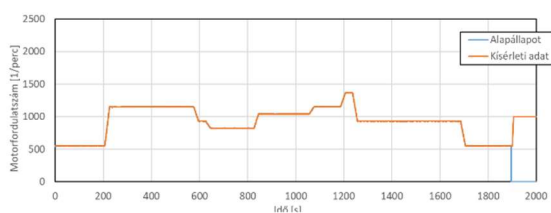


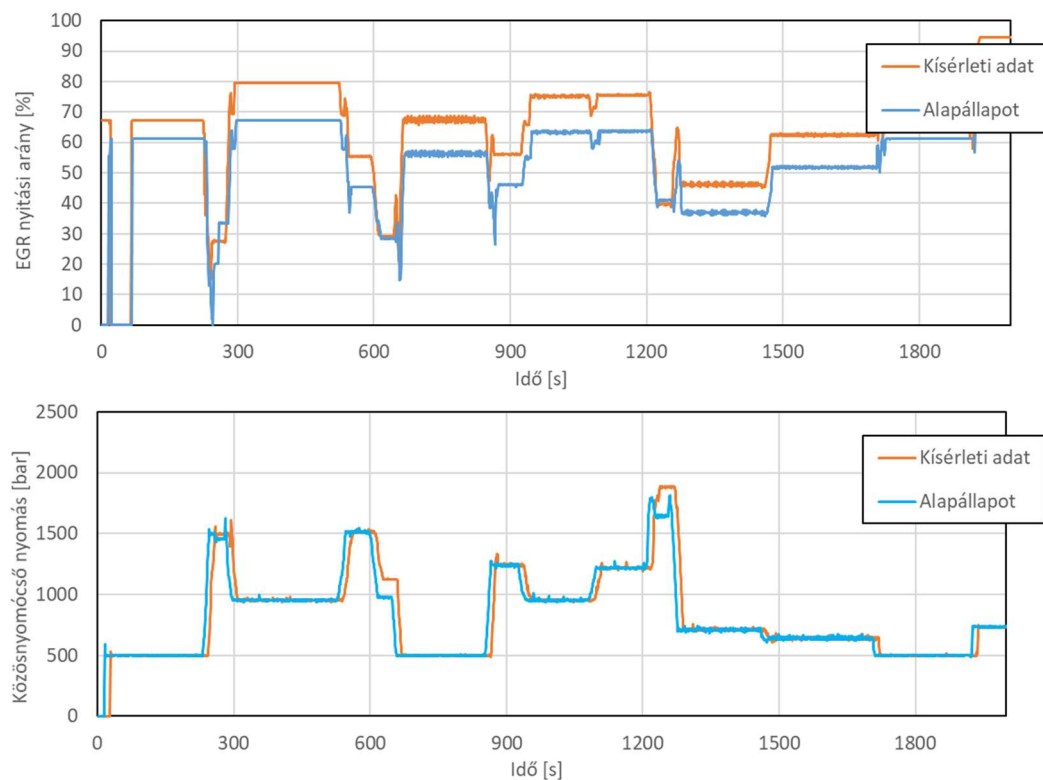
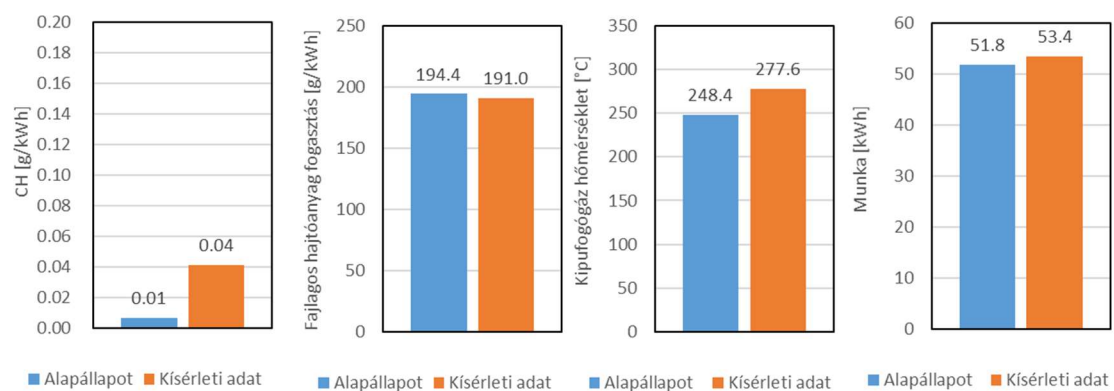


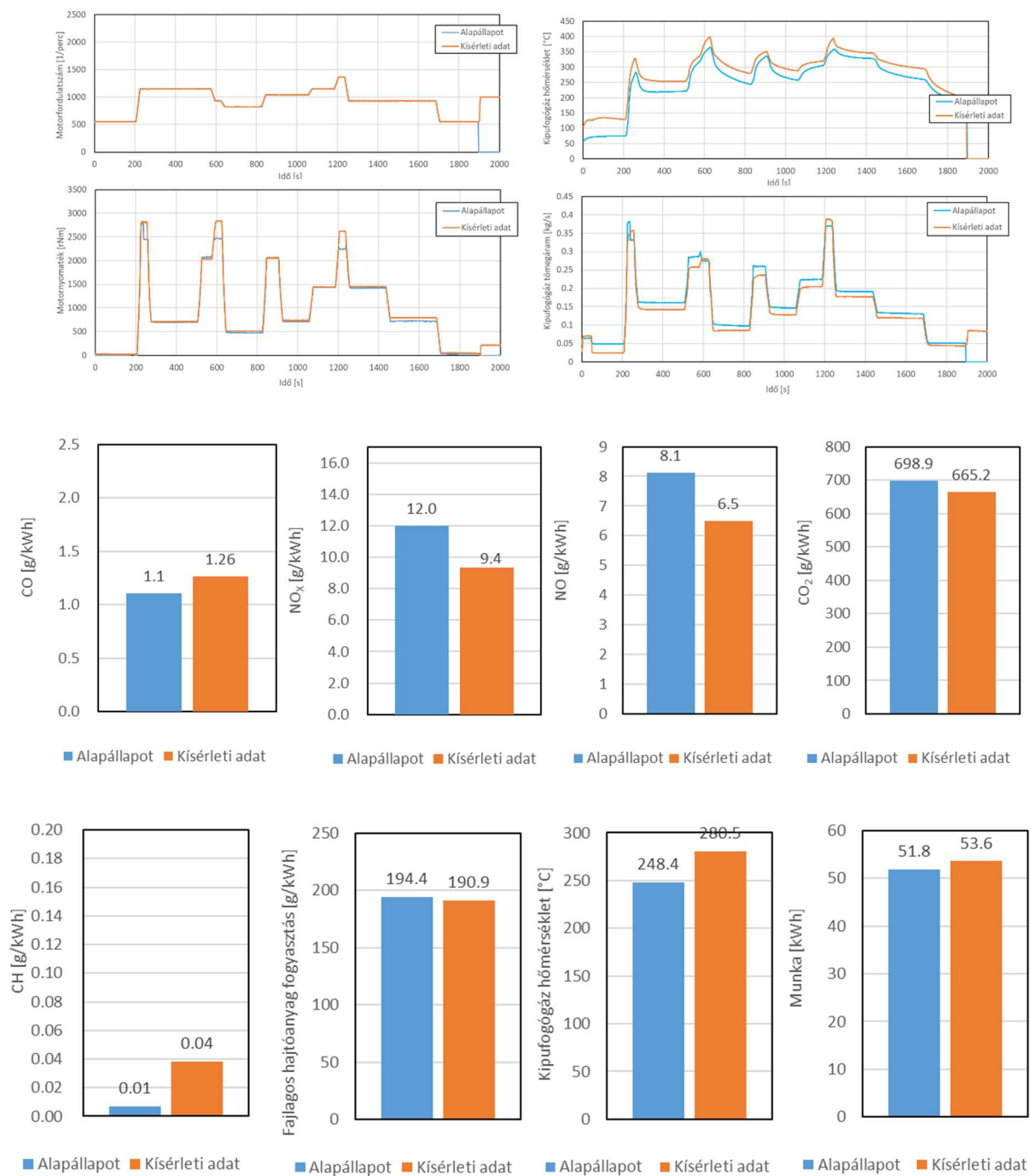


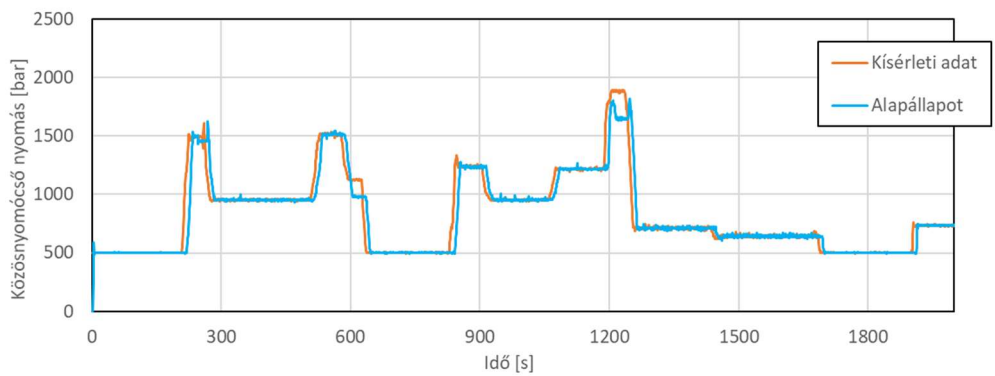
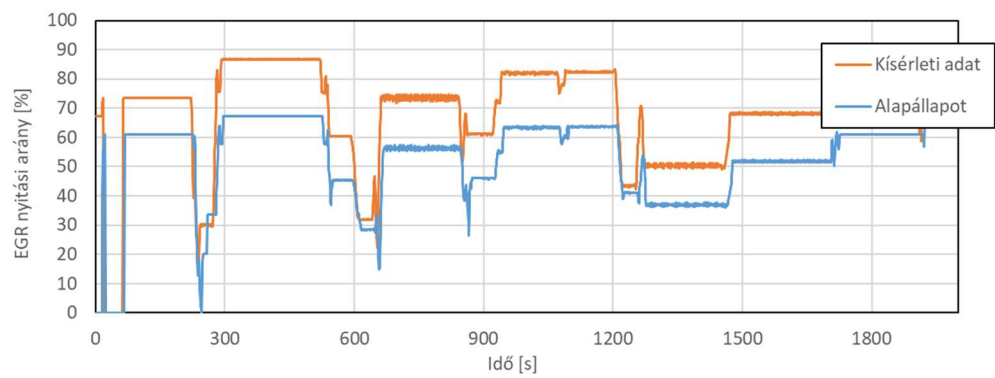


601

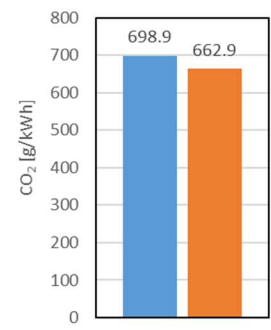
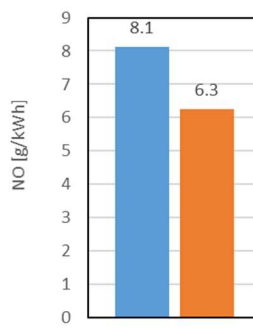
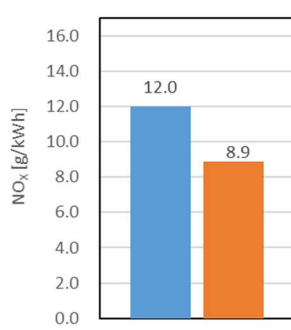
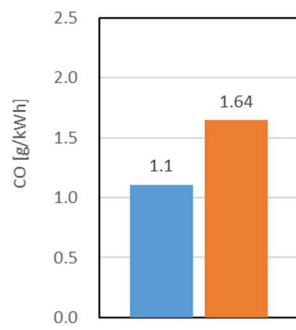
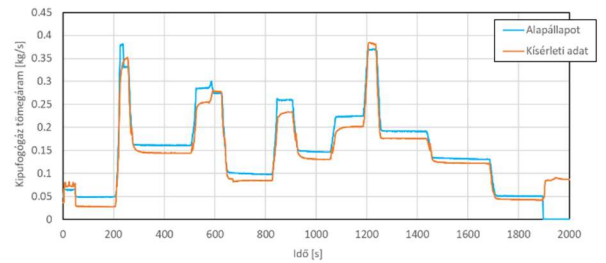
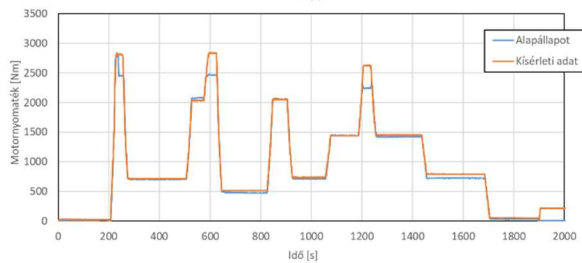
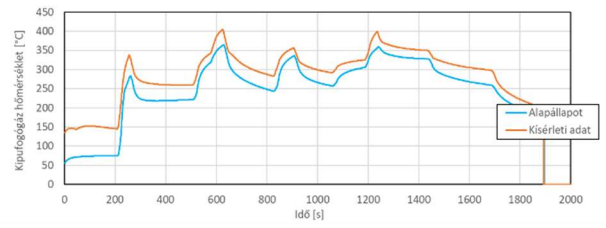
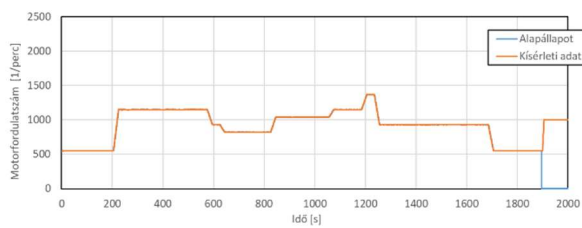








801

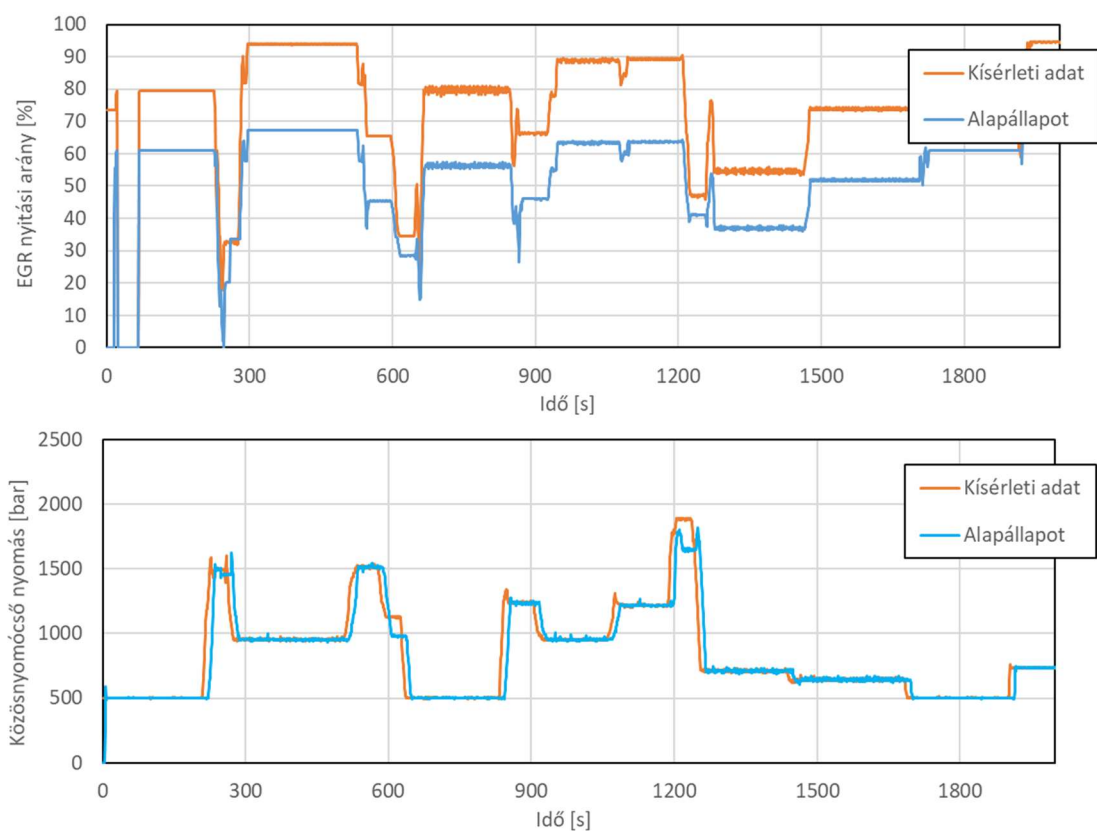
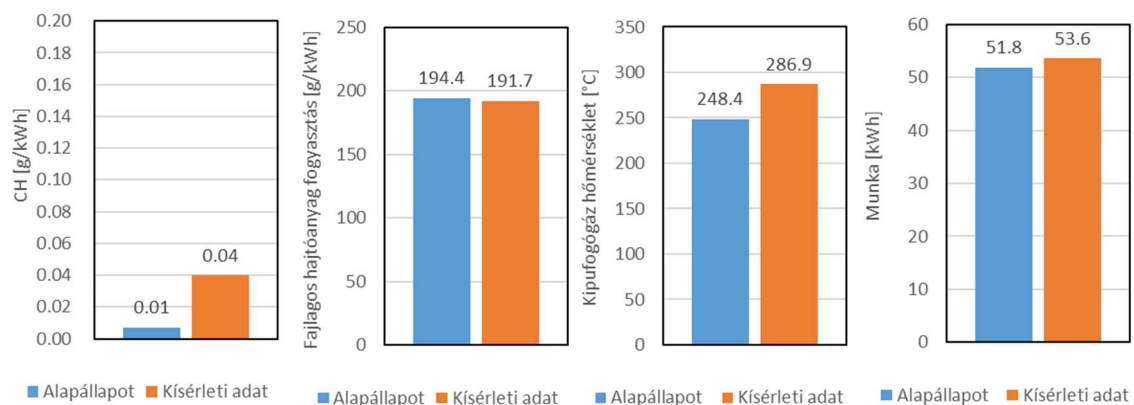


■ Alapállapot ■ Kísérleti adat

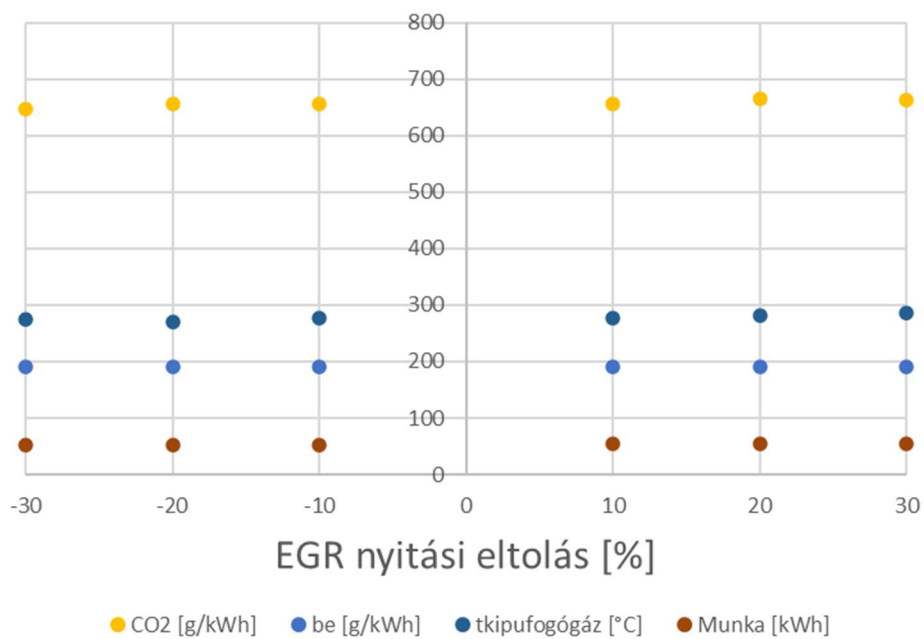
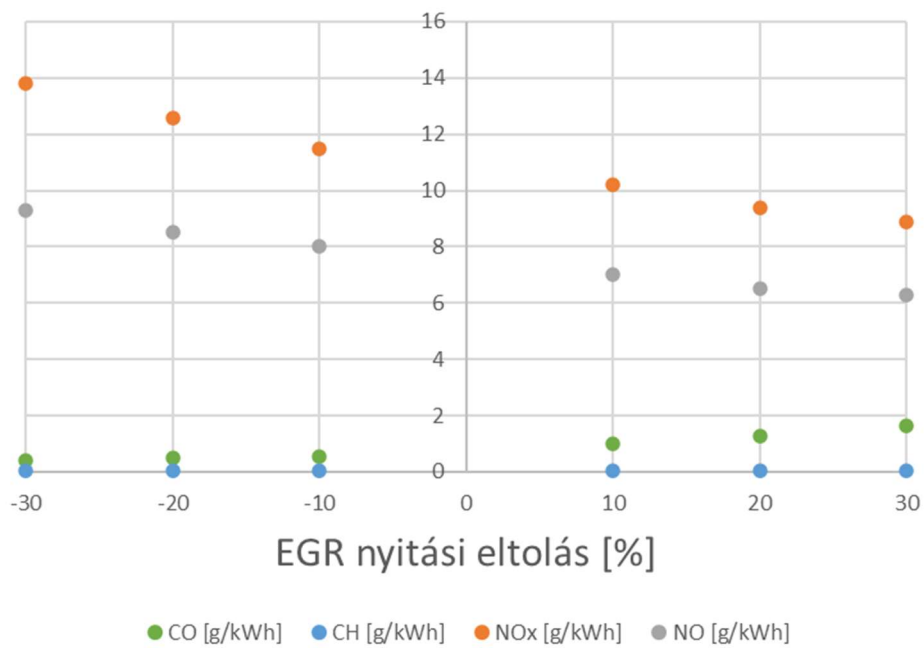
■ Alapállapot ■ Kísérleti adat

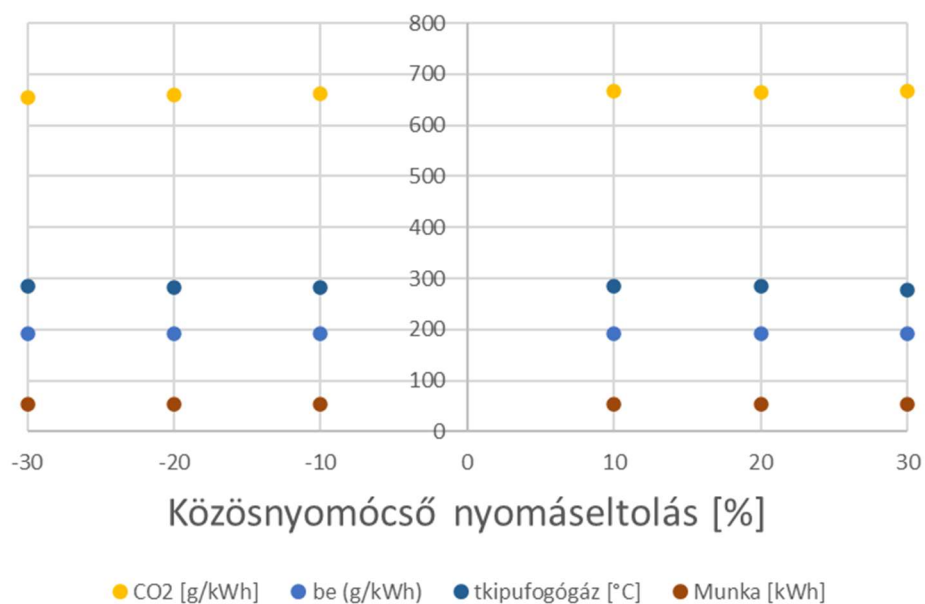
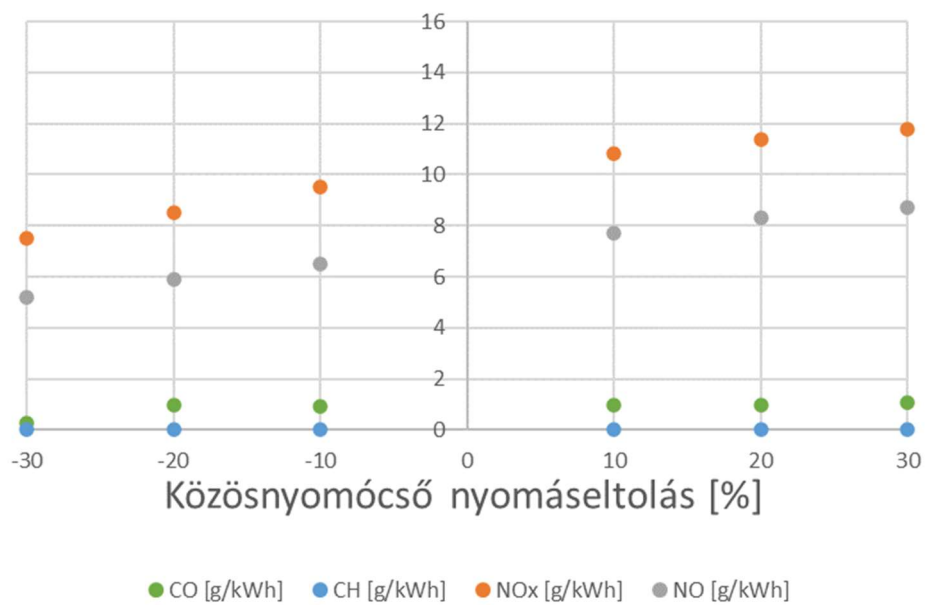
■ Alapállapot ■ Kísérleti adat

■ Alapállapot ■ Kísérleti adat



M2. Kísérlet összefoglaló diagramok





M3. Kísérletek mérési adatai

A kutatómunka során mért eredmények CD mellékletben kerültek rögzítésre, amely az eredmények fejezet alfejezetei szerint csoportosítva a következőket tartalmazza:

Mappa	Almappa	Almappa	Fájlnev	Fájl típus
4.1 hígítás kísérletek	Kísérleti adatok	kis részecske koncentráció	220325_07_#S0071_SD084_WHSC_dp4_4.xlsx	Microsoft excel munkafüzet

	220328_01_#S0131_SD084_WHSC _dpf_5.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	220328_02_#S0016_SD084_WHSC _dpf_6.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
nagy részecske koncentráció	220318_01_WHSC_Cold_D13_2_r aw1.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	220325_05_WHSC_Cold_D13_2_r aw2.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	220408_01_WHSC_Cold_D13_2_r aw3.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
Összefoglalók	apc_eeps_tests.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	kisebb PN kibocsátású tesztek.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	nagyobb PN kibocsátású tesztek.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
4.2 APC N kialakítás	Verification tests.xlsx	Microsoft excel munkafüzet

4.3 Alapemisszió	Alapállapot		230127_01_WHSC_Hot_D13_2	Microsoft excel munkafüzet
		Apc	230127_01_WHSC_hot_D13_2_AP C.csv	Vesszővel elválasztott értékek
		Puma	230127_01_WHSC_hot_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
		Puma	230127_01_WHSC_mode9_D13_2 .xls	Microsoft excel munkafüzet
		Vision	230127_01_WHSC_hot_D13_2.rec	Rec fájl
		Vision	230127_01_WHSC_hot_D13_2.txt	Szöveg fájl
		Vision	230127_01_WHSC_mode9_D13_2 .rec	Rec fájl
		Vision	230127_01_WHSC_mode9_D13_2 .txt	Szöveg fájl
		Vision	New Microsoft Excel Worksheet.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
4.4 ECU mod tesztek	EGR (230613_01_NEW)		230613_01_WHSC_301_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet

230613_01_WHSC_301_D13_2_ comparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
230613_05_WHSC_401_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
230613_05_WHSC_401_D13_2_co mparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
230613_09_WHSC_501_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
230613_09_WHSC_501_D13_2_co mparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
230615_05_WHSC_601_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
230615_05_WHSC_601_D13_2_co mparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
230616_03_WHSC_701_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
230616_03_WHSC_701_D13_2_co mparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet

	230616_07_WHSC_801_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
	230616_07_WHSC_801_D13_2_co mparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
APC	230613_01_WHSC_301_D13_2_A PC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
	230613_05_WHSC_401_D13_2_A PC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
	230613_09_WHSC_501_D13_2_A PC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
	230615_05_WHSC_601_D13_2_A PC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
	230616_03_WHSC_701_D13_2_A PC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
	230616_07_WHSC_801_D13_2_A PC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
PUMA	230316_07_WHSC_hot_801_D13_ 2.xls	Microsoft excel munkafüzet

230316_07_WHSC_mode9_801_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230613_01_WHSC_301_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230613_01_WHSC_mode9_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230613_05_WHSC_401_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230613_05_WHSC_mode9_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230613_09_WHSC_501_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230613_09_WHSC_mode9_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230615_05_WHSC_hot_601_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230615_05_WHSC_mode9_601_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230616_03_WHSC_hot_701_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet

	230616_03_WHSC_mode9_701_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
Vision	230613_01_WHSC_301_D13_2.rec	Rec fájl
	230613_01_WHSC_301_D13_2.txt	Szöveg fájl
	230613_01_WHSC_301_D13_2.xls	Rec fájl
	230613_01_WHSC_mode9_D13_2.rec	Szöveg fájl
	230613_01_WHSC_mode9_D13_2.txt	Szöveg fájl
	230613_05_WHSC_401_D13_2.rec	Rec fájl
	230613_05_WHSC_401_D13_2.txt	Szöveg fájl
	230613_05_WHSC_401_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230613_05_WHSC_mode9_D13_2.rec	Rec fájl

230613_05_WHSC_mode9_D13_2 .txt	Szöveg fájl
230613_09_WHSC_501_D13_2.rec	Rec fájl
230613_09_WHSC_501_D13_2.txt	Szöveg fájl
230613_09_WHSC_501_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230613_09_WHSC_mode9_D13_2 .rec	Rec fájl
230613_09_WHSC_mode9_D13_2 .txt	Szöveg fájl
230615_05_WHSC_hot_601_D13_2.rec	Rec fájl
230615_05_WHSC_hot_601_D13_2.txt	Szöveg fájl
230615_05_WHSC_hot_601_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230615_05_WHSC_mode9_601_D13_2.rec	Rec fájl

230615_05_WHSC_mode9_601_D 13_2.txt	Szöveg fájl
230616_03_WHSC_701_D13_2.rec	Rec fájl
230616_03_WHSC_701_D13_2.txt	Szöveg fájl
230616_03_WHSC_701_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230616_03_WHSC_mode9_701_D 13_2.rec	Rec fájl
230616_03_WHSC_mode9_701_D 13_2.txt	Szöveg fájl
230616_07_WHSC_801_D13_2.rec	Rec fájl
230616_07_WHSC_801_D13_2.txt	Szöveg fájl
230616_07_WHSC_801_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230616_07_WHSC_mode9_D13_2 .rec	Rec fájl

	230616_07_WHSC_mode9_D13_2 .txt	Szöveg fájl
RailP (230619_01_NEW)	230619_01_WHSC_303_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_303_D13_2_ comparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_403_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_403_D13_2_co mparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_503_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_503_D13_2_ comparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_603_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_603_D13_2_ comparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet

	230619_01_WHSC_703_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_703_D13_2_co mparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_803_D13_2.xls x	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_803_D13_2_co mparison.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
	~\$230619_01_WHSC_303_D13_2. xlsx	Microsoft excel munkafüzet
APC	230619_01_WHSC_303_D13_2_A PC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
	230619_01_WHSC_hot_403_D13_ 2_APC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
	230619_01_WHSC_hot_503_D13_ 2_APC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
	230619_01_WHSC_hot_603_D13_ 2_APC.csv	Vesszővel elválasztott értékek

	230619_01_WHSC_hot_703_D13_2_APC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
	230619_01_WHSC_hot_803_D13_2_APC.csv	Vesszővel elválasztott értékek
PUMA	230619_01_Mode9_303_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_Mode9_403_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_Mode9_703_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_Mode9_803_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_303_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_403_Bad_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_503_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_803_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet

	230619_01_WHSC_hot_403_2_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_hot_603_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_hot_703_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_mode9_2_603_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_mode9_403_2_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_mode9_503_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
	230619_01_WHSC_mode9_603_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
Vision	230619_01_Mode9_303_D13_2.rec	Rec fájl
	230619_01_Mode9_303_D13_2.txt	Szöveg fájl
	230619_01_Mode9_403_D13_2.rec	Rec fájl

230619_01_Mode9_403_D13_2.tx t	Szöveg fájl
230619_01_Mode9_803_D13_2.re c	Rec fájl
230619_01_Mode9_803_D13_2.tx t	Szöveg fájl
230619_01_WHSC_303_D13_2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_303_D13_2.txt	Szöveg fájl
230619_01_WHSC_303_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230619_01_WHSC_803_D13_2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_803_D13_2.txt	Szöveg fájl
230619_01_WHSC_803_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230619_01_WHSC_hot_403_2_D1 3_2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_hot_403_2_D1 3_2.txt	Szöveg fájl

230619_01_WHSC_hot_403_2_D1 3_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230619_01_WHSC_hot_503_D13_ 2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_hot_503_D13_ 2.txt	Szöveg fájl
230619_01_WHSC_hot_503_D13_ 2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230619_01_WHSC_hot_603_D13_ 2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_hot_603_D13_ 2.txt	Szöveg fájl
230619_01_WHSC_hot_603_D13_ 2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230619_01_WHSC_hot_703_D13_ 2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_hot_703_D13_ 2.txt	Szöveg fájl

230619_01_WHSC_hot_703_D13_2.xls	Microsoft excel munkafüzet
230619_01_WHSC_mode9_2_603_D13_2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_mode9_2_603_D13_2.txt	Szöveg fájl
230619_01_WHSC_mode9_403_2_D13_2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_mode9_403_2_D13_2.txt	Szöveg fájl
230619_01_WHSC_mode9_503_D13_2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_mode9_503_D13_2.txt	Szöveg fájl
230619_01_WHSC_mode9_603_D13_2.rec	Rec fájl
230619_01_WHSC_mode9_603_D13_2.txt	Szöveg fájl

	230619_01_WHSC_mode9_703_D 13_2.rec	Rec fájl
	230619_01_WHSC_mode9_703_D 13_2.txt	Szöveg fájl
4.4 Klaszter analízis	interkvartilis klaszter analízis.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
Mérés összefoglalás	Összegzés.xlsx	Microsoft excel munkafüzet
Vision script	Scriptek.zip	Tömörített ZIP fájl