BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

Kardos Réka Anna

Folyékony tüzelőanyagok párolgásának vizsgálata Fázis Doppler Anemométer segítségével

Konzulens:

Dr. Józsa Viktor
egyetemi docens

Budapest, 2021

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó ... 1
Jelölések jegyzéke ... 2
1. Célkitűzés ... 3
2. Bevezetés ... 4
2.1. Szakirodalmi áttekintés ... 4
2.2. A párolgás modellezése ... 7
2.2.1. Állandósult párolgás számítása ... 7
2.2.2. A felfűtési szakasz számítása ... 9
2.2.3. Cseppélettartam és párolgási szám számítása ... 11
2.3. A mérőrendszer bemutatása ... 11
3. A permet globális tulajdonságainak értékelése ... 14
3.1. Minták elemszáma, validációs rátája ... 14
3.2. Cseppek Sauter középátmérője ... 17
3.3. Permetben kialakuló sebességképek ... 20
4. Párolgás számítása ... 23
4.1. Bemeneti adatok ... 23
4.2. Párolgás modellezése csak egyenletes párolgás figyelembevételével ... 28
4.3. Párolgás modellezése a felfűtés figyelembevételével ... 31
5. Összefoglalás ... 35
6. Irodalomjegyzék ... 37

ELŐSZÓ

Tanulmányaim során sokat formálódott a szemléletmódom az energetikáról, energiatermelésről. Érdeklődésem főként a tüzeléstechnikai folyamatok felé fordult, egyrészt mert úgy hiszem, életünkben még mindig jelentős szerepet játszanak, másrészt pedig összetettségük miatt mindig akad egy-egy új kihívás a területen, mely megoldásra vagy éppen kutatásra vár.

Folyékony tüzelőanyagok esetén a tüzeléstechnikai folyamatokat az egyik legdominánsabban befolyásoló hatás a párolgás, így örülök, hogy kifinomult optikai méréstechnikai eszközökkel, különböző tüzelőanyagokkal, fejlett tüzelőberendezéssel volt lehetőségem a vizsgálatára, és hogy ennek tanulmányozása során merülhetek el igazán a tüzeléstechnikában, annak reményében, hogy a jelenlegi munkám alapul szolgál majd még sok másiknak.

* * *

Köszönetnyilvánítás

A dolgozat elkészüléséért köszönettel tartozom konzulensemnek, Dr. Józsa Viktornak, aki felkeltette mélyebb érdeklődésem a téma iránt és mindvégig segített, Milan Malý-nak akinek szaktudása és eszközei nélkül nem mehetett volna végbe a Fázis Doppler Anemométeres mérés, Csemány Dávidnak, aki a témában szerzett korábbi tapasztalataival jelentősen megkönnyítette a megíráshoz vezető utat és végül, de nem utolsó sorban a családomnak és a páromnak a támogatásért.

Budapest, 2021.11.07.

Kardos Réka Anna

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A	csepp felülete	m^2
B_M	Spalding szám	1
B_T	hőátadást jellemző dimenziótlan szám	1
c_p	izobár fajlagos hőkapacitás	J/(kg·K)
D	cseppátmérő	m
Ev	párolgási szám	1
h	hőátadási tényező	W/m^2K
k	hővezetési tényező	W/mK
L	látens hő	J/kg
m	csepp tömege	kg
m_F	párolgási tömegáram egységnyi felületen	kg/m^2s
$\dot{m}_F$	párolgási tömegáram	kg/s
M	moláris tömeg	kg/kmol
P	nyomás	Pa
$\bar{Q}$	dimenziótlan hőáram	1
$\dot{Q}$	cseppbe bevitt hőáram	W
$\dot{Q}_e$	párolgásra fordított hőáram	W
r	csepp sugara	m
t	idő	s
t_{ev}	csepp élettartama	s
t_{res}	tartózkodási idő	s
T	hőmérséklet	K

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
λ	párolgási konstans	m^2/s
ρ	sűrűség	kg/m^3

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
amb	környezet
A	levegő
bn	normál forrásponti
cr	kritikus
g	tüzelőanyaggőz-levegő keverék
hu	felfűtési szakaszra átlagosan jellemző
hu,end	felfűtési szakasz végén
r	referencia
s	felületi
st	stacionárius
0	kezdeti állapot

1. CÉLKITŰZÉS

A párolgás fizikai folyamata egy régóta aktívan kutatott területnek tekinthető, melynek ma is alkalmazott keretrendszerét 1953-ban Spalding [1] és Godsave [2] fektették le. A világ azóta sokat változott, ahogy az energiatermelés is, azonban a téma ma is aktuális. A megújuló energiaforrások használata egyre inkább előtérbe kerül, ez a tendencia a folyékony tüzelőanyagok esetén is megfigyelhető, egyre több kutatás irányul a biotüzelőanyagok előállításának, használati lehetőségeinek feltárására. A személyes használatú gépkocsik belső égésű motorjainak lassú kiszorulása várhatóan nem fog hatni a bioüzemanyagok felhasználására, hiszen a ReFuelEU [3] javaslat éppen a repülőgép hajtóanyagként való alkalmazást szorgalmazza. Magyarországon az olajkereskedőket is Uniós szabályozások kötik, hogy a terméküknek mekkora legyen a megújuló-részaránya, ezt dízelolaj esetén repce-metilészterrel (RME) teljesítik. Habár az elektromos hajtások igen népszerűek, a fosszilis folyékony tüzelőanyagok égésével történő hőfelszabadítás teljes kiváltására még várni kell legalább a század végéig [4]. Ugyan tisztán biotüzelőanyagok használata lehetséges, de vannak olyan nagynyomású technológiák (pl. gázturbinák, belsőégésű motorok, magasnyomású kazánok), ahol az indítási folyamat során műszaki problémák merülnek fel, így csupán keverékben valósítható meg az alkalmazásuk [5]. Ennek megfelelően ebben a dolgozatban mindhárom lehetőség vizsgálat alá kerül az alábbi tüzelőanyagok reprezentálásával: kerozin, a kereskedelemben kapható dízelolaj (7% biodízel), biodízel (100%), és dízel-biodízel fele-fele arányú keveréke.

Az égési folyamatokban kritikus szerepet játszanak a tüzelőanyagok párolgási jellemzői, így hatással vannak az adott berendezés által leadott teljesítményre, emisszióra a folyamat hatékonyságára, a leállásokra (például, ha nincs megfelelő folyadékgőz képződés, az véget vethet az égési reakciónak, ezzel együtt az egység működésének). Emiatt felmerül az igény arra, hogy a párolgás már a tervezési szakaszban is jól számítható, modellezhető legyen, elkerülve ezzel a működési bizonytalanságokat. Az elmúlt évtizedek során erre számos modell született. Azonban elmondható, hogy a leggyakrabban alkalmazott megoldás az ún. D^2-törvény, mely lineáris összefüggést teremt a cseppátmérő négyzete és az eltelt idő között. Egyszerű matematikai alakja könnyű használatra ad lehetőséget, és sok esetben a kísérleti adatokkal jó egyezést mutat. Ugyanakkor kérdéses, hogy ez mennyire pontosan működik különböző tüzelőanyagok és különböző porlasztási, égési beállítások mellett, egyedi csepp helyett permet esetén, valós körülmények között, így ennek vizsgálata a gyakorlat számára hasznos eredményekkel szolgál.

A Fázis Doppler Anemométer (PDA) használata széleskörűen elterjedt az áramlástannal összefüggésben lévő területeken, így a permetképződési, porlasztási és a párolgási folyamatok vizsgálatánál is [6,7]. Segítségével meghatározható a cseppméret- és a sebességeloszlás az adott, parányi mérőtérfogatban, több helyen mérve pedig a permet globális jellemzőiről tudhatunk meg többet. Arra, hogy a valós és a számított párolgás utáni cseppeloszlásokat, a párolgási jellemzőket összehasonlítsuk remek lehetőséget nyújt a PDA segítségével történő mérés, hiszen egyben szolgáltat a kiinduláshoz és a validációhoz szükséges adatokat azzal, hogy a kifúvástól mérve több távolságban is mérünk. Így már a kezdeti eloszlások is értékelhetővé válnak a tüzelési beállítások függvényében, ezzel támogatva a lejátszódó jelenségek minél részletesebb megértését.

Dolgozatom elsődleges célja a megnevezett négy tüzelőanyag párolgási jellemzőinek vizsgálata, a párolgás számítása D^2-törvény alapján, majd ezek eredményeinek összevetése a PDA mérés adataival. Ezzel értékelhetővé válnak az eltérések, melyek egy pontosabb modell fejlesztésének alapjai lehetnek.

2. BEVEZETÉS

A dolgozatomban először bemutatom a párolgási folyamat számításához használt elveket és számítási metódusokat, illetve az ezek alkalmazásához szükséges feltételeket, majd a mérés menetét, a mérőrendszer elrendezését és tulajdonságait. Ehhez társul egy szakirodalmi áttekintés, hogy a kapott eredményeket megfelelően lehessen minősíteni, összehasonlítani az eddigi kutatásokból nyert adatokkal. A kiértékelés alkotja a következő két fejezetet, mind a globális, mind a tengelyben mért adatokra, illetve a párolgás számítására vonatkozóan. Az első szakaszban a PDA mérés során nyert adatok feldolgozására, szemléletes bemutatására és az ezek hátterében álló fizikai magyarázatokra kerül sor, mind a cseppméretek, mind a sebességek tekintetében, a permet különböző axiális és radiális távolságaiban. Ezt követően történik a párolgás számítása D^2-törvény alapján, a modell által kapott eredmények összehasonlítása a mért adatokkal, a hasonlóságok és eltérések lehetséges okainak feltárása, esetleges modellfejlesztési lehetőségek meghatározása. Lezárásként összegzem a kapott eredményeket és levonom a végső következtetéseket.

2.1. Szakirodalmi áttekintés

A párolgás folyamata életünk számos területén megjelenik: a szervezetünkben, Földünk vízkörforgásában, ipari alkalmazásokban, például szárítás vagy lepárlás során, a tüzeléstechnikában, vagy laboratóriumi vizsgálatoknál, mint a kromatográfia vagy a spektroszkópia. Emiatt szükségessé vált a párolgási modellek megalkotása, melyek köre az idő múlásával fokozatosan bővült. Napjainkban már számos analitikus és numerikus modellt ismerünk, amelyekből a vizsgálandó probléma jellemzői alapján válogathatunk.

A klasszikus modelleket egykomponensű folyadékokra a [8] forrás ismerteti. Dolgozatomban a legegyszerűbb, egyben az egyik legkorábban megalkotott párolgási modellt, a D^2-törvényt alkalmazom, melyet Maxwell hozott létre 1877-ben. Ennek részletes bemutatását 2.2. fejezet tartalmazza. Ezt Abramzon and Sirignano finomította, akik a konvektív hő- és tömegátadást az ún. film-elmélet felhasználásával vették figyelembe. Ennek lényegi feltevése, hogy a filmben a hővezetés vagy diffúzió útján történő tisztán molekuláris transzport sebességének meg kell egyeznie a cseppfelület és a külső áramlás közötti konvektív hő- vagy tömegátadás tényleges intenzitásával. Ezenkívül figyelembe vették a hősugárzást, illetve a cseppek belsejében kialakuló tüzelőanyag-cirkuláció hatását. Ehhez a modellhez hasonlót mutatott be Yao, Abdel-Khalik, and Ghiaasiaan, azonban számításba veszik, hogy a határrétegek vastagsága véges. Az eddig említett 3 modellt mind a tömeg-, energia- és impulzusmegmaradási törvényekből vezették le, sok helyen egyszerűsítéseket alkalmazva, például a sűrűségekre és hőmérsékletekre, diffúziós együtthatókra stb. Tonini and Cossali új modellt dolgoztak ki gömbszimmetrikus, egykomponensű csepp zavartalan levegőben történő párolgására, melyben kevésbé szigorú feltevésekre van szükség. A gázfázisra helyezték a hangsúlyt, feltették, hogy a csepp belsejében nincs hőmérsékleti gradiens és hogy a folyadék hővezetési tényezője végtelen nagy. A modell a cseppet körbevevő levegő-gőz keverékre felírt stacionárius tömeg-, energia- és impulzusmegmaradási törvényeken alapul.

A gyakorlat legtöbbször nem korlátozódik az egykomponensű anyagok alkalmazására, azonban több komponens esetén azok eltérő párolgási sebessége koncentráció gradienst hoz létre a folyadékban, ezzel bonyolultabbá téve a modellezést. Korai egyszerűbb megoldásokat erre a [9,10] források taglalják, emellett ilyenek még például a Discrete Component Model (DCM)

kis számú komponensre, vagy a Distillation Curve Model és Continuous Thermodynamics modell összetettebb anyagokra. Napjainkban fejlesztett modelleket mutatnak be a [11,12] források, az első a DCM numerikus változata, mely kis számú komponens esetén használható jól, míg a második az ún. kvázidiszkrét modell, ami akár nagyobb számú összetevőt tartalmazó folyadékok párolgásának számítására is alkalmas. A legfrissebb kutatási eredményeket a párolgás modellezésének terén [13] hasonlítja és foglalja össze.

Azonban ezekben a modellekben is számos helyen találunk megoldatlan problémákat, melyek kiküszöbölése további kutatásokra, fejlesztésekre vár, ilyenek például a következők [13]: A legtöbb modell gömbszimmetrikus cseppek párolgására készült. Habár már léteznek modellek, melyek eltérnek ettől, azok is csak a gömb geometriától való kis eltérés, esetleg hengeres alak esetén használhatók, de így is sokkal bonyolultabb összefüggéseket eredményeznek. Valószínűleg ezt a problémát csak nagy kapacitásokat igénylő számítógépes numerikus szimulációk fogják megoldani. A cseppek mozgását is figyelembe vevő modell az ún. ETC/ED (Effective Thermal Conductivity/Effective Diffusivity) modell, azonban a validálása szélesebb paramétertartományokra még zajlik. A felmelegedésre és a párolgásra a cseppek közötti kölcsönhatás is kifejti hatását, még akkor is, ha csupán kellően közel (ha a távolság és a cseppátmérő aránya kisebb, mint 10), egymás mellett mozognak. Habár az egyszerűbb esetekre léteznek félempirikus közelítések, azok nagy számú cseppek és összetett kölcsönhatások esetén nem működnek. Azt már megállapították, hogy minél sűrűbb a permet (minél nagyobb a cseppek térfogategységenkénti száma), annál kisebb a párolgási sebesség, azonban a pontos modellezése jelenleg is nyitott kérdés. Több gyakorlati alkalmazásban (például belső égésű motorokban) a tüzelőanyag nyomása és hőmérséklete a kritikus fölé emelkedik, bár a modellek többsége nem alkalmazható kritikushoz közeli, vagy transz- és szuperkritikus körülmények közt lejátszódó párolgás számítására. Ilyenkor a párolgás látens hője nullává válik, eltűnik a különbség a folyadék és gázfázis között, így a felületi feszültség is, illetve a termodinamikai jellemzők erősen érzékennyé és nemlineárissá válnak a hőmérséklet- és nyomásváltozásokra. Ezeket a különleges kondíciókat a modellezés során is figyelembe kell venni. A többkomponensű anyagok modellezésére jó lehetőséget nyújt a már említett kvázidiszkrét modell, azonban még ebben is számos egyszerűsített megoldás van jelen, például, hogy az alkotók diffúziós együtthatóit egyenlőnek veszi, illetve, hogy csak gömbszimmetrikus cseppek párolgásának vizsgálatára lett kifejlesztve, így ezek a kiegészítések még hátra vannak. A párolgási együtthatóra gyakorolt kvantumkémiai hatás mértéke még kérdéses, értékelni fejlett kinetikai és molekuladinamikai modellekkel lehetséges, melyek jelenleg még a műszaki alkalmazásokhoz is túl durva közelítéseket alkalmaznak, így fejlesztésre várnak. Mindezek alátámasztják a modellek vizsgálatának fontosságát a lehető legváltozóbb körülmények között, hogy megállapíthassuk az adott modell közelítő, egyszerűsítő feltételezéseinek helyességét vagy helytelenségét, illetve, hogy milyen mértékben torzítják a tényleges folyamatokat. Ezáltal kijelölhető, mely aspektusokból van szükség további fejlesztésre.

Ugyanakkor nem csak a modellek maguk, hanem a bemeneti paramétereknek, a tüzelőanyagok termofizikai jellemzőinek pontos megadása is befolyásolhatja a kapott eredményeket, ezt vizsgálja [14]. Az érzékenységi vizsgálat alapján kijelenthető, hogy a párolgás különösen érzékeny a következő paraméterekre: a látens párolgási hőre, forráspontra, a folyadék sűrűségére és a gőz hővezető képességére. A gőz dinamikus viszkozitása, a gőz sűrűsége és a folyékony tüzelőanyag fajhője az elemzett körülmények között marginális hatással volt a párolgási időre, míg a kritikus hőmérséklet és a gőz fajhője csekély mértékben befolyásolta a jelenséget.

A folyadékok párolgása során zajló mechanizmusok teljes megismerése fontos szerepet játszik az energetikában. Az egyre szigorodó környezetvédelmi eljárások megkövetelik a kibocsátott szennyezőanyagok csökkentését. Ezeket gyakran úgy teljesítik, hogy a tüzelőanyagot már homogén, előkevert tüzelőanyaggőz-levegő keverék formájában juttatják az égőtérbe. Így elkerülhetők a lokális hőmérsékletingadozások és a tüzelőanyagban szegény és gazdag részek váltakozása, melyek kedveznének a CO és NO_x keletkezésnek. A nitrogén-oxidok keletkezése a légfeleslegtényező függvényében 1-nél enyhén nagyobb érték esetén éri el a maximumot, tehát kis kibocsátást vagy nagyon kis, vagy nagy légfeleslegekkel érhetünk el. Az utóbbi, azaz tüzelőanyagban szegény keverékek alkalmazása gyakoribb, melyeknél az elsődleges NO_x keletkezési mechanizmus a termikus, azaz a magas hőmérsékletű égés során keletkező atomos oxigén a levegő nitrogénjével reakcióba lép, aminek NO keletkezés a végeredménye. Ez a levegő oxigénjével reagálva, jellemzően a hőerőgépek kipufogócsonkja után NO_2-vé alakul. (Utóbbi az égés során is keletkezik, de csupán 5% körüli mértékben.) Magas nyomáson, amivel gázturbinákban találkozunk, az N_2O keletkezése dominál, melyeket együttesen szokás NO_x-nek nevezni. A termikus NO_x keletkezése exponenciálisan nő a hőmérséklettel, ezért fontos, hogy homogén hőmérsékletmezőt alakítsunk ki. Ha a tüzelőanyag porlasztása során kialakuló cseppek mérete olyan nagy, hogy azok nem tudnak teljesen elpárologni az égőtér előtt, akkor azok lokális hőmérsékletcsúcsokat fognak létrehozni a tüzelés során, mely a berendezés élettartamát is negatívan befolyásolja. A nem megfelelő párolgás továbbá működési instabilitásokhoz is vezethet, melyek könnyen meghibásodásba torkollanak [14].

A károsanyag-kibocsátást és a működést természetesen nem csak a párolgás szabja meg, hanem a teljes áramlástani folyamat, melyben a csepp- és a gázdinamikát, a keveredést és a porlasztást is figyelembe kell venni. A jelen esetben is alkalmazott PDA a permet számos jellemzőjéről nyújt információt, többek között cseppméretről, cseppeloszlásról, axiális sebességekről, illetve mindezek axiális és radiális eloszlásairól. A mérési technikáról, az elrendezésről és az adatok feldolgozásáról [15] nyújt részletes információkat. Sok kutatás alapul PDA méréseken, például Kamrak és tsai [16] pálmaolaj alapú zsírsav-metilészter és dízelolaj keverékének cseppméretét és cseppdinamikáját vizsgálták, Urbán és tsai [7] pedig ugyanezt, nagysebességű levegő segédközeges porlasztó által létrehozott dízelolaj permetre. Szintén Urbán és tsai [17]-ben ugyanerre a porlasztóra a kialakult cseppeloszlásokra illeszthető optimális valószínűségi sűrűségfüggvényt keresték, többek között dízelolajra is. Shin és tsai [18] a repülésben használatos hagyományos és alternatív üzemanyagok permetét vizsgálta nagy környezeti nyomás mellett.

Habár számos tanulmány született már hagyományos szénhidrogén alapú folyékony tüzelőanyagok párolgásáról, a világ tendenciái a megújuló alapú biotüzelőanyagok felé sodorják a napjainkban zajló kutatásokat. Sokszor emlegetett téma a fosszilis energiaforrások felhasználásának csökkentése, sokan ezzel együtt a jelenleg használt fosszilis folyékony tüzelőanyagok teljes kiveszését prognosztizálják az energiaiparból. A mostani helyzetben ez még távoli célnak tűnik, bizonyos technológiák számára nincs más megoldás, mint ezek alkalmazása. Emellett vonzóbbá válhat az alkalmazásuk biotüzelőanyagok hozzákeverésével, melyet már jogi szabályozások is ösztönöznek. Mindez alátámasztható többek között az IEA (International Energy Agency) 2050-re készített STEPS (Stated Policies Scenario) alapú elemzéseivel [19], az Európai Bioüzemanyagok Technológiai Platformjának létrejöttével és a már bevezetőben is említett ReFuelEU javaslattal [3], mely növelni hivatott a fenntartható légijármű-üzemanyagok piaci részesedését az EU-ban. A biotüzelőanyagok előállítása ugyanakkor kihívásokkal járhat, ugyanis az első generációs biotüzelőanyagok bizonyítottan veszélyeztetik az élelmiszerellátás biztonságát [20], így olyan megoldásokat kell keresnünk, melyek diverz forrásból, speciális technológiát nem igénylő módon előállíthatók. Erre kiváló lehetőség a használt sütőolajból előállított biodízel felhasználása, melynek társadalmi háttere egyre inkább megerősödni látszik.

Tiszta alkalmazásakor működési problémák léphetnek fel, ezért gyakran fosszilis tüzelőanyagokkal keverve használják. Ez az elsődleges oka, hogy a dolgozatban a fosszilis, és a tiszta biotüzelőanyag vizsgálata mellett egy keverék párolgási viselkedését is modellezem.

2.2. A párolgás modellezése

Ebben a részben a párolgás számításához felhasznált összefüggések értékelésére kerül sor. Ezek bővebb magyarázata megtalálható a [21] irodalomban. Alkalmazásuk során bizonyos feltételek teljesülése szükséges, ezek a következők [1,2]:

- A cseppek gömbszimmetrikusak: Ezt a feltételt a mintavételezett adatok kielégítik, azonban ez később a validációs ráta értékelésénél lesz részletezve, hiszen a permet fejlődésének csak a végállomása a stabil, gömbszimmetrikus cseppek kialakulása.
- A tüzelőanyag egykomponensű, jól meghatározott forrásponttal: Ez ebben az esetben nem áll fenn, azonban látjuk majd, hogy jó közelítések tehetők ennek kielégítésére.
- Párolgás során az elsődleges hőközlési folyamat a hővezetés, emellett a hősugárzás és a konvektív hőátadás szerepe elhanyagolható. Ezek hatását részletesebben a [22] forrás dolgozza fel.
- A Lewis szám, mely a hő- és az anyagdiffúzió arányát fejezi ki, egységnyi.

A párolgást alapvetően a molekuláris diffúzió határozza meg, folyamata jó közelítéssel két egymást követő részfolyamatra különíthető el, ezek a tranziens és a stacionárius szakasz. Az első (tranziens), az ún. felfűtési szakasz. Ekkor a csepp felületén még alacsony a tüzelőanyag-gőz koncentrációja és a diffúzió is, szinte az összes felvett hő a csepp hőmérsékletének növelésére fordítódik, mivel a tüzelőanyagcsepp középpontja hidegebb, mint a felülete. Ahogy a csepp hőmérséklete emelkedik, a bevitt hő egyre nagyobb hányada fordítódik a párolgásra, ezáltal fokozódik a gőzképződés. A gőzök áramlása miatt pedig lassul a hőátadás a közeg és a csepp között, így a hőmérséklet egyre inkább egyenletessé válik. Végül elérünk a második szakaszba, ahol stacionárius párolgás zajlik, azaz a csepphőmérséklet stabilizálódik a nedves hőmérsékleten, és az összes hő az elpárolgásra fordítódik. (Habár az elnevezéssel ellentétben a valóságban sosem lesz teljesen állandósult a folyamat, csak kvázi-stacionárius.)

2.2.1. ÁLLANDÓSULT PÁROLGÁS SZÁMÍTÁSA

Az alábbi egyenletek esetében az állapotjelzők mind hőmérsékletfüggők. Ezeket az egyszerűség kedvéért nem írjuk ki minden esetben, csak ott, ahol több variáció is felmerülhet, elkerülve a félreértéseket. Állandósult párolgás során a cseppek fogyását a D^2-törvény alábbi alakja fejezi ki:

$$D_0^2 - D(t)^2 = \lambda_{st} t. \tag{2.1}$$

Az egyenletben D a csepp átmérőjét, t az időt, a 0 index a kezdeti állapotot, λ_{st} pedig a stacionárius állapotban érvényes párolgási konstanst jelöli, mely a következő egyenlet segítségével számítható:

$$\lambda_{st} = \frac{8k_g \ln(1+B_M)}{c_{pg}\rho_F}, \tag{2.2}$$

ahol k a hővezetési tényező c_p az izobár fajhő, ρ_F a tüzelőanyag sűrűsége. A g index arra utal, hogy a tüzelőanyag-gőzből és a levegőből álló gázkeverék jellemzőivel kell számolnunk, ezeket

a komponensek tömegarányok alapján súlyozott, referencia hőmérsékleten vett értékeiből kapjuk [23]:

$$c_{pg} = Y_{Ar} c_{pA}(T_r) + Y_{Fr} c_{pv}(T_r),$$

$$k_g = Y_{Ar} k_A(T_r) + Y_{Fr} k_v(T_r),$$

$$T_r = T_s + \frac{T_{amb} - T_s}{3},$$

$$Y_{Fr} = \frac{2}{3} Y_{Fs} = 1 - Y_{Ar},$$

ahol Y a tömeghányadot jelenti, az A index a levegőt, F index a tüzelőanyagot, v index a tüzelőanyaggőzt, T_r a referencia hőmérsékletet, T_{amb} a környezeti hőmérsékletet, T_s pedig a felületi hőmérsékletet jelenti. Stacionárius esetre a tömegátadást és a hőátadást jellemző számok egyenlősége teljesül, ezt az értéket jelöli a B. Azt a hőmérsékletet, ahol a két kifejezés egyenlővé válik, azt nevezzük az ún. nedves (wet-bulb) hőmérsékletnek, mely egyenlő a felületi hőmérséklettel ($T_{s_{st}}$).

(2.2)-ben a termikus diffúziót elhanyagolva feltételezhetjük, hogy a diffúzió kényszerítő ereje a koncentrációkülönbség, így felírható, hogy:

$$\frac{dY_F}{dr} = -\frac{RT}{D_C P} m_F Y_A, \tag{2.3}$$

ahol R a gázállandó, D_C a diffúziós együttható, P a gáz nyomása, m_F a párolgási tömegáram egységnyi felületre vetítve, r pedig a csepp sugara. A tömegátadást jellemző dimenziótlan hasonlósági számot (Spalding-szám) az alábbi módon definiáljuk:

$$B_m = \frac{Y_{Fs}}{1 - Y_{Fs}}. \tag{2.4}$$

Felhasználva (2.3) és (2.4)-et, a kontinuitási egyenletet, az érvényes peremfeltételeket és feltételezve, hogy a Lewis-szám egységnyi, megkapjuk a párolgás sebességére vonatkozó alapegyenletet (párolgási tömegáram):

$$\dot{m}_F = 2\pi D \frac{k_g}{c_{pg}} \ln(1 + B_M). \tag{2.5}$$

Y_{Fs} kifejezése történhet a parciális nyomások segítségével:

$$Y_{Fs} = \frac{P_{Fs} M_F}{P_{Fs} M_F + (P - P_{Fs}) M_A},$$

ahol P_{Fs} telített gőznyomást (a gőznyomást a csepp felületén) a felületi hőmérséklet függvényében az Antoine-egyenlet fejezi ki, ennek paraméterei különböző tüzelőanyagokra mások, M a moláris tömeget jelzi.

Definiálhatunk egy, a hőátadást jellemző dimenziótlan hasonlósági számot (B_T) is, mely megmutatja, hogy a környező gázban rejlő entalpia hogy arányul a párolgáshoz szükséges hőhöz (párolgáshőhöz (L)):

$$B_T = \frac{c_{pg}(T_{amb} - T_s)}{L}, \tag{2.6}$$

ahol a látens hő a következőképp számítható Watson [24] alapján:

$$L = L_{Tbn}\left(\frac{T_{cr}-T_s}{T_{cr}-T_{bn}}\right)^{-0,38},$$

ahol T_{bn} a normál forráspontot jelöli, L_{Tbn} az ezen vett párolgáshőt, T_{cr} a tüzelőanyag kritikus hőmérsékletét. Amennyiben a párolgást teljes mértékben a hőátadási folyamatok sebessége szabályozza, és a Lewis-szám egységnyi, úgy (2.5)-höz hasonló alakra juthatunk:

$$\dot{m}_F = 2\pi D\frac{k_g}{c_{pg}}\ln(1+B_T). \tag{2.7}$$

A stacionárius párolgás szakaszában $B_M = B_T$, így mindkettő használható a párolgási sebesség számításakor. Azonban tranziens folyamatokban, mint például a következő pontban ismertetett felfűtési szakasz, csak (2.5) alkalmazható. Így most a B_T és B_M egyenlőségekor kiadódó $T_s(= T_{s_{st}})$ felületi hőmérsékletet visszahelyettesítve minden tőle függő jellemző egyenletébe végül (2.2) alapján megkapjuk λ_{st}-t.

2.2.2. A FELFŰTÉSI SZAKASZ SZÁMÍTÁSA

Chin és Lefebvre [25] alapján a számítások során kvázi-stacionárius gázfázis feltételezése szükséges, így a csepp körüli határréteg állandósult állapotbeli jellemzőkkel rendelkezik. Így a hőátadási tényezőt (h) kifejezhetjük a Nusselt-szám (Nu) segítségével:

$$h = \frac{Nu\,k_g}{D} = 2\frac{k_g}{D}\frac{1+B_M}{B_M}.$$

Így a hőáram, mely a gázáramból a cseppbe jut ($\dot{Q}$):

$$\dot{Q} = Ah(T_{amb}-T_s) = 2\pi D k_g(T_{amb}-T_s)\frac{1+B_M}{B_M}, \tag{2.8}$$

ahol A a csepp felülete. A csepp elpárolgásához szükséges hőáram ($\dot{Q}_e$):

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_F L = 2\pi D\frac{k_g}{c_{pg}}L\ln(1+B_M). \tag{2.9}$$

A felfűtésre fordított hőt ezek különbsége adja, melyet átrendezve és felhasználva (2.6)-ot kapjuk, hogy:

$$\dot{Q}-\dot{Q}_e = 2\pi D\frac{k_g}{c_{pg}}L\ln(1+B_M)\left(\frac{B_T}{B_M}-1\right) = \dot{m}_F L\left(\frac{B_T}{B_M}-1\right). \tag{2.10}$$

A kifejezésből látszik, hogy amikor már a teljes bevitt hőmennyiség a párolgásra fordítódik ($\dot{Q} = \dot{Q}_e$), akkor érjük el a felfűtési szakasz végét, és kezdődik meg az elpárolgási szakasz. A csepp hőmérsékletének változását az idővel a következő egyenlet fejezi ki, melyben m a csepp tömege:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{Q}-\dot{Q}_e}{c_{pF}m} = \frac{\dot{m}_F L}{c_{pF}m}\left(\frac{B_T}{B_M}-1\right). \tag{2.11}$$

A csepp méretének időbeli változását az alábbi egyenlet átrendezésével kaphatjuk:

$$\dot{m}_F = \frac{dm}{dt},$$

$$2\pi D\frac{k_g}{c_{pg}}\ln(1+B_M) = \frac{d}{dt}\left(\rho_F\frac{\pi}{6}D^3\right) = \rho_F\frac{\pi}{2}D^2\frac{dD}{dt}.$$

Így:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{4k_g \ln(1+B_M)}{\rho_F D c_{pg}}. \tag{2.12}$$

Azt, hogy a felfűtési szakasz mennyi ideig tart, és a végén mekkora a csepp mérete és felületének hőmérséklete két módon is számíthatjuk. Az iteratív megoldás ugyan pontosabb eredményt ad vissza, azonban a számítás sokkal időigényesebb. Esetünkben, mint a gyakorlati példák többségében a közelítő módszer is megfelel, mivel az egyéb bizonytalanságok nagyobb mértékben terhelik az eredményeket, ellenben egy sokkal gyorsabban megvalósítható számításra ad lehetőséget. Ezért ez utóbbit választottam, a következőkben ennek a metódusát ismertetem. Először bevezetünk egy dimenziótlan hőáramot ($\bar{Q}$), melyet így definiálunk:

$$\bar{Q} = \frac{\dot{Q}-\dot{Q}_e}{\dot{Q}_0-\dot{Q}_{e0}}, \tag{2.13}$$

melyben $\dot{Q}_0$ a kezdeti pillanatban a csepphez jutó hőáram, $\dot{Q}_{e0}$ pedig ami ebből a tüzelőanyag egy részének elpárolgására fordítódik. $\bar{Q}$ értéke kezdetben 1, hiszen $\dot{Q} = \dot{Q}_0$ és $\dot{Q}_e = \dot{Q}_{e0}$, a felfűtési szakasz végén pedig 0, mivel $\dot{Q} = \dot{Q}_e$. $\bar{Q}$ értékét az idő függvényében, különböző tüzelőanyagokra és tüzelési paraméterekre vizsgálva megállapítható, hogy jó közelítéssel lineárisan csökkenő jelleget mutat (1-ről 0-ra). Emiatt a $\bar{Q} = 0{,}5$ átlagérték használata a további számításokban indokolható.

A csepp felfűtési ideje (t_{hu}) a következőképp becsülhető (2.5) és (2.11) egyenletek alapján:

$$t_{hu} = \frac{c_{pF}\rho_F c_{pg} D_{hu}^2 (T_{s_{st}}-T_{s0})}{12k_g \ln(1+B_M) L\left(\frac{B_T}{B_M}-1\right)}, \tag{2.14}$$

ahol D_{hu} a felfűtési szakaszra jellemző átlagos cseppátmérőt jelzi, mely a kezdeti cseppátmérő függvényében kifejezhető:

$$D_{hu} = D_0\left(1 + \frac{c_{pF}(T_{s_{st}}-T_{s0})}{2L\left(\frac{B_T}{B_M}-1\right)}\right)^{-0{,}5}, \tag{2.15}$$

Mivel a (2.15)-ben szereplő változókra meg kell adnunk, mely hőmérsékleten számítjuk őket:

- L, B_M, B_T, ρ_F esetére:

$$T_{shu} = T_{s_0} + \overline{T_s}(T_{s_{st}} - T_{s_0}),$$

ahol T_{shu} a felfűtési szakaszra érvényes átlaghőmérséklet, melyet $\bar{Q} = 0{,}5$ mellett kapunk és amelyre így a következő egyenlőség teljesül:

$$\frac{D\left(\frac{k_g}{c_{pg}}\right) L \ln(1+B_M)\left(\frac{B_T}{B_M}-1\right)}{D_0\left(\frac{k_g}{c_{pg}}\right)_0 L_0 \ln(1+B_{M0})\left(\frac{B_{T0}}{B_{M0}}-1\right)} = 0{,}5.$$

A D_{hu}/D_0 arányt (2.15)-ből nyerjük, 1 kezdeti értékről indulva pár lépéses iteráció után $T_{s_{hu}}$ érték megkapható.

- c_{pF} esetére:

$$T_{c_{pF}} = 0{,}5(T_{s_0} + T_{s_{st}}).$$

- c_{pg}, k_g esetére:

$$T_r = T_{shu} + \frac{T_{amb} - T_{shu}}{3}.$$

A felfűtési időszak átlagos párolgási konstansának számításához (λ_{hu}) használható a stacionárius esetben alkalmazott (2.2) egyenlet, az erre a szakaszra érvényes értékek behelyettesítésével. Ekkor a felfűtés végén a cseppméret ($D_{hu,end}$) az alábbiak szerint alakul:

$$D_{hu,end}{}^2 = D_0^2 - \lambda_{hu} t_{hu}. \tag{2.16}$$

2.2.3. Cseppélettartam és párolgási szám számítása

Miután kiszámítottuk a felfűtési időt (t_{hu}), és annak végén a cseppméretet ($D_{hu,end}$), a következő egyenlettel fejezhető ki a csepp élettartama (t_{ev}), tehát az az idő, míg a teljes térfogata elpárolog:

$$t_{ev} = \Delta t_{hu} + \frac{D_{hu,end}^2}{\lambda_{st}}. \tag{2.17}$$

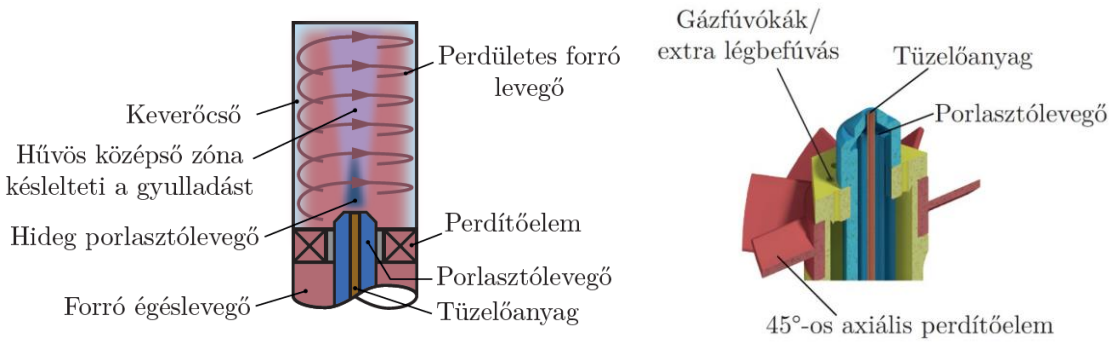
A tartózkodási idő (t_{res}) a PDA-val mért axiális sebességadatok ismeretében számítható, a párolgás idejének és ennek hányadosa pedig megadja a dimenziótlan ún. párolgási számot:

$$Ev = \frac{t_{ev}}{t_{res}}. \tag{2.18}$$

Amennyiben a párolgási szám kisebb egynél, az azt jelenti, hogy a párolgási idő kisebb a tartózkodási időnél, tehát a vizsgált folyadékcseppnek volt elég ideje teljesen elpárologni. Ha nagyobb egynél, akkor a vizsgált szakasz (esetünkben a kifúvástól mérve 15 mm-től 45 mm-ig) végén még maradnak folyadékcseppek, a párolgás nem maradéktalan.

2.3. A mérőrendszer bemutatása

A dolgozat során kiértékelt mérések és számítások egy előkeveréses égő párolgási viszonyait reprezentálják, tehát a keverékképzés a közegben még a lángfront előtt megtörténik. A vizsgált égőkialakítást az 1. ábra mutatja.



1. ábra. Az előkeveréses égő kialakítása [26].

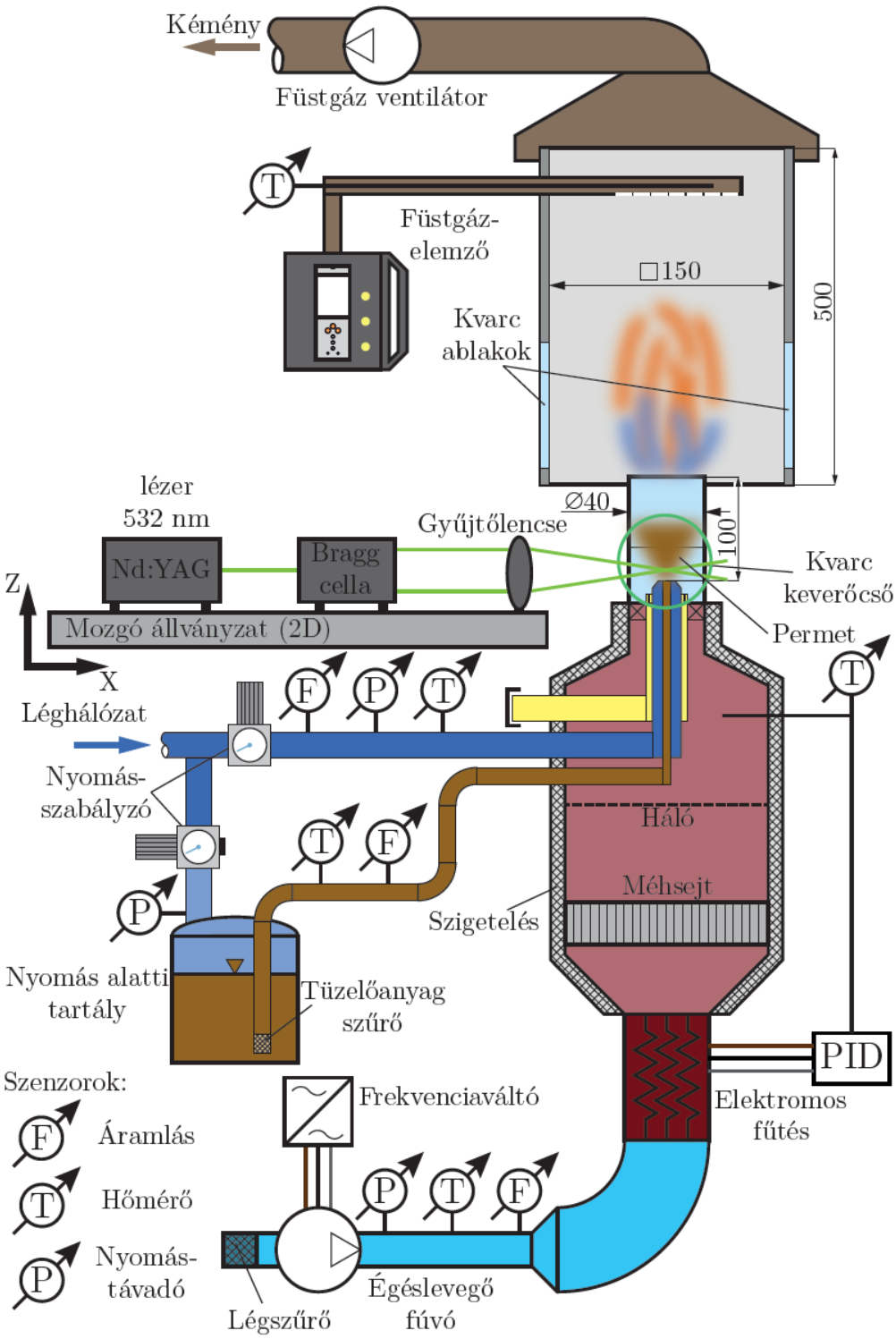
A kialakítás gáz és folyékony tüzelőanyag alkalmazását külön-külön és együtt is lehetővé teszi. A dolgozatban kizárólag folyékony tüzelőanyagok vizsgálatára kerül sor, ezek a jobb oldali ábrán látható barna, centrális vezetéken áramlanak ki, néhány m/s sebességgel. Ez elhanyagolhatóan kis érték az ezt körülvevő gyűrűs keresztmetszeten kiáramló porlasztólevegő pár 100 m/s-os sebességéhez képest, mely a porlasztócsúcson látható konfúzoron gyorsul fel. Az előmelegített égéslevegő a 45°-os axális perdítőelemeken keresztül áramlik ki, melyek a homogén keverékképzést segítik. Az alacsony nitrogén-oxid kibocsátást az eredményezi, hogy a hideg porlasztólevegő a porlasztáson kívül közel adiabatikusan tágulva körülveszi a tüzelőanyag áramot, így meggátolja a fokozott hőfelszabadulást a láng gyökerében, mely elsődleges oka az NO_x keletkezésnek a szegény keverékű égők esetén. A mérések során a levegőelőmelegítés hőmérsékletét két értéken vizsgáltuk: 250 és 300 °C-on, míg a porlasztólevegő 0,3, 0,45, 0,6 és 0,75 bar túlnyomás értékeket vett fel. A füstgázban mért oxigénszintet végig 3%-on tartottuk, ez 1,167-es légfeleslegtényezőt jelent. A 2. ábra részletesen ábrázolja az alkalmazott mérőeszközöket és berendezéseket, a hőmérsékletméréshez termoelemeket (jellemzően 100 °C felett) és Pt100-as ellenálláshőmérőket használtunk. A zöld körrel jelölt részt emeli ki az 1. ábra. Részletesebb leírást a tüzelőberendezésről [26] nyújt.

A lézeroptikai elven működő PDA berendezés zöld színnel látható az ábrán. A lézersugarak által kialakított interferencia csíkrendszer lehetővé teszi a folyamatosan érkező gömbszimmetrikus folyadékcseppek méretének és sebességének mérését. Az alkalmazott zöld lézer hullámhossza 532 nm, teljesítménye 90 mW volt. A mérési pozíciók axiálisan és radiálisan is változtak, ezeket az 1. táblázat mutatja. A mérőberendezés korlátait (mérhető sebességeket, cseppalakokat) figyelembe véve csak a kifúvástól számítva minimum 15 mm-nél vagy annál távolabb lévő pontokat mértünk, a permetfejlődésnek megfelelően egyre szélesebb radiális tartományban. Adott pontban a mintavételek maximális száma 35.000 lehetett, azonban a permet szélén az alacsony cseppsűrűség miatt a másodlagosan állított 8 másodperces korlát gyakrabban érvényesült. Bár a mozgató állványzat a tér három irányában tudott volna mozogni, mi ebből csupán két irányt használtunk ki. A hengeres keverőcső miatt az axiális irány egyértelmű, a másik pedig egy átmérő volt, amin lépkedtünk a mérések során különböző axiális távolságokban. Mivel a geometria forgásszimmetrikus, ezért elvileg egy sugár mentén is elég lett volna a vizsgálatokat elvégezni, azonban a porlasztó apró méretei következtében kialakuló kisebb eltérések miatt a globális permetkép is némi torzultságot mutathat, amit mindenképp fel szerettünk volna deríteni. A harmadik koordináta az előzőleg említett átmérőre merőleges, második átmérő lett volna, azonban a kvarcüveg keverőcső fénytörése miatt korrigálni kellett volna a cseppről visszaverődő és szóródó fény útját, hogy az érzékeny optikai beállítás esetén a fotodetektor szisztematikus mérési hiba nélkül tudja gyűjteni a fényjelet.

A vizsgált tüzelőanyagok közül kettő fosszilis, egy tisztán biodízel és egy keverék. Előbbiek a B7, mely a kereskedelemben kapható dízelolaj legfeljebb 7 V% biokomponenssel, a JP8 („Jet-Propellant 8”) kerozin, mely főként a repülésben használatos. A B100 30 V% használt sütőolaj (WCO) és 70 V% repceolaj keverékének észterezésével nyert biodízel, míg a B50 a B7 és B100 50-50 V% arányú keveréke.

Axiális távolság (mm)	Radiális mérési pontok száma (db)	Radiális osztás (mm)
15	15	1
25	21	1
35	17	1,5
45	21	1,5

1. táblázat. Mérési pontok pozíciója.



2. ábra. A mérőberendezés vázlata.

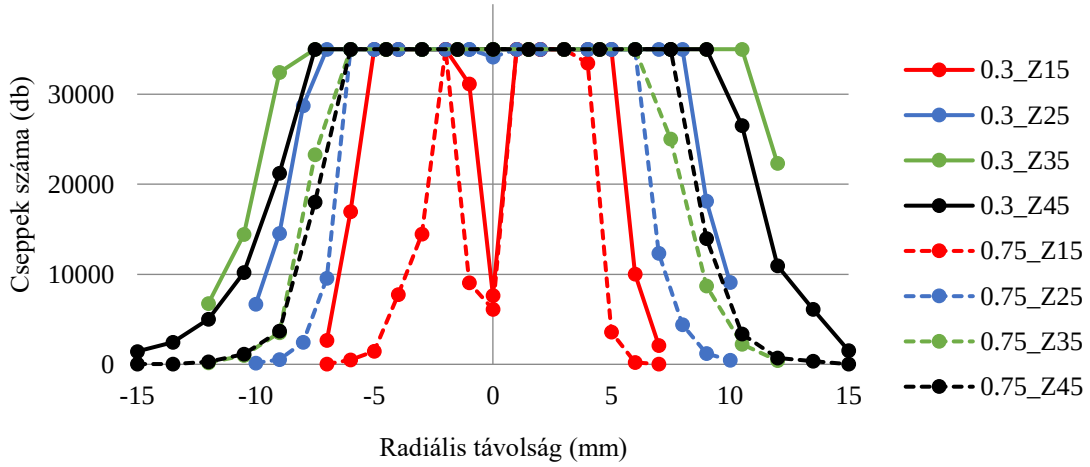
3. A PERMET GLOBÁLIS TULAJDONSÁGAINAK ÉRTÉKELÉSE

A fejezetben ismertetem a PDA által mért átlagolt adatokat a beállítások és a tüzelőanyagok függvényében. A diagramok jelölései minden esetben a következő logikát követik: A jelzés nélküli számok (0.3, 0.45, 0.6, 0.75) a porlasztónyomást (túlnyomást) jelölik bar-ban. A Z-t követő számok jelentik az axiális távolságot mm-ben, míg a T-t követő számok a hőmérsékletet Celsiusban.

3.1. Minták elemszáma, validációs rátája

Általános tendenciák

A PDA által a mért elemszámra állított korlátok a következők: elsődlegesen 35.000 csepp értékeinek lemérésekor haladhatunk tovább a következő pontra, azonban a permet szélein a kevés elemszám miatt ez jelentős időt venne igénybe, így ott maximálisan 8 másodpercig tartott a mérés. Az 1. táblázatban feltüntetett mérési pontokban mért cseppek számát mutatja a 3. ábra, B100 tüzelőanyagra.



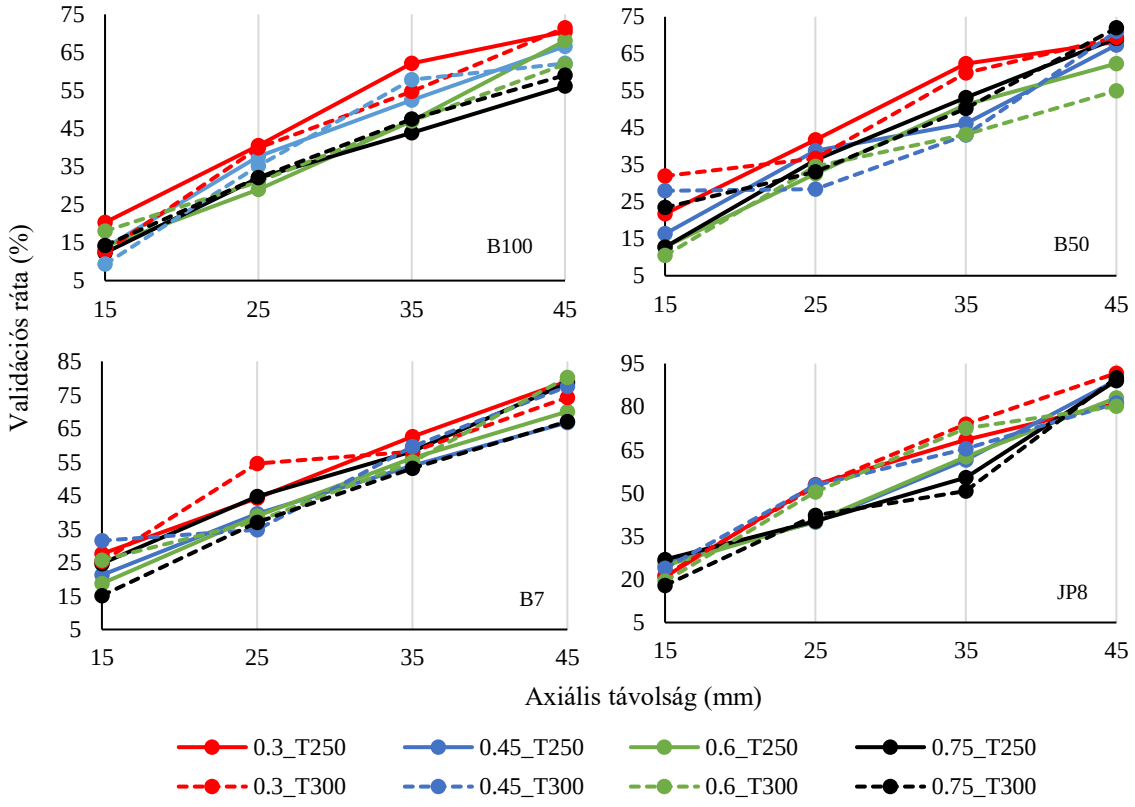
3. ábra. Minták elemszáma (B100 tüzelőanyag, 250 °C).

Látható, hogy a tengelytől kifelé haladva általánosan egyre kevesebb cseppet mérünk, hiszen közeledünk a permet széle felé. Az axiális távolság növekedésével a permet egyre jobban kiszélesedik, felvéve a kúp alakot, ez jól látható abból, hogy egyre nagyobb a széleken adott idő alatt mért cseppek száma, illetve egyre nagyobb radiális tartományban érjük el a maximum számot. A 35 és 45 mm-nél mért cseppszámok közel esnek egymáshoz azonos radiális távolságoknál, ez főleg a nagyobb porlasztónyomáson figyelhető meg. A tengelyben mért minta nagysága jelentősen lecsökken a környező adatokhoz képest, ennek oka feltehetően a perdületes légbevezetés okozta keverő hatás.

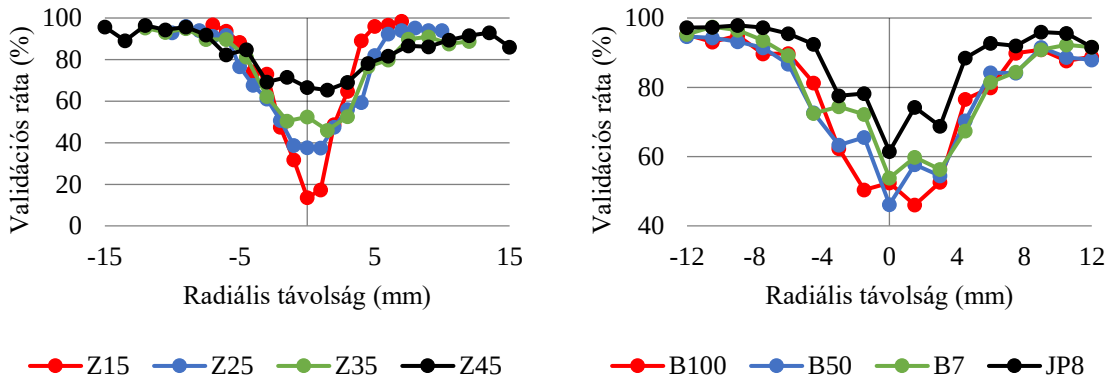
A PDA mérések jellemző tulajdonsága, hogy csak apró, közel gömbszimmetrikus cseppeket tudunk mérni. Azonban a permetben nem csak ez a geometria van jelen (különösen az elején, ahol a másodlagos porlasztás még folyamatban van), gyakran hosszúkás, szalagszerű folyadékrészek sodródnak az áramlásban. A validációs ráta mutatja meg, hogy az adott pontban beérkező minta hányadát értelmezte a PDA gömbszimmetrikusnak, azaz az egész mintának hányad részére érvényesek a kapott eredmények. A 4. ábra ábrázolja a validációs ráta változását az axiális távolság függvényében két tüzelőanyagra. Mivel a párolgás számítása a tengelyben mért cseppekre történik, ezért most is az $r = 0$ radiális távolság értékeit vizsgáltuk.

A görbék jellege mind a négy tüzelőanyagra hasonló. Megállapítható, hogy a validációs szám egyre növekszik az kifúvástól távolodva, tehát a folyadékrészek a permetben egyre inkább gömbszerűek, azonban még a 45 mm-es távolságnál is jelentősen elmaradnak a 100%-tól. A 15 mm és 25 mm-es axiális távolságoknál az értéke alacsonynak mondható. Ennek következménye, hogy az ebből a kiinduló állapotból számolt eredmények bizonytalansága magasabb lesz, hiszen a geometriájuk miatt figyelembe nem vett folyadékrészek a későbbi pontokban is jelen vannak, habár a kezdeti állapotuk nem jellemezhető a 15 mm-nél mért értékekkel. Ennek ellenére a számítás mégis a legelső távolságból indul ki, aminek két oka van: A későbbi pontokban a tüzelőanyag hőmérséklete csak nehezen lenne becsülhető, pedig ez mindenképp szükséges a számításokhoz. Másrészt egyéb korszerű méréstechnikai eszközök sem teszik lehetővé, hogy pontosabb képet, ezzel biztosabb eredményeket kapjunk.

A validációs ráta radiális változásáról az 5. ábra ad információt egy adott beállítás különböző kifúvástól mért távolságaira, B100 esetén, illetve adott távolságon a négy tüzelőanyagra. A bal oldali ábrán jól látszik, hogy egyre nagyobb axiális távolságok egyre magasabb értéket eredményeznek, mint azt már a 4. ábra kapcsán megfigyelhettük. Ugyanakkor a tengelyben és környékén alacsonyabb ráta jellemző, maximuma a permet szélén van. A jobb oldali ábra alapján a mérés JP8-ra a legpontosabb, ezt követi a B7. A legrosszabb B100 esetén, a B50 a B7 és a B100 között helyezkedik el.



4. ábra. Különböző tüzelőanyagokra mért validációs ráták.



5. ábra. Validációs ráta a radiális távolság függvényében.
B100_0.45_T250 (bal), T250_0.45_Z35 (jobb).

Porlasztónyomás hatása

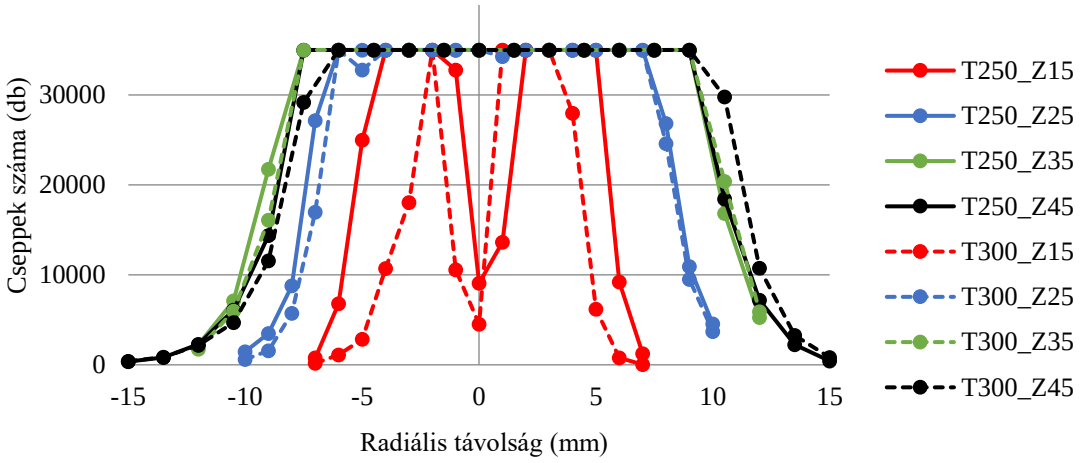
A 3. ábra mutatja, hogy a porlasztónyomás növelésével csökken a mért cseppek száma a permet szélső szakaszain, tehát a kúpszög is csökken, annak ellenére, hogy a nyomásnövelés fokozottabb turbulenciával jár. Ez összhangban van [27] eredményeivel. A megfigyelés a kifúváshoz közel (Z15) jelentősebb. A validációs rátákat tekintve nem minden tüzelőanyag esetén egyértelmű a porlasztónyomás változásának hatása, azonban általánosan állítható, hogy minél alacsonyabb az alkalmazott nyomás, annál magasabb a validációs ráta. Ennek oka, hogy a nagyobb cseppeket tartalmazó, ritkább és lassabb permetben könnyebben teljesülnek a méréshez szükséges feltételek, valamint a porlasztás a mérsékeltebb sebességviszonyoknak köszönhetően térben hamarabb végbemegy.

Hőmérséklet hatása

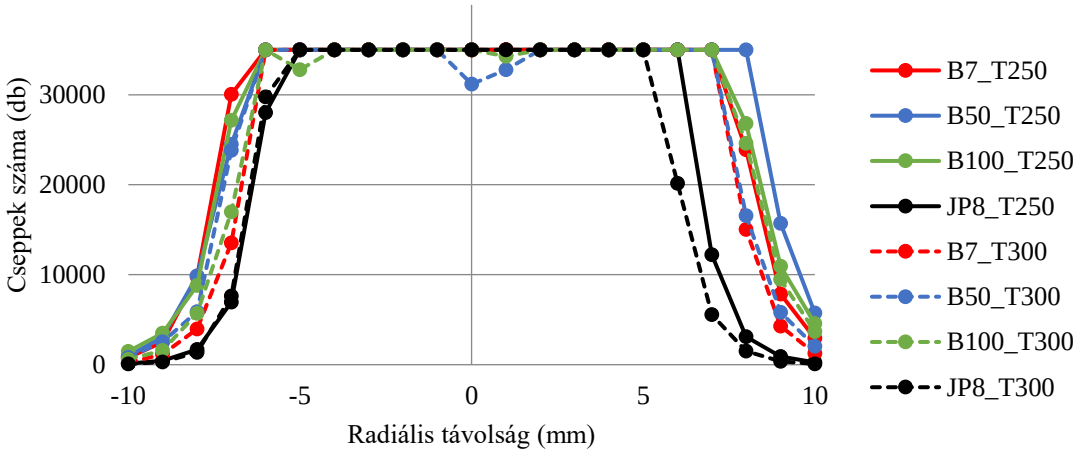
A levegőelőmelegítés hőmérsékletének hatása a 6. ábra és a 7. ábra segítségével válik értékelhetővé. A 6. ábra B100-ra vonatkozik, a cseppek száma különböző axiális távolságokban van feltüntetve, míg a 7. ábra a különböző tüzelőanyagokra vonatkozó adatokat ábrázolja. Látható, hogy habár B100-nál a kifúváshoz közel a magasabb hőmérséklet jelentősen csökkenti a cseppek számát, ez nagyobb távolságoknál kevésbé erősen érvényesül. (A többi tüzelőanyag diagramja 15 mm-es távolságban is mérsékeltebb összehúzódást mutat.) Mindazonáltal levonható a következtetés, hogy mind a négy tüzelőanyag esetében kisebb visszaesés látható az elemszámban a magasabb levegőelőmelegítési hőmérséklet hatására, ez figyelhető meg a 7. ábra kapcsán is. Ez összefüggésben lehet a párolgással, hiszen az magasabb hőmérsékleten intenzívebb, így a kis átmérővel rendelkező cseppek akár teljesen el is párologhatnak, amellett, hogy a viszkozitás csökkenése miatt még a porlasztás is finomabb permetet eredményezhet. A validációs ráta nagyságára a hőmérséklet nincs jelentős hatással.

Tüzelőanyagok összehasonlítása

A 7. ábra alapján elmondható, hogy kerozin (JP8) esetén a legszűkebb a tartomány, amelyben elérjük a maximális elemszámot, a másik három tüzelőanyagnál nincs szignifikáns eltérés. Ez azt jelenti, hogy a permet kúpszöge JP8 esetén a legkisebb, ez magyarázható a [27]-ben a permet kúpszögére megállapított empirikus összefüggéssel, tekintve, hogy a négy tüzelőanyag közül a kerozinnak a legkisebb a sűrűsége.



6. ábra. Minta elemszám: B100, 0.45 bar.



7. ábra. Minta elemszám: 0.45 bar, Z25.

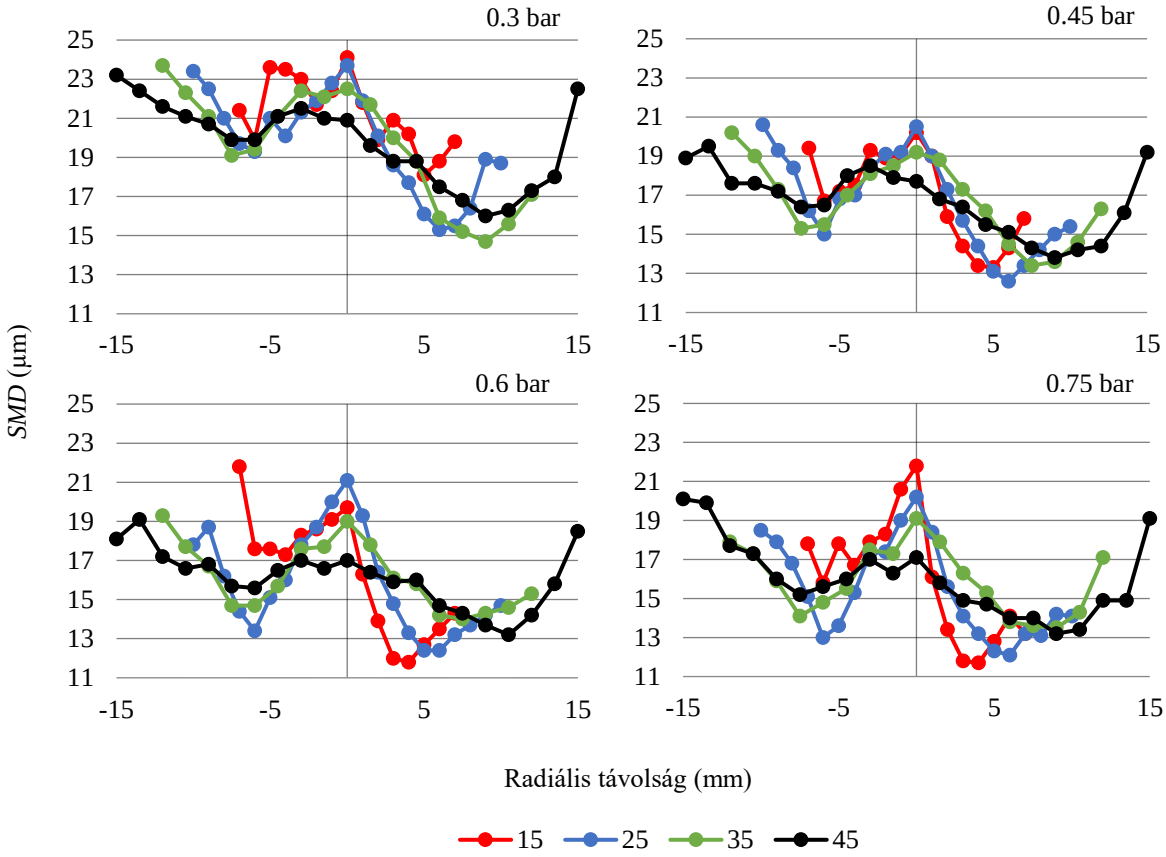
3.2. Cseppek Sauter középátmérője

A Sauter középátmérő (Sauter Mean Diameter, a továbbiakban *SMD*) a cseppek átlagos méretéről ad számunkra információt. Ez egy olyan származtatott cseppátmérő, mely a teljes adatsor (jelen esetben egy egyedi porlasztási beállítás és egy egyedi mérési pontban a mintavételezett cseppek összessége) térfogat/felület arányával egyezik meg.

Általános tendenciák

A cseppátmérő változását a permetfejlődés során a 8. ábra mutatja, B100 példáján keresztül. A többi tüzelőanyagra is hasonló görbesereget kapunk, így a megállapítások általánosan vonatkoznak a be nem mutatott esetekre is. A grafikon gyűrűs porlasztási szerkezetet, azaz három csúcsot mutat: kettőt a széleken, egyet pedig a forgástengelyen. Előbbit azok a nagy cseppek okozzák, melyek a folyadéksugár kezdeti aprózódása után hamar a peremvidékre sodródnak, ahol már kisebb az áramlási sebesség, így az aprózódásuk méret szerint hamarabb véget ér, mint a nagysebességű zónában haladó folyadékcsomagoké. A belső maximum az axiális távolság növekedésével folyamatosan ellaposodik, a „völgyek” megemelkednek, ezáltal egyenletesebb cseppméreteloszlást kapunk a radiális tartományra. A tengelybeli csúcs jelenléte a kezdeti szakaszokban arra utalhat, hogy ekkor még zajlik a másodlagos porlasztás, ennek a vége és a

párolgás együttes hatása simítja ki a görbét. Szinte minden esetben megfigyelhető, hogy a cseppátmérő a negatív radiális távolságok esetén nagyobb, ez kissé aszimmetrikus görbét eredményez. Ezt a fúvóka enyhe aszimmetriája okozza, ahogy azt a 2.3. alfejezetben említettem.



8. ábra. *SMD* a radiális távolság és a porlasztónyomás függvényében (B100, T250).

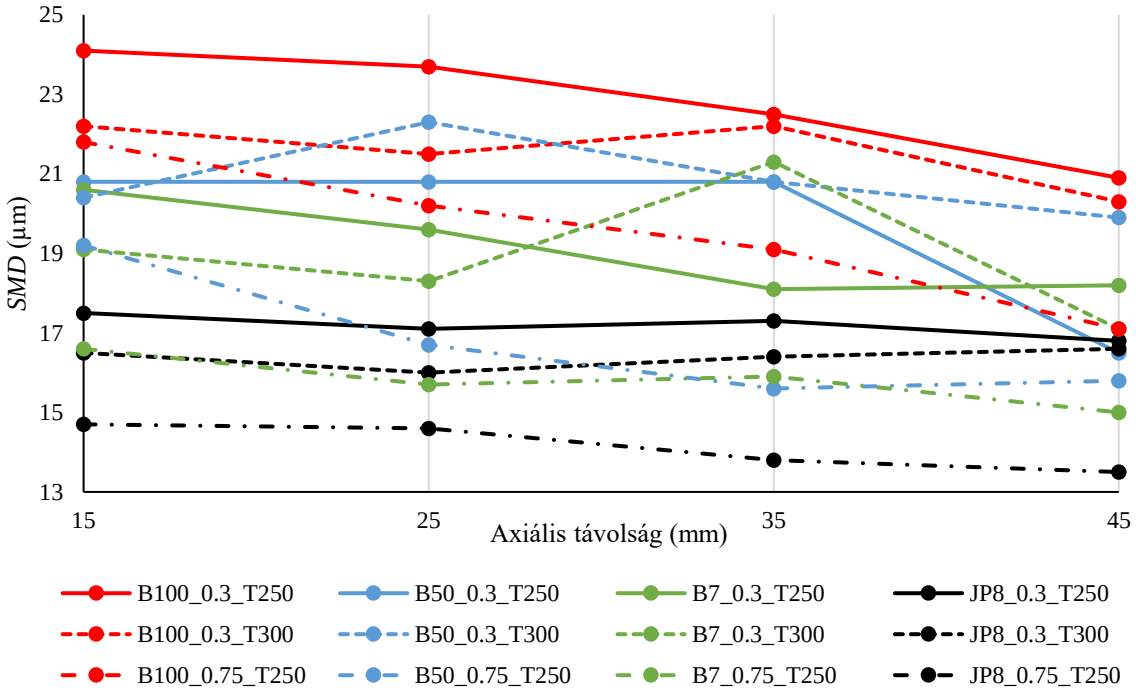
A 9. ábra a tengelyben mért átlagos cseppméreteket ábrázolja a kifúvástól számított távolság függvényében. Habár nem minden beállítás esetén egyértelmű, de a görbék összességét tekintve látható, hogy a cseppméretek csökkennek az axiális távolság növekedésével, összhangban az előzőekben tett állításokkal.

A porlasztónyomás hatása

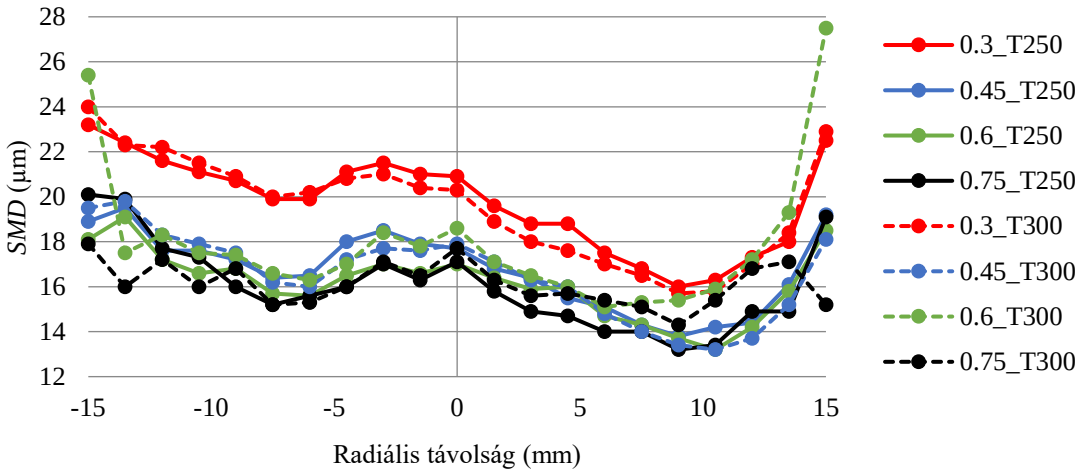
A porlasztónyomás változásának hatása szintén a 8. ábra és a 9. ábra alapján értékelhető. A nagyobb nyomások elméletileg kisebb cseppeket és egyenletesebb permetet alakítanak ki, habár a jelenlegi mérésekben feltehetően a komplexen zajló porlasztási, párolgási, áramlástani folyamatok, és az esetleges mérési bizonytalanságok miatt ez nem mindig érvényesül. Például nagy csökkenést láthatunk a méretben, ha a nyomást 0,3 barról 0,45-re emeljük, azonban efölött az értékek majdhogynem egybeesnek.

A hőmérséklet hatása

A 9. ábra és a 10. ábra alapján elmondható, hogy a levegőelőmelegítés hőmérsékletének nincs egyértelmű hatása az átlagos cseppméretre: a T300-as görbék közel helyezkednek el a T250-esekhez, ugyanakkor van, hogy felettük, van, hogy alattuk haladnak (akár egy beállítás vizsgálatakor is).



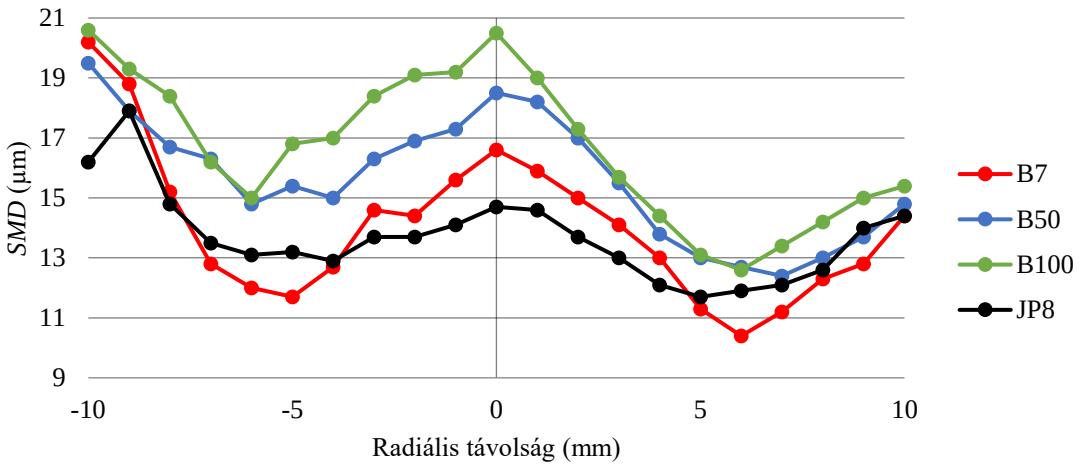
9. ábra. *SMD* alakulása a tengelyben.



10. ábra. *SMD* radiális alakulása: B100, Z45.

Tüzelőanyagok összehasonlítása

A cseppméret változásait négy különböző tüzelőanyagra a 9. ábra és a 11. ábra mutatja. A radiális eloszlásokat tekintve a B100 és a B50, illetve a B7 és a JP8 páronként közelebb helyezkedik el egymáshoz, különösen a permet szélein. A legnagyobb cseppméreteket B100 esetén figyelhetjük meg, ezt követi a B50, majd a B7 és a JP8. Ez a tüzelőanyagok viszkozitásával függ össze, mivel minél kisebb (JP8-nál a legkisebb, majd B7, B50, B100 a sorrend), annál jobb minőségű porlasztás tud megvalósulni, kisebb cseppekkel.



11. ábra. *SMD* radiális változása különböző tüzelőanyagokra (T250, 0.45 bar, Z25).

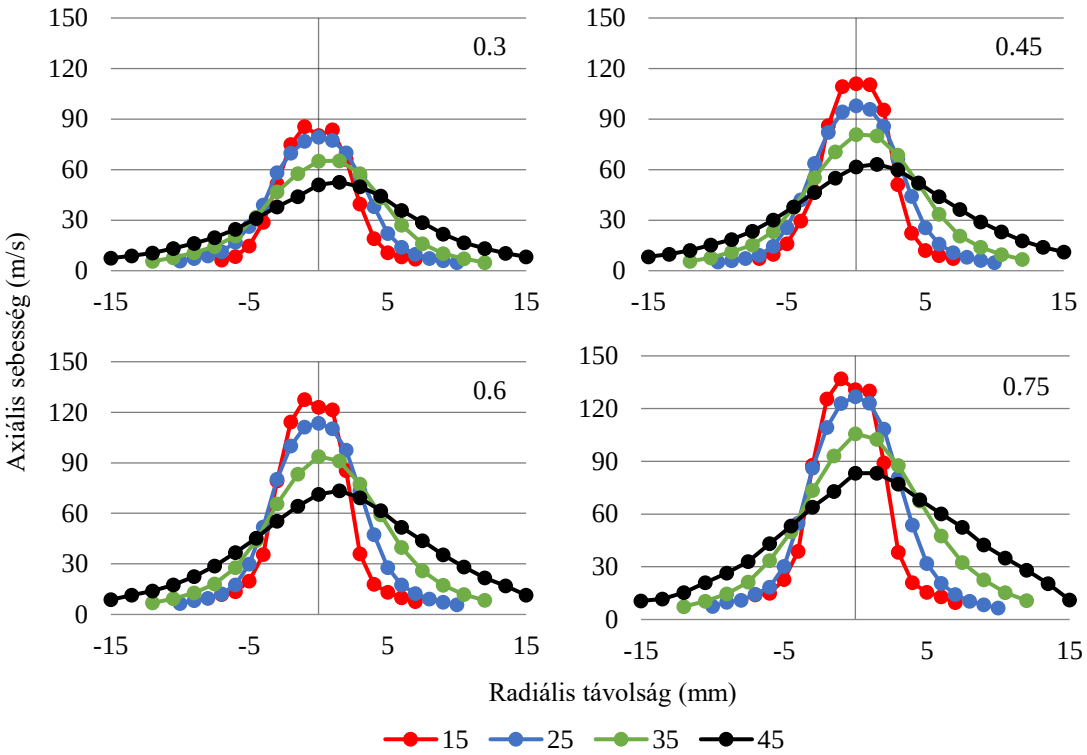
3.3. Permetben kialakuló sebességképek

Általános tendenciák

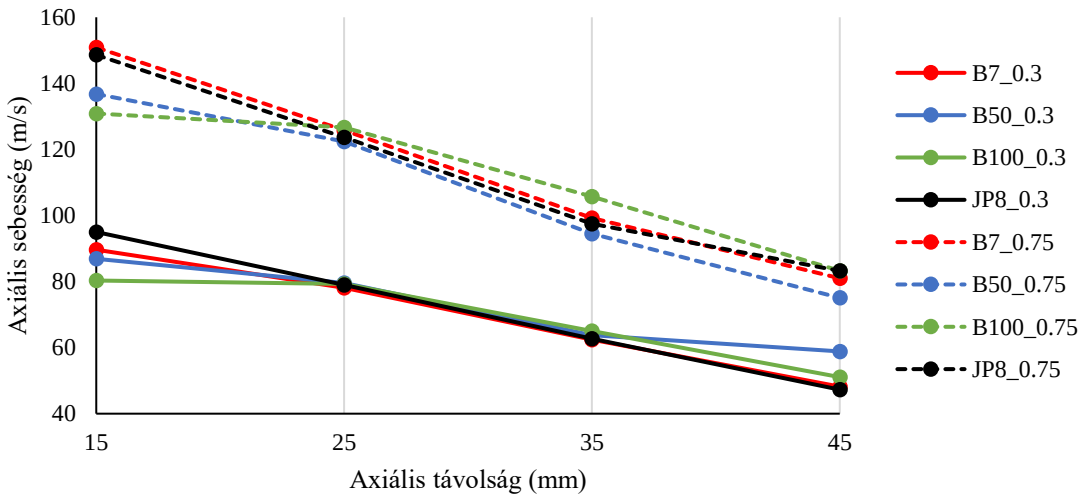
A 12. ábra az axiális sebesség (ezután sebesség alatt minden esetben axiális sebességet értünk) alakulását mutatja meg a radiális távolság függvényében, különböző porlasztónyomásokra, B100 esetén. A permet szabadsugárként viselkedik. A kezdeti nagy sebességek a tengelyben idővel jelentősen csökkennek, a perifériára eső cseppek szintén lassulnak, de kisebb mértékben, így 45 mm-es távolságban már egyenletesebb sebességkép alakul ki. A többi tüzelőanyagra is hasonló megállapítások tehetők. A tengelybeli sebességek lecsengését ábrázolja a 13. ábra is, a tartózkodási idő kiszámításának alapját ez és a többi beállításra ennek megfelelő görbe adta. B7 és JP8 esetén jó közelítésnek vehető a lineáris változás, míg B50 és B100 esetén a 15 és 25 mm-ek között mért sebességváltozás kisebb, mint a további szakaszokon mért, így ezek a görbék két lineáris szakaszra lettek bontva: az első egy rövidebb (Z15-Z25), laposabb egyenes, majd ezt követi a hosszabb (Z25-Z35), meredekebb szakasz. A tartózkodási idő kifejezéséhez egy egyszerű átalakítás vezetett, melyben a sebesség-hely diagramból hely-idő diagram lett. A számítás eredményeit az egyes beállításokra a 4. fejezetben ismertetem.

A porlasztónyomás hatása

A 12. ábra és a 13. ábra alapján a porlasztónyomás növekedése a sebesség növekedését eredményezi, főként a tengely környékén. Tehát az előbb megállapított sebességcsúcsok egyre inkább kimagaslanak, azonban a permet szélein csak kis változás figyelhető meg. Ezzel együtt nagyobb lassulás figyelhető meg a tengelyben, Z15-től Z45 felé haladva annál nagyobbak az eltérések a görbék között, minél magasabb az alkalmazott porlasztónyomás értéke. Azonban a Z45-ben mért sebességértékek nagyobb nyomás esetén még így is meghaladják a kisebb nyomásokra kapott adatokat. A különböző tüzelőanyagok közel egyforma sebességnövekedést mutatnak a porlasztónyomás növelésével.



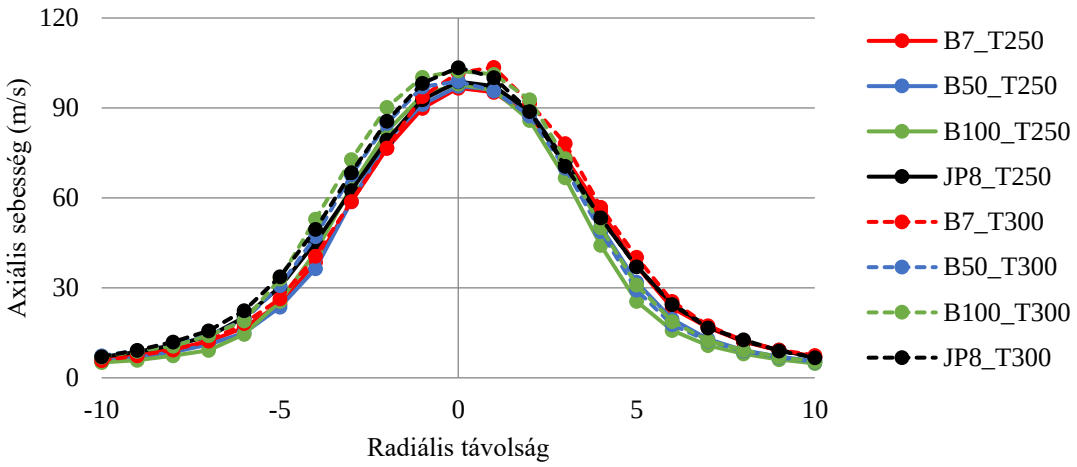
12. ábra. Axiális sebesség radiális eloszlása (B100, T250).



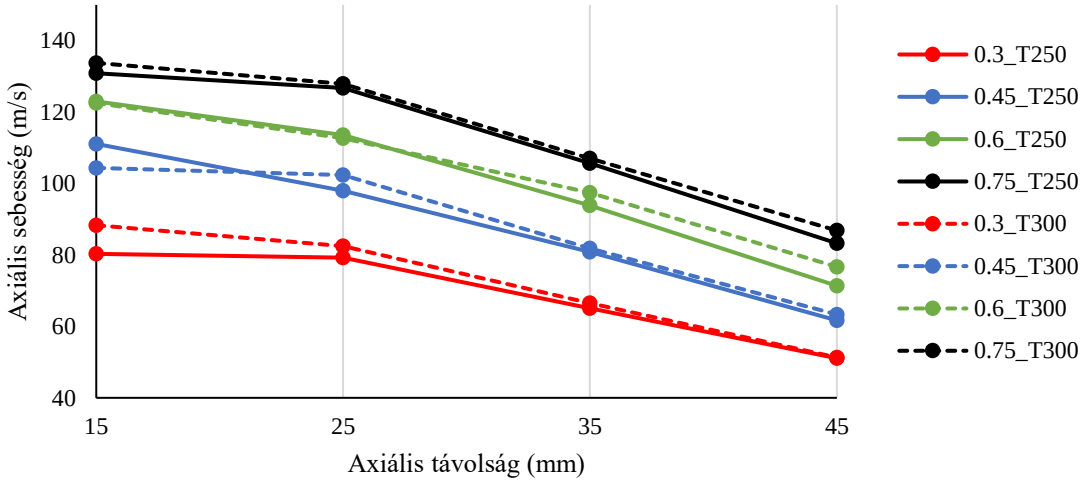
13. ábra. Axiális sebesség a permet tengelyében (T250).

A hőmérséklet hatása

A 14. ábra és a 15. ábra alapján elmondható, hogy a levegőelőmelegítés hőmérsékletének 50 °C-os változása nincs jelentős hatással a sebességekre, sem a radiális távolságok tartományában, sem adott radiális távolságra vett (r = 0) különböző axiális távolságoknál, egyik tüzelőanyagra sem.



14. ábra. Axiális sebességek radiális eloszlása különböző tüzelőanyagokra (0.45, Z25).



15. ábra. A hőmérséklet és a porlasztónyomás hatása az axiális sebességekre (B100).

Tüzelőanyagok összehasonlítása

A 13. ábra és a 15. ábra alapján különböző tüzelőanyagokra mind radiálisan, mind axiálisan közel egyformák a sebességlefutások, az egyetlen lényeges különbség a B100 esetére már ismertetett kezdeti kisebb meredekségű szakasz, valószínűleg B50 esetén is a tüzelőanyag B100 tartalma okozza ennek a megjelenését.

4. PÁROLGÁS SZÁMÍTÁSA

A fejezetben először bemutatom a párolgás számításához felhasznált bemeneti adatokat és az alapvető számítási megfontolásokat, valamint az alkalmazott közelítéseket. Ezt követi az egyenletes párolgás számítása: a felfűtési szakasz elhanyagolásával adódó eredmények értékelése, végül pedig a felfűtéssel együtt a teljes párolgási modell eredményei kerülnek ismertetésre és összehasonlításra a PDA által mért cseppeloszlásokkal. A jelölések megegyeznek a 3. fejezetben alkalmazottakkal.

4.1. Bemeneti adatok

A D^2-törvény alapján a párolgási görbe meredekségét a párolgási konstans értéke határozza meg, mind az egyenletes párolgás, mind a felfűtés szakaszában. Ennek számításához számos anyagjellemzőre van szükség, ezeket foglalja össze a 2. táblázat. A második oszlop *p* értékei az adott jellemző polinomiális alakban felírt hőmérsékletfüggésének az állandóit adják meg, a következő módon értelmezhetők, ha *y*-nal jelöljük az adott anyagjellemzőt:

$$y(T) = \sum_{i=0}^{n} p_i T^i.$$

A második oszlop alján, *A-E* jelöléssel az Antoine egyenlet állandói láthatók, mely egyenlet a következő alakban írható fel:

$$\log_{10} P = A + \frac{B}{T} + C \cdot log_{10} T + D \cdot T + E \cdot T^2.$$

Itt *P*-t Hgmm-ben kapjuk, így átváltás volt szükséges. Mivel mind a négy vizsgált tüzelőanyag összetétele nagyon változatos lehet és nem állt módomban pontosan meghatározni a komponenseket és arányukat, így az alábbi közelítéseket alkalmaztam:

A dízelolajat normál-dodekánnal, a B100-at metil-oleáttal közelítettem, mivel tiszta anyagok révén könnyebben fellelhetők a jellemzőik a szakirodalomban, és korábbi kutatások, számítások alkalmával megfelelően helyettesítették ezeket a tüzelőanyagokat [28]. (B100 alatt a 30% használt sütőolaj (WCO) és 70% repceolaj keverékéből észterezéssel előálló biodízelt értjük. Az elegyet, mint tüzelőanyag mintát egy magyarországi gyártótól kaptuk kutatási célra, aki pontosan ilyen biodízelt kever hozzá a dízelolajhoz a B7-es követelmény teljesítése érdekében. JP8-ra nem találtam hasonlóan jól használható, egykomponensű helyettesítő anyagot, azonban [21]-ben megtalálhatók egy másik, hasonló közelítő összegképlettel rendelkező kerozin, a JP5 adatai és összefüggései, így ezeket használtam fel. A táblázatban *-gal jelölt, illetve üresen hagyott értékek számítása nem a B7 és B100 esetén alkalmazott képletekkel zajlott, helyette a következőket használtam [21] alapján:

$$c_{pv}(T) = (363 + 0{,}467T)(5 - 0{,}001\rho_{F0})$$

$$k_v(T) = 0{,}001[13{,}2 - 0{,}0313(T_{bn} - 273)]\left(\frac{T}{273}\right)^n$$

$$n = 2 - 0{,}0372\left(\frac{T}{T_{bn}}\right)^2$$

$$c_{pF}(T) = (760 + 3{,}35T)/(0{,}001\rho_F)^{0{,}5}$$

$$P_{Fs}(T_s) = \exp\left(A - \frac{B}{T_s - 43}\right)$$

Az utolsó egyenlet az Antoine egyenlet egy speciális formája, melyet Clausius-Clapeyron egyenletnek is neveznek. JP8 esetén egyedül a folyadék sűrűségének függvénye alapul a ténylegesen alkalmazott kerozin mérési adatain.

Az alkalmazható hőmérséklettartományok minden összefüggés esetén ellenőrizve lettek, a vizsgált hőmérsékletek minden esetben beleesnek azokba. A B50 bemeneti adatait nem tartalmazza a táblázat. Ennek oka, hogy többkomponensű anyagok keverékeként a karakterisztikus jellemzők nem írhatók le egy számértékkel, közelítésként ezért a B7 és B100 tüzelőanyagok anyagjellemzőit átlagoltam, hiszen a B50 ezek 50-50 térfogatszázalékú keverékéből áll elő. A felfűtési szakaszra a párolgási konstans számítása ez alapján történt, azonban a stacionárius szakaszra a [29] forrás vizsgálatai alapján megállapítható, hogy körülbelül a csepptérfogat felének elpárolgásáig az anyagjellemzők jobban követik B7 jellemzőinek függvényét, ezt követően pedig B100-ét, így a stacionárius párolgási konstansok értékének felvételét is e két szakaszra bontottam (ez látható később a 4. táblázatban is).

		B7 (normál-dodekán)	B100 (metil-oleát)	JP8 (JP5*)
M_F (kg/kmol)		177,338	296,494	160,96
L_{Tbn} (J/kg)		256160	225342	266500
T_{cr} (K)		658,1	764	684,8
T_{bn} (K)		489,3	635,958	495,3
ρ_F (kg/m^3)	$p0$	977,571	1181,299	1008,2
	$p1$	-0,775	-1,185	-0,744
	$p2$	-	$4{,}684 \cdot 10^{-4}$	-
c_{pv} (J/kgK)	$p0$	-47,084	-18,812	-
	$p1$	6,715	6,004	-
	$p2$	-0,004	-0,003	-
	$p3$	$7{,}691 \cdot 10^{-7}$	$7{,}195 \cdot 10^{-7}$	-
k_v (W/mK)	$p0$	-0,023	-0,014	-
	$p1$	$1{,}045 \cdot 10^{-4}$	$6{,}448 \cdot 10^{-5}$	-
	$p2$	$-3{,}849 \cdot 10^{-9}$	$-1{,}801 \cdot 10^{-9}$	-
c_{pF} (J/kgK)	$p0$	1458,111	1842,023	-
	$p1$	1,684	-1,897	-
	$p2$	0,003	0,009	-
Antoine egyenlet	A	-5,653	79,301	*15,16
	B	-3469,8	-8318	*4768,77
	C	9,027	-22,989	-
	D	-0,023	$1{,}407 \cdot 10^{-9}$	-
	E	$1{,}124 \cdot 10^{-5}$	$3{,}160 \cdot 10^{-6}$	-

2. táblázat. Felhasznált anyagjellemzők [29,30].

A permetet körülvevő levegő (környezeti levegő) jellemzői szintén befolyással vannak a párolgási folyamatra, így ezeket is meg kell határozni, ezt foglalja össze a 3. táblázat, a 2. táblázathoz hasonló felépítéssel.

Környezeti (levegő) adatok					
c_{pa} (J/kgK)	$p0$	$p1$	$p2$	$p3$	$p4$
	1,068	$5{,}05 \cdot 10^{-4}$	$1{,}341 \cdot 10^{-6}$	$-1{,}025 \cdot 10^{-9}$	$2{,}68 \cdot 10^{-13}$
k_a (W/mK)	$p0$	$p1$	$p2$		
	0,007	$7{,}142 \cdot 10^{-5}$	$-8{,}125 \cdot 10^{-9}$		
M_A (kg/kmol)	28,97				
P_{amb} (kPa)	101,33				
T_{amb} (K)	523,15 / 573,15				
T_{s0} (K)	298,15				

3. táblázat. Környezeti adatok.

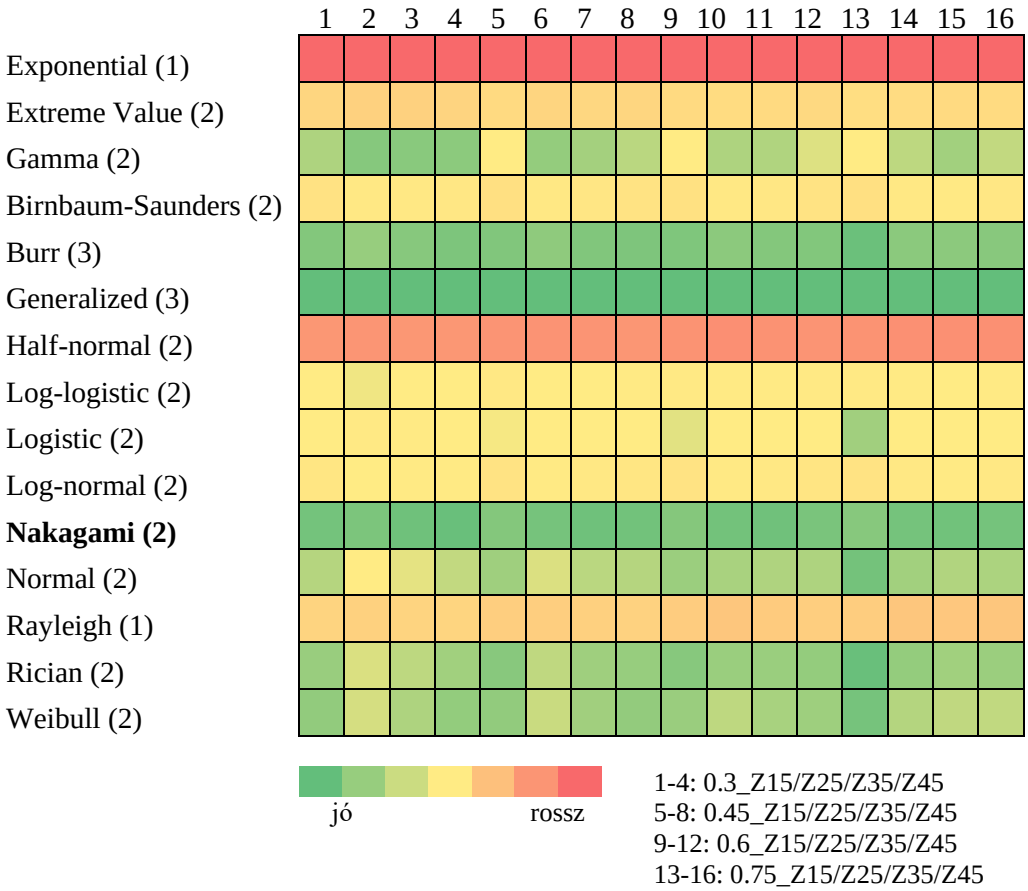
A 3.3. fejezetben ismertetett módon számított tartózkodási időket a 4. táblázat tartalmazza. A különböző beállítások mellett a 25, és 35 mm-es axiális távolságok eléréséig eltelt idők is meg lettek határozva, ugyanis a modell értékelése során az ezeken a helyeken kialakult cseppeloszlás is szerepet játszik. A párolgást a permetet leginkább jellemző helyen, a tengelyben vizsgálom, így mind a tartózkodási idők, mind a később ismertetett cseppeloszlások az $r = 0$ radiális távolságnál érvényes értékek.

		B7			B50			B100			JP8		
		Z25	*Z35*	*Z45*	*Z25*	*Z35*	*Z45*	*Z25*	*Z35*	*Z45*	*Z25*	*Z35*	*Z45*
250 °C	*0.3 bar*	0,121	0,267	0,449	0,120	0,255	0,411	0,125	0,264	0,437	0,115	0,256	0,439
	0.45 bar	0,094	0,208	0,355	0,096	0,211	0,357	0,096	0,209	0,351	0,091	0,202	0,344
	0.6 bar	0,073	0,164	0,284	0,085	0,184	0,308	0,085	0,182	0,305	0,082	0,180	0,302
	0.75 bar	0,072	0,159	0,267	0,077	0,168	0,284	0,078	0,164	0,271	0,073	0,159	0,266
300 °C	*0.3 bar*	0,115	0,255	0,438	0,118	0,252	0,425	0,117	0,252	0,422	0,112	0,247	0,420
	0.45 bar	0,093	0,206	0,35	0,097	0,209	0,349	0,097	0,205	0,343	0,086	0,192	0,327
	0.6 bar	0,078	0,174	0,296	0,081	0,177	0,301	0,085	0,182	0,299	0,074	0,164	0,278
	0.75 bar	0,072	0,157	0,264	0,075	0,162	0,271	0,076	0,162	0,265	0,067	0,148	0,248

4. táblázat. Tartózkodási idők (s).
(Oszloponként skálázva: piros – nagy érték, zöld -kis érték)

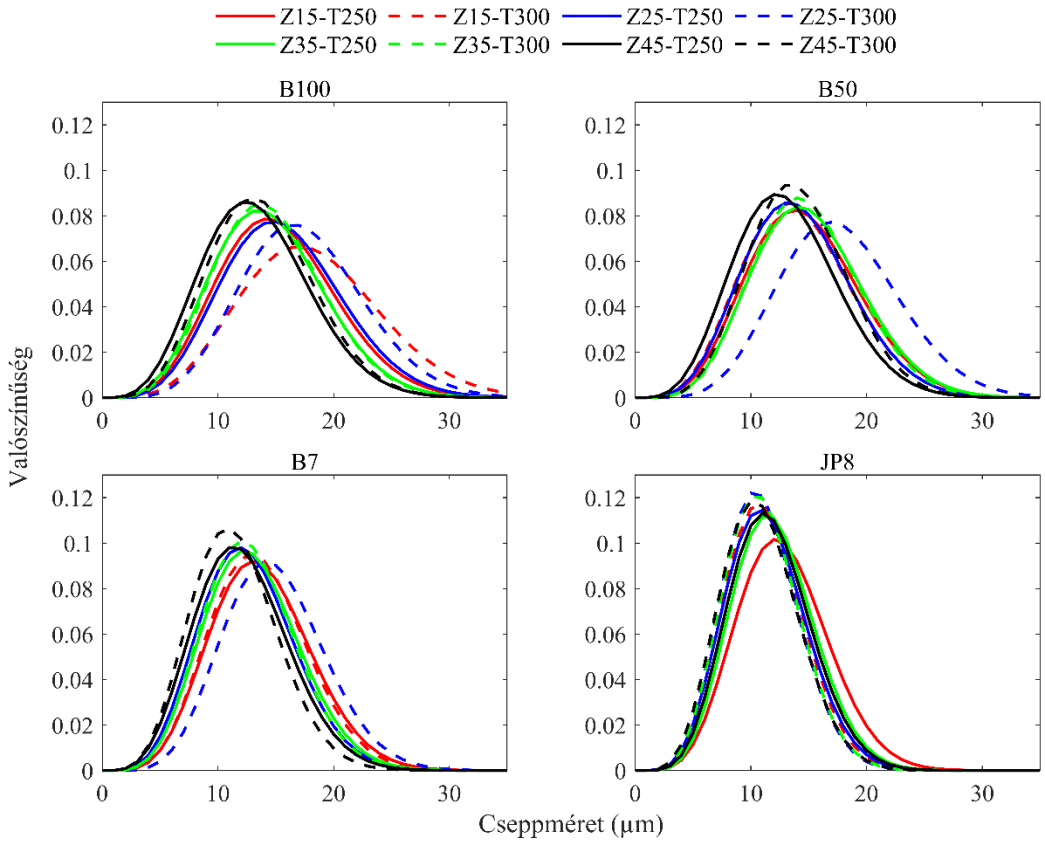
A párolgás számításához szükséges a kezdeti, a kifúvástól 15 mm-re mért cseppeloszlások ismerete, ezt veszem a modell kiinduló adatsorának. A felfűtési szakasz ugyan megkezdődik már a kifúvástól, azonban a folyamat a párolgás szempontjából elhanyagolásra kerül a nagy sebességek és kis tüzelőanyag-hőmérsékletek miatt, ami a porlasztó szabadsugár adiabatikus expanziója során való visszahűlésének az eredménye. Emiatt a 15 mm-nél mért cseppek felületi hőmérsékletét 25 °C-ra becsültem. A cseppeloszlások normalizált hisztogramjaira valószínűségi sűrűségfüggvények (PDF, azaz probability density function) illeszthetők, melyekkel az eloszlások matematikailag könnyebben kezelhetővé válnak. Az optimális függvény megtalálása érdekében 15 sűrűségfüggvényt illesztettem az eloszlásokra, és értékeltem őket jóságuk szerint (az ún. negative loglikelihood értékük alapján), ez látható az 5. táblázatban. A bal oldali oszlopban a tesztelt PDF neve és paramétereinek száma (zárójelben) van, a további oszlopok a jelmagyarázat szerinti különböző beállításoknak felelnek meg. Szemléltetésre relatív színskálát tüntettem fel az értékek helyett, a pirossal jelölt területek adják a legrosszabb, a zöldek a legjobb illeszkedést. A táblázat itt B100 tüzelőanyagra van feltüntetve, 250 °C-os levegőelőmelegítés mellett, azonban sem a hőmérséklet, sem a tüzelőanyag fajtája nem befolyásolja jelentősen a

kapott eredményeket, a jósági sorrend ugyanaz a PDF-ek között. A 3 paraméteres PDF-ek közül a Generalized Extreme Value (GEV), a kétparaméteresek közül a Nakagami emelkedik ki, összhangban a [17] forrás eredményeivel. Mivel nem tapasztalható nagy eltérés a két PDF illeszkedése között, ezért az egyszerűbb, kétparaméteres Nakagami függvényre esett a választásom a további eredménynek bemutatásához.



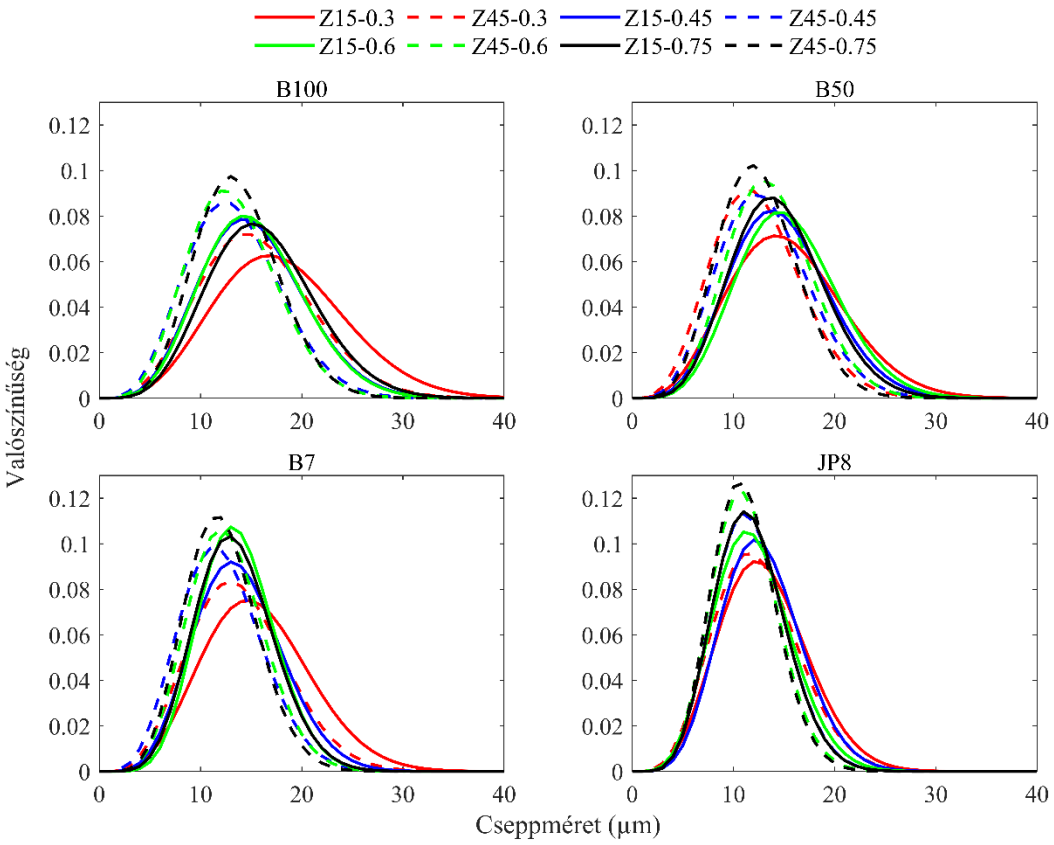
5. táblázat. Valószínűségi sűrűségfüggvények illesztése.

A PDA segítségével mért cseppeloszlásokat ábrázolja a 16. ábra és a 17. ábra. Előbbinél 0,45 bar porlasztónyomás mellett vizsgáltuk a beállításokat, utóbbinál 250 °C-os hőmérsékletet rögzítettünk. A görbék kerozin esetén mutatják a legnagyobb csúcsot, és a legszorosabb összetartást, itt a legkevésbé érzékeny a cseppméret a beállítási paraméterekre. A cseppátmérő legvalószínűbb tartománya 10-12 µm, a legnagyobb cseppek 22-23 µm nagyságúak. A dízelolaj és a biodízelek esetén az eloszlás ellaposodik, az átmérőtartomány kiszélesedik, különösen B100 esetén. A B50 itt is B7 és B100 közti viselkedést mutat, eredetének köszönhetően. Az axiális távolság növelésével az eloszlások maximumai megnőnek és a kisebb cseppméretek felé mozdulnak el. Ez azt jelenti, hogy a párolgási folyamat során a nagyobb cseppek erőteljesebben fogynak, mint ahogy a kicsik eltűnnek, hiszen fordított esetben, ha az apró cseppek gyorsabban elpárolognának, minthogy a nagyokból kicsi legyen, úgy pont a másik irányba tolódna a maximum. Tehát például B100 esetén míg a kifúvástól 15 mm távol legnagyobb eséllyel 15 µm-es cseppet mérünk, addig 45 mm-nél ez az érték már lecsökken 12 µm-re, és a valószínűsége is nő.



16. ábra. Mért cseppeloszlások I. (0,45 bar).

A levegőelőmelegítés hőmérsékletének hatása főként kis távolságokban érvényesül, ekkor egy szimmetrikusabb és laposabb görbét hoz létre, azaz a cseppméretek egyre hasonlóbb valószínűséggel fordulnak elő. A porlasztónyomás növekedése is enyhén a kisebb tartományok felé tolja az eloszlást, azonban a maximumot erőteljesen megemeli: a cseppméretek szűkebb tartományban fognak alakulni.



17. ábra. Mért cseppeloszlások II. (T250).

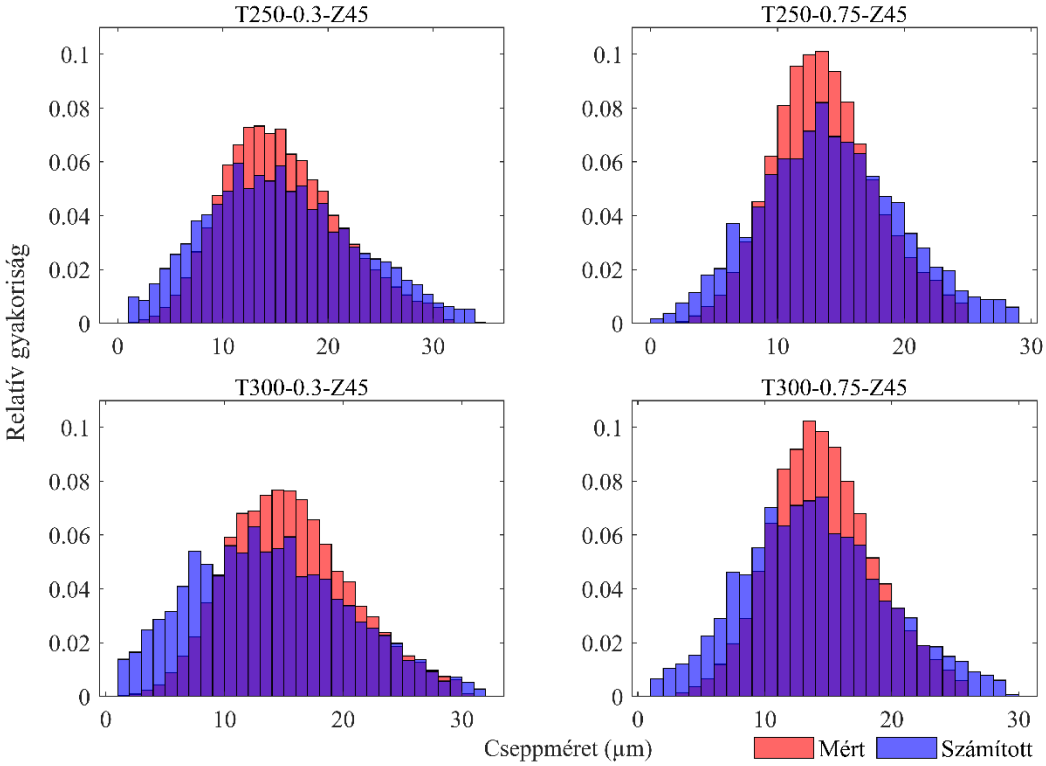
4.2. Párolgás modellezése csak egyenletes párolgás figyelembevételével

Az 6. táblázat a 2.2. fejezet összefüggéseivel az imént bemutatott bemeneti értékekből számolt párolgási konstansokat mutatja az egyenletes párolgási szakaszra.

	B7	**B50**	**B100**	**JP8**
λ_{st} (T_{amb}=250 °C) [m²/s]	$2{,}834 \cdot 10^{-7}$	$\sqrt[3]{0{,}5}\,D$ -ig λ_{st} (B7),	$2{,}584 \cdot 10^{-7}$	$2{,}467 \cdot 10^{-7}$
λ_{st} (T_{amb}=300 °C) [m²/s]	$3{,}080 \cdot 10^{-7}$	utána λ_{st} (B100)	$2{,}949 \cdot 10^{-7}$	$2{,}689 \cdot 10^{-7}$

6. táblázat. Párolgási konstansok számított értékei.

A legmagasabb értéket dízelolajra kaptuk, a közelítő megoldás miatt ezt követi a B50, majd a B100 és a kerozin. A magasabb levegőhőmérséklet fokozza a párolgást, azaz a párolgási konstans értéke is megnő. A felfűtési szakasz elhanyagolásával, csak stacionárius párolgás számításával nyert eredményeket hasonlít össze a 18. ábra-20. ábra. A hisztogramokon kék szín jelöli a modell alapján létrejövő cseppeloszlásokat, piros pedig a PDA segítségével mért, ténylegesen kialakuló eloszlásokat. (Előbbi enyhén áttetsző, hogy a takarásban lévő részek is értékelhetők legyenek.) Tökéletes párolgási modell esetén a hisztogramoknak egybe kéne esnie, azonban a kapott eredmények ettől jelentősen eltérnek, mutatva, hogy fejlettebb modellekre van szükségünk, valamint a kezdeti alacsony validációs ráta eredményeképp figyelmen kívül hagyott folyadékstruktúrák számottevően befolyásolják a permet statisztikai jellemzőit.

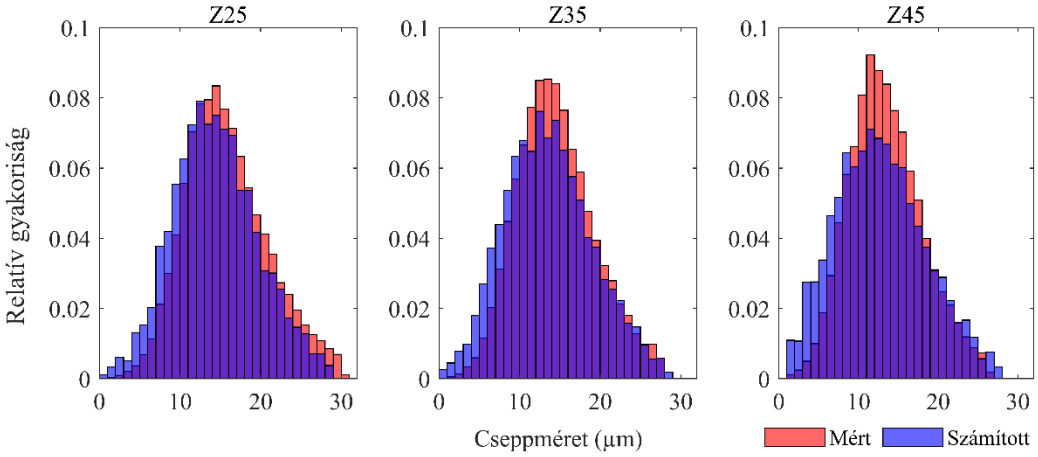


18. ábra. B100 cseppeloszlásai stacionárius párolgást követően.

A 18. ábra mutatja, hogy a számított cseppméretek sokkal laposabb függvényt rajzolnak ki, mint ahogy az a valóságban alakul. Egyrészt a 10 és 20 µm között a tartomány közepe felé alakuló maximum értéke enyhén balra csúszik, másrészt nem vesz fel olyan magas relatív gyakorisági értéket, mint a mért. A kisebb cseppméretek felé tolódás összhangban van az 4.1. fejezetben megállapított elvárásokkal, azonban ez itt túlzott, a mérettartomány szélén, a kis átmérőknél a modell több cseppel számol, ez csökkenti a középső értéket is. A kb. 20 µm-nél nagyobb cseppek változását a párolgással jól követi a modell. Tehát levonható a következtetés, hogy a modell hibáját leginkább a kis cseppek számának túlbecslése dominálja. Ez összefüggésben lehet azzal, hogy az általam kiindulónak vett állapotokban 15 mm-él még jelen lehet másodlagos porlasztási folyamat, mely tovább aprózza a cseppeket, amik ezáltal gyorsabban képesek a teljes elpárolgásra, ezzel csökkentve a számukat. Mindemellett lehetséges, hogy a kisebb cseppek esetén felerősödnek olyan egyéb hatások, melyekkel a modell nem számol, közülük a legfontosabb a permet cseppjeinek interakciója párolgás szempontjából.

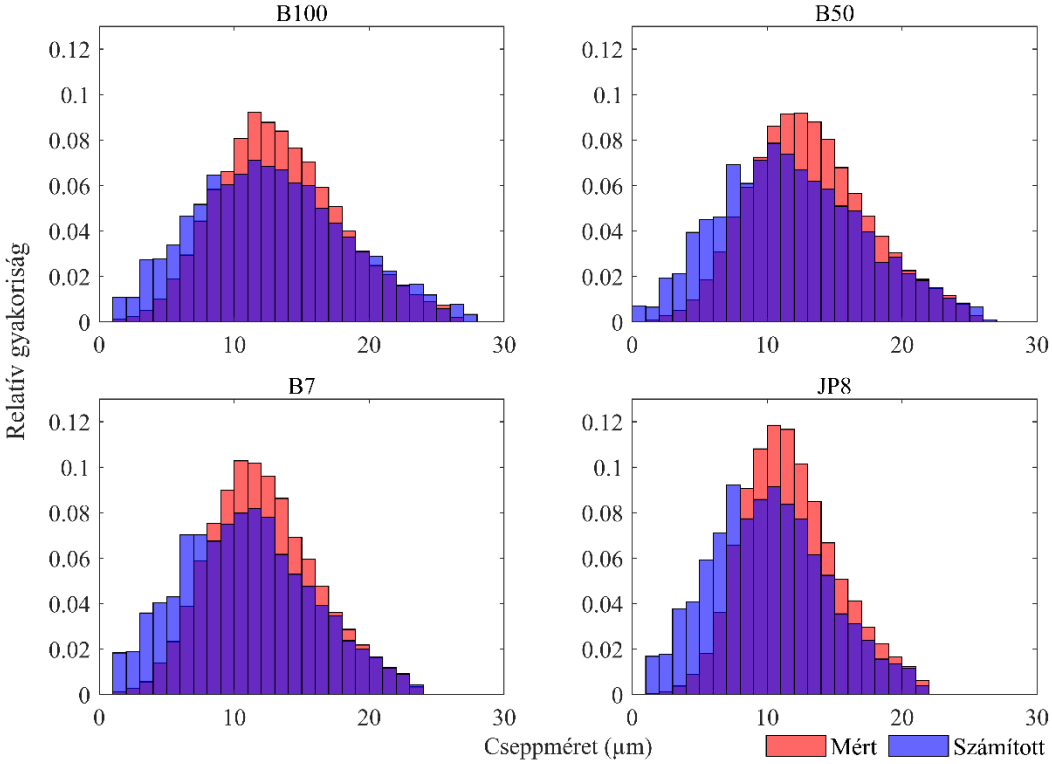
A porlasztónyomás növelésének hatására élesebb maximum alakul ki, mind a bemeneti eloszlásban, mind a mértben, azonban a modell ezt még kevésbé képes lekövetni. A hőmérséklet növelésének hatására a számított eloszlás a kisebb méretek felé tolódik, így a nagyobb átmérőjű cseppekre egy pontosabb eredményt kapunk, azonban alatta rosszabbat.

A 19. ábra ábrázolja a mért és számított értékek eltérésének fokozatos evolúcióját a kifúvástól mért távolság növelésével. Látható, hogy a modell jól működik, ha csak rövid szakaszokra alkalmazzák (10 mm), azonban a hiba az első pontban bemenetként tovább adódik a második pont számításába, mely ezáltal még nagyobb eltéréseket mutat.



19. ábra. B100 cseppeloszlásai különböző axiális távolságokban. (T250-0.45-stacionárius).

Végül a 20. ábra mutatja a modell megfelelőségét a különböző tüzelőanyagokra. A legpontosabb eredményt B100 esetén kaptuk, ebben szerepet játszik a korábban ismertetett tény, miszerint erre a tüzelőanyagra laposabb kezdeti eloszlás jellemző, így a kisebb kicsúcsosodást és szélesebb tartományt jól le tudja követni a modell. Ugyanakkor ez nem mondható el a JP8 esetére, ahol a legnagyobb eltéréseket látjuk a hisztogramon. Az értékelésnél nem szabad megfeledkezni arról, hogy ezek az ábrák elhanyagolják a felfűtési időszak hatását, mely jelentős befolyásoló tényező. A teljes párolgás vizsgálatát a következő fejezet mutatja be.



20. ábra. Különböző tüzelőanyagok stacionárius párolgása (T250-0.45-Z45).

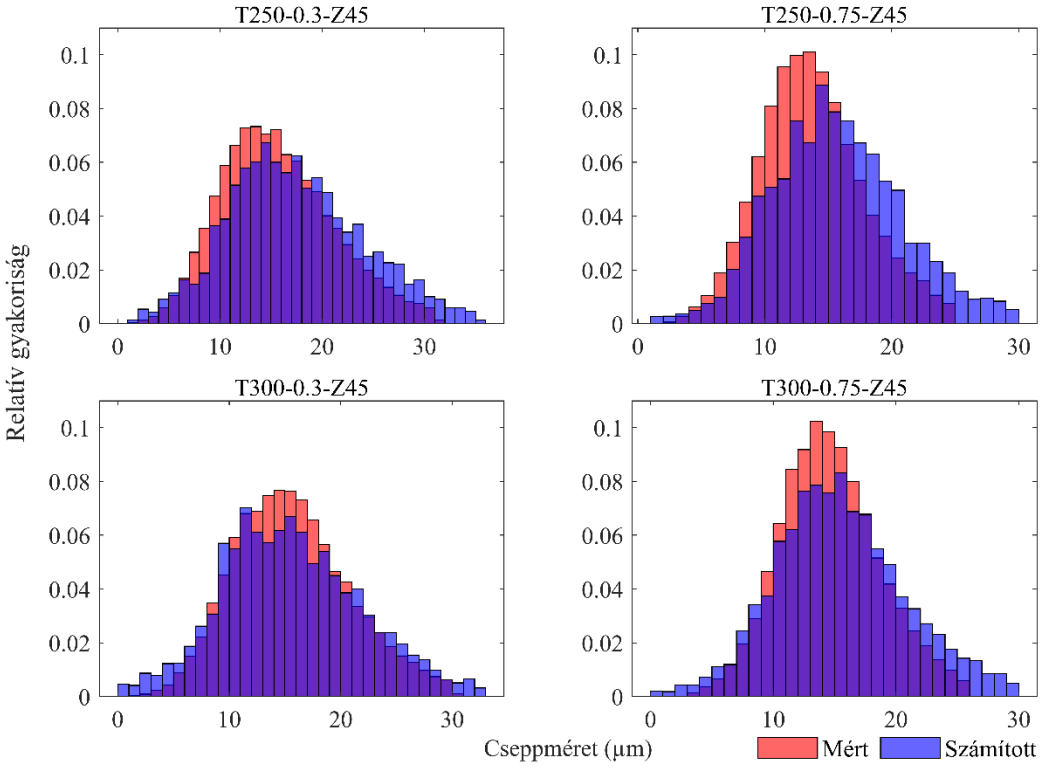
4.3. Párolgás modellezése a felfűtés figyelembevételével

A felfűtési szakasz számításához szükséges adatokat a 7. táblázat foglalja össze.

	B7	**B50**	**B100**	**JP8**
λ_{hu} (T_{amb}=250 °C) [m²/s]	$2{,}220 \cdot 10^{-7}$	$2{,}079 \cdot 10^{-7}$	$7{,}954 \cdot 10^{-8}$	$2{,}047 \cdot 10^{-7}$
λ_{hu} (T_{amb}=300 °C) [m²/s]	$2{,}458 \cdot 10^{-7}$	$2{,}348 \cdot 10^{-7}$	$1{,}120 \cdot 10^{-7}$	$2{,}242 \cdot 10^{-7}$
D_{hu}/D_0 (T_{amb}=250 °C) [-]	0,795	0,788	0,887	0,796
D_{hu}/D_0 (T_{amb}=300 °C) [-]	0,787	0,782	0,849	0,792
t_{hu}/D_0^2 (T_{amb}=250 °C)	2206045	2431027	3567142	2390087
t_{hu}/D_0^2 (T_{amb}=300 °C)	2067850	2207641	3325516	2214991

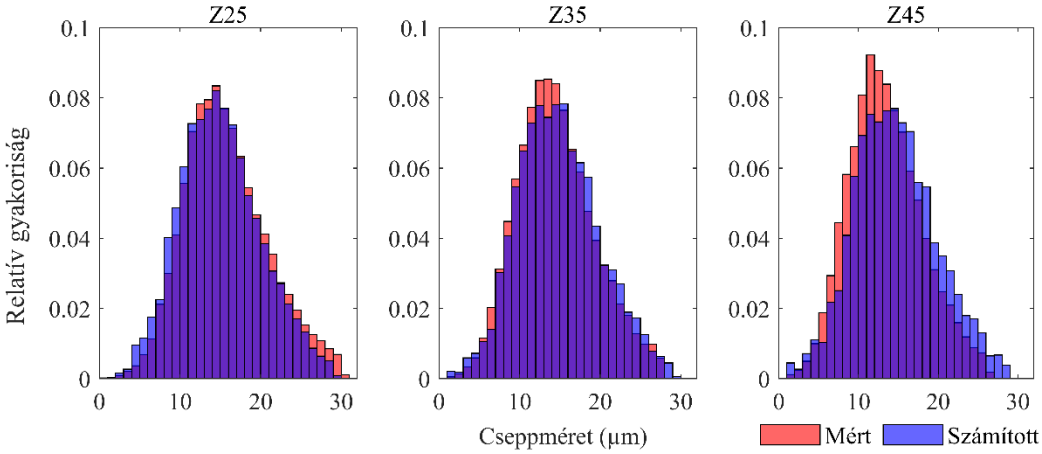
7. táblázat. Felfűtési szakasz jellemző értékei.

A hisztogramok értékelésének menete követi a stacionárius párolgás vizsgálatakor alkalmazottat, ezzel lehetővé téve a felfűtési szakasz hatásának minél részletesebb elemzését. A 21. ábra alapján azt tapasztaljuk, hogy a felfűtési szakasz figyelembevétele kedvező irányban befolyásolta a modell eredményeit. Egyrészt mérsékelte az eltolódást a kis méretek irányába, másrészt szűkítette a cseppméret-tartományokat, így a számolt adatok közelebb kerültek a csúcsbeli értékekhez. A hőmérséklet növelése tovább javítja a kapott hisztogramot, azonban a nagyobb porlasztónyomáson ebben az esetben is szignifikánsabb az eltérés.



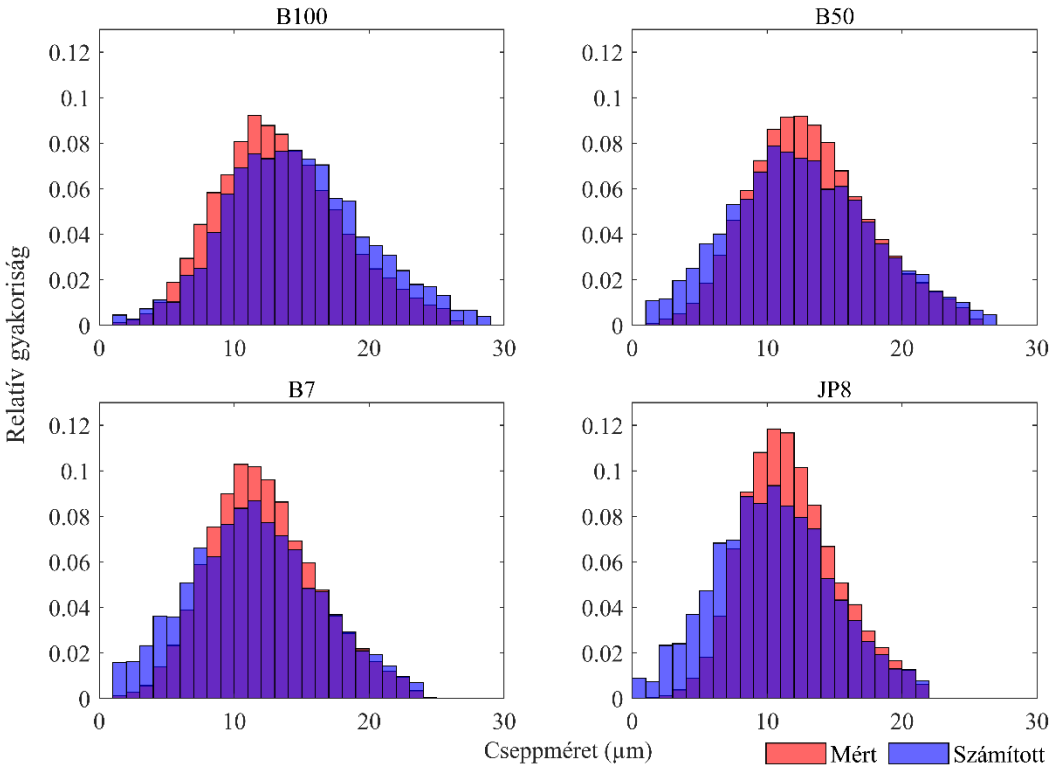
21. ábra. B100 cseppeloszlásai teljes párolgást követően.

Hasonló következtetést vonhatunk le a 22. ábra kapcsán is, 25 és 35 mm-es axiális távolságoknál a kapott eredmények kellően pontosnak bizonyulnak, habár 45 mm-nél már megjelenik mind az eltolásbeli, mind a csúcsbeli eltérés.

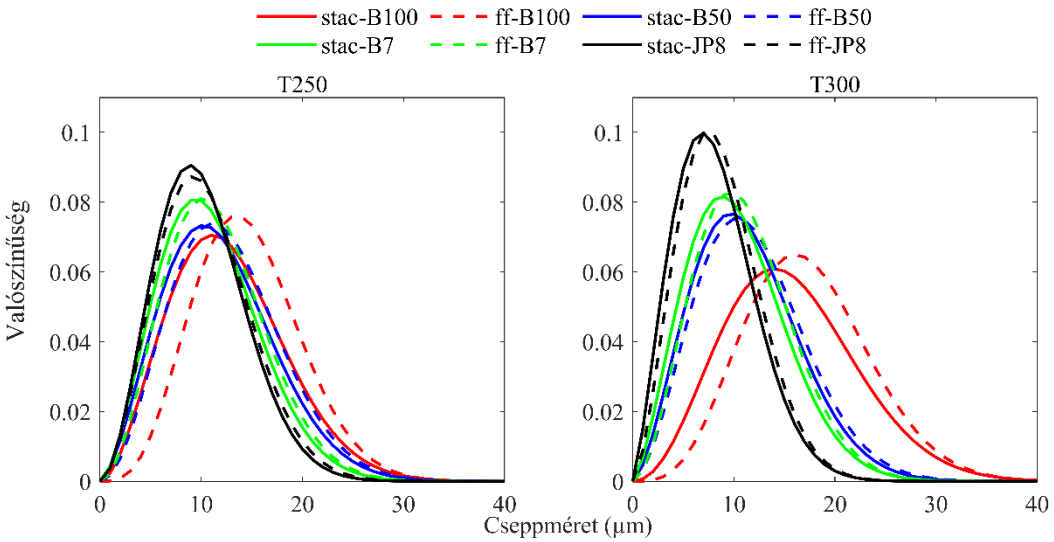


22. ábra. B100 cseppeloszlásai különböző axiális távolságokban. (T250-0.45-teljes).

A felfűtési szakasz paraméterei bár az anyagjellemzőktől függenek, így mindegyik tüzelőanyagra mások, ez nem mutatkozik meg szignifikánsan a 20. ábra és a 23. ábra összevetésekor. Az eltérések a mért és számított hisztogramok között minden tüzelőanyagra mérséklődtek azzal, hogy a felfűtést az egyenletes párolgási szakasz elé kapcsoltuk (bár B100 esetén nagyobb eltolást tapasztalunk a nagyobb cseppátmérők irányába). Kiemelendő a B50 esete, hiszen itt mind a stacionárius, mind a felfűtési szakaszra a B100 és B7 anyagi jellemzőinek kombinálásából határoztuk meg a bemeneti értékeket, és a 23. ábra igazolja ennek a becslésnek a megfelelőségét.



23. ábra. Különböző tüzelőanyagok teljes párolgása (T250-0.45-Z45).



24. ábra. Stacionárius és teljes párolgás összevetése (0.45-Z45).

A 24. ábra közös grafikonon mutatja a stacionárius (*stac*) és a felfűtési szakasszal is kiegészített (*ff*) párolgási modellek számítási eredményeit, melyből egyértelműen látszik, hogy a felfűtés a nagyobb cseppméretek irányába tolja el az eloszlást, illetve van, ahol magasabb maximumot produkál.

A 8. táblázat a modell alapján számolt párolgási szám átlagos értékét foglalja össze az egyes esetekben, illetve információt nyújt arról, hogy a permetben a cseppek hányada párolgott el teljesen, mielőtt elérte volna a 45 mm-es axiális távolságot.

		***Ev* átlag (-)**				**Elpárolgott cseppháányad (%)**			
		B100	**B50**	**B7**	**JP8**	**B100**	**B50**	**B7**	**JP8**
250 °C	***0.3 bar***	5,321	2,784	2,441	1,925	3,936	15,467	16,334	24,053
	0.45 bar	4,662	2,869	2,371	2,329	4,830	11,258	14,813	14,348
	0.6 bar	5,354	3,642	2,824	2,33	3,689	6,065	7,544	15,431
	0.75 bar	6,704	3,468	2,933	2,499	2,980	7,263	7,853	12,016
300 °C	***0.3 bar***	3,956	2,217	2,053	1,691	8,645	21,585	19,770	28,874
	0.45 bar	5,813	2,411	2,123	1,716	3,421	16,211	17,279	25,181
	0.6 bar	5,065	2,745	2,467	2,055	4,712	11,607	11,564	17,989
	0.75 bar	5,91	2,766	2,801	2,271	3,288	12,828	8,171	14,308

8. táblázat. Párolgási szám és elpárolgott cseppek száma.
(Két színcsoport szerint kategorizálva, erősebb szín - kedvezőbb érték)

A párolgási szám JP8 esetén a legalacsonyabb, minden beállítás mellett, illetve az elpárolgott cseppek száma is az egyik legnagyobb, ez a permet elején kialakuló cseppeloszlásnak köszönhető: a kerozin esetén vannak jelen a legkisebb átmérőjű cseppek a permet kezdeti állapotában. Ezt követi a B7, majd a B50 és a B100, egyrészt szintén az eloszlásokban előforduló cseppméretek miatt, másrészt a jelenséget erősíti, hogy a B100 kisebb párolgási konstanssal rendelkezik, mint a dízelolaj. A hőmérséklet növelésével az esetek többségében kisebb a párolgási szám, több az elpárolgott csepp. (Kivételes esetek előfordulnak, de fontos megjegyezni, hogy a kiinduló cseppeloszlások nem ugyanazok, ez okozhat eltéréseket.) A porlasztónyomás növekedés-

ével nő a párolgási szám is, hiszen a nagyobb nyomás nagyobb axiális sebességeket eredményez, ami kisebb tartózkodási időhöz vezet, tehát a párolgási szám nevezője csökken, így maga az értéke nő.

A párolgási szám értéke körülbelül 2 és 5 között változik, ezt azt jelenti, hogy nagyjából még kétszer-ötször ennyi idő kellene a cseppeknek ahhoz, hogy elpárologjanak. Valójában ennél kevesebb, hiszen a fennmaradó szakaszban már az erőteljesebb fogyást biztosító stacionárius párolgás zajlik (illetve a mért és számított adatoknál látott eltérés is befolyásolja). A keverőcső 100 mm hosszú, tehát a kerozin és a dízelolaj túlnyomó része elpárolog, mire eléri a tüzelőteret, azonban ez nem mondható el a biodízelről (és csak mérsékelten állítható B50-re).

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatom első szakaszában a PDA mérés során nyert adatok feldolgozására, szemléletes bemutatására és az ezek hátterében álló fizikai magyarázatokra került sor, mind a cseppméretek, mind a sebességek tekintetében, a permet különböző axiális és radiális távolságaiban. Ezt követően történt a párolgás számítása D^2-törvény alapján, a modell által kapott eredmények összehasonlítása a mért adatokkal, a hasonlóságok és eltérések lehetséges okainak feltárása. A dolgozat legfontosabb eredményei összefoglalva az alábbiak:

(1) A mért validációs ráták a permet kezdeti szakaszában meglehetősen alacsonyak, a tengelyben különösen. A kifúvástól mért nagyobb távolságok felé erősen nő az értékük. B100 és B50 esetén körülbelül 10-15%-kal kisebb értéket kaptunk minden pontban, mint a döntően fosszilis tüzelőanyagok esetén. Ez azt jelenti, hogy a permetben kevesebb volt a gömbszimmetrikus cseppek aránya az összes csepphez képest a biotüzelőanyagok esetén. Ugyanakkor emiatt a modell számításai hibával terheltek, mivel a kevésbé gömbszerű cseppekben, folyadékszalagokban sodródó folyadékrészek a permet későbbi szakaszán más formában szintén jelen vannak és mérhető értékeket produkálhatnak a későbbi axiális távolságokban.

(2) A cseppek Sauter-középátmérőjének (*SMD*) radiális eloszlása gyűrűs szerkezetet mutat: 3 maximum állapítható meg, kettő a széleken, egy a tengelyben. Előbbieket a hamar a permet perifériájára sodródó cseppek okozzák, melyek ott a kis áramlási sebességek miatt csak lassan aprózódnak tovább, utóbbit pedig az, hogy a másodlagos porlasztás még folyamatban van a vizsgált pontban, valamint az aprózódásért felelős légsugár gyűrűs keresztmetszetben áramlik ki, míg a tengelyben a tüzelőanyag csak 1 m/s alatti sebességgel. Az *SMD* a kifúvástól mért távolság növekedésével csökken, ahogy azt a párolgás és a porlasztás befejeződése indokolja is. A porlasztónyomás növekedése a várt eredménnyel összhangban valóban csökkenti a cseppátmérőket, azonban kisebb mértékben, mint azt előzetesen feltételeztem. A magasabb hőmérséklet, habár a párolgást fokozza, a méretek csökkenése mégsem figyelhető meg egyértelműen. A tüzelőanyagok közötti különbség élesen kirajzolódik, összefüggésben a viszkozitásukkal: B100 esetén a legnagyobbak a cseppek, ezt követi a B50, majd a B7 és végül a JP8.

(3) Az axiális sebességek a tengelyben jóval magasabbak, mint a permet szélein, az axiális távolság növelésével csökkennek, tehát a cseppek lassulnak. A tüzelőanyag fajtája nincs hatással a sebességképre, azonban a porlasztónyomás növelésével magasabb értékeket kapunk. A sebességek tengelyben vett axiális értékei alapján számítottam a tartózkodási időket az egymást követő pontok között. Ezt a függvényt fosszilis tüzelőanyagok esetén egy egyenessel közelítettem, míg B50 és B100 esetén két lineáris szakasz összeillesztésével.

(4) A mért cseppeloszlásokra legjobban a Generalized Extreme Value és a Nakagami valószínűségi sűrűségfüggvények illeszkedtek. A stacionárius párolgási konstans B7 esetén lett a legmagasabb, ezt követi a B50, majd a B100, végül a JP8. A felfűtési szakasz elhanyagolása a számításban hibát eredményezett, a mért és számított adatok közötti eltérés magasabb volt. Jellemzően a kisebb cseppméret tartományokon a számított modell magasabb relatív gyakoriságot mutat, mint a mért adatsor, a mért eredmények hisztogramjának maximumát pedig a modell becsüli alá. Ez annyit jelent, hogy a modell alapján a kisebb méretű cseppek valószínűbben fordulnak elő a permetben, mint a valóságban, azonban ami a valóságban a leggyakoribb (jellemző) nagysága a cseppeknek, az a számított modell értékeiben nem fordul elő olyan gyakran. A felfűtési szakaszra vonatkozó párolgási konstansoknál a JP8-ra számított érték felülmúlja B100-ét, a további sorrend hasonló a stacionárius esethez. A teljes párolgási folyamatra megalkotott modell már jobb egyezést mutat a valós adatokkal a

hisztogramok szélein, azonban a csúcsértékeket továbbra is alulbecsüli. Magasabb porlasztónyomások esetén a maximum magasabb, még nehezebben közelíti meg a modell, így ott rosszabb egyezést kaptam. A modell magasabb levegő-előmelegítési hőmérsékleten, és egymáshoz közelebbi pontok között (például a 15 és 25 mm-es axiális távolságok között a 15-45 mm-es távolság helyett) pontosabbnak bizonyult. Mivel kerozinnál és dízelolajnál a kezdeti cseppeloszlás erősebben kicsúcsosodott, így az előzőekben elmondottak alapján a modell itt is nagyobb hibákat eredményezett a B50-hez és a B100-hoz viszonyítva. B50 esetén az anyagjellemzők jó közelítését jelentette a B100 és B7 értékeinek kombinálása.

(5) A párolgási szám (*Ev*) a 2 és 5 között alakul (leszámítva pár kiugró értéket), a vártnak megfelelően magasabb porlasztónyomásokon és alacsonyabb hőmérsékleten magasabb az értéke. A különböző tüzelőanyagok esetére a kezdeti cseppméreteloszlással összhangban alakultak az értékek: JP8 esetén mértük átlagosan a legkisebb cseppeket és kaptuk a legkisebb párolgási számot. Ezt követte B7, B50, a legnagyobb cseppekből álló permethez tartozó B100 párolgási száma pedig a legmagasabb.

A modell egyszerűségét tekintve véleményem szerint korrekt közelítést adott a párolgás végén kialakuló cseppméretekről, becslő jellegű számításokra alkalmas. Továbbfejlesztési lehetőségként elsőként a vizsgált tüzelőanyagok egyes jellemzőinek mérés útján történő pontos meghatározását említeném az irodalomban fellelhető adatok helyett, hiszen jelentősen befolyásolhatják az eredményt. A hősugárzás és konvektív hőátadás hatásának modellbe építése is növelheti a pontosságot. Emellett felmerül a numerikus modellezés lehetősége. Meghagyva a most használt alapegyenleteket, a cseppek párolgását jellemző adatok pontról pontra számíthatóvá válnának. Habár még rengeteg fejlesztési lehetőség van, a 2.1. alfejezetben leírt megoldatlan problémák következtében, én reális kereteken belül egyelőre ezeket tartom megvalósíthatónak.

6. IRODALOMJEGYZÉK

[1] Spalding DB. The combustion of liquid fuels. Symposium (International) on Combustion 1953;4:847–64. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(53)80110-4.

[2] Godsave GAE. Studies of the combustion of drops in a fuel spray—the burning of single drops of fuel. Symposium (International) on Combustion 1953;4:818–30. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(53)80107-4.

[3] European Commission. Proposal for a regulation of the european parliament and of the council on ensuring a level playing field for sustainable air transport https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/refueleu_aviation_-_sustainable_aviation_fuels.pdf (accessed October 25, 2021).

[4] X. Pan HWLW and WC. Decarbonization of China's transportation sector: In light of national mitigation toward the Paris Agreement goals. Energy 2018;155:853–64. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.144.

[5] Józsa V, Csemány D. Evaporation of renewable fuels in a lean premixed prevaporized burner. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 2016;60:82–8. https://doi.org/10.3311/PPme.8564.

[6] Marchione T, Allouis C, Amoresano A, Beretta F. Experimental Investigation of a Pressure Swirl Atomizer Spray. Journal of Propulsion and Power 2007;23:1096–101. https://doi.org/10.2514/1.28513.

[7] Urbán A, Zaremba M, Malý M, Józsa V, Jedelský J. Droplet dynamics and size characterization of high-velocity airblast atomization. International Journal of Multiphase Flow 2017;95:1–11. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.02.001.

[8] Sazhin S. Droplets and Sprays. Springer London Heidelberg New York Dordrecht; 2014. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6386-2.

[9] Sirignano WA. Fluid dynamics and transport of droplets and sprays. Cambridge: Cambridge University Press; 1999. https://doi.org/doi:10.1017/CBO9780511529566.

[10] Landis RB, & MAF. Effect of internal diffusional resistance on the evaporation of binary droplets. Proceedings of the Fifth International Heat Transfer Conference, Tokyo, Japan,: 1974.

[11] Sazhin SS, Elwardany A, Krutitskii PA, Castanet G, Lemoine F, Sazhina EM, et al. A simplified model for bi-component droplet heating and evaporation. International Journal of Heat and Mass Transfer 2010;53:4495–505. https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2010.06.044.

[12] Sazhin SS, Elwardany AE, Sazhina EM, Heikal MR. A quasi-discrete model for heating and evaporation of complex multicomponent hydrocarbon fuel droplets. International Journal of Heat and Mass Transfer 2011;54:4325–32. https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2011.05.012.

[13] Sazhin SS. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems. Fuel 2017;196:69–101. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2017.01.048.

[14] Csemány D, Józsa V. Fuel Evaporation in an Atmospheric Premixed Burner: Sensitivity Analysis and Spray Vaporization. Processes 2017;5:80. https://doi.org/10.3390/pr5040080.

[15] H.-E. Albrecht M. Borys N. Damaschke c. Tropea. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques Springer. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2003. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05165-8.

[16] Kamrak J, Kongsombut B, Grehan G, Saengkaew S, Kim KS, Charinpanitkul T. Mechanistic study on spraying of blended biodiesel using phase Doppler anemometry. Biomass and Bioenergy 2009;33:1452–7. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2009.06.011.

[17] Urbán A, Groniewsky A, Malý M, Józsa V, Jedelský J. Application of big data analysis technique on high-velocity airblast atomization: Searching for optimum probability density function. Fuel 2020;273. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117792.

[18] Shin D, Satija A, Lucht RP. Spray characteristics of standard and alternative aviation fuels at high ambient pressure conditions. Experimental Thermal and Fluid Science 2022;130:110511. https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2021.110511.

[19] Global fuel supply by scenario, 2010-2040 – Charts – Data & Statistics - IEA https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-fuel-supply-by-scenario-2010-2040 (accessed October 22, 2021).

[20] H.-G. Chen and Y.-H. P. Zhang. New biorefineries and sustainable agriculture: Increased food, biofuels, and ecosystem security. Renew Sustain Energy Rev 2015;47:117–32. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.02.048.

[21] Lefebvre AH, Mcdonell VG. Atomization and Sprays. Second Edition. Boca Raton: CRC Press; 2017. https://doi.org/10.1201/9781315120911.

[22] Csemány Dávid JV. Tüzelőanyag cseppek párolgásának modellezése előkeveréses égőben - Konvektív hőátadás és hősugárzás hatásának vizsgálata. Energiagazdálkodás 2018;59:8–12.

[23] Sparrow EM, and GJL. Similar solutions for free convection from a non-isothermal vertical plate. Trans ASME 1958;80:379–86.

[24] Watson KM. Prediction of critical temperatures and heats of vaporization. Ind Eng Chem 1931;23:360–4. https://doi.org/10.1021/ie50256a006.

[25] Chin JS, and LAH. The role of the heat-up period in fuel drop evaporation. Int J Turbo Jet Eng 1985;2:315–25. https://doi.org/10.1515/TJJ.1985.2.4.315.

[26] Józsa V. Mixture temperature-controlled combustion: A revolutionary concept for ultra-low NOX emission. Fuel 2021;291. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120200.

[27] Urbán A, Katona B, Malý M, Jedelský J, Józsa V. Empirical correlation for spray half cone angle in plain-jet airblast atomizers. Fuel 2020;277:118197. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.118197.

[28] Füzesi D, Csemány D, Chong CT, Józsa V. Numerical modeling of waste cooking oil biodiesel combustion in a turbulent swirl burner. 2021.

[29] Csemány D, DarAli O, Rizvi SAH, Józsa V. Density, kinematic viscosity, surface tension, distillation curve, and flash point data of diesel-biodiesel blends 2021. https://doi.org/10.5281/ZENODO.4892781.

[30] NIST WebBook https://webbook.nist.gov/ (accessed November 4, 2021).