

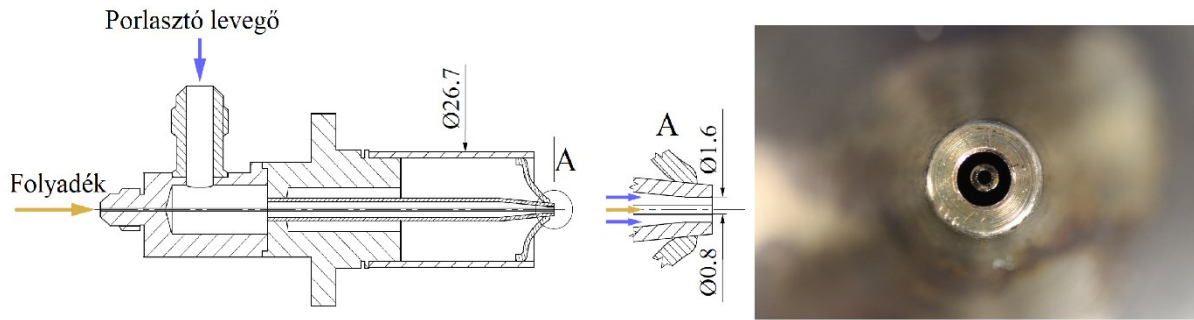
Levegősegédközegees porlasztó dimenziótlan sebességprofiljainak értékelése

Porlasztókkal gyakran találkozunk az energetikai alkalmazások mellett különböző iparágakban (mezőgazdaság, vegyipar, nehéz- és könnyűipar). Mivel a porlasztás folyamata kaotikus és igen nagy térbeli méretskálákat fog át, ezért a permetkép jellemzése ma is elsősorban méréses úton valósítható meg. Jelen cikkben egy Capstone C-30 mikro-gázturbina levegő segédközegees porlasztójának permetképét értékeltük, melyet korábban Fázis Doppler Anemométeres technikával mértek igen széles paramétertartományokon. A nagy adathalmazból az eddigi kutatások elsősorban a folyadékcseppek méretére, illetve ezek alakulására fókuszáltak, ebben a tanulmányban a sebességeloszlást értékeltük. A kétfázisú áramlás és a többlépcsős permetképződési folyamat a hagyományos szabadsugár viselkedéstől némileg eltér. A nagyszámú mért egyedi csepp miatt az adathalmazt statisztikai módszerekkel lehetséges hatékonyan feldolgozni. A cikkben ismertettünk egy dimenziótlantási lehetőséget, amelynek eredményeképp az igen különböző körülmények mellett származtatott sebesség-hisztogramok igen jól egybe estek a permet középső régiójában. A peremrégióban a kevés mérési adatpont és az erősen sztochasztikus jelleget mutatott.

1. Alkalmazási területek és kihívások

Több mint 110 év telt már el a Bánki-Csonka-féle porlasztó szabadalmaztatása óta, azonban a porlasztás folyamata a mai napig aktív kutatás tárgya. Ennek fő oka, hogy a folyadék-levegő interakciója kaotikus folyamat a porlasztásban szokásos körülmények mellett, azaz a fizikai feltételekre végtelen érzékenységet mutat. Nem véletlen, hogy a jellemző cseppméretek közelítésére csak empirikus és félempirikus modellek léteznek [1]. Az élvonalbeli numerikus szoftverek is alapvetően ezekre támaszkodnak [2], mivel bár a folyadéksugár felbomlása szimulálható [3], ez igen nagy számítási kapacitásokat emészt fel, így a jelenlegi eszközeinkkel egy teljes tűzteret lehetetlen modellezni. Mind az energiatermelésben mind a repülésben jelentős szerepe van a gázturbináknak, amelyeket akár gáz és folyadék halmazállapotú tüzelőanyagok használatára is alkalmaznak. A folyadékok optimális tüzelése megfelelő párolgási viszonyokat igényel, amely a folyadék szükséges méretű cseppekké történő porlasztásával érhető el [4]. A tüzelési módszerek fejlesztéséhez, optimalizálásához így szükséges a porlasztási folyamatok és körülmények széleskörű vizsgálata. A kapcsolódó kutatás az olvasók számára jól ismert energetikai alkalmazások mellett a gyógyszerészet [5], a porkohászat [6] és a festékszórás technológiák [7] esetén is releváns. Jelen cikkben levegő segédközegees porlasztóval kapcsolatos eredményeinket mutatjuk be, hiszen ez a kialakítás ideális a porlasztási folyamat értékelésére az egyszerű geometriai kialakítása miatt.

A levegő segédközegees porlasztók esetén a folyadék cseppekké aprózódását nagy sebességű levegő segédközeggel biztosítjuk. A vizsgált egyszerű sugaras, levegő segédközegees porlasztó esetén a folyadék egy belső csőben áramlik néhány m/s sebességgel, az azzal koncentrikusan kialakított fűvókában pedig akár több száz m/s sebességgel a porlasztó levegő áramlik ki, ahogy az az 1. ábraán látszik. A két közeg a porlasztó csúcsánál találkozik, ahol a nagy relatív sebesség, és a viszkozitáson keresztül az impulzuscsera a folyadékot szalagokra és cseppekre bontja fel, amelyek tovább aprózódhatnak [1].

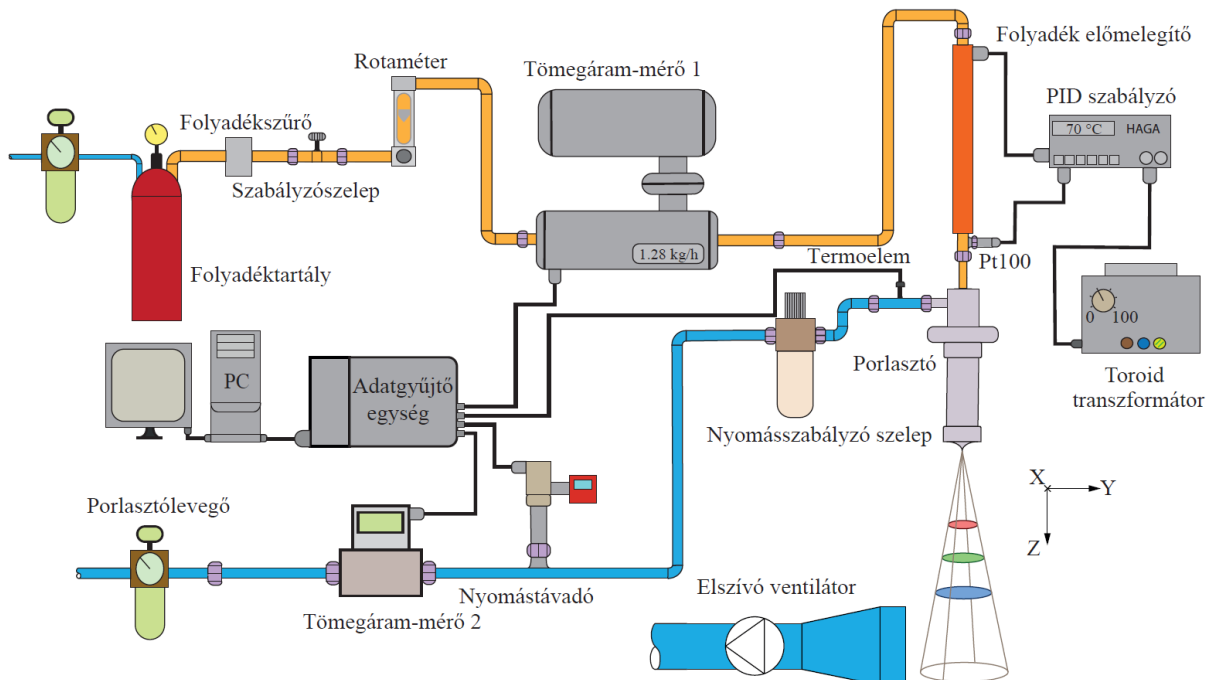


1. ábra: Capstone C-30 gázturbina porlasztójának metszete (balra) [8], és a fűvókacsúcs (jobbra)

Jelen publikációban az 1. ábrán látható porlasztó korábbi Fázis Doppler Anemométeres (PDA) vizsgálata [8] során nyert sebességmérési eredményeket értékeljük. A szabadsugarú önhasonlóságát az áramlástanból ismerjük [9], azonban a porlasztás sztochasztikus volta miatt célszerű a mérési eredményeket statisztikai módszerekkel is értékelni a folyamat jobb megértése céljából.

2. A mérőrendszer rövid ismertetése

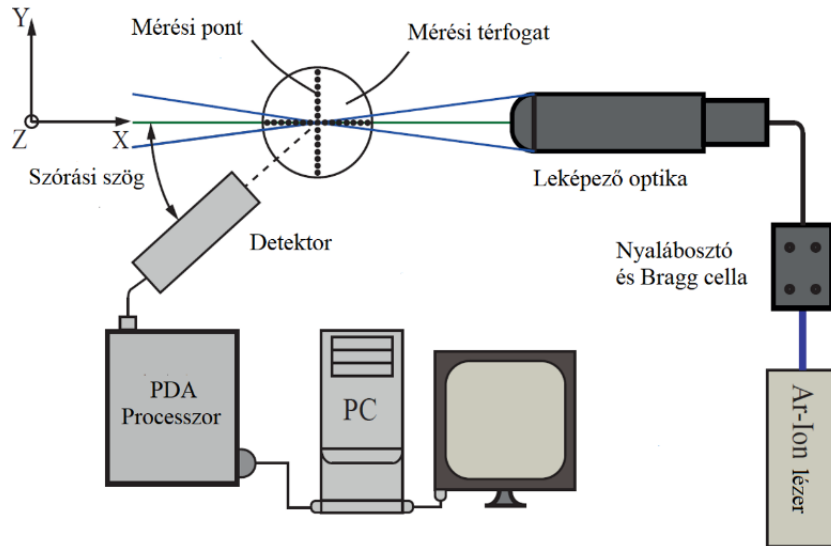
A következőkben ismertetett mérést a Brno Műszaki Egyetemen végezték el, ahol a kutatók egy Capstone C-30 mikrogázturbina égő egyszerű sugaras, levegősegedőközegetes porlasztóját vizsgálták atmoszférikus körülmények mellett. Az 1. ábrán látható porlasztó 0,4 mm belső átmérőjű csövében áramlik a sárga nyíllal ábrázolt folyadék, körülötte koncentrikusan helyezkedik el a 0,8 mm belső és 1,6 mm külső átmérőjű csatorna, amelyben áramlik a kézzel jelölt porlasztólevegő. A méréseket a 2. ábrán látható elrendezésben végezték el.



2. ábra: Mérőrendszer kialakítása [8].

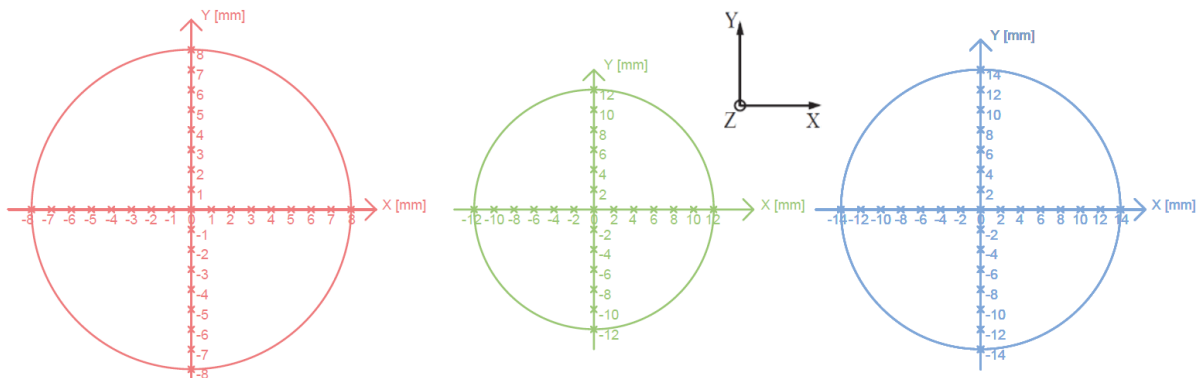
A mérés során lehetőség volt a porlasztónyomás, a folyadék előmelegítési hőmérsékletének, valamint a folyadék és porlasztólevegő tömegáramának szabályozására. Ezek közül jelen

cikkben a 25 °C folyadék hőmérsékletéhez tartozó adatok elemzésével foglalkozunk. A folyadék tömegárama a mérés során egységesen 1,28 kg/h volt, az légáram 1 kg/h-tól (0,3 bar porlasztási túlnyomás) 2,65 kg/h-ig változott (2,4 bar porlasztási túlnyomás). A 2. ábra vázlatán a folyadék a sárga, a légáram pedig a késsel jelölt vezetéken áramlik a rendszerben. A fekete vezeték elektromos csatlakozást és adatkábeleket jelölnek. Az egyedi cseppek sebességének mérését PDA segítségével végezték el. A rendszer optikai elrendezését a 3. ábra mutatja, amelynek segítségével a szubmikronos folyadékcseppek is detektálhatók a permet megzavarása nélkül. A mérőrendszer a cseppek méretét axiális irányban méri, a sebességkomponensek közül a 2. ábrán ábrázolt koordináta-rendszerben az Y és Z irányokban rögzített adatokat.



3. ábra: PDA rendszer elrendezése [8].

A mérési pontokat minden beállítás mellett a fűvókacsúcstól mérve 20, 40 és 60 mm (Z tengely) távolságban fekvő keresztmetszeteken jelölték ki, amelyek a 4. ábrán láthatóak (a $z = 20$ mm keresztmetszet a többihez képest kétszeres nagyításban látható). Az adatgyűjtés időben egymás után a permet összesen 90 különböző pontjában történt, a porlasztás a mérések alatt folyamatos volt. Egy mérési pont mintavételezési korlátja 40 000 db egyedi csepp detektálása vagy 15 s időtartam volt, ez utóbbi a peremrégió esetén volt fontos, ahová kevés csepp sodródik ki. Itt jegyezzük meg, hogy a permet radiális terjedéséért kizárólag a turbulencia felelős, a fűvókából nem származik radiális erőhatás.



4. ábra: Mérőpontok elhelyezkedése $z = 20, 40$ és 60 mm keresztmetszeteken – balról jobbra.

A mérés során 4 különböző folyadékot vizsgáltak, amelyek közül a, dízelolajat (D), és a jól ismert tulajdonságai miatt vizet (W) értékeljük. A méréseket több porlasztási túlnyomás mellett, 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,8; és 2,4 bar mellett végezték el.

3. Az értékelés módszertana

Először minden adatsort előszűrtünk cseppméret alapján. A PDA rendszer Z irányban 0,5145 μm hullámhosszú, zöld lézerefény segítségével mér, így az ennél kisebb átmérőjű cseppek detektálására fizikailag alkalmatlan. Első lépésként tehát a 0,5145 μm -nél kisebb átmérővel rendelkező, a kiértékelő szoftver általános működése miatt regisztrált cseppek adatainak eltávolítására került sor, mivel a mérést szinte tetszőleges hullámhosszt biztosító lézerre el lehet végezni. A cseppméreteket tartalmazó adatsorok tartalmazhatnak továbbá olyan elemeket, amelyek jelentősen eltérhetnek a cseppméret eloszlások várható értékétől. Ezeknek az elemeknek az előfordulási gyakorisága alacsony, viszont az adatsor statisztikai tulajdonságait, illetve a modellillesztések eredményét jelentősen torzítják. Ezek az adatokat az adathalmazok kilógó elemei, másodszer ezek szűrésére került sor. Ezeknek az elemeknek a száma egy-egy adatsorban ezrelék körüli, általában ezek a cseppek olyan folyamatokból származnak, amelyek előfordulásának esélye kicsi, az adathalmazok valószínűségi varianciája miatt kiugró elemekként mégis megjelenhetnek. A kilógó adatok szűrését a Matlab szoftver isoutlier [10] függvénye segítségével végeztük el, amely a mediántól mért/vett átlagos abszolút eltérés háromszorosánál nagyobb eltérést mutató adatokat válogatja le. Esetünkben ez a kisméretű cseppek irányában negatív számot eredményezett, így ilyen irányban nem történt szűrés, tehát a módszer csak a túlzottan nagy cseppeket érintette.

Az előbbi eljárások után a mérési pontokban detektált és a szűrésnek megfelelő cseppekhez tartozó sebességek eloszlásait vizsgáltuk. Az adatsorok eloszlása jelentősen eltérhet a porlasztási körülményektől és a mérési pontok elhelyezkedésétől függően, ezért a különböző adatsorokhoz tartozó eloszlások jellegének összehasonlításához azok lineáris transzformációjára került sor. A transzformáció minden adatsoron a

$$v_{tr,i} = \frac{v_i - E(V)}{D(V)}, \quad (1)$$

összefüggésnek megfelelően történt, ahol

V az egy mérési pontban regisztrált cseppek axiális sebességkomponenseinek halmaza,

v_i a V halmaz egy eleme,

$E(V)$ a V halmaz várható értéke,

$D(V)$ a V halmaz szórása,

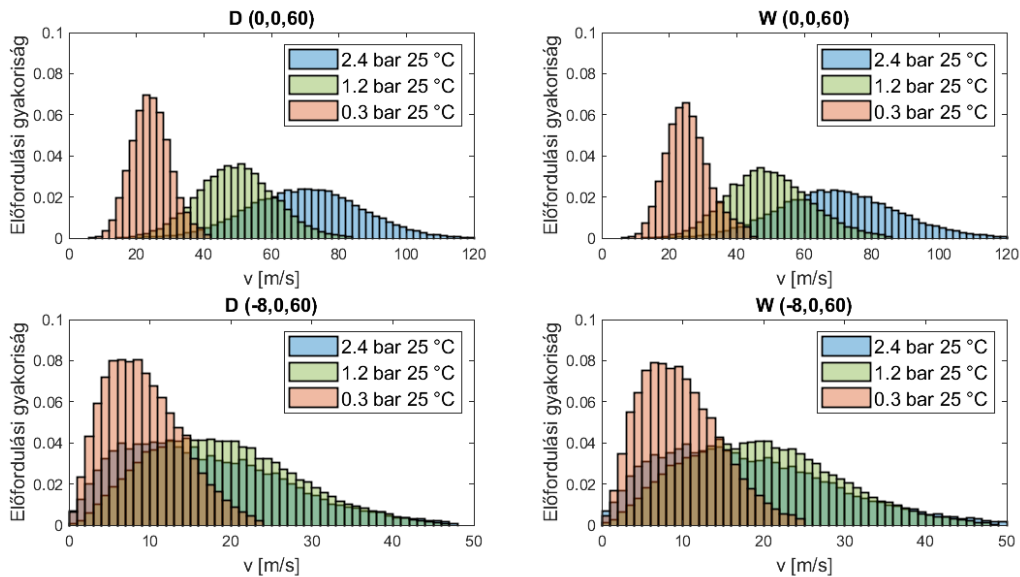
$v_{tr,i}$ pedig v_i elem transzformált, dimenziótlan értéke.

A transzformáció eredményeképpen olyan eloszlások adódnak, amelyek elemeinek átlaga a korrekció miatt nulla értékű, míg a szórásuk az arányosítás miatt egységnyi.

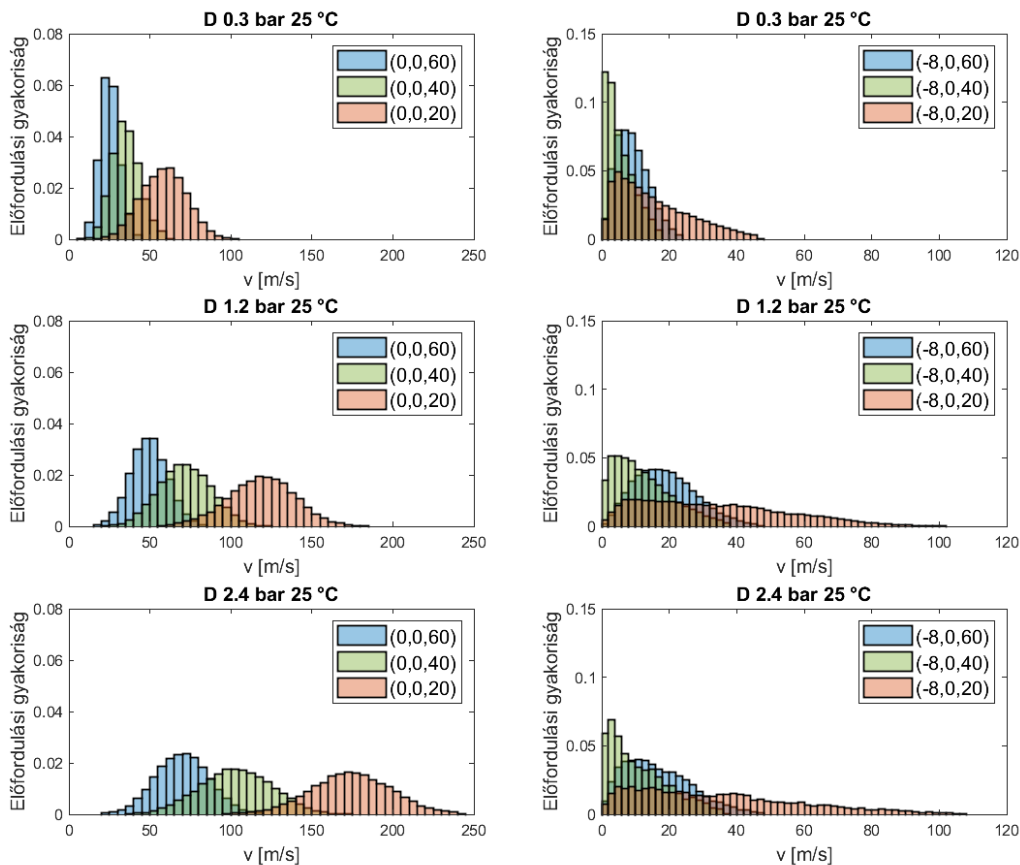
4. Eredmények

Az 5. ábra hisztogramjain látható, hogy az axiális sebességeket tartalmazó adatsorok jelentősen eltérhetnek a porlasztott folyadéktól, a porlasztás körülményeitől és a mérési pont elhelyezkedésétől függően. A szimmetriatengelyre eső, $(0, 0, z)$ koordinátájú, illetve azokhoz közeli elhelyezkedésű pontokban regisztrált sebességek eloszlása közel szimmetrikus, míg a permet pereme felé haladva az eloszlások jobb oldali farka elnyúlik magasabb értékek felé. A szélső pontokban az eloszlások kisebb sebességtartományba esnek (0–50 m/s), emiatt kisebb a

szórásuk. Magasabb porlasztónyomások esetén a sebességeloszlások a magasabb értékek felé tolódnak el, az eloszlások szélesebb sebességtartományon helyezkednek el, akár 120 m/s értékig, valamint nagyobb a szórásuk is. A két vizsgált folyadék sebességeloszlása annak ellenére hasonló, hogy a víz és a dízelolaj anyagi jellemzői eltérnek egymástól.

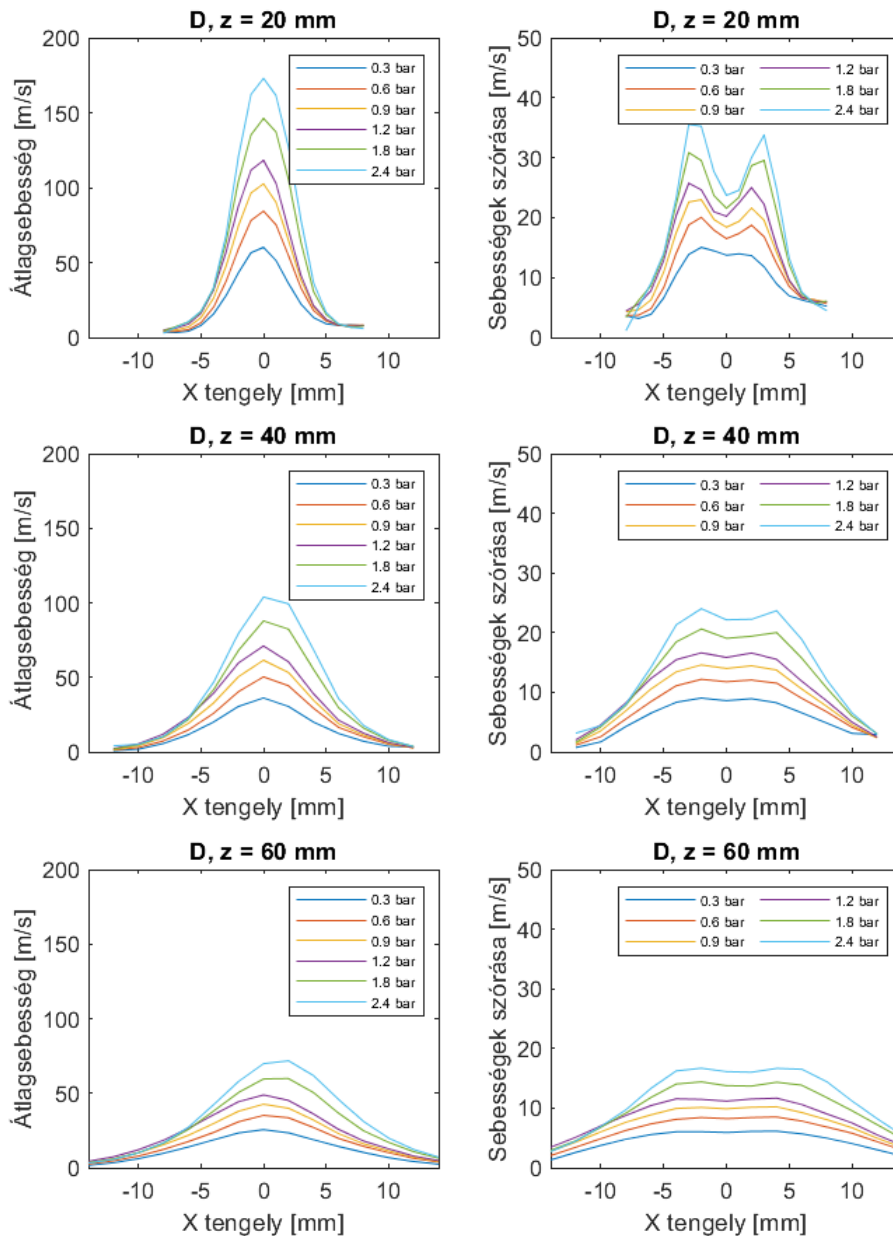


5. ábra: Sebességeloszlások alakulása különböző mérési körülmények esetén



6. ábra: $z=20, 40$ és 60 mm keresztmetszeteken regisztrált sebességek eloszlásai

A mérőpontok fűvókacsúctól való távolsága szintén jelentősen befolyásolja a sebességprofilok alakulását. A 6. ábra hisztogramjain látható, hogy a $z = 20$ mm keresztmetszeten, nagy porlasztónyomás esetén a középpontban akár 200 m/s, míg a peremen közel 100 m/s sebességű részecskék detektálhatók. Mind a $z = 20, 40$ és 60 mm keresztmetszeten a szimmetria-tengelyhez közeli pontokban jellemző a szimmetrikus sebességeloszlás. Ezzel szemben a szélső, peremközeli pontokban aszimmetrikus eloszlás jellemző, amely nagy porlasztónyomás esetén irregularitást mutat, a $z = 20$ mm keresztmetszet esetén az eloszlás erősen lapulttá válik.

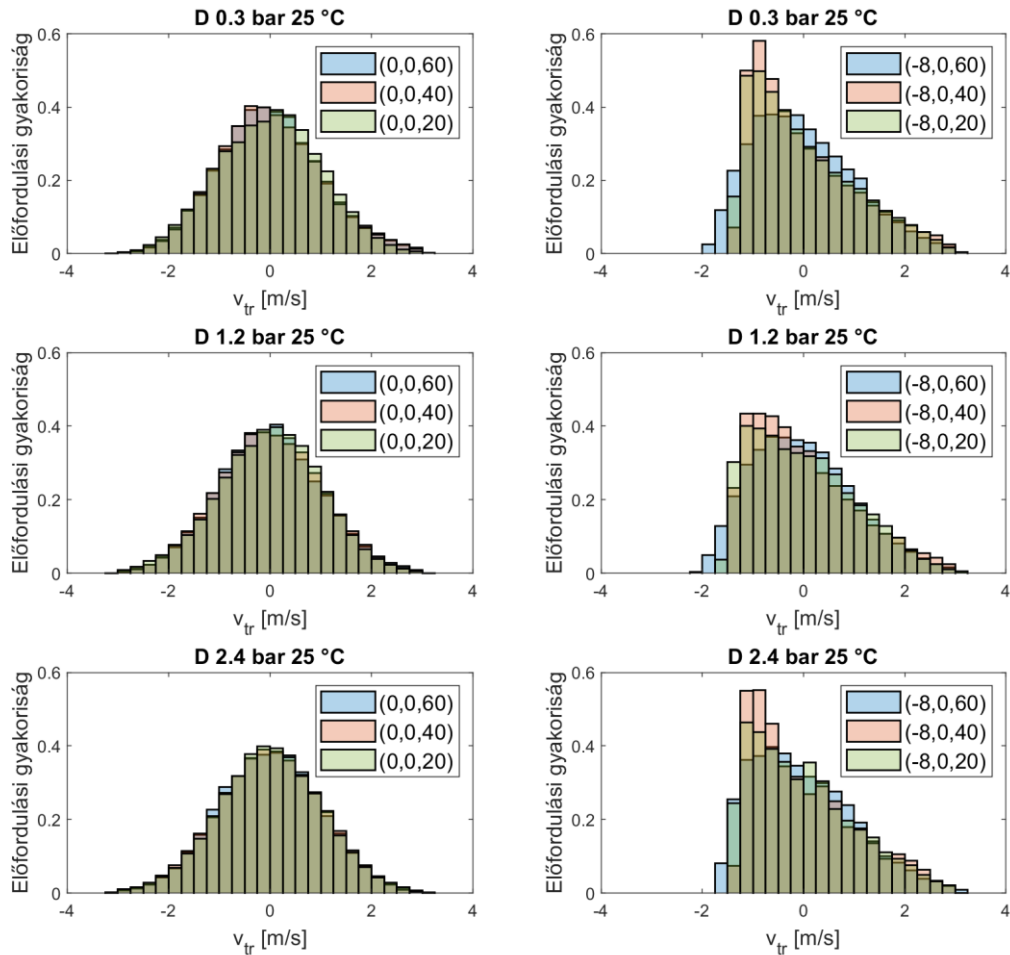


7. ábra: Az X tengely menti mérőpontok sebességeloszlásainak átlaga és szórása

Az X tengely menti sebességeloszlások átlagának és szórásainak alakulásai a 7. ábra diagramjain láthatóak. Minden porlasztónyomáson és fúvókatávolság esetén szimmetria figyelhető meg a sebességek és a szórások esetén is, ami a permet szabadsugár tulajdonságát mutatja. Az eredmények alapján látható, hogy az eloszlások tulajdonságai jelentősen eltérnek egymástól, eltérő sebességtartományon helyezkednek el, a permet pereme felé alakjuk is torzul. Megjegyezzük, hogy bár az Y tengely pontjaihoz tartozó eredményeket nem mutattuk be, ezek jellegüket tekintve nagyon hasonlóak az X tengely esetén tapasztalt eredményekhez.

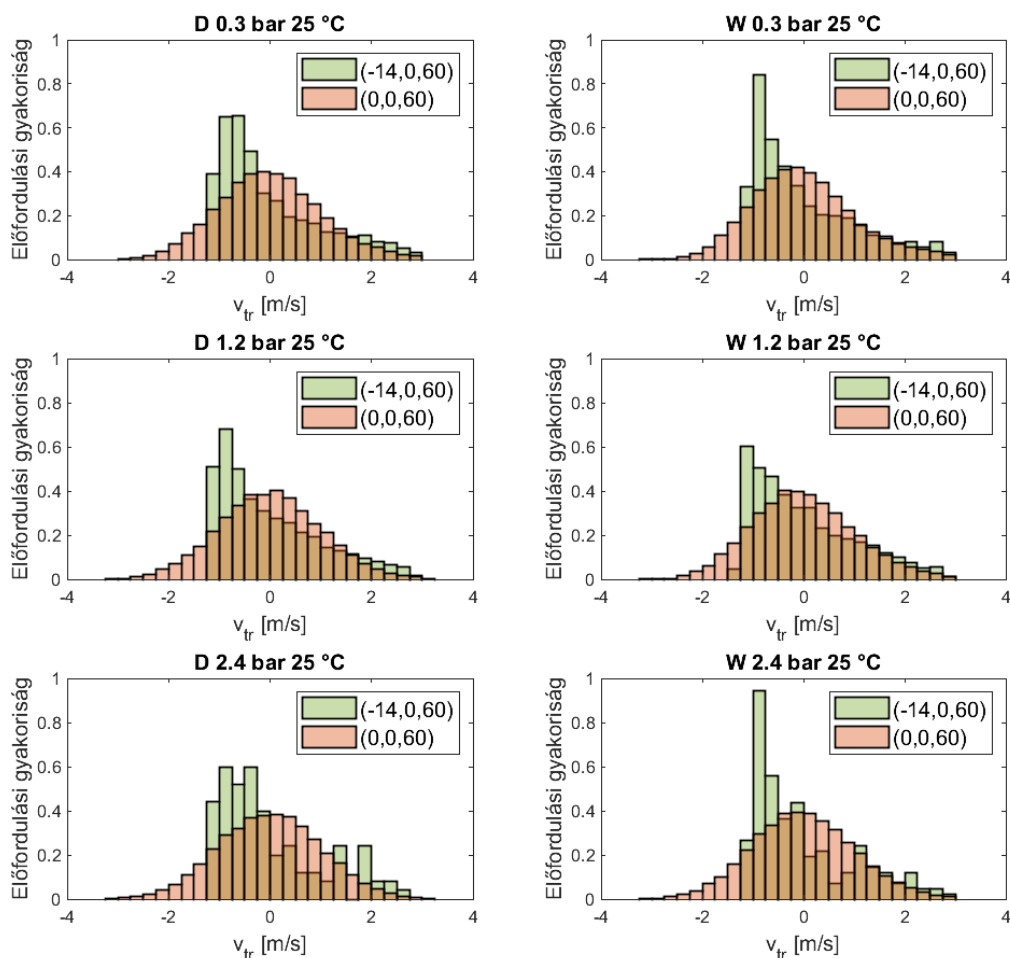
A sebességeloszlások hasonlóságának vizsgálatához az adatsorokat a korábban említett módon transzformáltuk és dimenziótlantítottuk. Az így nyert dimenziótlán sebességeloszlások átlaga nulla, míg a szórásuk egységnyi. Ezek az eloszlások a 8. ábra hisztogramjain láthatóak. A dimenziótlán eloszlások alakja a szimmetriatengely mérési pontjaiban csupán minimális el-

térést mutat a különböző porlasztónyomások és z koordináták esetén. A permet szélső pontjaiban az aszimmetrikus eloszlások szintén hasonlóak a különböző porlasztónyomások esetén, viszont nagyobb eltérést mutatnak a különböző z koordinátában.



8. ábra: Dimenziótlan sebességprofilok hasonlóságának értékelése a dízelolaj porlasztásakor

A 9. ábra diagramjain látható, hogy víz esetén is hasonlóan alakulnak a dimenziótlan sebességeloszlások a szimmetriatengelyhez közeli pontokban. A permet szélső pontjaiban a sebességeloszlás szabálytalan, ez a jelleg a porlasztónyomás növelésével erősödik.



9. ábra: Sebességeloszlások dimenziótlanításának eredménye víz porlasztásakor

5. Összegzés

Jelen publikációban levegő segédközeges porlasztás nagyszámú mérési eredményeinek statisztikai módszerekkel történt feldolgozását mutattuk be. A bemutatott módszertan a permet modellezésével foglalkozó kutatók és tervezőmérnökök munkáját is elősegíti.

Megállapítottuk, hogy a $z = 60$ mm keresztmetszetben az $-5 \leq x \leq 5$ mm tartományban vizsgált sebességeloszlások szórása nem változik jelentősen, míg a $z = 40$ mm keresztmetszetben ez a határ közelebb esik a szimmetriatengelyhez. A $z = 20$ mm keresztmetszet esetén ilyen tartomány nem határozható meg, hiszen ilyen közel a fűvókához még nem beszélhetünk kifejlett peremről.

A dimenziótlanítás lineáris transzformációval történt, ezért adott pontban, ahol hasonlóak a dimenziótlan eloszlások, a porlasztónyomás növelésével közel lineárisan növekvő átlagsebességre és szórásra következtethetünk. A kapott hisztogramok a dimenziótlanítás után a körülményektől függetlenül közel egybevágónak mutatkoztak a permet magjában, így a további, átfogóbb kutatások alkalmával igyekszünk olyan korrelációkat felállítani, amelyek segítségével a permet középső része jól modellezhető lehet. Mivel a peremrégió igen irreguláris, továbbá az ide sodródó cseppek száma alacsony, ezért vélhetően ezt a szakaszt sztochasztikus modellezés segítségével lehetséges megfelelően közelíteni.

6. Köszönetnyilvánítás

Jelen cikk a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával, az NKFI Alapból az OTKA-FK 124704 projekten keresztül valósult meg.

7. Hivatkozások

- [1] Lefebvre AH, McDonell VG. *Atomization and Sprays*. Second. Boca Raton, FL, FL: CRC Press; 2017.
- [2] ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 20R1 2020. [https://doi.org/10.1016/0140-3664\(87\)90311-2](https://doi.org/10.1016/0140-3664(87)90311-2).
- [3] Behzad M, Ashgriz N, Karney BW. *Surface breakup of a non-turbulent liquid jet injected into a high pressure gaseous crossflow*. Int J Multiph Flow 2016;80:100–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.11.007>.
- [4] Lefebvre AH, Ballal DR. *Gas turbine combustion*. third. Boca Raton: CRC Press; 2010. <https://doi.org/10.1002/1521-3773>.
- [5] Poozesh S, Lu K, Marsac PJ. *On the particle formation in spray drying process for biopharmaceutical applications: Interrogating a new model via computational fluid dynamics*. Int J Heat Mass Transf 2018;122:863–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.043>.
- [6] Fritsching U. *Droplets and particles in sprays: tailoring particle properties within spray processes*. China Particuology 2005;3:125–33. [https://doi.org/10.1016/S1672-2515\(07\)60178-X](https://doi.org/10.1016/S1672-2515(07)60178-X).
- [7] Schäfer W, Rosenkranz S, Brinckmann F, Tropea C. *Analysis of pneumatic atomizer spray profiles*. Particuology 2016;29:80–5. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2015.12.002>.
- [8] Urbán A, Malý M, Józsa V, Jedelský J. *Effect of liquid preheating on high-velocity airblast atomization: From water to crude rapeseed oil*. Exp Therm Fluid Sci 2019;102:137–51. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.11.006>.
- [9] Lajos Tamás. *Az áramlástan alapjai*. 4th ed. Budapest: Lajos Tamás; 2008.
- [10] MathWorks. MATLAB, Statistics Toolbox Release 2020b 2020.

Munkahely: BME Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék
Foglalkozás, e-mail cím: Ráczi Erika: MSc hallgató, raczi@energia.bme.hu, Józsa Viktor:
egyetemi docens, jozsa@energia.bme.hu

Evaluation of the non-dimensional velocity profiles of airblast atomization