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

RÁCZ ERIKA

TDK DOLGOZAT

Levegő segédközeges porlasztás légsebességének meghatározása a permetben

Konzulens:
Dr. Józsa Viktor
egyetemi adjunktus

Budapest, 2020

TARTALOMJEGYZÉK

1. Célkitűzések 3
2. Bevezetés 4
2.1. Levegő segédközeges porlasztás 5
2.2. A cseppek áramláskövetése 9
3. Mérési Körülmények 13
3.1. Vizsgált permet 13
3.2. A Fázis Doppler Anemométer 16
4. Értékelési módszerek 18
4.1. A permet légsebességének vizsgálata méret alapú adatszűréssel 18
4.2. A statisztikai értékelés eszközei 19
4.2.1. Adatsorok előszűrése 20
4.2.2. Méret alapú osztályozás 22
4.2.3. Adatszűrés 23
5. Eredmények értékelése 26
5.1. Maximális cseppméret 26
5.2. Sebességeloszlások, átlagsebességek 31
5.3. Reynolds szám 36
5.4. Stokes szám 41
6. Összefoglalás 46
7. Felhasznált források 47

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Józsa Viktornak, aki segített ennek a dolgozatnak a megvalósítását.

Köszönöm mind a szakmai tanácsokat, mind az emberi támogatást, továbbá a bizalmat, amelyet megszavazott nekem az elmúlt félévben, így részt vehetek ebben a kutatásban. A közös munka során sokat fejlődtem, tanulhattam tőle.

A jövőben remélem kamatoztathatom a megszerzett tudást, és tovább fejleszthetem ismereteimet a kutatási feladatokban.

Budapest, 2020

Rácz Erika

1. CÉLKITŰZÉSEK

Levegő segédközeges porlasztóval képzett permet áramlása összetett folyamat, a porlasztás leíró mérlegegyenletei bár ismertek, a folyamat kaotikus természete (a peremfeltételekre való végtelen érzékenység) miatt azonban analitikusan a probléma nem megoldható, így statisztikai módszerek alkalmazására van szükség. Jelen dolgozat arra a kérdésre keresi a választ, hogy a kétfázisú áramlás esetén hogyan tudjuk jól meghatározni a gáz fázis (itt levegő) áramlási sebességét. Erre az irodalomban pontos iránymutatás nem létezik, többnyire ökölszámokat alkalmaznak, melyek a jelenleg vizsgált nagy áramlási sebességek mellett (100 m/s nagyságrend: a közeg már nem közelíthető összenyomhatatlanként) nem alkalmazhatók.

A diagnosztikai vizsgálat célja a kialakult kétfázisú áramlás viselkedésének és jellemzőinek általánosítása. A kidolgozott módszer a kívánt statisztikai jellemzők mellett megtalálja az azonosan viselkedő cseppméret osztályokat, így következtethetünk a porlasztóközeg áramlási sebességére, megoldva a felvetett problémát. A nagy adatbázis és széles áramlási sebességtartomány segítségével a Stokes számra egy általános kritériumot fogalmazunk meg.

2. BEVEZETÉS

A porlasztó berendezések használata általánosan elterjedt különböző iparágakban, ahol technológiai szükséglet jelentkezik folyadékok permetképzésére, például:

- mezőgazdaság: permetezés, öntözés,
- nehézipar: porkohászat, anyagtechnológiai edzés,
- könnyűipar: bevonatképzés festékporlasztóval,
- vegyipar: szárítás, hűtés, párásítás, mosás,
- gyógyszeripar: egészségügyi, gyógyászati eszközök.

A levegő segédközeges porlasztás használata megjelenik az ipari tüzelőberendezésekben is. A nyomásporlasztókhoz képest a levegő segédközeges porlasztók nagy levegőmennyiséggel és alacsonyabb nyomáson üzemelnek, ezért megfelelőek lehetnek repüléshez és energiatermeléshez használt gázturbinákhoz.

A gázturbinákban gáznemű tüzelőanyagok mellett folyékony tüzelőanyagok tüzelésére is lehetőség van megfelelő porlasztóberendezésekkel. A porlasztás folyamatának megismerésére, így a permet tulajdonságainak vizsgálatára több szempontból is szükség van a tüzelési folyamat optimalizálásának érdekében.

- A fosszilis energiahordozókat használó tüzelőberendezésekkel szemben kialakult szigorú környezetvédelmi elvárások miatt törekednünk kell a károsanyagkibocsátás csökkentésére.
- Megfelelően irányított porlasztási folyamat esetén a tüzelőanyag-felhasználás is csökkenthető, amely az ezzel járó költségeket és a CO_2 kibocsátást is csökkeni.
- A tüzelési technológia optimalizálásával folyamatos, biztonságos üzem hozható létre, amellyel meghosszabítható a berendezések élettartama.
- Szintén a környezetvédelmi előírások és a csökkenő mennyiségű fosszilis tüzelőanyagok kiváltására megjelenő új, pl. megújuló energiahordozó alapú, folyékony tüzelőanyagok porlasztási vizsgálatainak megismerése szükséges.

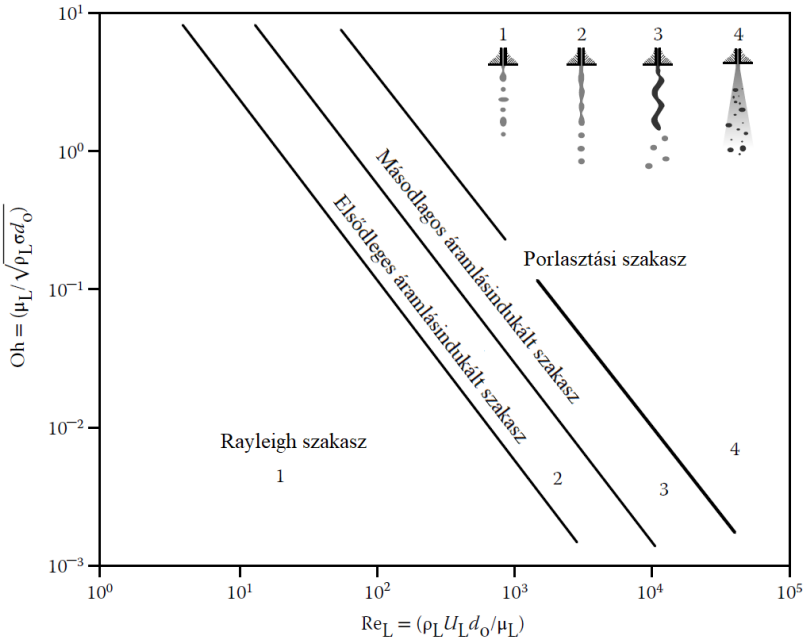
A levegő segédközeges porlasztás során turbulens kétfázisú áramlás jön létre. A permetet alkotó komponensek viselkedésének, áramlástani jellemzőinek mérése nehéz, az áramlás jellege és a permet cseppjeinek kis mérete miatt speciális méréstechnikai eszközökre van szükség. A porlasztás fizikai folyamatainak és a permet tulajdonságainak matematikai leírása bonyolult és nehézkes a kaotikus viselkedés miatt, így közelítő analitikus módszerek sem léteznek a porlasztás, illetve részmechanizmusok modellezésére a permet méretskáláján. A szakirodalomban főként empirikus- és félempirikus leírások és közelítő értékek találhatóak, melyek általános hátránya, hogy leginkább interpolációra használhatóak, tehát a vizsgálatokon kívüli paramétertartományokra körülményesen alkalmazhatók.

2.1. Levegő segédközeges porlasztás

Levegő segédközeges porlasztó esetében a folyadék cseppekké bontása nagy sebességű levegővel történik. A permetképzés során a befecskendezett folyadék nagyobb méretű cseppekből aprózódik kisebb cseppekké. Az aprózódás folyamata több egymásra ható mechanizmussal eredménye, melyek lefolyása függ a levegő és a folyadék anyagjellemzőitől, illetve az áramlási körülményektől.

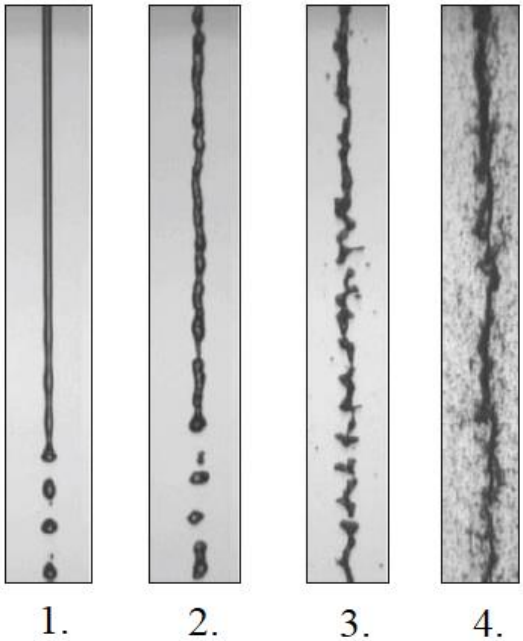
A permet egy cseppjének egyensúlyi állapotában a cseppfelület bármely pontján jelentkező belső nyomás megegyezik a külső aerodinamikai nyomás és a felületi feszültség összegével. A csepp addig stabil marad, míg a külső nyomás változásait le tudja követni a felületi feszültség, azaz összegük álandó marad. Abban az esetben, ha a külső nyomás nagyobb a felület feszültségnél, az utóbbi nem tudja kompenzálni az előbbi változásait, ezért a csepp deformálódik és végül felaprózódhat kisebb cseppekké. A primer porlasztási mechanizmus során a befecskendezett folyadékból a levegő áramlás nagy cseppeket szakít le. Ezek cseppek instabilak, ezért további aprózódási folyamatokat szenvednek el. Mivel a cseppek felületi feszültségéből származó nyomás fordítottan arányos a cseppmérettel, a cseppek addig aprózódnak, míg ez megfelelően nagy nem lesz a külső erők kompenzálására. Ezt szekunder porlasztási mechanizmusnak nevezzük [1].

A porlasztási mechanizmus különböző módon folyhat le a porlasztás körülményeitől és a porlasztott folyadék tulajdonságaitól függően. A cseppaprózódási folyamatok áramlástani jellemzésére több leírás is található a szakirodalomban. Egy kutatásban R.D. Reitz (1978) az Ohnesorge és Reynolds szám alapján osztályozta az aprózódási mechanizmusokat [1]. Az Ohnesorge szám (Oh) a viszkózus erők, a tehetetlenségből származó, illetve a felületi feszültségből származó erők viszonyát, a Reynold szám pedig a tehetetlenségből és súrlódásból származó erők viszonyát fejezi ki.



1. ábra: Porlasztási mechanizmusok osztályozása [1].

A kutató a tanulmányban a porlasztási mechanizmusokat négy osztályba sorolta, az Ohnesorge és Reynolds szám alapján történő besorolást az 1. ábra, illetve a mechanizmusokról készített képeket a 2. ábra mutatja be.

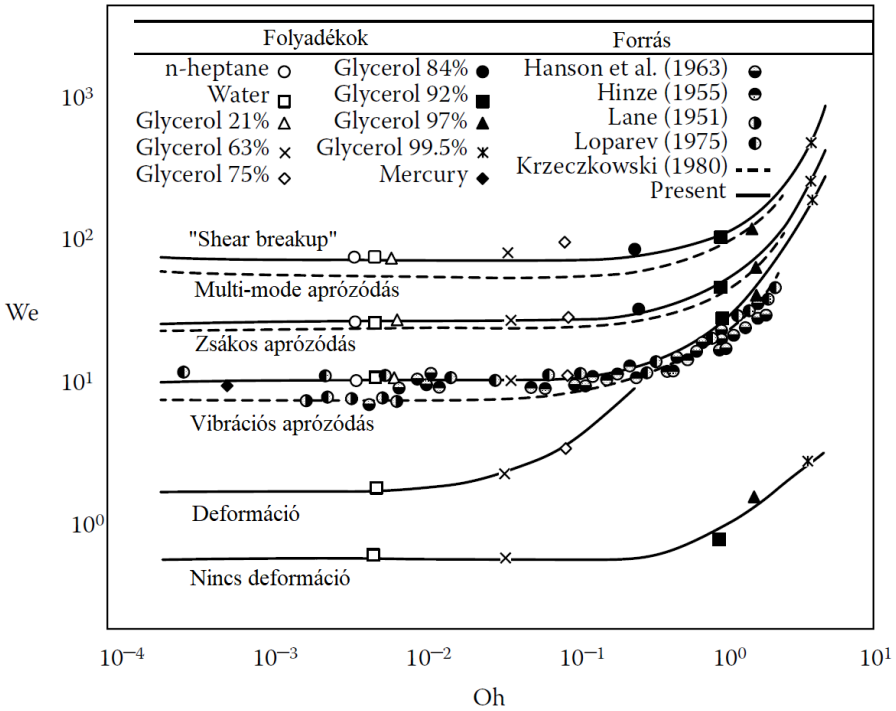


2. ábra: Porlasztási folyamatokról készített fényképek [2].

- Az első mechanizmus a Rayleigh szakasz, amely során a folyadéksugár tengelyére szimmetrikus rezgések növelik a sugár felületét, így megnő a felületi feszültség. A cseppátmérő meghaladja a sugár átmérőjét [1,2].
- A második képen az elsődleges áramlásindukált szakasz látható. A felületi feszültséget növeli a sugár és a gáz áramlása közötti relatív sebességkülönbség növekedése. Ennek eredménye a sugárban kialakuló statikus nyomáseloszlás, gyorsul a sugár szétesésének folyamata. A cseppátmérők megegyeznek a sugár átmérőjével, az aprózódás a fúvóka nyílásától több átmérő távolságra történik [1,2].
- A harmadik kép a másodlagos áramlásindukált szakaszt mutatja. A cseppek létrejöttét a felszínen megjelenő instabil rövidhullámhosszú hullámok okozzák szintén a relatív sebességkülönbség növekedése miatt. Az átlagos cseppátmérő kisebb, mint a sugár átmérője. Az aprózódás a fúvóka nyílástól csak néhány átmérőnyi távolságra történik [1,2].
- A negyedik folyamat a porlasztás szakasza. A folyadéksugár a fúvóka nyílásnál szétesik. Az átlagos cseppátmérő jóval kisebb, mint a sugár átmérője [1,2].

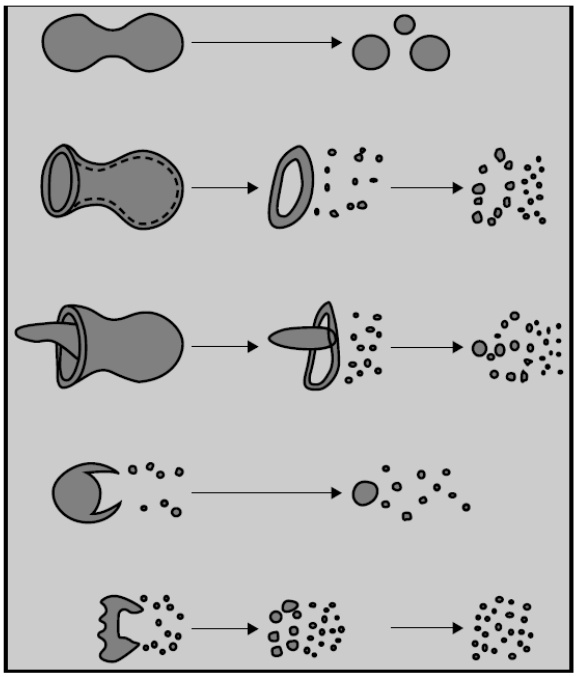
Hsiang és *Faeth* [3] és *Guildenbecher és tsai.* [4] cikkeiben olvashatunk a szekunder porlasztási mechanizmusok vizsgálatáról, ahol a kutatók két kulcsparamétert használnak ennek jellemzésére. Az egyik az előzőekben már említett Ohnesorge szám, a másik

pedig a Weber szám (We), amely a tehetetlenségi és a felületi feszültségből származó erők viszonyát fejezi ki. A két paramétertől függő szekunder porlasztási mechanizmusok tartományait a 3. ábra mutatja.



3. ábra: Szekunder porlasztási folyamatok besorolása Oh és We alapján [1].

A 3. ábra értelmezéséhez a folyamatokhoz készített vázlatok 4. ábra rajzain láthatóak növekvő relatív sebesség, így egyre finomabb permet mellett, noha ez utóbbi a jobb értelmezhetőség miatt nem látszódik.



4. ábra: Szekunder porlasztási mechanizmusok vázlata [1].

- Az első vázlat a vibrációs aprózódást mutatja, amely ritkán megfigyelhető jelenség. A folyamat során néhány az aprózódó cseppel összehasonlítható méretű részecske jön létre. [4]
- A második vázlat a zsákos aprózódást mutatja. A csepp elnyúlik, majd zsákszerű alakot vesz fel. Először a zsák pereme toroidális alakban leszakad, majd tovább aprózódik a zsák és a perem is [4].
- A harmadik vázlat a többmódusú aprózódást szemlélteti, amely hasonló az előzőhöz, viszont zsák képződésénél létrejön egy porzó szerű alakzat, amely szintén apróbb cseppekre bomlik a folyamat végén [4].
- A negyedik folyamat a nyíráson vagy folyadékfilm vékonyodáson keresztüli mechanizmus, amely a cseppekre ható nagy nyíróerő hatására megy végbe. A folyamat során a csepp folyamatosan aprózódik, néhány esetben viszont maradhat egy nagyobb méretű mag is.
- Az utolsó folyamat a katasztrofális aprózódás jelensége, amely során a cseppek nagy hullámhosszú és amplitúdójú deformáció miatt viszonylag nagy méretű részekre bomlik, majd ezek tovább aprózódnak. Ez tipikusan szuperszonikus viszonyok mellett alakul ki.

Urbán és tsai. [5] cikkben vizsgálták a választott folyadékok és porlasztási körülmények esetén számított Ohnesorge, Weber, illetve Reynolds számok tartományát. Az eredményeket a 1. táblázat tartalmazza. A táblázatban megjelenő mennyiségek alsó indexei a a levegőre számított és l folyadékra számított értékeket jelölik.

1. táblázat: Kétfázisú áramlást jellemző mennyiségek, jellemzők [5]

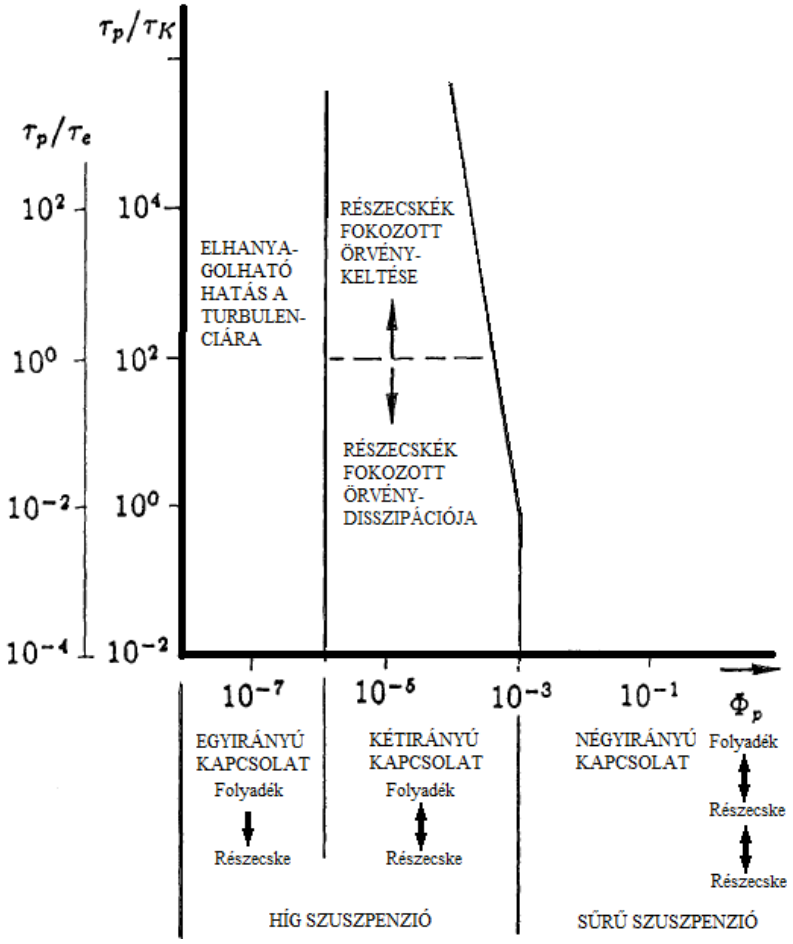
		D	LHO	RO	W
p [bar]	min.	0,3	0,3	0,3	0,3
	max.	2,4	2,4	2,4	2,4
Re_a	min.	8969	8974	8979	8994
	max.	30.037	30.047	30.058	30.075
Re_l	min.	32.337	6524	1849	91765
	max.	197.784.824	81.897.568	30.974.271	446.301.699
We_a	min.	988,4	792,5	730,6	289,7
	max.	9549	4640	5014	1982
We_l	min.	546.717	494.002	479.443	231.970
	max.	3.399.635	3.220.624	2.872.961	1.335.408
Oh	min.	0,019	0,029	0,077	0,0028
	max.	0,036	0,147	0,465	0,0052

Az 1. ábra alapján a vizsgált beállítások porlasztási mechanizmusai a porlasztási szakaszba esnek, a 3. ábra alapján a jellemző aprózódási folyamat a nyíráson keresztüli felbomlás.

2.2. *A cseppek áramláskövetése*

Annak ellenére, hogy a kutatók a turbulencia vizsgálatában nagy előrelépést értek el, ismereteink máig korlátosak ezen a területen. A turbulencia matematikai modelljére nincsen általános megfogalmazás, ez pedig a kétfázisú áramlások vizsgálatát is limitálja. A turbulencia matematikai leírását leginkább a Navier-Stokes egyenlet segítségével közelíthetjük, viszont ezek az erősen nemlineáris, parciális differenciálegyenletek megoldási nem triviálisak turbulens áramlás esetén [6], így analitikus megoldást lehetetlen adni.

A kétfázisú, turbulens áramlások esetén az áramló közeg és részecskéi között az áramlást befolyásoló kölcsönhatások jöhetnek létre. Ennek matematikai vizsgálatával foglalkozott *Elghobashi* [7]. A kutató a kölcsönhatások osztályozását vizsgálta a az áramlás fázisainak időskálájának viszonya és fázisaránya alapján, az 5. ábra szemlélteti eredményeinek összegzését diagram formájában.



5. ábra: Részecskék és turbulencia kölcsönhatásának osztályozása [7].

A diagramon szereplő mennyiségek a következők [7]:

- Φ_p a részecskék térfogatarány az áramlásban, $\Phi_p = \frac{M \cdot V_p}{V}$,
- M a részecskék száma,
- V_p egy részecske térfogata,
- V a részecskék és az áramló közeg össztérfogata,
- d a részecske átmérője,
- τ_p a részecske időléptéke, $\tau_p = \frac{\rho_p \cdot d^2}{18 \cdot \rho_f \cdot \nu}$,
- τ_K Kolmogorov időlépték, $\tau_K = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}}$,
- τ_e nagyméretű örvények elhaladási ideje $\tau_e = \frac{l}{u}$,
- ρ_p a részecskék sűrűsége,
- ρ_f az áramló közeg és a részecskék sűrűsége,
- ν az áramló közeg kinematikai viszkozitása,
- u az áramlás átlagsebessége,
- l legnagyobb energiával rendelkező örvények hosszléptéke,
- ε a turbulencia kinetikus energiájának disszipációs rátája.

Alacsony térfogatarány esetén ($\Phi_p < 10^{-6}$) a részecskék relatíve alacsony száma miatt azok nem befolyásolják a turbulenciát, a kölcsönhatás egyirányú. A részecskék diszperziója függ a turbulencia állapotától, de a részecskék és a turbulencia közötti impulzusátvitel minimális hatást gyakorol az áramlásra [7].

A $10^{-6} < \Phi_p < 10^{-3}$ tartományban a részecskék száma/mérete elég nagy ahhoz, hogy befolyásolják a mérhető turbulenciát. Ezt a kölcsönhatást kétirányú kapcsolatnak nevezzük. Ebben a tartományban rögzített Φ_p érték mellett τ_p csökkenésével (pl. kisebb részecske átmérők esetén, viszont több részecske esetén) növekszik a részecskék összfelülete, emiatt megnövekedik a turbulencia disszipációs rátája is. Ellenkező esetben, ha a τ_p növekedése lép fel változatlan Φ_p érték mellett, a részecskék Reynolds száma növekszik. Kb. $Re_P \geq 400$ esetén örvénykeltés történik, amely fokozza a turbulencia energiáját. Az eddig tárgyalt tartományokat híg szuszpenziónak is nevezzük [7].

A harmadik tartományt az áramlás megnövekedett részecske-terhelése ($10^{-3} < \Phi_p$) miatt sűrű szuszpenziónak nevezzük. A nagy részecskeszám/méret miatt a kétirányú kapcsolat mellett a részecskék is kölcsönhatásba lépnek egymással, részecske ütközés történik. Ezt nevezzük négyirányú kapcsolatnak. Ahogy a Φ_p megközelíti az 1 értéket, szemcsés áramlás alakul ki, amelyben az áramló folyadék és a részecskék nem különíthetőek el egymástól [7].

Egyirányú kapcsolat esetén a turbulens áramlás viselkedésének modellezése jóval egyszerűbb, mint a másik két esetben. A kétirányú és négyirányú kapcsolatok vizsgálata rendkívül bonyolult, hiszen ezeknek a kölcsönhatások erősen nemlineárisak [7].

Az előbb említett vizsgálat izotermikusan nem összenyomható folyadékokra korlátozódik, fázisváltozások vagy kémiai reakciók végbemenetele nélküli esetben. Szintén nem veszi figyelembe a részecskék és fal ütközéseinek hatását sem [7].

Kétfázisú áramlás során abban az esetben, ha egyirányú kapcsolat jön létre az áramló közeg és a szállított részecskék között, akkor elmondható, hogy a részecskék hasonlóan viselkednek az áramló közeghez a turbulens áramlásban. Ennek a tulajdonságnak a számszerűsítésére a Stokes dimenziótlan számot (Stk) használhatjuk, amely a részecskék áramláskövető tulajdonságát jellemzi. A részecskék áramlása a valóságban bizonyos mértékben eltér az áramló közegétől tehetetlenségük és véges méretük miatt [6]

A Stokes szám meghatározására több formula is létezik. Az (1) egyenlet egy olyan általános formula, amelyben tartalmazza a turbulencia hatását [8].

$$\mathrm{Stk} = \frac{1}{18} \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \cdot \left(\frac{d}{\eta}\right)^2 \tag{1}$$

ahol η a Kolmogorov hosszlépték (a legkisebb örvények jellemző mérete), $\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}}$. A szakirodalomban általánosan használt ökölszám a Stokes szám esetén 10^{-1} értékben maximalizálja a cseppek elfogadható áramláskövetésének határát [6].

A dolgozat számításai során a (2) egyenletet használtam a Stokes szám meghatározására:

$$\mathrm{Stk} = \frac{\tau_p}{\tau_f} = \frac{\frac{\rho_f \cdot d^2 \cdot (10^{-6})^2}{18 \cdot \mu_l}}{\frac{d \cdot 10^{-6}}{w_R}} = \frac{w_R \cdot \rho_f \cdot d \cdot 10^{-6}}{18 \cdot \mu_l} = \frac{|\overline{w} - w| \cdot \rho_f \cdot d \cdot 10^{-6}}{18 \cdot \mu_l} \tag{2}$$

ahol:

- τ_p a részecske időskálája [s],
- τ_f az áramlás időskálája [s],
- d a csepp mérete [μm],
- $w_R = |\overline{w} - w|$ a csepp relatív sebessége [m/s],
- $\overline{w}$ a mérési pontban detektált cseppek átlagsebessége [m/s],
- w csepp mért sebessége [m/s],
- ρ_f a folyadék sűrűsége [kg/m^3],
- μ_l a porlasztólevegő hőmérsékletfüggő dinamikai viszkozitása [Pa·s].

Összenyomhatatlan közegben áramló részecskék viselkedésére hatással vannak az áramlásban ébredő viszkózus erők. Stokes a valós közegek kétfázisú áramlását vizsgálta és megállapította, hogy a közeg részecskéire ható közegellenállás erő [1]:

$$F = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu_l \cdot w \tag{3}$$

Ezt a kifejezést Stokes-törvénynek nevezzük, amely dominánsan viszkózus erők által uralt áramlásokra jellemző. A közegellenállási erő több tényezőtől függ, a részecske geometriai jellemzőitől, az áramlás sebességétől és a viszkozitástól. Emiatt az áramláskövetés jellemzőinek számszerűsítésére használható egy másik dimenziótlan szám a

Reynolds szám, amely a tehetetlenségi és súrlódási erők viszonyát fejezi ki. A Reynolds szám számításához használt általános kifejezés [1]:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu_l} \tag{4}$$

A dimenziótlan számok számítása során relatív sebességeket kell használnunk, mivel a cseppek egyedi áramláskövető tulajdonsága relatív a kétfázisú közeg áramlásához képest, emiatt a Reynolds számra általam alkalmazott formula a következőképpen módosult:

$$\mathrm{Re} = \frac{w_R \cdot d}{\nu_l} = \frac{|\bar{w} - w| \cdot d \cdot 10^{-6}}{\nu_l} \tag{5}$$

ahol:

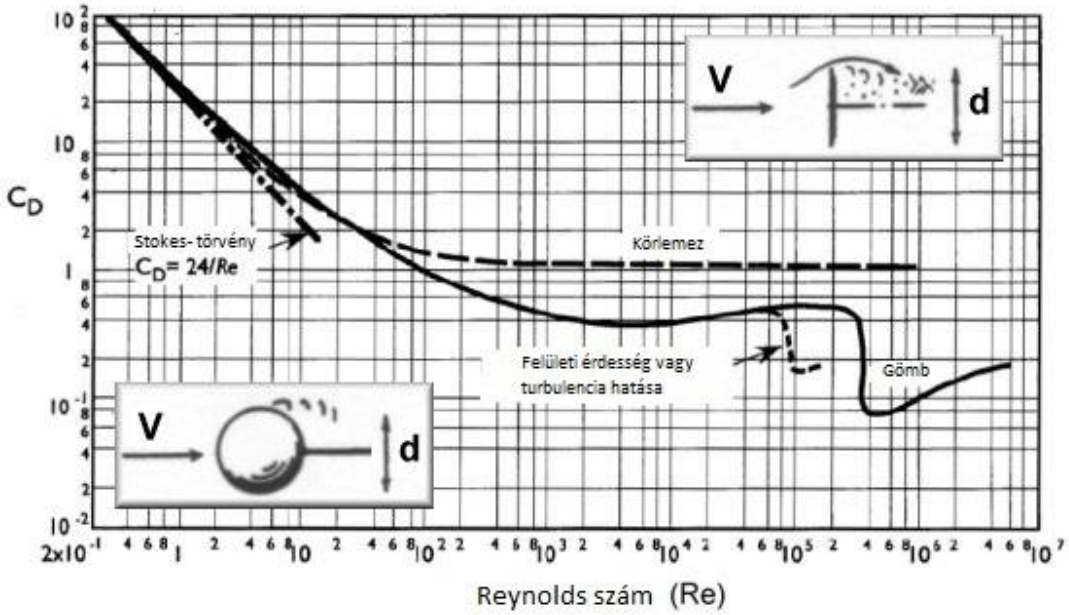
- ν_l a porlasztólevegő hőmérsékletfüggő kinematikai viszkozitása [m²/s].

Az ellenállás-tényező a következő formulával fejezhető ki [1]:

$$C_D = \frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \frac{\rho_f w}{2}} \tag{6}$$

A Stokes-törvény alacsony Reynolds számok esetén az (5) és (6) alapján kifejezhető:

$$C_D = \frac{24}{Re} \tag{7}$$



6. ábra: Körlemez és gömb alakú testek ellenállástényezője a Re függvényében [9].

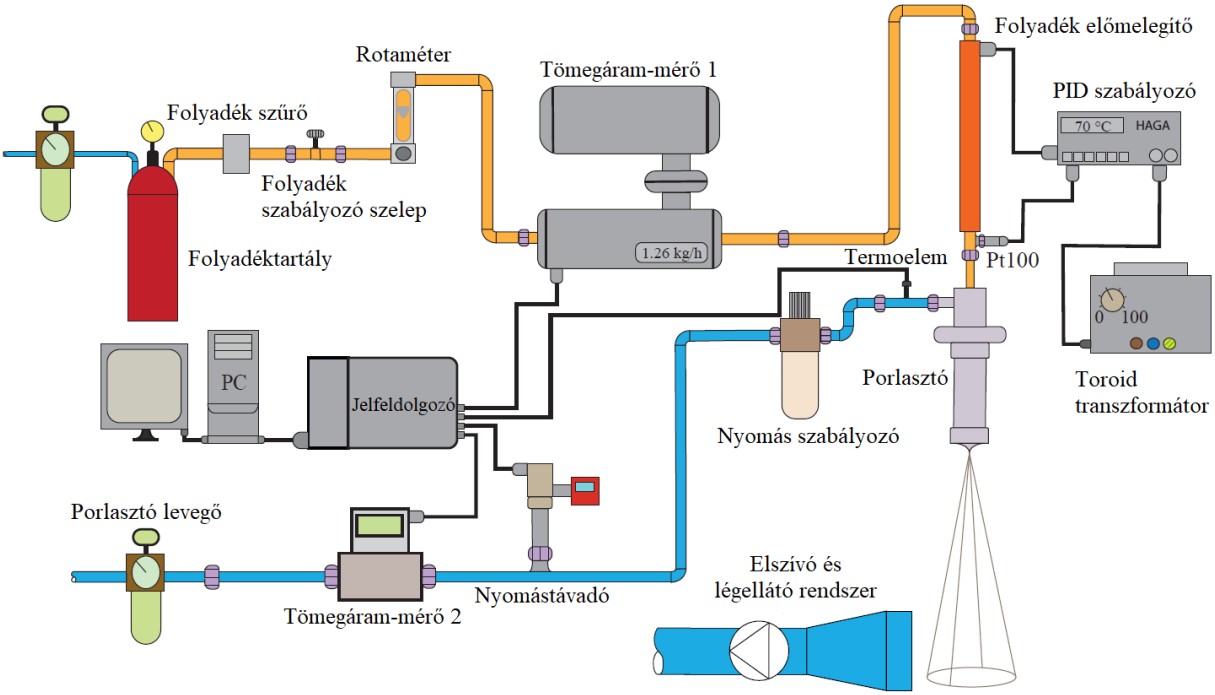
Az ellenállás-tényező és a Reynolds szám kapcsolatát a 6. ábra szemlélteti. A Stokes-törvény klasszikusan Re < 1, de praktikusan Re < 10 esetén alkalmazható mérnökileg általában elfogadható hibával. Ebben a tartományban jellemzően a viszkózus erők dominálnak az áramlásban, a részecskék áramláskövető tulajdonsága megfelelő.

3. MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK

A mérési adatsorok regisztrálása a következőkben tárgyalt mérési elrendezés és eszközök segítségével történt a korábbiakban. Ennek részletes leírása a *Urbán és tsai* [10] cikkben megtekinthető, a dolgozat csak a körülmények és módszerek megértésének szempontjából szükséges részleteket tartalmazza. Tehát az önálló munka elhatárolódik a berendezés összeállításától és a méréstől, a mérés eredményeinek feldolgozására fókuszál.

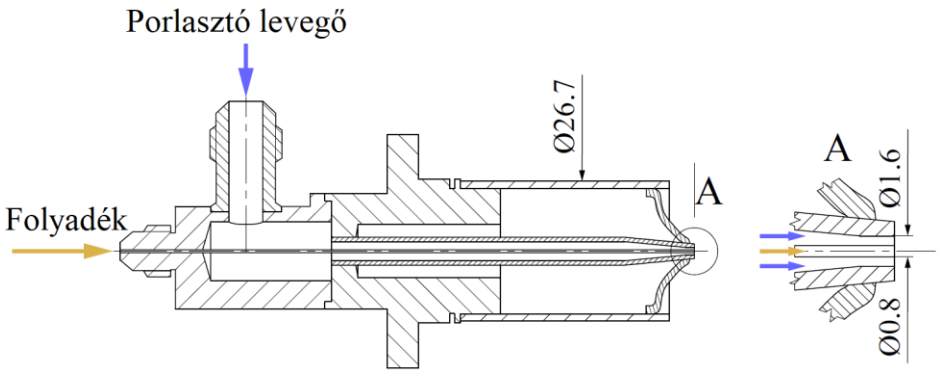
3.1. Vizsgált permet

A vizsgálat mérési elrendezését az 7. ábra mutatja. A rendszer segítségével szabályozható porlasztó nyomású, folyadék előmelegítési hőmérsékletű, folyadék és porlasztó levegő tömegáramú állapotokat vizsgáltak a kutatók. A 7. ábra vázlatán a folyadékág sárga, a légáram a kék vezetéken halad. A fekete vezetékek elektromos csatlakozást és adatkábeleket jelölnek.



7. ábra: Mérési elrendezés [10].

A mérés során vizsgált porlasztó keresztmetszeti képét a 8. ábra mutatja, ami egy Capstone C-30 mikrogázturbina égő egyszerű sugaras, levegő segédközeges porlasztója. A porlasztó 0,4 mm belső átmérőjű csövében áramlik a folyadék, ekörül koncentrikusan elhelyezkedő, 0,8 mm belső és 1,6 mm külső átmérőjű csatornában áramlik a porlasztólevegő. A két közeg a porlasztócsúcs után találkozik, ahol a néhány m/s-al áramló folyadék felett több száz m/s-al áramlik el a levegő. A nagy relatív sebesség és az impulzusátadás eredményezi a folyadéksugár cseppekre bomlását.



8. ábra: A vizsgált porlasztó keresztmetszeti rajza [10].

Az egyedi cseppek mérése Fázis Doppler Anemométerrel történt. Minden mérési pontban a cél 40.000 részecske detektálása volt, viszont a permet széléhez közel eső pontokban ennek elérése nem minden esetben sikerült, mivel a peremeken ritkábban történik csepp detektálás. Ebben az esetben a mérés ideje 15 másodpercben lett maximalizálva. Az adatgyűjtés így meghatározott ideig folyt annak érdekében, hogy a mérés ideje ne nyúljon túl hosszúra. A mérőtérfogat 0,6×0,072×0,073 mm volt.

A permet vizsgálata a következő anyagok (4 folyadék), előmelegítési hőmérsékletek (5 beállítás), és porlasztónyomások (6 beállítás) esetén történt. Az előmelegítési hőmérsékletek víz esetén eltérnek, az utolsó érték 100 °C helyett 90 °C volt (2. táblázat), hogy ne forrjon fel a víz.

2. táblázat: PDA mérés körülmények.

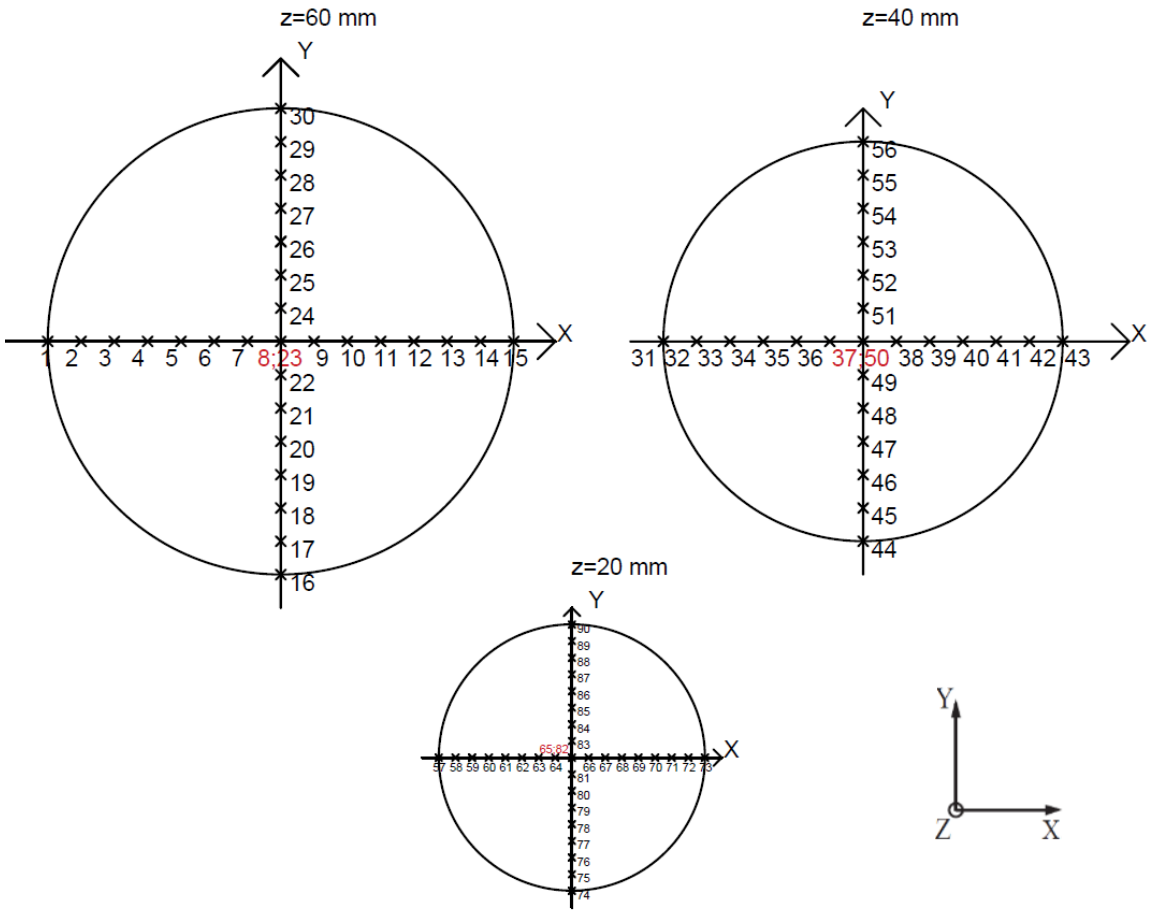
Anyag	D: Diesel LHO: könnyű fűtőolaj RO: repceolaj W: víz
Hőmérséklet [°C]	25 40 55 70 100 (víz esetén 90)
Nyomás [barg]	0,3 0,6 0,9 1,2 1,8 2,4

A kinematikai viszkozitás meghatározó anyagjellemző a permet kialakulása során lejátszódó folyamatokban [2, 3]. A folyadékok mért kinematikai viszkozitása a 3. táblázatban található. Látható, hogy a négy választott anyag kinematikai viszkozitása az előmelegítés hatására két nagyságrendet átfog. Ennek köszönhetően a mérés értékelése során az anyagjellemzők széles skáláján tudunk következtetéseket levonni a permet jellemzőről.

3. táblázat: Vizsgált anyagok kinematikai viszkozitása az előmelegítési hőmérsékleten [5].

	Előmelegítési hőmérséklet [°C]	25	40	55	70	100 (W: 90)
Viszkozitás [mm²/s]	D	2,53	1,72	1,32	1,02	7,41
	LHO	12,5	7,31	4,34	3,06	1,79
	RO	44,2	25,2	15,2	8,81	4,73
	W	0,893	0,658	0,511	0,413	0,326

Mérés összesen 120 körülmény esetén történt (lásd 2. táblázat). Az adatgyűjtés időben egymás után a permet 90 különböző pontjában történt. A porlasztó szimmetriatengelyén (továbbiakban z tengely) három távolságban, 60, 40 és 20 mm-en két-két átmérő mentén voltak rögzítve a mérési pontok, amit a 3. ábra mutat.



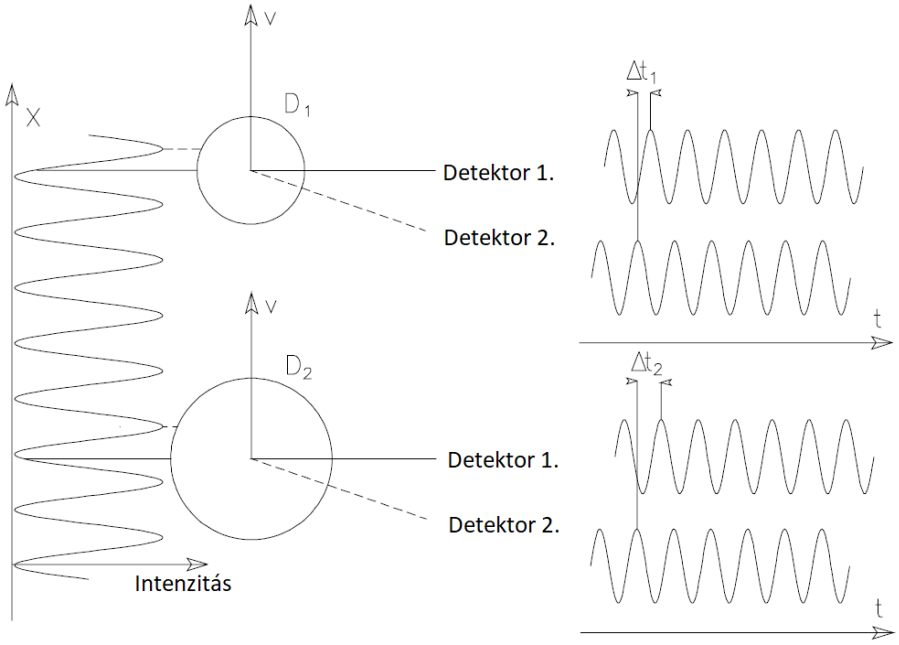
9. ábra: Mérőpontok számozása a három kijelölt keresztmetszeten.

A permet mérőpontjainak elhelyezkedésének értelmezéséhez az 9. ábra rajzán látható koordináta-rendszert rögzítettük. A mérőpontok szimmetrikusan helyezkednek el a keresztmetszeteken, ezzel lehetőség van a permet tengelyszimmetrikusságának vizsgálatára. A z = 60 mm távolságban összesen 30 db, a z = 40 mm távolságban 26 db és a z = 20 mm keresztmetszeten 34 db mérési pont található. A z = 60 és 40 mm távolságok esetén a mérési pontok egy-egy átmérő mentén 2 mm-es távolságra vannak egymástól, míg z = 20 mm esetén ez 1 mm.

3.2. A Fázis Doppler Anemométer

A levegő segédközeges porlasztóval képzett permet vizsgálata Fázis Doppler Anemométerrel (Phase Doppler Anemometry, röviden PDA) történt. Ezzel a technológiával optikai úton információt kaphatunk a permet részecskéinek méreteiről és sebességkomponenseiről egyszerre, anélkül, hogy a permet áramlását megzavarnánk, ami kifejezetten fontos ilyen kis méretskálájú problémák mérése során.

A PDA kis méretű, gömbszimmetrikus, mozgó cseppek vizsgálatára alkalmas. A nem kellően gömbszerű részecskékről nem rögzít információt, viszont ezek számosságáról igen. A mérési elve a Doppler-effektus elvén alapszik, amely szerint a mozgó forrás által kibocsájtott hullám torzul, megváltozik annak frekvenciája.

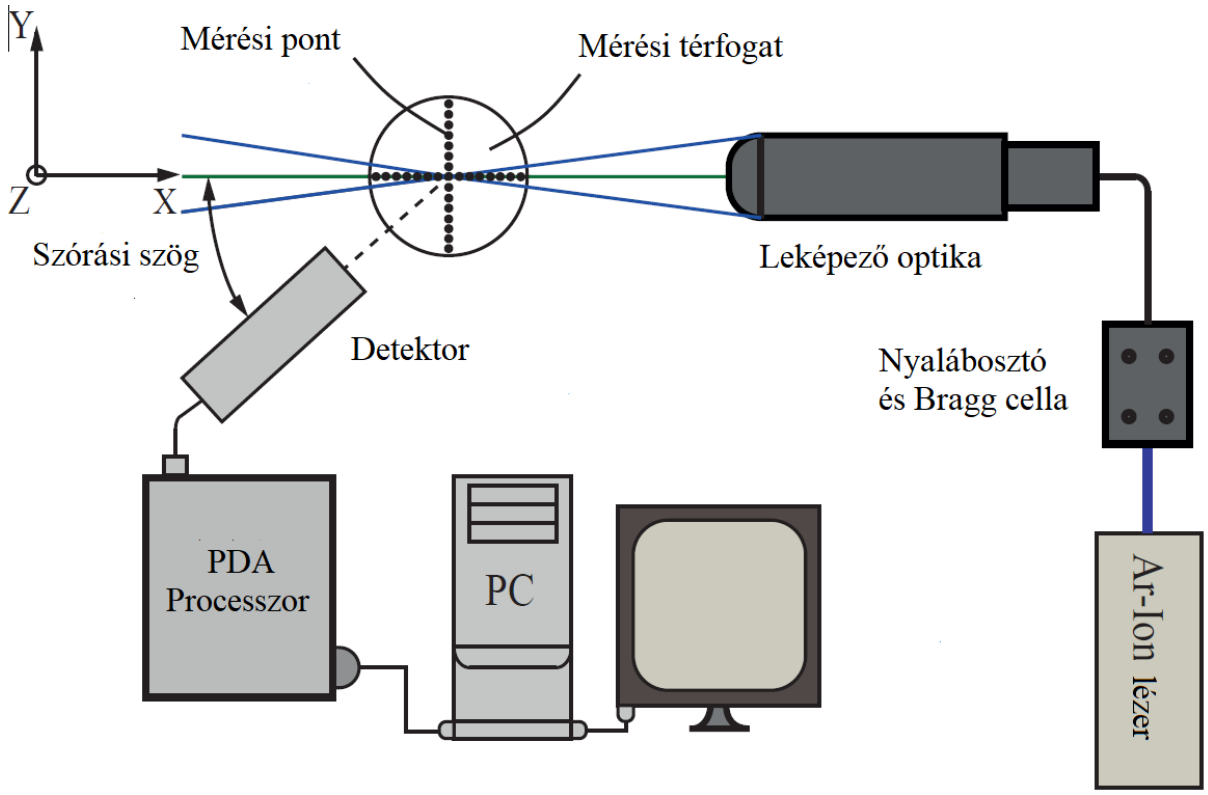


10. ábra: Detektorokkal érzékelt jel fáziseltolódása. [12].

A berendezésben a leképező optika két zöld lézernyalábot bocsájt ki 514,5 nm hullámhosszon jelen berendezés esetében, amelyek a gömb alakú részecskéken fénytörést szenvednek el. Amikor a részecske áthalad a mérési pontban, a beépített két fotodetektor azonos frekvenciájú Doppler-eltolódást érzékel, viszont a jelek között fáziselto-

lódás lehet attól függően, hogy a két detektor milyen szögben helyezkedik el. A fáziseltolódás függ a csepp méretétől, feltéve, hogy az optika paraméterei változatlanok, ennek szemléltetésére szolgál a 10. ábra. A nagy részecskék detektálása során keletkező fáziskülönbség nagyobb, mint a kis részecskéken. Előfordulhat, hogy a két jel közötti fáziseltolódás nagyobb, mint 2π, akkor a méretben bizonytalanság lép fel, amely egy harmadik detektor beépítésével kiküszöbölhető [12].

A vizsgálat során használt műszer a Dantec Dynamics gyártmányú PDA mérőrendszer volt, ennek sematikus felépítését az 11. ábra szemlélteti. A detektorok által érzékelt cseppekről kapott információkat jelátalakítás után az adatgyűjtő rendszer összegzi és tárolja. A PDA rendszer nagy előnye, hogy az optikai rendszer paramétereiből és a fáziseltolódásból információt kaphatunk a cseppek méreteiről és sebességkomponenseiről is. A használt PDA egy méretkomponenst, a z irányút rögzítette, valamint a z irányú sebességkomponens mellett kék lézerfényt (488 nm hullámhossz) is használva az argon ion lézer fényemissziójából az y irányú sebességkomponens is rögzítve lett, y irányú méret rögzítésére a rendszer nem alkalmas, ehhez már fizikailag több helyen szükséges detektort elhelyezni. A két polarizált lézersugarat két részre osztás után egy Bragg-cella segítségével 40 MHz-eltolva alakul ki összesen a 4 fénysugár, amiből az azonos színűek közti fáziskülönbség teszi lehetővé a részecskék mérését. Eltolás nélkül az érkező jel túl nagy frekvenciája miatt az optikai mérés a jelenlegi eszközeinkkel megvalósíthatatlan lenne.



11. ábra: PDA rendszer elrendezése [10].

4. ÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK

A dolgozat célja olyan értékelési módszer kidolgozása volt, amellyel általánosan állapíthatóak meg a kifejlett permethez tartozó leíró jellemzők a porlasztás és a porlasztott anyagok jellemzőitől függetlenül. Ebben a fejezetben részletezem azokat a statisztikai eszközöket, amelyek segítségével a közel 400 millió egyedi cseppet tartalmazó adathalmazt értékelem.

4.1. A permet légsebességének vizsgálata méret alapú adatszűréssel

A porlasztási folyamat során a folyadék aprózódik, amely eredményeként megfelelően kis méretű folyadékcseppeket kapunk eredményül, melyeknek z irányú méretét és y és z irányú sebességkomponensét mérjük. A hasonlósági vizsgálat során, mivel jóval kisebb értékeket tartalmaz, az y irányú sebességkomponensektől most eltekintünk, ezt későbbi kutatások során fogjuk értékelni a z irányú komponens mellett. A dolgozat egyik célkitűzése egy általános szűrési módszer kidolgozása volt, a permetet jellemző cseppmérettartomány leszűkítésére a permet légsebességének meghatározásához. A PDA mérés segítségével nyert 10.800 adatsort közvetlenül értékelem, fókuszálva a cseppátmérő és az axiális sebesség kapcsolatára.

A méret alapú szűrés eredményeképpen meghatároztam a kifejlett permet cseppjeinek jellemző mérettartományának maximumát. Ezzel az értékkel szűrtem az adatsorok cseppméret-sebesség adatpárjait, ezáltal meghatározva a permetet jellemző légsebességet.

A szűrt adatsorok jellemző méretének és sebességének meghatározása után vizsgálni kell a porlasztott részecskék áramláskövető tulajdonságait. A cseppek eltérő méretei és sebességei miatt dimenziótlan számok segítségével tudunk következtetéseket levonni az általános viselkedésről. A cseppek áramláskövető tulajdonságainak értékelésére megfelelő dimenziótlan szám a Stokes (Stk) és Reynolds számok (Re). A Reynolds szám a tehetetlenségi és súrlódási erők arányát írja le. Az porlasztott cseppek áramlása akkor hasonló, ha hasonló geometriai viszonyokra a cseppekhez tartozó Reynolds szám azonos, azaz a cseppek áramlási viszonyait hasonlíthatjuk össze. A Stokes szám a cseppek egyedi áramláskövető tulajdonságát, a részecske időskálája és az áramlás időskálája között kapcsolatot teremtő dimenziótlan szám. A Stokes szám számításához a (2) egyenlet, a Reynolds szám számításához pedig a (5) egyenletet használtam.

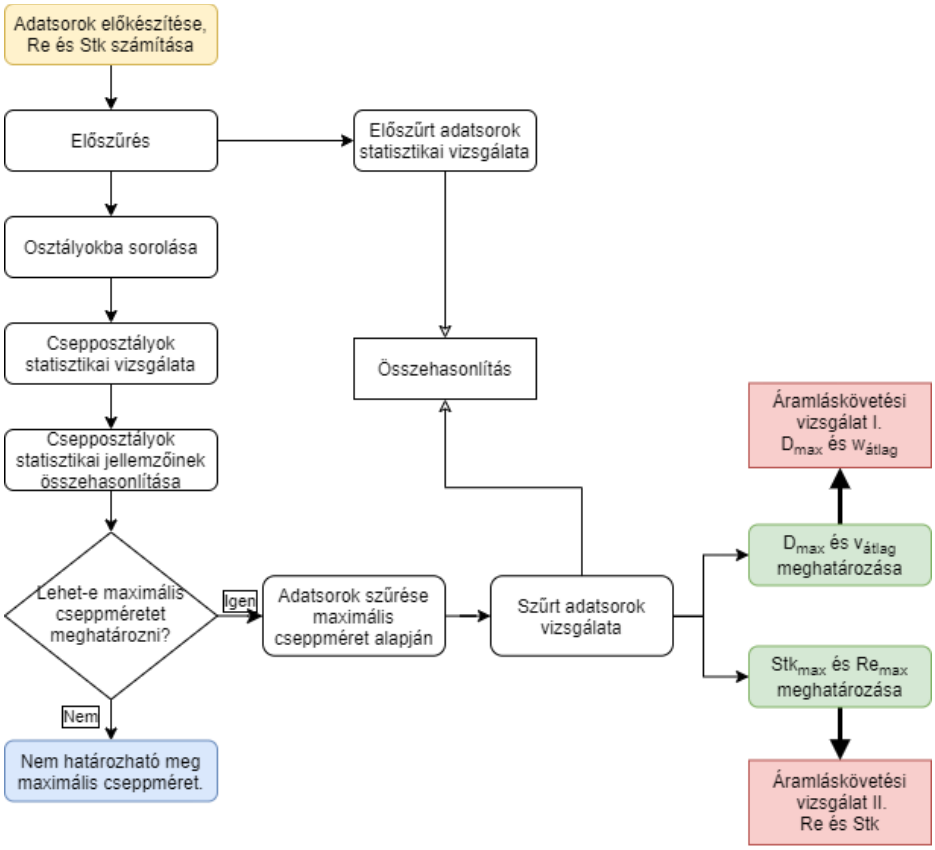
4. táblázat: Vizsgált anyagok sűrűsége az előmelegítési hőmérsékleten [5]

	Előmelegítési hőmérséklet [°C]	25	40	55	70	100 (W: 90)
Sűrűség [kg/m^3]	D	838,8	830,9	822,2	816,6	808,3
	LHO	878,6	870,1	861,5	853,2	841,6
	RO	920,2	909,8	900,6	889,6	871,8
	W	997	991,8	986,3	979,5	971,9

A számítások során szükség volt a vizsgált folyadékok előmelegítési hőmérséklet-függő sűrűségének használtára, amelyeket a 4. táblázat tartalmaz. A dinamikai viszkozitást megkapjuk a kinematikai viszkozitás és a sűrűség mérésének szorzataként.

4.2. A statisztikai értékelés eszközei

A 2.1 fejezetben leírtak alapján, a vizsgálati beállítások során regisztrált cseppek azonos porlasztási mechanizmusok során jöttek létre. Emiatt lehetőség van az adatsorok statisztikai módszereken alapuló általános összehasonlítására. A számításokat Matlab szoftverrel készítettem, az általános algoritmus folyamatábrája a 12. ábrán látható. A kiindulási adatsorok a cseppméreteket és az axiális sebességkomponenseket tartalmazzák minden vizsgált folyadék és beállítás esetén. Első lépésként a 4.1 fejezetben részletezett formulákkal kiszámítottam a Reynolds és Stokes számok értékeit minden csepp esetén. Ezután az adatsorokon előszűrést végeztem a kilógó elemekre a cseppméretek alapján. Az előkészített adatsorokat cseppméret osztályokra bontottam, majd ezek statisztikai módszerekkel hasonlítottam össze. Az első cél minden adatsorra olyan maximális cseppméret meghatározása, amely a kialakult permetet jellemzi. Azokra az adatsorokra, amelyekre ilyen felső határ meghatározható az adatsorok határ alatti halmazát vizsgáltam meg. Ezekre az adatsorokra meghatározható átlagsebesség a permet légsebessége. Szintén vizsgáltam a szűrt adatsorokra számított Reynolds és Stokes számokat. Utolsó lépésként függetlenségi vizsgálatot végeztem az előbb felsorolt jellemzők érzékenységére a bemenő paraméterek változtatásának hatására.



12. ábra: A statisztikai vizsgálat folyamata

4.2.1. ADATSOROK ELŐSZŰRÉSE

Az adatsorok 40.000 regisztrált csepp adatait tartalmazzák, kivétel néhány adatsor, amely a permet külső pereméhez közel található pontokban lett regisztrálva. Az adatsorok vizsgálata előtt a cseppméretek előszűrésére volt szükség. A PDA rendszer zöld lézerfény kibocsátásával működik, amelyhez tartozó hullámhossz 0,532 μm. Ez azt jelenti, hogy az e határ alatti átmérővel rendelkező cseppek detektálására fizikailag alkalmatlan, ezért ezeket a cseppeket el kell távolítani az adatsorokból.

Az előkészített adatsorok cseppméretei között találhatóak olyan cseppek, amelyek kilógnak az adathalmazból, jóval eltérnek a jellemző várható értékétől. Ezeket az adatokat hívjuk az adathalmaz kilógó elemeinek. Ezeknek az elemeknek előfordulási gyakorisága alacsony, viszont torzíthatják az adatsor statisztikai tulajdonságait, továbbá a modellillesztések eredményét jelentősen torzítják. Alacsony számuk nem tekinthető reprezentatívnak, általában ezek a cseppek olyan folyamatokból származnak, melyek végbemenetelének igen kicsiny az esélye, hiszen a mért minta valószínűségi varianciája miatt kiugró értékeket is tartalmazhat. Ekkor érdemes lehet megvizsgálni, hogy a kiugró értékek száma nem magasabb-e a várhatónál, valamint ki kell zárni a mérési hiba okozta megjelenésüket [13].

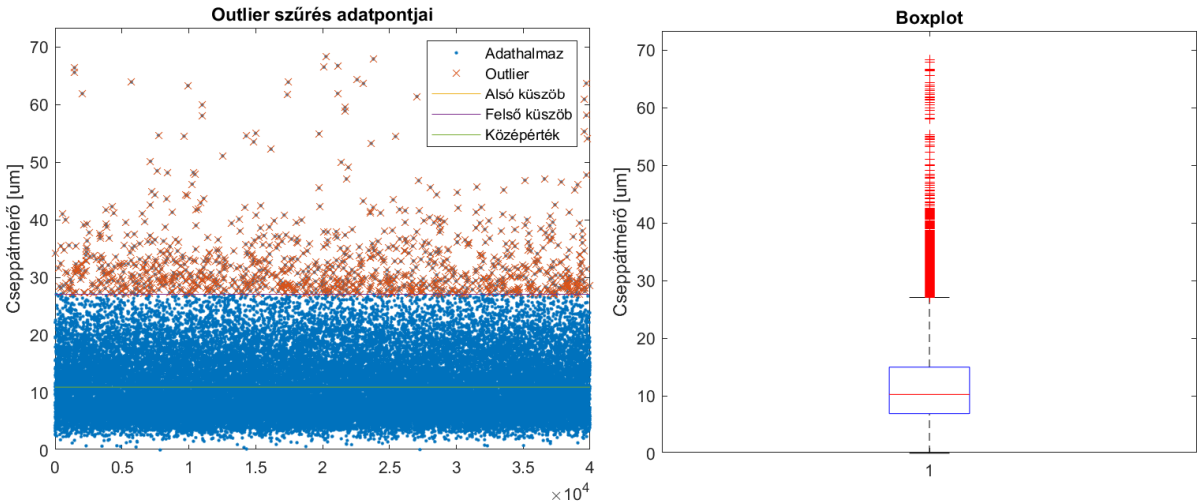
Az kilógó adatok szűrésének alapfogalmai:

- medián (*Me*): egy adatsor sorba rendezése után az adatsor azon középértéke, amelynél az adatsor elemeinek fele nagyobb/egyenlő, illetve másik fele kisebb/egyenlő,
- kvartilisek (Q_k): az adathalmazt k-adik kvartilise az az elem, amelynél a halmaz elemeinek k/4-ed része kisebb/egyenlő és (1-k/4)-ed része nagyobb/egyenlő,
- interkvartilis tartomány (*IQ*): az első és harmadik kvartilis közötti távolság.

Ezek alapján az általános „outlier" szűrés szerint azok az elemek elfogadhatóak, amelyek a következő feltételnek megfelelnek. Itt a 1,5 értékű szorzó önkényesen felvett számérték, mely konstans elterjedten alkalmazott a statisztikában.

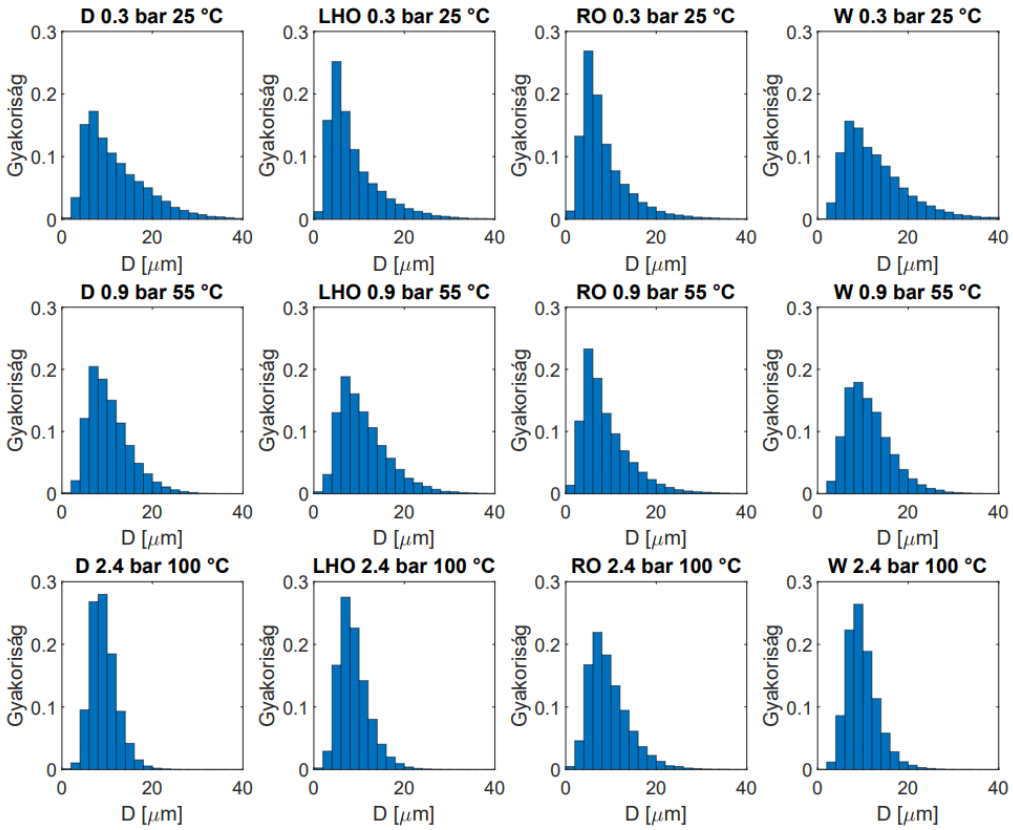
$$Q_1 - IQ \cdot 1{,}5 \leq x \leq Q_3 + IQ \cdot 1{,}5 \tag{8}$$

A 13. ábra D 0,3 barg porlasztó nyomáson és 100 °C előmelegítési hőmérsékletén a 23-as pontban (lásd 9. ábra) porlasztott cseppeinek szűrési eredményét mutatja. A jobb oldali diagramot boxplot-nak nevezzük, itt az összes elem ábrázolása nélkül tudjuk bemutatni a kilógó elemek tartományát.

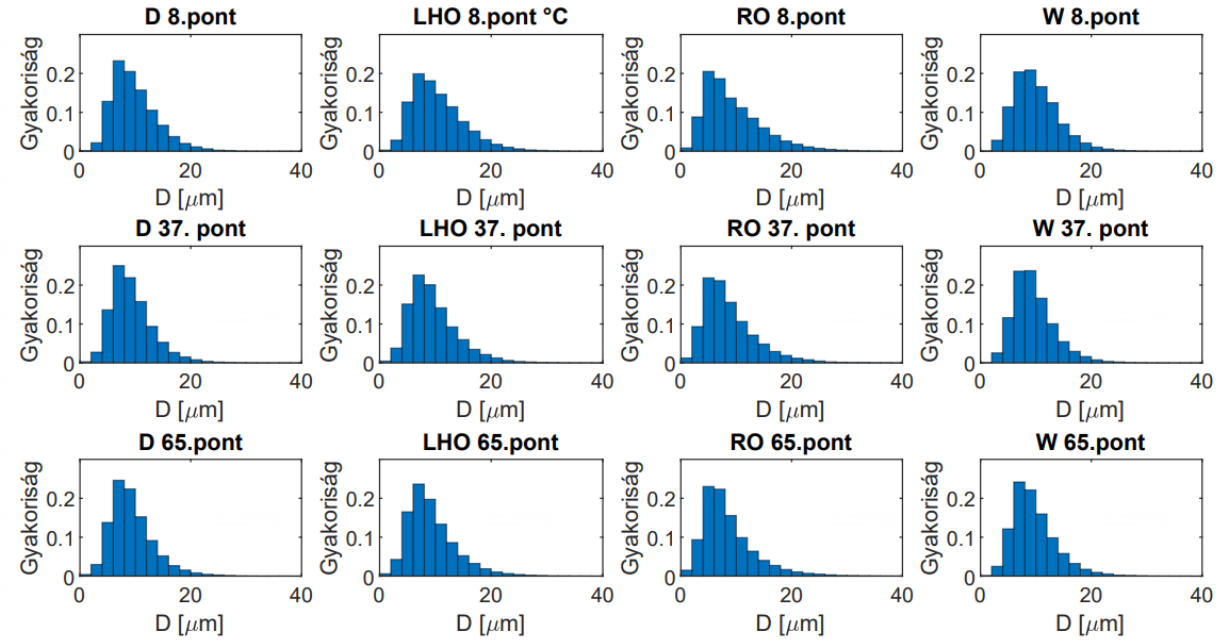


13. ábra: D, 0,3 barg, 100 °C, 23-as adatsor szűrésének eredménye.

Látható, hogy a cseppek jelentős hányada a teljes mérettartartomány alsó felébe esik, kisméretű részecskék szűrése emiatt nem történt, a nagyobb átmérőjű cseppek között viszont nagyobb számú elem szűrésére van szükség. Korábbiakban már a cseppátmérők eloszlásának vizsgálatára sor került, Urbán és tsai. [10], megállapították, hogy a legjobban illeszkedő eloszlások aszimmetrikusak, a cseppméret várható értéke alacsonyabb méretek felé tolódik el (lásd 14. ábra, 15. ábra) [14]. Ez a sebességekre jellemző tipikus eloszlás az oka a szűrés eredményének.



14. ábra: 8-as mérési pontban regisztrált cseppméretek eloszlásai.



15. ábra: 1,2 barg, 70 °C körülmények között regisztrált cseppméretek eloszlásai.

4.2.2. Méret alapú osztályozás

A kialakult, áramláskövető cseppekről elmondható, hogy statisztikailag hasonló sebességű cseppek halmazát adják a teljes mintán belül, melyek méret szempontjából az alsó tartományt képviselik. Itt a maximális cseppméret a körülményektől függő változó. Annak érdekében, hogy leszűkítsünk egy mérettartományt, amelybe tartozó cseppek tulajdonságai hasonlóak kisebb mérettartományú halmazok vizsgálatára van szükség.

Az előszűrt adatsorok elemeit 30 db egyenlő cseppméret- intervallum osztályra bontottam fel a minimális és maximális cseppméretek között. Az intervallumok számát *Urbán és tsai.* [2, 4] alapján választottam, akik megállapították, hogy a tipikus cseppátmérő 5-30 μm tartományba esik a vizsgálat körülményeitől és vizsgált folyadékoktól függően, ami így kb. 1 μm szélességű cseppmérettartományokat jelöl ki. A különböző cseppméret osztályok eltérő cseppszámot tartamaznak, a választott csepposztályszám esetén, viszont ezek a halmazméretek még mindig megfelelőek a statisztikai elemzés elvégzéséhez. Abban az esetben, ha számottevően növeljük a csepposztályok számát azok statisztikai jellemzői nem reprezentálják a csepposztályokra jellemző áramlási tulajdonságok belső jellegét megfelelően. Ellenkező esetben, ha csökkentjük a csepposztályok számát, az áramláskövető cseppek méretének kellően pontos meghatározása sérül. Egyértelmű, hogy a 30 osztály tapasztalati úton megállapított érték, azonban a pontos érték kijelöléséhez a jelenlegi dolgozat témáját és terjedelmét jelentősen meghaladó statisztikai elemzés szükséges, melyre a későbbiekben kerül majd sor.

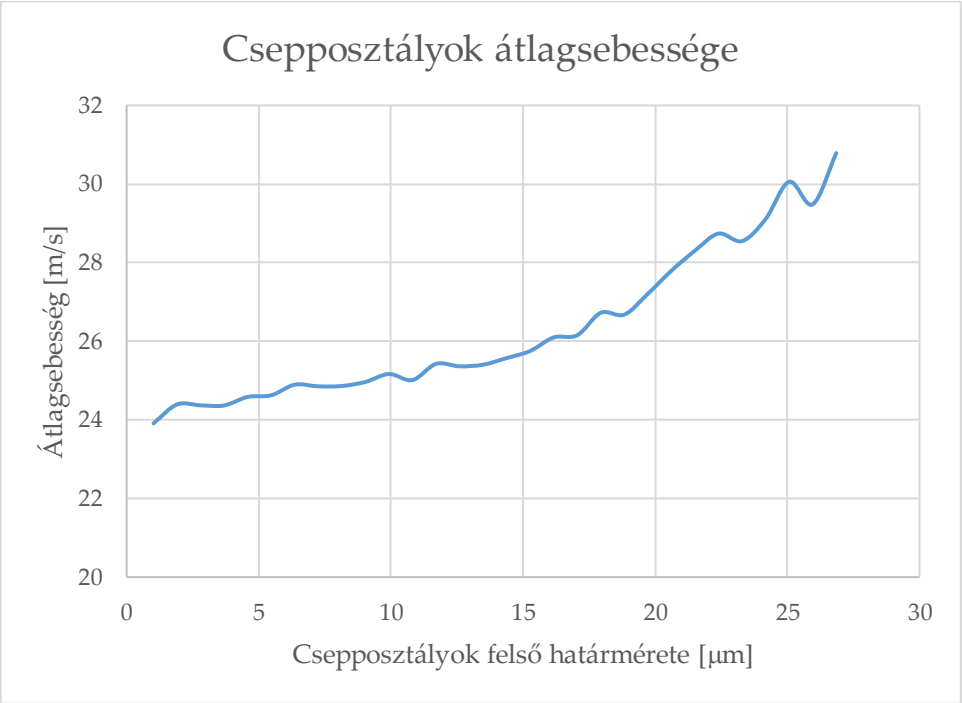
4.2.3. ADATSZŰRÉS

Az adatsorok cseppjeinek méretosztályokba sorolása után az osztályokba tartozó cseppek axiális sebességkomponenseinek statisztikai vizsgálatára került sor. Az 5.2 fejezetben található 22. ábra alapján a sebességek eloszlása unimodális, a gyakoriság értékek pedig exponenciális tagot tartalmazó, kétparaméteres valószínűségi sűrűségfüggvények illesztését teszik lehetővé. Ezért az eloszlások jellemzése két, statisztikailag független paraméterrel megtehető, ami esetünkben az átlag és a szórás voltak.

5. táblázat: D, 0,3 barg, 100 °C, 8 mérőpont adatsorának felosztása (részlet).

Csepposztály	…	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	…
Felső határ [μm]	…	5,03	5,92	6,81	7,70	8,59	9,48	10,37	11,26	…
Alsó határ [μm]	…	4,14	5,03	5,92	6,81	7,70	8,59	9,48	10,37	…
Mintaszám [db]	…	2104	2760	3195	3125	2763	2683	2142	2239	…
Átlagsebesség [m/s]	…	24,58	24,63	24,90	24,85	24,86	24,97	25,17	25,01	…
A sebesség szórás [m/s]	…	5,78	5,65	5,61	5,64	5,66	5,56	5,51	5,28	…

Az osztályok sebességeloszlás hasonlóságának vizsgálata az átlagok és szórások összehasonlításával történt. Az vizsgált adatsor esetén azt tapasztaltam, hogy a csepposztályok sebességeloszlásainak szórása egyenletesnek mondható (lásd 5. táblázat), a kiugró értékeket az egy osztályba tartozó alacsony mintaszám okozta. A másik általános tapasztalat, hogy az osztályok átlagsebessége a cseppméretek növekedésével emelkedik (lásd 16. ábra).



16. ábra: D, 0,3 barg, 100 °C, 8 mérőpont adatsor: Csepposztályok átlagsebessége.

Az osztályok átlagsebességének hasonlóságát, azok relatív szórásával vizsgáltam. A relatív szórás az adatok szórásának és átlagának a hányadosa. Ha az átlagsebességek relatív szórása alacsony, akkor a vizsgált csepposztályok viselkedése hasonló, szignifikánsan nem tér el egymástól. Az átlagsebességek relatív szórásának értékelése minden öt egymást követő csepposztályra történt. A csepposztályszám változtatásának eredményekre gyakorolt hatásáról az 5.1 alfejezetben olvashatunk.

6. táblázat: D, 0,3 barg, 100 °C, 8 mérőpont: Átlagsebességek a csepposztály-csoportokban (részlet).

Csepposztályok	1.-5.	2.-6.	3.-7	3.-8.	4.-9.	5.-10.	6.-11.	7.-12.	8.-13.	…
Felső határ [μm]	5,02	5,92	6,81	7,70	8,59	9,48	10,37	11,26	12,15	…
Alsó határ [μm]	0,57	1,46	2,35	3,24	4,14	5,03	5,92	6,81	7,70	…
Szórás [m/s]	0,25	0,13	0,22	0,22	0,15	0,13	0,13	0,13	0,22	…
Átlag [m/s]	24,32	24,47	24,57	24,66	24,76	24,84	24,95	24,97	25,09	…
Relatív szórás [%]	1,02	0,52	0,89	0,87	0,59	0,51	0,52	0,51	0,87	…

Szignifikánsan hasonlónak tekinthetjük azokat a csepposztályokat, amelyet egy csoporton belül vett relatív szórása az általunk jelen esetben önkényesen felvett 1%-os elfogadási határon belül van. Ha ez a kritérium megvalósul több egymást követő csoportra is, akkor az összes csoporton belüli csepposztály beletartozik a lehatárolt mérettartományba, pl. Diesel, 0,3 barg, 100 °C, 8 mérőpont adatsor esetén lehatárolt csepposztályok 1,46-15,72 μm cseppméret-tartományba tartoznak. Ez a határ látható 16. ábra esetén is, az átlagsebességek növekedésében található egy törés 15,72 μm méretnél, ahonnan az illeszthető érintő egyre meredekebbé válik. Az áramláskövető részecskék maximális cseppmérete az így megkapott tartomány felső határával egyezik meg. Az alsó osztályok esetén az átlagsebesség relatív szórása meghaladhatja az 1%-ot, mivel az alacsony mintaszám torzítja az átlag és szórás értékeket, ezért az alsó mérethatár nem reprezentatív.

A maximális cseppméretek alapján az adatsorok sebességeit szűrtem. A permet légsebességeit a szűrt adatsorok átlagsebességeiként határoztam meg, ezek kapcsolatát vizsgáltam a porlasztónyomással. Ezután összehasonlítottam szűrt adatsorok sebességeloszlásait a kiindulási adatsorok sebességeinek eloszlásaival.

Végül a Reynolds és Stokes számok szűrését végeztem el, összehasonlítottam a szűrt és kiindulási adatsorok eloszlását. Az szűrt adatsorok esetén a Stokes és Reynolds számok eloszlása tartalmaz kilógó elemeket, így az áramláskövető részecskékre jellemző maximális Stokes és Reynolds számokat az eloszlások percentiliseinek vizsgálatával határoztam meg.

A szűrt adatsorokra meghatározott értékek:

- maximális cseppméret,
- átlagsebesség,
- maximális Stokes szám,
- maximális Reynolds szám.

A számítások során két paramétert változtathatunk, az átlagsebességek relatív szórásainak számítása során vett csepposztály-csoportok mérete (alapesetben 5 db) és a relatív szórás elfogadási határát (alapesetben 1%). A maximális cseppméretek, átlagsebességek, illetve a Stokes és Reynolds számok átlagainak és szórásainak eredményeire érzékenység vizsgálatot végeztem a két választott paraméterrel.

5. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Az értékelés során a különböző fúvókatávolságban mért adatsorok (lásd 9. ábra) értékelését külön végeztem el. *Urbán és tsai.* [15] cikkben megállapították, hogy a z=50 mm fúvókatávolság szükséges a kifejlett permet biztosításához. Ennek fényében az értékelés főként a z = 60 mm-es, azaz 1-30. számú adatsorok értékelésére fókuszál.

5.1. Maximális cseppméret

A maximális cseppméretek értékelése során minden vizsgált anyag esetén a következő megállapításokat tettem. A maximális cseppméretek szemléltetésére a 7. táblázat szolgál, melyen az első 15 pont (x irány), minden előmelegítési hőmérséklet és porlasztónyomás látható dízelolajra. Azonban az értékelést a maradék 15 pontra, illetve a további 3 folyadékra is elvégeztem, így az általános megállapítások minden egyes adatpont mérési eredményére építenek.

- A permet szélső pontjaiban a legtöbb esetben nem volt lehatárolható cseppmérettartomány. Ennek oka részben a cseppek közti kölcsönhatás (ütközés, egyesülés), amely során a méretük is jelentősen változhat [16], illetve a permet szélén elhelyezkedő mérőpontokban a detektált cseppek száma gyakran túl alacsony az alkalmazott statisztikai módszer alkalmazásához.
- A porlasztónyomás növekedésével a maximális cseppméret megállapításának sikertelensége gyakoribbá vált. Szintén porlasztónyomás növelésével a maximális cseppméret értékek csökkentek.
- Az előmelegítési hőmérséklet hatása minimális a maximális cseppméret megállapításának sikerességére és annak értékére.
- A z tengelyen mért adatsorokra (a 7. táblázatban 8. mérőpont) szimmetrikusan elhelyezkedő mérőpontokban általában hasonló sikerességgel, hasonló maximális cseppméretek megállapítása sikerült. Ebből következtethetünk a permet tengelyszimmetrikusságára, viszont ennek átfogó, kvantitatív vizsgálata túlmutat a dolgozat keretein.
- RO esetén 2,4 barg, D és LHO esetén már 1,8 barg porlasztónyomás esetén a megállapított maximális cseppméretek száma drasztikusan lecsökkent. W folyadék esetén ez a tendencia már 0,9 barg nyomásnál is jelentős. Ennek oka a folyadékok jelentősen eltérő viszkozitása (3. táblázat).

7. táblázat: D, z = 60 mm: maximális cseppméretek [μm] (részlet).

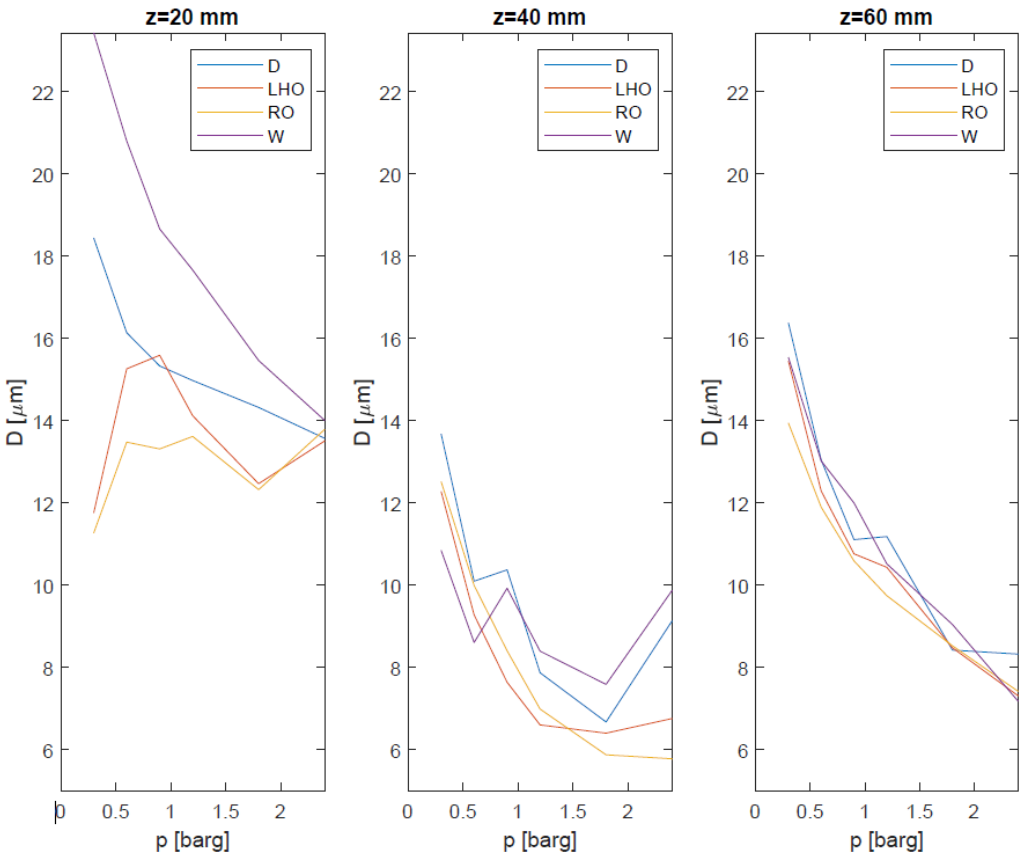
	0,3 barg					0,6 barg					0,9 barg				
	25 °C	40 °C	55 °C	70 °C	100 °C	25 °C	40 °C	55 °C	70 °C	100 °C	25 °C	40 °C	55 °C	70 °C	100 °C
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	31,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,75	0	0	0
3	34,20	0	0	0	28,28	0	0	7,10	10,94	13,93	8,09	8,47	12,94	13,33	6,60
4	0	17,94	8,13	7,90	8,97	8,46	10,89	9,98	10,15	0	0	12,69	9,73	0	13,39
5	16,04	21,63	11,88	16,77	15,65	9,52	15,32	15,63	15,75	15,17	10,81	14,42	13,01	11,90	11,02
6	18,30	19,67	15,15	23,61	22,58	18,40	16,71	15,06	15,91	13,33	0	13,24	13,74	13,47	15,72
7	15,34	15,13	15,72	16,73	20,21	11,68	14,22	14,16	13,72	11,74	0	11,89	0	12,39	18,89
8	16,06	16,73	14,73	13,81	15,72	12,34	13,66	13,38	12,91	14,49	10,54	12,47	12,89	12,38	13,87
9	13,54	15,61	16,08	16,18	14,57	11,50	11,84	13,19	11,14	15,12	11,87	11,54	11,68	10,90	12,90
10	18,04	23,06	11,44	18,41	10,28	0	13,88	11,31	20,40	13,10	0	17,69	14,87	13,03	0
11	14,17	11,66	15,34	17,01	17,31	8,70	9,65	15,40	14,54	16,20	15,07	17,18	0	10,25	14,62
12	12,70	13,74	11,09	12,14	21,39	14,66	13,35	17,24	11,46	12,31	11,18	9,98	0	7,93	9,30
13	13,98	0	0	0	14,61	7,02	12,68	7,90	9,81	0	5,10	6,54	6,87	7,09	10,71
14	0	0	0	0	0	0	12,59	8,74	0	5,37	0	3,07	0	0	7,04
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,17	0	0	0	0	0

	1,2 barg					1,8 barg					2,4 barg				
	25 °C	40 °C	55 °C	70 °C	100 °C	25 °C	40 °C	55 °C	70 °C	100 °C	25 °C	40 °C	55 °C	70 °C	90 °C
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	11,45	11,06	12,22	9,73	13,18	0	0	0	0	7,75	0	0	0	0	0
4	14,59	10,35	10,34	13,22	11,72	0	14,16	0	0	0	0	0	0	0	0
5	14,22	11,54	0	13,67	13,65	0	0	0	0	10,43	0	0	0	0	0
6	0	0	16,02	0	14,75	0	0	0	0	14,47	0	0	0	0	0
7	0	10,90	0	14,80	13,05	0	0	0	0	0	0	6,88	5,96	0	0
8	10,64	12,17	9,12	10,84	11,60	8,45	7,11	10,16	0	11,52	0	0	0	5,73	0
9	11,08	0	12,19	12,31	11,81	10,53	6,88	10,07	11,40	5,45	6,53	0	7,14	0	4,75
10	0	0	0	12,15	10,64	4,38	0	0	0	11,83	0	0	0	12,63	11,54
11	12,71	11,52	0	11,18	0	4,15	11,29	10,90	0	0	0	0	14,13	0	0
12	12,54	9,18	12,47	9,55	0	10,33	0	0	4,18	0	0	0	0	0	0
13	0	6,94	11,44	11,93	8,27	7,03	0	7,49	9,22	4,07	9,06	0	10,44	7,98	9,46
14	0	0	0	0	4,57	8,08	0	4,30	7,78	0	8,48	6,97	9,70	8,36	8,06
15	0	0	7,16	0	0	7,41	0	0	7,73	0	0	0	0	0	0

A z = 40 mm és 20 mm-es keresztmetszetek maximális cseppméreteinek meghatározása főként a z tengely közeli mérőpontokban volt sikeres. A z = 40 mm keresztmetszet mérőpontjaiban meghatározott maximális cseppméretekre szintén jellemzőek az előbbi megállapítások, viszont alacsonyabb porlasztónyomások (0,3-0,6 barg) esetén jóval kisebb határméreteket kaptam eredményül. Ennek oka, hogy nagyon eltérő cseppméretek jelennek meg az adatsorban, mivel az aprózódási folyamatok még nem fejeződnek be a z = 40 mm fúvókatávolságban. Ez szintén bizonyítja a permet kifejlet-

lenségét A z = 20 mm keresztmetszet esetén a maximális cseppméretek meghatározásának sikeressége nem függ a porlasztónyomástól, a szimmetriatengely közeli pontokban nagy maximális határcseppméretet állapítottam meg.

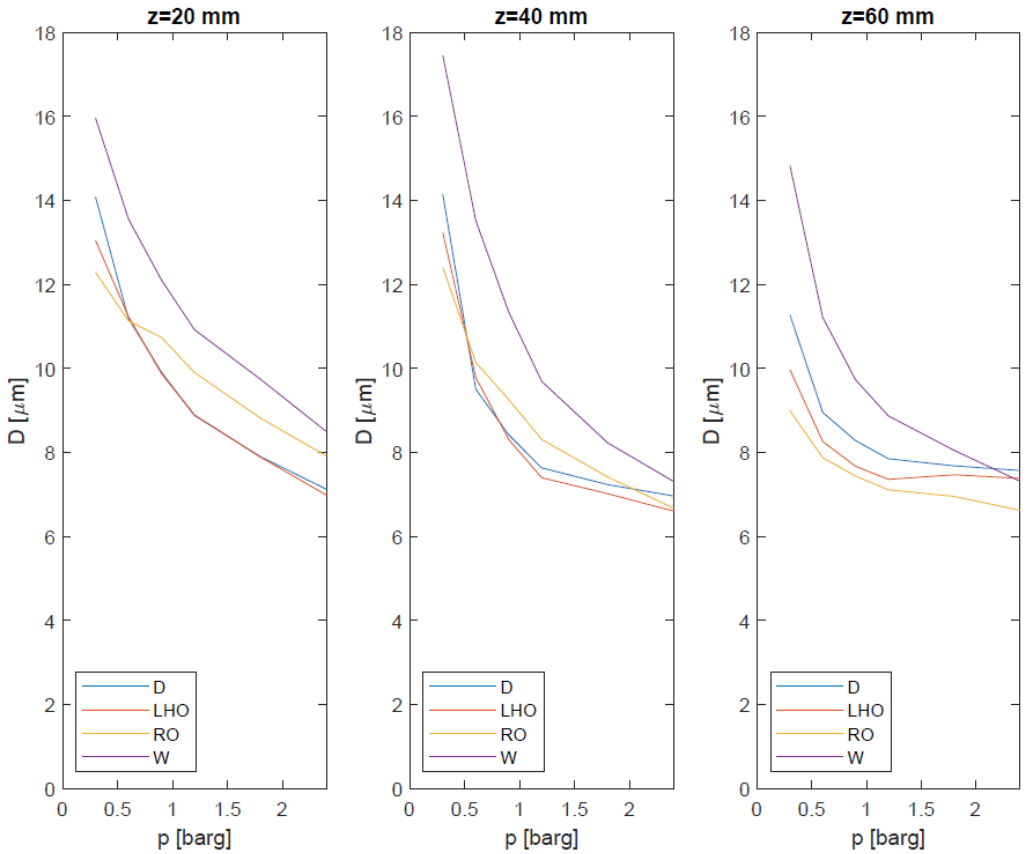
A folyadékok különböző porlasztónyomáson kapott maximális cseppméreteinek összehasonlításához átlagos maximális cseppméreteket számítottam. Az átlagolás egy porlasztónyomáshoz tartozó összes előmelegítési hőmérsékleten egy keresztmetszetben meghatározott értékekből történt, kihagyva a zérus elemeket. Az eredményt a 17. ábra mutatja.



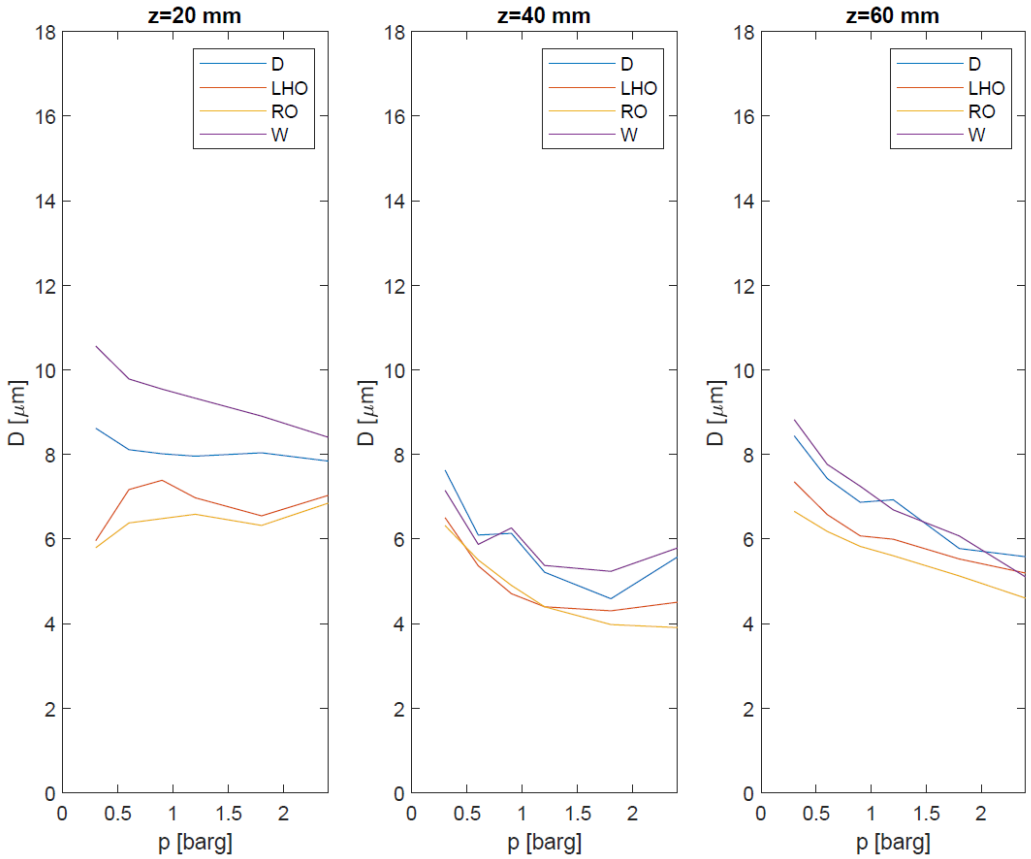
17. ábra: Átlagolt maximális cseppméretek a porlasztónyomás függvényében.

Látható, hogy a z = 60 mm kereszmetszetben az áltagos maximális cseppméretek exponenciálisan csökkenő trendet vesznek fel, a porlasztónyomás növelésével apróbb cseppeket kapunk. Ez egyértelművé teszi, hogy a porlasztás során áramláskövetőnek titulált cseppek a porlasztás körülményeitől erősen függnek, így nem javallott ökölszámokat használni a megfelelő eredményre jutás érdekében.

A maximális cseppméréthatár segítségével szűrt adatsorokat össezhasonlítottam a kiindulási adatsorokkal. Mindkét esetben számítottam a cseppméretek átlagát és előzőekben kifejtett módszerrel hasonlítottam össze. A kiindulási adatsorok különböző kersztmetszetben számított átlagcseppméreteit a 18. ábra, a szűrt adatosorok átlagcseppméreteit 19. ábra mutatja. A z = 60 mm esetén a szűrt cseppméretek átlaga jóval alacsonyabb, 6-16 μm tartományról 3-11 μm tartományra csökkent.

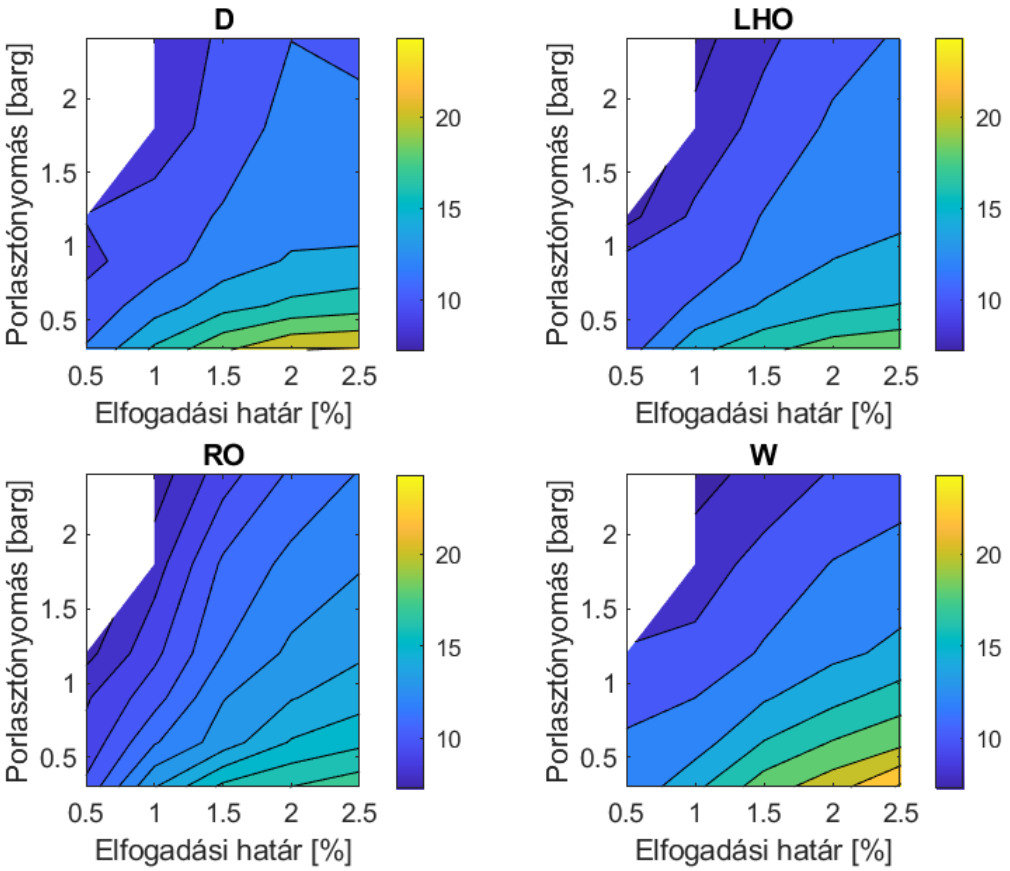


18. ábra: Kiindulási adatsorok különböző keresztmetszetekben számított átlagcseppméretei.



19. ábra: Szűrt adatsorok különböző keresztmetszetekben számított átlagcseppméretei.

A statisztikai szűrés során két paraméter értéke változtatható, ezeknek hatását vizsgáltam a maximális cseppméretekre. A relatív szórások elfogadási határát alapesetben 1%-nak vettem. A számításokat újból elvégeztem 0,5%, 1%, 1,5%, 2% és 2,5%-os értékekre, az eredményeket a z = 60 mm keresztmetszetben a 20. ábra szemlélteti.

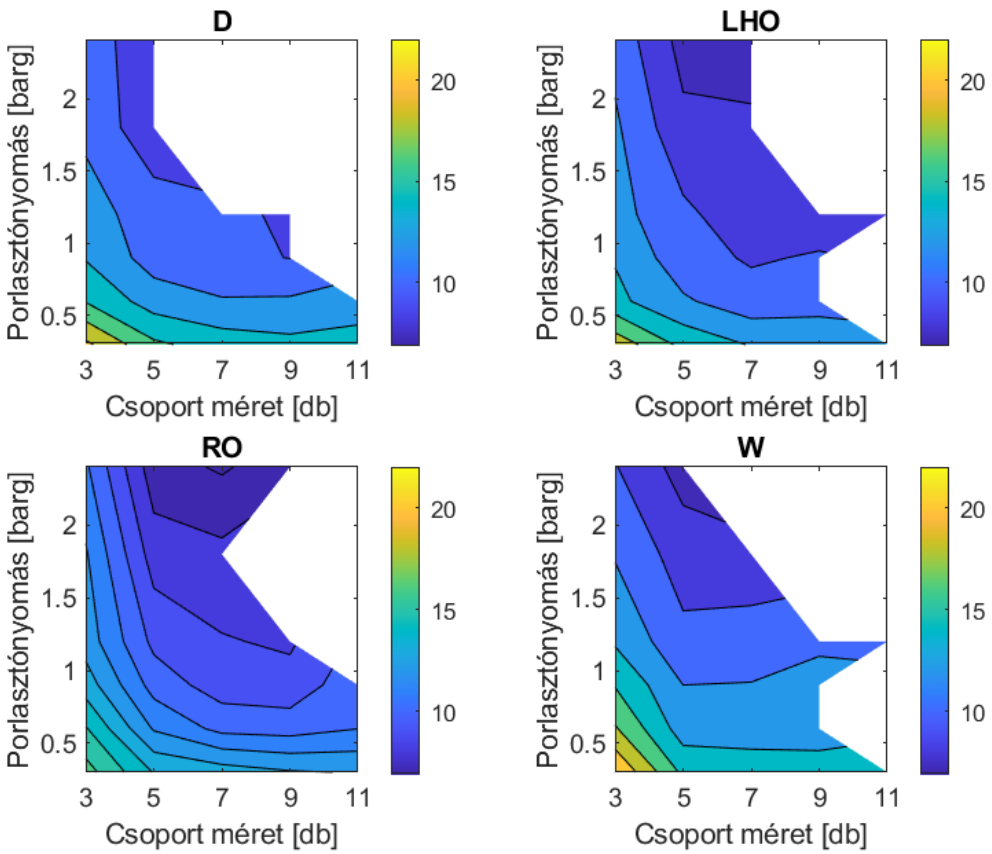


20. ábra: Maximális cseppméretek az elfogadási határ függvényében (z = 60 mm).

Látható, hogy 0,5% esetén jóval szigorúbb az értékelési módszer, magas nyomásokon a maximális cseppméretek megállapítása minden mérési pontban sikertelen. Az elfogadási határ növelésével olyan maximális cseppméreteket kapunk, amelyek megközelítik a kiindulási adatsorok átlagsebességeit, a szűrt adatsorok átlagsebességeinél jóval magasabbak, ezt túlzottan megengedőnek nevezhetjük. Ebben az esetben a maximális cseppméret a porlasztónyomások függvényében akár 20 μm tartományt is átfoghat.

A másik változtatható paraméter a relatív szórások során használt csepposztály-csoport méret, amely alapesetben 5 volt. A számításokat elvégeztem 3, 5, 7, 9 és 11 csepposztály esetén is, az eredményeket a 21. ábra tartalmazza. Nagy méretszám esetén az értékelés szigorú volt, sikertelen volt a maximális cseppméret megállapítása. Ellenkező esetben, alacsony méretszám esetén az értékelés megengedő.

Mind a választott méretszám és elfogadási határ esetén az eredményeket megfelelően szigorúnak tapasztaltam.



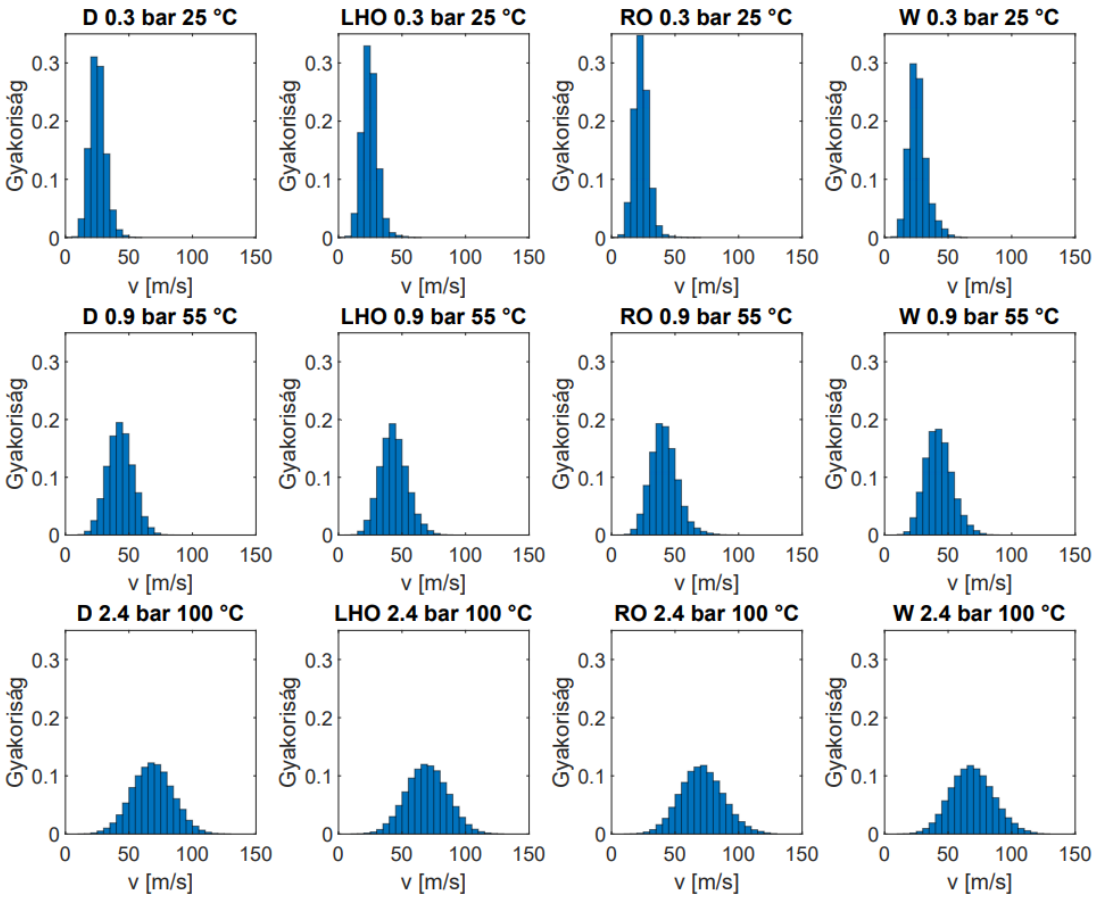
21. ábra: Maximális cseppméretek a csepposztály méret függvényében (z = 60 mm).

5.2. Sebességeloszlások, átlagsebességek

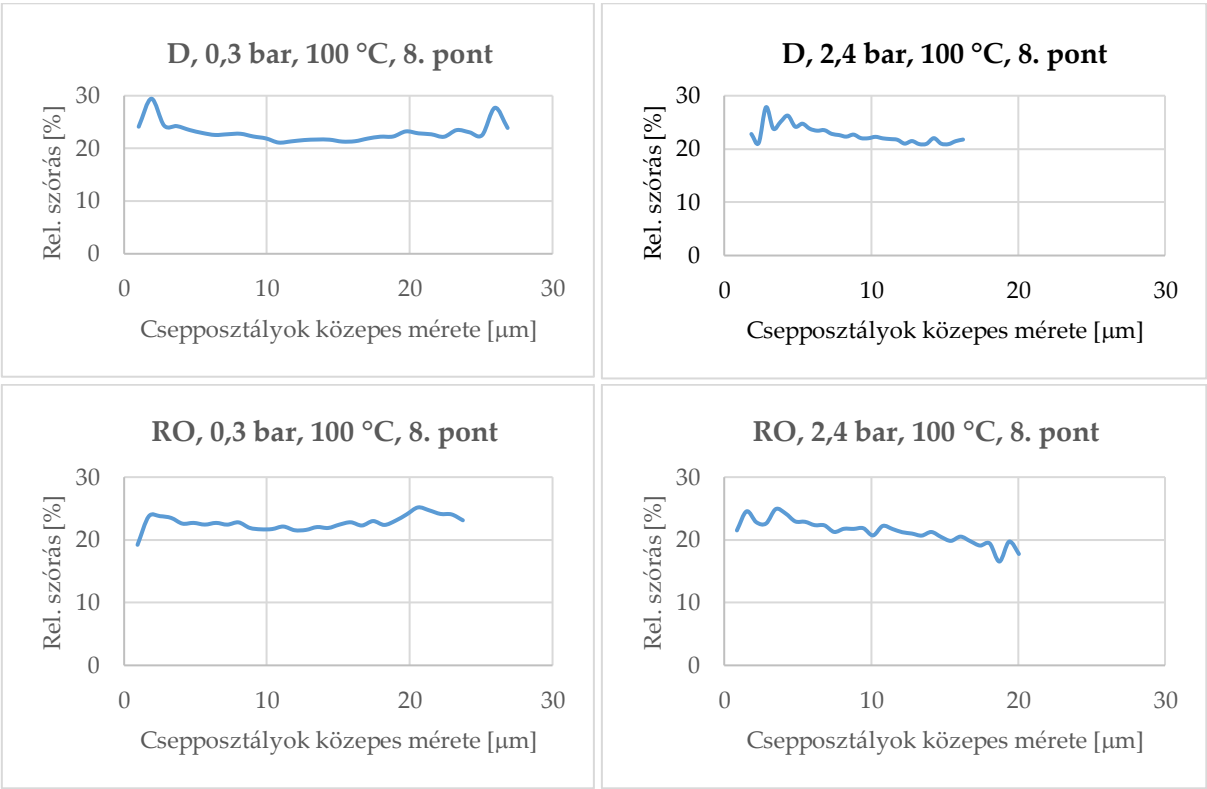
A cseppméretek vizsgálata után a sebességeloszlásokkal foglalkoztam, összehasonlítottam a kiindulási és szűrt sebeségeloszlásokat, majd meghatároztam az átlagos légsebességet, mely jelen dolgozat elsődleges célja volt.

A sebességeloszlásokra tett általános megfigyeléseim a következők:

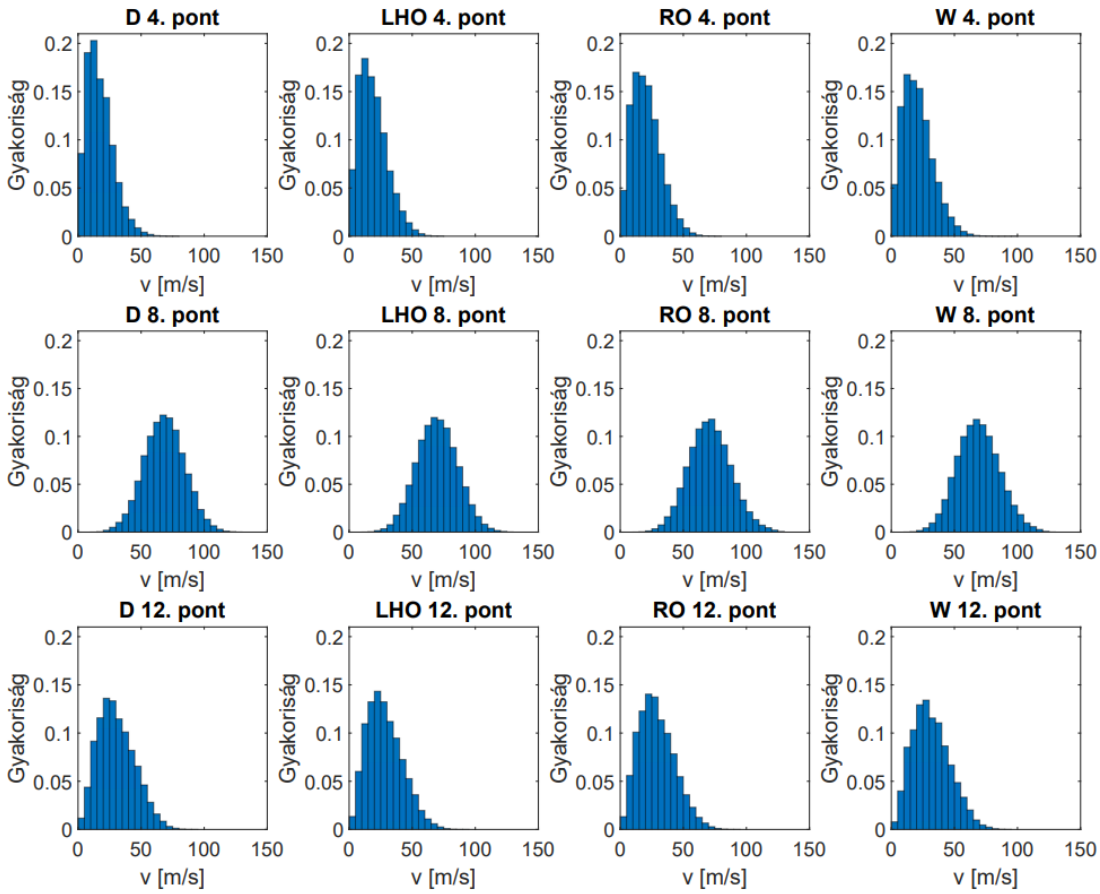
- A cseppméretekkel ellentétben a sebességek eloszlása nagyban függ nemcsak a porlasztási körülményektől, hanem a szimmetriatengelytől való távolságtól is.
- A 22. ábra a vizsgált folyadékok különböző körülményekre kapott sebességeloszlását mutatja be néhány példán keresztül. A szimmetriatengelyen, pl. a 8. mérőpontban, a sebességeloszlások közel normál eloszlásúak, a porlasztónyomás függvényében növekvő átlagsebességekkel rendelkeznek. Szórásuk arányosan növekszik, mivel a csepposztályok sebességeinek relatív szórása állandó (± 1-2%-os eltéréssel), ez látható a 23. ábra.
- A 24. ábra a sebességeloszlásokat mutatja különböző szimmetriatengely távolságokban (4., 8. és 12. mérőpont) 2,4 bar, 100 °C porlasztási körülmények között. Látható, hogy a normális sebességeloszlás torzul a permet széléhez közeli mérőpontokban, az átlagsebesség csökken, mivel a permet és a nyugvó levegő kölcsönhatása (örvények, keveredés) erősödik.



22. ábra: Sebességeloszlások különböző porlasztási beállítások esetén, 8. pont (példák).

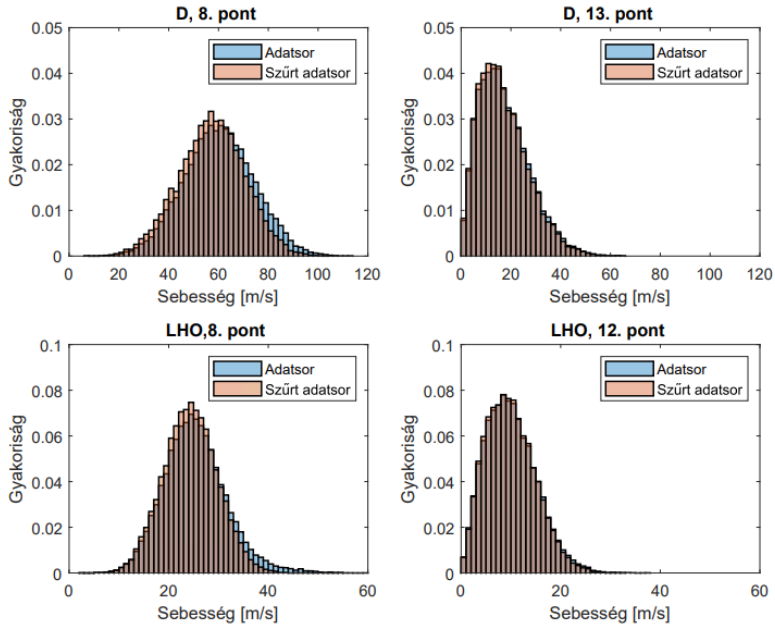


23. ábra: Cseppposztályok sebességének relatív szórása.



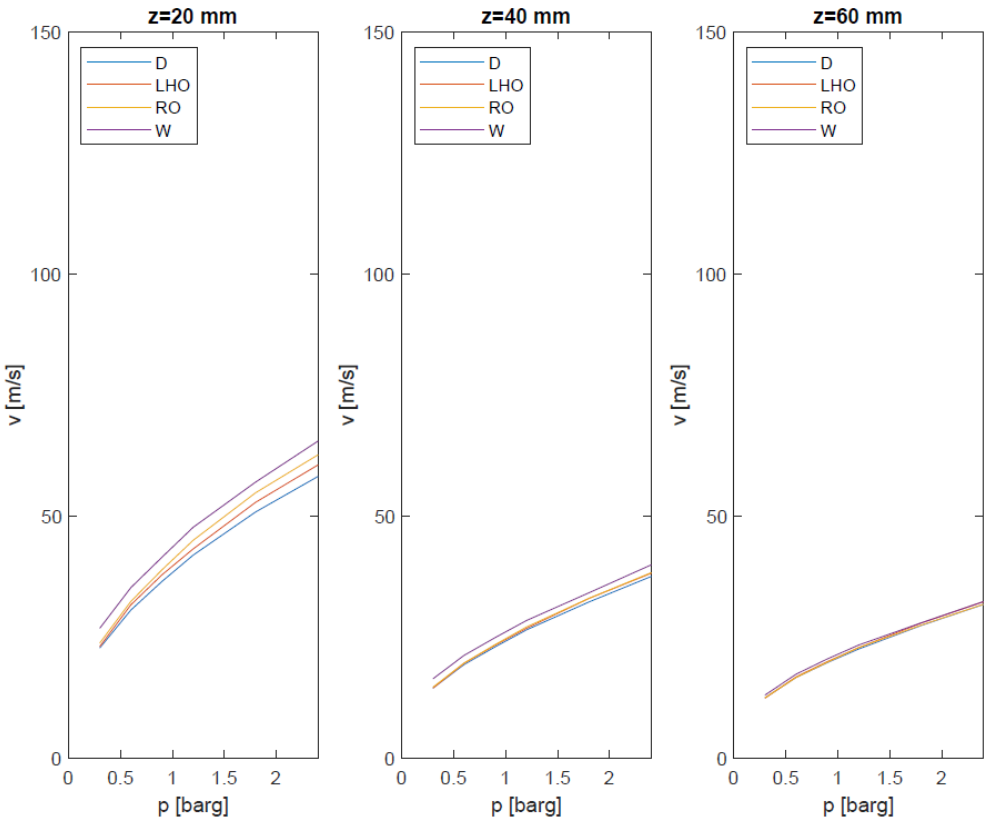
24. ábra: 2,4 bar, 100°C: Sebességeloszlások (példák).

A kiindulási adatsor és a szűrt adatsorok eloszlásai közötti eltéréseket a 25. ábra segítségével mutatom be. A porlasztás körülményeitől és a mérőpont helyzetétől függetlenül a sebességeloszlások átlaga a szűréssel csökkent. Az aprózódási folyamatok során a kis cseppek gyorsan fel tudnak gyorsulni a szállító közeg sebességére. Az impulzuscsere során a nagy cseppek eleinte lassan gyorsulnak, azonban nem veszítenek sebességükből akkora ütemben, a kis cseppek viszont könnyen lelassulnak a közeg sebességére. Ezt a jelenséget overshooting vagy sebesség-túllövés jelenségnek hívjuk [15,17]. A számítások során ezeket a nagyméretű cseppeket kiszűrjük a cseppméreteloszlásokból, illetve az ezekhez tartozó nagy sebességeket is az eloszlásokból.

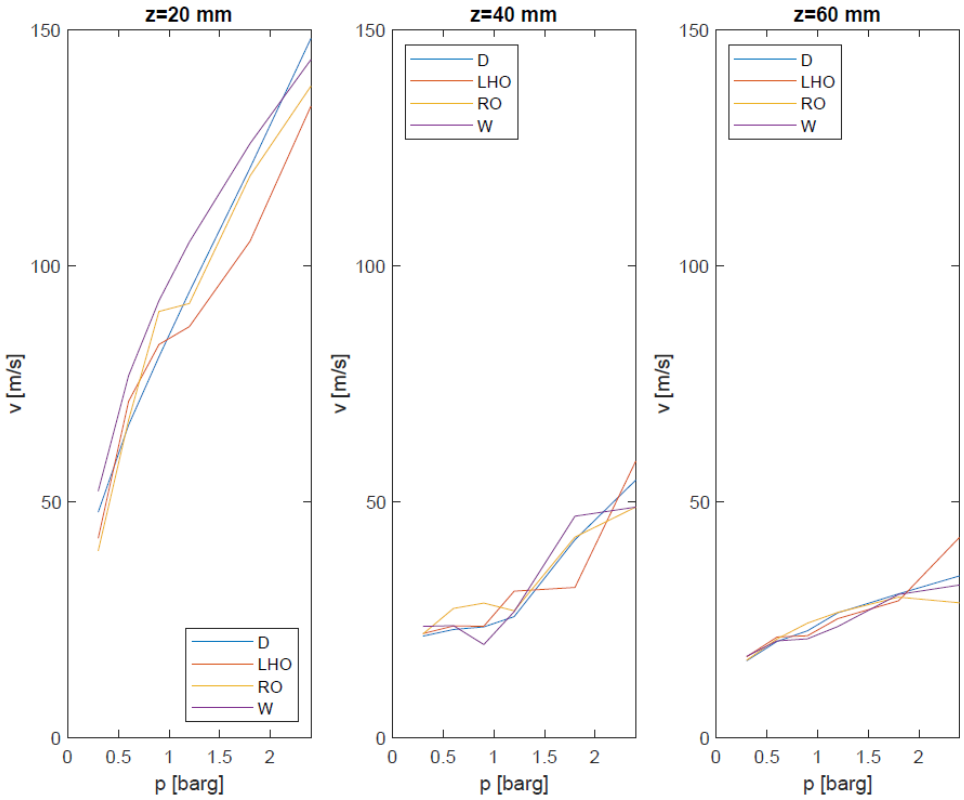


25. ábra: z = 60 mm, 1,8 barg, 55 °C: sebességeloszlások.

A keresztmetszetekre jellemző sebességek átlagát a kiindulási és szűrt adatsorokra a 5.1 fejezetben a cseppméretek esetén bemutatott módszerrel számítottam, az eredményeket a 26. ábra és 27. ábra tartalmazza. A diagramokon látható a 25. ábra alapján tett megállapításokkal ellentétben a keresztmetszetekre jellemző átlagsebesség nő a kiindulási adatsorokhoz képest. Ennek a következő okai vannak.



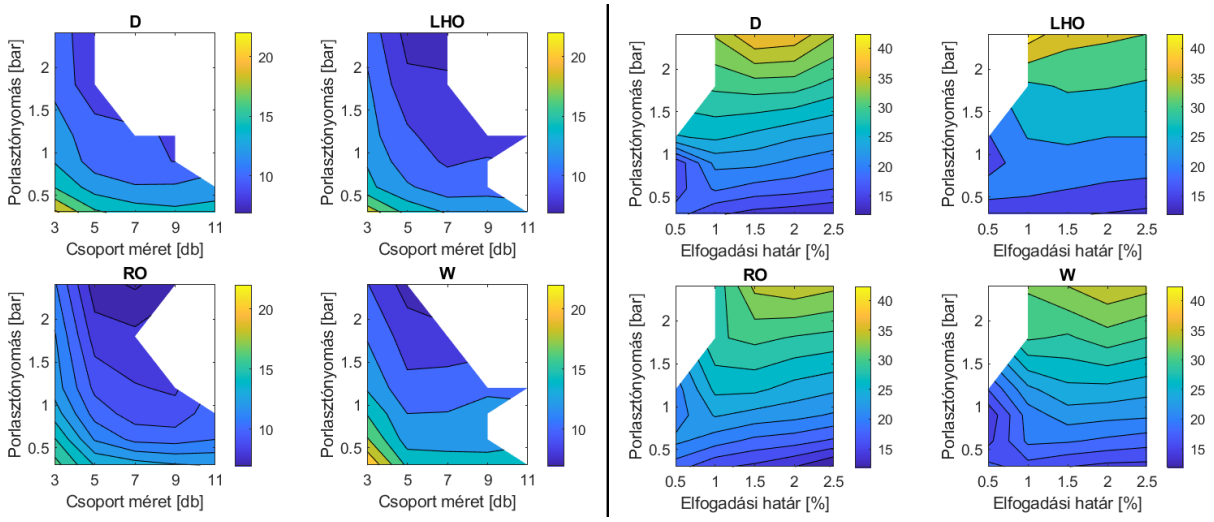
26. ábra: Kiindulási adatsorok különböző keresztmetszetekben számított átlagsebességei.



27. ábra: Szűrt adatsorok különböző keresztmetszetekben számított átlagsebességei.

A szűrés során azok az adatsorok, amelyekre nem tudtam átlagos cseppméretet megállapítani, általában alacsonyabb átlag cseppméretű, a szimmetriatengelytől távol eső mérőpontok voltak. Összességében így hiába csökkent lokálisan a szűrt adatsorok átlagsebessége a lassú cseppek kiszűrésével globálisan mégis jóval magasabb értékű. Ezek az átlagsebességek a permet áramláskövető részecskéinek adataiból származik, azaz ezek adják meg a permet légsebességét. A $z = 20$ mm és 40 mm keresztmetszetekben az átlagsebességek jelentősen különböznek a kiindulási és szűrt adatsorokra, mivel ezekben a keresztmetszetekben a szűrés jóval több adatsorra volt sikertelen, mint a $z = 60$ mm keresztmetszetben.

A meghatározott jellemző átlagsebességek 1% elfogadási határ felett és a relatív szórás értékelése során 5 db csoportméret felett minimális változást mutat (lásd 28. ábra), ezeket a választott értékeket elfogadhatjuk.

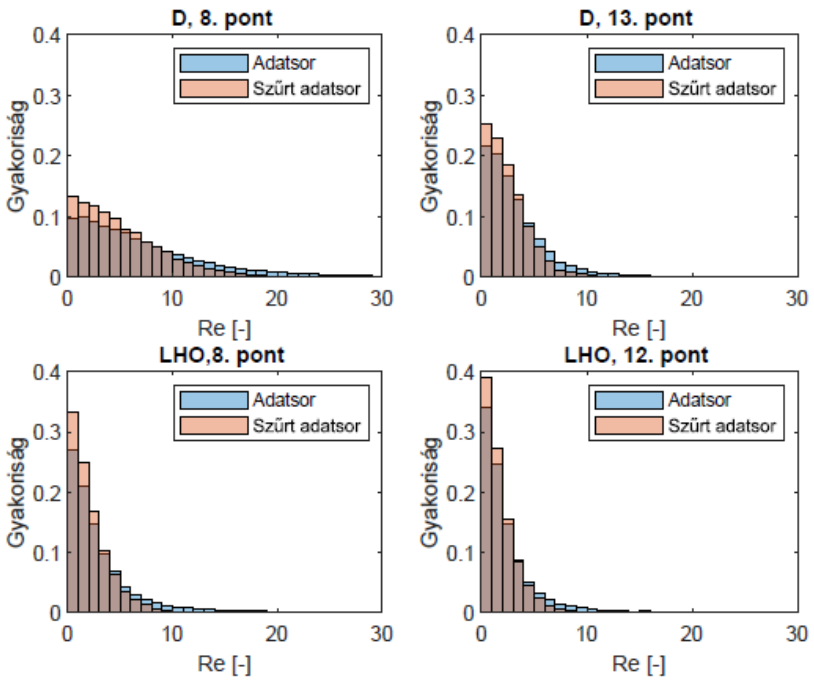


28. ábra: Jellemző átlagsebességek a változtatható paraméterek függvényében (z = 60 mm).

5.3. *Reynolds szám*

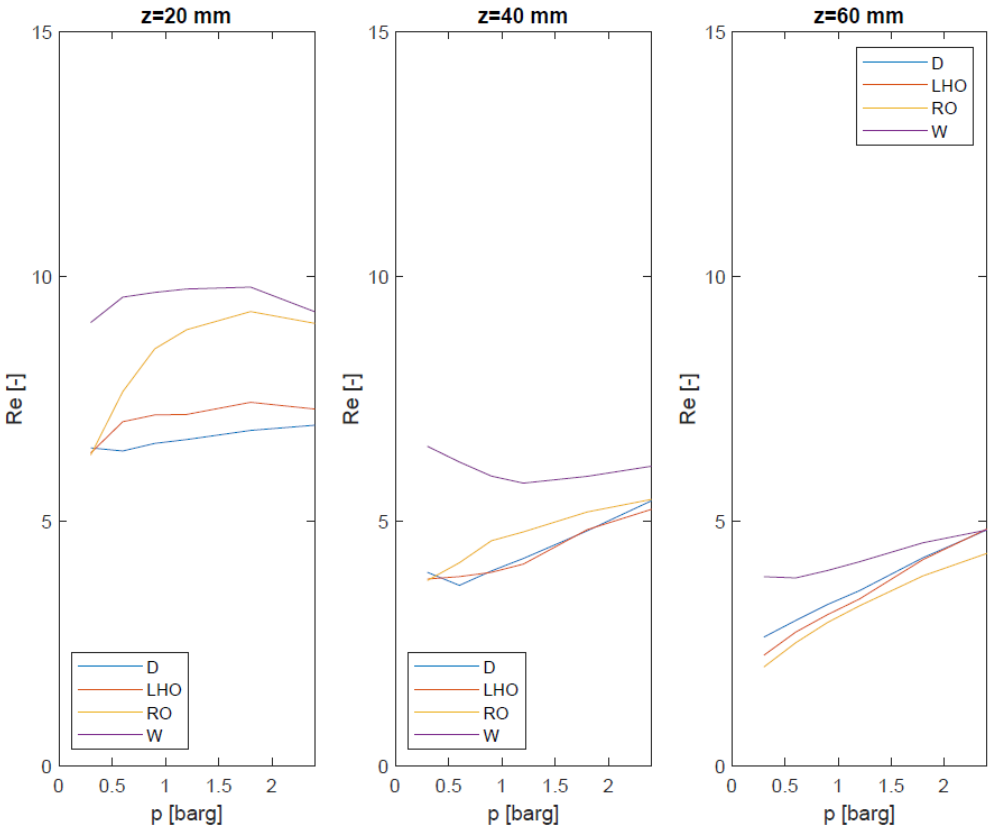
A szűrt cseppek áramláskövető tulajdonságainak számszerűsítésére dimenziótlan számokat használtam. Először Re eloszlását vizsgáltam a kiindulási és szűrt adatsorok esetén. A Re szűrésének eloszlásra gyakorolt hatása a 29. ábra hisztogramjain látható. A példa adatsorokon tapasztaltak általánosak minden porlasztási körülményre és mérési pontra:

- A kiindulási és szűrt adatsorok Reynolds számainak eloszlása fél-normál eloszlással közelíthető különböző átlaggal és szórással a porlasztási körülményektől és mérési pontok helyzetétől függően.
- A szűrt adatsorok átlaga alacsonyabb értéket vesz fel, mint a kiindulási adatsoroké, mivel főként magas értékű Reynolds számok szűrése történt. Ez látható a hisztogramok magas Re tartományának változásán is.
- Az eloszlások farok része erősen nyúlt, az átlagok akár tízszeres értéke is előfordul, ezen számottevően mérsékel a szűrés.

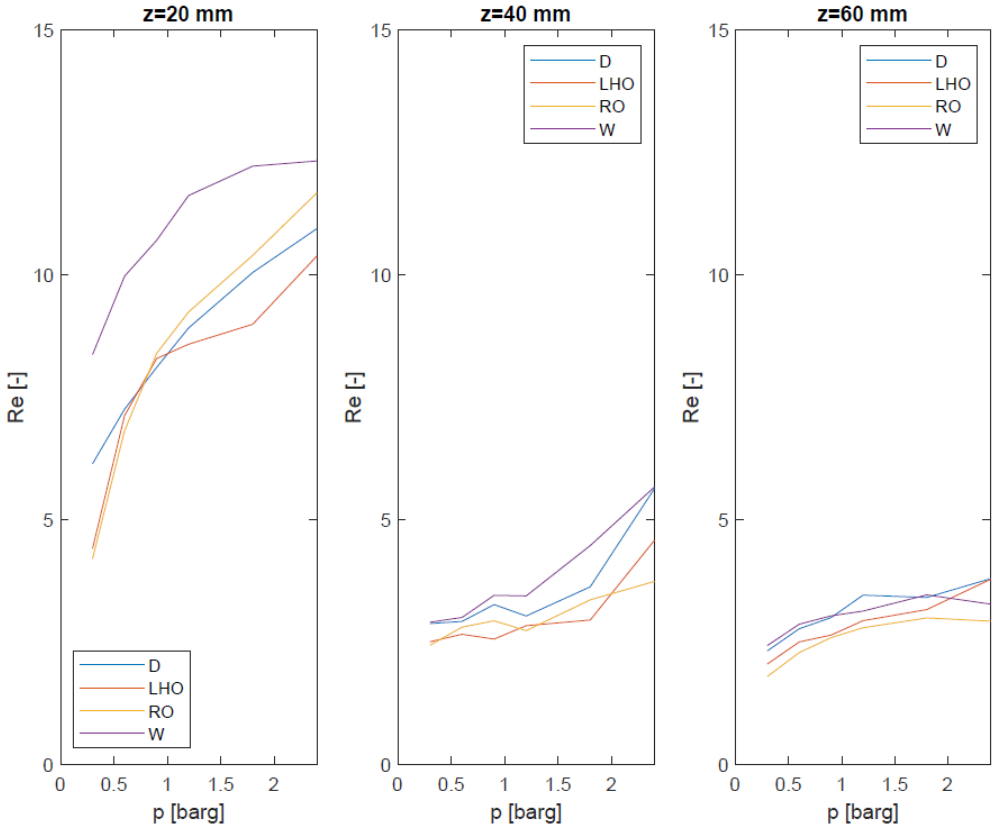


29. ábra: z = 60 mm, 1,8 barg, 55 °C, Reynolds szám eloszlások.

A cseppméretekre és sebességekre is alkalmazott átlagolási módszer segítségével vizsgáltam a Re átlagát a különböző fúvókatávolságokban a porlasztónyomás függvényében. Az eredményeket a 30. ábra és 31. ábra tartalmazza.



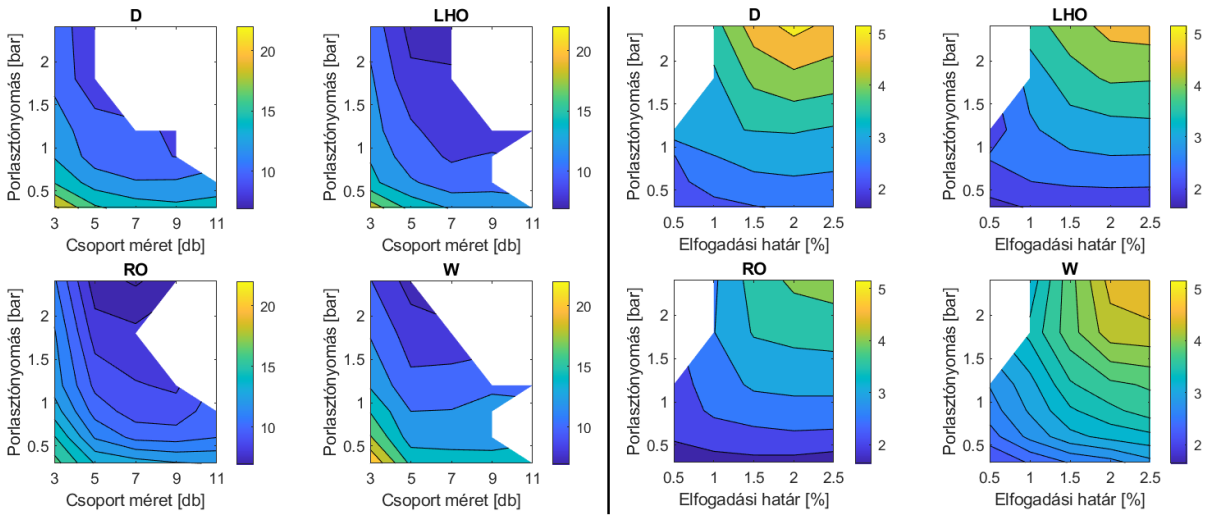
30. ábra: Kiindulási adatsorok különböző keresztmetszetekben számított átlagos Reynolds szám.



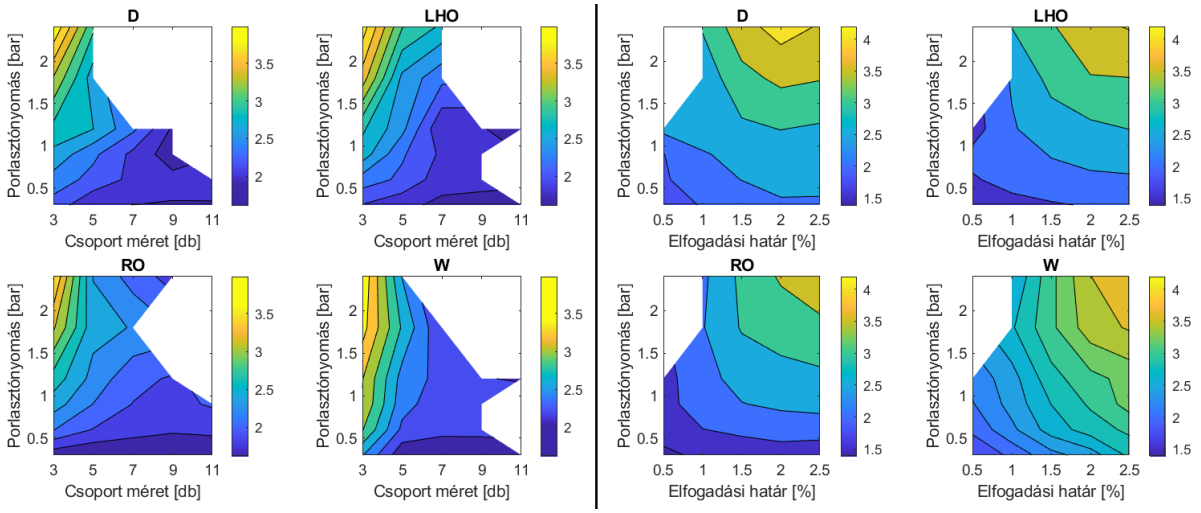
31. ábra: Szűrt adatsorok különböző keresztmetszetekben számított átlagos Reynolds szám.

A jellemző átlagos Re a $z = 20$ mm-es keresztmetszetben növekedett, mivel a fúvókanyíláshoz közel magas áramlási sebességek jelentkeznek. A porlasztónyomás növelésével az értékek drasztikusan növekedtek, az áramláskövetési tulajdonság romlik. A $z = 40$ mm és 60 mm keresztmetszetekben az átlagos Re csökken, ebben a két esetben a szűrt cseppek áramláskövető tulajdonsága javul.

A jellemző Re átlagának és szórásának érzékenységére vizsgálatot végeztem a két változtatható paraméter esetére. Az eredményeket a 32. ábra és 33. ábra tartalmazza.



32. ábra: Átlagos Reynolds szám a változtatható paraméterek függvényében ($z = 60$ mm).

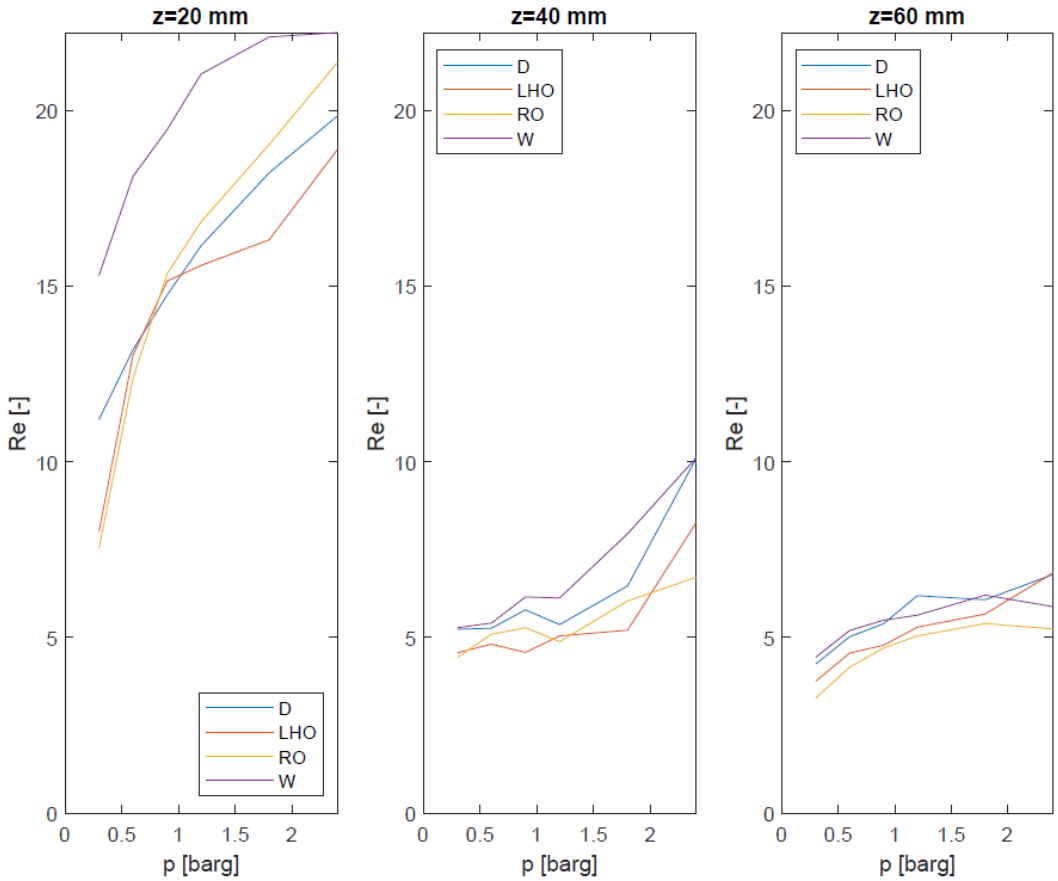


33. ábra: Reynolds szám szórása a változtatható paraméterek függvényében (z = 60 mm).

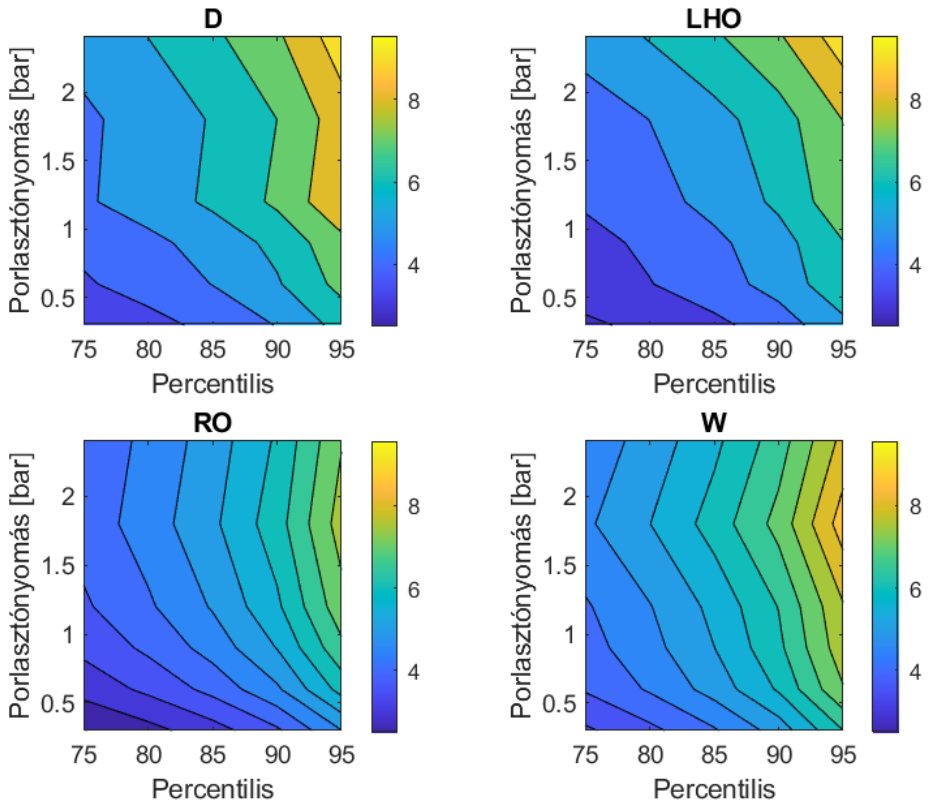
Az átlagok és szórások esetére is igaz, hogy adott porlasztónyomáson az elfogadási határ 1%-os értéke felett mérsékelten változik az értékük, 1% alatt pedig az értékelés szigorú. A csoportméret változtatása a választott, Re = 5 felett adott porlasztónyomáson nincs jelentős hatással az átlagokra.

A 29. ábra látható eloszlások farok része jelentősen elnyúlik a magas értékű szélsőségekben. Az áramlásra jellemző maximális Re értékének meghatározása azok percentilis értékeivel történt. A hisztogramok alapján általam önkényesen felvett érték a 85. percentilis volt, azaz a mérési pontok Reynolds számainak 85. percentilisét határoztam meg maximumként. A keresztmetszetekre jellemző maximális Reynolds számot a porlasztónyomásokon vett maximális Reynolds számok átlagaként számítottam. Ennek eredménye a 34. ábra látható. A jellemző maximális Re a z = 20 mm keresztmetszeten kifejezetten magas, kb. 10 és 20 közé esik, z = 40 mm esetén kb. 5 < Re < 10 értéket vesz fel, míg z = 60 mm esetén 3,5 < Re < 6.

A választott percentilis érték hatása maximális Reynolds számokra a 35. ábra látható z = 60 mm-es keresztmetszetre. A legmagasabb, 95. percentilis esetén is a jellemző maximális Re 10-nél kisebb marad. Alacsonyabb percentilis értékek esetén mérséklet csökkenés látható.



34. ábra: Reynolds számok eloszlások 85. percentiliseinek jellemző értéke.

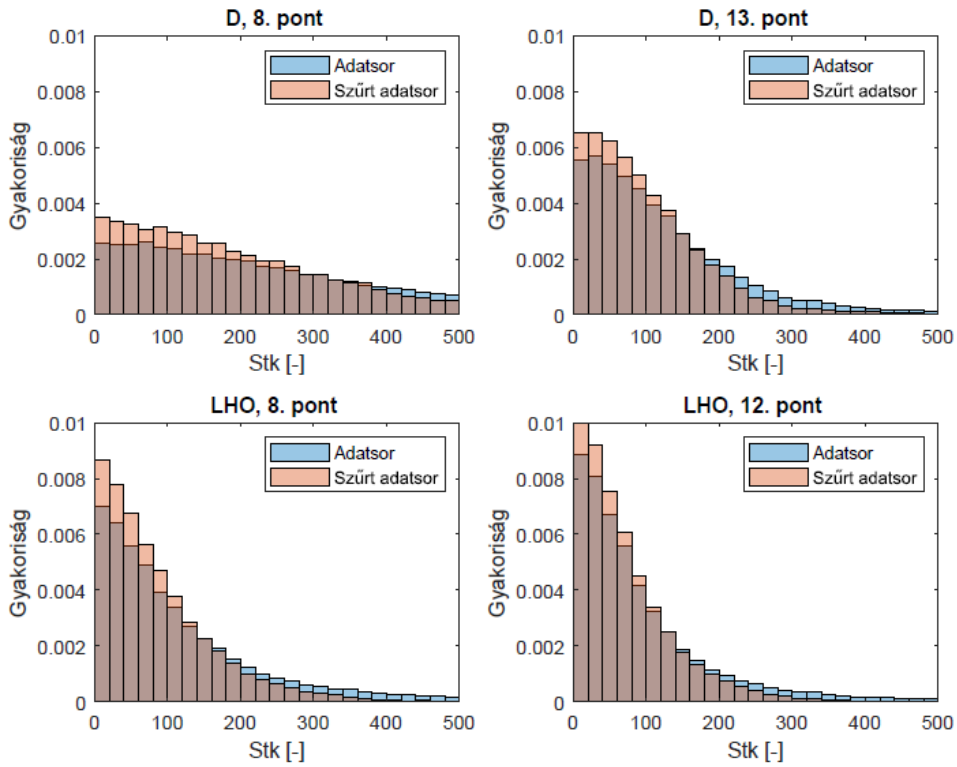


35. ábra: Maximális Reynolds szám értékek a percentilis érték változtatásával.

A statisztikai szűrés és értékelési módszer eredményeképpen alacsony Re értékeket tudtam meghatározni, ez a $z = 60$ mm keresztmetszetben Re < 10 értékeket jelent. A 2.2 fejezetben tárgyalt szakirodalmi adatok alapján az áramláskövető cseppek a Stokes áramlási tartomány jellemző alacsony Re értékekkel jellemezhetőek, amelyek az általam meghatározott Re értékekkel megegyeznek.

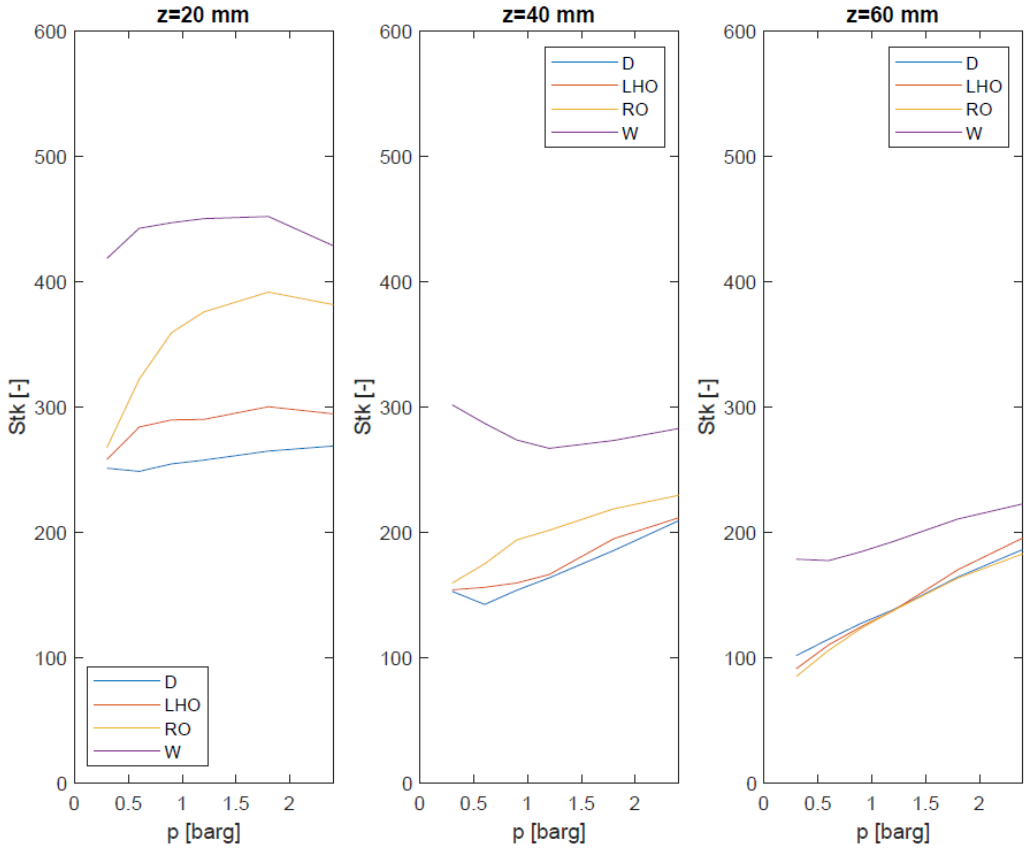
5.4. Stokes szám

A Reynolds szám után az egyedi cseppek áramláskövető tulajdonságait vizsgáltam a Stokes számon keresztül. A mérési pontokban számított Stk eloszlásainak változását a kiindulási és szűrt adatsorok összehasonlításával a 36. ábra szemlélteti néhány reprezentatív esetben. Stk eloszlására a Re eloszlására (5.3 fejezet) tett kvalitatív megállapításaim szintén érvényesek.

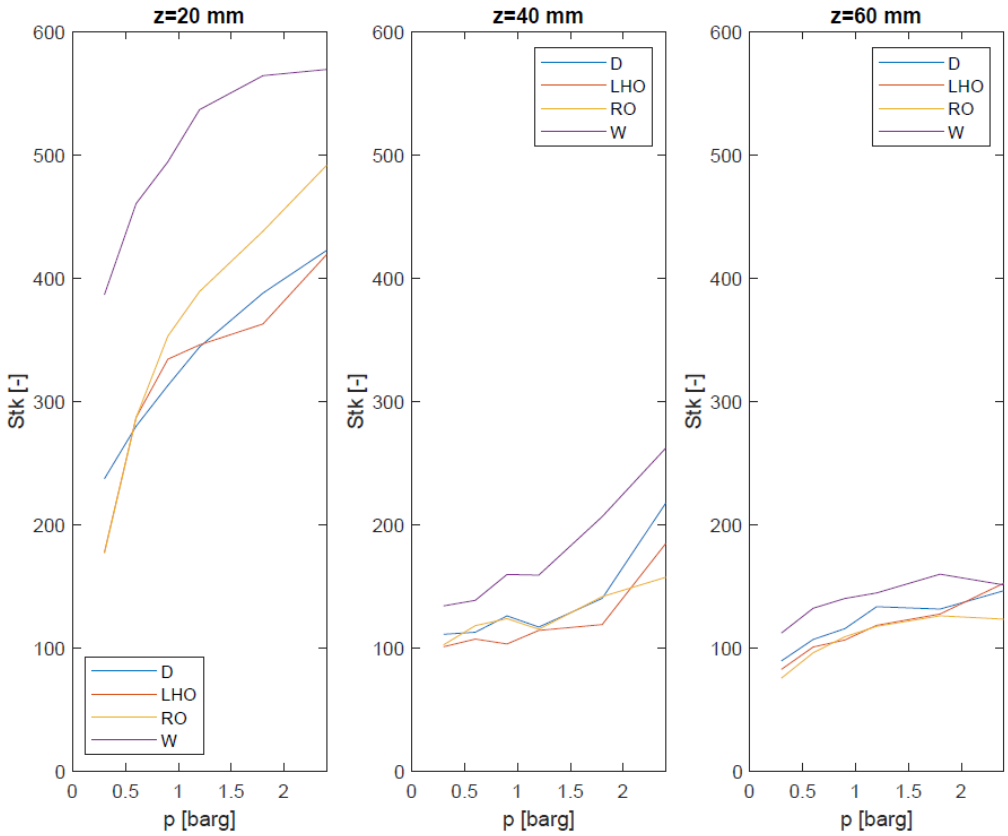


36. ábra: $z = 60$ mm, 1,8 barg, 55 °C, Stokes szám eloszlások.

A Re esetén is bemutatott módszerrel meghatároztam a keresztmetszetekre jellemző átlagos Stk értéket a porlasztónyomás függvényében. Az eredményeket a 37. ábra és 38. ábra tartalmazza. A keresztmetszetekben jellemző átlagos Stk a $z = 20$ mm-en növekedett a szűrt adatsorok esetén. A $z = 40$ mm és 60 mm keresztmetszetekben az átlagos Stk csökken a szűrt adatsorok esetén. A porlasztónyomás növelésével Stk értékei növekedtek, ami $z = 20$ mm esetén hatványozottan jelentkezett.

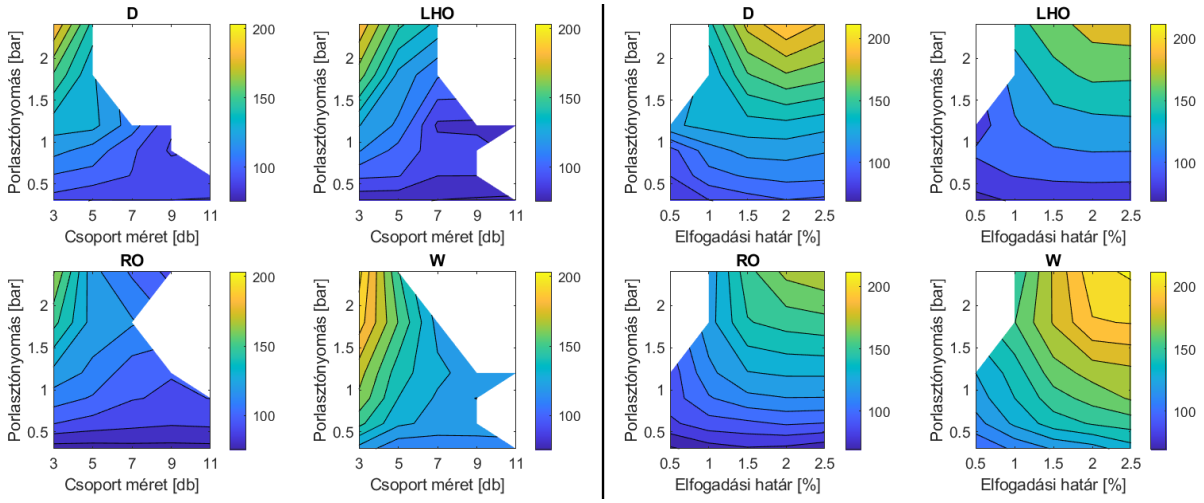


37. ábra: Kiindulási adatsorok különböző keresztmetszetekben számított átlagos Stokes száma.

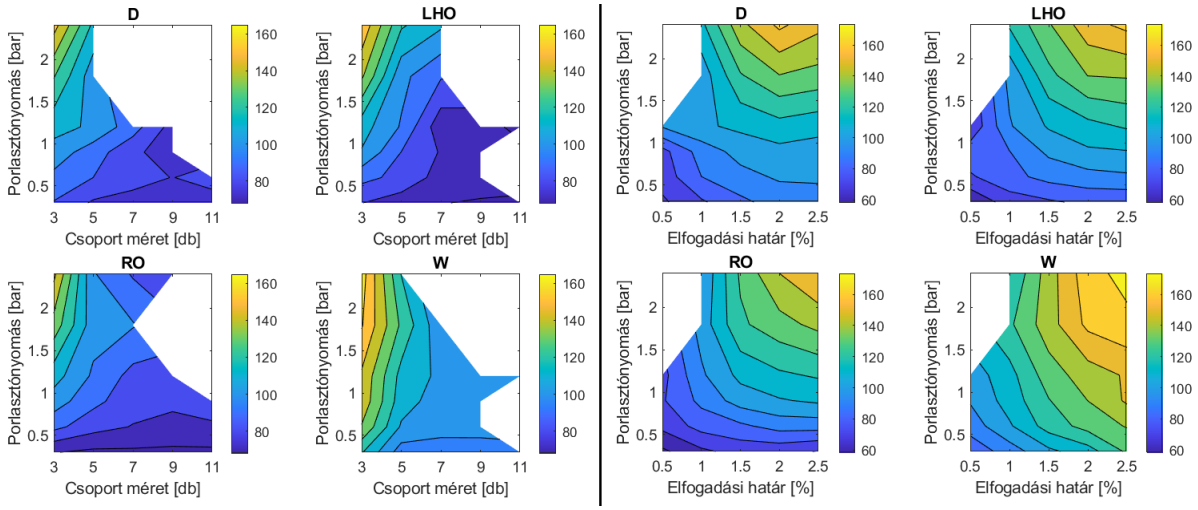


38. ábra: Szűrt adatsorok különböző keresztmetszetekben számított átlagos Stokes száma.

A jellemző Stk átlagának és szórásának érzékenységére vizsgálatot végeztem a két változtatható paraméter esetére. Az eredményeket a 39. ábra és 40. ábra tartalmazza. Az 5.3 fejezetben kifejtettek szintén jellemzőek a Stk átlagaira és szórásaira. Az 1%-os elfogadási határt és 5 csoport méretet elfogadhatjuk az értékelés során, mivel az átlagolás lazítása jelentősen növelt értékeket eredményez, továbbá az 1%-os tolerancia felett a porlasztónyomástól relatíve független, függőlegeshez közeli szintvonalak átváltanak horizontálisba, mely kevéssé kívánatos.



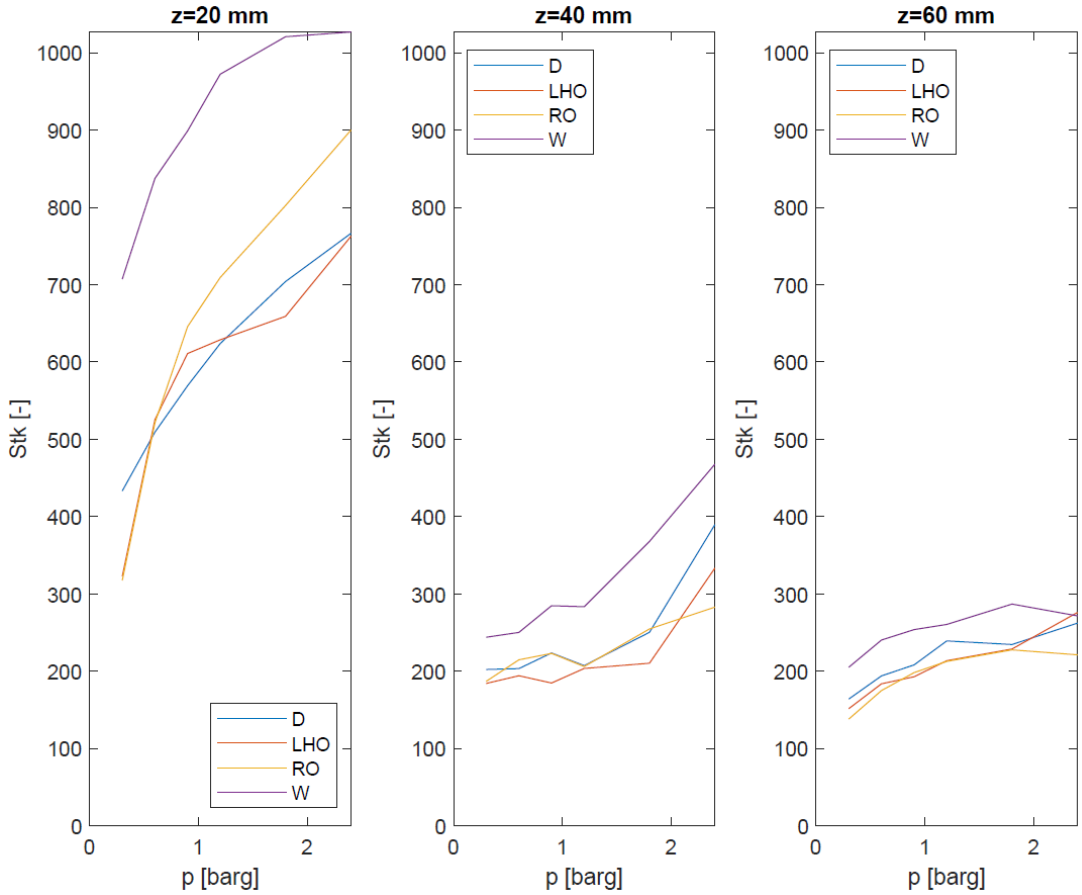
39. ábra: Átlagos Stokes szám a változtatható paraméterek függvényében (z = 60 mm).



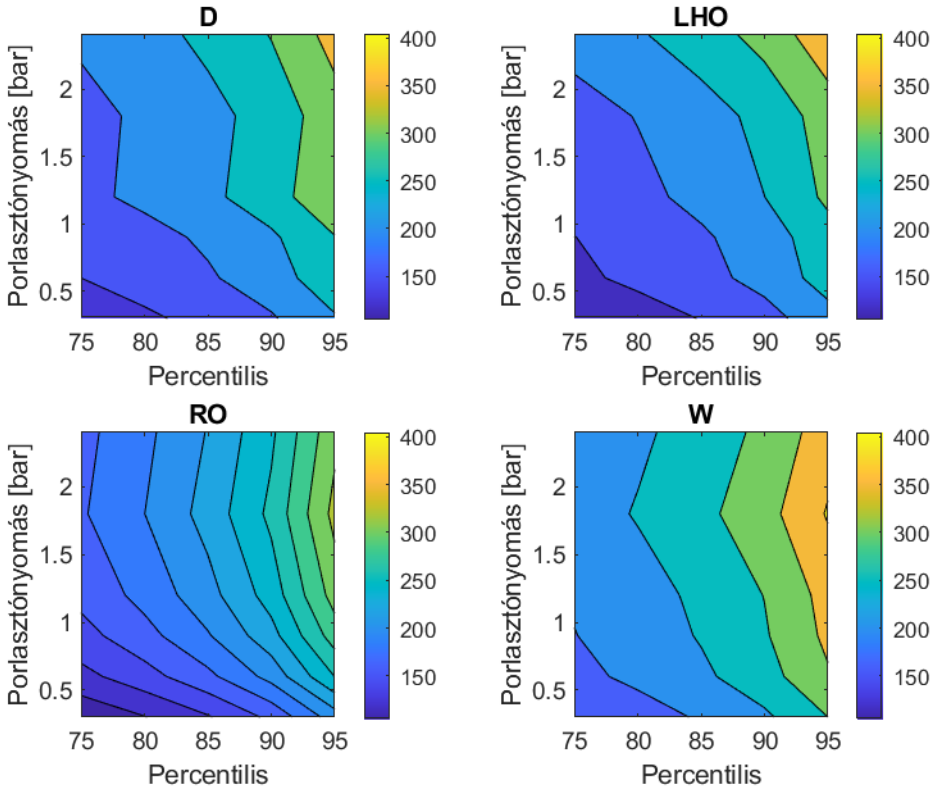
40. ábra: Stokes szám szórása a változtatható paraméterek függvényében (z = 60 mm).

A jellemző maximális Stk meghatározásához szintén a 85. percentilis értékek átlagolását végeztem el. Ennek eredménye a 41. ábra látható. A jellemző maximális Stk értéke a z = 20 mm keresztmetszeten kifejezetten magas, 300 és 1000 közé esik. z = 40 mm esetén a határok 200 és 500, míg z = 60 mm esetén alacsonynak mondható 150 és 300.

A választott percentilis érték hatása a maximális Stk értékekre a 35. ábra látható z = 60 mm-es keresztmetszetre. A legmagasabb, 95. percentilis esetén is Stk < 400 adódik. Alacsonyabb percentilis értékekkel számítva a Stk értékei minimálisan csökkennek.



41. ábra: Stokes számok eloszlások 85. percentiliseinek jellemző értéke.



42. ábra: Maximális Stokes szám értékek a percentilis érték változtatásával.

A statisztikai módszerekkel meghatározott Stk eredmények értékelése során az általam kijelölt maximális Stokes szám z = 60 mm keresztmetszeten 300 értékre adódott. A 2.2 fejezetben tárgyalt szakirodalom több definíciót mutat be, amelyek eltérő számítási módot adnak a Stk meghatározására. Ebből következik, hogy a különböző szakirodalmak eltérő eredményeket adnak az áramláskövető cseppekre jellemző maximális Stk határértékre. Az általam meghatározott Stk érték összehasonlítása így nem lehetséges a szakirodalom adataival.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat elsődleges célja levegő segédközeges porlasztó légsebességének statisztikai módszerekkel történő vizsgálata volt előzetesen készített mérési eredmények alapján. Ennek a feladatnak a motivációja, hogy a szakirodalomban a porlasztás során mért cseppeket jellemzően leszűrik néhány μm átmérőre, ami általánosan egyértelmű, hogy kevéssé alkalmazható, elsősorban nagysebességű gázáramban. A vizsgálatot 4 folyadékra (dízelolaj, könny fűtőolaj, nyers repceolaj és víz) végeztem el, amelyek porlasztási tulajdonságaiban jelentős szerepet játszó viszkozitás értéke két nagyságrendet fog át.

A permet légsebességének meghatározásához először az ezt jellemző cseppméretet kellett meghatározni. Először az adatsorok előszűrését végeztem el a kilógó elemek eltávolítása céljából. A cseppek áramlási tulajdonságai között hasonlóságot kerestem statisztikai módszerekkel fizikai korlátok felállítása nélkül. Alacsony porlasztónyomások esetén az osztályozott cseppméretek szórásait és átlagait vizsgálva kaptam egy maximális méretet, ami az áramláskövetésre enged következtetni. Azonban magas porlasztónyomásokon egyre inkább a szimmetriatengelyhez közeli mérési pontokban működött a módszer, a permet pereme felé haladva ilyen köszöbszámot nem tudtam megállapítani. A több származtatott áramlástani paraméterre érzékenységvizsgálatot végeztem, melynek eredményeképp megállapítottam, hogy a cseppméret osztályok átlagsebességeinek relatív szórását 5 osztályra célszerű meghatározni, majd a mozgóátlag 1%-nál kisebb változása egy olyan határ, ami alkalmas az áramláskövető cseppek meghatározására.

A szűrt eredményből számított Stokes és Reynolds számokat értékeltem tovább, ugyanis ezek értékeire a szakirodalomban általános útmutatások találhatók, elsősorban a megfellelő lézeroptikai mérések kivitelezése céljából. A Stokes áramlási tartományra jellemző alacsony Re érték adódott ki, esetünkben $Re < 10$ a $z = 60$ mm keresztmetszetben kialakult permet esetén, csupán statisztikai eszközök segítségével. Stk meghatározására az irodalomban több definíció is létezik, amiből következően a szakirodalom sem egységes a határértékeket illetően. Így itt a Re számhoz hasonló összehasonlítást nem tudtam hatékonyan végezni. Az eredményül kapott Stk limit 300-ra adódott.

7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

[1] Lefebvre AH, Mcdonell VG. Atomization and Sprays, Second Edition. 2017. https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315120911.

[2] Dumouchel C. On the experimental investigation on primary atomization of liquid streams. Exp Fluids 2008;45:371–422. https://doi.org/10.1007/s00348-008-0526-0.

[3] Hsiang LP, Faeth GM. Drop deformation and breakup due to shock wave and steady disturbances. Test 1995;21:545–60.

[4] Guildenbecher DR, López-Rivera C, Sojka PE. Secondary atomization. Exp Fluids 2009;46:371–402. https://doi.org/10.1007/s00348-008-0593-2.

[5] 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.

[6] Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30299-5.

[7] Elghobashi S. On predicting particle-laden turbulent flows. Appl Sci Res 1994;52:309–29. https://doi.org/10.1007/BF00936835.

[8] Ouellette NT, Xu H, Bourgoin M, Bodenschatz E. An experimental study of turbulent relative dispersion models. New J Phys 2006;8. https://doi.org/10.1088/1367-2630/8/6/109.

[9] Aerospaceweb.org | Ask Us - Drag of Cylinders & Cones n.d. http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0231.shtml (accessed November 1, 2020).

[10] 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;273:117792. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117792.

[11] 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.

[12] Dantec Dynamics. LDA and PDA Reference Manual. 2011.

[13] Walpole RE, Myers RH, Myers SL, Ye K. Probability and Statistics for Engineers and Scientists. 9th ed. Boston: 2011.

[14] Feng Z, Tang C, Yin Y, Zhang P, Huang Z. Time-resolved droplet size and velocity distributions in a dilute region of a high-pressure pulsed diesel spray. Int J Heat Mass Transf 2019;133:745–55. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.147.

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

[16] Lajos T. Az áramlástan alapjai. 3rd ed. Budapesti Műszaki Egyetem, Áramlástan

Tanszék; 1992.

[17] Lasheras JC, Villermaux E, Hopfinger EJ. Breakup and atomization of a round coal water slurry jet by an annular air jet. J Fluid Mech 1998;357:351–79. https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0022112097008070.