

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



RÁCZ ERIKA  
TDK DOLGOZAT

Levegő segédközeges porlasztóval képzett permet sebességképeinek értékelése dimenziótlan számokkal és statisztikai módszerekkel

Konzulens:  
*Dr. Józsa Viktor*  
egyetemi docens

Budapest, 2021

AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTERIUM ÚNKP-21-2 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.



Szerzői jog © Rác Erika, 2021.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, *Dr. Józsa Viktornak*, aki felügyelte és segítette munkámat az elmúlt két évben. Köszönöm a bizalmat, a szakmai tanácsokat és az emberi támogatást is.

Szeretném továbbá megköszönni, hogy ebben az évben csatlakozhattam a *BME Combustion Research Group* munkájához, illetve a csoport tagjainak a szakmai segítségét. A nyár folyamán méréseket végeztem *Milan Malýval*, a Brnoi Műszaki Egyetemről érkezett vendégkutatóval, akinek ez úton is köszönöm a lehetőséget és a sok tanácsot. A közös munka során szerzett rengeteg tapasztalatot és elméleti tudást a dolgozat elkészítése közben is kamatoztattam.

Végül köszönet illeti az *Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéket*, ahol lehetőséget és segítséget kaptam a tudásom bővítéséhez. A TDK dolgozatom hozzájárul a diplomatervem elkészítéséhez, illetve a jövőbeli kutatómunkám alapját képezi, így a feladat lehető legalaposabb elvégzésére törekszem. A jövőben tanulmányaimat és kutatómunkámat szeretném doktori képzés keretein belül folytatni.

Budapest, 2021

*Rácz Erika*

## TARTALOMJEGYZÉK

Ábrajegyzék.....	4
Táblázatok jegyzéke .....	6
Jelölések jegyzéke .....	7
1. Célkitűzések .....	9
2. Bevezetés.....	10
2.1. A porlasztás folyamata.....	10
2.2. A szabadsugár tulajdonságai .....	17
2.3. A cseppek áramláskövetése.....	19
2.4. A levegő segédközeges porlasztók típusai .....	24
3. Mérési Körülmények.....	27
3.1. A mérési elrendezés.....	27
3.2. A Fázis Doppler Anemométer .....	29
4. Értékelési módszerek .....	33
4.1. Adatsorok előszűrése .....	34
4.2. Stokes szám alapú szűrés.....	36
4.3. Eloszlások összehasonlítása dimenzióatlanítással és statisztikai momentumok segítségével.....	38
5. Eredmények értékelése .....	41
5.1. Határcseppméret.....	41
5.2. Cseppméret eloszlások.....	43
5.3. Sebességeloszlások.....	49
5.4. Reynolds szám.....	56
5.5. Stokes szám.....	63
6. Összefoglalás.....	69
7. Irodalomjegyzék .....	70

## ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A stabilitási görbe szakaszai [1,2].	11
2. ábra: Porlasztási mechanizmusok osztályozása [5].	12
3. ábra: Gömb alakú cseppek deformálódásának lehetséges alakjai [6].	14
4. ábra: Szekunder porlasztási folyamatok besorolása Oh és We alapján [7,8].	15
5. ábra: Szekunder porlasztási mechanizmusok vázlata: 1. vibrációs, 2. zsákos, 3. többmódusú, 4. nyírás hatására történő, 5. katasztrofális aprózódás [9].	16
6. ábra: Folyadácsugár fejlődése [11] és az áramvonalak mintázata [12].	17
7. ábra: Szabadsugár jellemző régiói [12].	17
8. ábra: Permet zónáira jellemző axiális sebességeloszlások [13].	18
9. ábra: Különböző $z$ távolságokban vizsgált dimenziótlan sebességeloszlások: $z/d_0=40 \circ, 50 \triangle, 60 \square, 75 \diamond, 97,5 \bullet$ [14].	19
10. ábra: Részecskék és turbulencia kölcsönhatásának osztályozása [18].	20
11. ábra: Részecskék mozgása különböző Stokes számok esetén egy örvényvel érintkezve [22].	22
12. ábra: Részecskék terjedése (a) $Stk \sim 0$ , (b) $Stk = 0,1$ , (c) $Stk=1$ , (d) $Stk = 10$ áramvonalak mentén [20].	23
13. ábra: Körlemez és gömb alakú testek ellenállástényezője a $Re$ függvényében [16].	24
14. ábra: Levegő segédközeges porlasztó típusai: a) egyszerű sugaras, b) ajakos, c) hibrid, d) simplex.	25
15. ábra: Mérési elrendezés [24].	27
16. ábra: A vizsgált porlasztó keresztmetszeti rajza (balra) [24] és a porlasztócsúcs (jobbra).	28
17. ábra: Mérőpontok elhelyezkedése a három kijelölt keresztmetszeten.	29
18. ábra: PDA rendszer elrendezése [24].	30
19. ábra: Interferenciakép kialakulása [25]: a) és b) lézernyalábok, c) interferenciakép, d) interferenciakép intenzitása.	30
20. ábra: Detektorokkal érzékelt jel fáziseltolódása.[26].	31
21. ábra: Hagyományos és planáris PDA [26].	32
22. ábra: DualPDA elrendezés [26].	32
23. ábra: A statisztikai vizsgálat folyamata.	33
24. ábra: Dízelolaj, 1.2 barg, 25 °C, (8, 0, 60) koordinátájú adatsor kilógó elem szűrésének eredménye.	35
25. ábra: Különböző cseppméret adatsorok dobozdiagramjai.	36
26. ábra: Adatsorok cseppméret-osztályait jellemző sebességek átlagos értéke (balra) és szórása (jobbra).	41
27. ábra: Határcseppméretek $Stk < 1$ ; 0,1; 0,01 szűrés esetén.	42
28. ábra: Dízelolaj 0,3 bar 25 °C (0,0,60) adatsor sebesség-méret térképei.	43
29. ábra: Eredeti adatsorok cseppméret eloszlásai.	44
30. ábra: Szűrt adatsorok cseppméret eloszlásai.	44
31. ábra: Eredeti adatsorok dimenziótlan cseppméret eloszlásai.	45

32. ábra: Szűrt adatsorok transzformált cseppméret eloszlásai. ....	45
33. ábra: Cseppméret eloszlások átlaga. ....	46
34. ábra: Cseppméret eloszlások szórása. ....	47
35. ábra: Cseppméret eloszlások relatív szórása. ....	47
36. ábra: Cseppméret eloszlások ferdesége. ....	48
37. ábra: Cseppméret eloszlások kurtózis értékei. ....	49
38. ábra: Eredeti adatsorok sebességeloszlásai. ....	50
39. ábra: Eredeti adatsorok dimenziótlan sebességeloszlásai. ....	51
40. ábra: Szűrt adatsorok sebességeloszlásai. ....	51
41. ábra: Szűrt adatsorok dimenziótlan sebességeloszlásai. ....	52
42. ábra: Sebességeloszlások átlagai. ....	53
43. ábra: Sebességeloszlások szórásai. ....	53
44. ábra: Sebességeloszlások relatív szórás értékei. ....	54
45. ábra: Sebességeloszlások ferdesége. ....	55
46. ábra: Sebességeloszlások kurtózis értékei. ....	56
47. ábra: Eredeti Reynolds szám eloszlások. ....	57
48. ábra: Eredeti Reynolds szám eloszlások dimenziótlan alakja. ....	57
49. ábra: Szűrt Reynolds szám eloszlások. ....	58
50. ábra: Szűrt Reynolds szám eloszlások dimenziótlan alakja. ....	59
51. ábra: Reynolds szám eloszlások átlaga. ....	60
52. ábra: Reynolds szám eloszlások szórása. ....	60
53. ábra: Reynolds szám eloszlások relatív szórása. ....	61
54. ábra: Reynolds szám eloszlások ferdesége. ....	62
55. ábra: Reynolds szám eloszlások kurtózis értéke. ....	62
56. ábra: Eredeti adatsorok Stokes szám eloszlásai. ....	63
57. ábra: Eredeti adatsorok dimenziótlan Stokes szám eloszlásai. ....	64
58. ábra: Szűrt adatsorok Stokes szám eloszlásai. ....	64
59. ábra: Szűrt adatsorok dimenziótlan Stokes szám eloszlásai. ....	65
60. ábra: Stokes szám eloszlások átlagai. ....	66
61. ábra: Stokes szám eloszlások szórásai. ....	66
62. ábra: Stokes szám eloszlások relatív szórásai. ....	67
63. ábra: Stokes szám eloszlások ferdesége. ....	67
64. ábra: Stokes szám eloszlások kurtózis értékei. ....	68

## TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: Aprózódási folyamatok átmenetét.....	15
2. táblázat: Vizsgált anyagok és mérési beállítások.....	28
3. táblázat: Vizsgált anyagok sűrűsége különböző előmelegítési hőmérsékleten [30]. .....	37
4. táblázat: Vizsgált anyagok kinematikai viszkozitása különböző előmelegítési hőmérsékleten [30]. .....	37
5. táblázat: Elemzés során használt statisztikai jellemzők számítási módjai. ....	40

## JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk		
Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$d$	Jellemző méret	m
$D$	Cseppméret	$\mu\text{m}$
$D_{max}$	Határcseppméret	$\mu\text{m}$
$m$	Részecskék száma	db
$M$	Valószínűségi változó várható értéke	
$MAD$	Medián abszolút eltérés	
$Me$	Medián	
$n$	Egy adatsor elemeinek száma	db
$l$	Karakterisztikus hossz	mm
$Oh$	Ohnesorge szám	-
$p$	Nyomás	bar
$P$	Valószínűség	-
$p_A$	Aerodinamikai nyomás	Pa
$p_I$	Belső nyomás	Pa
$p_{\sigma_D}$	Felületi feszültségből származó nyomás	Pa
$r$	sugár	m
$Re$	Reynolds szám	-
$S$	Valószínűségi változó szórása	
$Stk$	Stokes szám	-
$T$	Hőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$
$x_i$	Valószínűségi változó egy értéke	
$X$	Valószínűségi változó általános jelölése	
$u$	Jellemző sebesség	m/s
$v$	Sebesség	m/s
$V$	Térfogat	$\text{m}^3$
$w$	Axiális sebesség	m/s
$\bar{w}$	Levegősebesség	m/s
$We$	Weber szám	-

## Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$\gamma_1$	Ferdeségi együttható/ ferdeség	
$\gamma_2$	Lapultsági együttható/ lapultság/ csúcsosság/ kurtózis	
$\varepsilon$	Turbulencia disszipációs rátája	-
$\eta$	Dinamikus viszkozitás	Pa·s
$\mu$	Átlag	
$\nu$	Kinematikai viszkozitás	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Sűrűség	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Szórás	
$\sigma_D$	Felületi feszültség	N/m
$\tau$	Idő/hosszlépték	
$\varphi$	Kolmogorov hosszlépték	

## Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
$f$	Folyadék jellemzője
$K$	Kolmogorov skála
$l$	Levegő jellemzője
$p$	Részecske jellemzője
$R$	Relatív érték
$tr$	Transzformált érték/alak
$0$	Kiáramlási keresztmetszetre jellemző értékek

## 1. CÉLKITŰZÉSEK

A levegő segédközeges porlasztóval képzett permet kétfázisú, turbulens áramlás, amely kaotikus természete miatt analitikusan nem becsülhető kellő pontossággal. A permetképzés szimulációja, habár elméletben lehetséges, a gyakorlatban nem kivitelezhető a jelenséget jellemző nagy méretskálabeli átfogás miatt. A permet értékelésének ma a legmegbízhatóbb útja a méréses vizsgálat és a mért jellemzők statisztikai módszerekkel történő értékelése.

A dolgozatban egy mikro-gázturbina egyszerű sugaras, levegő segédközeges porlasztóján elvégzett atmoszférikus, nem reaktív körülmények között végzett mérés eredményeit értékeltem, melyet Fázis Doppler Anemométer segítségével végeztek el különböző folyadékok, porlasztási körülmények és permetbeli pozíciók esetén.

A dolgozatban egy olyan módszert mutatok be, amely a permet cseppméret, axiális sebesség, illetve a cseppekre jellemző Stokes és Reynolds számok statisztikai eloszlásait értékeli. Az algoritmussal az adatsorok Stokes szám (Stk) alapú szűrését végeztem el iterációs folyamat során. A szakirodalomban az áramláskövető részecskék jellemzésére a  $Stk < 0,1$  határértéket jelölték meg, azaz ennek a feltételnek megfelelő cseppek jellemzői közelítik az áramlás tulajdonságait. Az adatsorok szűrését így ennek a feltételnek megfelelően elvégeztem, majd az értékelés során az eredeti és szűrt adatsorok eloszlásait hasonlítottam össze dimenziótlanítási módszer segítségével. Az eloszlások hasonlóságainak, illetve eltéréseinek számszerűsítésére a statisztikai momentumok módszerét alkalmaztam. Az eljárás segítségével összefüggések teremthetők a porlasztás tulajdonságai és permet jellemzői között. A vizsgálat eredményei segítséget adhatnak a porlasztók tervezése és ellenőrzése során, illetve a modellezési feladatokban.

## 2. BEVEZETÉS

Sok ipari és hétköznapi életben előforduló eszköz működése során merül fel folyadékok porlasztása. Ez megjelenik a mezőgazdaságban a növények permetezésénél és öntözésénél, nehéziparban a porkohászat és anyagtechnológiai edzés folyamatában. Permetképzés történik a festékszórók esetén, párasítás és egyes légtisztítási technológiák során, akár tűzoltás esetén is. Fontos anyagkezelési módszer a vegyszer- és gyógyszeriparban, illetve gyógyászati eszközök, pl. inhalátorok működésének alapja. Az energetika területén is gyakran találkozhatunk porlasztók alkalmazásával. Az ipari tüzelőberendezésekben kiemelt szerepet kap a levegő segédközeges porlasztás, amely nagysebességű porlasztó levegő segítségével cseppekké bontja a folyadékokat. A levegő segédközeges porlasztó nagyobb levegőmennyiséggel és alacsonyabb nyomáson üzemel a nyomásporlasztóhoz képest, így alkalmazása optimálisabb repüléshez és energiatermeléshez használt gázturbinákban [1].

A levegő segédközeges porlasztás során kétfázisú, turbulens áramlás jön létre, amely globális tulajdonságainak leírásához pontos matematikai modellt nem ismerünk. A folyadék és levegő interakciója kaotikus folyamat, azaz a fizikai feltételekre végtelen érzékenységet mutat, így közelítő analitikus módszerek sem léteznek a porlasztás, illetve részmechanizmusok modellezésére a permet méretskáláján. A szakirodalomban a jellemző cseppméretek közelítésére empirikus- és félempirikus modellek találhatóak, melyek alkalmazása így csak interpolációval lehetséges, a mérések érvényességi tartományán kívül tehát nem alkalmazhatók. Numerikus szoftverekkel, habár ezen modellek segítségével lehetséges szimulációk készítése, nagy számítási kapacitást igénynek a széles méretskála miatt [2]. A permet vizsgálata ebből kifolyólag mérési úton a legcélszerűbb, amely speciális mérőeszközöket igényel. A permet tulajdonságait a permetképződés sztochasztikus jellege miatt statisztikai módszerekkel elemezhetjük.

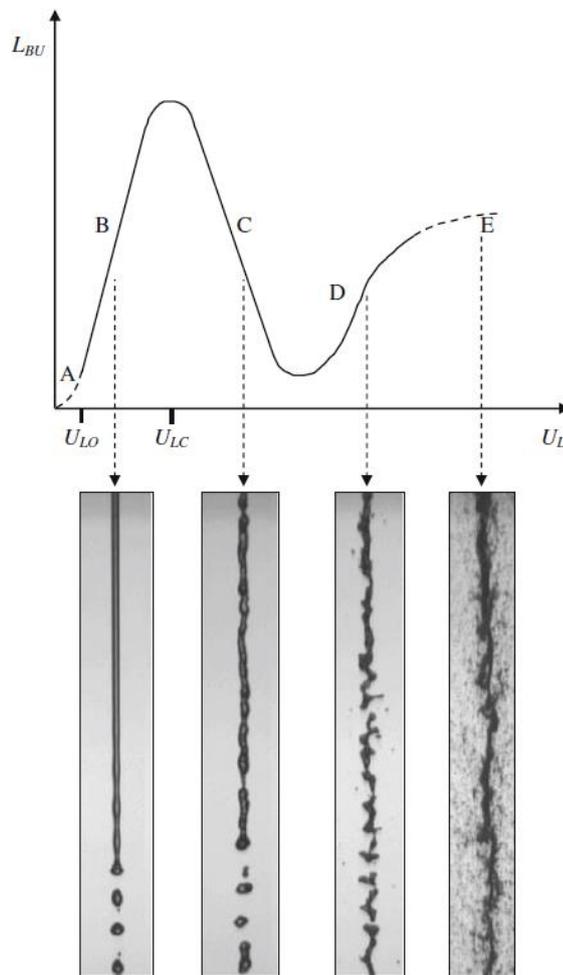
A permet jellemző tulajdonságival szemben feltételeket szabhatnak a technológia kívánt céljainak megfelelően, például átlagos vagy küszöb cseppméret értéket. Folyadékok tüzelése során fontos a megfelelő tüzelési körülmények kialakítása a szigorú környezetvédelmi elvárásoknak megfelelés és a gazdaságos működés érdekében. Az optimális párolgási viszonyok és tüzelési folyamatok fenntartása céljából a porlasztás folyamatainak és jellemzőinek megfelelően pontos ismerete szükséges. Bármely alkalmazás esetén a berendezés vagy folyamat hatékonysága a permet jellemzőitől függ, így annak ellenőrzése szükséges.

### 2.1. A porlasztás folyamata

A porlasztás folyamatát több összetett mechanizmus alkotja, amelyeket a folyadék és a környező levegő kölcsönhatása alakít, melynek végeredménye a folyadéksugár cseppekké bomlása és a folyadék felszín-tömeg arányának több nagyságrenddel való növelése. A permet minőségét és a permetképzési folyamatokat a gáz és a folyadék fizikai tulajdonságai határozzák meg, amelyek a sűrűség, viszkozitás, felületi feszültség és az interakció térbeli és időbeli lefolyása.

A permetképzést három fő szakaszra bonthatjuk fel, amelyek a befecskendezés, a primer és szekunder porlasztási mechanizmusok [3]. A befecskendezés során, amint a folyadékáram kilép a fúvókából, deformációk jelennek meg a folyadék felületén. A deformációk térben és időben növekednek, míg végül a folyadékáram szétszakad vagy folyadékdarabok válnak ki a fő áramból. Ezt követően a primer porlasztási mechanizmus során a folyadékból nagyobb cseppek szakadnak le, amelyek méretük és sebességük okán instabilak, emiatt deformációt szenvednek el, igen nagy hányadban pedig végül a szekunder porlasztási mechanizmusok során a külső erők hatására tovább aprózódnak. A fő porlasztási mechanizmusok működése elsősorban a folyadékáramok relatív sebességétől, valamint a geometriai környezettől függenek. Alacsony energiaszint esetén a primer, míg magas energiatartam esetén a szekunder porlasztási mechanizmus dominál [3].

A folyadéksugár porlasztási mechanizmusainak kategorizálására leggyakrabban a stabilitási görbét használják, amely a sugár szakadási hosszát mutatja az átlagos kiáramlási sebesség függvényében. A szakadási hossz a sugár azon részének mérete, amely összefüggő folyadékoszlopként érintkezik a fúvókanyílással. *Leroux* [4] munkájában bemutatott stabilitási görbe az 1. ábrán látható, amelyen  $L_{BU}$  a szakadási hossz  $U_L$  pedig a kiáramlási sebesség.



1. ábra: A stabilitási görbe szakaszai [1,2].

R. D. Reitz (1978) kutatásában az aprózódási mechanizmusokat az Ohnesorge és a Reynolds szám alapján vizsgálta. Az Ohnesorge szám ( $Oh$ ) a viszkozus erők és a felületi feszültségből származó erők viszonyát fejezi ki, így mentes a tehetetlenségi erőtől:

$$Oh = \frac{\mu_f}{\sqrt{\rho_f \sigma_D l}} \quad (1)$$

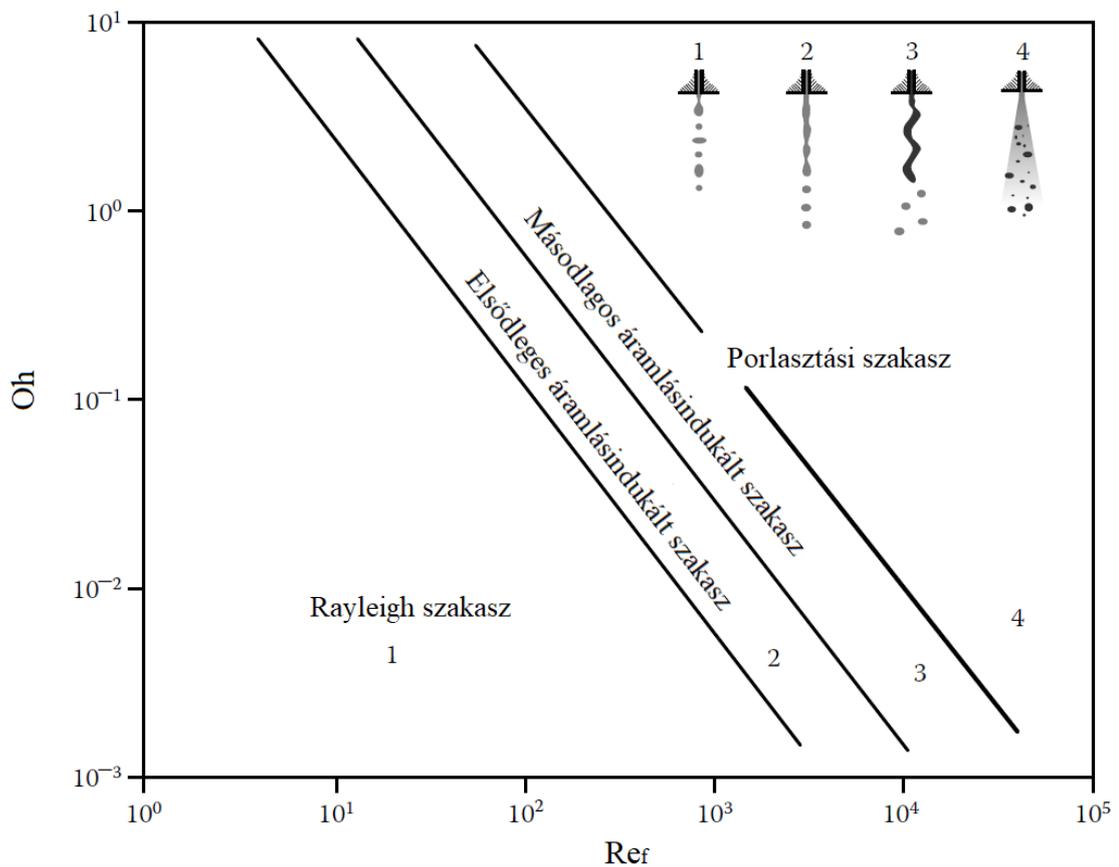
ahol:

- $\mu_f$  a folyadék dinamikus viszkozitása [Pa·s],
- $\rho_f$  a folyadék sűrűsége [kg/m<sup>3</sup>]
- $\sigma_D$  a folyadék felületi feszültsége [N/m],
- $l$  a karakterisztikus hossz [m].

A Reynolds szám a tehetetlenségből és súrlódásból származó erők viszonyát fejezi ki:

$$Re_f = \frac{\rho_f \cdot v \cdot l}{\mu_f}, \quad (2)$$

ahol  $v$  a csepp sebessége [m/s].



2. ábra: Porlasztási mechanizmusok osztályozása [5].

A stabilitási görbe folyamatai az 1. ábra fotóin és a 2. ábra diagramján láthatóak, ezek a következők:

- Csepegő szakasz, amelyet az 1. ábrán A) jelöl. Ekkor nagyméretű cseppek lépnek ki a fúvókanyílásból, amelyek nem alkotnak folyamatos folyadékoszlopot.
- 1) Rayleigh szakasz (1. ábra B), amely esetén a folyadéksugár tengelyére szimmetrikus, a sugárátmérővel azonos nagyságrendű rezgések növelik a sugár felületét, így megnő a felületi feszültség. Abban az esetben, ha a rezgés amplitúdója megegyezik a folyadéksugár sugarával a csepp leválik a folyadékszalagról. Ebben a tartományban a keletkező nagy cseppek átmérője analitikusan becsülhető, azonban az elmélet már nem ad magyarázatot a két nagy csepp között néha felbukkanó kisebb, úgynevezett szatellit cseppek jelenlétére.
- 2) az elsődleges áramlásindukált szakasz (1. ábra C), amely hasonló a Rayleigh szakasz mechanizmusához. A tengelyszimmetria továbbra is tapasztalható, de a cseppek képződése szabálytalanabb. A gáz és a folyadék közötti növekvő relatív sebességkülönbség növeli a felületi feszültség szerepét, ennek eredménye a folyadéksugárban kialakuló egyenetlenebb statikus nyomáseloszlás, ami fokozza a folyadéksugár szétesését. A keletkező cseppek átmérője kisebb, mint az előző szakaszokban, de továbbra is a folyadéksugár átmérőjével azonos nagyságrendbe esik. A cseppek keletkezése a fúvóka nyílástól több átmérő távolságra történik.
- 3) a másodlagos áramlásindukált szakasz (1. ábra D). A tovább növekvő relatív sebességkülönbség miatt a felszínen megjelenő instabil rövidhullámhosszú hullámok intenzívebb cseppképződést okoznak. A cseppek a fúvókanyílástól csak néhány átmérőnyi távolságra keletkeznek, méretük jóval kisebb a folyadéksugár átmérőjénél. Ebben és az ezt követő esetben a felületi feszültség már a folyadéksugár felbomlása ellen dolgozik.
- 4) porlasztás, amely az 1. ábra E jelű szakasza. A folyadéksugár a már fúvókanyílásnál aprózódik. Az átlagos cseppátmérő jóval kisebb, mint a sugár átmérője [3–5].

A cseppek aprózódásának matematikai leírásához szükség van a cseppet deformáló nyomáseloszlás pontos ismeretéhez. Azonban a deformáció hatására a nyomásviszonyok is megváltoznak, amely további deformációhoz vezet, végül pedig a cseppek tovább bomlanak [5].

A porlasztási folyamatok befejeztével olyan cseppek keletkeznek, amelyek nem apróznak tovább, egyensúlyi állapotba kerülnek. Ebben az esetben a csepp belső felületén jelentkező nyomás ( $p_I$ ) éppen kiegyenlíti a külső aerodinamikai nyomás ( $p_A$ ) és a felületi feszültségből származó nyomás ( $p_{\sigma}$ ) összegét:

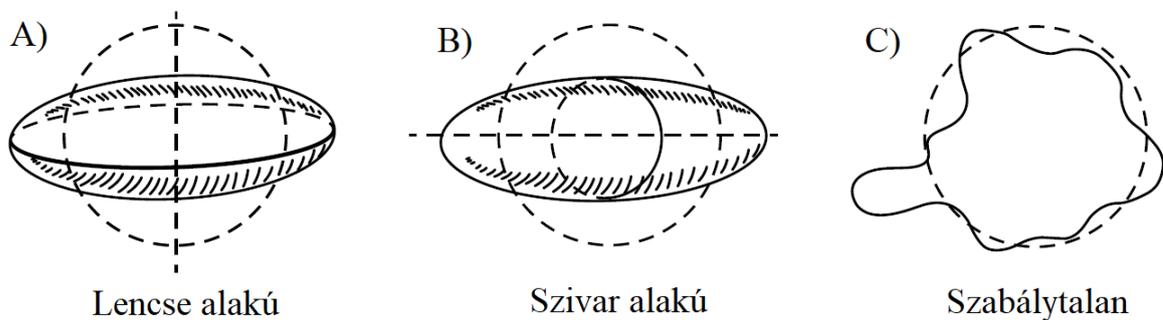
$$p_I = p_A + p_{\sigma_D} \quad (3)$$

és

$$p_{\sigma_D} = \frac{4\sigma_D}{D}, \quad (4)$$

ahol  $\sigma_D$  a felületi feszültség és  $D$  a csepp mérete [5].

Az egyensúlyi állapot addig marad fent, ameddig a csepp felületi feszültsége le tudja követni a külső nyomásváltozásokat, azaz az összegük állandó marad. Abban az esetben, ha a külső nyomás változásának kompenzálása nem valósul meg a csepp deformálódik, végső soron kisebb cseppekké aprózódhat. A kisebb cseppek (4) alapján nagyobb felületi nyomással rendelkeznek, így nagyobb aerodinamikai nyomásváltozás kompenzálására képesek. Ellenkező esetben a csepp instabillá válik, deformálódik, majd addig aprózódik, amíg az adott áramlási körülmények között stabil, kis méretű cseppek keletkeznek. Ebből következik, hogy definiálható egy kritikus cseppméret, aminél valamivel nagyobb cseppek esetén, az aprózódás ideje nő a cseppméret csökkenésével. A stabil, kritikus méretű cseppek aprózódási ideje így végtelen. A folyadékok viszkozitása szintén befolyásolja az aprózódási időt. Minél nagyobb a folyadék viszkozitása, annál ellenállóbb a deformációnak, így nagyobb az aprózódás ideje [5].

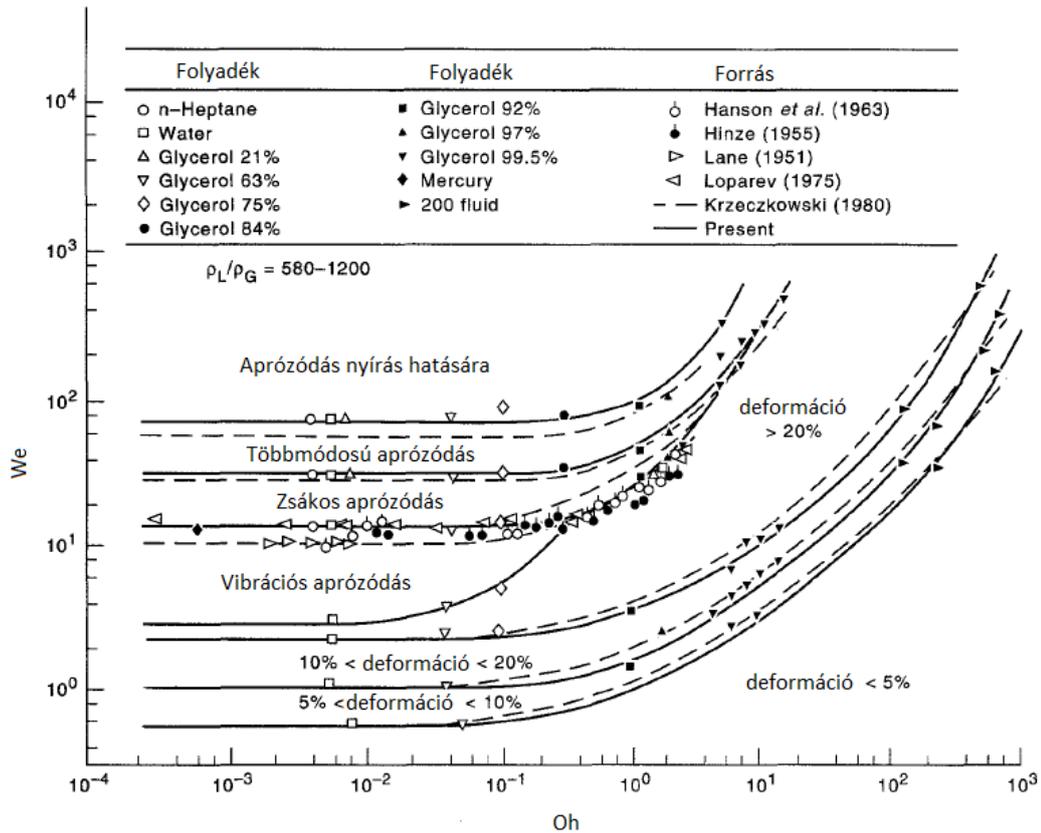


3. ábra: Gömb alakú cseppek deformálódásának lehetséges alakjai [6].

Hinze [6] nagysebességű kamera segítségével a cseppek három fő deformációs alakját figyelte meg, amelyeket a 3. ábra mutat. Az A) típus, a lencse alakú deformáció nagy aerodinamikai nyomás vagy párhuzamos, örvénylő áramlás által keltett nyírófeszültség hatására jön létre. A csepp elnyúlt ellipszoid alakká deformálódik, majd a belső erők nagyságától függően felaprózódik. A B), szivar alakú típus Coutte áramlás vagy sík-hiperbolikus áramlás hatására hosszú hengeres alakká nyúlik, míg a C) típus szabálytalan áramlások esetén alakulhat ki.

Hsiang és Faeth [7,8] és Guildenbecher és tsai [9] 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:

$$We = \frac{\rho_f \cdot v^2 \cdot l}{\sigma_D} \quad (5)$$



4. ábra: Szekunder porlasztási folyamatok besorolása Oh és We alapján [7,8].

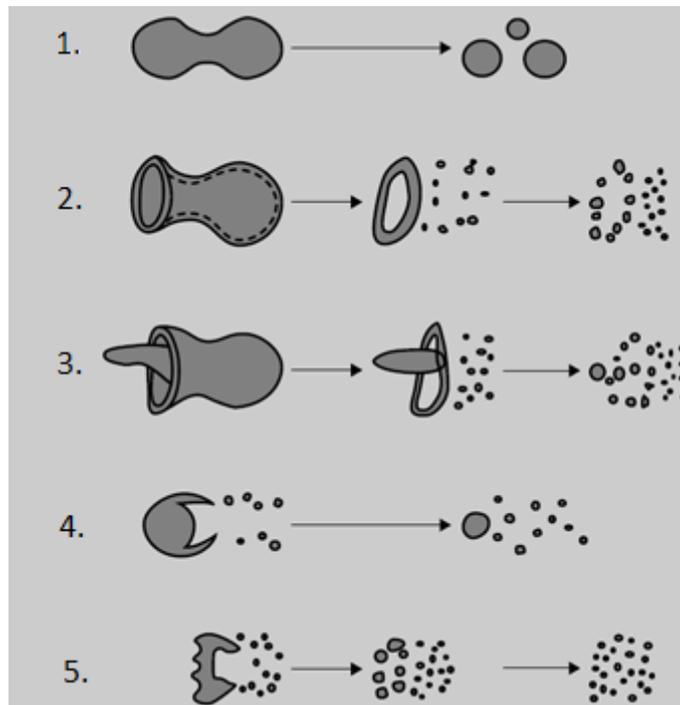
A két paramétertől függő szekunder porlasztási mechanizmusok tartományait a 4. ábra mutatja, a folyamatok értelmezéséhez az 5. ábra rajzai segítenek. A rajzok növekvő relatív sebességet, így egyre finomabb permetet ábrázolnak.

A 4. ábra esetén látható, hogy  $Oh < 0,01$  esetén az aprózódási folyamatok közötti átmenet független a viszkozus erőktől, mivel a  $We$  állandónak tekinthető. *Hsiang és Faeth* (1995) [7] az átmenetek között az 1. táblázatban található  $We$  határértékeket jelezte meg.

1. táblázat: Aprózódási folyamatok átmenetét.

Aprózódás/deformáció típusa	$We$ [-]
5%-os deformáció	0,6
10%-os deformáció	1
20%-os deformáció	2,1
Vibrációs deformáció	3
Zsákos aprózódás	13
Többszörös aprózódás	35
Aprózódás nyírás hatására	80

Látható továbbá, hogy  $Oh > 0,1$  felett az átmenetekhez tartozó  $We$  fokozatosan nő. A vibrációs deformáció tartománya  $Oh \approx 0,3$ -nál, illetve a zsákos aprózódás tartománya  $Oh \approx 4$ -nél eltűnik.



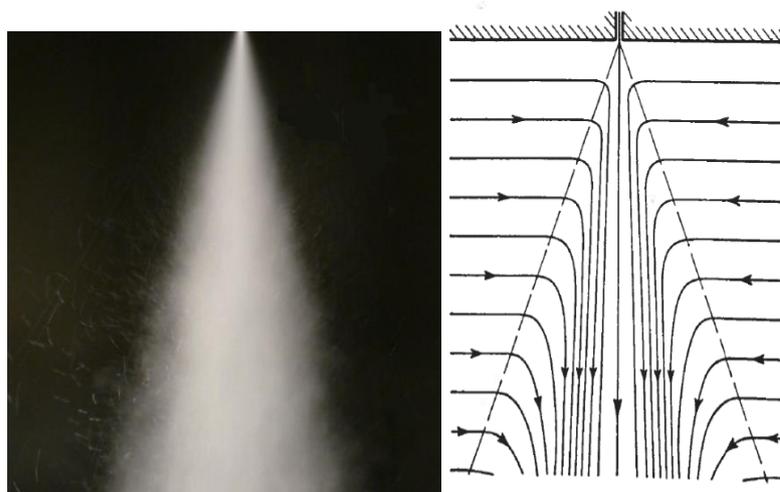
5. ábra: Szekunder porlasztási mechanizmusok vázlatja: 1. vibrációs, 2. zsákos, 3. többmódusú, 4. nyírás hatására történő, 5. katasztrofális aprózódás [9].

Az 5. ábra az előzőekben tárgyalt aprózódási folyamatokat mutatja, amelyek a következők:

1. Vibrációs aprózódás, amely ritkán megfigyelhető jelenség, eredményeként néhány az aprózódó cseppel összehasonlítható méretű részecske létrejötte.
2. Zsákos aprózódás folyamata. A csepp elnyúlik és zsákszerű alakot vesz fel. Először a zsák pereme toroidális alakban leszakad, majd tovább aprózódik a zsák, illetve a perem is.
3. Többmódusú aprózódás, amely hasonló a zsákos aprózódáshoz, viszont zsák képződése közben létrejön egy porzó szerű alakzat is, amely szintén apróbb cseppekre bomlik a folyamat végén.
4. Nyírásan 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.
5. Katasztrofális aprózódás, amely során a cseppek nagy hullámhosszú és amplitúdójú deformáció miatt viszonylag nagy méretű részecskére bomlik, majd ezek tovább aprózódnak. Ez tipikusan szuperszonikus viszonyok mellett alakul ki.

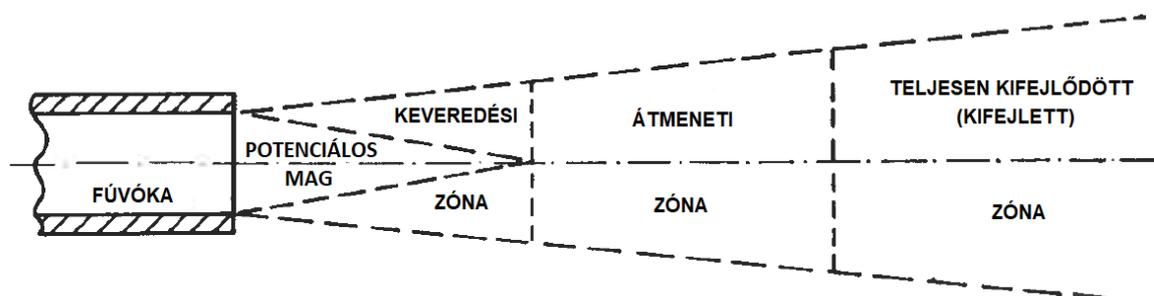
## 2.2. A szabadsugár tulajdonságai

A porlasztás során kétfázisú, turbulens áramlás jön létre, amely elemzéséhez elengedhetetlen a szabadsugarak viselkedésének ismerete. A folyadék a fúvókacsúcson kilépve kölcsönhatásba lép a környezetében lévő levegővel, miközben az áramlás sebességeloszlása, térfogatárama és keresztmetszete változik. A folyamat során a folyadéksugár a levegő egyre nagyobb részét mozdtítja meg, miközben a szabadsugár sebessége lecsökken a levegővel történő keveredés miatt. Az elragadott levegő helyére környezeti levegő áramlik be közel axiálisan, az így kialakult áramvonalak a 6. ábrán láthatóak [10].



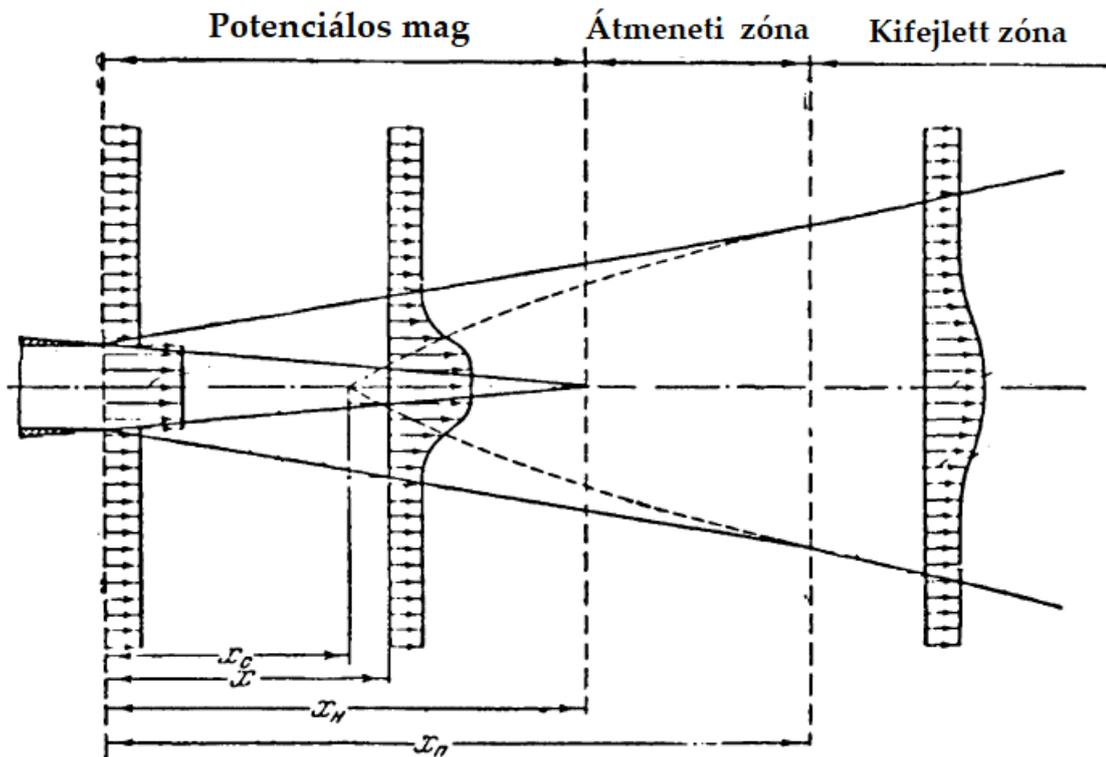
6. ábra: Folyadéksugár fejlődése [11] és az áramvonalak mintázata [12].

A kialakult szabadsugár áramlási régióit a 7. ábra mutatja. A nyíláson kilépve a folyadék sebessége és koncentrációja közel változatlan marad, ez a zóna a potenciális mag. Ezt egy határréteg veszi körül, a keveredési zóna, ahol az impulzus- és az anyagáramok merőlegesek az áramlás irányára. A teljesen kifejlődött zónát az átmeneti zóna előzi meg. A sugár határa az a kúpfelület, ahol a levegő sebesség tengelyirányú komponense éppen nagyobb nullánál. Jellemzően a felület kúpszöge  $20-25^\circ$  a turbulenciafoktól függően [10]. *Urbán és tsai.* [11] folyadékok porlasztásával képzett permet kúpfélszögét vizsgálta, a porlasztási nyomás és folyadék előmelegítési hőmérsékletektől függően az eredmény  $17,84-27,47^\circ$  között változott.



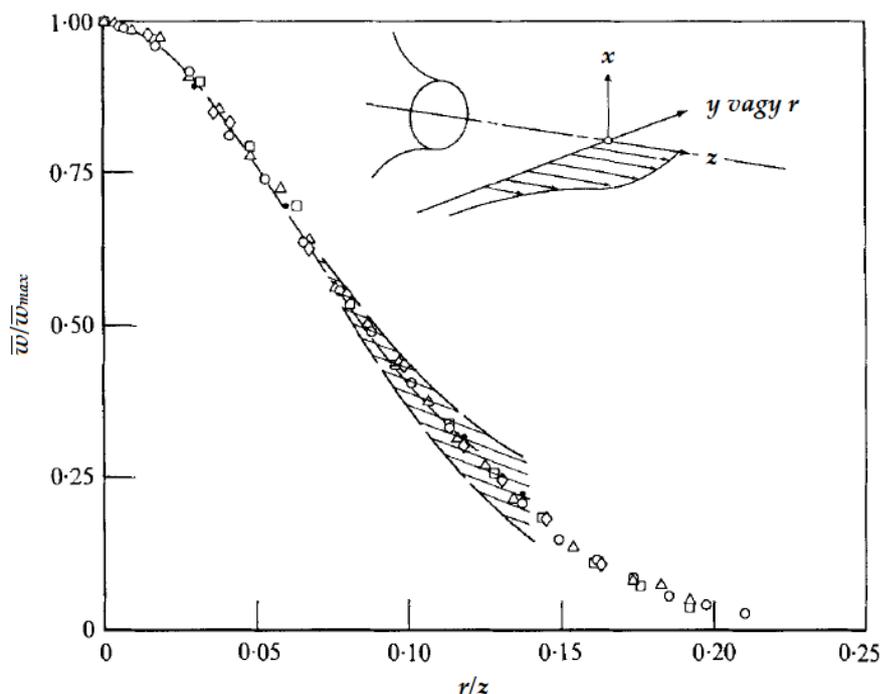
7. ábra: Szabadsugár jellemző régiói [12].

A potenciális mag keresztmetszete a fúvókától távolodva csökken a környező levegő elragadása miatt. A zóna addig tart, ameddig a sugár keresztmetszet legalább egy pontjának sebessége, amely elméletben a szimmetriatengelyre esik, még éppen megegyezik a kiáramlás sebességével. Ez a hossz a fúvókanyílás méretének kb. négy-öttszöröse, míg az átmeneti zóna hossza annak tízszerese. Ezek az értékek függenek a sebességeloszlástól és a nyílásnál tapasztalható turbulencia mértékétől [12].



8. ábra: Permet zónáira jellemző axiális sebességeloszlások [13].

A kifejlett zónában, a fúvókanyílástól távolodva a sugár keresztmetszeteinek átlag, illetve maximális sebessége csökken. *Hinze & Van der Hegge Zijnen* (1949) sebességeloszlások dimenziótlan alakját vizsgálta különböző fúvókátávolságban, amely eredményét a 9. ábra mutatja. A sebességeket a keresztmetszetben mérhető maximális sebességértékkel arányosítva láthatjuk a radiális távolság ( $r$ ) fúvókátávolsággal dimenziótlanított értékének függvényében. A 9. ábra alapján arra következtethetünk, hogy a vizsgált keresztmetszetekben vizsgált sebességeloszlások hasonlóságot mutatnak [14,15]. Abban az esetben, ha az előbbi dimenziótlan sebességeket az  $r/z$  függvényében ábrázoljuk, akkor azt tapasztaljuk, hogy a sebességeloszlások eloszlások egybevágóvá válnak [10,15]. A szabadsugar ezen tulajdonságát önmodellezésnek nevezzük. Turbulens áramlások esetén az önmodellezést  $z > 30d_0$  fúvókátávolság esetén tapasztalhatjuk.



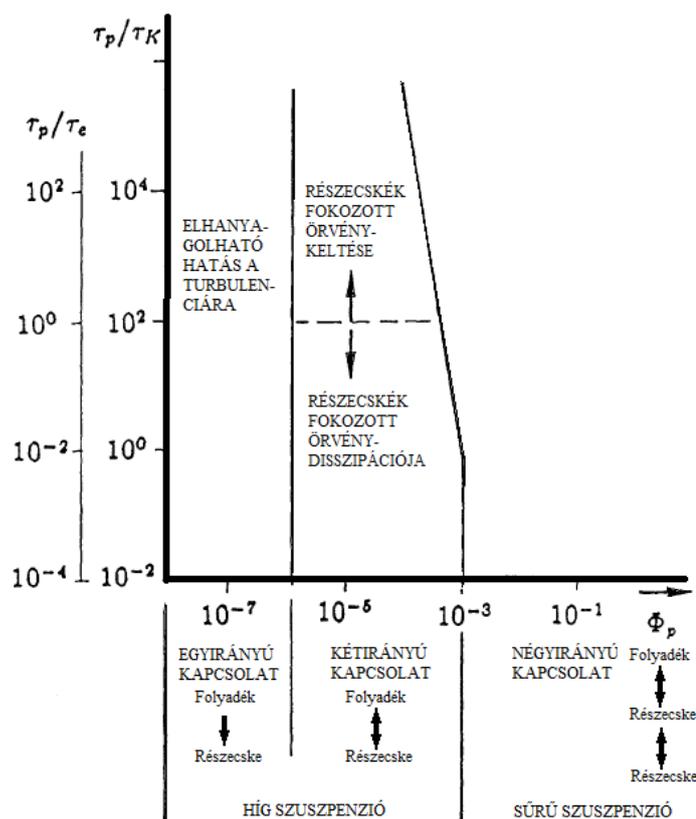
9. ábra: Különböző  $z$  távolságokban vizsgált dimenziótlan sebességeloszlások:  $z/d_0=40$  ○, 50 △, 60 □, 75 ◇, 97,5 • [14].

### 2.3. A cseppek áramláskövetése

A turbulencia olyan szabálytalan áramlási állapot, amely térben és időben véletlenszerűen változó mozgásokból áll. A természetben és a gyakorlatban előforduló áramlási jelenségek nagy része turbulens, amely természete szabálytalan, látszólag véletlenszerű és kaotikus, a keletkező örvények, illetve többfázisú áramlás esetén a részecskék mozgása kiszámíthatatlan. A turbulenciának nincs pontos elméleti leírása, sem általános matematikai modellje. Leginkább a Navier-Stokes egyenlet segítségével közelíthető a turbulens áramlások leírása, viszont megoldásuk nem lehetséges teljes komplexitásukban, mivel ezek az erősen nemlineáris, parciális differenciálegyenletek megoldásai nem triviálisak turbulens áramlás esetén, így zárt alakú, általános analitikus megoldást lehetetlen rájuk adni [2,10,16].

Turbulens áramlásokban örvények jelennek meg, amelyek egymással is kölcsönhatásba léphetnek. A nagyméretű, instabil örvények kisebb méretű örvényekre bomlanak, amik további aprózódáson mehetnek keresztül, míg végül az energia disszipálódik. A folyamat matematikai leírását a Kolmogorov-féle skálatörvény adja [9,10].

A kétfázisú, turbulens áramlások esetén az áramló közeg és részecskéi között az áramlást befolyásoló kölcsönhatások jöhetnek létre, amelyek a turbulencia modulációját okozzák [17]. Elghobashi [18] a kölcsönhatások osztályozását vizsgálta az áramlás fázisainak időskálaviszonyai és fázisaránya alapján. A vizsgálat eredményeit a 10. ábra szemlélteti.



10. ábra: Részecskék és turbulencia kölcsönhatásának osztályozása [18].

A diagramon szereplő mennyiségek a következők [18]:

- $\Phi_p$  a részecskék térfogataránya az áramlásban,

$$\Phi_p = \frac{m \cdot V_p}{V}, \quad (6)$$

ahol:

- $m$  a részecskék száma,
- $V_p$  egy részecske térfogata,
- $V$  a részecskék és az áramló közeg ösztérfogata,
- $D$  a részecske átmérője,
- $\tau_p$  a részecske relaxációs ideje:

$$\tau_p = \frac{\rho_p \cdot D^2}{18 \cdot \rho_f \cdot \nu}, \quad (7)$$

- $\tau_K$  Kolmogorov időlépték,

$$\tau_K = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

- $\tau_e$  nagyméretű örvények elhalási ideje

$$\tau_e = \frac{l}{\nu}, \quad (9)$$

- $\rho_p$  a részecskék sűrűsége,
- $\rho_f$  az áramló közeg és a részecskék sűrűsége,
- $\nu$  az áramló közeg kinematikai viszkozitása,
- $\nu$  az áramlás átlagsebessége,
- $l$  legnagyobb energiával rendelkező örvények hosszléptéke,
- $\varepsilon$  a turbulencia kinetikus energiájának disszipációs rátája.

A vizsgálat eredményei izotermikus áramlások nem összenyomható folyadékokra, fázisváltozások vagy kémiai reakciók végbemenetele nélküli esetére vonatkozik, illetve figyelmen kívül hagyja a részecskék és fal ütközéseinek hatását [18].

- $\Phi_p < 10^{-6}$  érték esetén a részecskék relatíve alacsony száma, térfogataránya miatt azok nem befolyásolják a turbulenciát, a kölcsönhatás egyirányú. A részecskék és a turbulencia közötti impulzusátvitel minimális hatást gyakorol az áramlásra, a részecskék diszperziója függ a turbulencia mértékétől.
- A  $10^{-6} < \Phi_p < 10^{-3}$  tartományban kétirányú kapcsolatot tapasztalhatunk az áramló közeg és a részecskék között. Ebben az esetben a részecskék száma/mérete elég nagy ahhoz, hogy befolyásolja a mérhető turbulenciát, illetve az áramlás tulajdonságait. Adott térfogatarány mellett a részecskék relaxációs idejének csökkenésével növekszik a részecskék összfelülete, például a kisebb átmérők és nagyobb számú részecske esetén. Ennek eredménye a turbulencia disszipációs rátájának növekedése. Ellenkező esetben a részecskék Reynolds száma növekszik. Kb.  $Re_p \geq 400$  esetén örvénykeltés történik, amely fokozza a turbulencia energiáját. Az eddig tárgyalt térfogatarány tartományokat híg szuszpenzióknak is nevezzük.
- A harmadik tartományt,  $10^{-3} < \Phi_p$  esetén az áramlás megnövekedett részecske-terhelése miatt sűrű szuszpenzióknak nevezzük. A nagy részecskeszám/méret miatt a részecskék egymással is kölcsönhatásba lépnek, ütköznek egymással. Ezt nevezzük négyirányú kapcsolatnak. Ahogy a  $\Phi_p$  megközelíti az 1 értéket, szemcsés áramlás alakul ki, amelyben az áramló közeg és a részecskék nem különíthetők el egymástól [18].

Egyirányú kapcsolat esetén a turbulens áramlás viselkedésének modellezése jóval egyszerűbb, mint a másik két esetben, mivel a kétirányú és négyirányú kapcsolatok vizsgálata rendkívül bonyolult erősen nemlineáris jellegük miatt [18]. Kétfázisú turbulens áramlásban, ha egyirányú kapcsolat áll fenn az áramló közeg és a szállított részecskék között, akkor a részecskék hasonlóan viselkednek az áramló közeghez. Ezt az áramlást követő tulajdonságot a Stokes dimenziótlan számmal számszerűsíthetjük. A részecskék véges mérete és tehetetlensége miatt a részecskék viselkedése nem lehet teljesen hasonló az áramláséhoz, de megközelítheti azt [2].

A Stokes szám meghatározására több formula is létezik, definíció alapján a vizsgált részecske relaxációs idejének és az áramlás karakterisztikus időskálájának a hányadosa:

$$Stk = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (10)$$

A relaxációs idő az a részecskére jellemző érték, amely alatt a részecske mozgása állandósul, reagál a részecske az azt érő erőhatásokra. Azaz, ha egy részecske mozgó légáramba lép be, akkor a jellemző  $\tau_p$  relaxációs idő alatt megközelíti az áramlás sebességét, megmutatja, hogy a részecske képes-e alkalmazkodni a környezet új állapo-

tához. Gömb alakú részecskék esetén ez arányos az átmérő négyzetével, így a részecskeméret növekedésével a relaxációs idő hatványfüggvényt követve növekszik, így általában a kis részecskék rövid relaxációs idővel rendelkeznek.

$$\tau_p = \frac{\rho_p \cdot D^2}{18 \cdot \mu_f} \quad (11)$$

Az áramlás karakterisztikus időskálájának értéke a karakterisztikus hossz ( $l$ ) és a jellemző sebesség ( $u$ ) hányadosa:

$$\tau_f = \frac{l}{u}. \quad (12)$$

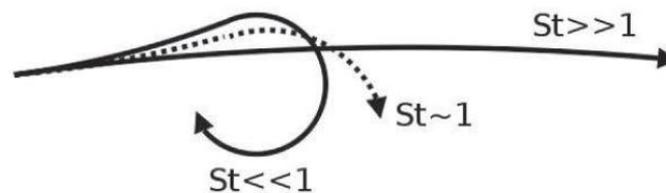
(11) és (12) alapján a Stokes szám [12,13]:

$$Stk = \frac{\rho_p \cdot D^2}{18 \cdot \mu_f} \cdot \frac{u}{l}. \quad (13)$$

(14) egy olyan általános formula, amely tartalmazza a turbulencia hatását [2,21].

$$Stk = \frac{1}{18} \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \cdot \left(\frac{d}{\varphi}\right)^2, \quad (14)$$

ahol  $\varphi$  a Kolmogorov hosszlépték (a legkisebb örvények jellemző mérete),  $\varphi = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}}$ .

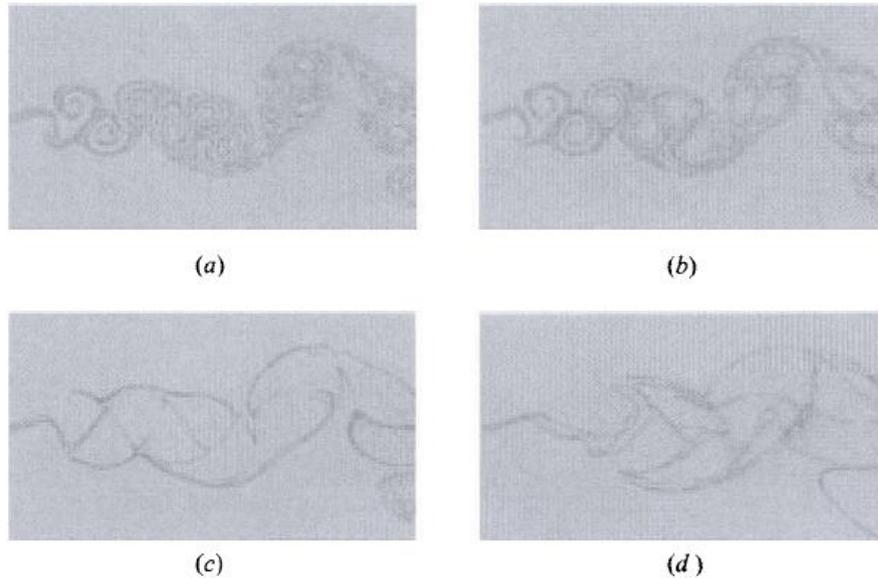


11. ábra: Részecskék mozgása különböző Stokes számok esetén egy örvénnyel érintkezve [22].

A szakirodalomban ökölszámokat jelöltek meg a Stokes szám esetén a részecskék áramlaskövető tulajdonságának leírásához, ezeket az állapotokat a 11. ábra szemlélteti [10,14,16].

- $Stk < 1$  esetén a részecskék jelentős részének relaxációs ideje kisebb az áramlás karakterisztikus időskálájánál, azaz jól lekövetik az áramlást. A részecskék és az áramlás ideje közel azonos.
- $Stk < 0,1$  esetén a részecskék 1%-os pontossággal követik az áramlást.
- $Stk \sim 1$  esetén a részecskék kilépnek az örvénymagokból és az örvények szélein mozognak.
- $Stk > 1$  esetén az áramlás kevésbé befolyásolja a részecskék mozgását.
- $Stk \sim 0$  esetén a két fázis termikus és kinetikus egyensúlyban van.

*Krstic* [20] munkájában a részecskék terjedését vizsgálta az áramlás tulajdonságaitól függően. A 12. ábra különböző Stokes számmal jellemezhető áramvonalak esetén illusztrálja a részecskék mozgását. Látható, hogy a Stokes szám növekedésével a részecskék mozgása függetlenedik az áramlástól.



12. ábra: Részecskék terjedése (a)  $Stk \sim 0$ , (b)  $Stk = 0,1$ , (c)  $Stk=1$ , (d)  $Stk = 10$  áramvonalak mentén [20].

Áramló közeggel együtt áramló részecskék mozgását meghatározzák az áramlásban ébredő viszkózus erők, illetve az azokra ható közegellenállási viszonyok. Ebből következik, hogy az áramláskövetés jellemzőinek számszerűsítésére alkalmas a dimenziótlan Reynolds szám, amely a tehetetlenségi és súrlódási erők viszonyát fejezi ki. A Reynolds szám számításához használt általános kifejezés [5]:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu_f}, \quad (15)$$

ahol  $\nu_f$  az áramló folyadék kinematikai viszkozitása [ $m^2/s$ ]. Alacsony Reynolds szám (kb.  $Re = 2300$  értékig, mely apró külső zavarások, pl. gépjárműforgalom, villamos által keltett rezgések stb. hatására 1600-ig is lecsökkenhet) esetén az áramlás lamináris, míg magas értékek esetén turbulens jellegű.

Az áramlásban mozgó részecskék mozgását leíró Reynolds szám esetén a számítás:

$$Re_p = \frac{w_R \cdot D}{\nu_f}, \quad (16)$$

ahol  $D$  a részecske jellemző mérete [ $m$ ], gömbalakú folyadékcseppek esetén az átmérője és  $w_R$  a részecske relatív sebessége a környező közeghez képest [ $m/s$ ].

Stokes valós közegek kétfázisú áramlásának vizsgálata során a közegellenállási erő számítására a következő összefüggést állapította meg, amelyet Stokes-törvénynek nevezünk [5]:

$$F = 3 \cdot \pi \cdot D \cdot \mu_l \cdot w_R \quad (17)$$

A közegellenállási erő több tényezőtől függ, a részecske geometriai jellemzőitől, az áramlás sebességétől és a viszkozitástól. A Stokes-törvény csak azokra az áramlásokra érvényes, amelyeket dominánsan a viszkózus erők határoznak meg, vagyis az alacsony Reynolds számokkal jellemezhetőek. Magasabb Reynolds számok esetén a tehetetlenségi erők jelentőssé válnak, ekkor megnövekszik a közegellenállási erő a fokozott örvénykeltés vagy örvényleválások miatt. Az ellenállás-tényező a következő formulával fejezhető ki gömbalakú részecskék esetén [5]:

$$C_D = \frac{2F}{\rho_f \cdot w_R^2 \cdot A} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} D^2 \cdot \frac{\rho_f w_R^2}{2}} \quad (18)$$

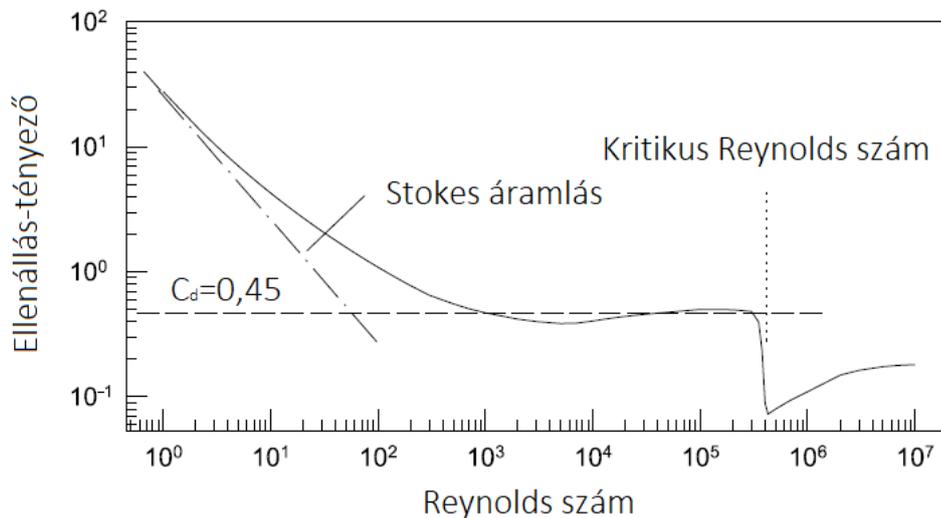
ahol  $A$  [m<sup>2</sup>] a részecske referencia felszíne, amely a részecske áramlásra irányában levetített felületének nagysága. Az ellenállás-tényező alacsony Reynolds számokkal jellemezhető Stokes áramlás esetén az (17) és (18) alapján kifejezhető [5]:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (19)$$

A Stokes áramlástól történő eltérő viselkedést a részecske körül kialakuló határréteg okozza, mivel ez változtatja a részecskét jellemző paramétereket. A határréteg hatásának kiküszöbölésére különböző korrekciós módszereket fejlesztettek ki az ellenállás-tényező számítására, viszont ezek legtöbbször mérési adatok elemzéséből származnak.

Az ellenállás-tényező és a Reynolds szám kapcsolatát a 13. ábra mutatja be. Alacsony Reynolds szám tartományban az ellenállás-tényező lineárisan csökken. A Stokes-törvény klasszikusan  $Re < 1$ , de praktikusán  $Re < 10$  esetén alkalmazható mérnöki általában elfogadható hibával. Ebben a tartományban a viszkózus részecskék gömb alakúak maradnak, nem deformálódnak, a részecskék áramlást követő tulajdonsága megfelelő [2,16].

A Reynolds szám növekedésével a részecskék által keltett örvények hatása meghaladja a viszkózus erők hatását. A Stokes áramlás után, kb.  $750 < Re < 3,5 \cdot 10^5$  tartományban közel  $C_D \sim 0,445$  értéket vesz fel, amelyet tehetetlenségi tartománynak nevezünk. Ezután az ellenállás-tényező hirtelen csökkenése tapasztalható a kritikus Reynolds szám értéknél, majd fokozatos növekedés [16].

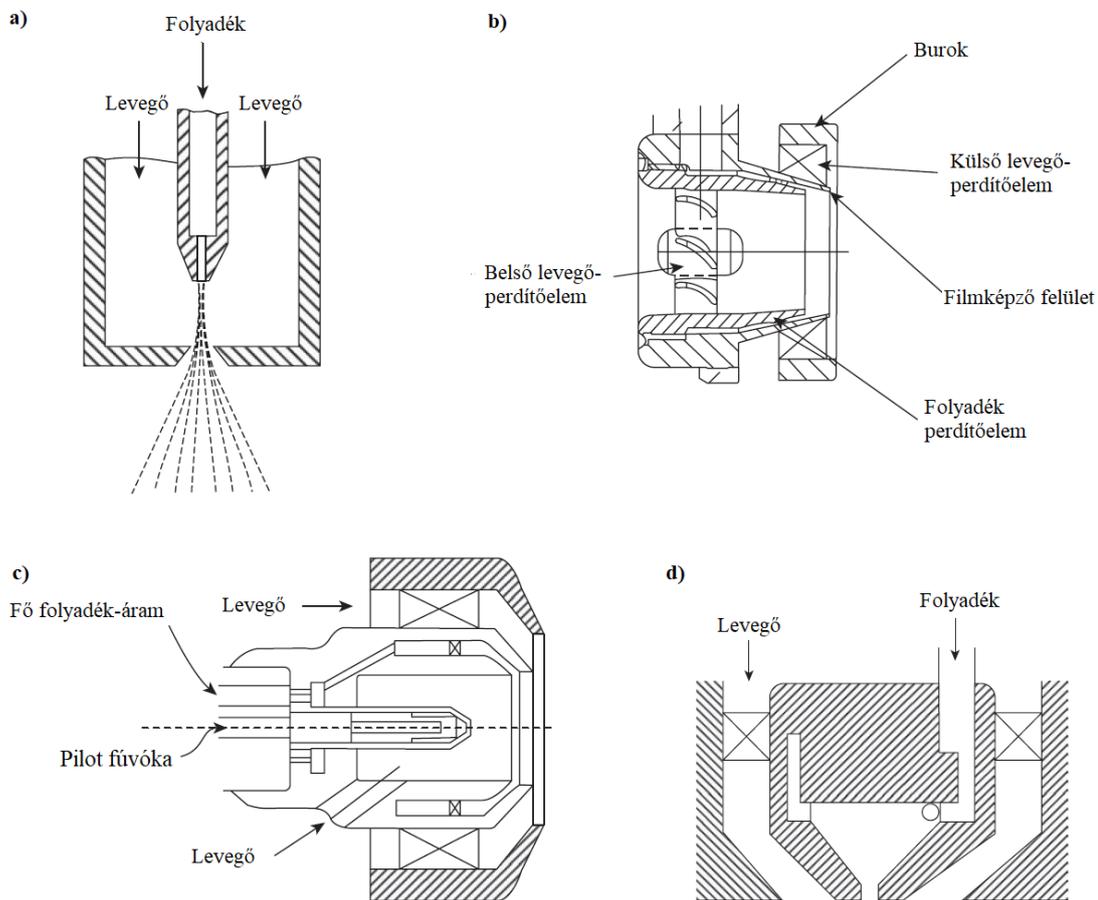


13. ábra: Körlemez és gömb alakú testek ellenállástényezője a  $Re$  függvényében [16].

#### 2.4. A levegő segédközeges porlasztók típusai

A levegő segédközeges porlasztó az áramló levegő mozgási energiáját használja fel a porlasztáshoz. A folyadék kis sebességgel, egy vagy több sugár formájában áramlik ki, majd a folyadékot nagysebességű (kb. 100 m/s nagyságrendű) légáram szaggatja sza-

lagokra, majd cseppekre [5]. A porlasztótípus alkalmazásának célja a levegő legnagyobb hatékonyságú felhasználása az elérhető legjobb minőségű permet képzéséhez. A cél a porlasztott folyadék minél magasabb felület-tömeg arányú cseppekre aprózása, amely megfelelően gyors párolgást eredményez [23]. A levegő segédközegees porlasztóknak számos előnyük van a nyomásporlasztókhöz képest, kifejezetten a magasnyomású tüzelési rendszerekben történő alkalmazásukat tekintve. A levegő segédközegees porlasztó alacsonyabb tüzelőanyag-nyomás esetén is megfelelő minőségű permet előállítását teszi lehetővé. A porlasztó kialakításából fakadóan a permetképzési folyamat során a tüzelőanyag és levegő alapos keveredése valósul meg, amely kék lángot és alacsony koromkibocsátást eredményez [5]. A porlasztó további előnye, hogy állandó tüzelőanyag-eloszlást biztosít az áramlás teljes térfogatában, emiatt a távozó füstgáz hőmérséklete érzéketlen a tüzelőanyagáram változására [23]. A fő hátrányok a meglehetősen szűk stabilitási határok és a gyenge porlasztási minőség indításkor, az ekkor jelentkező alacsony légsebesség miatt, valamint az alacsony porlasztási hatások [1].



14. ábra: Levegő segédközegees porlasztó típusai: a) egyszerű sugaras, b) ajakos, c) hibrid, d) simplex.

Az 14. ábra mutatja a leggyakrabban említett levegősegédközegees porlasztó típusok felépítését. Az a) típus az egyszerű sugaras, levegő segédközegees porlasztó. A tüzelőanyag befecskendezés a belső, kör keresztmetsetű csövön történik, amelyet ezzel ko-

axiálisan bevezetett levegő szaggat cseppekre. Habár a gyakorlatban ez a porlasztótípus a legkevésbé használt, a levegő és a tüzelőanyag tulajdonságainak átlagos cseppméretre gyakorolt hatására vonatkozó ismereteink nagyobb része ehhez az kialakításhoz köthető [1].

A leggyakrabban alkalmazott típus a 14. ábra b) rajzán látható ajkas porlasztótípus. A folyadék vékony filmréteget képez az ajak felületén, amit a nagysebességű levegő lesodor és apróz cseppekre. Ebben az elrendezésben a levegő két koncentrikus csatornán áramlik, amelyek terelőlapátok segítségével perdületet kapnak. A légáramok perdítési iránya lehet azonos, ami elősegíti az erős elsődleges áramlás recirkulációját. Az ellentétes irányú levegőmozgás előnye a fokozott nyíróhatás, amely segíti a hatékonyabb permetképzést és a keverékképzést, viszont hátrányos a recirkuláció szempontjából [1].

Az 14. ábra c) rajzán a hibrid porlasztó látható. A berendezés egy ajkas és egy örvénykamrás porlasztóból áll, amivel a levegő segédközeges porlasztó hátrányait lehet mérsékelni. Alacsony tüzelőanyagáram esetén a folyadék a pilot fúvókán keresztül áramlik be, amely megfelelő minőségű permet eredményez az indításhoz. Nagyobb teljesítmény esetén a folyadékot a pilot fúvóka és a fő folyadékáram együttesen adja [1].

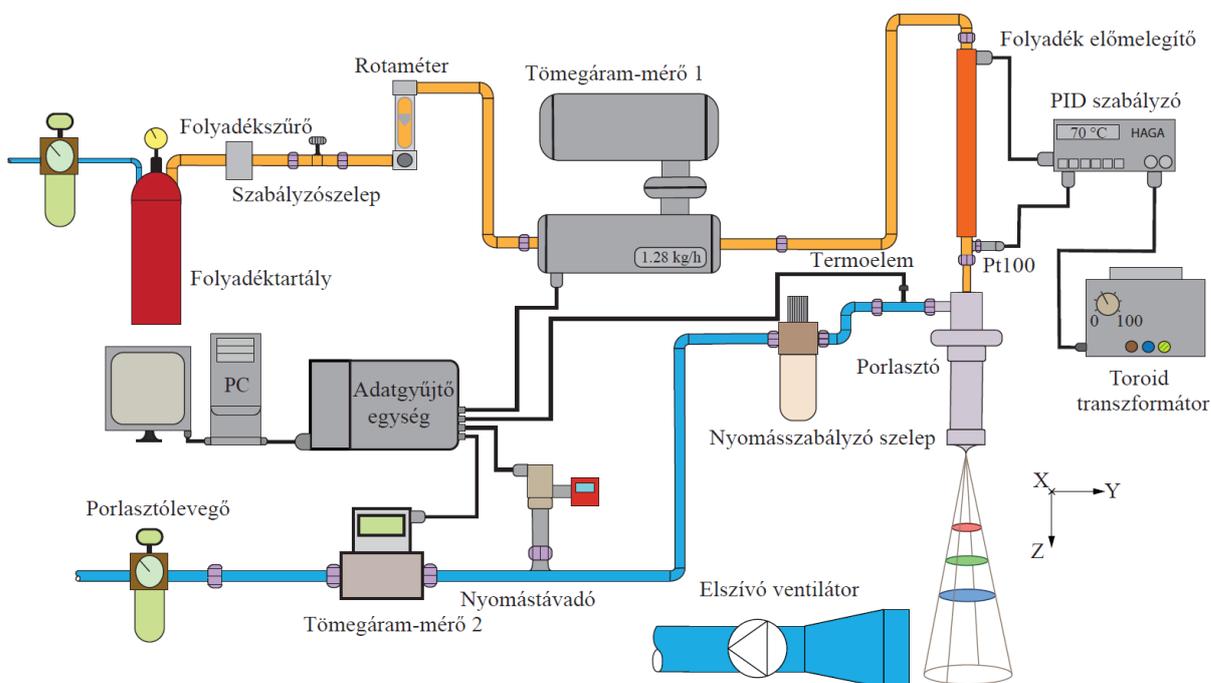
Az 14. ábra d) rajzán a simplex porlasztó, másképpen ABS látható. Legnagyobb előnye, hogy gyártása könnyebb és olcsóbb, mint más típusok esetén [1].

### 3. MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK

A dolgozatban feldolgozott adatsorok mérése a következőkben tárgyalt eszközök segítségével történt 2017-ben. Ennek részletes leírása a *Urbán és tsai* [24] cikkben megtekinthető, jelen fejezetben csak a dolgozat teljeskörű megértése szempontjából releváns mérési körülményeket mutatom be.

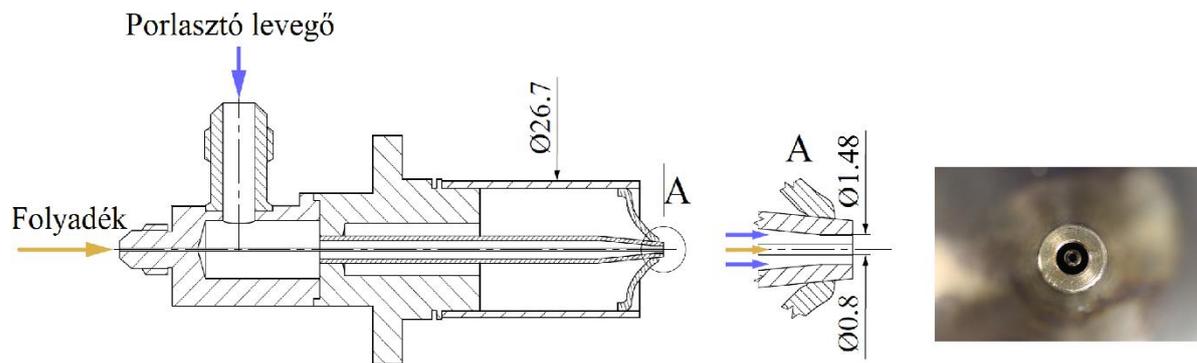
#### 3.1. A mérési elrendezés

Az elvégzett vizsgálat mérési elrendezését az 15. ábra mutatja, ahol a folyadékágot sárga, a légáramot a kék, míg az elektromos csatlakozást és adatkábeleket fekete vezeték jelölik. A rendszer segítségével szabályozható porlasztónyomású, folyadék előmelegítési hőmérsékletű, folyadék és porlasztó levegő tömegáramú állapotokat vizsgáltak a kutatók. A mérés során folyadék tömegárama egységesen 1,28 kg/h volt, a légáram 0,3 bar porlasztási túlnyomáson 1 kg/h-tól 2,4 bar porlasztási túlnyomáshoz tartozó 2,65 kg/h értékig változott.



15. ábra: Mérési elrendezés [24].

A mérés egy Capstone C-30 mikro-gázturbina égő, egyszerű sugaras, levegő segédközegetes porlasztóján végezték. A 16. ábra bal oldali képe a porlasztó keresztmetszeti rajzát, míg a jobb oldali kép a fúvókacsúcsot mutatja. A porlasztó 0,4 mm belső átmérőjű csövében áramlik a folyadék, ekörül koncentrikusan elhelyezkedő, 0,8 mm belső és 1,6 mm külső átmérőjű gyűrűs csatornában áramlik a porlasztólevegő. A két közeg a porlasztócsúcson történő kilépés után találkozik, ahol a néhány m/s-al áramló folyadék felett több száz m/s-al áramlik el a levegő. A levegő és a folyadék nagy relatív sebességkülönbsége a folyadéksugar cseppekre bomlását eredményezi.



16. ábra: A vizsgált porlasztó keresztmetszeti rajza (balra) [24] és a porlasztócsúcs (jobbra).

Az egyedi cseppek mérése Fázis Doppler Anemométerrel történt. A mérési pontokban 40.000 részecske detektálásáig folyt a mérés, kivéve néhány pontban permet peremrégiójában, ahol 15 másodperc alatt nem gyűlt össze ennyi adat. Ez utóbbi kritérium segített abban, hogy a mérés ideje ne nyúljon túl hosszúvá. A mérőtér fogat  $0,6 \times 0,072 \times 0,073$  mm volt, ahol a nagyobb méret az axiális irányt jelöli.

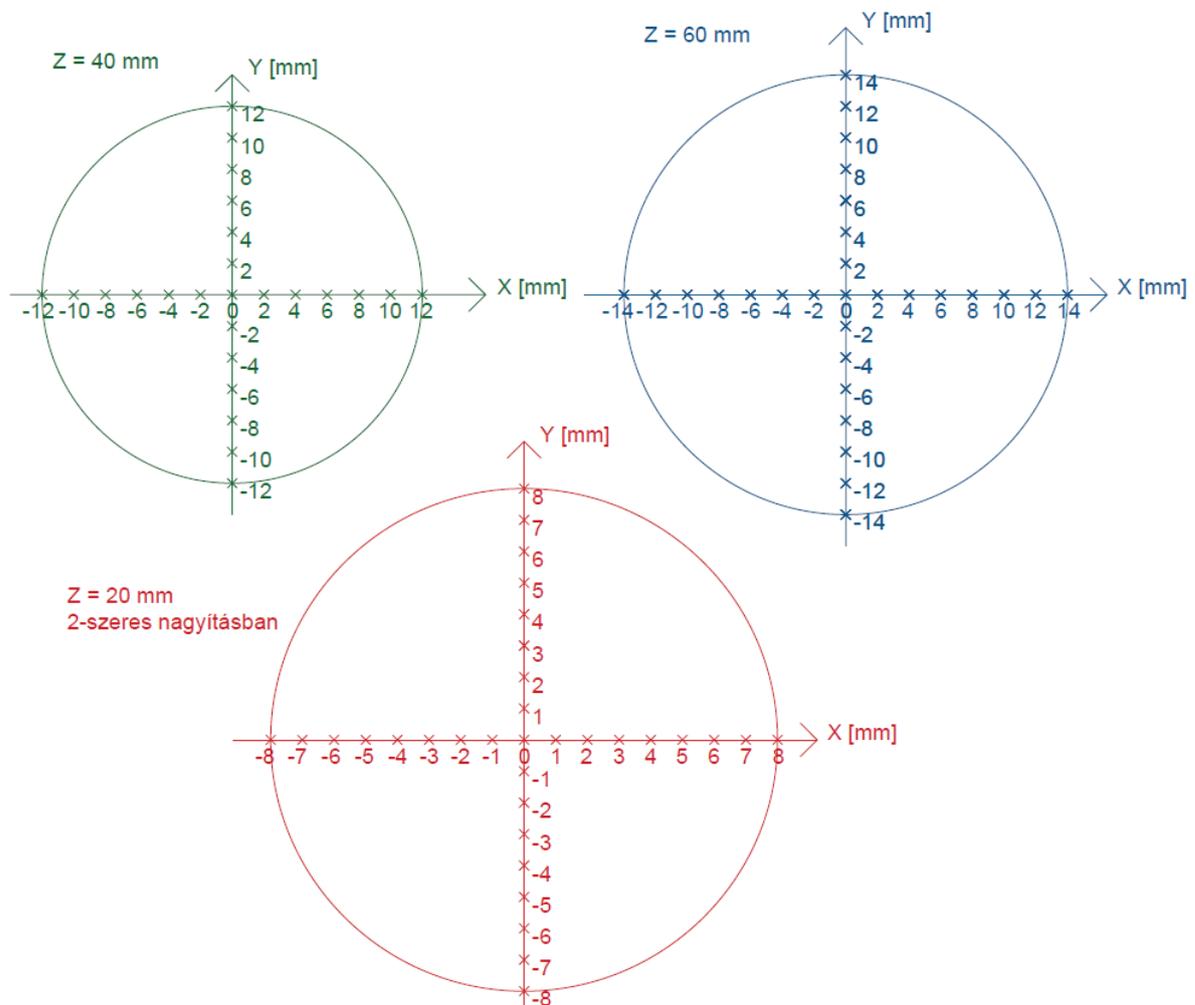
A permet vizsgálata négy folyadékot tartalmazott öt előmelegítési hőmérsékleten, valamint hat porlasztónyomáson, tehát összesen 120 konfigurációban. A folyadékokat és a mérési beállításokat részletesen a 2. táblázat tartalmazza. Víz esetén a legmagasabb előmelegítési hőmérséklet  $90\text{ °C}$  volt a forrás elkerülésének érdekében.

2. táblázat: Vizsgált anyagok és mérési beállítások.

Folyadék	D: dízelolaj 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

Egy mérési beállítás esetén az adatgyűjtés a permet 90 különböző pontjában történt. A porlasztó szimmetriatengelyén (z tengely), a porlasztócsúcstól három távolságon, két átmérő mentén rögzítették a mérési pontokat, amelyek a 17. ábrán láthatóak. A

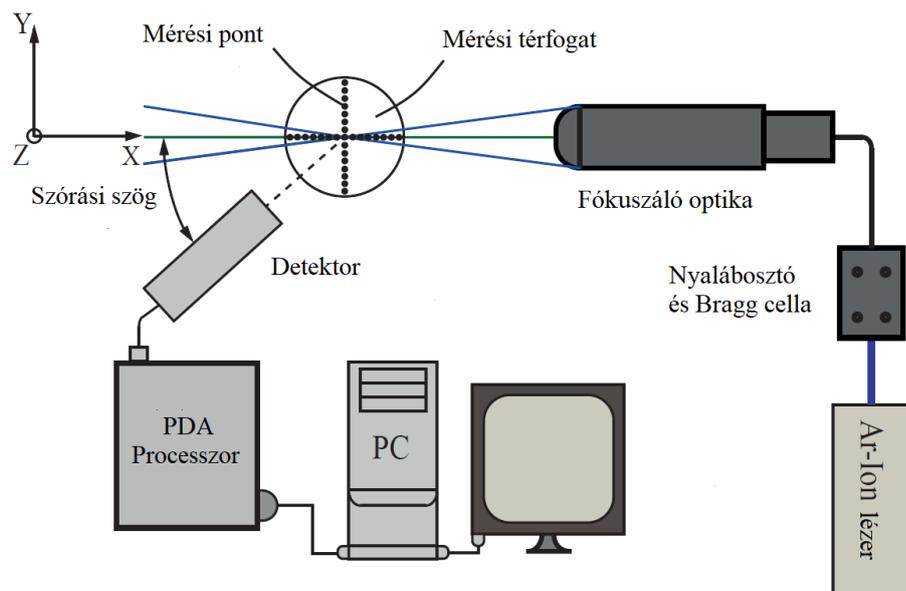
keresztmetszetek  $z = 60, 40$  és  $20$  mm távolságban fekszenek, melyeket rendre kék, zöld és piros színnel jelöltem a 15. és 17. ábrákon. A  $z = 60$  mm távolságban összesen 30 db, a  $z = 40$  mm távolságban 26 db és a  $z = 20$  mm keresztmetszeten 34 db mérési pont található. A  $z = 60$  és  $40$  mm távolságok esetén a mérési pontok egy-egy átmérő mentén 2 mm-es távolságra vannak egymástól, míg  $z = 20$  mm esetén ez 1 mm, amelyeket a kúptérfogatban terjedő permet méretei alapján jelöltek ki.



17. ábra: Mérőpontok elhelyezkedése a három kijelölt keresztmetszeten.

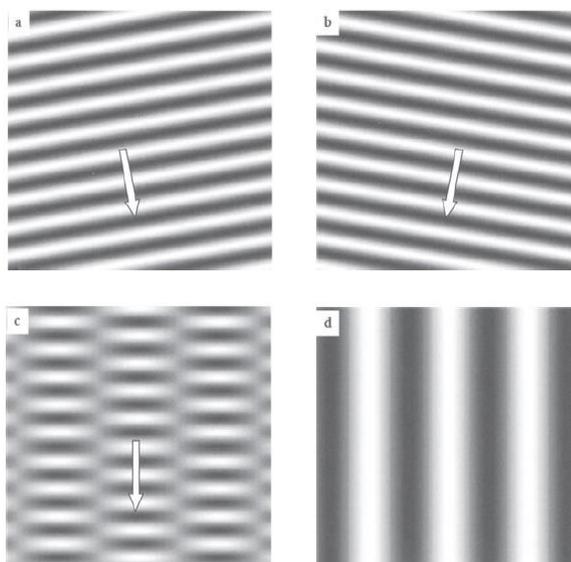
### 3.2. A Fázis Doppler Anemométer

Az előzőekben bemutatott méréssorozatot Fázis Doppler Anemométer (Phase Doppler Anemometer, röviden PDA) segítségével végezték el. A technológia optikai mérési módszeren alapul, amely segítségével egyidőben információt kaphatunk az áramlásban található részecskék méreteiről és sebességkomponenseiről is. A PDA kis, akár mikronos méretű, gömbszimmetrikus mozgó részecskék vizsgálatára alkalmas az áramlás megzavarása nélkül, ami kifejezetten fontos a permet viselkedésének vizsgálata során. Az eszköz működési elve a Doppler-effektus, miszerint a mozgó forrás által kibocsájtott hullám torzul, megváltozik annak frekvenciája. A rendszer gyakorlatilag az áramlásban áthaladó részecskék által okozott fényjel inhomogenitást detektálja [25].



18. ábra: PDA rendszer elrendezése [24].

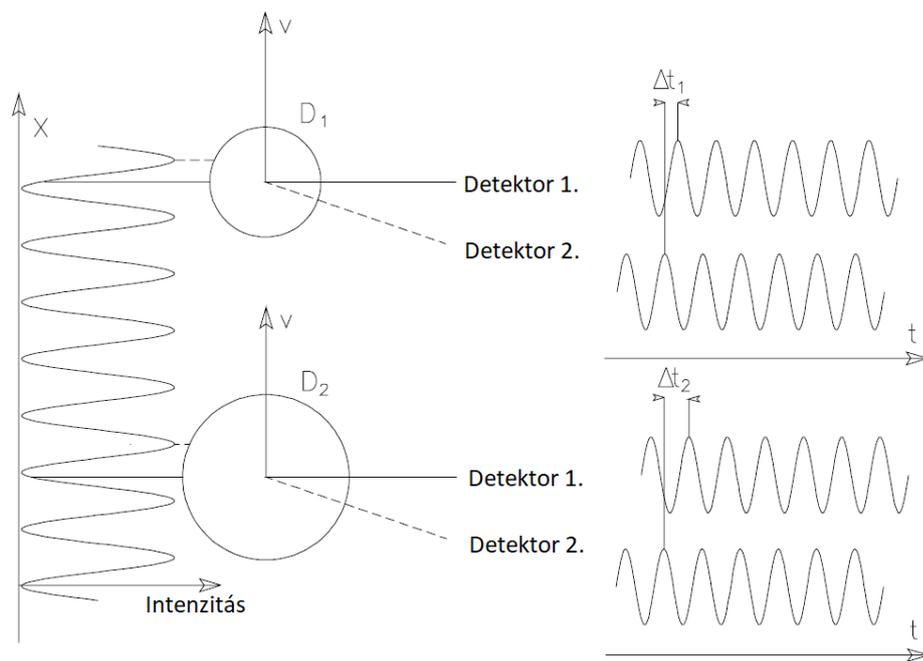
A 18. ábra a mérés során használt rendszer elemeit mutatja. Az eszköz argon-ion lézer segítségével két hullámhosszon lézernyalábot bocsát ki, amelyet a Bragg-cella segítségével, 40 MHz-el eltolva két polarizált nyalábbá alakít. A leképező optika ezek fókuszálását végzi el, így azok kereszteződésében adott intenzitású interferenciakép alakul ki, amely egyben a mérőtérfogatot alkotja.



19. ábra: Interferenciakép kialakulása [25]: a) és b) lézernyalábok, c) interferenciakép, d) interferenciakép intenzitása.

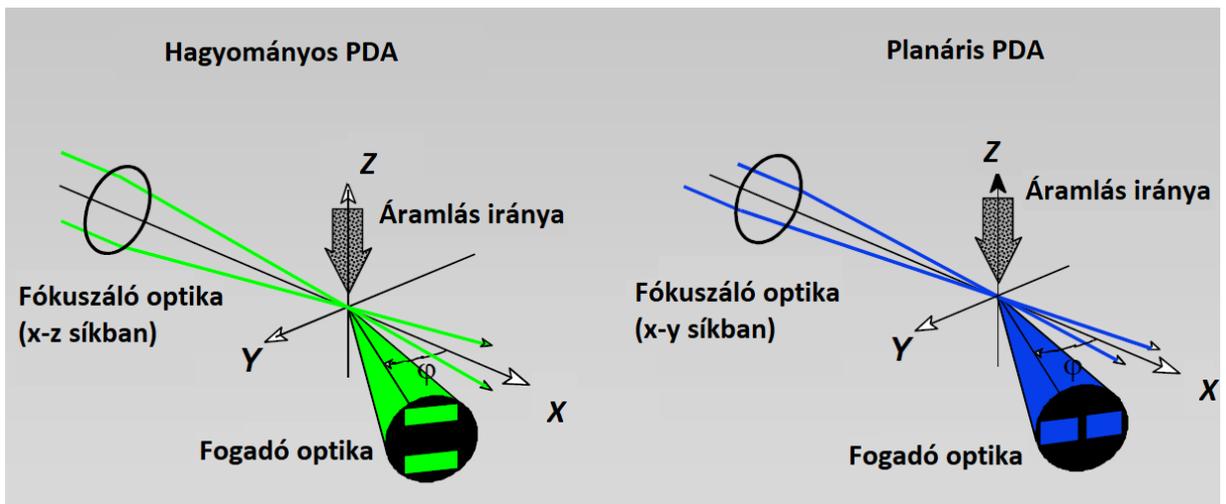
A mérőtérfogaton áthaladva a részecskék az interferenciakép, illetve a lézernyalábok intenzitásának megváltozását okozzák. A PDA rendszer detektorai érzékelik ezt a változást, így annak időtartama, illetve az interferenciakép hossza alapján számítható az azon áthaladó részecske sebessége [25].

A részecskék méretének mérése ennél komplexebb. A gömb alakú részecskék a lézernyalábokon áthaladva fénytörést okoznak. A cseppekre beeső sugárzás visszaverődésének optikai úthossza függ a fényérzékelő detektor helyzetétől. A PDA rendszer ezt a jelenséget kihasználva két fotodetektort használ, amelyek által érzékelt jelek között fáziseltolódás lehet eltérő elhelyezkedésük miatt, habár azonos Doppler-eltolódású fényhullámokat érzékelnek. Változatlan optikai paraméterek mellett a fáziseltolódás függ a részecskék méretétől, amely hatását a 20. ábra mutatja. A nagy részecskék nagyobb fáziskülönbséget okoznak a két fotodetektor által érzékelt jelek között, mint a kis részecskék. Előfordulhat, hogy a két jel közötti fáziseltolódás nagyobb, mint  $2\pi$ , ekkor mérési bizonytalanság lép fel, amelyet egy harmadik detektor beépítésével küszöbölnek ki [26]. A detektált cseppekről kapott információt jelalakítás után az adatgyűjtő rendszer tárolja.

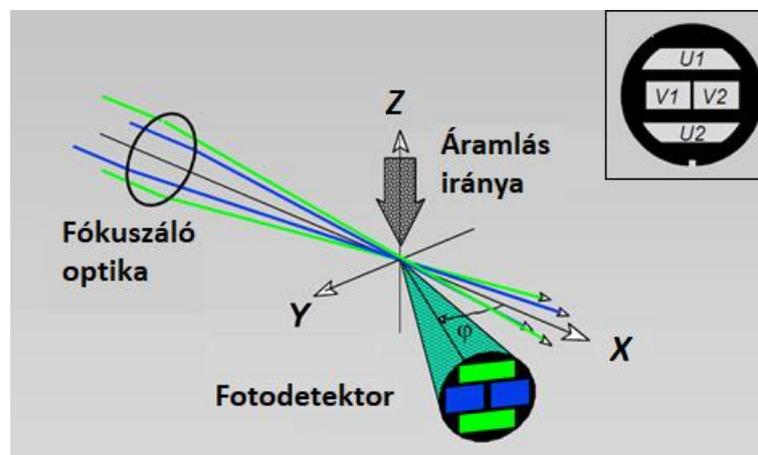


20. ábra: Detektorokkal érzékelt jel fáziseltolódása.[26].

A DualPDA rendszerrel lehetséges a részecskék többkomponensű sebességmérése. A rendszer egy hagyományos két-detektoros és egy planáris két-detektoros PDA rendszert kombinál egy fogadó optikában egyesítve, amely a 22. ábrán látható. A két PDA típus sematikus rajzát a 21. ábra mutatja. A hagyományos PDA esetén a detektorok a nyalábokra merőleges síkban helyezkednek el, míg a planáris PDA esetén azokkal párhuzamos síkban találhatóak [25].



21. ábra: Hagyományos és planáris PDA [26].



22. ábra: DualPDA elrendezés [26].

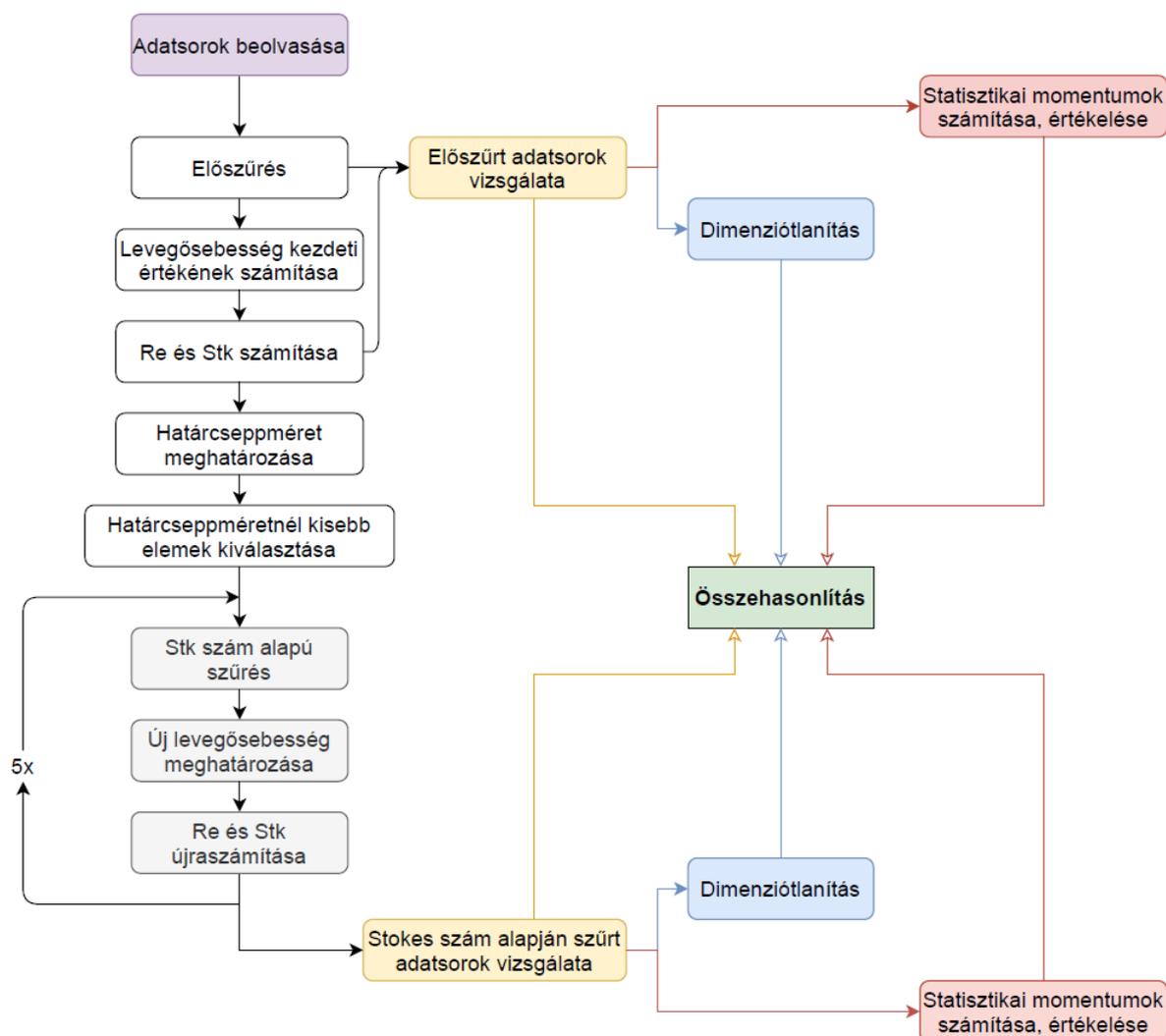
A DualPDA a részecske két vetületében a méret mérését teszi lehetővé. A két rendszer a részecske méretéről gömbszimmetrikus részecske esetén azonos eredményt ad. Előfordulhatnak viszont olyan kvantumfizikai jelenségek, amelyek a detektált cseppméretek módosulását okozhatják, ekkor a kettős redundancia segítségével kiszűrhetőek a valótlan mérési adatok, amelyeket előfordulását a validációs ráta jellemzi. A mérés egy Dantec Dynamics gyártmányú 2DFiber PDA rendszerrel történt. A mérés a z irányban történő méréshez 514,5 nm hullámhosszú zöld lézert használt, míg y irányban 488 nm hullámhosszú kék lézert használt.

## 4. ÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK

A dolgozat fő célja egy statisztikai értékelési módszer kidolgozása, amely segítségével a teljes permetet leíró jellemzőket állapíthatunk meg a porlasztás és a porlasztott anyagok jellemzőitől függetlenül. Ebben a fejezetben az eljárás módszertanát mutatom be, amely segítségével kb. 400 millió csepp adatait tartalmazó 10.800 adatsort értékeltem.

A mérési adatsorok a cseppméreteket és a sebességkomponenseket tartalmazzák minden mérési pont, beállítás és folyadék esetén. A létrejött permet cseppjei mikrométeres nagyságrendűek, amelyek  $z$  irányú méretének, illetve  $y$  és  $z$  irányú sebességkomponenseinek regisztrálása történt (a PDA tehát két sebességkomponenst és egy méretkomponenst határozott meg).

Mivel a különböző adatsorokban regisztrált cseppek azonos porlasztási mechanizmusok során képződnek, ezért lehetőség van az adatsorok statisztikai módszerek segítségével történő összehasonlítására. Ebben a dolgozatban a cseppátmérő és az axiális sebesség kapcsolatát vizsgáltam. A számításokat MatLab szoftverrel készítettem, a 23. ábra mutatja az általános algoritmus lépéseit.



23. ábra: A statisztikai vizsgálat folyamata.

A statisztikai vizsgálat során a permet áramláskövető cseppeinek szelektálása történt, amelyek megfelelő pontossággal írják le a permetképződés folyamatait. A cseppek szelektálása Stokes szám alapú szűréssel, iterációs folyamaton keresztül történt, amely eredményeként határcseppméreteket határoztam meg. Az adatsorokban az eljárás után megmaradt cseppek adataiból képzett Reynolds szám adatsorokat is vizsgáltam. Az porlasztott cseppek áramlása akkor hasonló, ha hasonló geometriai viszonyokra a cseppekhez tartozó Reynolds szám azonos, azaz a cseppek áramlási viszonyait hasonlíthatjuk össze. Az elvégzett számítások során egy paramétert változtathatunk, amely a  $Stk$  alapú szűréshez szükséges érték, így a szakirodalomban meghatározott értéken kívül  $Stk < 0,01$  és  $1$  értékek esetén is elvégeztem a számításokat, és megvizsgáltam a feltétel változásának határcseppméretekre gyakorolt hatását.

Stokes szám alapú szűrés után a cseppméret, axiális sebesség, Stokes szám és Reynolds szám adatsorok eloszlásait vizsgáltam. Az eloszlások hasonlóságának megfigyeléséhez dimenziótlanítási transzformációt végeztem el az eloszlásokon, a hasonlósági tulajdonságok számszerűsítéséhez pedig statisztikai momentumokat használtam. Az eloszlások alakjának jellemzéséhez az átlag, szórás, ferdeség és kurtózis értékeket használtam. A dimenziótlanítási folyamatot és a statisztikai momentumok számítását az eredeti és a  $Stk$  alapján szűrt adatsorok esetén is elvégeztem, így megfigyelhettem a szűrés hatását.

#### 4.1. Adatsorok előszűrése

Az adatsorok elemzése előtt az adatsorok előkészítését végeztem el, amely két lépésből állt. A PDA rendszerrel történő mérés során a cseppek detektálása argon-ion lézerrel történt, amely zöld lézerfény hullámhossza  $514,5$  nm. Ennek ellenére az adathalmazokban szerepelhetnek olyan cseppek, amelyek átmérője kisebb ennél, habár a rendszer ezek detektálására fizikailag alkalmatlan. Ezek a cseppméretek a rendszer mérési hibája miatt keletkezhetnek [27]. Első lépésként ezeket a cseppeket távolítottam el az adatsorokból.

A cseppméret adatsorok továbbá tartalmazhatnak olyan értékeket, amelyek jelentősen eltérhetnek a várható értéknél, kilógnak az adathalmazból. Ezek az adathalmaz kilógó, „outlier” elemei. Ezek az elemeket általában alacsony valószínűségű folyamatokból származnak, így előfordulási gyakoriságuk is alacsony. Habár egy adathalmaz annak varianciája miatt tartalmazhat kiugró értékeket, ezek az elemek torzíthatják a statisztikai jellemzőket vagy a modellillesztés eredményeit, továbbá nem kellően reprezentatívak a permet egésze szempontjából. Ennek kiküszöbölése érdekében érdemes megvizsgálni az adatsort, és eltávolítani az elemeket, illetve gyakori előfordulásuk esetén ellenőrizni, hogy mérési hiba okozza-e a megjelenésüket [28].

A számítások során a MatLab beépített, alapértelmezett „outlier” szűrés függvényét használtam [29], amely szerint azok az elemek elfogadhatóak, amelyek a következő feltételnek megfelelnek:

$$Me(X) - MAD(X) \cdot 3 < X < Me(X) + MAD(X) \cdot 3, \quad (20)$$

ahol:

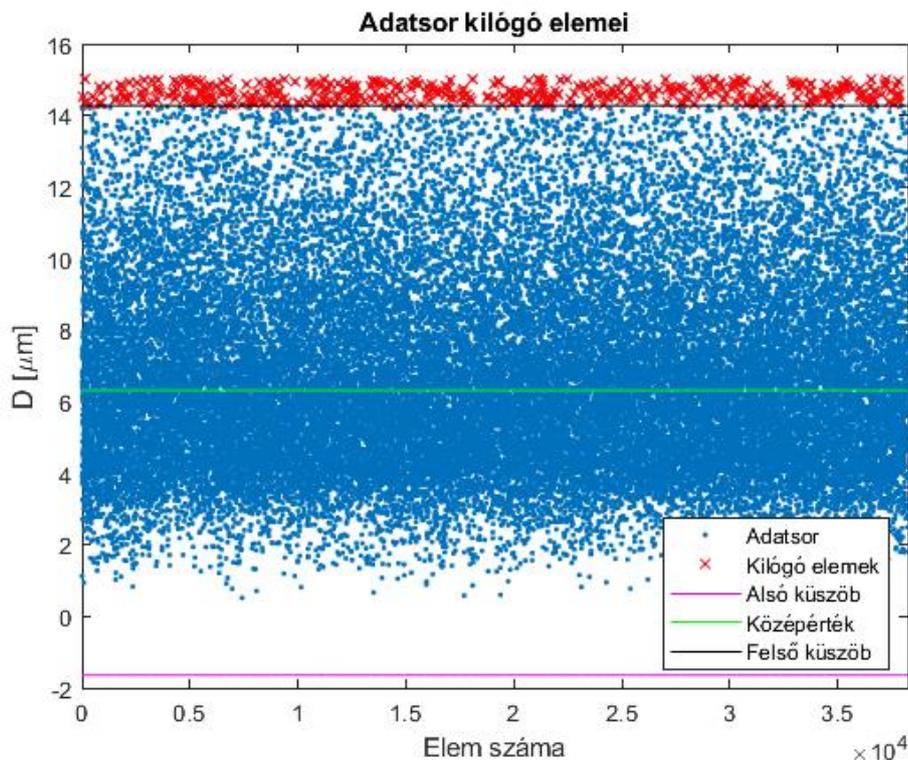
- $Me$  a medián: egy adatsor sorba rendezése után az adatsor azon középértéke, amelynél az adatsor elemeinek fele nagyobb/egyenlő, illetve másik fele kisebb/egyenlő,
- $MAD$  (median absolute deviation, vagyis medián abszolút eltérés), az adatok az adatsor mediánjától vett abszolút eltéréseinek mediánja. Ez a következő egyenlettel számítható:

$$MAD(X) = \frac{-1}{\sqrt{2} \cdot \text{erfcinv}\left(\frac{3}{2}\right)} \cdot Me(|X - Me(X)|) \quad (21)$$

- és  $\text{erfcinv}(x)$  az inverz komplementer hibafüggvény.

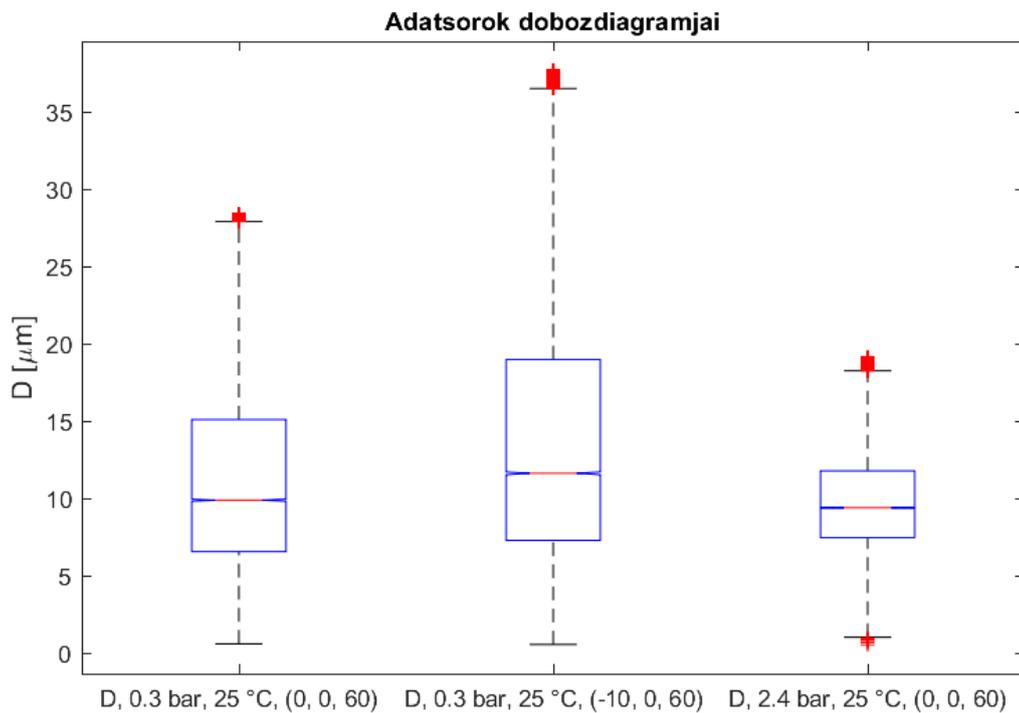
A statisztikában az  $MAD$  módszer kvantitatív adatok egyváltozós mintájának variabilitását leíró megbízható mérőszáma. A szórás az adatok átlagtól való eltérések négyzetösszege, így a nagy eltérések erősen befolyásolhatják az értékét. Ezzel szemben az  $MAD$  módszer érzéketlenebb az adathalmaz kiugró értékeivel szemben, így jobban jellemzi az aszimmetrikus eloszlásokat.

A 24. ábra példaként a dízelolaj, 1.2 barg nyomáson és 25 °C hőmérsékleten, a 12. mérési pontban regisztrált cseppméret adatsor kilógó elem szűrésének eredményét mutatja. Az ábrán az alsó küszöb jelöli a  $Me(D) - 3 \cdot MAD(D)$  értéket, a felső küszöb a  $Me(D) + 3 \cdot MAD(D)$  értéket, a középérték pedig az  $Me(D)$ . Látható, hogy ebben az esetben a kilógó elemek a felső határon felül jelentkeznek, míg az alsó határ alatt nincs ilyen elem, ami a cseppméreteloszlások jobbra elnyúló alakja miatt jellemző.



24. ábra: Dízelolaj, 1.2 barg, 25 °C, (8, 0, 60) koordinátájú adatsor kilógó elem szűrésének eredménye.

A kilógó elemek ábrázolásának egy egyszerűbb módja a dobozdiagram készítése, ahol nem ábrázolunk minden elemet, így az jóval átláthatóbb és megfelelő az adatsorok összehasonlítására. A dobozdiagramon, amely a 25. ábrán látható, a téglalap tartalmazza az adatsor első és harmadik kvantilise közé eső elemeket, a medián értéket pedig az abban elhelyezkedő piros vonal jelzi. A felső és az alsó küszöbön belül eső elemeket a fekete szaggatott vonal jelzi, míg a kilógó elemeket a piros jelölők mutatják. A 25. ábra néhány adatsor dobozdiagramját mutatja, amelyeken szintén a felső küszöbön túl kilógó elemeket láthatóak, de előfordulhatnak adatsorok, amelyekben alul kilógó elemek is találhatóak, amennyiben az alsó határ 514,5 nm-nél nagyobb számértékű, ami kifejezetten az alacsony porlasztónyomások esetén merül fel.



25. ábra: Különböző cseppméret adatsorok dobozdiagramjai.

Az adatsorok az előszűrés előtt 40.000 regisztrált cseppet tartalmaztak, kivéve néhány adatsort a peremrégióban. Az előszűrés után a legtöbb adatsor elemszáma 5-10%-kal csökkent. Egyes esetekben nagyobb szelektálás is történt, ami néhány adatsor irregularitásának és alacsony elemszámának köszönhető.

#### 4.2. Stokes szám alapú szűrés

Az előszűrések után a megfelelő cseppek méret és axiális sebességkomponens adataiból történő Stokes szám alapú szűrés és a Reynolds számok számítása történt. A Stokes szám számítása a következő képlettel történt:

$$\text{Stk} = \frac{|\bar{w}-w|\cdot\rho_f\cdot D^2}{18\cdot\eta_l\cdot l} \quad (22)$$

ahol  $\eta$  a porlasztólevegő dinamikai viszkozitása, értéke  $18,691\cdot 10^{-6}$  Pa·s 25 °C-on.

3. táblázat: Vizsgált anyagok sűrűsége különböző előmelegítési hőmérsékleten [30].

	Előmelegítési hőmérséklet [°C]	25	40	55	70	100 (W: 90)
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	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 karakterisztikus hossz az a méret, amely jellemzi az áramlásra jellemző hossz skálát. A számítások során a karakterisztikus hossz értéke azon szabadsugárra jellemző távolság, amelynél már megfigyelhető a sugár sebességeloszlásának ön hasonlósága. Ennek értéke a következő:

$$l = 30 \cdot d_0 = 30 \cdot 0,4 \text{ mm} = 12 \text{ mm} \quad (23)$$

ahol  $d_0$  a folyadéksugár jellemző mérete, jelen esetben a fúvókanyílás átmérője 0,4 mm.

A Reynolds szám számítása a következő egyenlettel történt:

$$\text{Re}_p = \frac{|\bar{w} - w| \cdot D}{\nu_f} \quad (24)$$

4. táblázat: Vizsgált anyagok kinematikai viszkozitása különböző előmelegítési hőmérsékleten [30].

	Előmelegítési hőmérséklet [°C]	25	40	55	70	100 (W: 90)
$\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]	D	2,53	1,72	1,32	1,02	0,74
	LHO	12,53	7,31	4,34	3,06	1,79
	RO	44,24	25,21	15,18	8,81	4,73
	W	0,89	0,66	0,51	0,41	0,33

A négy vizsgált anyag kinematikai viszkozitása az előmelegítés hatására két nagyságrendet átfog, amelyeket a 4. táblázat tartalmaz. Ennek köszönhetően a mérés értékelése során az anyagjellemzők széles skáláján tudunk következtetéseket levonni a permet jellemzőről.

Annak érdekében, hogy a permetre vonatkozóan következtetéseket vonhassuk le, az áramlásokövető cseppek vizsgálatára van szükség. Ehhez az áramlásokövető tulajdonság feltételeit kielégítő cseppek kiválasztását kell elvégezni, ami nem triviális feladat. A szűrés célja határcseppméret meghatározása, illetve az annál kisebb méretű cseppek osztályának kiválasztása, amelyek jól jellemzik az áramlást.

A szakirodalomban az áramlásokövető viselkedés feltételét a Stokes szám segítségével adják meg, amely szerint áramlásokövető részecskéket alacsony Stokes szám,  $\text{Stk} <$

0,1 jellemez. Ez a szűrés viszont nem küszöböli ki a nagyméretű cseppek hatását, amelyek, habár a feltételnek megfelelnek, annak hiperbolikus sebesség-cseppméret kapcsolata miatt a levegősebességet megközelítő sebességgel mozognak, mégis torzítják az eredményt. Ennek oka, hogy hasonlóan nagy mérettel rendelkező csepposztályok sebességeloszlásait magasabbak értékek jellemzik, ezek a cseppek pedig nagyobb méretű csepposztályok méreteloszlásainak alsó tartományából származnak, így fizikailag helytelen az áramláskövető cseppek közé besorolásuk. Ebből következik, hogy feltételes szűrést kell alkalmaznunk, amivel a  $Stk = 0,1$  által meghatározott határcseppméret alatti csepposztályt kell kiválasztunk.

A  $Stk$  alapú szűrés során iterációt kellett elvégezni. A  $Stk$  és  $Re$  esetén egyaránt szükség van a relatív axiális sebesség ( $w_R$ ) értékre, mivel a cseppek a levegővel együtt mozognak, így az abszolút vagy mért axiális sebességgel képzett dimenziótlan számok nem a cseppek viselkedését jellemeznék, hanem az együtt mozgó rendszerét. A relatív axiális sebesség a cseppek levegősebességhez viszonyított relatív értéke, amely viszont ismeretlen. Az iteráció a következő lépésekből áll.

0. Kezdeti értéket kijelölése, az összes csepp átlagsebességének számítása. Ez az átlagos levegősebesség közelítő értéke. Reynolds (24) és Stokes (22) számok számítása.
1. Cseppek sorba rendezése méret alapján. Az első  $Stk > 0,1$  értékkel rendelkező csepp méretének rögzítése, amely a határcseppméret.
2. Adatsorok szűrése  $Stk < 0,1$  értékkel rendelkező cseppekre.
3. Adatsorok határcseppméretet meghaladó cseppjeinek eltávolítása.
4. Feltételnek megfelelő cseppek átlagsebességének meghatározása, amely a következő lépés levegősebességének felel meg.
5. Reynolds és Stokes számok újraszámítása az új levegősebesség értékével.

Az 2–5. műveleteket öt iterációs lépésben végeztem el. Az iteráció addig folyt, míg az átlagos légsebesség változása nem eredményezett  $Stk > 0,1$  értékű cseppeket az újraszámítás során. Az iteráció a második/harmadik lépésben szinte minden adatsor esetén befejeződött, kivéve az erősen irregularitást mutató adatsorok esetén. A szűrés az adatok átlagosan 80-90%-át távolította el az adatsorokból.

Eredményként nem csak az áramláskövető cseppek kiszűrése történt, hanem az azokra jellemző Reynolds számok meghatározása, illetve az átlagos levegősebesség számítása is. A mérési pontokban regisztrált cseppek méreteloszlását, axiális sebességeloszlását, az átlagos levegősebességet, Stokes és Reynolds szám eloszlásait tudtam vizsgálni.

#### *4.3. Eloszlások összehasonlítása dimenziótlanítással és statisztikai momentumok segítségével*

A dolgozatban a vizsgált mennyiségek, jellemzők eloszlásai is bemutatásra kerülnek. A valószínűségi változókat és eloszlásukat statisztikai jellemzőkkel írják le, például az átlag, medián, szórás és szórásnégyzet. Kétparaméteres, egyszerűbb eloszlásfüggvényekkel jellemezhető eloszlások esetén az átlag és szórás értékeket használják,

viszont bonyolultabb, többparaméteres eloszlások esetén, illetve eloszlások részletes összehasonlítása esetén több ilyen statisztikai jellemző bemutatására is szükség lehet [31].

Először az eloszlások hasonlóságát vizsgáltam dimenziótlanítási módszerrel. Az eloszlásokat a következő egyenlettel transzformáltam, amelyben csak az átlag és szórás értékek meghatározása szükséges, ezért eredményeképpen a transzformált eloszlásokat egyszerű módon, lineáris átalakítással hasonlíthattam össze. A transzformált valószínűségi változók új eloszlásának zérus középpértékkel, illetve egységnyi szórással rendelkeznek, így dimenziótlan eloszlásokat adnak [32,33].

$$X_{tr} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (25)$$

ahol:

- $X_{tr}$  a transzformált, dimenziótlan valószínűségi változó,
- $X$  a valószínűségi változó,
- $\mu$  az  $X$  valószínűségi változó átlaga,
- $\sigma$  az  $X$  valószínűségi változó szórása.

Az eloszlások hasonlóságának megfigyelése mellett, ezeknek a hasonlóságoknak vagy eltéréseknek a számszerűsítésére is szükség van. Jelen esetben a dolgozatban vizsgált eloszlásoknak nem csak átlag és szórás értéke változhat, hanem az alakjuk is. Emiatt több leíró jellemzőre van szükségünk, amelyeket előállításuk statisztikában általában a momentumok segítségével történik [32].

Bármely  $X$  valószínűségi változó esetén az  $X^k$  változó várható értékét  $k$ -adik vagy  $k$ -adrendű momentumának nevezzük, azaz [31]:

$$M_k = M(X^k) = \sum_i x_i^k \cdot P(X = x_i) \quad (k = 1, 2 \dots) \quad (26)$$

ahol:

- $M_k$  a  $k$ -adik momentum,
- $M(X)$  a várható érték,
- $x_i$ , az  $X$  valószínűségi változó egy értéke,
- $P(X = x_i)$  pedig  $x_i$  valószínűsége.

Abban az esetben, ha  $X$  változó egy adott értéktől történő eltéréseinek  $k$ -adik momentumát vizsgáljuk, és ez az érték pont az  $X$  középpértéke, akkor  $X$   $k$ -adik centrális momentumáról beszélünk, ami [31]:

$$\mu_k = M((X - M(X))^k) \quad (27)$$

Ebből következik, hogy  $M(X)$ , azaz a várható érték az  $X$  valószínűségi változó elsőrendű momentuma, másrészt annak elsőrendű centrális momentuma zérus. A második centrális momentum a szórásnégyzettel egyenlő. Az eloszlásokat jellemző statisztikai leíró jellemzők, így a következők, amelyek számítási képletei az 5. táblázatban találhatóak:

- átlag vagy középpérték, amely az elsőrendű momentum,
- szórás, amely a másodrendű centrális momentum négyzetgyöke,
- ferdeség, amely a harmadrendű centrális momentum,
- illetve a kurtózis, amely a negyedrendű centrális momentum.

5. táblázat: Elemzés során használt statisztikai jellemzők számítási módjai.

Átlag [34]	$\mu = M(X) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$
Szórás[35]	$\sigma = S(X) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n  x_i - \mu ^2}$
Ferdeség[36]	$\gamma_1 = \frac{M((X - M(X))^3)}{S^3(X)} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}\right)^3}$
Kurtózis[37]	$\gamma_2 = \frac{M((X - M(X))^4)}{S^4(X)} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2\right)^2}$

A módusz az  $X$  valószínűségi változó azon  $x_i$  értéke, amelyhez tartozó  $P(X = x_i)$  valószínűség érték a legnagyobb, azaz  $x_i$  elem a legvalószínűbb. Abban az esetben, ha egy eloszlásnak egy csúcsa van, akkor annak egy módusza van, az eloszlás unimodális [31].

A ferdeség megmutatja, hogy a szimmetrikus eloszlástól mennyire eltérő egy eloszlás, számszerűsíti annak ferdeségét vagy elnyúltságát. Abban az esetben, ha:

- $\gamma_1 = 0$ , akkor az eloszlás szimmetrikus,
- $\gamma_1 < 0$ , akkor az eloszlás a módusztól balra nyúlik el,
- $\gamma_1 > 0$ , akkor az eloszlás a módusztól jobbra nyúlik el.

Egy eloszlás kurtózis értéke (másnéven lapultság vagy csúcsosság) megmutatja, hogy egy eloszlás mennyivel csúcsosabb/lapultabb az azzal megegyező átlaggal és szórással rendelkező normális eloszláshoz képest, és számszerűsíti azt. Az általam használt MatLab beépített kurtosis [37] függvény esetén, ha:

- $\gamma_2 = 3$ , akkor az eloszlás csúcsossága egyenlő,
- $\gamma_2 < 3$ , akkor az eloszlás lapultabb,
- $\gamma_2 > 3$ , akkor az eloszlás csúcsosabb,

a vele azonos átlaggal és szórással rendelkező normális eloszláshoz képest. Az adat-sorok eredeti, illetve szűrés utáni alakjainak összehasonlítása és számszerűsítése ezek-  
kel az értékekkel történt. A négy statisztikai momentum mellett vizsgáltam a relatív  
szórás értéket is, amely a szórás és az átlag hányadosa.

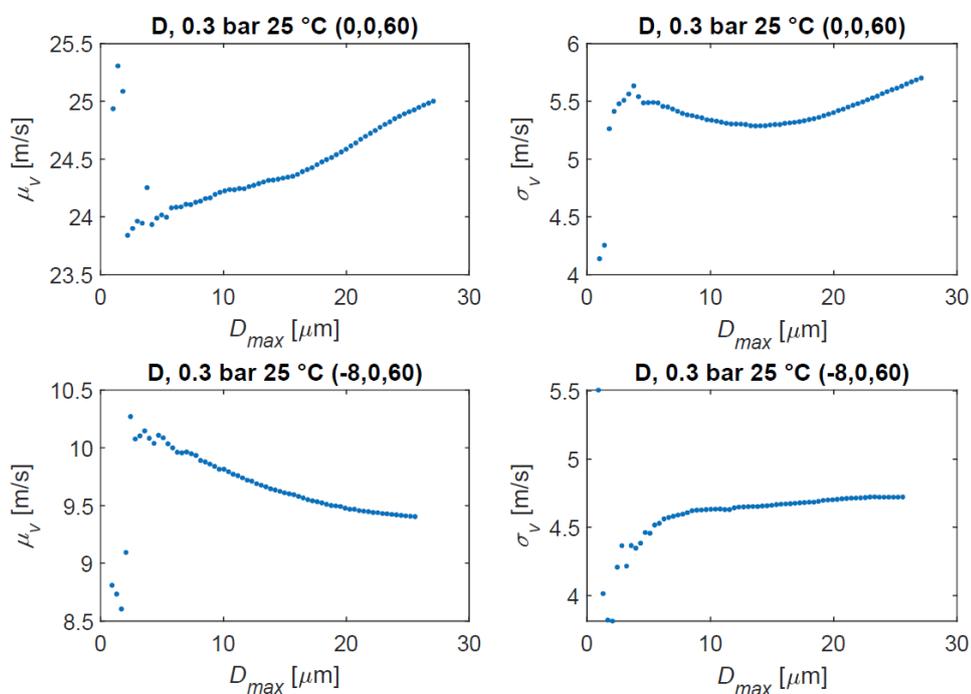
$$\sigma_{R,X} = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (28)$$

## 5. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Az értékelés során azt tapasztaltam, hogy a négy folyadék öt előmelegítési hőmérséklete esetén a megfigyelt jellemzők statisztikai eloszlásai hasonlóak a porlasztási körülmények függvényében, így a számszerűsített értékek szintén hasonló tendenciát mutatnak. Ebből kifolyólag példaként a dízelolaj mérési eredményeit értékelem, az eloszlások bemutatása 25 °C hőmérsékleten történik, a statisztikai momentumok esetén pedig az átlagos értékek segítségével. Az  $x$  és  $y$  tengely mentén a tengelyszimmetria miatt szintén hasonló értékeket kaptam, így az eredményeket az  $x$  tengely mérőpontjaiban ismertetem.

### 5.1. Határcseppméret

A 4.2 fejezetben bemutatott algoritmussal a mérési adatsorok esetén a határcseppméretet állapítottam meg, azt feltételezve, hogy ezen méret alatti cseppek áramláskövető feltételnek megfelelően jellemzik az gáz fázis áramlását. Az adatsorok cseppméretosztályait jellemző sebességek átlagos értékeit és szórásait egy permetszéli és egy tengelyen fekvő mérőpontban a 26. ábra mutatja. A cseppméretosztályok alsó határa az adatsor minimális cseppmérete, a felső határ pedig a maximum értékéig egyenletesen növekednek. Azt tapasztaljuk, hogy mind az átlag és szórás értékek egy az adatsorra jellemző cseppméret felett valamilyen tendenciát követnek, ez a cseppméret az átlagos sebességek esetén a szélsőérték helye. Látható, hogy az átlagsebesség növekvő cseppméretek esetén egyre eltér a szélsőértéktől.

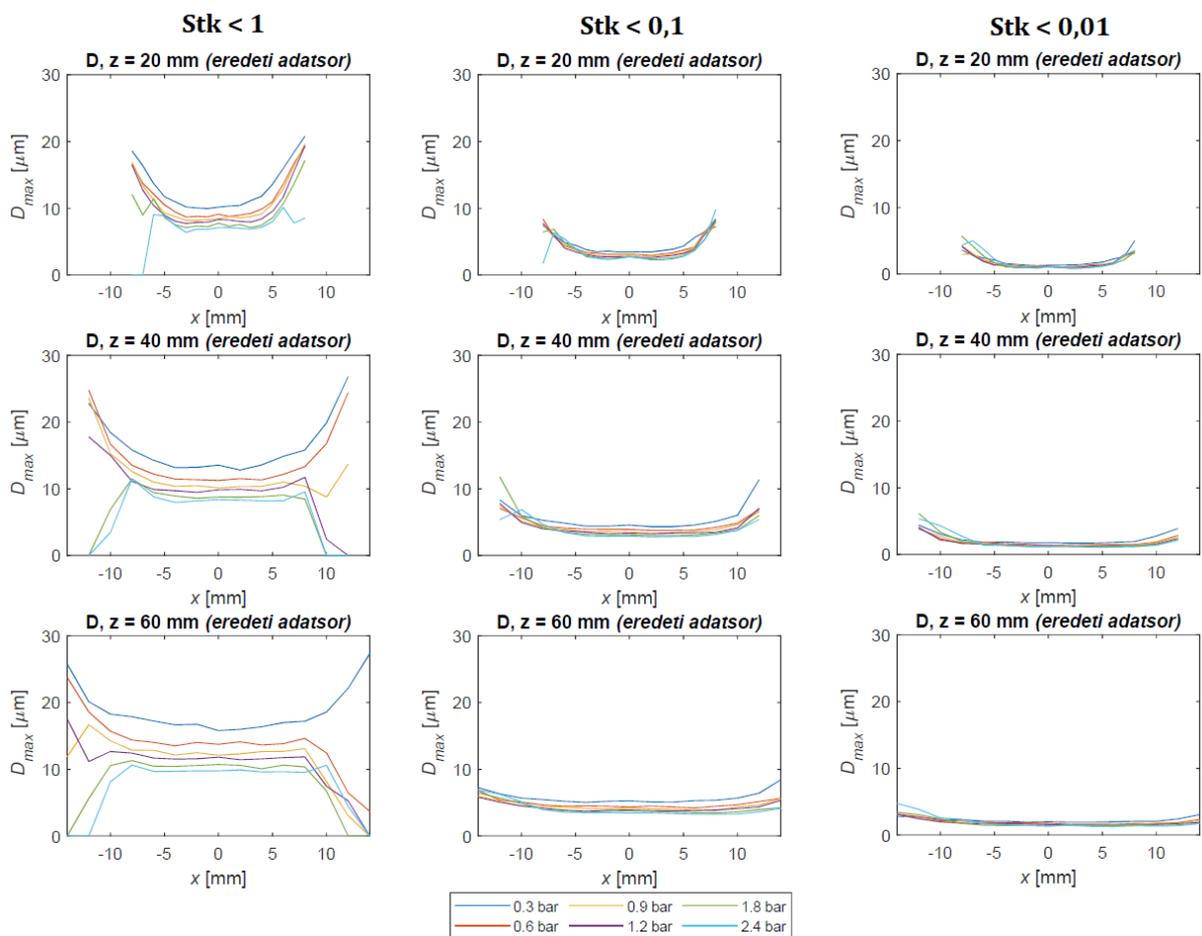


26. ábra: Adatsorok cseppméret-osztályait jellemző sebességek átlagos értéke (balra) és szórása (jobbra).

Jedelsky & Jicha [38] a cseppméretosztályok Stokes szám kapcsolatát vizsgálta különböző porlasztási paraméterek esetén. Eredményeik alapján az  $Stk < 0,1$  feltételnek megfelelő cseppek határmérete 5-10  $\mu\text{m}$  közé esett.

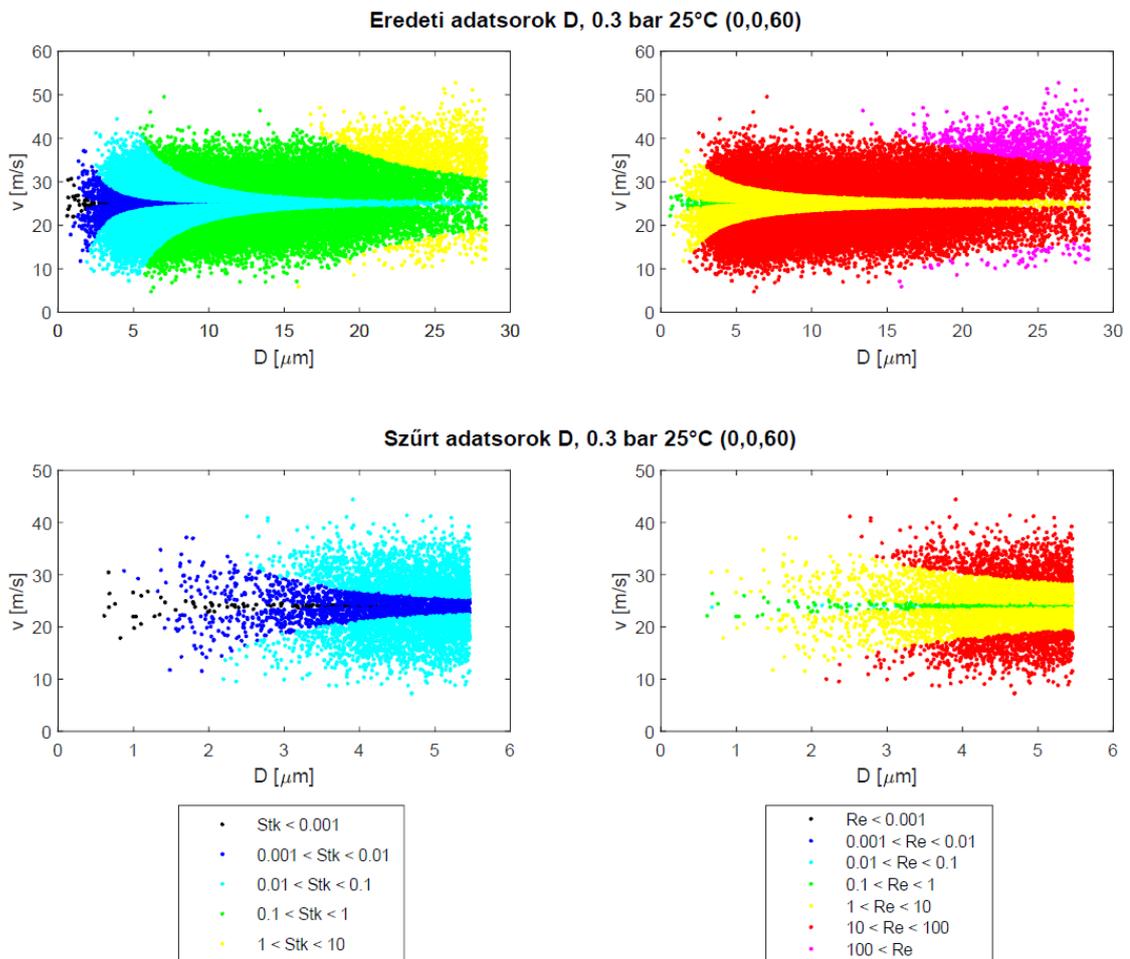
A határcseppméreteket a  $Stk$  alapú szűréssel három érték (1; 0,1; 0,01) esetén számítottam, amelyek eredményei a 27. ábrán láthatóak. Az előmelegítési hőmérséklet hatása elenyésző, így az ábrán az öt előmelegítési hőmérséklet esetén számított átlagos határcseppméret látható a porlasztónyomás függvényében. A határcseppméretekre a következő megállapításokat tettem:

- A  $Stk$  feltétel értékének csökkenésével a határcseppméretek értéke csökken.
- A porlasztónyomás növekedésével csökken a határcseppméret, habár a feltétel értékének csökkenésével a határcseppméret görbék közötti különbség is csökken.
- A permet magjában az értékek közel állandóak, míg a permet szélén növekednek.
- A  $z$  fúvókatávolság növekedésével a határcseppméret növekedett.



27. ábra: Határcseppméretek  $Stk < 1$ ; 0,1; 0,01 szűrés esetén.

Az  $Stk < 0,1$  szűrés esetén számított határcseppméretek közelítik a 26. ábra esetén bemutatott átlagsebesség szélsőérték helyét. A  $Stk < 0,1$  szűréssel meghatározott határcseppméretek a [https://docs.google.com/spreadsheets/d/18yL\\_0URSi6hQnT-ZOvD1YT3XYuo7SelZ/edit#gid=2072255226](https://docs.google.com/spreadsheets/d/18yL_0URSi6hQnT-ZOvD1YT3XYuo7SelZ/edit#gid=2072255226) linken megtalálhatóak minden folyadék és porlasztási körülmény esetén. A szűrés hatását az adatsorokra példaként a 28. ábrán látható sebesség-méret térkép mutatja a cseppeket  $Re$  és  $Stk$  alapján kategorizálva.



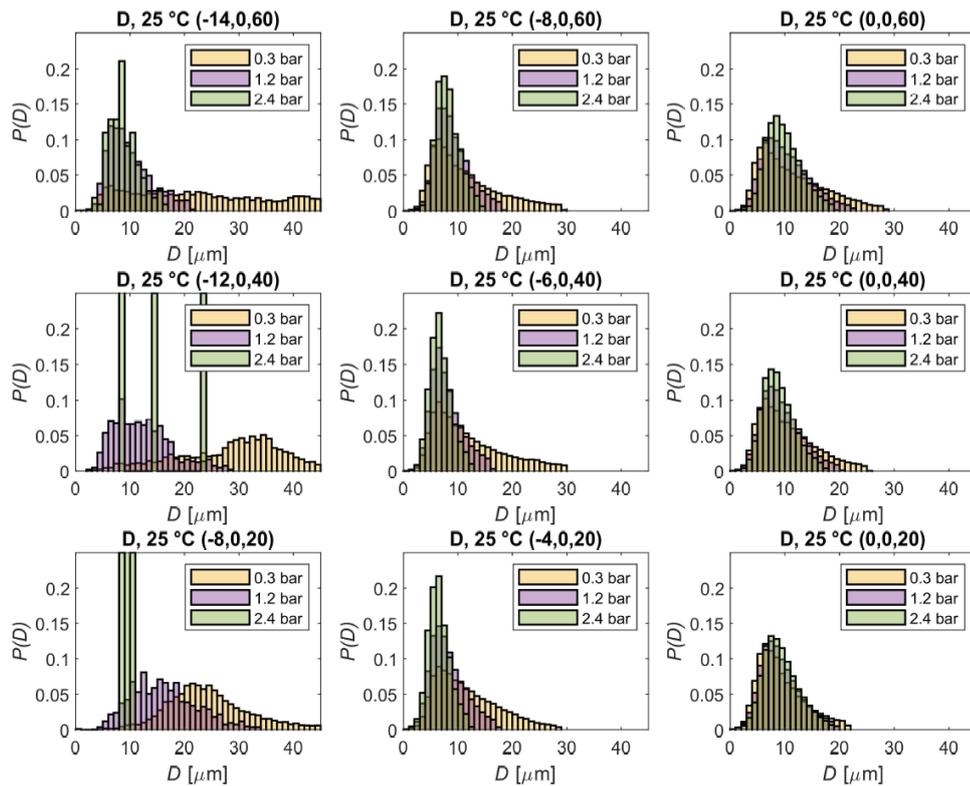
28. ábra: Dízelolaj 0,3 bar 25 °C (0,0,60) adatsor sebesség-méret térképei.

## 5.2. Cseppméret eloszlások

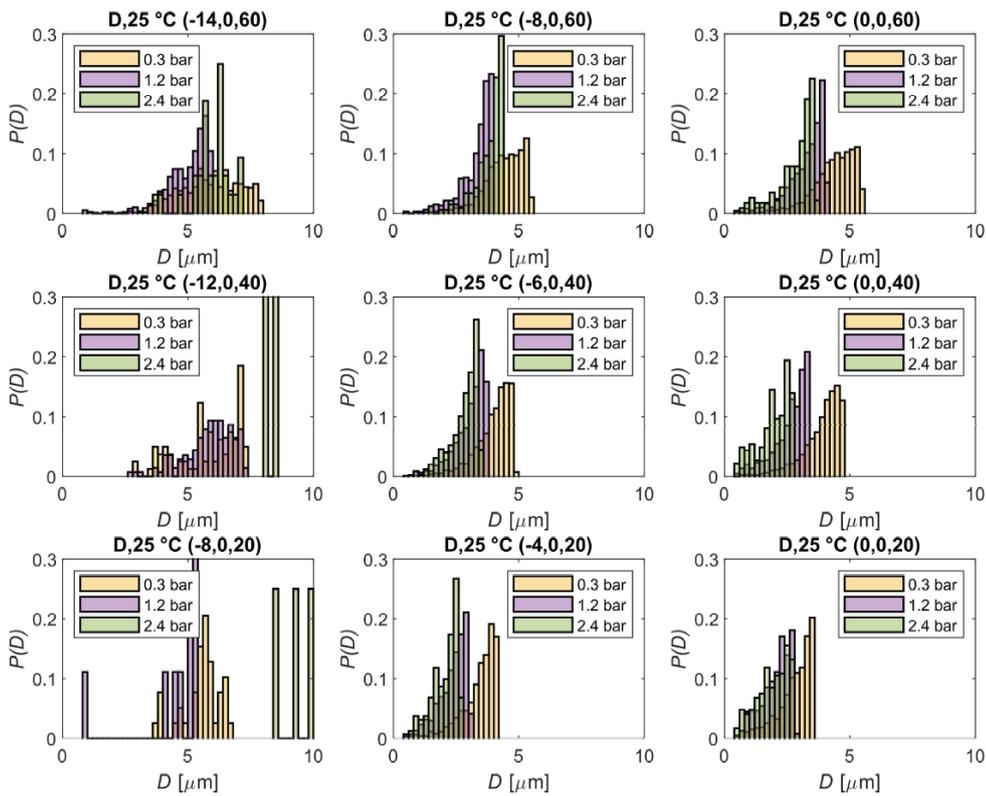
Urbán és tsai. [24] korábbiakban a cseppátmérők eloszlását vizsgálta, ahol az eloszlásokra legjobban illeszkedő sűrűségfüggvényeket értékelte, amelyek jellemzően jobbra elnyúló, aszimmetrikus alakúak. Az méreteloszlások esetén a következőket tulajdonságokat figyeltem meg, amelyeket a 29. ábrán láthatóak:

- A cseppméret eloszlások a permet minden pontjában jobbra elnyúló, kivéve néhány permetszéli mérőpontban, ahol a detektált cseppek száma alacsony. Ebből kifolyólag ezen adatsorok esetén a cseppméret mellett az axiális sebesség, Stokes és Reynolds szám eloszlások is irregulárisak.
- A porlasztónyomás növekedésével a méreteloszlások szűkebb tartomány felé nyúlnak el.
- A z fúvókatávolság növekedésével a méreteloszlások szélesebb tartomány felé nyúlnak el.

A szűrés utáni méreteloszlások alakjai a 30. ábrán láthatóak, amelyek a cseppek hátracseppméret alatti csepposztályának eloszlásai. A hisztogramokon látható, hogy a szűrés során eltávolított cseppek nemcsak a nagyméretű cseppek, hanem olyan kisméretű cseppek, amelyekre jellemző Stk meghaladja a 0,1 értéket nagy axiális sebességük miatt. Emiatt az eloszlások alakja jelentősen módosul.

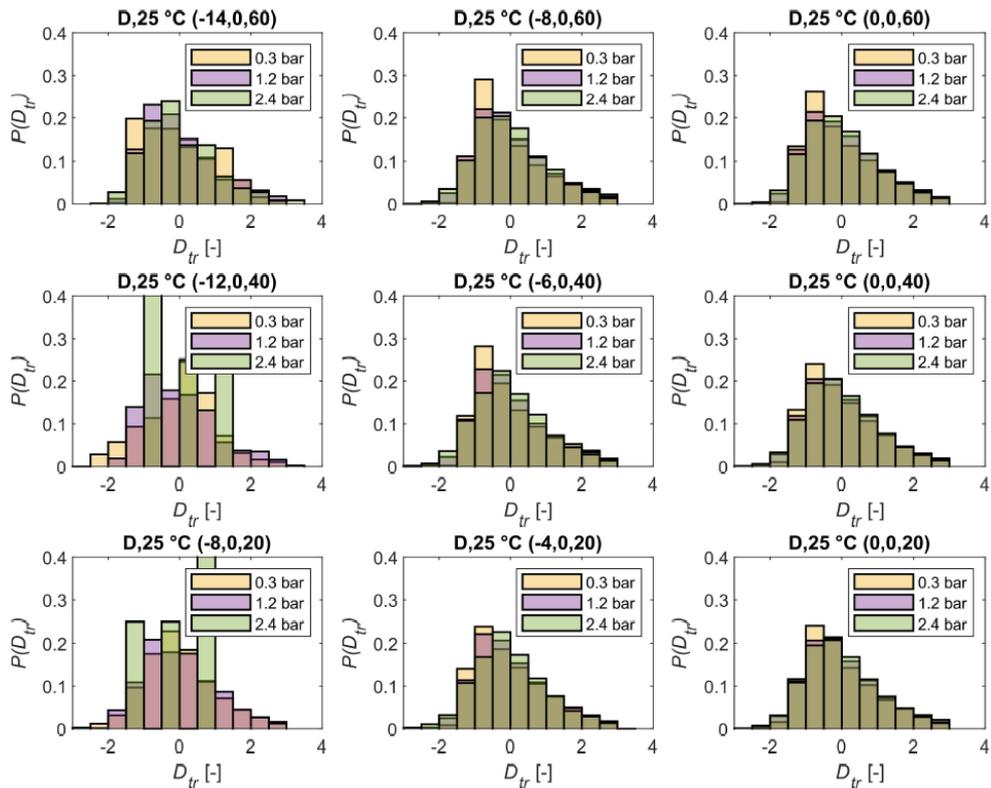


29. ábra: Eredeti adatsorok cseppméret eloszlásai.



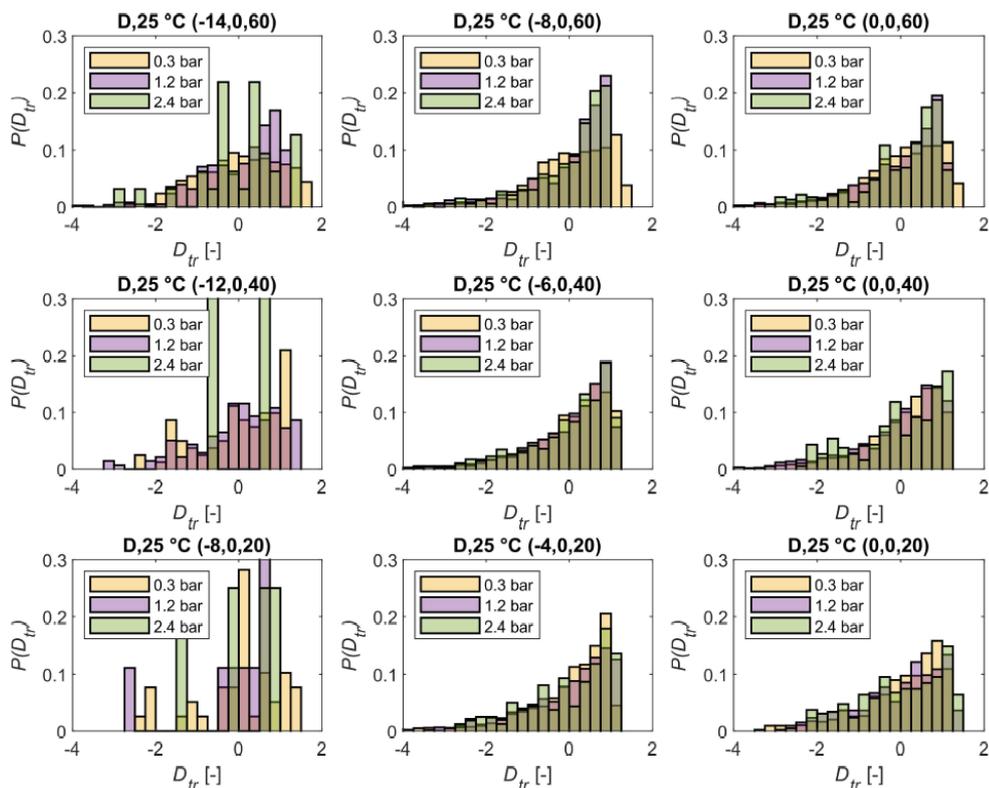
30. ábra: Szűrt adatsorok cseppméret eloszlásai.

A 31. ábrán a cseppméret eloszlások dimenziótlan alakjai láthatóak. Látható, hogy a különböző porlasztónyomásokon és  $z$  távolságokban az eloszlások hasonló alakúak, viszont alacsony nyomáson csúcsosabbak. A hisztogramok a permet belseje felé haladva,  $(-8, 0, 60)$  és  $(0, 0, 60)$  pontokban minden nyomáson hasonló ferdeségűek.



31. ábra: Eredeti adatsorok dimenziótlan cseppméret eloszlásai.

A 32. ábrán látható szűrt eloszlások dimenziótlan alakja látható. Az eredeti cseppméret adatsorokkal ellentétben a szűrt adatsorok hisztogramjának csúcsossága a porlasztónyomás növekedésével növekszik.

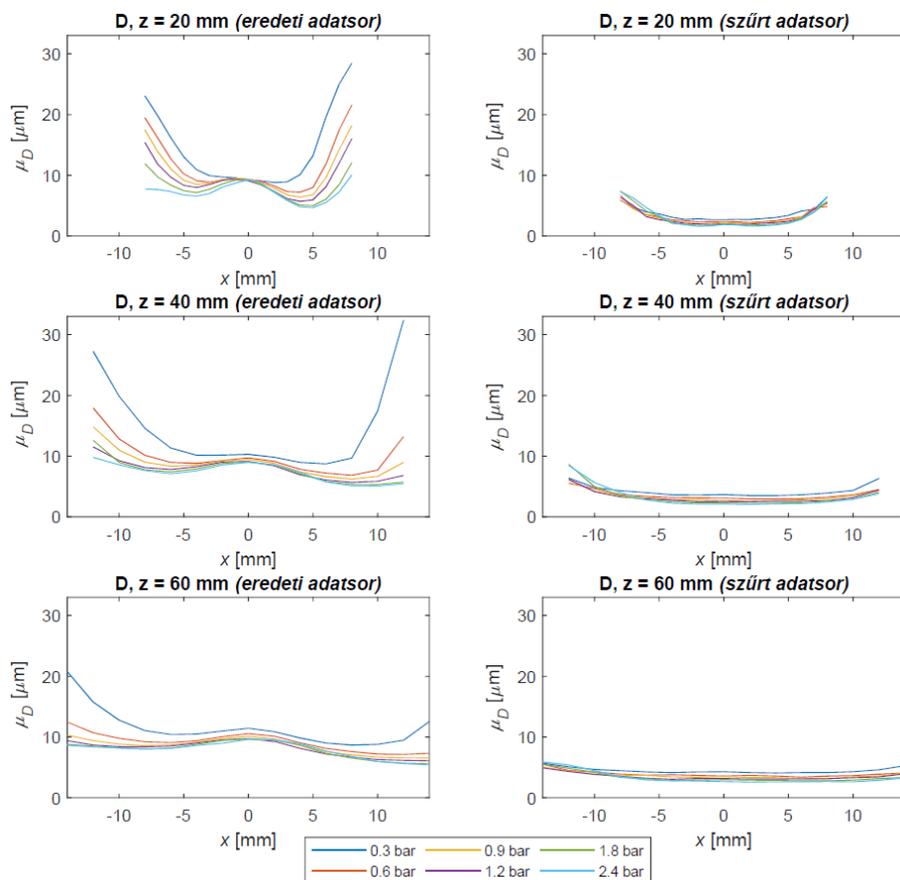


32. ábra: Szűrt adatsorok transzformált cseppméret eloszlásai.

A 33. ábrán a balra az eredeti, míg a jobbra a szűrt cseppméreteloszlások átlaga látható. Az eredeti adatsorok esetén a következő megállapításokat tettem:

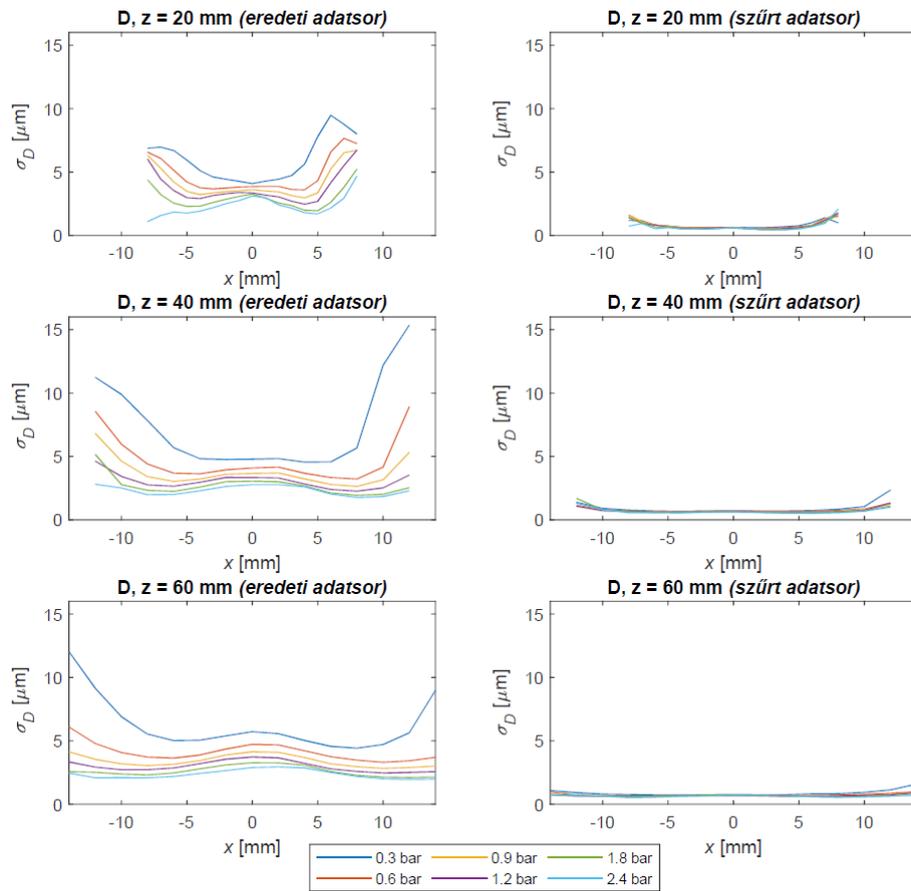
- A porlasztónyomás növekedésével az átlag értéke csökken.
- A permet szimmetriatengelyén az átlag görbéjének lokális maximum értéke található, amely a permet széle felé haladva csökken, mígnem a görbe egy inflexiós pontban növekedő értékeket vesz fel. Az inflexiós pont a porlasztónyomás növekedésével a permet széle felé tolódik el. A jelenséget a nagyméretű cseppek kiszóródása okozza, ami alacsony porlasztónyomás esetén fokozódik.
- A z fúvókatávolság növekedésével a permet szimmetriatengelyének környezetében nő az átlag, míg a szélső pontokban csökken.

A szűrt adatsorok esetén, habár az átlag cseppméret továbbra is csökken a porlasztónyomás növekedésével, a permet közel teljes keresztmetszetében állandó értékű, kivéve a permet szélén, ahol enyhén megnövekszik az értéke.

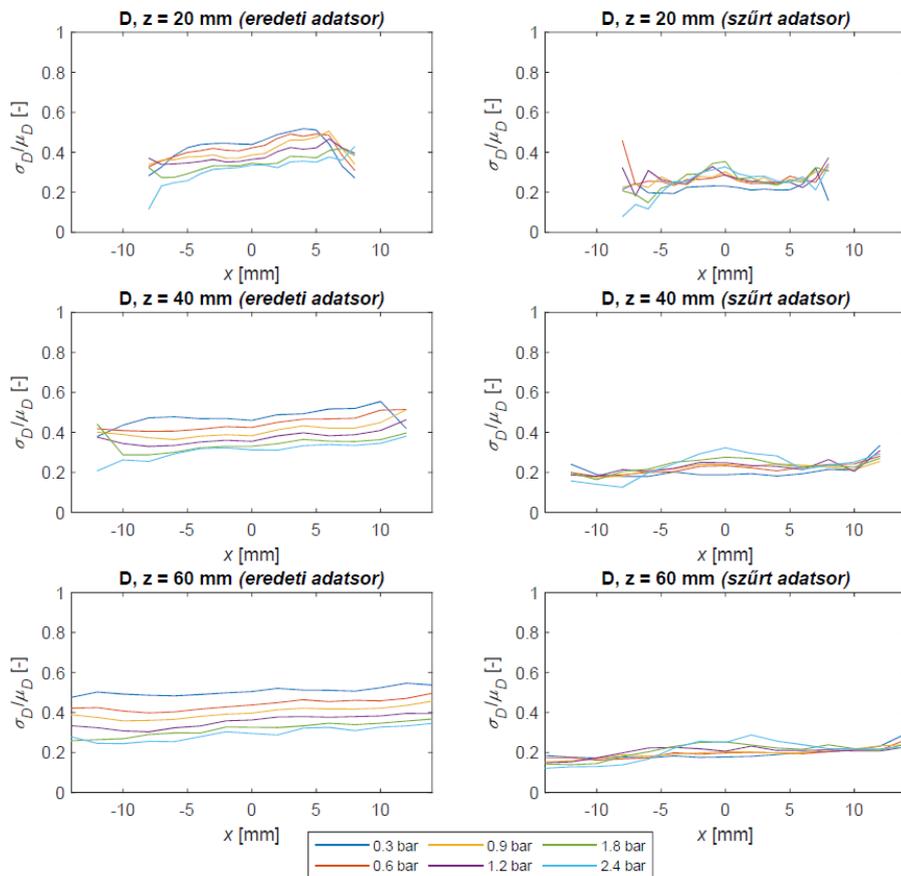


33. ábra: Cseppméret eloszlások átlaga.

A 34. ábrán láthatóak a cseppméret eloszlásokra jellemző szórás értékek, amely görbéi hasonlóak a 33. ábrán látható átlag cseppméret görbékhez az eredeti és a szűrt adatsorok esetén is. A 31. és 32. ábrán látható dimenziótlan eloszlások a porlasztónyomások és a mérőpontok elhelyezkedésétől függetlenül közel azonos dimenziótlan mérettartományon helyezkednek el. Az előbbi megállapítások és a (25) dimenziótlanítási eljárás linearitásából következik, hogy az átlag és szórás értékek közötti összefüggés szintén lineáris reláció a cseppméreteloszlások esetén.

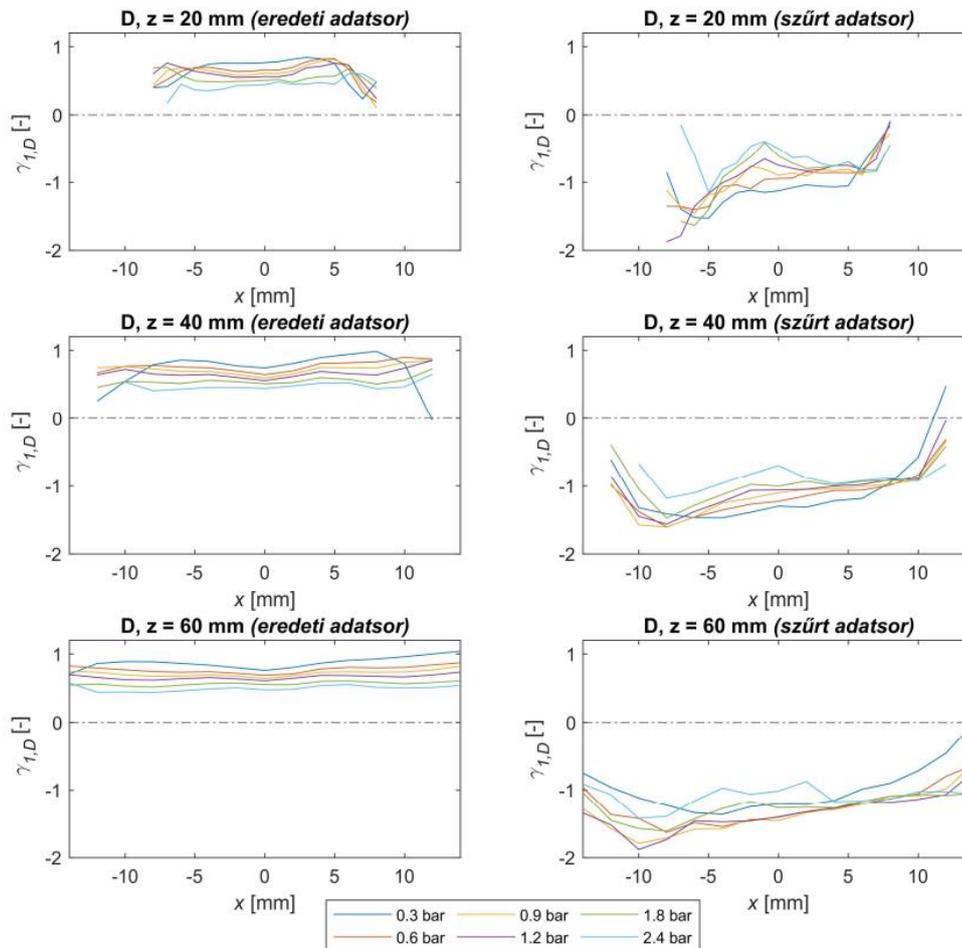


34. ábra: Cseppméret eloszlások szórása.



35. ábra: Cseppméret eloszlások relatív szórása.

A 35. ábrán láthatóak a cseppméret eloszlásokat jellemző relatív szórás értékek, ami a szórás és átlag értékek hányadosa. Az eredeti adatsorok esetén a görbék közel állandó értéket vesznek fel, az értékek a porlasztónyomás növekedésével csökkennek. A  $z$  fúvókatávolság növekedésével különböző nyomások esetén a görbék közötti különbség nő. Ezzel ellentétben a szűrt adatsorok esetén a görbék a porlasztónyomás növekedésével növekvő érték körül ingadoznak. A  $z$  fúvókatávolság növekedésével a relatív szórás értéke csökken.



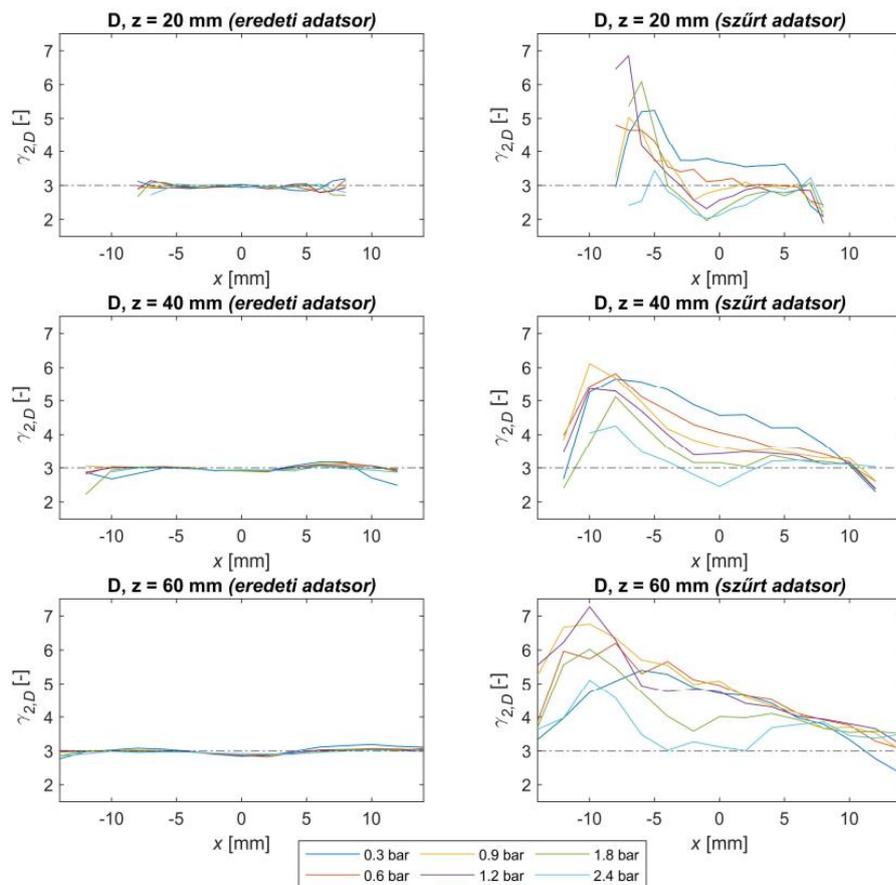
36. ábra: Cseppméret eloszlások ferdesége.

A 36. ábrán a méreteloszlások ferdeség értéke látható. Az eredeti adatsorok esetén a görbék közel konstans értéket vesznek fel, ami növekszik a  $z$  távolság növekedésével. A porlasztónyomás növekedésével az értékek csökkennek. Az összes görbe értéke 0 feletti, azaz a permet minden pontjában a 29. ábrán bemutatott balra dőlő, jobbra elnyúló cseppméret eloszlások jellemzőek.

A szűrt adatsorok esetén a görbék negatív, azaz az eloszlások jobbra dőlő, balra elnyúló eloszlások, amelyek a 30. ábrán láthatóak. Az értékek növekvő  $z$  fúvókatávolsággal nőnek, míg növekvő porlasztónyomással csökkennek. A görbék nem szimmetrikusak a szimmetriatengelyre ( $x = 0$ ), amelyből a permet enyhe aszimmetriájára következtethetünk.

A 37. ábrán a cseppméret eloszlások kurtózis értékei láthatóak. Az eredeti adatsorok esetén a kurtózis értéke minden porlasztónyomás és fúvókatávolság esetén három körül ingadozik. A permetszéli pontokban a görbék értéke ettől enyhén eltérhet, illetve a szimmetriatengelyen kissé három alá esik.

A szűrt adatsorok esetén a kurtózis érték ingadozik, szintén megfigyelhető a ferdesége is jellemző aszimmetria. A kurtózis növekszik a porlasztónyomás csökkenésével és a fúvókatávolság növekedésével. A legtöbb mérőpontban az értékek nagyobbak háromnál, azaz az eloszlások csúcsosabbak a velük megegyező átlagú és szórású normális eloszláshoz képest. Főként a  $z = 20$  mm fúvókatávolság magas nyomásai esetén a kurtózis érték három alá csökken.



37. ábra: Cseppméret eloszlások kurtózis értékei.

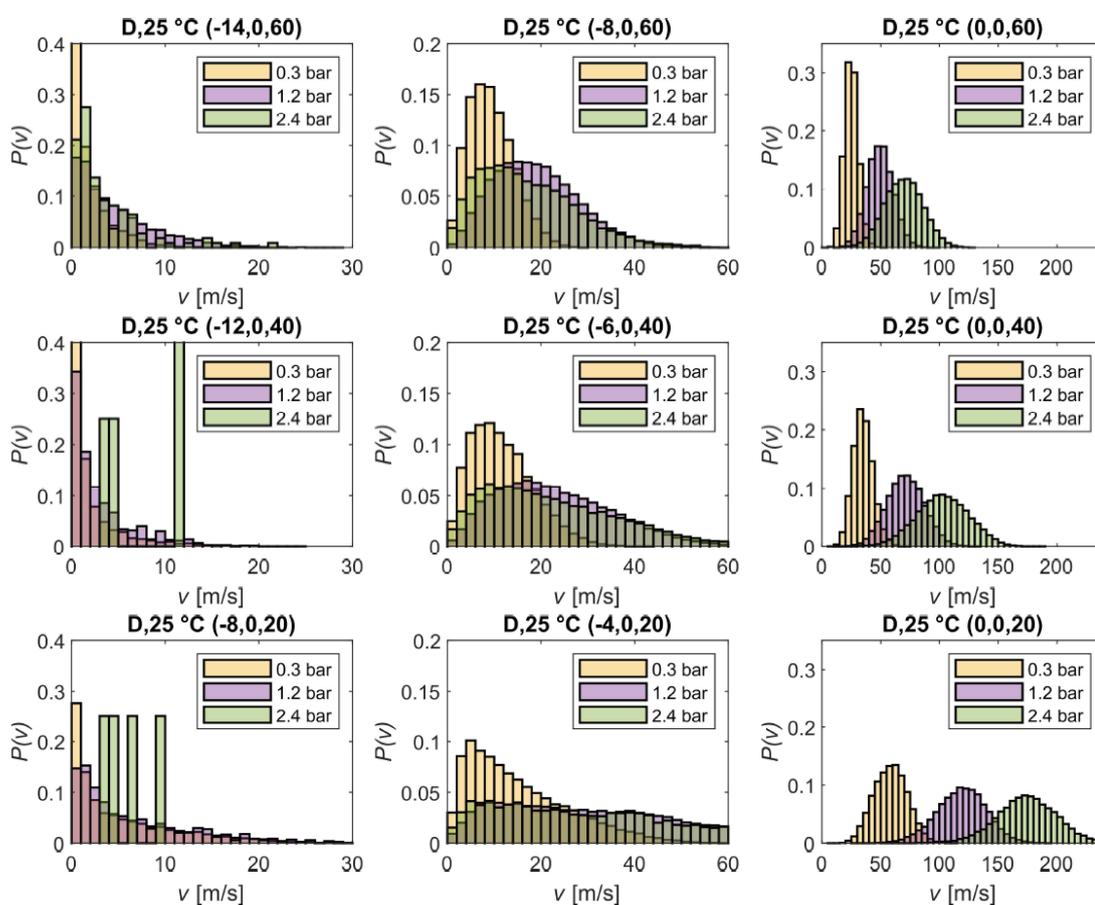
### 5.3. Sebességeloszlások

A sebességek vizsgálata során az axiális sebességkomponensek eloszlásainak értékelésével foglalkoztam. Az iterációs folyamat során a szűrés segítségével azon cseppek kiválasztása történt, amelyek megfelelő áramláskövető tulajdonsággal rendelkeznek. Így a szűrt adatsorok sebességeloszlásaival az áramló levegő sebességét közelíthetjük.

Az eredeti adatsorok sebességeloszlásainak vizsgálatát a korábbiakban elvégeztem [33], a dolgozatban viszont részletesebb elemzést készítettem a ferdeség és kurtózis

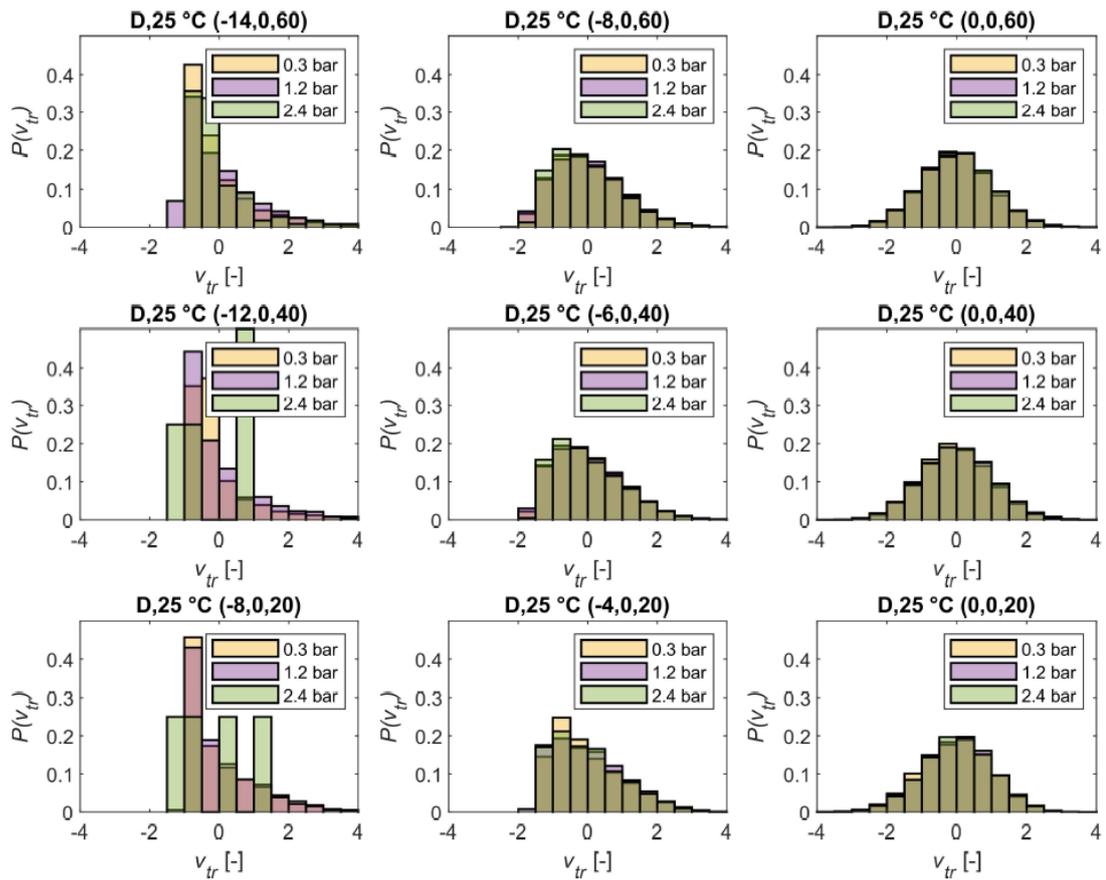
értékek vizsgálatával. A sebességeloszlások hisztogramjai a 38. ábrán láthatóak, amelyek esetén a következő megjegyzéseket tettem:

- A cseppméret eloszlásokkal szemben a sebességeloszlások alakja nemcsak a porlasztási körülményektől, hanem a szimmetriatengelytől vett távolságtól is jelentősen függ.
- A permet szimmetriatengelyén a regisztrált cseppek sebességeloszlása normál eloszláshoz hasonló minden porlasztónyomás esetén. A permet széle felé haladva az eloszlás balra dől, jobbra nyúlik el, azaz a ferdeség az  $x$  távolság növekedésével növekszik. Ennek oka a permet és nyugvó levegő kölcsönhatásának, azaz az örvénykeltés és a keveredés fokozódása.
- A  $z$  távolság, illetve a porlasztónyomás növekedésével is az eloszlások által átfogott sebességtartományok növekednek.

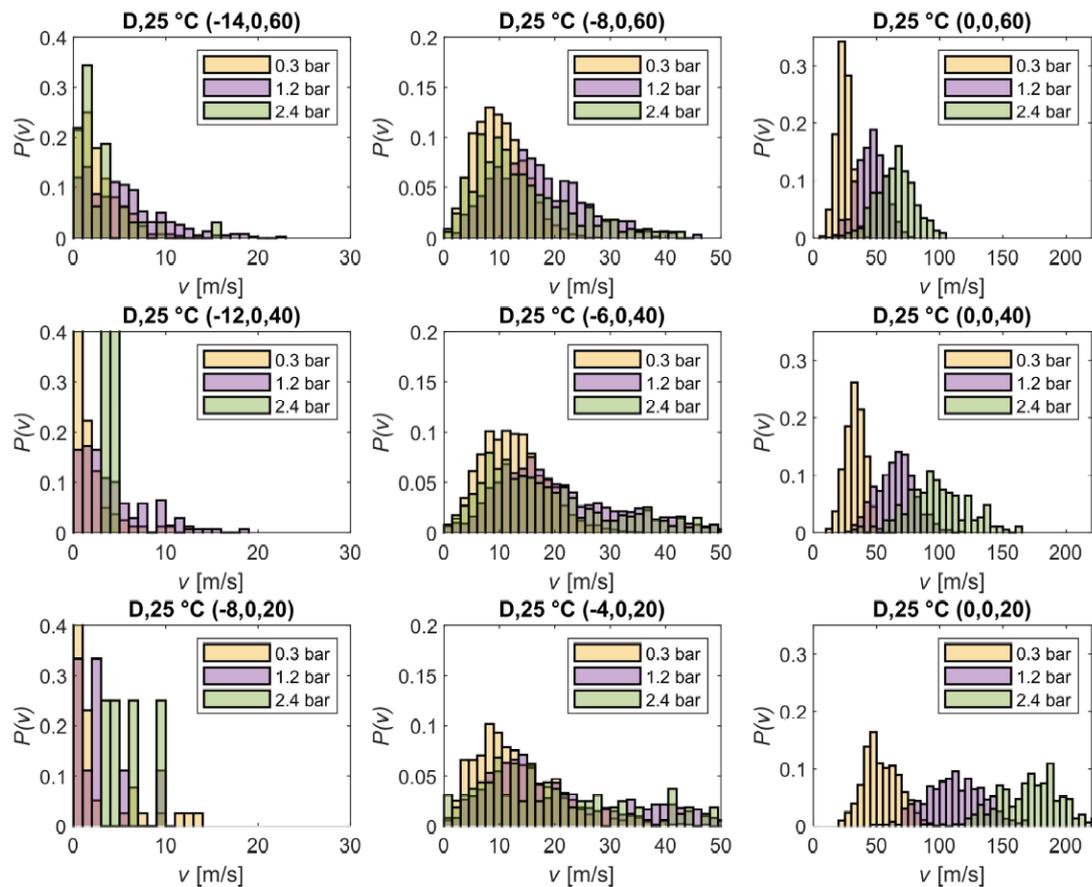


38. ábra: Eredeti adatsorok sebességeloszlásai.

A 39. ábrán láthatóak az előbbi sebességeloszlások dimenziótlan alakjai. Látható, hogy a szimmetriatengelyhez közeli mérőpontokban különböző porlasztónyomások esetén a sebességeloszlások egybevágóak. Mivel a dimenziótlanítási folyamat lineáris jellegű, arra következtethetünk, hogy adott mérőpontban az eloszlások átlaga és szórása lineárisan függ a porlasztónyomástól. Eközben a ferdeség és kurtózis változatlan, azok értéke a szimmetriatengelytől való távolságtól függ. A permetszéli pontokban a sebességeloszlások habár hasonlóak, nem egybevágóak, magas porlasztónyomás esetén irregulárisabbá válnak.

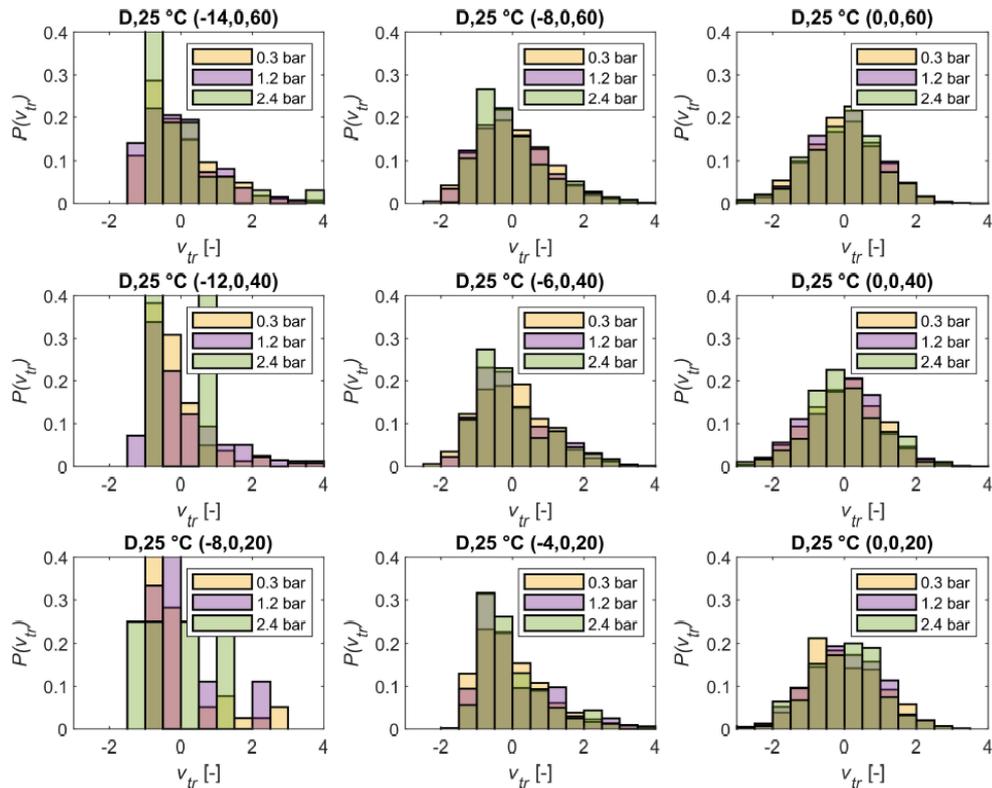


39. ábra: Eredeti adatsorok dimenziótlan sebességeloszlásai.



40. ábra: Szűrt adatsorok sebességeloszlásai.

A szűréssel kiválasztott cseppek sebességeloszlásai a 40. ábrán láthatóak. Az eloszlások, habár hasonlóak, szabálytalanabb alakúak, nagyobb ingadozások láthatóak a hisztogram oszlopaiban, mint az eredeti adatsorok esetén. Ennek oka, hogy a módszer nemcsak a nagysebességű cseppeket, hanem az alacsony sebességű nagyméretű cseppeket is eltávolította az adatsorokból.

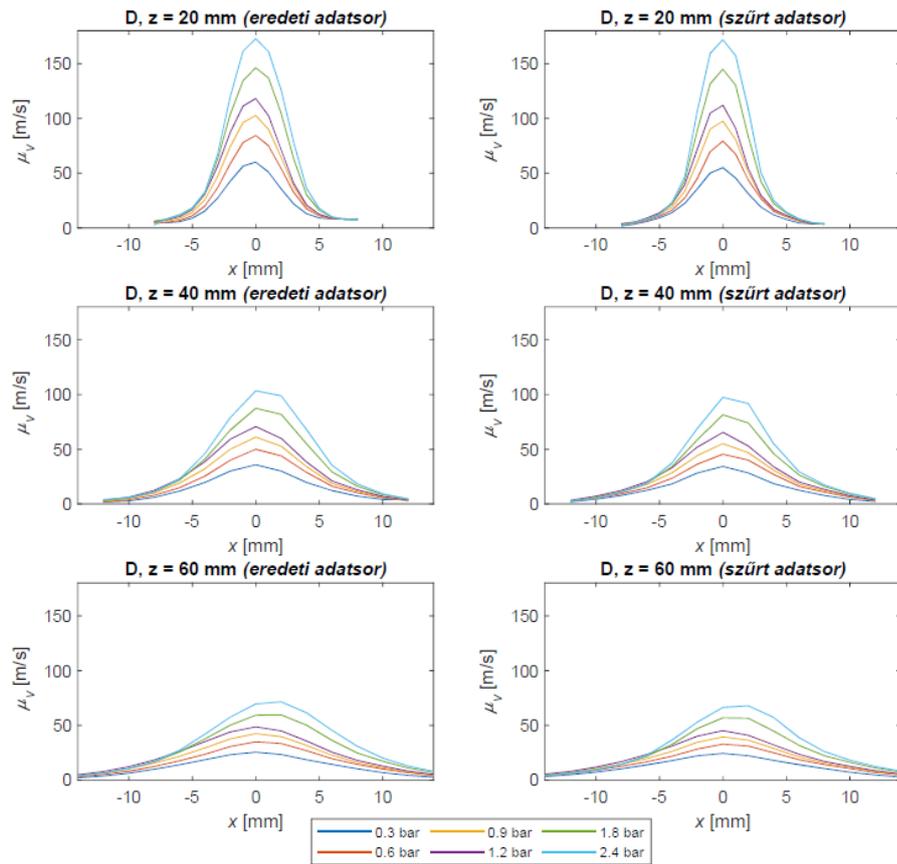


41. ábra: Szűrt adatsorok dimenziótlan sebességeloszlásai.

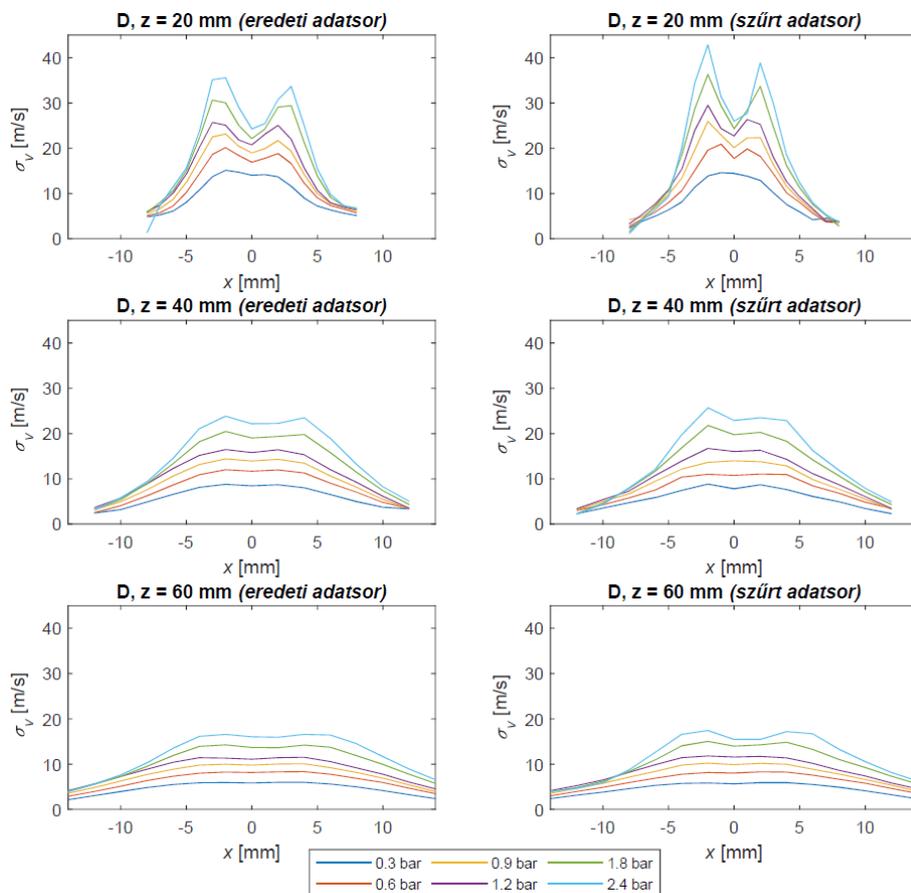
A 41. ábrán a szűrt sebességeloszlások dimenziótlan alakja látható. Az eloszlások a permet szimmetriatengelyén egybevágóak, habár az ingadozások miatt nem akkora mértékben, mint az eredeti adatsorok esetén. A permet szélsőbb pontjaiban viszont látható, hogy a porlasztónyomás növekedésével az eloszlások csúcsosabbak.

A 42. ábrán a sebességeloszlások átlag értékei láthatóak. Az eredeti és szűrt adatsorok átlagai közel azonosak, minimális csökkenés tapasztalható. Az átlagos sebesség növekszik a porlasztónyomás növekedésével és a z fúvókatávolság csökkenésével. A permet szimmetriatengelyén jelentkezik a görbék maximum értéke, a permet széle felé a sebesség csökken. A különböző nyomásokhoz tartozó görbék a permet szélén egy azonos értékhez tartanak. A görbék jellege megegyezik a szabadsugar kifejtett zónájának (lásd 8. ábra) sebességeloszlásával.

A sebességeloszlások szórásait a 43. ábra mutatja. A permet szimmetriatengelyéhez közeli pontokban, a  $z = 40$  és  $60$  mm keresztmetszet esetén a görbék közel állandó értéket vesznek fel, a konstans szakaszon minimális csökkenés látható a szimmetriatengelyen. A permet ezen belső tartománya kiszélesedik a  $z$  fúvókatávolság növekedésével. A  $z = 20$  mm keresztmetszetben a görbe hasonló szakasza lecsökken az  $x = 0$  mm pontban, ami a porlasztónyomás növekedésével fokozódik.

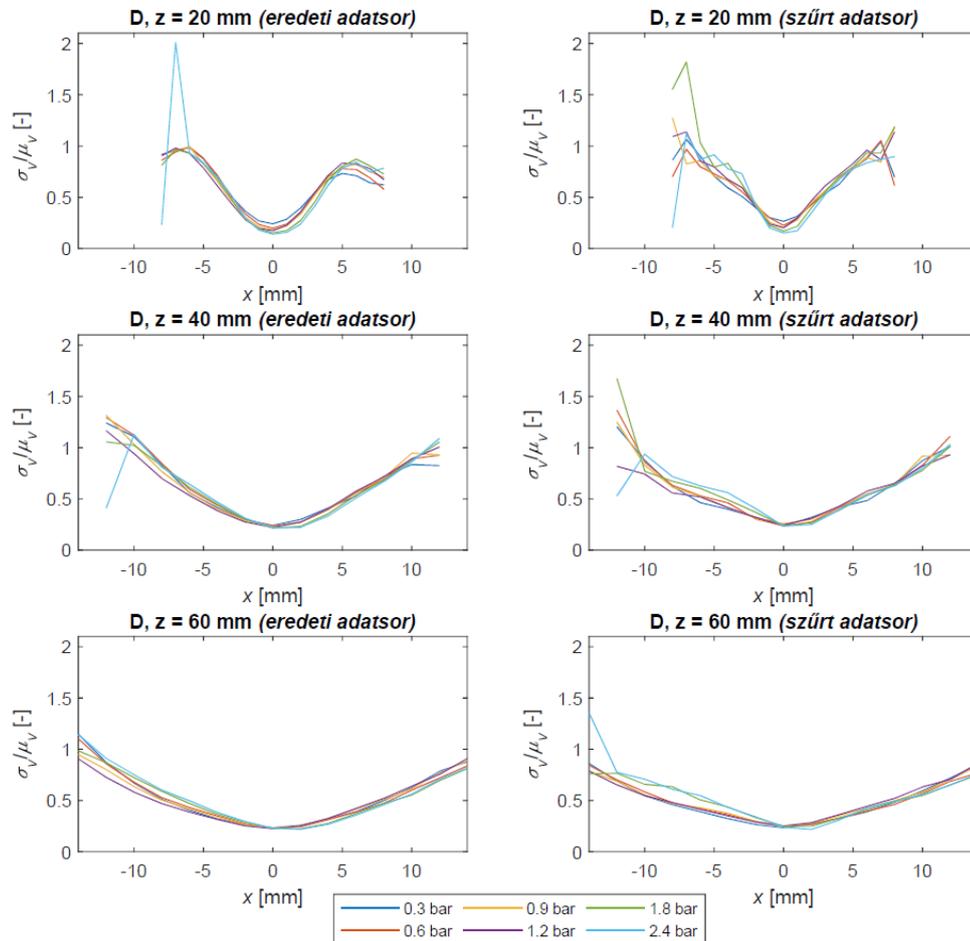


42. ábra: Sebességeloszlások átlagai.



43. ábra: Sebességeloszlások szórásai.

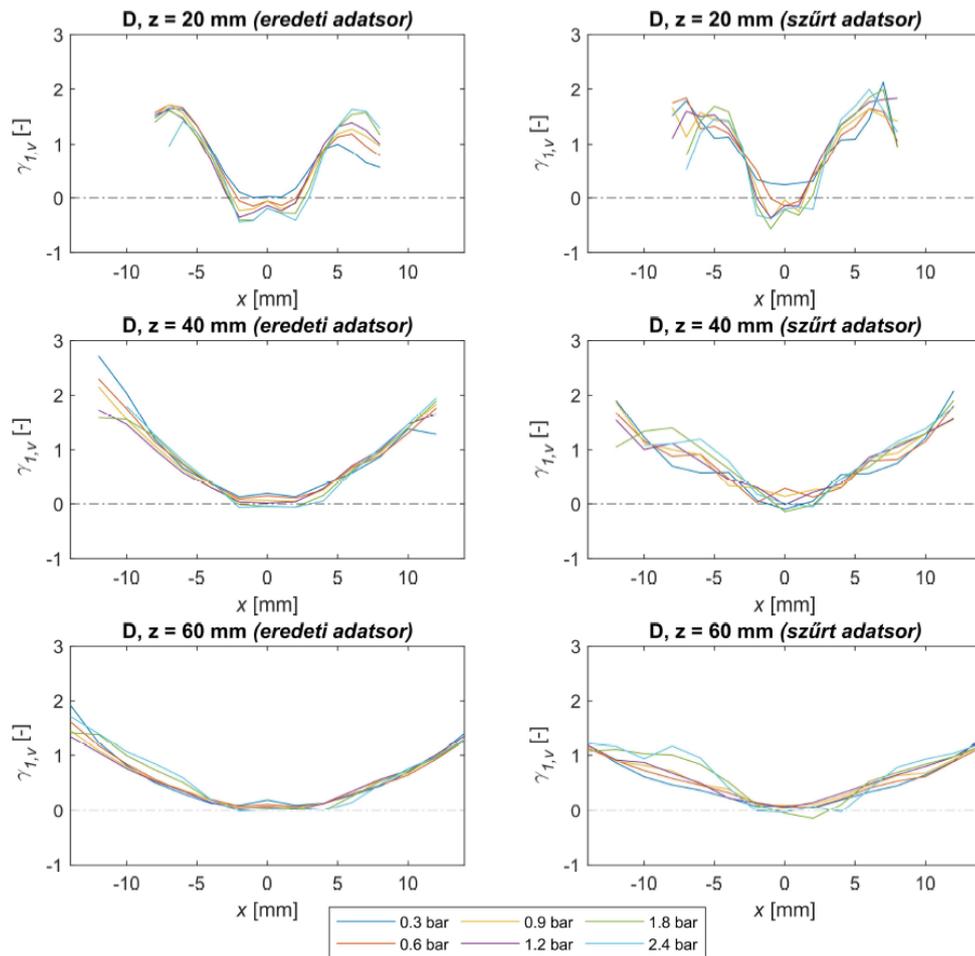
A 44. ábra a sebességeloszlások relatív szórás értékét mutatja. Különböző fúvókátávolságban minden porlasztónyomáshoz tartozó görbe egybevágó. A görbék parabola alakúak, azaz a permet széle felé növekszik a relatív szórás, viszont a  $z = 20$  mm keresztmetszeten a permetszéli mérőpontokban az értékek visszaesése tapasztalható. A három fúvókátávolságban kissé eltérő alakú görbék azonos relatív szórás tartományban, kb. 0 – 1,5 között vesznek fel értékeket.



44. ábra: Sebességeloszlások relatív szórás értékei.

A 45. ábrán a sebességeloszlások ferdeség értékei láthatóak. A görbék a különböző fúvókátávolságokban minden porlasztónyomáson közel egybevágóak, az értékek a legtöbb esetben 0 feletti, azaz az eloszlások jellemzően balra dőlnek. A permet szimmetriatengelyéhez közel eső pontokban egy szűk tartományon az értékek csökkennek a porlasztónyomások növekedésével, habár a középpontban alacsony nyomáson kissé növekszik a ferdeség. A 38. ábra szimmetriatengelyen fekvő pontjaihoz tartozó eloszlások esetén (jobbra) látható, hogy a normál eloszláshoz hasonló hisztogramok kissé aszimmetrikusak. Ennek oka az overshooting, másnéven sebesség túllövés jelensége [39]. Az aprózódás folyamata során miután a cseppek sebessége eléri az áramlás sebességét, tehetetlenségük miatt túllépi azt, mivel kisebb mértékben lassulnak, mint a szabadsugár. Az impulzuscsere során a nagy cseppek lassan alkalmazkodnak a környezeti viszonyokhoz, míg a kis cseppek könnyebben lassulnak le a levegő sebességére. A szűrés ezeket a nagyméretű cseppeket eltávolítja az adatsorokból. Emellett,

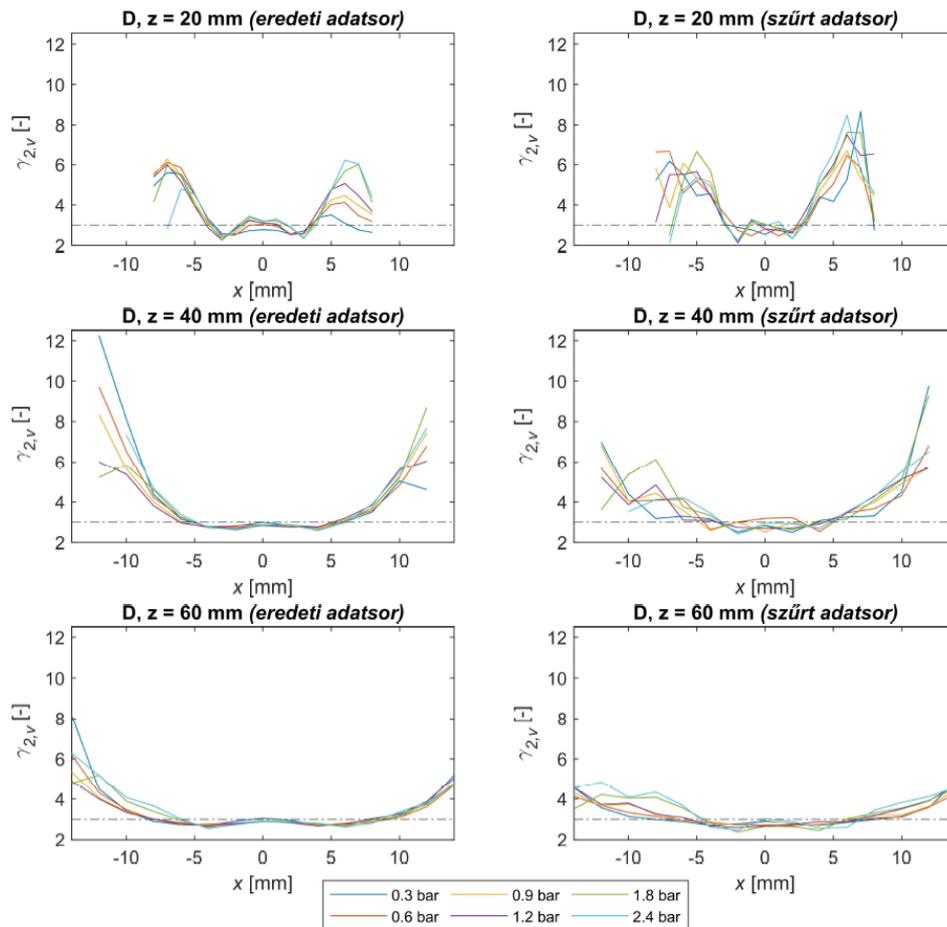
mivel az eltávolított nagyméretű cseppek jelentős része a nagysebességű tartományba esik a 41. ábrán látható szimmetriatengelyre eső pontok szűrt sebességeloszlásai kissé jobbra dőlnek. Ez látható a 45. ábra görbéin is, a szűrt adatsorok ferdeség értékei alacsonyabbak.



45. ábra: Sebességeloszlások ferdesége.

A 46. ábra a sebességeloszlások kurtózis értékeit mutatja. A permet szimmetriatengelyén a kurtózis érték közel három értéket vesz fel, amely minimális csökkenés után növekszik a permetszéli pontokban. A ferdeséghez hasonlóan  $z = 20$  mm keresztmetszet permetszéli pontjaiban a kurtózis kissé lecsökken. A porlasztónyomásokhoz tartozó görbék közel egybevágóak a különböző  $z$  fúvókatávolságban. A szűrt adatsorok kurtózis görbéi hasonlóak az eredeti adatsorokéhoz, habár a permet szélén kissé mérseklődik az eloszlások csúcsossága.

A szűrés módszer egyes adatsorokhoz tartozó cseppek akár 90-95%-át is eltávolította, amelyek jellemzően nagyméretű cseppek. Ezen cseppek sebességei közel a teljes sebességtartományt lefedik, ez látható a 28. ábrán is. Ennek eredménye a 40. ábrán látható az eredeti adatsorokhoz hasonló alakú, de szabálytalanabb sebességeloszlások. A hisztogramok szabálytalanságai látható a szórás, relatív szórás, ferdeség és kurtózis görbéken, amelyeket így ingadozó értékek alkotnak.

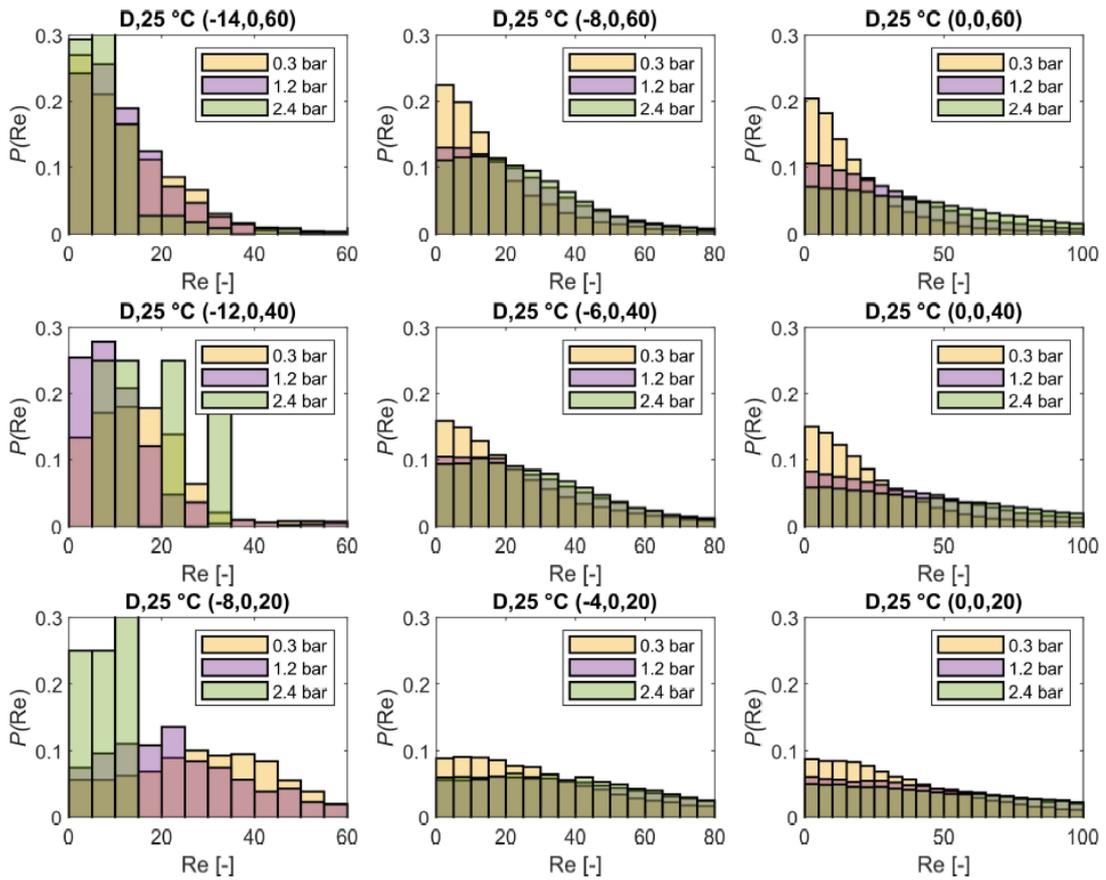


46. ábra: Sebességeloszlások kurtózis értékei.

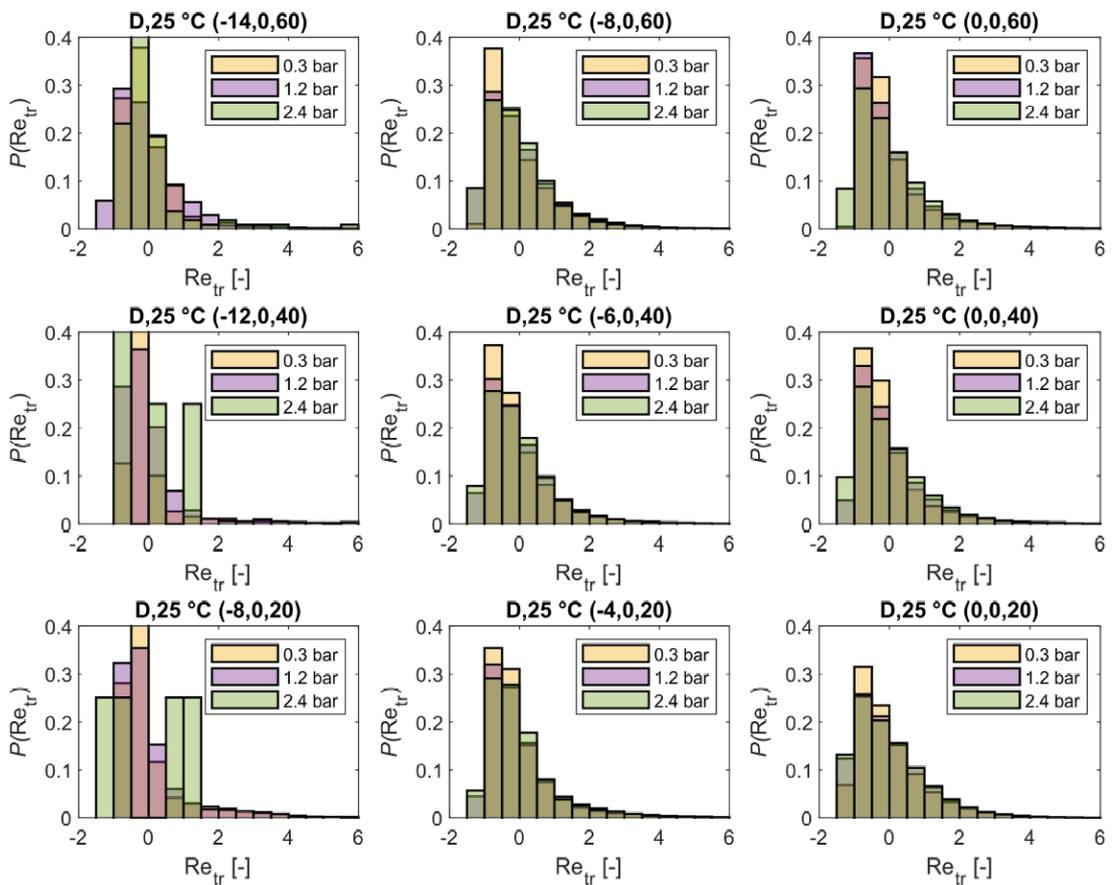
#### 5.4. Reynolds szám

A Reynolds szám eloszlásainak vizsgálata során a sebességeloszlások és méreteloszlások egyes tulajdonságait ismertem fel, mivel a dimenziótlan mennyiség (24) számításában mindkét jellemző megjelenik. Szintén szükséges a folyadék hőmérsékletfüggő kinematikai viszkozitásának ismerete, ami a vizsgált anyagok esetén akár egy nagyságrendet is változhat. Ebből kifolyólag az adatsorokhoz tartozó Reynolds számok nagyságrendje változhat a hőmérséklettől függően, viszont az eloszlásokat jellemző statisztikai momentumok alakulása hasonló. A dolgozatnak nem célja a hőmérsékletfüggés vizsgálata, így a továbbiakban a különböző hőmérsékletek adatsorait jellemző átlagos értékek bemutatása történik minden porlasztónyomás és mérőpont esetén. A Reynolds szám eloszlások vizsgálata során a következőket tapasztaltam:

- A 47. ábra hisztogramjai alapján az eloszlások fél-normál sűrűségfüggvénnyel közelíthetőek, ami a számítási módszer során használt relatív sebességkülönbség abszolút értékére vezethető vissza.
- A porlasztónyomás növekedésével az eloszlások lapultabbak.
- A permet széléhez képest a szimmetriatengely mérőpontjaiban az eloszlások nagyobb sebességek felé nyúlnak el, így lapultabbak.
- A fúvókanyíláshoz közelítve az eloszlások nagyobb értékeket vesznek fel.
- A permet szélső pontjaiban az eloszlások irregularitást mutatnak.

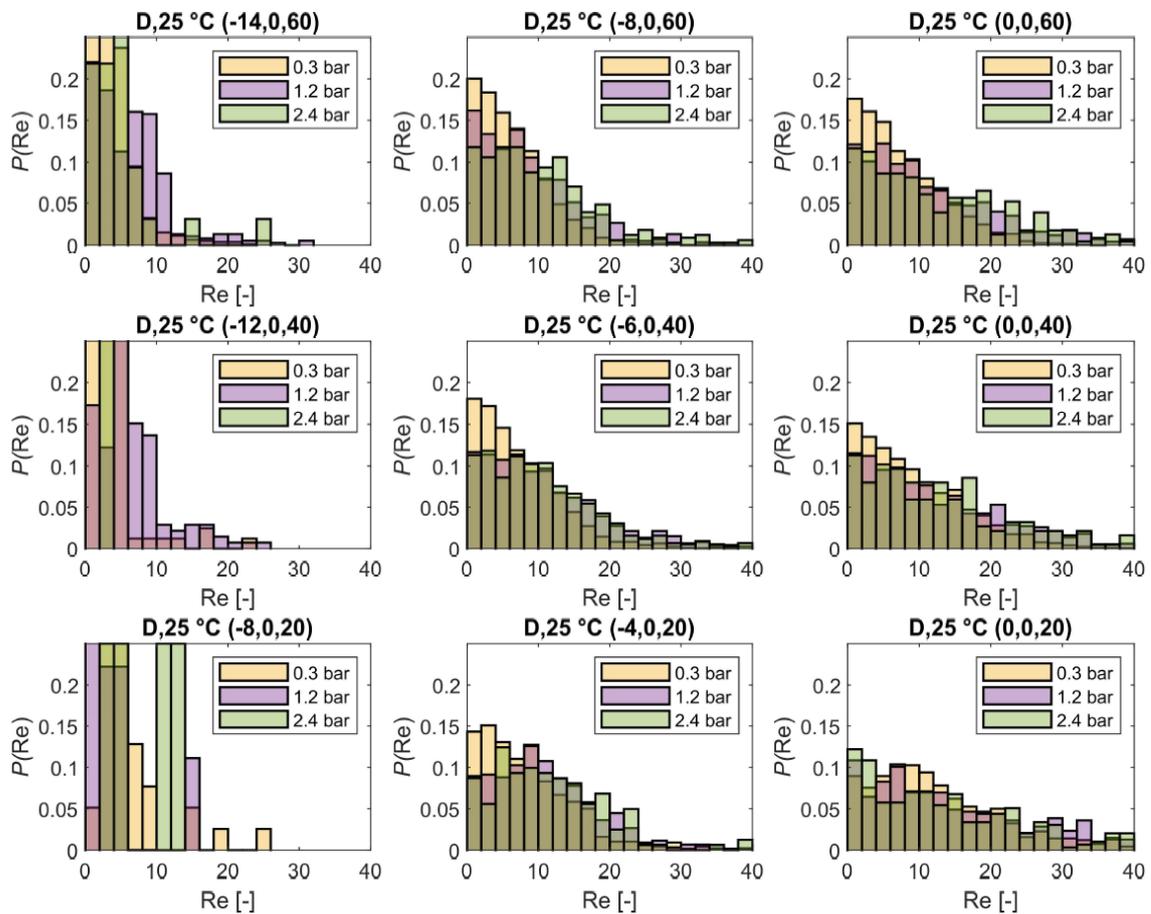


47. ábra: Eredeti Reynolds szám eloszlások.



48. ábra: Eredeti Reynolds szám eloszlások dimenziótlán alakja.

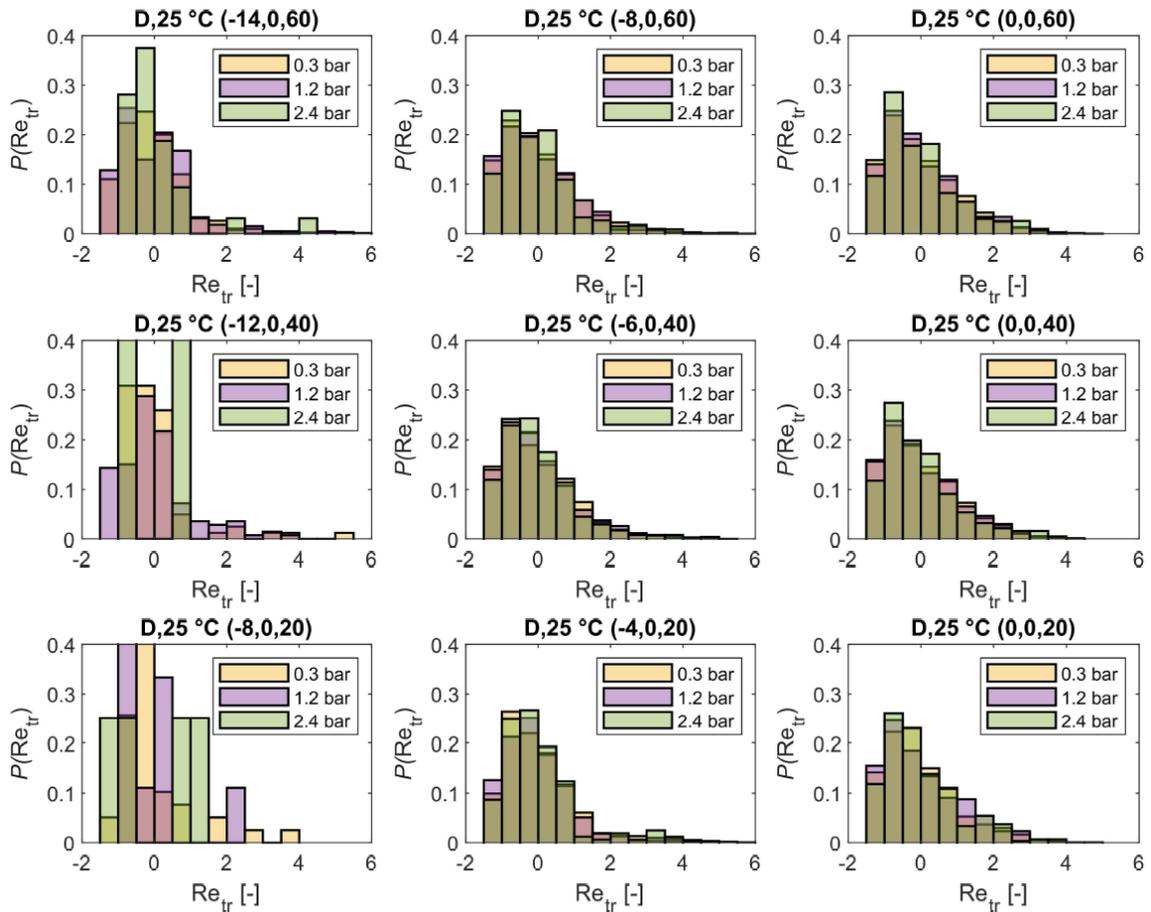
A 48. ábrán láthatóak az eloszlások dimenziótlan alakjai, amelyek a cseppméret eloszlásokhoz hasonlóan, közel egybevágóak minden porlasztónyomás  $x$ , illetve  $z$  távolságban. Minimális eltérés látható azonban a különböző porlasztónyomások esetén, az eredeti adatsorokhoz hasonló a nyomás növekedésével csökken a csúcosság.



49. ábra: Szűrt Reynolds szám eloszlások.

A 49. ábrán láthatóak a szűrt adatsorok eloszlásai. Az eredeti eloszlások alakja erősen jobbra nyúlt, ami miatt akár 100 érték feletti Reynolds számok is megjelenhetnek az adatsorokban. A szűrés eredményeképp ez a tulajdonság mérséklődik, de az eloszlások továbbra is hasonlóak az eredeti eloszlásokkal minden paraméter esetén. Sebeségeloszlásokhoz hasonlóan tapasztalható a szűrt adatsorok hisztogramjainak szabálytalansága, ami a permetszéli pontokban erősen torzítja az eloszlásokat.

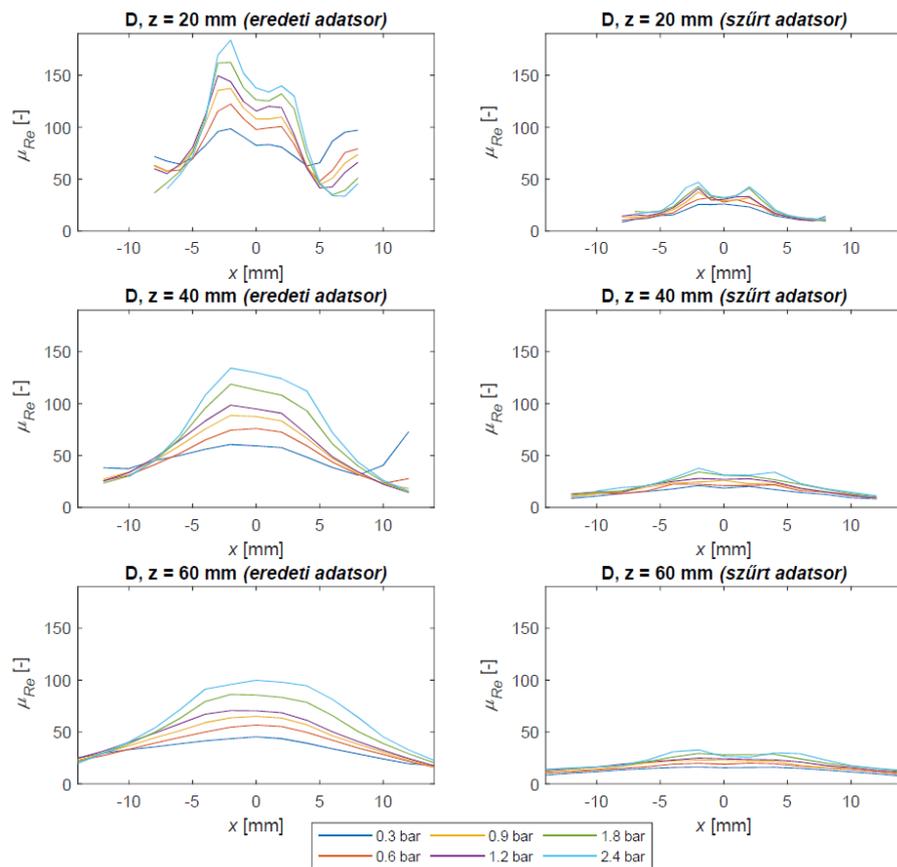
Az 50. ábrán látható a szűrt adatsorok dimenziótlan alakja. Látható, hogy a szűrt eloszlások különböző porlasztónyomások esetén is hasonlóságot mutatnak. Ebből arra következtethetünk, hogy a szűrt Reynolds szám eloszlások a porlasztónyomástól és a mérőpont elhelyezkedéstől függetlenül hasonló alakúak a permetszéli irreguláris adatsorokat leszámítva.



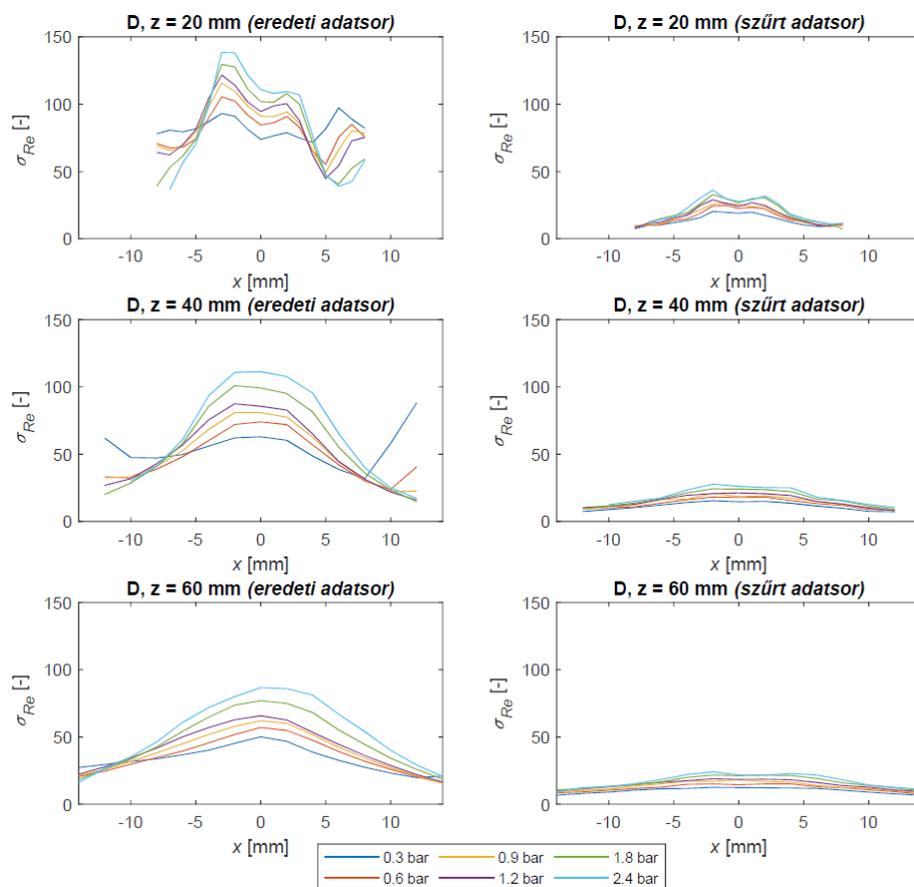
50. ábra: Szűrt Reynolds szám eloszlások dimenziótlan alakja.

Az eloszlások átlagai az 51. ábrán láthatóak, az értékek növekednek a porlasztónyomás növekedésével, illetve a fúvókatávolság csökkenésével. Az eredeti adatsorok görbéi a  $z = 40$  és  $60$  mm keresztmetszetek esetén a szimmetriatengelyen maximum értéket vesznek fel, majd csökkennek a permet széle felé, ahol a görbék egy értékbe futnak, illetve az irregularitás miatt kissé eltérhetnek. A  $z = 20$  mm keresztmetszeten az  $x = 0$  mérőpontban az átlagérték visszaesése tapasztalható. A görbék aszimmetriát mutatnak, amely minimálisan a sebesség és cseppméreteloszlások esetén is megfigyelhető, viszont a Reynolds szám esetén a számítási módszerből fakadóan szuperponálódnak.

A szűrés segítségével az átlag értékek jelentősen csökkennek. A görbék alakulása hasonló minden fúvókatávolságban és porlasztónyomáson. A szimmetriatengelyen lokális minimum alakul ki, ahonnan az értékek kissé növekednek a permet egy rövid belső tartományán, ami a  $z$  távolság növekedésével szélesednek. A maximum értékektől a permet széle felé haladva csökkennek az értékek, amelyek a permet szélén egy értékben futnak össze. A szűrés csökkenti az aszimmetriát.

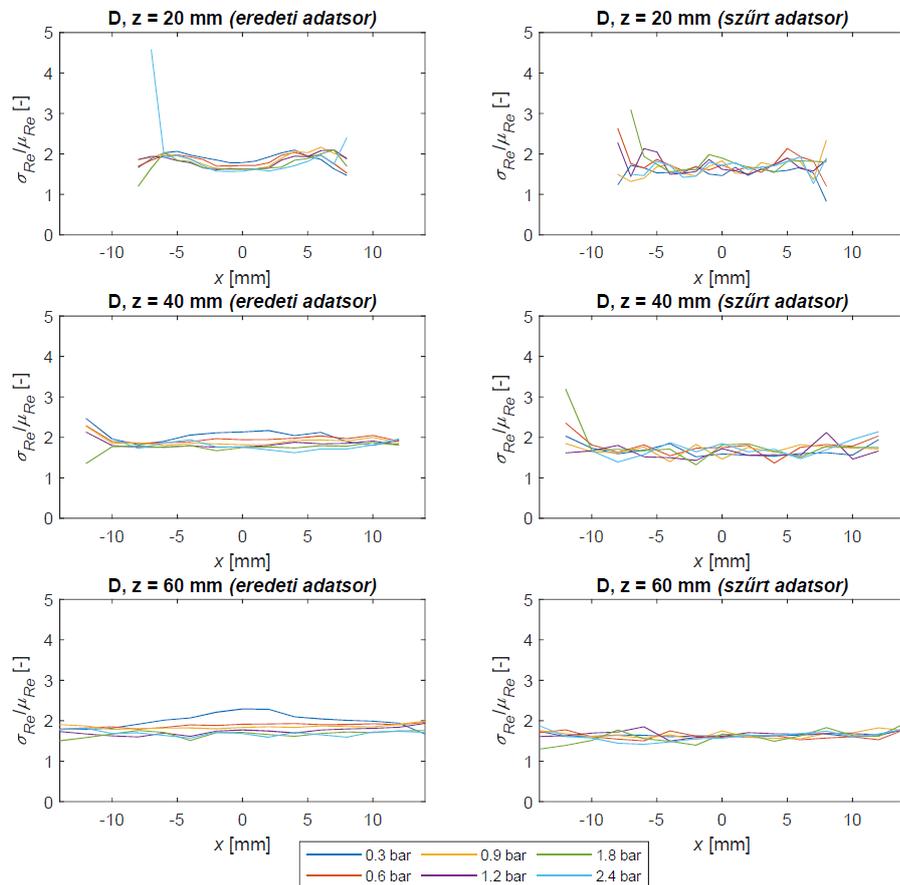


51. ábra: Reynolds szám eloszlások átlaga.



52. ábra: Reynolds szám eloszlások szórása.

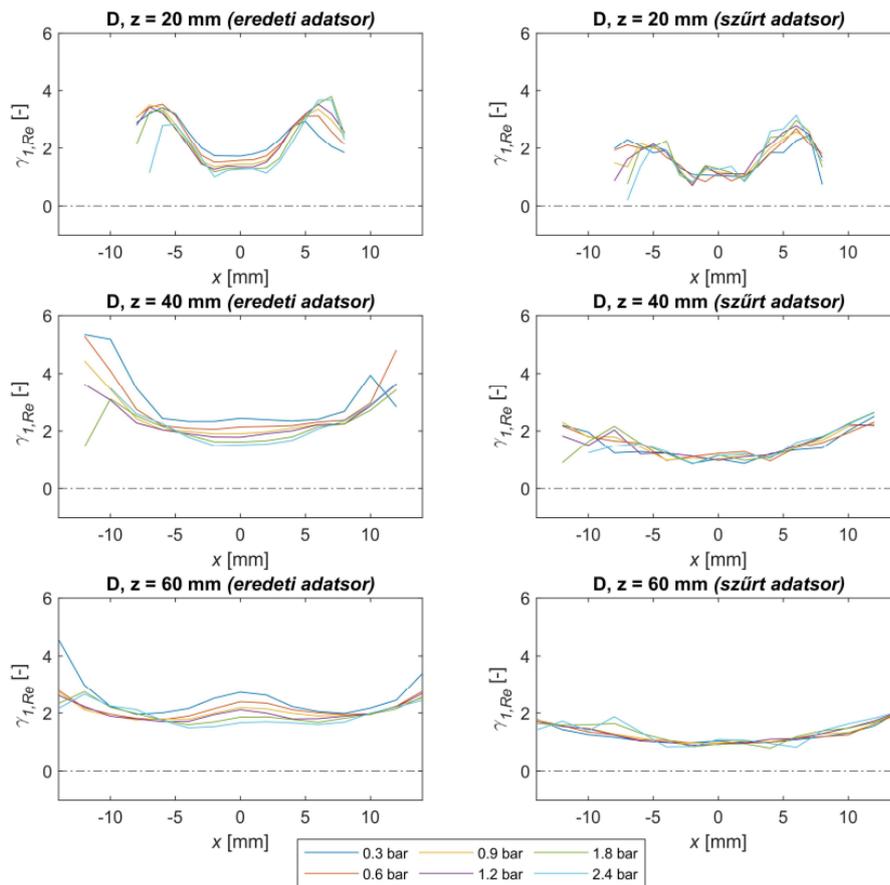
Az 52. ábrán látható szórás görbék esetén az átlag során tett megfigyeléseket tapasztalhatjuk, viszont az értékek valamivel alacsonyabbak az átlagoknál. Ebből kifolyólag az 53. ábrán látható relatív szórás görbék a  $z = 40$  és  $60$  mm keresztmetszeteken közel állandó értéket vesznek fel, azaz a szórás és az átlag kapcsolata lineáris, ahogyan azt a cseppméret eloszlások esetén is tapasztaltam. A relatív szórás értéke a  $25 - 100$  °C hőmérséklettartományon  $0,5 - 3$  között mozog.



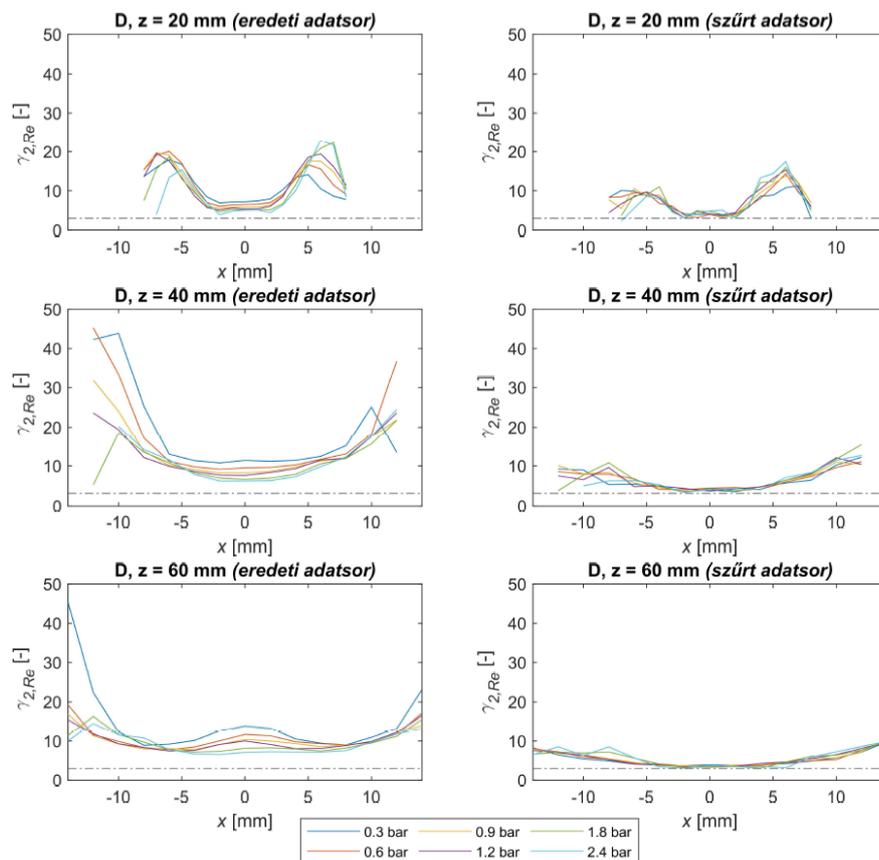
53. ábra: Reynolds szám eloszlások relatív szórása.

Az 54. ábrán az eloszlásokat jellemző ferdeség, az 55. ábrán pedig a kurtózis látható, amelyek alakulása hasonló, viszont különböző tartományon vesznek fel értékeket. A  $z = 20$  mm fúvókatávolságban a permet belső tartományán konstans, majd növekvő értékeket vesznek fel, amik a permet széli pontokban visszaesnek. A  $z = 40$  mm fúvókatávolságban a permet középső részén az előzőnél szélesebb keresztmetszetben konstans értéket vesznek fel, majd szintén növekedés tapasztalható. A  $z = 60$  mm fúvókatávolságban a szimmetriatengelyen lokális maximumtól csökkennek az értékek, majd a görbék konvexitása megváltozik és növekedik a permet széle felé.

A ferdeség és kurtózis növekszik a fúvókatávolság növekedésével és a porlasztónyomás csökkenésével. A szűrés segítségével a  $z = 40$  és  $60$  mm távolságban a görbék parabola alakúak, a  $z = 20$  mm távolságban a görbék alakja hasonló maradt. A görbék minden fúvókatávolságban egybevágóvá válnak, az értékek csökkennek a szűrés segítségével.



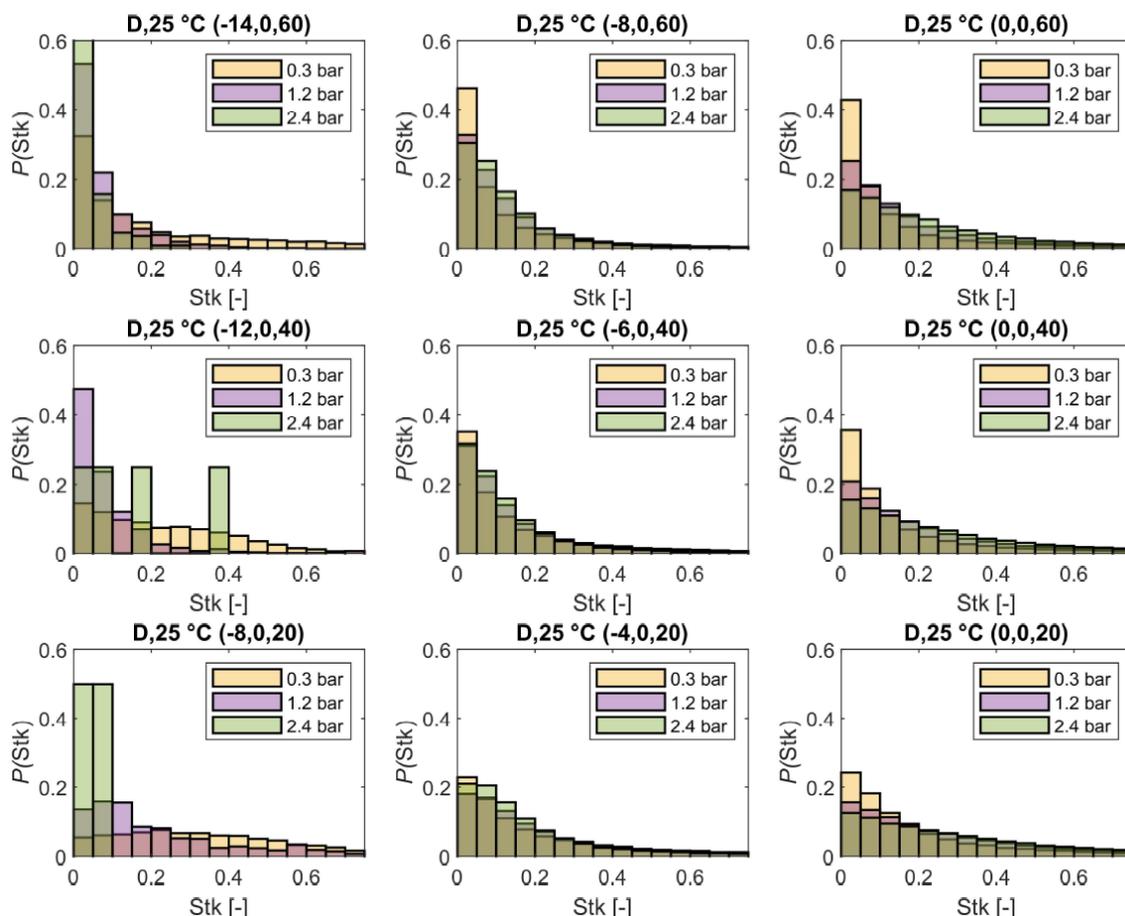
54. ábra: Reynolds szám eloszlások ferdesége.



55. ábra: Reynolds szám eloszlások kurtózis értéke.

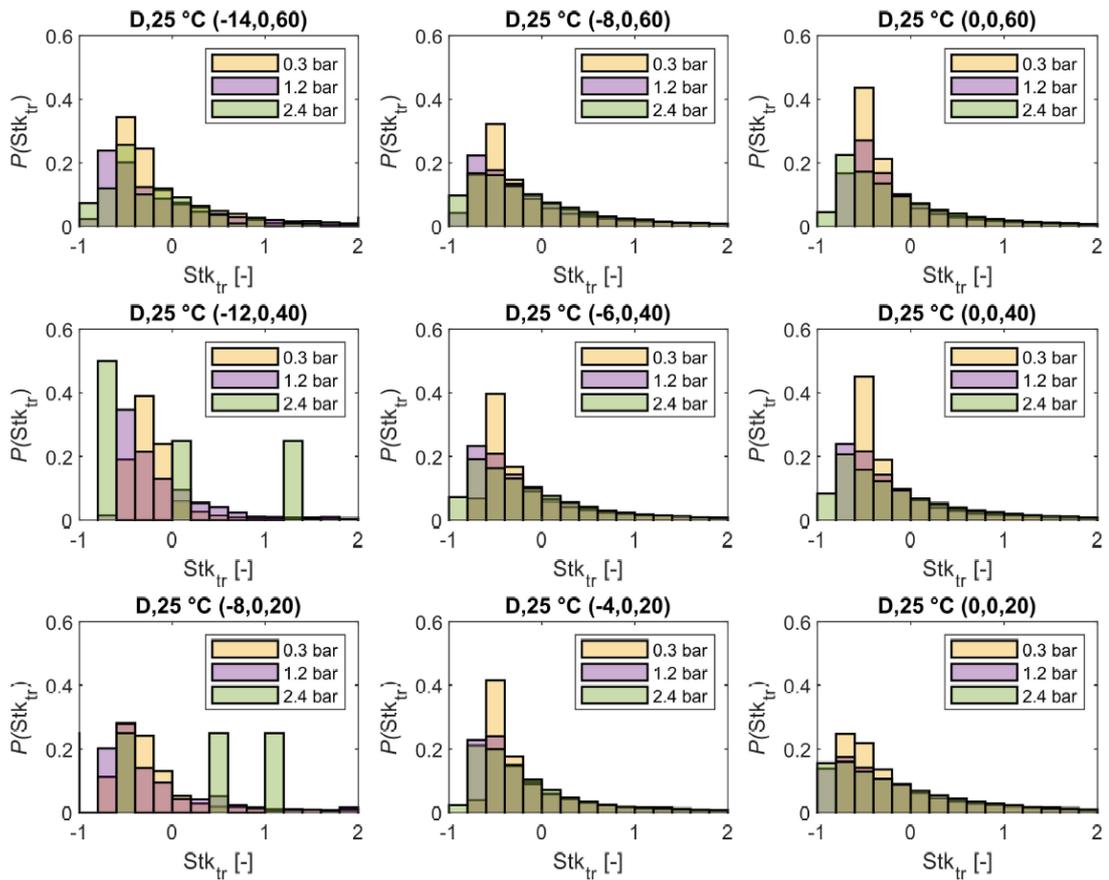
## 5.5. Stokes szám

A Stokes szám eloszlások esetén a Reynolds számhoz hasonlóan megjelennek a cseppméret és sebességeloszlások tulajdonságai, így a két dimenziótlan szám eredményei hasonlóságot mutatnak. Az 56. ábrán látható, hogy az eloszlások erősen elnyúltak, e legtöbb csepp Stk értéke 0,1 alatti. Az 57. ábrán látható dimenziótlan eloszlások a porlasztónyomás növekedésével lapultabbak, viszont a permetszéli pontok kivételével adott nyomáson egybevágóak. A permetszéli pontokban a Stokes szám eloszlások erősen irregulárisak.

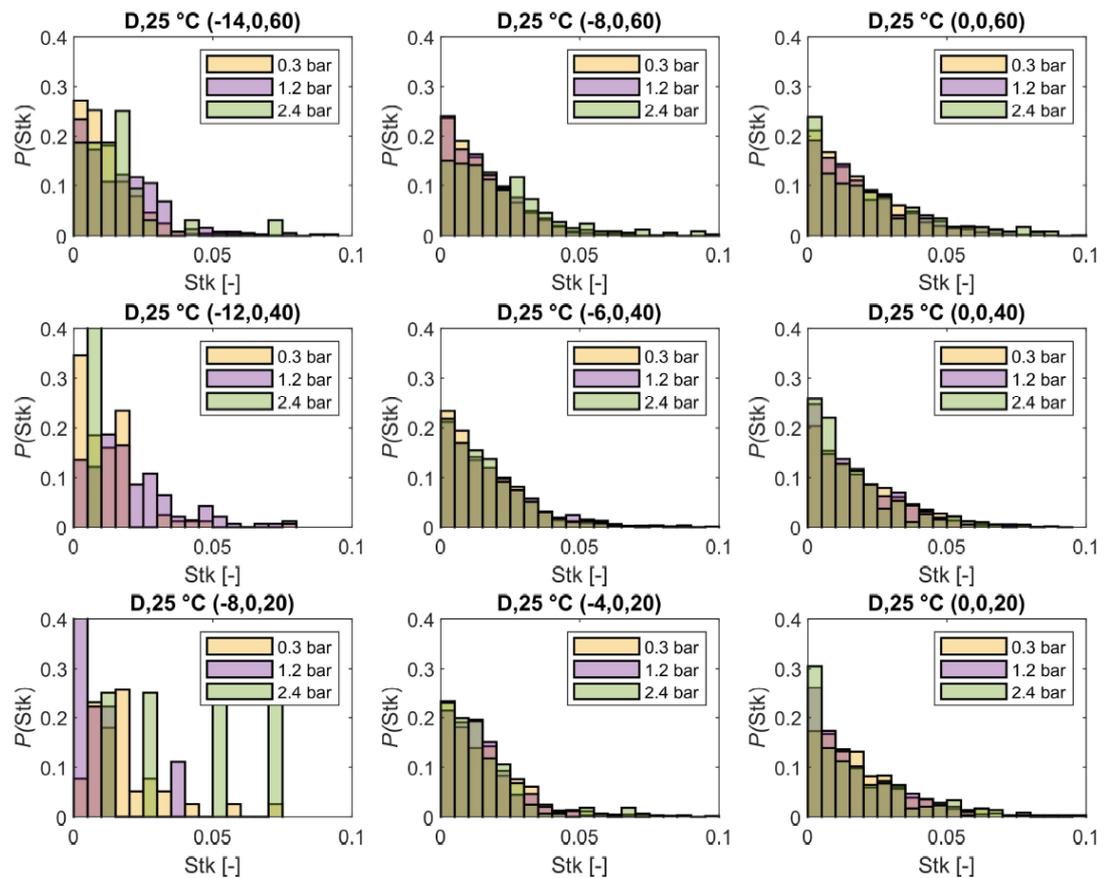


56. ábra: Eredeti adatsorok Stokes szám eloszlásai.

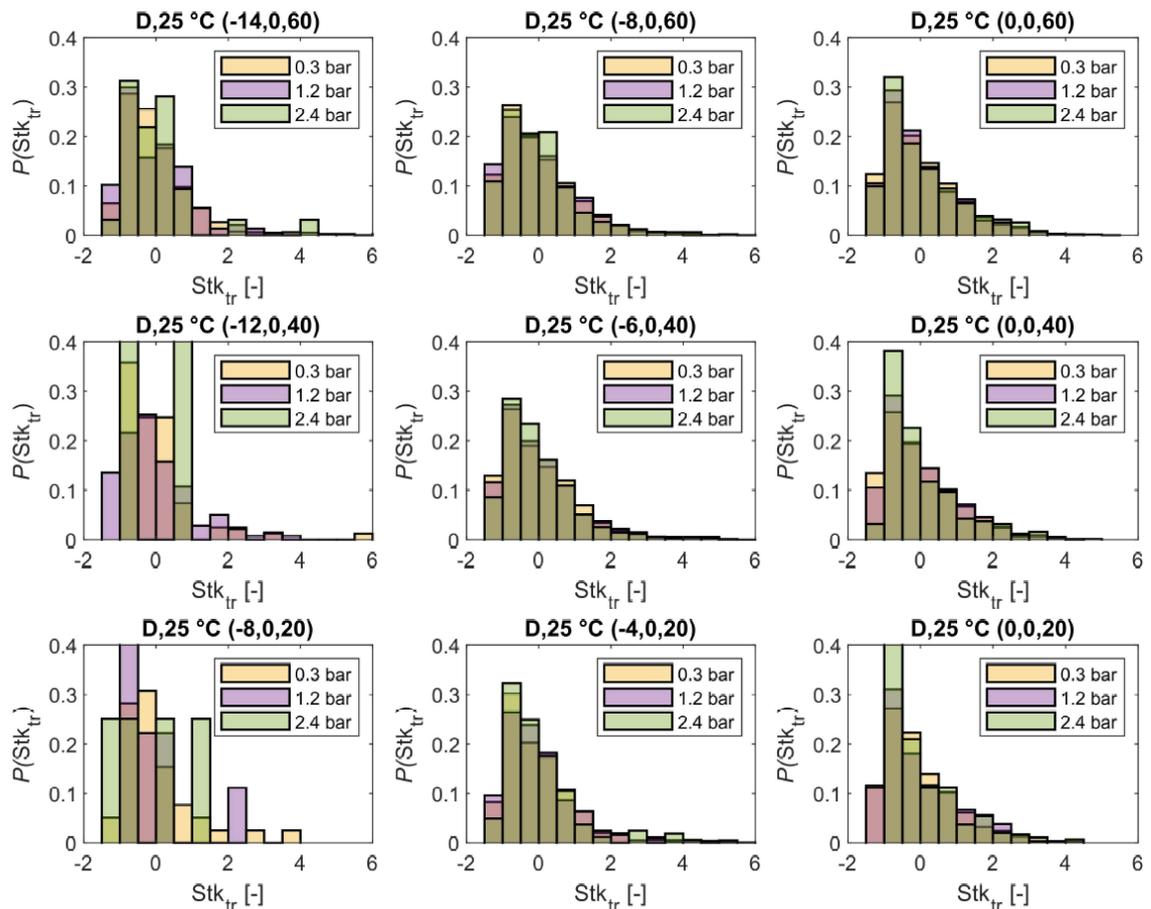
A szűrés eredményeként a maximális Stk érték 0,1, emiatt az eloszlások alakja jelentősen változik. A szűrt Stokes szám eloszlások az 58. ábrán láthatóak. A Stk értékek valószínűsége közel egyenletesen csökken 0,05 értékig, majd az eloszlás farok része 0,1 értékig nyúlik el, azaz a feltételnek megfelelő elemek nagyrésze 0,05 érték alatti Stokes számmal rendelkezik. Az 59. ábra mutatja a szűrt Stokes szám eloszlások dimenziótlan alakjait. Az  $x$  és  $z$  távolság növekedésével az eloszlások lapultabbak, a porlasztónyomás hatása mérséklődik.



57. ábra: Eredeti adatsorok dimenziótlan Stokes szám eloszlásai.



58. ábra: Szűrt adatsorok Stokes szám eloszlásai.



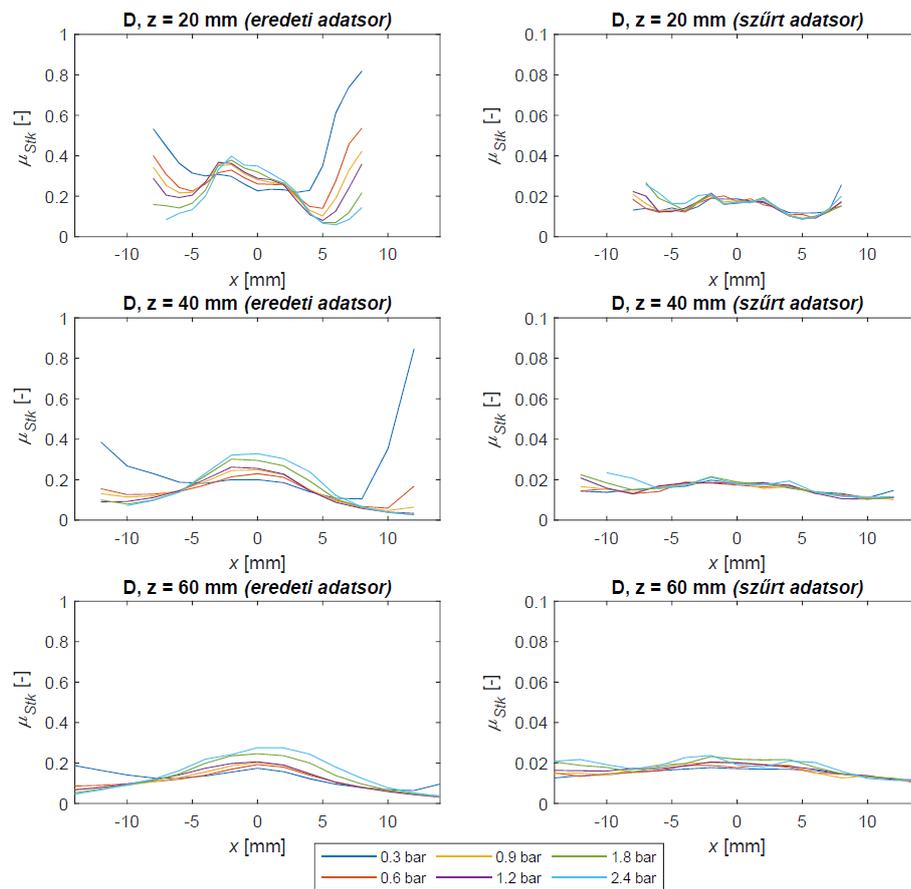
59. ábra: Szűrt adatsorok dimenziótlán Stokes szám eloszlásai.

A 60. ábrán az eloszlások átlag értékei láthatóak. Az eredeti adatsorok eredményei hasonlóak a Reynolds számok átlagaihoz (51. ábra), viszont a permet szélén a görbék széttartóak, ez a tulajdonság a cseppméretek esetén is tapasztalható (33. ábra). A tulajdonság felerősödését annak tudhatjuk be, hogy a Stokes szám négyzetesen arányos a cseppmérettel.

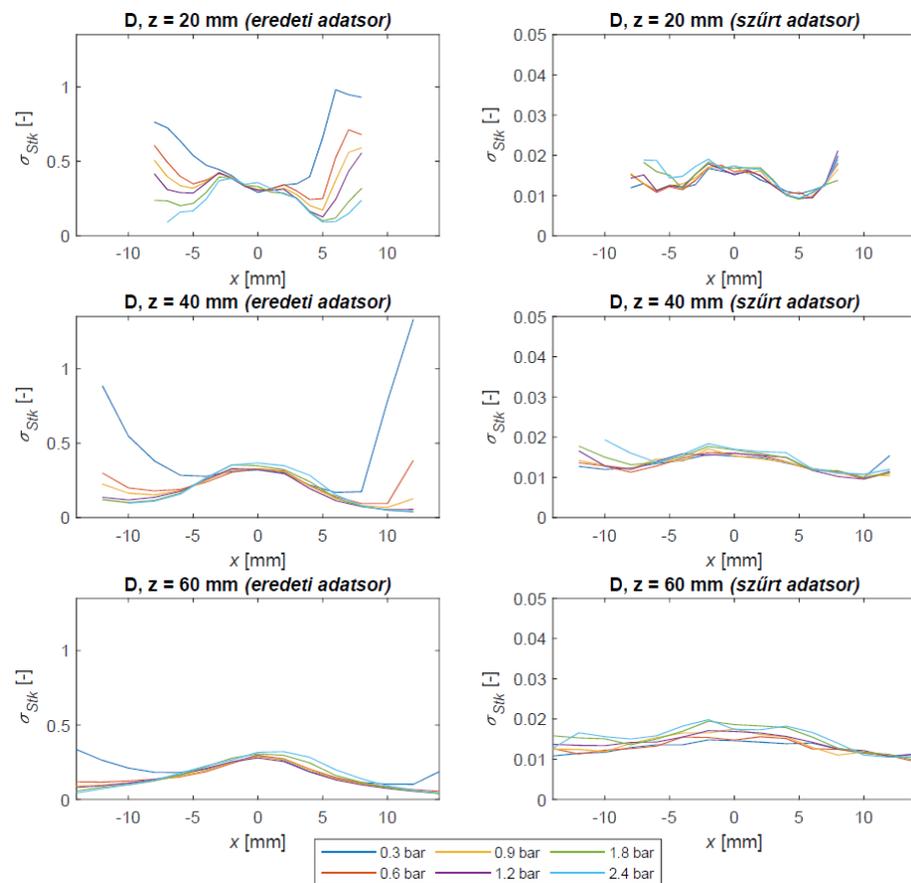
Míg szűrt adatsorokhoz tartozó Reynolds szám átlag görbéi (51. ábra) függenek porlasztónyomástól, addig a Stokes szám esetén (60. ábra) a görbék egybevágóak. A permet szimmetriatengelye körüli szűk tartományban az átlag értéke közel konstans, majd lecsökken. A permetszéli pontokban növekedés tapasztalható.

A 61. ábrán látható szórás értékek görbéi hasonló alakúak az átlagok görbéihez. Emellett a görbék által felvett érték is közel megegyezik, ez látható a 6. ábrán, ahol a relatív szórás görbék kb. 1 érték körül mozognak.

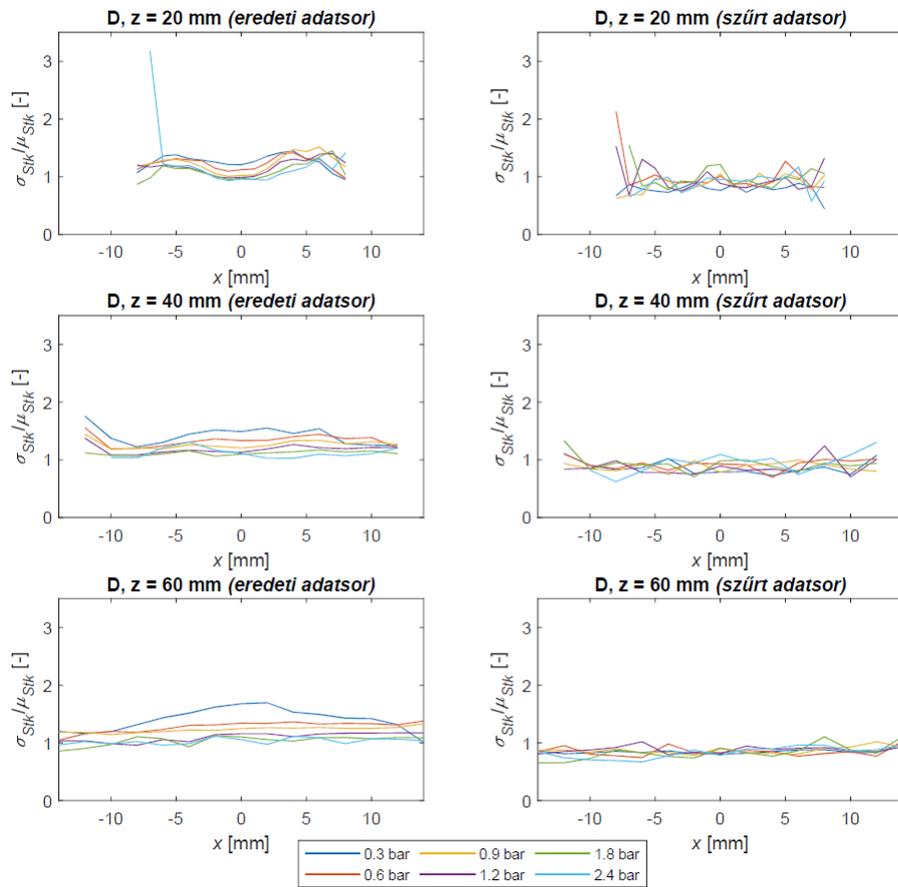
A Stokes szám eloszlások relatív szórás (62. ábra), ferdeség (63. ábra) és kurtózis (64. ábra) értékeinek alakulása megegyezik a Reynolds szám eloszlások esetén tapasztaltakkal, így ezek értékelése megtalálható a 5.4 fejezetben. A Stokes szám eloszlások átlag és szórás görbéi a különböző  $z$  fúvókatávolságokban, emellett a ferdeség (63. ábra) és kurtózis (64. ábra) görbéi  $z = 40$  és  $60$  mm távolságban hasonlóak.



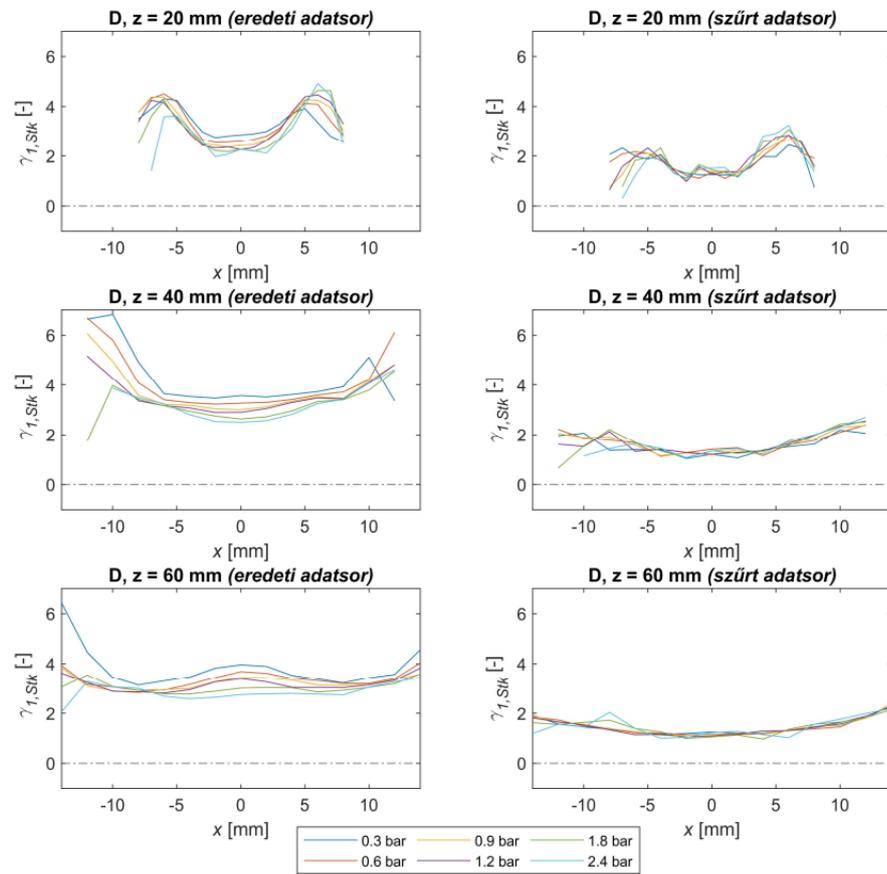
60. ábra: Stokes szám eloszlások átlagai.



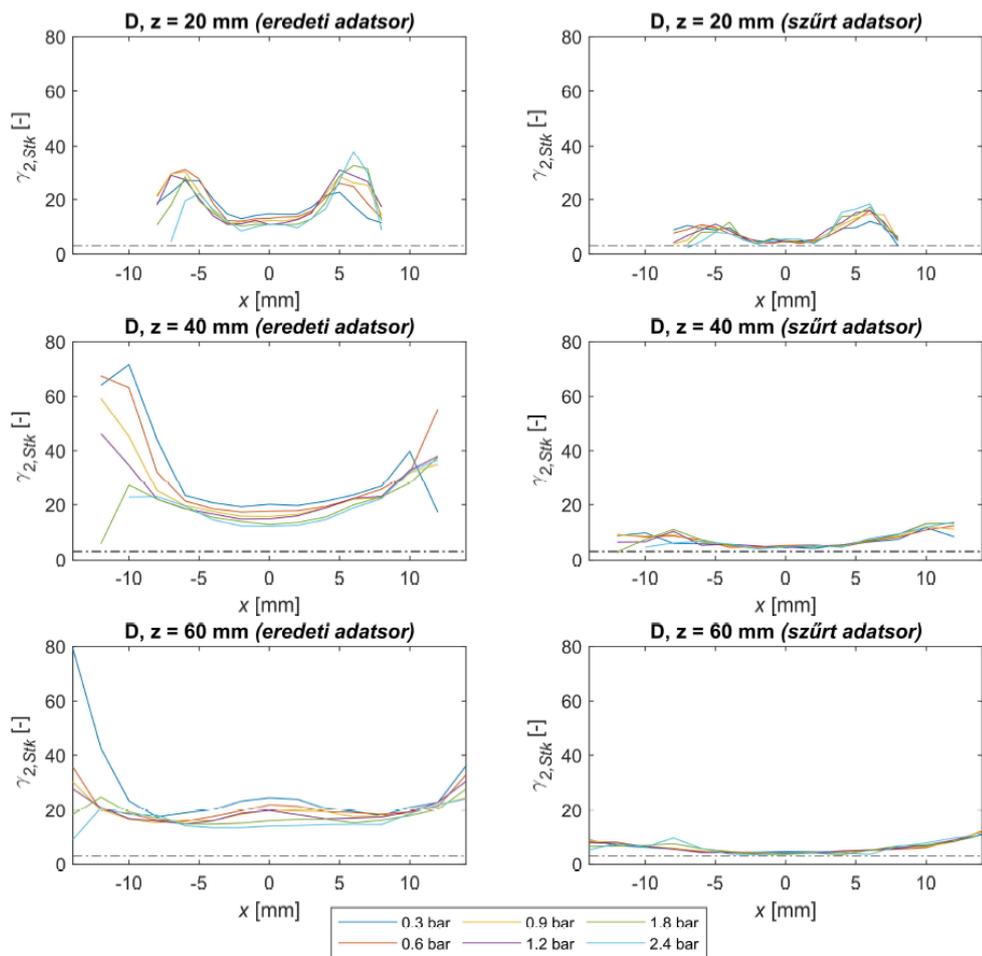
61. ábra: Stokes szám eloszlások szórásai.



62. ábra: Stokes szám eloszlások relatív szórásai.



63. ábra: Stokes szám eloszlások ferdesége.



64. ábra: Stokes szám eloszlások kurtózis értékei.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat célja a levegő segédközeges porlasztóval képzett kétfázisú turbulens áramlás áramlási viszonyainak elemzése volt olyan statisztikai módszer kidolgozása révén, amely a porlasztási körülmények és a permet tulajdonságaitól függetlenül alkalmazható. A permetképződés folyamatának leírásához szükség van a folyadék és gáz fázis jellemzőinek ismeretére, amelyek az áramlás jellegéből fakadóan matematikai módszerekkel nehezen számíthatóak. Ebből kifolyólag az áramlás vizsgálata mérésel történhet, az eredmények vizsgálata pedig statisztikai módszerek segítségével. Munkám során négy folyadék (dízelolaj, könnyű fűtőolaj, nyers repceolaj és víz) Fázis Doppler Anemométerrel történő mérési eredményeit vizsgáltam, amik a cseppek méret és sebességkomponenseit tartalmazzák.

A folyadékfázis vizsgálata a mérési eredmények alapján statisztikai eszközök használatával megvalósítható, viszont a gázfázis vizsgálatához összetettebb módszer kidolgozása szükséges. A gáz fázis közelítése történhet az áramláskövető cseppek kiválasztásával és elemzésével, amely nem triviális feladat. A szakirodalomban a cseppeket a  $Stk < 0,1$  áramláskövető feltételnek megfelelő tartományra szűrik le. Ehhez az értékhez néhány  $\mu m$  átmérőjű határcseppméretet állapítanak meg, ami mérések tapasztalati értéke. A  $Stk$  feltétel és a határcseppméret közötti összefüggésről viszont kevés információ áll rendelkezésre.

A kidolgozott értékelési módszer segítségével a  $Stk$  feltétellel meghatározott határcseppméret és a porlasztási körülmények, folyadék anyagjellemzők közötti kapcsolatot vizsgálhattam. Azt tapasztaltam, hogy a permet egy lehatárolható térfogatában a határcseppméret közel konstans értéket vesz fel, amely a permet szélső pontjaiban megnövekszik. Az értéke 5-10  $\mu m$  között változik a porlasztónyomástól és a fúvókátávolságtól függően.

A határcseppméretek segítségével kiszűrtem az adatsorok elemeit, amelyek áramláskövető tulajdonságuk révén jellemzik a gáz fázist. A folyamat segítségével az cseppek kb. 10-20%-a került lehatárolásra. A szűrés közben elvégeztem a cseppek Stokes és Reynolds szám számítását, így a cseppméret és sebesség adatsorok mellett két, az áramlás jellemzésére alkalmazható dimenziótlan szám is rendelkezésre áll. Ezután össze tudtam hasonlítani az eredeti és a szűrt adatsorok eloszlásait mind a négy mennyiség esetén. A hasonlóság vizsgálatát az eloszlások dimenziótlanításával végeztem el, amely számszerűsítésére a statisztikai momentumokat használtam (átlag, szórás, relatív szórás, ferdeség, kurtózis). Az eloszlások alakjának jellemzése, a porlasztási paraméterekkel való kapcsolatok és a szűrés hatásának megfigyelése így egyszerű, de általános eszközökkel lehetséges.

Az eredmények a továbbiakban a permetképződés folyamatát leíró összefüggések megalkotásához adnak információt mind folyadék és gáz fázisok esetén. Emellett új információt szerezhetünk az áramláskövetés jellemzőiről, illetve a permetkép elemzéséhez szükséges statisztikai eszközökről.

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Lefebvre AH. *GAS Turbine Combustion, Second Edition*. 1998.
- [2] Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30299-5>.
- [3] 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>.
- [4] Leroux S, Dumouchel C, Ledoux M. The stability curve of Newtonian liquid jets. *At. Sprays*. vol. 6., 1996, p. 623–47. <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.v6.i6.10>.
- [5] Lefebvre AH, McDonnell VG. *Atomization and Sprays, Second Edition*. 2017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315120911>.
- [6] Hinze J, Shell-laboratory RD. *Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes* n.d.;1:289–95.
- [7] Hsiang LP, Faeth GM. Drop deformation and breakup due to shock wave and steady disturbances. *Test* 1995;21:545–60.
- [8] Faeth GM, Hsiang LP, Wu PK. Structure and breakup properties of sprays. *Int J Multiph Flow* 1995;21:99–127. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(95\)00059-7](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00059-7).
- [9] Guildenbecher DR, López-Rivera C, Sojka PE. Secondary atomization. *Exp Fluids* 2009;46:371–402. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0593-2>.
- [10] Lajos Tamás. *Az áramlástan alapjai*. 4th ed. Budapest: Lajos Tamás; 2008.
- [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] Beér JM, Chigier NA. *Combustion Aerodynamics*. Malabar, Florida: Robert E. Krieger Publishing Company; 1983.
- [13] Abramovich GN. *The theory of turbulent jets*. Massachusetts Institute of Technology; 1963.
- [14] Wygnanski I, Fiedler H. Some measurements in the self-preserving jet. *J Fluid Mech* 1969;38:577–612. <https://doi.org/10.1017/S0022112069000358>.
- [15] Pope SB. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press; 2000.
- [16] Crowe CT, Schwarzkopf JD, Sommerfeld M, Tsuji Y. *Multiphase flows with droplets and particles*. Second. 2012.
- [17] Crowe CT. On models for turbulence modulation in fluid-particle flows. *Int J Multiph Flow* 2000;26:719–27. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(99\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(99)00050-6).
- [18] Elghobashi S. On predicting particle-laden turbulent flows. *Appl Sci Res* 1994;52:309–29. <https://doi.org/10.1007/BF00936835>.
- [19] Lau TCW, Nathan GJ. The effect of Stokes number on particle velocity and concentration distributions in a well-characterised, turbulent, co-flowing two-phase jet. *J Fluid Mech* 2016;809:72–110. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.666>.
- [20] Krstic M. Chapter 9 MIXING CONTROL FOR JET FLOWS n.d.:87–96.

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369394-5.50013-5>.
- [21] Ouellette NT, Xu H, Bourgoïn 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>.
- [22] Nierhaus T. Modeling and simulation of dispersed two-phase flow transport phenomena in electrochemical processes 2009.
- [23] Lefebvre AH. Airblast atomization. *Prog Energy Combust Sci* 1980;6:233–61. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(80\)90017-9](https://doi.org/10.1016/0360-1285(80)90017-9).
- [24] 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>.
- [25] Albrecht H-E, Borys M, Damaschke N, Tropea C. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. 2003. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05165-8>.
- [26] Dantec Dynamics. LDA and PDA Reference Manual. 2011.
- [27] Note T. ACCURACY, RESOLUTION, AND REPEATABILITY OF POWERSIGHT PDPA AND LDV SYSTEMS Doppler Frequency Signal Processing n.d.:8–11.
- [28] Walpole RE, Myers RH, Myers SL, Ye K. *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. 9th ed. Boston: 2011.
- [29] Find outliers in data - MATLAB isoutlier n.d. [https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/isoutlier.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/isoutlier.html?s_tid=doc_ta) (accessed October 10, 2021).
- [30] 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>.
- [31] Obádovics J. Gyula - Valószínűségyszámítás és matematikai statisztika (2003) - libgen.lc.pdf n.d.
- [32] Rácz E, Józsa V. Porlasztás sebességképezének elemzése statisztikai momentumok segítségével. XXIX Nemzetközi Gépészeti Konf – OGÉT 2021 2021:72–5.
- [33] Rácz E, Józsa V. Levegő-segédközeges porlasztó dimenziótlan sebességprofiljainak értékelése. *Magy Energ* 2021;XXVIII. 3:42–8.
- [34] Average or mean value of array - MATLAB mean n.d. [https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/mean.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/mean.html?s_tid=doc_ta) (accessed October 9, 2021).
- [35] Standard deviation - MATLAB std n.d. [https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/std.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/std.html?s_tid=doc_ta) (accessed October 9, 2021).
- [36] Skewness - MATLAB skewness n.d. <https://www.mathworks.com/help/stats/skewness.html?searchHighlight=skew>

- ness&s\_tid=srchtitle (accessed October 9, 2021).
- [37] Kurtosis - MATLAB kurtosis n.d.  
[https://www.mathworks.com/help/stats/kurtosis.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/stats/kurtosis.html?s_tid=doc_ta) (accessed October 9, 2021).
- [38] Jedelsky J, Jicha M. Droplet dynamics in internally mixed twin-fluid spray. *WIT Trans Eng Sci* 2014;82:227–38. <https://doi.org/10.2495/AFM140201>.
- [39] 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>.