

LEVEGŐSZŰRŐK HATÉKONYSÁGÁNAK MÉRÉSE III. RÉSZ: AZ AEROSZOL-MINTAVÉTELI TECHNIKÁK, IZOKINETIKUS MINTAVÉTEL, MINTAVÉTEL HATÉKONYSÁGA, MINTÁZÁSI VESZTESÉGEK

EFFICIENCY TEST OF THE AEROSOL FILTERS PART III. AEROSOL SAMPLING METHODS, ISOKINETIC SAMPLING, SAMPLING EFFICIENCY, LOSSES IN SAMPLING LINE

CSURGAI József

(ORCID: 0000-0003-4770-7997)

jcsurgai@gmail.com

Absztrakt

Jelen írás egy többrészes cikksorozat harmadik darabja, amely részletesen foglalkozik mindenfajta aeroszol-koncentráció mérésének központi eljárásával, a nyugvó és áramló légnemű közegekből való helyes mintavétel szabályaival, valamint áttekinti a mintavétellel együtt járó veszteségeket.

A publikáció a KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés” projekt támogatásával, Ludovika Kiemelt Kutatóműhely keretében készült.

Kulcsszavak: aeroszolrészecske-fizika, Knudsen-szám, Stokes-szám, részecskeszámlálás, egyezményes frakciók, vágási méret, izokinetikus mintavétel, tehetetlenségi impaktorok.

Abstract

The actual paper is the third part of series of papers investigating the central procedure of the aerosol measurements – the proper methods and principles of the particle sampling from static and flowing gaseous media, describing losses during sampling.

The work was created in commission of the National University of Public Service under the priority project KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 titled „Public Service Development Establishing Good Governance” in the Ludovika Workshop.

Keywords: aerosol-particle physics, Knudsen number, Stokes number, particle counting, standard sampling fractions, cut-size, isokinetic sampling, inertial impactors.

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2018.09.23.

A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2018.12.19.

BEVEZETÉS

A jelen cikk egy cikksorozat harmadik része, ahol figyelmünket egy nagyon gyakorlatias témának szenteljük, az aeroszolok mintavételezésének, a mintázás helyes technikájának kialakításának és a mintázás során óhatatlanul bekövetkező veszteségek mérséklésének. A sorozat korábbi részeiben egyrészt megismerkedtünk az aeroszolok szűrésével, az aeroszol- és porszűrők minősítésének rendszerével [1], a második részben [2] sikerült áttekinteni az aeroszol részecskék fizikai tulajdonságait, az áramló légnemű közeggel való alapvető kölcsönhatásait, olyan mélységig, ami lehetővé teszi egy adott mintavételi feladathoz helyesen kialakítani a mintavevő rendszert. A jelen cikk az aeroszolmérés kulcsfontosságú részét kívánja feldolgozni, nevezetesen a mintavételt. Ennek érdekében meg kell ismerkednünk a különböző állapotú levegőből történő mintavételezés törvényszerűségeivel, valamint foglalkoznunk kell a mintavétel során fellépő veszteségekkel, azok forrásaival, annak érdekében, hogy egyrészt lehetőség szerint csökkentjük azokat, másrészt kalibrációs összefüggésekkel kompenzáljuk hatásukat. Mivel ebben a cikkben is egy sor összefüggést fogunk használni, amelyek az aeroszol részecskéknek az előző cikkben tárgyalt fizikai tulajdonságain alapulnak, így, a könnyebb megértés kedvéért, formabontó módon (talán megbocsájtja a kedves Olvasó), itt, a bevezetésben újra felsoroljuk táblázatosan azokat a jelöléseket, amelyeket az előző cikkben és a jelen cikkben azonos módon szerepelnek, illetve néhány új jelöléssel kiegészítjük, mivel új fogalmakat is bevezettünk:

v_s	Részecske ülepedési sebessége
F	Külső erő
F_m	Közegellenállási (súrlódási) erő
F_{th}	Termoforézis által ható erő
F_C	Coulomb erő
d	Részecske jellemző mérete
d_c	Akadály jellemző mérete
D	Csőátmérő (áramlási keresztmetszetre jellemző lineáris mennyiség)
v_m	Közeg viszkozitása
C_C	Cunningham-faktor: csúszási faktor, minél kisebb a részecske, annál inkább el tud csúszni a közeg molekulái között, vagyis egyre jelentősebb lesz a közeg részecskéivel való egyes ütközéseknek a hatása (Brown-mozgás) a közegellenállásból fakadó erők hatásához képest. Valójában 1 μm részecskeméret alatt lesz jelentősége
A_1	Tapasztalati konstans, értéke: 1,257 (Cunningham-faktor számításához szükséges)
A_2	Tapasztalati konstans, értéke: 0,4 (Cunningham-faktor számításához szükséges)
A_3	Tapasztalati konstans, értéke: 0,55 (Cunningham-faktor számításához szükséges)
X	Részecske alak-faktor

λ	A közeg molekulái által megtett átlagos szabad úthossz
n_m	Molekulasűrűség – egységnyi térfogatra eső gázmolekulák száma, $n_m = p/(kT)$
m	Részecske tömege
g	Gravitációs gyorsulás, értéke a 45° földrajzi szélességen, tengerszinten: $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$
ρ_p	Aeroszol-részecskék sűrűsége
ρ_m	Közeg sűrűsége
ρ_0	Egységnyi sűrűség, 10^3 kg/m^3
s_p	Megállási távolság (másképp relaxációs hossz)
τ	Relaxációs idő
ν_d	A közeg dinamikai viszkozitása
T	Abszolút hőmérséklet
T_d	A mintavevő cső hőmérséklete
T_g	A közeg hőmérséklete a mintavevő csőben
T_p	Az aeroszol részecske hőmérséklete
k	Boltzmann-állandó, $k = 1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
N	Aeroszol részecskeszám-koncentráció
Diff	Diffúziós tényező
K	Koagulációs együttható
sd	Standard deviáció
σ_p	Szórás
μ	A lognormális eloszlás sűrűségfüggvényének maximuma (modus), itt a leggyakoribb részecskeméret
d_R	Leggyakoribb részecskeméret egy szórásértékkel növelt értéke
d_L	Leggyakoribb részecskeméret egy szórásértékkel csökkentett értéke
CMD	Leggyakoribb részecskemérethez tartozó átmérő (Count Median Diameter)
MMD	Leggyakoribb részecsketömeghez tartozó átmérő (Mass Median Diameter)
u_0	A közeg áramlási sebessége a mintavételi pont környezetében
Q	Mintavételi térfogatáram
u	A közeg áramlási sebessége a mintavevő cső belsejében

u_{th}	Termoforézis útján, a részecske által nyert sebességkomponens
u_{ep}	Elektroforézis útján, a részecske által nyert sebességkomponens
Re	A közeg áramlási képét meghatározó Reynold-szám, gömbszimmetrikus testre: $Re \leq 1$ – lamináris tartomány, $Re \geq 600$ – turbulens, köztes: átmeneti
Kn	Knudsen-szám, a közeg molekuláinak közepes szabad úthosszának és az aeroszol részecske jellemző méretének viszonya, meghatározza az áramlás, illetve az aeroszolok viselkedésének természetét, minél nagyobb, annál könnyebben kikerülnek a közeg molekulái a részecskét. A részecskeméret növekedésével a Kn csökken.
Stk	Stokes-szám, a relaxációs úthossz és a részecske útjába eső akadály méretének aránya. A relaxációs úthossz egy adott távolság, amely szükséges a részecskének, hogy kövesse az áramlási tér anomáliáit. Minél nagyobb, annál könnyebben kilép az adott részecske az áramlásból, annak szignifikáns irányváltozása esetén. A részecskeméret növekedésével a Stk nő.
d_v	A részecske térfogatra vonatkoztatott átmérője
d_s	A részecske felületre vonatkoztatott átmérője
d_{sv}	A részecske fajlagos felületre vonatkoztatott átmérője
d_A	A részecske velületre vonatkoztatott átmérője
d_p	A részecske kerületre vonatkoztatott átmérője
d_{ST}	A részecske Stokes-átmérője
d_{ae}	A részecske aerodinamikai átmérője
d_{diff}	Diffúziós egyenérték átmérő
$f(Re)$	Részecskére ható súrlódási (közegellenállási) együttható
X	A szabálytalan alakú részecske gömbre vonatkoztatott aerodinamikai alakfaktora, kvarchomokra pl.: $X = 1,36$
k_m	A közeg hővezetési tényezője
k_p	A részecske anyagának hővezetési tényezője
q_p	A részecske elektromos töltése
K_C	Coulomb állandó, $K_C = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$
E	Elektromos térerősség
U	Elektromos térerősséget létrehozó potenciálkülönbség

1. táblázat A cikkben alkalmazott jelölések és jelentésük (saját szerkesztés)

Még egy dologra kell felhívni a kedves Olvasó figyelmét. Szintén formabontó módon, számos hivatkozás számozása nem követi az előfordulás sorrendjét, aminek oka az, hogy az előző cikk forrásaira támaszkodom és ezt változatlan formában közlöm.

NYUGALOMBAN LÉVŐ LEVEGŐBŐL, ILLETVE KÖRNYEZETBŐL TÖRTÉNŐ AEROSZOL MINTAVÉTELEZÉS

Mint a méréseknél általában, itt is a művelet kritikus pontja a mintavételezés. Egy zárt térben, helyiségben végzett mérésnél, mint például tisztatér méréseknél, viszonylag nyugalomban lévő közegből veszünk mintát. Azért hangsúlyozzuk a viszonylagosságot, mert azért egy zárt térben is van mozgás a tevékenységek miatt, vagyis, a levegőben helyi rendszertelen áramlás alakul ki. Ennek ellenére, a közeg viszonylagos nyugalomban van, a rá jellemző részecskeeloszlással. Amikor mintát veszünk, ezt az állapotot „megbolygatjuk” és a részecskékre más áramlási helyzetet kényszerítünk. Ugyanezt mondhatjuk el a környezetből történő mintavételről is, bár a környezeti mintavétel során az aktuális szélviszonyok miatt a közeg többé-kevésbé áramlik, azonban ebben az esetben sem beszélhetünk stacionárius áramlásról, így a mintázás szempontjából legkedvezőbb módszer, a nyugvó közegből történő mintavételi eljárás lesz.

Különböző munkahelyek és intézmények levegőminőség-ellenőrzése során általában ismert térfogatú levegőt szívattunk keresztül egy adott tömegű szűrőn, amely a belélegezhető, vagy a respirábilis aeroszol frakció mintavételére kialakított mintavételi feltétben helyezkedik el. Az expozíciónak kitett személyek környezetében azon aeroszol típusokat és méretfrakciókat vizsgáljuk, amik az adott helyre jellemző folyamatok során keletkeznek és egy jellemző kritériumrendszer alapján a levegőben jelen lévő koncentrációjukat valamilyen egészségügyi határérték alatt kell tartani. Ezt megfelelő szellőztetéssel és a levegőminőség monitoringjával kell biztosítani.

Egyezményes aeroszol-részecske tartományok

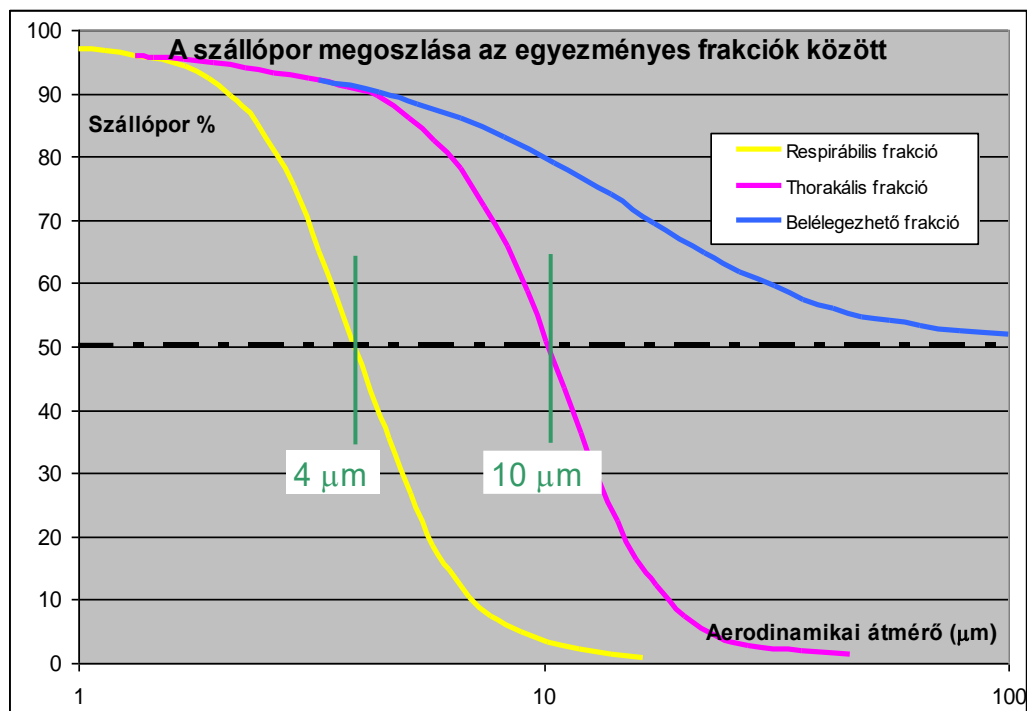
A munkahelyi aeroszokok belélegezhető, respirábilis és thorakális frakcióját az MSZ EN 481[8] és az ISO Standard 7708[9] definiálja. A szabványok meghatározása szerint a belélegezhető (vagy inhalábilis) frakció a munkahelyi aeroszokoknak az a tömegfrakciója, amelyet az egyén az orron és szájon át belélegez. A belélegezhető frakció a légmozgás sebességétől, irányától, a légzés gyakoriságától és egyéb tényezőktől (pl. attól, hogy levegővétel az orron és/vagy a szájon át történik-e) függ. A respirábilis frakció megközelítőleg azonos a munkahelyi aeroszokok azon tömegfrakciójával, amely bejut a tüdő alveolusaiba (gázcsereelő tartományába). Bár a legtöbb expozíciós határértéket az inhalábilis frakcióra adják meg, a hegesztési füstök és biológiai aeroszokok esetében a részecskék többsége 1 µm alatti aerodinamikai átmérővel rendelkezik, tehát a respirábilis frakcióba tartozik, míg a nukleáris létesítményekben üzemzavari, vagy baleseti helyzetben keletkező radioaktív aeroszokat a thorakális frakcióba sorolják, ami a gége alatti és az alveoláris régió fölött van. Az aeroszol frakcióknak az emberi légzőrendszeren belüli kiülepedési tartományait, valamint a részecskeméret szerinti eloszlását az alábbi, 1. ábra, a mérettartományokat és a mintavétel során alkalmazott vágási méreteket a 2. ábra szemlélteti:



1. ábra Az ISO Standard 7708 és az MSZ EN 481 által definiált aeroszol frakciók szemléltetésére szolgáló modell az emberi légzőrendszerrel [8][9][10]

Az aeroszlok egyezményes tartományok szerinti mintavételénél törekszünk az adott mérettartományon belüli reprezentatív mintavételre. Ennek érdekében három, egymást kiegészítő feltételnek teszünk eleget:

- A mintavevő bemenetének kialakítása biztosítsa az aeroszol részecskék vágási mérete alatti begyűjtését, a környező levegő széles tartományú áramlásától függetlenül (a respirábilis tartomány $4\ \mu\text{m}$, míg a thorakális $10\ \mu\text{m}$ alatt mintázandó);
- A mintavétel hosszában a mintavevő részegységei ne csapdázzanak szignifikáns részecskemennyiséget;
- A mintavevő feltét (fej) biztosítsa a részecskéknek a gyűjtőszűrőn való homogén eloszlását.



2. ábra Az aeroszolak egyezményes mérettartományai, valamint a mintázásnál alkalmazott vágási méretei [5].
(saját szerkesztés).

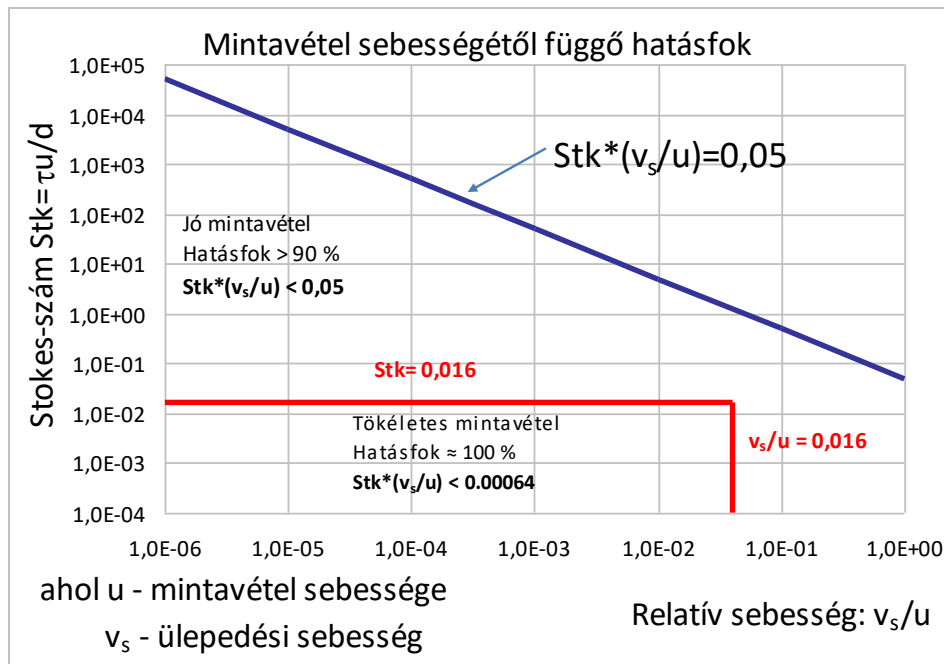
Mintavétel hatásfoka, mintavevő méretezése

A továbbiakban figyelmet kell szentelnünk annak, hogy hogyan függ a mintavétel hatásfoka és végső soron annak reprezentatív volta a mintavevő bemenetének kialakításától és méretétől, valamint a mintavétel sebességétől. Itt a veszteségek csökkentésének – adott méretű részecskék esetében – két, egymással versengő fizikai mennyiség közötti optimális tartomány definiálására van szükség:

- A mintavétel sebességének növelése arányos az adott méretű részecske relaxációs hosszának növekedésével, ami elősegíti annak a haladási áramvonalból történő kilépését, vagyis a falnak ütközést; ennek mérőszáma a Stokes-szám (Stk).
- A mintavétel sebességének növelése másrészt csökkenti az áramláshoz viszonyított ülepedési sebességarányt, ami megakadályozza a részecskék kiülepedését; ennek mérőszáma az ülepedési sebesség és a mintavételi sebesség aránya, az ún. relatív sebesség (v_s/u).

A két mennyiség szorzata hatásfok régiókat definiál és számunkra két régió bír gyakorlati jelentőséggel, a 90% és 99% feletti hatásfok régió. Minél kisebb a két mennyiség szorzata, annál nagyobb lesz a becsült hatásfok és a két nevezetes régiót az alábbi kritériumokkal tudjuk jellemezni:

- A $\eta > 90\%$ feletti régió esetében: $Stk \cdot (v_s/u) < 0,05$;
- A $\eta > 99\%$ feletti régió esetében: $Stk \cdot (v_s/u) < 0,00064$.



3. ábra A mintavétel hatásfokának függése a mintázó áramlási sebességétől és a mintázandó részecskék ülepedési sebességétől, illetve méretétől [6] (A szerző saját szerkesztésű ábrája).

A fenti ábrán bemutatott hatásfok-függés egyúttal azt is jelenti, hogy a maximális hatásfok elérése érdekében, a megfelelő méretű feltét kiválasztásánál ugyanezt a két, egymással versengő folyamatot kell figyelembe venni: a feltét minimális lineáris kiterjedés meghatározásánál a relaxációs utat, míg a maximális méretnél az ülepedési hosszat. Ezt az optimális méret-számítást látjuk az alábbi táblázatban, a megfelelő összefüggésekkel együtt. Egyébként (és főleg az ipari környezetben) a mintavételnél alkalmazott egyszerű mintázók mindenképpen jó, 90 %-nál lényegesen magasabb hatásfok mellett működnek és ez a gyakorlatban meg is felel nekünk, ezeket a megnyugtatóan alacsony méretkritériumokat láthatjuk a táblázatunk jobb oldalán, amelyek az adott méretű aeroszol részecskék relaxációs idejével jellemzett ülepedési hossz húszszorosát jelentik.

Mintavevő feltét átmérője (cm)		
Mintavételi térfogatáram / Q = 35 l/min		
Részecskeméret	Átmérő függő hatásfok	
	$\eta > 99\%$	$\eta > 90\%$
	$\left[\frac{4Q\tau}{0.016\pi} \right]^{1/3} \leq d < \left[\frac{0.16Q}{\pi v_s} \right]^{1/2}$	$d > 20\tau v_s$
1 μ m	0,5 < D < 93	D > 2*10 ⁻⁷
5 μ m	1,5 < D < 20	D > 1*10 ⁻⁴
10 μ m	2,4 < D < 10	D > 2*10 ⁻³
15 μ m	3,2 < D < 6.7	D > 9*10 ⁻³

2. táblázat A mintavétel hatásfokának függése a mintavevő feltét méretétől, a mintázandó részecskék függvényében [6] (A szerző saját szerkesztésű ábrája)

Ennek megfelelően, már egy tizedmilliméter átmérőjű kapilláris is 90 % feletti mintázási hatásfokot biztosít a 15 mikron alatti aeroszol-mérettartományra vonatkozólag. Egyes, speciális alkalmazásoknál pedig, például az ipari környezetben végzett HEPA szűrőket tartalmazó rendszereken végzett in-situ tesztek mintavételezésénél használt 6-8 mm belső átmérőjű egyszerű mintavevők bőven teljesítik a maximális hatásfokot a 0,3 mikron mérettartomány mintázásánál.

Aeroszol mintázási mérettartomány vágása, tehetetlenségi impaktor alkalmazása

Az egyezményes mérettartományok mintázásánál a 1.1. pontban kiemeltük, hogy a részecskéket az adott frakció vágási részecskemérete alatt kell gyűjtenünk, vagyis, a nagyobb részecskéket le kell választanunk az áramlásból, majd az áramlásban maradt frakció részecskéit a gyűjtőszűrőn „fogjuk meg”. Erre a célra különböző megoldásokat alkalmaznak, tehetetlenségi, virtuális, kaszkád- és testimpaktorokat, vagy ciklonokat, azonban itt csak a tehetetlenségi impaktort vizsgáljuk meg, mivel a működés elve analóg az összes változatnál.

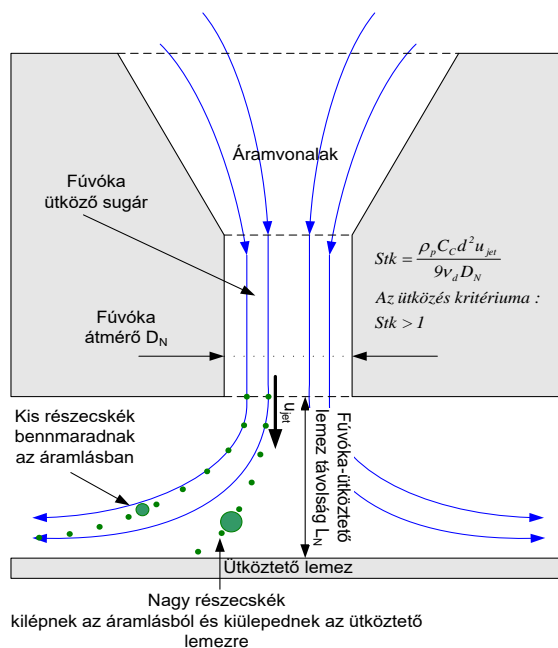
A tehetetlenségi impaktorokat széles paraméter tartományokban alkalmazzák:

- Vágási mérettartomány: 0,2 – 50 μm ;
- Térfogatáram tartomány: néhány cm^3/perc től néhány ezer m^3/perc ig;
- Mintavétel ideje: néhány perctől néhány óráig.

A működésnél alapvetően kihasználjuk a nagyobb részecskék nagyobb tehetetlenségét, vagyis:

- konfúzorral az áramlási sebességet a vágási mérethez számítva megnöveljük;
- az áramlás irányát ütköztető lemezzel hirtelen megváltoztatjuk;
- a vágási méretnél nagyobb részecskék az áramlásból kisodródhatnak és azokat az ütköztető lemezen felfogjuk (esetleg további elemzéshez gyűjtjük);
- az áramlásban maradt részecskéket egy gyűjtőszűrőn fogjuk fel pl. gravimetrikus méréshez, vagy a továbbáramló levegőáram aeroszol méretspektrumát elemezzük.

Az alábbi ábrán szematikusan láthatjuk, hogyan valósítható meg az elválasztás.



4. ábra A tehetetlenségi impaktor működése. (A szerző saját szerkesztésű ábrája).

Az ábrán látható összefüggés segítségével kifejezhetjük az adott vágási részecskemérethez alkalmazott impaktor méretezésének elvét:

Az impaktor, mint akadály, jellemző mérete a fúvóka sugara $D_N/2$ lesz. Így kiinduló összefüggésünk az alábbi:

$$Stk = \frac{s_p}{D_N/2} = \frac{\tau \cdot u_{jet}}{D_N/2} = \frac{\rho_p C_C d^2 u_{jet}}{9\nu_d D_N} \quad (1)$$

Mivel az ütközés kritériuma $Stk \approx 1$, így kapjuk a méretezés összefüggését:

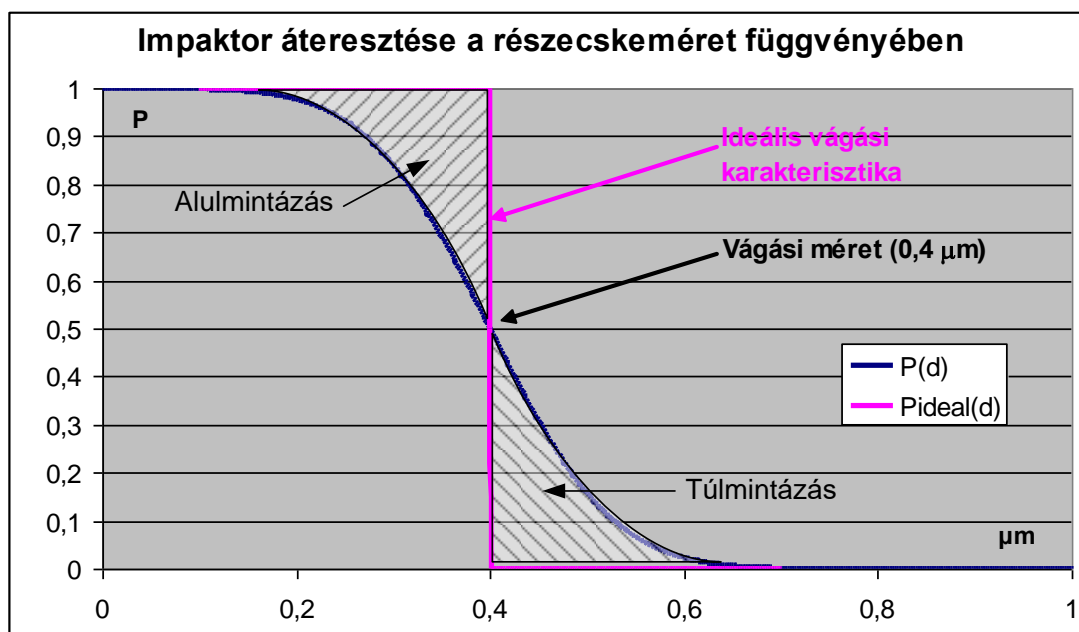
$$1 = \frac{\rho_p C_C d^2 u_{jet}}{9\nu_d D_N} \rightarrow \frac{u_{jet}}{D_N} = \frac{9\nu_d}{\rho_p} \cdot \frac{1}{C_C(d) d^2} \quad (2)$$

A vágási méret beállítása az impaktor átmérőjének és a fúvókából kilépő sugár sebességének változtatásával történik:

$$d_{cut} = \frac{9\nu_d}{\rho_p C_C(d)} \cdot \frac{D_N}{u_{jet}} \quad (3)$$

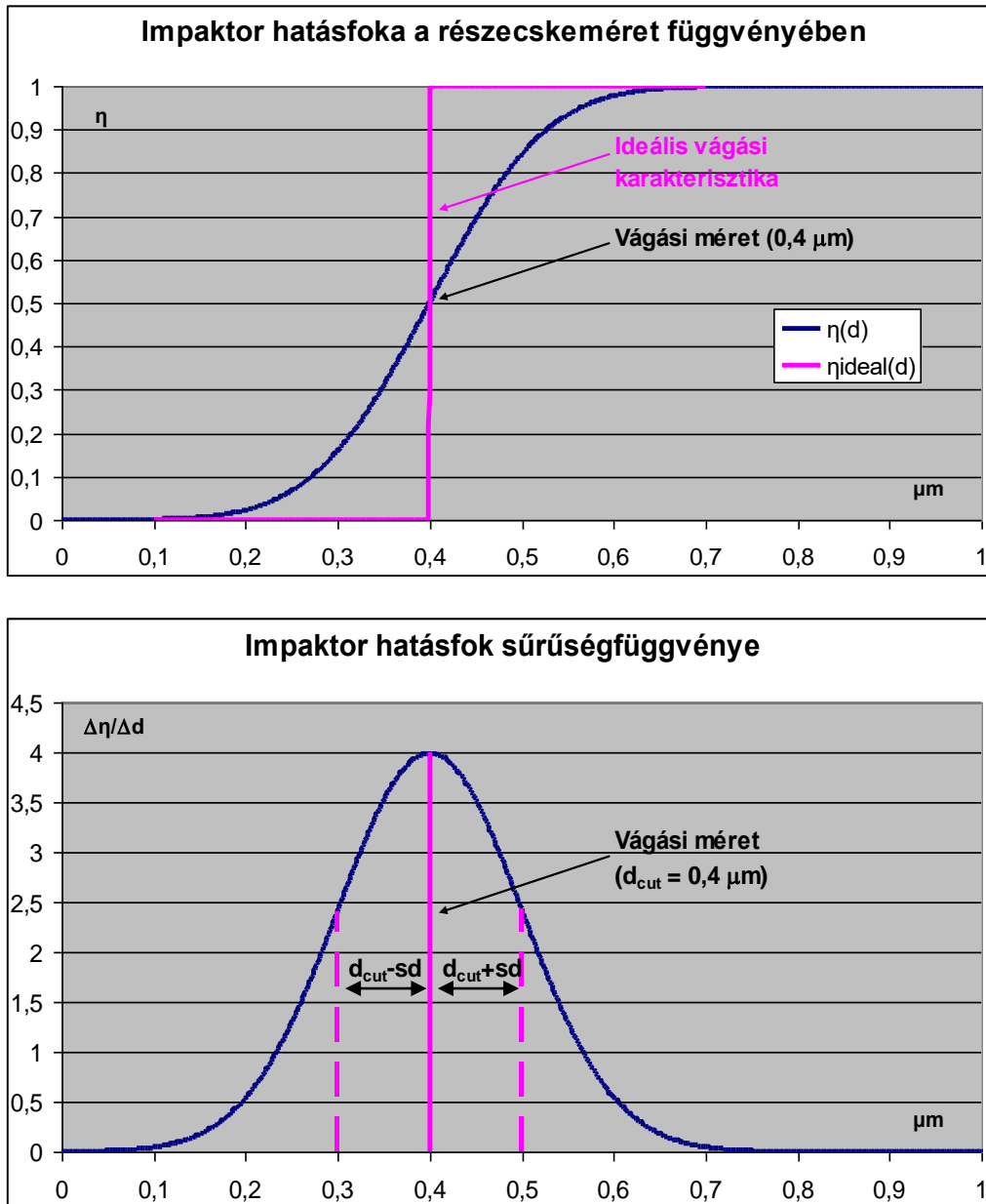
Vegyük észre, hogy az összefüggésben nem szerepel az ütköztető lemez és a fúvóka kimenetének távolsága (L_N). Az ok egyszerű, ideális esetben ettől a paramétertől nem függ a vágási méret, valójában természetesen van egy gyenge hatása az L_N mennyiségének, azonban ez a hatás a másik jellemző mennyiséggel ($D_N \sim L_N$) való összemérhetőség tartományában elhanyagolható.

Természetesen, mint minden „szűrő”, az impaktor is hibával „dolgozik”. Ha nagyfelbontású részecskeméret spektrométerrel megvizsgáljuk az impaktor előtti és utáni aeroszol frakciókat, felépíthetjük az impaktor áteresztés (permeabilitás) vs. részecskeméret karakterisztikáját, az alábbi ábrán látható módon:



5. ábra A tehetetlenségi impaktor áteresztés karakterisztikája. (saját szerkesztés).

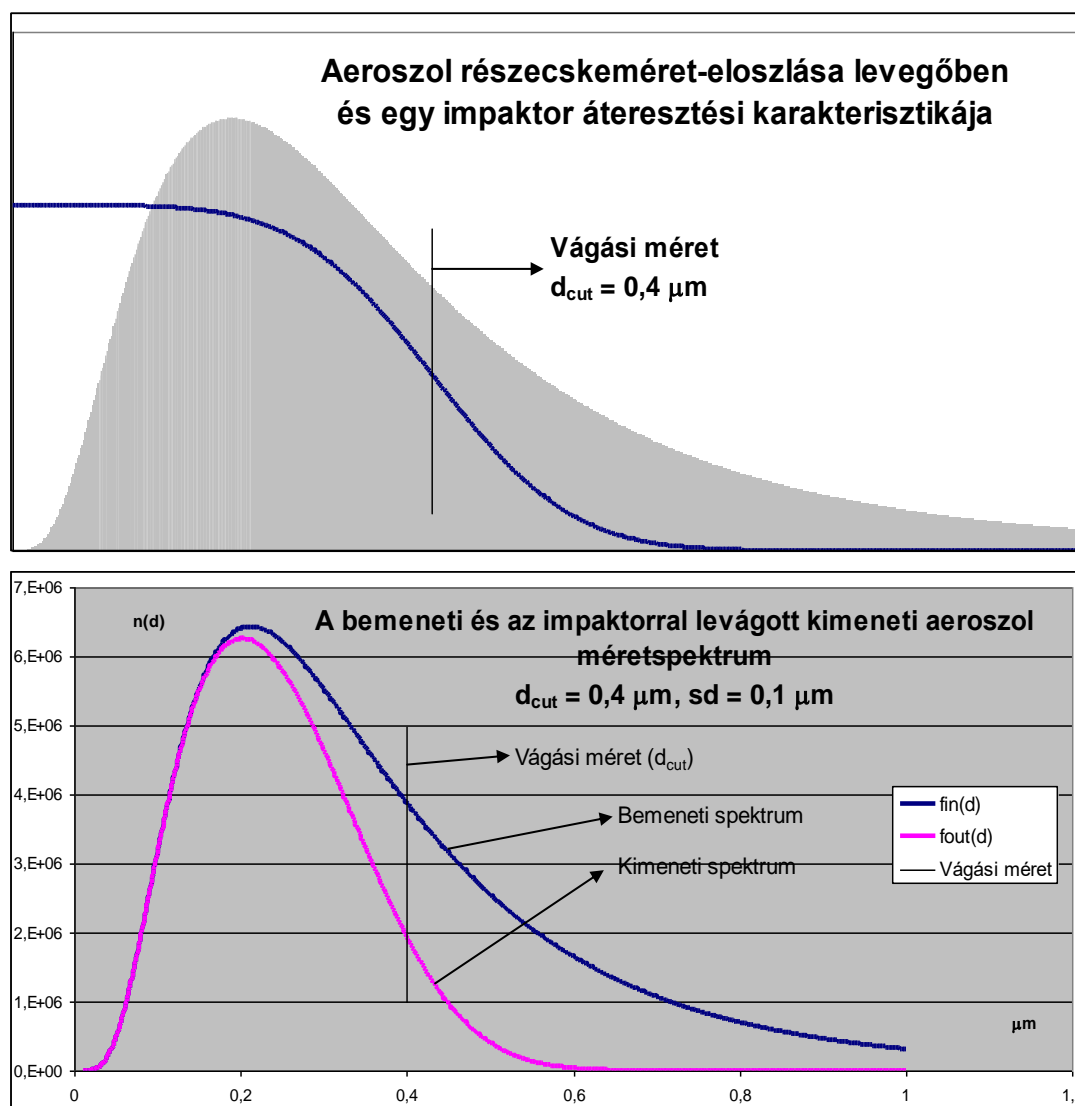
A diagram vizsgálata során nyilvánvaló, hogy az impaktor ütköztető lemeze „megfogja” a vágási méretnél kisebb frakció egy részét, míg a „szerencsés pályán” közlekedő nagyobb méretű részecskék egy részét átereszt. Ha sikerül elég pontosan kimérni az áteresztés paramétereit nagyfelbontású műszerrel (be- és kimeneti mérések sorozatával), lehetőség van az alul-, illetve túlmintázás szoftveres kompenzálására. Ehhez felépítjük az impaktor hatásfok diagramját ($\eta = \eta(d)$) az $\eta = 1 - P$ összefüggés segítségével, majd meghatározzuk a hatásfok sűrűségfüggvényt ($\Delta\eta/\Delta d$). Észrevesszük, hogy a sűrűségfüggvény jól követi a normál eloszlást, így annak szórása (diszkrét spektrum esetén standard deviációja) meghatározása után rendelkezni fogunk az impaktor vágási hibáját leíró függvénnyel, amit az alábbi ábrán láthatunk.



6. ábra A tehetetlenségi impaktor hatásfok eloszlás- és sűrűségfüggvény diagramja. (saját szerkesztés).

Sajnos, ez csak a feladat első része. Önmagában az impaktor hatásfok függvényének ismerete nem elég, mivel a vágási hibája az összes, a vágási méret körüli frakciókra érvényes, amelyeknek méret-eloszlása, bizony, nem homogén. A levegőben levő aeroszolok eloszlása,

emlékezzünk az előző cikkre [2] egy, a lognormális eloszlást követő függvényt mutat, azonban egyes munkahelyeken mérhető eloszlás ettől eltérhet az adott hely mesterséges részecskeeloszlásától, az ott folyó munka során keletkezett aeroszol és por jellegétől függően. Korrekt kalibrációs függvényt az aktuális aeroszol-eloszlás és az impaktor átérésztési karakterisztikája segítségével kaphatunk. Az alábbi ábrán látjuk az impaktor „működését”, az ábra felső diagramján az eredeti méretspektrumot, az impaktor átérésztési karakterisztikájával, míg az alsó diagramon összehasonlíthatjuk az eredményt, a kimeneti spektrumot az eredetivel.



7. ábra A tehetetlenségi impaktor működése. A felső diagramon az eredeti (bemeneti) méretspektrumot látjuk, amelyet az ugyanitt ábrázolt impaktorral „levágunk” és alul látjuk az eredményt, a kimeneti spektrumot, összehasonlításképpen, a bemeneti spektrummal. (A szerző saját szerkesztésű ábrája).

Az ábránkon látható példán respirábilis frakciót mintázunk, normál, környezeti levegőre jellemző aeroszol méreteloszlással, $4 \mu\text{m}$ vágási mérettel és $sd = 1 \mu\text{m}$ vágási bizonytalansággal. Kalibráció nélkül is végezhetjük a méréseket, azonban ebben az esetben a vágási bizonytalanságból eredő relatív hiba részecskeszám tekintetében mintegy $-4,5 \%$, míg gravimetrikus mérés esetén kb. 11% lesz, vagyis a részecskeszámot kicsit alul, a szűrőn felfogott tömeget pedig kicsit túlmintázzuk.

A környezeti aeroszol mintavételezés néhány perspektivikus területe

Ha olyan alkalmazási területekről beszélünk, ahol a környezeti mintavételezés nagy jelentőséggel bír, szót kell ejtenünk a levegőminőség folyamatos és átfogó méréséről. Ez nem csak bizonyos szennyező anyagok légköri jelenléte szempontjából fontos (az alábbiakban erről is ejtünk néhány szót), hanem a földi atmoszféra állapotának állandó monitoringja szempontjából is. Manapság már sajnos bizonyított az éghajlatváltozás ténye [18][20], ennek mérséklése érdekében folyamatos erőfeszítésre [17] van szükség, amelynek részét képezi az atmoszferikus környezeti paraméterek állandó kontrolja.

A tehetetlenségi impaktorról történő méretspecifikus mintázás és szűrőn történő begyűjtés, utólagos mintaelemzéssel, nagyon kedvező és perspektivikus módszer lehet lebegésre képes repülő eszközzel (nevezetesen drónnal) való mintavételhez. Csak gondolatébresztőnek soroljunk fel néhány olyan alkalmazási területet, ahol vagy kizárólagosan, vagy pedig kiegészítő eljárásaként szóba jöhet:

1. Radioaktív szennyezés kibocsátásával járó esemény során, a szennyezett felhő aktivitáskoncentrációjának meghatározása mintavételezéssel [11][12] [13] [19].
2. Különböző ipari balesetek során kibocsátott aeroszol állagú szennyező anyagok terjedésének meghatározása, a korai fázisban elvégzett számítások, szimulációk pontosítása céljából [13][14][15][16].
3. Nagymennyiségű aeroszolt, szállóport kibocsátó ipari objektumok környezetének mérése, ott, ahol nem áll rendelkezésre telepített mérőállomás (pl. cementgyárak, szenes erőművek környéke).
4. Nagyvárosi környezetben, levegőminőség mérése aeroszol és szállópor tartalom meghatározása, a telepített mérőállomások adatainak kiegészítésére, esetlegesen új kibocsátó források felfedése.
5. A telepített mérőrendszerektől távoli, vidéki vagy természetes növényzettel fedett helyek levegőminőség-mérése.

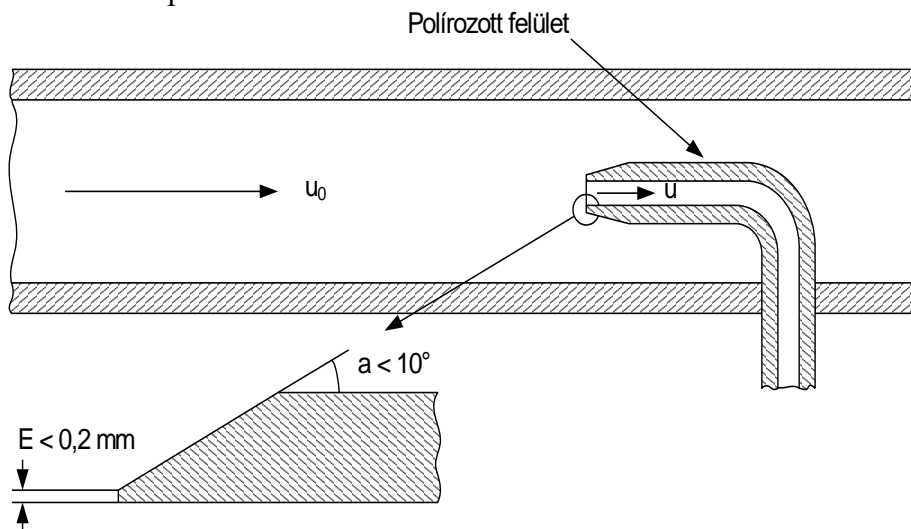
ÁRAMLÓ LEVEGŐ MINTÁZÁSA, IZOKINETIKUS MINTAVÉTELEZÉS

Az izokinetikus mintavétel alapjai

Áramló levegőből – például szellőzőrendszer csövéből – történő mintavétel során a főáram és a részecskeszámláló között, a különféle fizikai vagy akár kémiai hatások következtében elkerülhetetlenül bekövetkezik részecskevesztés. A veszteség mértékét befolyásolja a cső anyaga, hossza, az áramlási keresztmetszet geometriája, az áramlás sebessége, az áramlási profil. A mérések előkészítésénél ismerni kell a mérőrendszer hibalehetőségeit, és ezekkel számolni kell. Megfelelő tervezéssel és méretezéssel a veszteség mértéke minimalizálható.

A mintavételezés akkor reprezentatív egy adott pozícióban, ha a vételezett mintában az aeroszok eloszlása megfelel az áramló közegben jelenlévő eloszlásnak. Ennek érdekében megfogalmazzuk egy adott pozícióra vagy mintavételi pontra az izokinetikus mintavétel feltételét: ha az áramlási sebesség a főágban (u_0) és a mintavételi csőben (u) közel egyenlő és ezt a sebességvektorra kell érteni, tehát mind a skaláris mennyiségre, mind az irányra értendő. Ha a főágban és a mintavételi csőben áramló teszt-aeroszol részecskék méreteloszlása és koncentrációja megegyezik, akkor a mintavétel izokinetikus. Ha a mintavétel nem izokinetikus, a mintavevő nyílásnál az aeroszol részecskék méret szerinti szelektálódása megy végbe, ezt láthattuk az előző pontban bemutatott impaktor méret-szelektornál. Ha a főáram áramlási sebessége alacsonyabb, mint a mintaáram sebessége, a mintaáramban a nagyméretű részecskék koncentrációja megnő a mintavételi csőben. Ezt az állapotot szuper-izokinetikusnak nevezzük. Fordított esetben a nagyméretű részecskék tehetetlenségük következtében továbbhaladnak a főágban, a mintaáramban a kisméretű részecskék

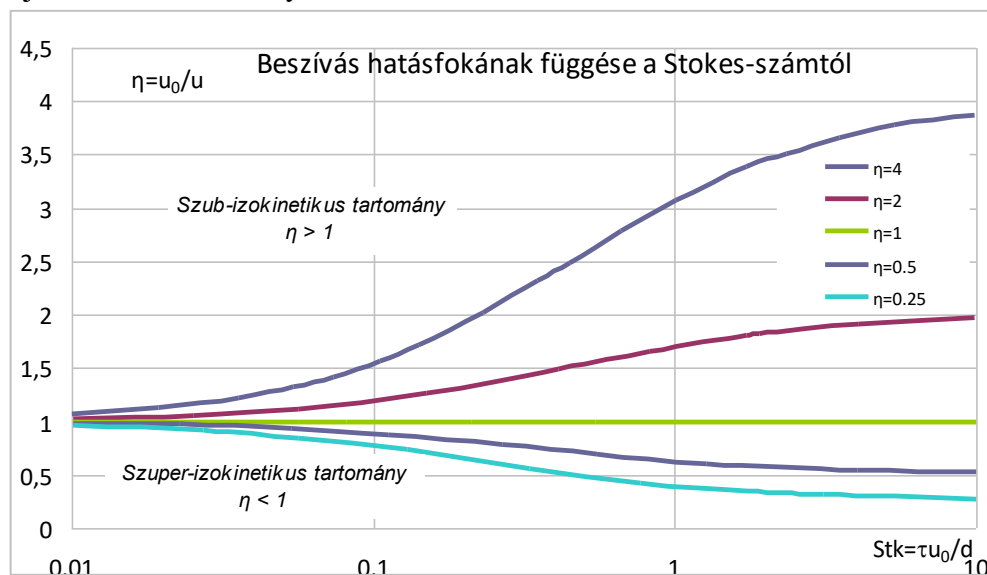
koncentrációja nő meg. Ez az állapot a szub-izokinetikus. A sebességváltozás hatására bekövetkező koncentrációváltozás a részecskék tehetetlenségéből adódik. Az izokinetikus mintavételezés érdekében javasolt a mintavevő fej gondos kialakítása, amire az alábbi ábrán láthatunk példát.



8. ábra A mintavevő fej helyes kialakítása. (A szerző saját szerkesztésű ábrája).

Izokinetikus mintavétel biztosítása érdekében a mintavétel sebességét célszerű úgy beállítani, hogy az minél inkább közelítse a főág áramlási sebességét. Ideális esetben a mintavevő berendezés folyamatosan méri (és szabályozza) az áramlási sebességet. Természetesen elképzelhető a szabályozás manuálisan is, azonban ez nagyon nehézkessé teszi a mintavétel folyamatát.

Szerencsére, az aeroszlok mérettartományában az izokinetikus tartomány elég széles, így nem okoz nehézséget a mintavétel sebességének automatikus, a műszer beépített elektronikáján keresztüli szabályozása.



9. ábra A mintavételezés tartományainak függése a főág és a mintavevő áramlási sebességarányától, valamint a részecske relaxációs úthossz – részecskeméret aránytól (Stokes-számtól). Vegyük észre, hogy a beszívás hatásfoka kis részecskeméreteknél ($Stk > 1$), a főág és a mintavevő áramlásának jelentős eltéréseinél is beleeshet az izokinetikus tartományba. (saját szerkesztés).

A fentiekben leírtuk az izokinetikus mintavétel alapjait, azonban a mintavételünk akkor lesz reprezentatív, ha azt kiterjesztjük a cső egész keresztmetszetére. A gyakorlat azt mutatja, hogy sajnos nagyobb keresztmetszetű légvezetékben kialakulhatnak a légvezeték szakaszai, hajlatai, esetleg a bennük elhelyezett szenzorok és egyéb akadályok miatt anomáliák a részecskék eloszlásában. Ez főként szellőzőkémények esetében lehet jellemző, ahol a fő áramba több mellékvezeték csatlakozik más-más eloszlással, így egy adott mintavételi pozícióban vett minta nem fogja a teljes keresztmetszetet jellemezni. Analóg eset a kémények, füstgáz elvezetésére szolgáló berendezések keresztmetszetének mintázása. Erről ejtünk néhány szót az alábbiakban.

Nagy keresztmetszetű áramló terek mintázása

Tapasztalataim szerint, ha a mintázandó légvezeték (cső), vagy kémény keresztmetszete meghaladja a kb. 1200-1300 cm²-es értéket ($d > 40$ cm), javasolt a mintavételt több ponton venni. Itt a mintavételi pontok pozíciójának meghatározásánál a vezérlő elv az, hogy a pontok által lefedett elemi részkeresztmetszetek egyenlő területűek legyenek.

Körkeresztmetszetű légvezeték (kémény) esetén a legegyszerűbb megoldás az, ha a keresztmetszetet egy belső, 0-dik körre és n számú körgyűrűre, valamint a körgyűrűket 4 szektorra osztják, úgy, hogy a belső körnek, valamint a körgyűrűk szektorainak a területe egymással megegyezzen. Így az elemi szektor területe megadható az alábbi kifejezéssel:

$$t = \frac{(d/2)^2 \pi}{4n+1} \quad (4)$$

Ahol d a csőátmérő és n a körgyűrűk száma. Innen adódik, hogy a mintavételi pontok (pozíciók) száma $4n+1$ lesz. Ezen kívül, a körgyűrűk száma megegyezik a sugárirányban egymás mellett levő mintavételi pozíciók számával, a középpont kivételével. Természetesen, a keresztmetszet növekedésével a mintavételi pozíciók száma is növekedik, ezt a körgyűrűk számának növelésével érjük el.

A körgyűrűk száma (a középpont kivételével)					
Csőátmérő (m)	0,4	1	1,7	2,6	3,9
Mintavevők száma sugárirányban (körgyűrűk száma) n	0	1	2	3	4
A mintavételi pozíciók száma $4n+1$	1	5	9	13	17

3. táblázat A körgyűrűk és mintavevő pozíciók számának függése a légvezeték átmérőjétől (saját szerkesztés)

A fenti táblázat értékeit függvényként is megadhatjuk, az alábbi összefüggés segítségével:

$$n = INT(-0,18d^2 + 1,9d + 0,33) \quad (5)$$

A csőátmérő által determinált körgyűrűk középvonalának, illetve azok belső körvonalának sugara könnyedén megadható két egyszerű összefüggéssel, amelyet az (4) egyenlet segítségével az 3. táblázat „igénye” szerint vezetünk le:

Középvonakugara:

$$r_i = r \sqrt{\frac{4i-1}{4n+1}} \quad (6)$$

Belsőkörvonalsugara:

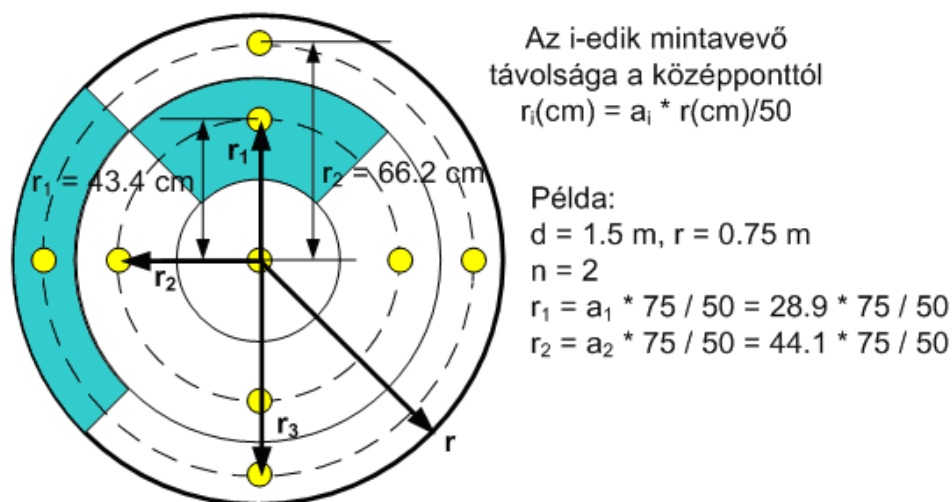
$$r_i = r \sqrt{\frac{4(i-1)+1}{4n+1}} \quad (7)$$

Az egyszerűség kedvéért az alábbi táblázatban láthatjuk a körgyűrűk elődefiniált adatait egy 50 cm sugarú csőre vonatkoztatva, amit természetesen át kell számolni az aktuális légyvezeték méretére és a 3.sz. táblázatban rögzített mintavételi paraméterekre:

Az a_i értékek a sugárirányú mintavételi pontok n száma és az aktuális i -dik pozíció szerint					
$i \setminus n$	1	2	3	4	5
1	38,7	28,9	24,0	21,0	18,9
2		44,1	36,7	32,1	28,9
3			46,0	40,2	36,2
4				47,0	42,3
5					47,6

4. táblázat A körgyűrűk elődefiniált középvonalai 50 cm-es egyensugarú körkeresztmetszetre vonatkoztatva (saját szerkesztés)

Az alábbi ábrán láthatjuk a mintavételi pozíciók meghatározásának egyszerű módszerét egy példán keresztül.



A szektor középvonalának sugara A szektor belső körvonalának sugara

$$r_i = r \sqrt{\frac{4i-1}{4n+1}}$$

$$r_i = r \sqrt{\frac{4(i-1)+1}{4n+1}}$$

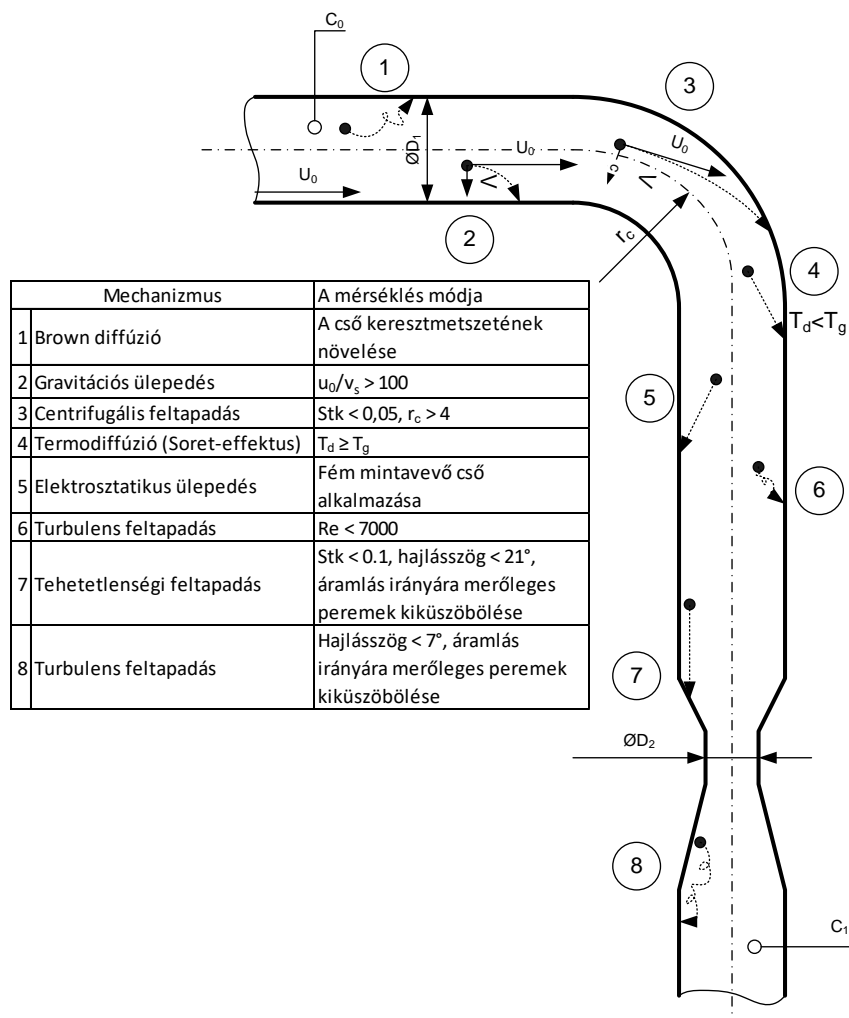
10. ábra A mintavételezés pozícióinak számítási módja: (saját szerkesztés)

A fenti ábrán egy egyszerű példán követhetjük egy viszonylag nagy áramlási keresztmetszetről történő mintavételhez szükséges mintavételi pozíciók meghatározásának

módszerét: az átmérő (sugár) meghatározza a körgyűrűk számát (3. táblázat), melyek középvonala a 4. táblázat adatai szerint, illetve a vonatkozó összefüggés alapján számítható.

A MINTAVÉTEL SORÁN JELENTKEZŐ VESZTESÉGEK TERMÉSZETE

A mintavétel során, mint ahogy már beszéltünk róla óhatatlanul képződik veszteség. A mintavevő anyaga és az aeroszol részecskék áramlásból történő kisodródása, ütközése, elektrosztatikus kölcsönhatások és más effektusok következtében a részecskék megfogódhatnak a felületeken. A veszteség mértéke redukálható, ha megfelelően választjuk ki a mintavételnél használt alkatrészek méretét, pozícióját, anyagát, az átmeneteknél nem használunk éles peremeket és nem toldunk egymásba különböző átmérőjű vezetéseket. A részecskevesztést nagymértékben befolyásolják még a mintaáram áramlási paraméterei is. Az előző cikkben megismerkedtünk az aeroszolzészecske-fizika fontosabb tételeivel, a jelen munkában foglalkoztunk a mintavétel alapvető rendszabályaival és már definiáltunk a művelet során képződő veszteségeket, így már csak az van hátra, hogy alkalmazzuk az ott tanultakat, általánosítsuk és megfogalmazzuk a mintavételi úton képződő veszteségeket, valamint azok fizikai természete alapján adjunk javaslatot az egyes kedvezőtlen effektusok mérséklésére.



11. ábra A mintavételi úton képződő veszteségek mechanizmusa és azok mérséklésének módja. (saját szerkesztés)

Brown-diffúzió

Már ismert előttünk, hogy a részecskék viselkedését a Knudsen-szám határozza meg. Ha a Knudsen-szám nagy, akkor az áramlás jellege molekuláris lesz. Molekuláris áramlás esetén a részecskék közepes szabad úthossza az átmérőhöz képest több nagyságrenddel nagyobb. A Knudsen-szám a mintavevő cső átmérőjének növelésével csökkenthető, igaz, csekély mértékben. Mintavevő cső kiválasztásakor figyelni kell arra, hogy a cső átmérője akkora legyen, hogy benne megfelelő térfogatárammal áramló levegő áramlási jellege folytonos legyen. A kisméretű részecskék diffúziós effektusai a mintavételi cső átmérőjének növelésével csökkennek.

A Knudsen-számot és a részecskék diffúziójának mértékét arányosan befolyásolja a gázmolekulák közepes szabad úthossza. Mivel a szabad úthossz nyomásfüggő mennyiség, így áramlás során a nyomóágon a Kn-szám kisebb, mint a szívóoldali ágon, ennek megfelelően az aeroszol részecskék diffúziós hajlama is változik.

Gravitációs ülepedés

Kis áramlási sebesség esetén, a nagyméretű részecskék gravitációs ülepedéssel könnyen kiléphetnek az áramlási profilból. A mintavevő rendszer tervezésekor törekedni kell arra, hogy, az áramlási sebesség a 10 μm átmérőjű részecskék ülepedési sebességénél két nagyságrenddel nagyobb legyen.

Centrifugális erő hatására történő feltapadás (impaktáció)

Ha a mintavevő cső nem egyenes, a hajlatokban a részecskék kiléphetnek az áramlási profilból, majd a cső falával ütközve feltapadhatnak arra. A centrifugális erő hatására történő ülepedést a Stokes-számmal (Stk) lehet jellemezni. Minél nagyobb a Stokes-szám, annál nagyobb a feltapadás mértéke. A hajlat szöge és a feltapadás mértéke egyenesen arányos.

A mérőrendszer felállításakor figyelni kell arra, hogy a cső lehetőleg egyenes legyen. A feltapadás nagyméretű részecskék esetén számottevő, az áramlási sebesség csökkentése, vagy a csőátmérő növelése csökkenti a hatást, továbbá, megfelelő csőátmérő esetén a hajlat sugara legyen lehetőleg a csőátmérőnél lényegesen nagyobb

Termodiffúzió (Ludwig-Soret-effektus)

Mivel ezt a jelenséget az előző cikkben nem említettük, így szenteljünk neki egy kis figyelmet.

Többkomponensű rendszerekre jellemző, hogy ha a két komponens hőmérséklete különböző, a nagyobb hőmérsékletű anyag felől tömeg áramlik a kisebb hőmérsékletű anyag irányában. A tömegáram irányát a hőmérsékletgradiensek határozzák meg. Ha a cső és az áramló közeg hőmérséklete különböző, akkor a hőmérsékletgradiens irányában tömegáram indul meg, az alacsonyabb hőmérsékletű közeg felé. Ha a cső hőmérséklete alacsonyabb, mint az áramló közegé, akkor a hőmérsékletgradiens a csőfal irányába mutat (sugárszerűen), így a tömegáram is abba az irányba indul meg és az aeroszol részecskék diffundálhatnak a cső falába.

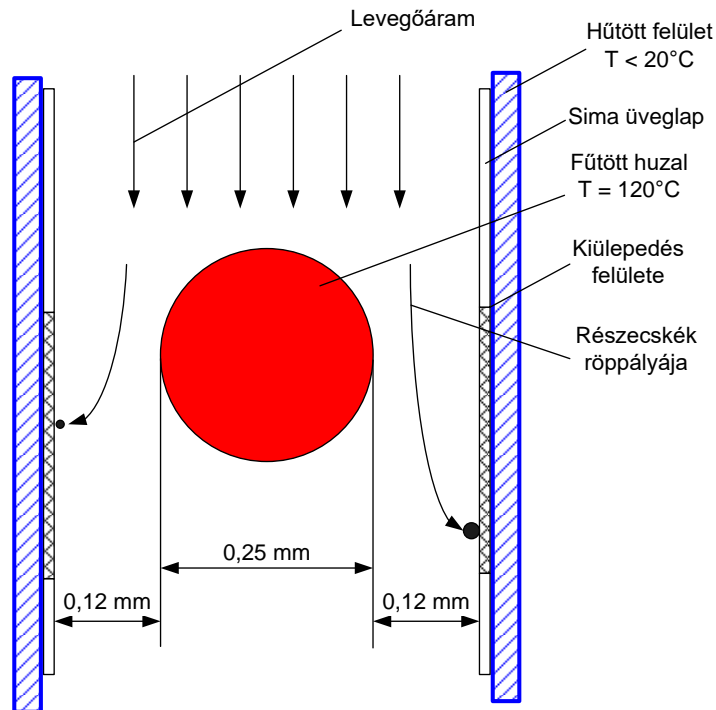
Mintavételezés során a mintavételi ág hosszában lehetőleg kerüljük a lényeges hőmérsékleti anomáliát. Ezt az ajánlást viszonylag könnyű betartani, hiszen általában az áramló levegő hőmérséklete megfelel a környezetinek, így a mintavételi ágban is izotermikus viszonyok alakulnak ki.

Mi lesz eme jelenség fizikai alapja? A termoforézis, természetesen, amit az alábbiakban kifejtünk.

Tegyük fel, hogy részecskénk egy adott pillanatban két, különböző hőmérsékletű fal között lebeg, vagyis nyugalomban van. Részecskénket a közeg gázmolekulái minden oldalról támadják, lökdösik, azonban a melegebb fal felől jövő molekulák energiája, sebessége

nagyobb, tehát nagyobb impulzust közölnek ütközéskor a részecskének, így az a hidegebb fal felé mozdul el. Közeg áramlása esetén ugyanez figyelhető meg, a részecskék haladási irányára merőleges sebességkomponens jelenik meg a hőmérsékleti gradiens hatására.

A termodiffúzió jelenségén alapuló mintavételi módszer (Green and Watson, 1935; Watson, 1936) évtizedekig az egyetlen aeroszol és szállópor mintázási és részecske méret-meghatározási módszer volt [21]. Valójában ez az oka annak, amiért egy kicsit megálltunk ennél a jelenségnél.



12. ábra Green-Watson féle termodiffúziós részecskeülepítő. A kiülepedés felületén a 40-es, 50-es években mikroszkóp alatt manuálisan számolták a részecskéket és számolták ki a részecskesűrűséget a lemez felületén, így határozták meg a részecske-eloszlást és a levegő aeroszol koncentrációját. (saját szerkesztés)

Fentebb említett részecskék lehet kis- és nagyméretű. Azt, hogy melyik kategóriát „húzzuk rá”, az határozza meg, hogy jellemző mérete kisebb, vagy nagyobb a közeg molekuláinak átlagos szabad úthosszájánál. Mindkét mérettartományra korrekt összefüggéseket közöl az irodalom [22]. A szabad úthossznál kisebb részecskékre ható erő:

$$F_{th} = \frac{-p\lambda d^2 \nabla T}{T_p} \quad (8)$$

A részecskék az erőhatásra elmozdulnak a hidegebb oldal felé, a közölt sebesség pedig az alábbi összefüggéssel számítható:

$$u_{th} = \frac{-0,55v_m \nabla T}{\rho_m T_p} \quad (9)$$

Természetesen, a szabálytalan alakú, szilárd aeroszokok esetében a nagyobb fajlagos felület miatt ennél egy kicsivel (kb. 3%) nagyobb lesz a nyert sebesség, mint a folyadék halmazállapotú gömb alakú részecskék esetében, de ez a különbség nem számottevő [3].

Figyeljük meg, hogy ebben az áramlási tartományban a termoforézis által közölt sebesség független a részecske méretétől és lineáris a közeg hőmérséklet gradiensevel.

Nagyobb részecskék esetében ($d_p > \lambda$), figyelembe kell vennünk a test hővezetését is. A közeg hőmérséklet gradiense hatására a test belsejében létrejön egy hőmérséklet gradiens. Ez módosítja a molekulák által átadott impulzusok arányát a külső gradienssel jellemzett oldalain a részecskének. A test hővezetése itt kritikus jelentőséggel bír, mivel a jó hővezetéssel bíró testnél a kisebb belső gradiens az oldalakon történő ütközéseknél jobban csökkenti az átadott impulzusok arányát. Mindez azt fogja eredményezni, hogy a jobb hővezetéssel bíró test kisebb impulzust kap a külső hőmérséklet gradiens hatására, mint egy ugyanolyan paraméterekkel rendelkező, de kisebb hővezető test. Itt be kell vezetnünk egy együtthatót, amely figyelembe veszi egyrészt a közeg és a részecske anyagának hővezetését (vagyis azok arányát), illetve a molekuláris szabad úthossz és a részecske méretének arányát. Ezt az együtthatót az angolszász irodalom „*molecular accommodation coefficient*” megnevezéssel használja [3], azonban mi H együtthatóként fogjuk emlegetni. A hőmérséklet gradiens hatására fellépő erő itt más alakot vesz fel:

$$F_{th} = \frac{-9\pi d v_m^2 HVT}{2\rho_m T_p} \quad (10)$$

Innen az egyensúlyi feltételt felírva a részecske aerodinamikai átmérőjére a Cunningham csúsztási faktorról módosított Stokes-egyenlet segítségével [2], majd megoldva a termoforézis által közölt sebességkomponensre, kapjuk az alábbi összefüggést a sebességre:

$$u_{th} = -\frac{3v_m C_C HVT}{2X\rho_m T_p} \quad (11)$$

A negatív előjel mind az termoforetikus erő, mind a sebességkomponens esetében a hőmérséklet gradiensevel ellentétes irányt jelent.

A H együtthatót Waldmann és Smith [22] után egy nem túl egyszerű összefüggéssel definiáljuk:

$$H \cong \left(\frac{1}{1+6\lambda/d} \right) \left(\frac{k_m/k_p + 4,4\lambda/d}{1+2k_m/k_p + 8,8\lambda/d} \right) \quad (12)$$

A termoforézis viszonylag kis mértékben függ a részecskék méretétől elég széles tartományban és máig alkalmazott módszer az elektronmikroszkópos vizsgálatokhoz szükséges részecske, bakteriális és vírusos mintavételhez. Figyelembe véve, hogy effektív mintavételhez alacsony térfogatáram és viszonylag nagy hőmérséklet gradiens szükséges, a termoforézisnek alapvetően inkább a biokémiai mintavételezésben van szerepe, az egyéb aeroszol mintavételi technikákban aligha találkozunk olyan hőmérséklet gradiensevel, amivel számolnunk kéne.

Elektrosztatikus lerakódás (elektroforézis hatása)

A cső fala mellett közel haladó részecskék, a részecske és a fal részecskéi közötti elektrosztatikus vonzóerő hatására összetapadhatnak. Ha a cső anyaga vezető és megfelelően van földelve, nem rendelkezik elektromos töltéssel, így a részecskék és a cső között nem lép fel elektrosztatikus vonzóerő (vagy taszítóerő). Speciális műanyagból készült mintavevő cső (pl. FESTO) esetében ez a hatás minimális, elhanyagolható, földelt fém mintavevő cső esetén pedig ez a hatás teljességgel hiányzik. Ezt a jelenséget mégis meg fogjuk röviden vizsgálni,

mivel az aeroszlok viselkedésében meghatározó szerepe lehet, gondoljunk csak az elektrosztatikus por- és részecskeleválasztókra, illetve az F7-F9 osztályú finomszűrőkre, ahol az egyes aeroszolszűrők részecske- és pormegkötő képessége a szűrőanyag elektrosztatikus megkötő hatásán alapszik [1].

A vizsgált részecskék méretétől függően valamilyen kölcsönhatás ($d_p < 0,2 \mu$ – elektromos tér, iondiffúzió, $d_p > 0,5 \mu$ – ütközés) következtében elektromos töltéshez juthat. Ha a közegben számottevő elektromos térerősség van jelen – lemezes porleválasztók esetében homogén elektrosztatikus, csöves elektrofilter esetén heterogén elektromos mező formájában – a töltött részecskék az ellentétes töltésű (gyűjtő-) elektród felé mozdulnak el és a többi részecskével való ütközésük eredményeképpen azok is töltéshez jutnak és a gyűjtőelektróda felületén ülepednek ki. Az erőhatás a részecske töltésével és a térerősséggel arányos:

$$F_C = q_p E \quad (13)$$

Lemezes porleválasztás esetében a lemezek közötti térerősség közelítőleg homogén:

$$E = \frac{U}{x} \quad (14)$$

ahol x – a két lemez közötti távolság.

Csőes elektrofiltereknél a térerőt egy, a cső geometriai középpontjában található, ellensúllyal feszített elektródszál, és egy csöves elektródtest hozza létre. Általában a szál a negatív, ún. sugárzó, vagyis ionizáló elektród, míg a csőtest a porgyűjtő, „leválasztó” elektród. A csőtest belsejében a tisztítandó levegő alul, oldalról lép be és a részecskék a szál koronaterében töltést nyernek, majd felfelé és kifelé, a test fala felé mozognak, ahol leadják a töltésüket, majd kiülepednek. A cső belsejében az elektromos térerő az alábbi paraméterek szerint változik:

$$E = \frac{U}{x \ln \frac{r_0}{r_1}} \quad (15)$$

ahol:

x – a vizsgált pont távolsága a cső geometriai középpontjától,

r_0 – a gyűjtő elektród sugara,

r_1 – a sugárzó elektród sugara.

A térerő hatására a töltött részecskék az előző alponban alkalmazott egyensúlyi feltétel szerint, a gyűjtőelektród felé mutató sebességkomponenst nyer:

$$u_{ep} = \frac{q_p E C_C}{3\pi v_m dX} \quad (16)$$

Turbulencia hatására történő feltapadás

A turbulens áramlás egy olyan áramlási tartomány, ahol az áramló közeg fizikai jellemzői gyorsan, kaotikusan változnak. A lamináris áramlástól eltérően, a turbulens áramlás esetén a

sebességprofil egzakt módon nem leírható, a súrlódási erők nagyobbak, mint a tehetetlenségi erők. Turbulens áramlás esetén a részecskék mozgási iránya véletlenszerűen változhat.

Ha mintavételi csőben az áramlás a turbulens tartományba esik, a részecskék kaotikus mozgásuk következtében közel kerülhetnek a cső falához vagy ütközhetnek azzal. A fallal történő ütközés következtében a részecskék feltapadhatnak arra. Ha a mintavétel során az áramlás végig a lamináris, vagy az átmeneti tartományba esik ($Re < 5000$, $10 \mu m$ átmérővel számolva), ez a hatás nem számottevő.

A cső keresztmetszetének szűkülésekor történő feltapadás

Cső keresztmetszetének szűkülésekor (konfúzor) előfordulhat, hogy a részecskék kilépve az áramlási profilból, nekiütköznek a cső falának. A szűkülés hatására hirtelen megváltozott áramlási irányt a nagyobb méretű részecskék nem tudják követni, az áramlási profilból kilépve, majd a fallal ütközve, arra feltapadhatnak. A feltapadás mértéke akkor számottevő, ha a szűkítés szögemelkedése vagy az áramlási sebesség túl nagy.

A Stokes-számmal meghatározható a keresztmetszet szűkülés hatására történő feltapadás mértéke. A veszteség redukálható a Stokes-szám csökkentésével ($Stk = 0,1$ alatt elhanyagolható), illetve a szűkítés szögemelkedésének csökkentésével (a szögemelkedés 21° alatt legyen). Ez a hatás legjobban akkor érvényesül, ha pl. különböző átmérőjű mintavevő csövek egymásba toldásakor az áramlás irányára merőleges peremek alakulnak ki. Az ilyen megoldásokat lehetőség szerint kerülni kell. Sajnos a tapasztalat azt bizonyítja, hogy a gyakorlatban végrehajtott mérések során (főleg az in-situ és on-site méréseknél) ez a leggyakrabban elkövetett hiba, valamint egyben a legnehezebben kiküszöbölhető is. Természetesen ugyanez mondható el a következő alpontban leírtakról is.

A cső keresztmetszetének tágulásakor bekövetkező feltapadás

Egy súrlódásmentes rendszerben, cső tágulásakor (diffúzor) felírható a kontinuitási-egyenlet a kisebb és a nagyobb átmérő között. A valóságban a falhoz közeli rétegekben a részecskék lassulása nagyobb mértékű, mint a profil középvonalának környezetében. A kontinuitási-egyenlet a rendszer egészére nézve igaz lesz, de az átmérő különböző pontjain a sebességmegoszlás és a nyomáseloszlás nem egyenletes. A profil egyes részein a keresztmetszet hirtelen tágulásakor turbulens áramlás alakulhat ki. A hirtelen turbulenssé váló tartományok aeroszol részecskéi ütközhetnek a fallal és feltapadhatnak rá.

Ha a keresztmetszet tágulásának szöge nem haladja meg a 7° -ot, akkor a veszteség minimális lesz. Természetesen, az előző pontban említett csövek egymásba toldásakor kialakuló merőleges peremek ezt a hatást is maximálisan erősítik.

ÖSSZEGRZÉS

Ha összegezzük a fentiekben megvizsgált, a mintavételre hatást gyakorló körülményeket kölcsönhatásokat és méretezési sajátosságokat, valamint felvértelve az aeroszolrészecskefizika alapjaival és áttekintve a mintavételi ágban történő áramlás és részecske kölcsönhatások sajátosságait, fogalmazzuk meg az aeroszol mintavételezés tízparancsolatát:

1. Válaszd meg körültekintően a mintavétel helyét!
2. A bemenetet körültekintően méretezd, a külső közeg áramlásának megfelelően!
3. Végy belül minél simább mintavevő csövet, ahol lehet, használj fémot!
4. Törekezd a rendszer homogenitására a mintavételi ág hosszában!
5. A mintavételi cső hajlatainak sugarát tartsd az átmérőnek minimum ötszörösén!
6. Törekezd az átmérő állandóságára, de lehetőleg tartsd az átmérő bővülés szögét 7° alatt, a szűkítés szögét pedig 21° alatt!
7. A mintavételi ágban tartsd az áramlási Reynolds számot 3000 és 5000 között!
8. Ha szükséges, válassz megfelelő mintavevő szűrőt a részecskék gyűjtéséhez!

9. A mintavételi térfogatáramot tartsd állandó értéken!
10. Gondosan ügyelj a berendezésed paramétereire, a mintavétel reprezentatív voltára és reprodukálhatóságára!

Végül, kicsit átgondolva az aeroszol mintavételezés legfontosabb területeit, tekintsük át őket:

- por- és aeroszol szűrők hatásfok tesztje (hiszen alapvetően erről szól a cikksorozat);
- tisztatér monitoring;
- szellőző-, kéményrendszerek kibocsátási tesztje;
- környezeti és levegőminőség vizsgálatok;
- természeti katasztrófák (pl. vulkáni tevékenység) nagymennyiségű por és aeroszol kibocsátásával járó következményeinek vizsgálata;
- katonai műveleti, hadműveleti helyzetben, ABV környezetben történő mintavétel;
- ipari balesetek (veszélyes vegyi vagy radioaktív anyagok) során történő kibocsátások mérése.

Az utolsó három alkalmazási terület jelentősen kibővíti a mintavétel dimenzióit, hiszen itt már nem csak telepített környezeti vagy létesítményi földfelszíni mérések iránt támasztanak igényt, hanem légi, pilóta vezette vagy pilóta nélküli repülő eszközök fedélzeti mintavevő rendszerei is szükségesek egy korrekt felméréshez, vagy monitoring megvalósításához. Ilyen megközelítésben valóban nagy szerepe van a mintavevő rendszerek gondos megtervezésének, méretezésének, valamint szakszerű mintavételi stratégia kialakításának.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] J. CSURGAI, M. SOLYMOSI: *Levegőszűrők hatékonyságának mérése, I. rész: az aeroszol szűrés alapjai, a por- és részecskeszűrők minősítésének rendszere*, Hadmérnök, X. évfolyam, 1. szám, 2015. március
- [2] CSURGAI J.: *Levegőszűrők hatékonyságának mérése II. rész: egy csipetnyi aeroszolzrészecske-fizika, néhány szó az aeroszolak és az áramló közeg kapcsolatáról*, Hadmérnök, XIII. évfolyam, 2. szám, 2018. június
- [3] PRAMOD KULKARNI, PAUL A. BARON, KLAUS WILLEKE: *Aerosol measurement: Principles, Techniques, and Applications*, Third Edition, John Wiley & Sons, 2011, ISBN 9780470387412, DOI: 10.1002/9781118001684
- [4] WILLIAM C HINDS: *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, 2012, ISBN 1118591976, 9781118591970
- [5] JAMES H. VINCENT: *Aerosol Science for Industrial Hygienists*, Elsevier Science, 1995, ISBN 008 042029X
- [6] JAMES H. VINCENT: *Aerosol Sampling: Science, Standards, Instrumentation and Applications*, 2007, John Wiley & Sons, ISBN 0470060220, 9780470060223
- [7] Á. VINCZE, G. EIGEMANN, J. SOLYMOSI: *Filtration of radioaerosols in Nuclear Power Plant Paks*, Hungary. AARMS, Vol. 5, No. 3. (2006) 335-344
- [8] MSZ EN 481:1994: *Munkahelyi levegő. A szállópor-mérés szemcseméret-frakciónak meghatározása*
- [9] ISO Standard 7708:1995: *Air quality - Particle size fraction definitions for health-related sampling*

- [10] JAMES S BROWN, TERRY GORDON, OWEN PRICE, BAHMAN ASGHARIAN: *Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment*, 2013, URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3640939/>, PMC US National Library of Medicine
- [11] CSURGAI JÓZSEF, ZELENÁK JÁNOS, NAGY GÁBOR, MOLNÁR LÁSZLÓ, PINTÉR ISTVÁN, BÄUMLER EDE, SOLYMOSI JÓZSEF: *A légi sugárfelderítés képességei alkalmazhatóságának vizsgálata elveszett, vagy ellopott sugárforrások felkutatása, illetve szennyezett terepszakaszok felderítése során*, Repüléstudományi Konferencia 2009: 50 év hangsebesség felett a magyar légtérben, Szolnok, Magyarország, 2009.04.24 Budapest: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Főiskolai Kar, p. 14.
- [12] MANGA LÁSZLÓ: *Drónok és alkalmazási területeik, avagy szóba jöhetnek-e egy esetleges nukleáris baleset esetén*, Műszaki Katonai Közlöny, ISSN: 1219-4166, eISSN: 2063-4986, 26: (2) pp. 183-196. (2016)
- [13] CSURGAI JÓZSEF: *A Magyar Honvédségben alkalmazott sugárhelyzet prognosztizálási és értékelési eljárások továbbfejlesztése számítógépes megvalósítással*, Haditechnika 34:(1) pp. 6-12. (2000)
- [14] CSURGAI J, ZELENÁK J, LAJOS T, GORICSÁN I, HALÁSZ L, VINCZE Á, SOLYMOSI J: *Numerical simulation of transmission of NBC materials*, Academic And Applied Research In Military Science 5:(3) pp. 417-434. (2006)
- [15] Á CSÉCS, J CSURGAI, J M SUDA, G KRISTÓF, I PINTÉR, J ZELENÁK: *ABV (NBC) anyagok épületen belül történő terjedésének numerikus szimulációja és modellkísérlete*, Bolyai Szemle 13:(3) pp. 1416-1443. (2004)
- [16] ÁCS BEATRIX, CSÓK LÁSZLÓ, CSURGAI JÓZSEF, GORICSÁN ISTVÁN, HALÁSZ LÁSZLÓ, LAJOS TAMÁS, PINTÉR ISTVÁN, SOLYMOSI JÓZSEF, VINCZE ÁRPÁD, ZELENÁK JÁNOS: *ABV-anyagok terjedésének numerikus, számítógépes szimulációja*, Haditechnika 39:(1) pp. 13-19. (2005)
- [17] PADÁNYI JÓZSEF, FÖLDI LÁSZLÓ: *Environmental responsibilities of the military, soldiers have to be "Greener Berets"*. Economics and Management, Published by the University of Defence in Brno, VIII. évf. 2. szám 48-56. o. 2014. ISSN 1802-3975 URL cím: <http://www.unob.cz/en/Eam/Documents/EaM%202-2014.pdf>, (letöltve: 2017. 12. 06.)
- [18] JÓZSEF PADÁNYI; LÁSZLÓ FÖLDI: *Security Research in the Field of Climate Change*. In: László Nádai; József Padányi (szerk.) Critical Infrastructure Protection Research: Results of the First Critical Infrastructure Protection Research Project in Hungary. (Topics in Intelligent Engineering and Informatics; 12.) 184 p. Zürich: Springer International Publishing, 2016. pp. 79-90. ISBN:978-3-319-28090-5
- [19] DOBOR JÓZSEF; KOSSA GYÖRGY; PÁTZAY GYÖRGY: *Atomerőművi balesetek és üzemzavarok tanulságai 2.*, Hadmérnök, XII. évfolyam, 4. szám, 2015. december
- [20] LÁSZLÓ HALÁSZ: *Facts of climate change; theories and scenarios*, In: Földi László, Padányi József (szerk.), *Effects of climate change on security and application of military force*. 270 p., Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014. pp. 11-72., ISBN:978-615-5305-25-2

- [21] S. A. ROACH: *Measuring dust exposure with the thermal precipitator in collieries and foundries*, British Journal of Industrial Medicine, 1959 (16), pp. 104-122, ISSN 0007-1072.
- [22] L. WALDMANN, K. H. SCHMITT, *Thermophoresis and Diffusiophoresis of Aerosols*, Aerosol Science, Academic Press, London, 1966, pp.163-194.