

LEVEGŐSZŰRŐK HATÉKONYSÁGÁNAK MÉRÉSE II. RÉSZ: EGY CSIPETNYI AEROSZOLRÉSZECSCKE-FIZIKA, NÉHÁNY SZÓ AZ AEROSZOLOK ÉS AZ ÁRAMLÓ KÖZEG KAPCSOLATÁRÓL

EFFICIENCY TEST OF THE AEROSOL FILTERS PART II. A LITTLE BIT OF THE AEROSOL PARTICLE PHYSICS, SOME WORDS ABOUT THE RELATIONS BETWEEN THE AEROSOLS AND FLUID FLOW

CSURGAI József

(ORCID: 0000-0003-4770-7997)

jcsurgai@gmail.com

Absztrakt

Jelen írás egy többrészes cikksorozat második munkája, amely betekintést nyújt az aeroszolrészecskék fizikájába, tárgyalja azon legfontosabb törvényszerűségeket, amelyeket figyelembe kell venni az aeroszol mintavételi technikák megvalósításánál a jó mintavételi hatások elérése érdekében.

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

Kulcsszavak: aeroszolrészecské-fizika, Knudsen-szám, Stokes-szám, részecské-koncentráció, részecskeméret szerinti eloszlás, egyenérték-átmérő

Abstract

The actual paper is the second part of series of papers overviewing basics of the aerosol-particle-physics investigating the most important physical laws and principals that must be taken into account for building a proper aerosol sampling line of high sampling efficiency.

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-concentration, particle-size-distribution, equivalent diameter

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2018.02.21.

A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2018.06.18.

BEVEZETÉS

A levegőszennyezés az emberiség létszámának és iparosodottságának sajnos (jelenleg) szükségszerű velejárója, így az ellene való védekezés is ugyanúgy szükségszerű. Természetesen, valami ellen csak úgy tudunk védekezni, ha „látjuk”, vagy saját érzékeinkkel, vagy az adott célra készített eszközön, műszeren keresztül. Korunkban, környezetünkben párhuzamosan zajló folyamatok, mint a városiasodás, a természetes környezetünk védelmének kényszere, globális klímaváltozás, mind-mind igényt támasztanak a minél pontosabb, folyamatos megfigyelésre, monitoringra, mintavételre. Másrészt, a szenzortechnika és az „okos” műszerek, eljárások ugrásszerű fejlődése, a költségek folyamatos csökkenése lehetőséget ad ennek az igénynek kielégítésére. Nem is olyan régen, a nyolcvanas-kilencvenes években még a távmérő hálózatok regionális szinten kezdtek kiépülni, valamely költségvetési szervezet kezdeményezésével, majd a 2000-es években történt meg ezen rendszerek harmonizálása, országos szintre emelése, a funkciók és alaprendeltetés egyeztetésével. Ebben az időben kerültek kifejlesztésre olyan, kimondottan repülő eszközre telepíthető mérőrendszerek, amelyek kezdetben tömegüknél fogva pilóta vezette légi eszközzel voltak szállíthatók, de ugyanakkor megkezdődött a pilóta nélküli eszközökre való mérőrendszerek fejlesztése is. A jelenkor kihívása a pilóta nélküli (UAV – unmanned aerial vehicle) eszközökkel főként drónokkal történő monitoring. A szálló – lebegő eszközökre szerelt szenzorok többnyire vegyi anyagok, vagy elektromágneses sugárzások multispektrális (IR, látható fény, UV, röntgen és gamma) detektálására és analízisére szolgálnak, de a levegő állapotának, szennyezettségének igen fontos paramétere a szálló por és aeroszol koncentráció, és annak területi, illetve vertikális eloszlása is, valójában, ilyen detektort is szükséges lesz légi, mobil eszközre telepíteni. Jogosan merül fel a következő kérdés: vajon mi köze a levegőszűrők hatékonyságának mérése az aeroszolok koncentrációjának különböző légrétegekben való meghatározásához? Röviden: egyrészt, az aeroszol koncentráció gravimetrikus mérése szűrőanyagon visszatartott anyag mérésén alapszik, másrészt, az aeroszol részecskék fizikai tulajdonságai határozzák meg a szűrés, a méréshez való mintavétel, valamint a detektálás módszereit.

Az előző cikkben [1] egy elég száraz témáról esett szó, nevezetesen az aeroszol szűrés alapjairól, a különböző rendeltetésű aeroszol és porszűrők csoportosításáról és minősítésük szabványosított rendszeréről. Ebben a cikkben lényegesen „izgalmasabb”, és nem kevésbé gyakorlatiasabb témát találunk: a kedves Olvasóval áttekintjük az aeroszol részecskék viselkedését leíró alapvető törvényszerűségeket, amelyek megteremtik a fizikai alapjait, egyrészt, az aeroszolok szűrésének, másrészt, a helyes mintavételezés eszközeinek, módszereinek szakszerű alkalmazásához.

Ennek megfelelően a jelen cikkben megvizsgáljuk az aeroszolok néhány olyan fontosabb tulajdonságát, amelyek fontosak a viselkedésük, valamint a szűrés és mintavételezés sajátosságainak megértéséhez. Ehhez szükségünk van néhány olyan összefüggés ismeretére, amelyekkel le tudjuk írni ezen folyamatokat. Tesszük ezt a teljesség igénye nélkül, hiszen egy cikk egy fejezete nem foghatja át egy kolloid fizikai-kémiai kurzus teljes anyagát. Mindazonáltal pontosan erre teszünk kísérletet, vagyis, jobban mondva megpróbáljuk összefoglalni a cikkben leírt problémák megértéséhez szükséges legfontosabb fizikai törvényeket és összefüggéseket. Ennek során – nem utolsósorban a kedves Olvasó megnyugtatóra – kerülni fogjuk a hosszas és felsőbb matematikai jártasságot követelő levezetéseket, mivel egyrészt itt úgy sincs rá lehetőség, másrészt a jelen cikk anyagának megértéséhez viszonylag egyszerű képletek alkalmazása is elegendő. Továbbá a kedves Olvasó ne keresse a különböző összefüggések láttán az oda vonatkozó hivatkozásokat, mivel itt csakis és kizárólag a klasszikus áramlástan törvényszerűségeiből indulunk ki és az itt található folyamatok, kritériumok jellemzésére rendre az ezekből derivált levezetéseket

alkalmazzuk, amelyeket nemhogy egy egyetemi oktató, de a hallgatók is kötelesek érteni és alkalmazni. Stokes, Knudsen, Kármán, Cunningham és mások neve mára a fizika, a fizikai kémia klasszikusai mellé emelkedett és törvényeiket, összefüggéseiket ma már ugyanolyan általánossággal alkalmazzuk, mint a Pitagorasz-tételt, Newton törvényeit, Nernst reakciósebesség-elméletét, vagy a termodinamika főtételeit.

AZ AEROSZOLOK DEFINÍCIÓJA, A CIKKBEN ALKALMAZOTT JELÖLÉSEK

Mivel az aeroszolookról van szó az aktuális munkában, tisztázzuk, mi is az. Ha aeroszolookról beszélünk, akkor egy olyan kolloid rendszerre gondolunk, ami egy gáz halmazállapotú közegben diszpergált folyadék vagy szilárd részecskék halmaza. A részecskék halmazállapotától függően, a folyadékcsepp aeroszolókat ködnek, a szilárd szemcse aeroszolókat füstnek nevezzük.

Ezek jellemzésére szükségünk lesz egy sor fizikai mennyiség és matematikai kifejezés alkalmazására, amelyeket alábbi táblázatban találunk meg:

v_s	Részecske ülepedési sebessége
F	Külső erő
F_m	Közegellenállási (súrlódási) erő
d	Részecske jellemző mérete
d_c	Akadály jellemző mérete
D	Csőátmérő (áramlási keresztmetszetre jellemző lineáris mennyiség)
ν_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
m	Részecske tömege
g	Gravitációs gyorsulás, értéke a 45° földrajzi szélességen, tengerszinten: $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$
ρ_p	Részecske 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
k	Boltzmann-állandó, $k = 1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
n_m	Molekulasűrűség, $n_m = p/(kT)$
N	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
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 aeroszolak 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.: $X = 1,36$

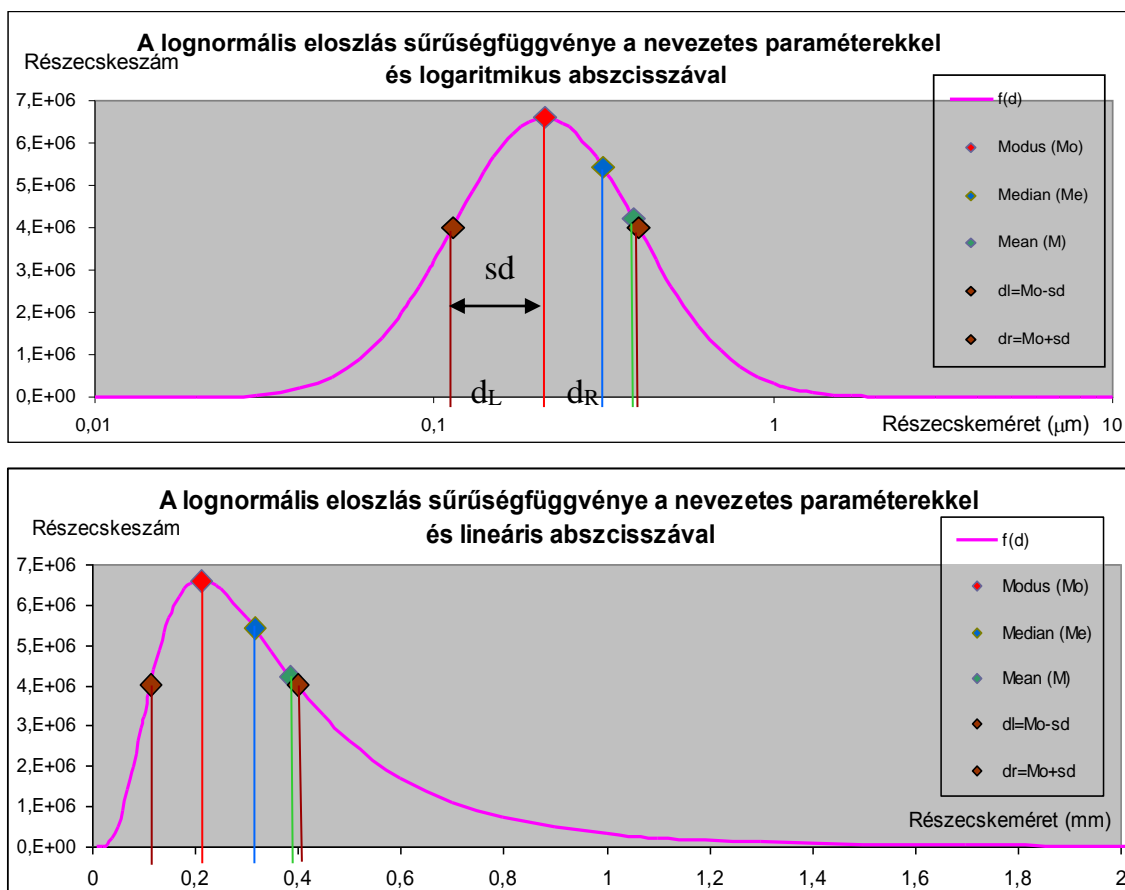
1. táblázat A cikkben alkalmazott jelölések és jelentésük (saját szerkesztés)

Megjegyzés: az egyszerűség és a könnyebb érthetőség kedvéért a táblázat jelölései összhangban vannak az előző cikkben [1] alkalmazott jelölésekkel, kiegészítve az adott cikkben bevezetett új mennyiségekkel. Azonban egyes esetekben sajnos meg kellett változtatni az előzőekben használt szimbólumokat, mint pl. a közeg *dinamikai viszkozitásának* esetében, ahol az a ν_a jelölést kapta, mivel a részecskék méreteloszlás sűrűségfüggvényét jellemző egyik nevezetes mennyiség, a *modus*, kapta a μ jelölést.

AEROSZOL RÉSZECSKÉK MÉRETELOSZLÁSA

Ahhoz, hogy egy aeroszol rendszert jellemezni lehessen, ismerni kell a rendszert alkotó aeroszol részecskék méreteloszlását. A környezet és a zárt terek levegője felfogható nagy mennyiségű aeroszol részecskével terhelt aeroszol rendszernek. Az ebben a rendszerben előforduló aeroszol részecskék méreteloszlása általában a lognormális eloszlást követi.

Lognormális eloszlás jellemzője, hogy az abszcissa lineáris értékeinek logaritmizálásával a normál eloszlás függvényéhez jutunk, így meg tudjuk határozni az olyan nevezetes értékeket, mint a *modus* és *medián*, középérték (*mean*) és *szórás* (diszkrét értékek esetében *standard deviáció*).



1. ábra A lognormális eloszlást követő ideális aeroszol-részecske méreteloszlás (a szerző szerkesztése)

A fenti ábrán, mivel matematikai értelemben folyamatos függvényről beszélünk, az eloszlásfüggvény jellemző paraméterének a szórást neveztük meg. Természetesen, a gyakorlati méréseknél mindig diszkrét spektrumot fogunk kapni, ahol annak jellemző paramétere a standard deviáció lesz és csak nagy elemszámnál feleltethetjük meg a két paramétert egymásnak:

$$sd \approx \sigma_p \quad (1)$$

A továbbiakban a szórást, mint paramétert fogjuk alkalmazni, hiszen ebben a részben elméleti síkon írjuk le a részecskék eloszlására vonatkozó összefüggéseket. A lognormális eloszlás sűrűségfüggvénye az alábbi általános képlettel írható le:

$$f(d) = \frac{1}{d \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln d - \mu)^2}{2\sigma_p^2}} \quad (2)$$

A részecske méretspektrum tanulmányozásánál kiemeltük a szórás mellett a másik nevezetes paramétert, a függvény maximumhelyét, ez lesz a *modus* (μ) és ezt a mennyiséget azonosítjuk a mi esetünkben a *leggyakoribb részecskeméretre* tartozó átmérővel (*CMD*). Itt a kedves Olvasó észreveszi, hogy a *CMD* (*Count Median Diameter*) kifejezés valójában helytelen, hiszen itt medián helyett a modus felel meg a fizikai tartalomnak, de ezt

nagylelkűen megbocsájtjuk a szakirodalomnak [2][3][5][6]. Ez a mennyiség az alábbi viszonyban van a többi, méretspektrum analízisének használt mennyiséggel:

$$\begin{aligned}d_L &= \mu - \sigma_p \\d_R &= \mu + \sigma_p \\ \sigma_p &= \frac{CMD}{d_L} = \frac{d_R}{CMD}.\end{aligned}\tag{3}$$

A részecskék tömegeloszlásának vizsgálatokor figyelembe vesszük, hogy az a térfogattal, végső soron az átmérő köbével arányos mennyiség, vagyis, a *leggyakoribb részecsketömeghez tartozó átmérő* és a leggyakoribb részecskeméretre tartozó átmérő között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$MMD = CMD \cdot \exp\left[3(\ln \sigma_p)^2\right]\tag{4}$$

A részecskék gravimetrikus mérési módszerei során alapvetően az aeroszolok tömeg (térfogati) eloszlását vizsgáljuk, míg a lézeres számlálók méretspecifikusak, így szükség van a két fajta eloszlás egymásba konvertálásának módszerére, ami a fenti (4) összefüggésen alapszik.

AEROSZOL RÉSZECSKÉK MÉRETÉNEK, TULAJDONSÁGAINAK ÉS VISELKEDÉSÜKNEK MEGFELELŐ EGYENÉRTÉK ÁTMÉRŐK

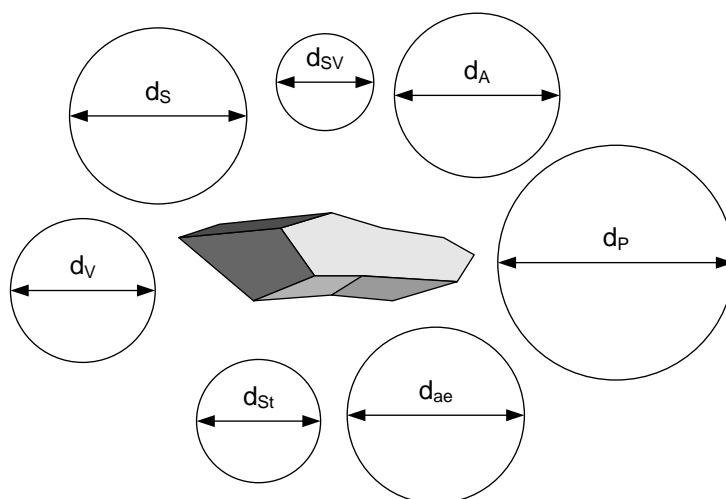
Az aeroszolok közegben való viselkedése alapvetően a méretüktől függ, a közeghez viszonyított sűrűségük és halmazállapotuk szerepe itt másodlagos.

Vizsgálatunk tárgya ez esetben a részecske mérete, valamint a közöttük áramló levegőmolekulák kölcsönhatása lesz.

A folyadék halmazállapotú aeroszolokkal könnyű dolgunk van, hiszen ezek a közegben lebegve, áramolva a gömbszimmetriára törekednek, vagyis méretük

Először is, el kell döntenünk milyen mérettel és geometriai alakkal jellemezzük az aeroszol részecskéket. A kérdés triviálisnak hangzik, de a válasz nem egyszerű, vagyis sok egymástól eltérő, önmagában helyes válasz létezik, hiszen szabálytalan alakú és egymástól eltérő testekről van szó. Természetesen ebben a formában leírni a tulajdonságaikat és viselkedésüket nehézkes, ezért gömbszimmetrikus testeknek feleltetjük meg őket és a méretüket egy adott geometriai paraméterrel, vagy fizikai tulajdonsággal rendelkező gömb átmérőjével jellemezzük, így valamilyen egyenérték átmérőt kapunk. A kiválasztás elve egyszerű: az adott egyenérték átmérővel és sűrűséggel jellemzett gömb, az adott folyamatban ugyanolyan fizikai paraméterrel, viselkedéssel rendelkezzen, mint a kérdéses részecske.

Az alábbi ábrán láthatjuk a leggyakrabban alkalmazott és a részecske valamilyen tulajdonságát, illetve viselkedését jellemző méreteket, illetve az alatta levő táblázatban pedig az adott méretet definiáló egyenérték átmérő számítási módszerét is. A geometriai tulajdonságra utaló – a térfogatra (d_V), felületre (d_S), fajlagos felületre (d_{SV}), vetületre (d_A), illetve kerületre (d_P) vonatkoztatott – méreteket az egyenérték gömb térfogati, felületi, fajlagos felületi, illetve a vetületi kör területi és kerületi paramétereiből kapjuk. A Stokes és aerodinamikai átmérőt pedig a részecske közegellenállásából, ülepedéséből és az ezekkel kapcsolatos módosító tényezőkből származtatjuk, ezeket a 4-7. pontban fogjuk tárgyalni.



2. ábra Egy adott szabálytalan alakú aeroszol részecskét jellemző egyenérték átmérők (a szerző szerkesztése)

Térfogatra vonatkoztatott átmérő	Annak a gömbnek az átmérője, amelynek a térfogata megegyezik a kérdéses részecske térfogatával	$d_v = \sqrt[3]{6V/\pi}$
Felületre vonatkoztatott átmérő	Annak a gömbnek az átmérője, amelynek a felülete megegyezik a kérdéses részecske térfogatával	$d_s = \sqrt{S/\pi}$
Fajlagos felületre vonatkoztatott átmérő	Annak a gömbnek az átmérője, amelynek a fajlagos felülete megegyezik a kérdéses részecske térfogatával	$d_{sv} = d_v^3 / d_s^2$
Vetületre vonatkoztatott átmérő	Annak a körnek az átmérője, amelynek a területe megegyezik a kérdéses részecske síkra bocsátott vetületével	$d_A = \sqrt{4A/\pi}$
Kerületre vonatkoztatott átmérő	Annak a körnek az átmérője, amelynek a kerülete megegyezik a kérdéses részecske síkra bocsátott vetületének kerületével	$d_p = P/\pi$
Stokes-átmérő	Annak a gömbnek az átmérője, amelynek a sűrűsége és az ülepedési sebessége megegyezik a kérdéses részecskéével	$d_{St}^2 C_C(d_{St}) = \frac{d_v^2 C_C(d_v)}{X}$ (5)
Aerodinamikai átmérő	Annak az egységnyi sűrűségű (1000 kg/m ³) gömbnek az átmérője, amelynek az ülepedési sebessége megegyezik a kérdéses részecskéével	$d_{ae}^2 C_C(d_{ae}) = d_v^2 C_C(d_v) \frac{\rho_p}{\rho_0 X}$ $d_{ae}^2 C_C(d_{ae}) = d_{St}^2 C_C(d_{St}) \frac{\rho_p}{\rho_0}$ (6)

2. táblázat Az aeroszol részecskék méreteinek jellemzői (saját szerkesztés)

Az utolsó két jellemző, ahogy fentebb utaltunk rá, a Stokes- és aerodinamikai átmérő definíciója ülepedési és sűrűlési (közegellenállási) tulajdonságokból vezethető le, ezekkel az alábbi pontokban foglalkozunk.

A RÉSZECSKÉK SÚRLÓDNAK

A részecskékre az adott közegben, valamilyen külső erő hatására (nehézségi, centrifugális, stb) történő mozgásuk miatt sűrűlési, közegellenállási erő hat. A részecske körüli áramlás jellege meghatározó jelleggel függ a részecske méretétől és nyugodtan kimondhatjuk, hogy az aeroszolok világában, hacsak nem kényszerítjük a részecskéket a közeghez képest valószínűtlenül nagy sebességre, az áramlás jellege alapvetően lamináris lesz, ezért, innentől kezdve, *a részecskék viselkedését és az áramlás jellegét alapvetően lamináris tartományban fogjuk vizsgálni.*

Erre az esetre alkalmazzuk George Gabriel Stokes 1845-ben kimondott törvényét, amely egy viszkózus, összenyomhatatlan fluidumban u sebességgel mozgó, d sugarú, gömb alakú tárgyra ható F sűrűlési erőt határoz meg. Ezt a törvényt most mi is levezetjük Newton sűrűlési törvényéből, amely szerint egy testre ható közegellenállási erő F függ a testnek az áramlásra merőleges keresztmetszetétől A , az áramló közeg térfogatra vonatkoztatott energiasűrűségétől E_{kin}/V , valamint egy együtthatótól f , ami figyelembe veszi a test alakját, méretét, az áramlási sebességet és a közeg fizikai tulajdonságait.

$$F_m = f(Re) \cdot A \cdot \frac{E_{kin}}{V} = f(Re) \frac{d^2 \pi}{4} \frac{1}{2} \rho_m u^2 \quad (7)$$

Az f együttható lamináris tartományban gyakorlatilag egyenesként közelíthető az alábbi formulával:

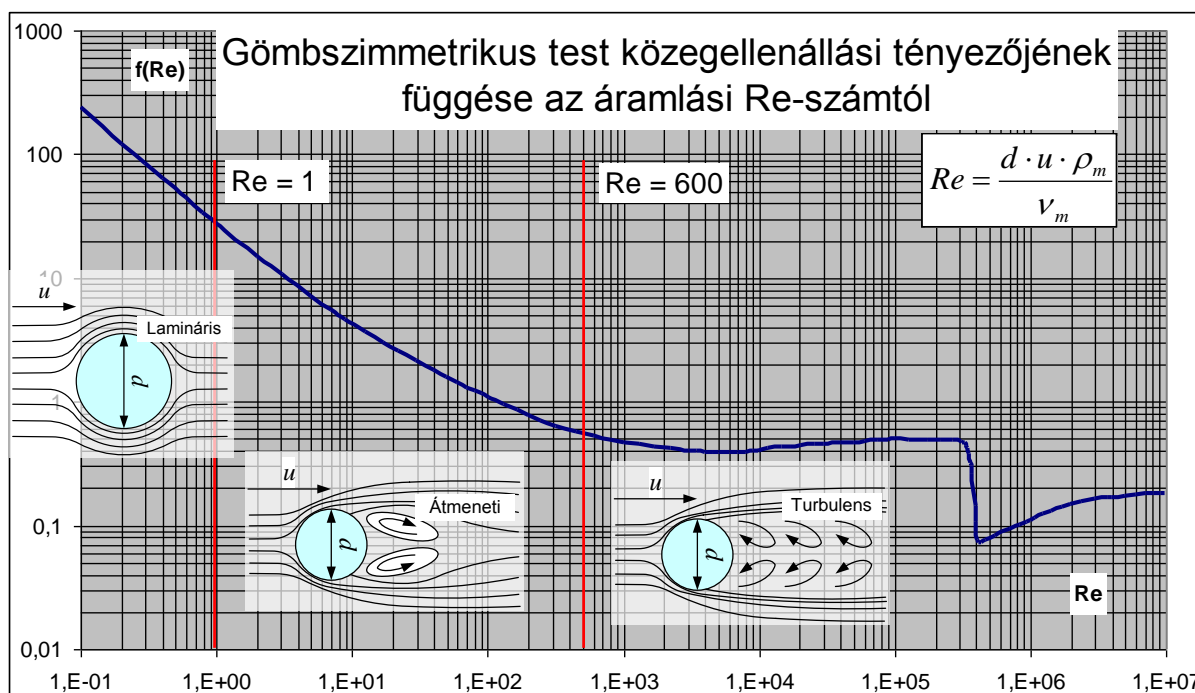
$$f(Re) = \frac{24 \cdot \nu}{d \cdot u \cdot \rho_m} = \frac{24}{Re} \quad (8)$$

Ezt az összefüggést alkalmazzuk a Newton-féle sűrűlési törvényre:

$$F_m = f(Re) \cdot A \cdot \frac{E_{kin}}{V} = \frac{24 \cdot \nu}{d \cdot u \cdot \rho_m} \frac{d^2 \pi}{4} \frac{1}{2} \rho_m u^2 \quad (9)$$

Elvégezve az egyszerűsítéseket, kapjuk a Stokes-egyenlet végleges alakját:

$$F_m = 3\pi \nu d u \quad (10)$$



3. ábra A közegellenállási tényező és a részecske körüli áramlás jellegét meghatározó Re-szám részecskeméret és relatív áramlási sebessége függése (a szerző szerkesztése)

Összességében, lamináris tartományban, makroszkopikus testek esetében, részecskékre az $1\ \mu\text{m}$ -nél nagyobb méretűekre értjük, a test körül áramló közeg folyamatosnak tekintendő, így a Stokes-egyenlet eredeti formájában alkalmazható. Ezt az áramlási formát viszkózus, vagy *kontinuum-tartománynak* hívjuk és az áramlás matematikai leírására a *Navier-Stokes egyenletek* alkalmazhatók helyesen felállított határértékekkel. Ebben a tartományban a közeg molekuláinak a részecske falával történő ütközése egyenletes intenzitású, vagyis az állandó statikus nyomásnak megfelelő jelenséget mutat.

A RÉSZECSKÉK „MEGCSÚSZNAK” A MOLEKULÁK KÖZÖTT

Amikor $1\ \mu\text{m}$ -nél kisebb részecskéket vizsgálunk, azt tapasztaljuk, hogy a méret csökkenéssel együtt a közegellenállási erő egyre kisebb lesz a vártnál, tehát a Stokes-egyenletet eredeti formájában nem tudjuk alkalmazni. Vizsgáljuk meg a problémát.

Azt tapasztaljuk, hogy részecskénket a közeg molekulái kezdik nem „egyenletesen” bombázni, időnként a molekulák, mintegy „elkerülik” a testet, vagyis részecskénk a közeg molekulái között mintegy „megcsúszik”, mozgása ez által gyorsabb lesz. Ez a fizika nyelvén lefordítva azt jelenti, hogy a közeg molekuláinak két ütközés közötti szabad úthossza (λ) kezd összemérhetővé válni a részecskénk méretével. Itt a közeg már egyre kevésbé tekinthető folyamatosnak, vagyis az áramlási tartomány megváltozik, *tranziens* (átmeneti, „Knudsen-áramlás”), majd a $0,01\ \mu\text{m}$ -es részecskeméret alatt átmeny *molekuláris jellegűvé*, vagyis a részecskefállal történő ütközések intenzitása rendszertelenné válik.

Ezt a jelenséget Ebenezer Cunningham brit matematikus tanulmányozta behatóan és sikerült a „megcsúzás” jelenségét jellemezni egy korrekciós faktorról [2, 2.4.2], amely mennyiségileg is pontosan leírja egy adott méretű részecske méretcsökkenése és a közegellenállási erő fajlagos csökkenése közötti összefüggést.

Definiáljuk a molekulák ütközése közötti átlagos szabad úthosszat, kiindulva a standard állapotú levegő molekulásűrűségéből, figyelembe véve a közeg átlagos molekulaméretét, illetve a gázállapotra jellemző átlagos molekulasebességet, valamint az ütközések statisztikus

voltát, vagyis, azt, hogy az ütközéseket leíró koszinusztétel koszinusztagja a nagyszámú ütközések miatt zérus:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi}d^2 p} = \frac{l}{\sqrt{2\pi}d^2 n_m} \quad (11)$$

Az átlagos szabad úthossz standard állapotú levegőben kb. $\lambda = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}$.

Cunningham bevezetett egy korrekciós csúszási faktort, amelyet a részecskeméret és a közeg átlagos szabad úthossza ismeretében számíthatunk:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} \left[A_1 + A_2 \cdot e^{-A_3 \frac{d}{\lambda}} \right] \quad (12)[2]$$

Ezzel a korrekcióval már jól le tudjuk írni a részecskékre ható közegellenállási erőt a módosított Stokes-egyenlettel:

$$F_m = \frac{3\pi\eta v d}{C_c} \quad (13)$$

Mivel részecskénk és a közeg molekulái közötti ritkább ütközések nagyobb mértékben befolyásolják a test mozgásának irányát is, így a szubmikrométeres tartományban még egy fontos jelenséggel találkozunk: részecskénk mozgása rendszertelenné válik, Brown-mozgásos jelleget kezd öltetni és diffúziós tulajdonságokat mutat, de ezt már alább fogjuk tárgyalni.

A RÉSZECSKÉK ÜLEPEDNEK

Egy, az aeroszolk mérettartományába tartozó részecske a levegőben gyorsan eléri azt a sebességet, amit mi *ülededési sebességnek* (v_s) hívunk, és egyensúlyi állapotba kerül. Ezt az állapotot három erő egyensúlya okozza, a nehézségi, a felhajtó (arkhimedeszi) és a fentebb tárgyalt közegellenállási erő:

$$mg + F_m + F_A = 0$$

Behelyette sítve és megoldva : (14)

$$\frac{d^3}{6} \pi \rho_p g - \frac{3\pi \eta v_s}{C_c} - \frac{d^3}{6} \pi \rho_m g = 0$$

$$v_s = \frac{d^2 C_c (\rho_p - \rho_m) g}{18\eta} \quad (15)$$

Az aeroszol részecskék 10 μm alatt oly csekély ülededési sebességgel ($v_s < 1 \text{ mm/s}$) rendelkeznek, hogy a levegőben – még zárt térben is – jelenlévő légáramlás miatt gyakorlatilag korlátlan ideig lebegnek, így eltávolításuk alapvetően valamilyen szűrőszellőztető berendezéssel lehetséges.

A RÉSZECSKÉK SZABÁLYTALAN ALAKÚAK

Mint már említettük fentebb, a részecskék szabálytalan voltával kapcsolatban, mi a fizikai tulajdonságokra helyezük a hangsúlyt, nevezetesen a súrlódási és ülepedési jellemzőkre, konkrétan, a részecskét azonosítjuk egy olyan gömbbel, amelynek az ülepedési sebessége megegyezik a kérdéses részecskéével. Ehhez a konverzióhoz azonban szükség van egy olyan paraméter bevezetésére, amely figyelembe veszi a szabálytalan alakú testnek a gömbszimmetriától való eltérését. Ez lesz a *dinamikus alak tényező (alakfaktor) (X)*, amellyel a szabálytalan geometria *közegellenállását* megfeleltetjük a gömbszimmetrikusénak. Persze jogosan fogalmazódik meg a kérdés, hogy vajon minden szabálytalan test azonos alak tényezővel bír-e. Természetesen, ahány test, annyiféle alak- és közegellenállási tényező, azonban érdekes módon, pont a szabálytalanságuk miatt talán, a hasonló méretű és sűrűségű részecskék nevezetes mutatói igen közel esnek egymáshoz [12]. Ezt számos gyakorlati mérés és elméleti kutatás, szimuláció támasztja alá [11][12][13]. Mindenesetre röviden tekintsük át az alakkonverzió fizikai jelentését és a szükséges összefüggéseket. Abból indulunk ki, hogy a dinamikus alakfaktor a valódi közegellenállási erő és egy ugyanolyan sebességű és térfogatú gömb esetén fellépő közegellenállási erő aránya:

$$X = \frac{F_m}{\frac{3\pi\nu v_s d_v}{C_c(d_v)}} \quad (16)$$

Ezt beépítjük a Stokes-törvénybe és az ülepedési sebességet kifejezzük a térfogat-egyenérték, az (5) és (6) összefüggésekkel megadott Stokes és aerodinamikai átmérőn keresztül:

$$F_m = \frac{3\pi\nu d_v u X}{C_c(d_v)} \quad (17)$$

$$v_s = \frac{d_v^2 C_c(d_v) (\rho_p - \rho_m) g}{18\nu X} = \frac{d_{st}^2 C_c(d_{st}) (\rho_p - \rho_m) g}{18\nu} = \frac{d_{ae}^2 C_c(d_{ae}) (\rho_0 - \rho_m) g}{18\nu} \quad (15a)$$

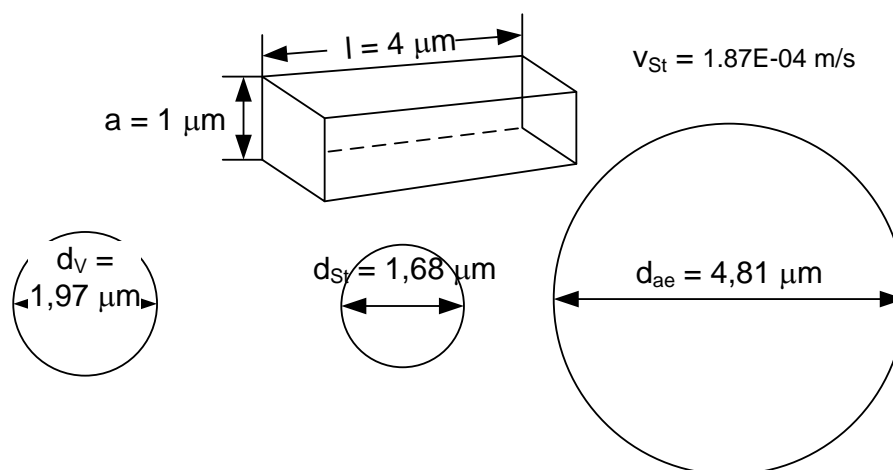
Ha a közegellenállási erőt ki szeretnénk terjeszteni a turbulens tartományra is, figyelembe véve a részecskék csúszását és szabálytalan alakját, a Stokes-erő (17) helyett az általános, newtoni alakot kell kiegészíteni:

$$F_m = f(Re) \frac{d_v^2 \pi}{4} \frac{\rho_m u^2}{2} \frac{X}{C_c(d_v)} \quad (18)$$

Ezt a kifejezést beírva az ülepedési egyensúly kifejezésbe a Stokes-erő helyébe, majd megoldva kapjuk az ülepedési sebességet:

$$v_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{d \cdot g}{f(Re)} \cdot \frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_m} \frac{C_c}{X}} \quad (19)$$

Az alábbi ábrán láthatók egy hasáb alakú részecskéhez hozzárendelt egyenérték-átmérők:



4. ábra Egy négyzet alapú hasáb részecske egyenérték átmérői, azonos ülepedési sebességgel (a szerző szerkesztése)

A RÉSZECSKÉK DIFFÚZIÓRA HAJLAMOSAK

A fentiekben említettük, hogy szubmikrométeres tartományban a részecskék kezdenek a gázmolekulákhoz hasonlóan viselkedni, így természetesen diffúziós tulajdonságot is mutatnak. Mivel a részecskék mérete azért jelentősen meghaladja a molekulák méretét, így mozgékonyaságuk messze elmarad azokétól. Mindenesetre a részecskediffúzió fizikai jelentése azonos a molekuladiffúzióval, csak a részecskeméretből fakadó mennyiségi jellemzőkben tér el. A diffúziós együttható számítására az Einstein-Stokes egyenletet alkalmazzuk, a részecskék mozgékonyaságát módosító Cunningham csúszási faktorról való súlyozással:

$$Diff = \frac{kTC_c}{3\pi\nu d} \quad (20)$$

A részecskéknek a forrástól kialakuló koncentrációjuk változása a normál eloszlás transzformált alakjával írható le, így a forrástól megtett átlagos távolságuk, amely valójában az adott eloszlásfüggvény szórása, az alábbi összefüggéssel adható meg:

$$\bar{x} = \sqrt{2Diff \cdot t} \quad (21)$$

Mivel nagyon finom diszperz aeroszoloknál a nagyon kis méret miatt előtérbe kerülhetnek a diffúziós tulajdonságok is, ezért most a (20) egyenletből kifejezzük a diffúziós állandóhoz tartozó méretet és azt elnevezzük *diffúzió egyenérték átmérőnek* d_{diff} :

$$d_{diff} = \frac{kTC_c}{3\pi\nu Diff} \quad (22)$$

Természetesen, ez a folyamat nem csak nyugalmi állapotban lévő közegben játszódik le, hanem mozgásban lévő közegre is, itt figyelembe kell venni az advektív diffúziós folyamatot, vagyis, ha pillanatnyi kibocsátásról beszélünk, akkor mozgó forrást feltételezünk és a diffúziós folyamatot mozgó viszonyítási rendszerben vizsgáljuk (PUFF-modell) 3D-Gauss-modellel való közelítésben, míg folyamatos kibocsátás esetén (PLUME-modell) végtelen sok pillanatnyi kibocsátást feltételezünk és 2D-Gauss-modellel írjuk le. Ez a módszer sok veszélyes ipari baleset során kibocsátott vegyi, vagy radioaktív szennyezés modellezésére

alkalmas [16], viszonylag kevés bemenő adattal, igaz emiatt többé-kevésbé idealizált környezeti, terepi, atmoszferikus viszonyokra. Ezen modellek mellett egyre jobban teret hódítanak a numerikus (CFD – Computational fluid dynamics) eljárások, amelyek végeselem-módszeren alapulnak és bár hatalmas mennyiségű, az áramlási térre, a közeg termodinamikai állapotára vonatkozó adattömegre és nem utolsósorban kimondottan erős hardverre és jelentős gépidőre van szükségük, de nagyon jó közelítéssel szimulálnak akár zárt, akár nyílt térben zajló folyamatokat, figyelembe véve az akadályok (fal, domborzat, érdesség, stb.) és más, a turbulenciából, illetve a közeg és a részecskék kölcsönhatásából származó effektusokat [17][18][19].

A RÉSZECSKÉK KÖVETIK AZ ÁRAMLÁST

A módosított Stokes-egyenlet (settling_velocity) alkalmazásával jól leírhatunk, a vizsgált részecskénkre jellemző más fontos tulajdonságokat is. Egyrészt, ha az egyenletben a gravitációs gyorsulás állandóját egy centrifuga fordulatszámából és pályasugarából számítható centripetális gyorsulás értékével helyettesítjük (az ülepítő centrifuga elve), más inerciális ülepedési sebességet tudunk elérni. Másrészt, és ez lesz számunkra a fontosabb, a Stokes-egyenletből levezetett gravitációs ülepedési sebesség összefüggését a gravitációs gyorsulással osztva, egy időállandót kapunk, ami független a részecskére ható erőtől és csakis az adott közegben levő adott méretű és sűrűségű részecskére jellemző:

$$\tau = \frac{d^2 C_c (\rho_p - \rho_m)}{18\nu} \quad (23)$$

Ez az időállandó számunkra igen fontos paraméter. *Relaxációs időnek* hívjuk és fizikai tartalmát megmagyarázzuk. Tegyük fel részecskénk nyugugalomban van. Ha hirtelen külső és állandó erőhatás éri, egy, a tömegéből fakadó **a** gyorsulással mozdul el, majd a közegellenállási erő fékező hatására eléri az adott erőhatásnak megfelelő végsebességet. Ha feltételezzük, hogy „álló” helyzetből végsebességre **t** idő alatt gyorsul fel, akkor a két időmennyiség között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$\frac{\tau}{t} = 1 - \frac{1}{e} \quad (24)$$

Vagyis, a relaxációs idő kb. 63 %-a annak az időnek, ami alatt a részecske eléri egy adott erőhatáshoz hozzárendelt végsebességet. Ha a részecskénk egy áramló közegben van, ahol az áramlási sebesség **u**, a *relaxációs idő* és az *áramlási sebesség* szorzata az ún. *megállási távolság*, vagy másképp *relaxációs hossz*, lesz:

$$s_p = u \cdot \tau = \frac{d^2 C_c (\rho_p - \rho_m)}{18\nu} u \quad (25)$$

Ha a részecskénk már nem a lamináris, hanem az átmeneti tartományban mozog ($1 < Re \leq 400$), a megállási távolságot egy empirikus formula segítségével számíthatjuk:

$$s_p = u \cdot \tau = \frac{d(\rho_p - \rho_m)}{\rho_m} \left[Re^{1/3} - \sqrt{6} \arctan\left(\frac{Re^{2/3}}{\sqrt{6}}\right) \right] \quad (26)[2]$$

Megjegyzés: a Re-számot itt az áramlási front sebességéből számítjuk.

A megállási távolság és a részecske útjába eső akadály jellemző méretének aránya egy, az aeroszol részecske viselkedésének nagyon fontos, dimenziómentes paraméterét szolgáltatja, az ún. *Stokes-számot*. Ez a mennyiség jellemzi a részecskék azon tulajdonságát, hogy mennyire képes követni az áramlási tér anomáliái során az áramvonalakat. Az akadály jellemző mérete szűrőanyag esetén a szálvastagság, míg impaktor esetén a konfúzor belső sugara lesz. Minél nagyobb a Stokes-szám, a részecskék annál nagyobb valószínűséggel lép ki az áramlásból és ütközik, kiüledik, pl. egy könyökcső falán, a szűrőanyagon, vagy egy impaktor felületén. Impaktorra számolva, ahol a konfúzor belső sugara $d/2$ a Stokes-szám az alábbiak szerint számítandó:

$$Stk = \frac{s_p}{d} = \frac{u \cdot \tau}{d} = \frac{d^2 C_c (\rho_p - \rho_m) \mu}{9 \nu d_c} \quad (27)$$

Az ütközés feltétele itt: $Stk \geq 1$. Ezt az elvet alkalmazzák a környezeti és munkahelyi aeroszolok mintavételénél, ahol az egyezményes mérettartományok [8][9][10] mintázásánál meghatározott részecskeméretnél mintegy „levágják” a nagyobb méretű frakciókat, de erről a következő cikkben lesz szó.

A RÉSZECSKÉK KOAGULÁCIÓRA HAJLAMOSAK

Egy kis időt kell szentelnünk még egy fontos jelenség leírásának, nevezetesen, a részecskék koagulációjának, vagyis az aeroszol részecskék ütközésének és ennek eredményeképpen azok összetapadásának. Ez a folyamat óhatatlanul végbemegy, mint áramló, mint viszonylag nyugalomban lévő közegben, mivel a részecskék ütköznek egymással, is nem csak a közeg molekuláival. Mindazonáltal, kicsit előrefutva, le kell szögeznünk, hogy az aeroszolok világában, nem extrém magas koncentrációkban és tegyük fel, néhány perces mérési idő alatt ez a folyamat általában egészen lassú és ritkán kell vele számolnunk. Ennek az oka az, hogy a az aeroszol részecskék Brown-mozgása sokkal lassúbb, mint a közeg gázmolekuláinak, mivel a részecskék diffúziós együtthatója 5-6 nagyságrenddel kisebb lesz, mint a gázzészecskéké. Természetesen, ha precíz akarunk lenni, akkor, ismervé a vizsgált részecskék koncentrációt, valamint a mérésünk paramétereit, néhány közelítő számítással meg kell győződnünk róla, hogy el tudjuk-e hanyagolni mérésünk során a koagulációt, vagy figyelembe kell-e vennünk, legalábbis a mérésünk kumulatív hibája szempontjából.

Vajon mi várható a koaguláció eredményeként, ha annak valószínűsége az aeroszol részecskék között jelentős? Elsősorban a részecskeszám-koncentráció csökken, míg a részecskék térfogata nő, miközben a részecskék méretének változása igen lassú. Ez abból következik, hogy kétszeres térfogathoz csak mintegy 26 %-os méretnövekedés járul. Természetesen a jelenség során a részecskék össz tömege változatlan marad. Mindazonáltal, ha lassan is, de a koaguláció során a részecskék méreteloszlás-függvényére jellemző *CMD* (részecskék átlagmérete) érték növekszik, míg a másik jellemző mennyiség, a szórás σ_p gyakorlatilag állandó marad.

A koagulációnak két típusa van, vagyis két jelenség válthatja ki a részecskék ütközését:

- A részecskék Brown-mozgásából adódó ún. termális koaguláció,
- Külső, a közegre gyakorolt hatás, pl. lökéshullám által kiváltott ún. kinematikus koaguláció.

A második esettel itt most nem foglalkozunk, mivel ahhoz, hogy a kinematikus koaguláció mértéke jelentős legyen, vagyis nagyságrendileg összemérhető a termikus koagulációéval, egyrészt nagy lökéshullámra van szükség (akusztikus koaguláció, 120 dB-nél nagyobb hullámfront esetén)[2, 39. old.], másrészt intenzív turbulencia során, ahol a közeg örvényeinek mérete összemérhető a részecskék megállási távolságával. Ez a szerző közelítő

számításai szerint $Re > 10^6$, esetén is csak az 5 μm -nél nagyobb részecskénél lehet jelentős, így nem extrém áramlásoknál ezt az effektust elhanyagoljuk.

A továbbiakban a termál koaguláció folyamatát fogjuk leírni, egy egyszerűsített, majd egy általános megközelítéssel. Az egyszerűsített elmülethez tegyünk egy elég durva feltételezést, nevezetesen, hogy legyen az aeroszolunk nagyjából monodiszperz, tehát közel azonos méretű részecskék ütköznek majd. Ezt az elmületet Smoluchowski koagulációnak nevezzük, kidolgozója után (1917). Az elmélet alapja a feltevés, hogy a koaguláció az egyes részecskék diffúziója más részecskék felületére. Így kapjuk az alapösszefüggést:

$$\frac{dN}{dt} = -KN^2 \quad (28)$$

A differenciális alapösszefüggésben szétválasszuk a változókat, integráljuk:

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 K t} \quad (29)$$

Ha a részecske mérete nagyobb, mint a gázmolekulák közepes szabad úthossza, a koagulációs együtthatót ki tudjuk fejezni az alábbi képlettel:

$$K = 4\pi d \text{Diff} = \frac{4kTC_c}{3\nu} \quad (30)[4]$$

Vajon milyen összefüggés van a részecskék számának változása és a részecskék méretének változása között? Gondolkozzunk: ideális esetben, ha a részecskék gömb alakúak és folyékonyak, akkor ahhoz, hogy kétszer akkora lineáris mérethez, nyolcszor akkora térfogat, tartozik, vagyis nyolcszor annyi részecske szükséges. Általánosítva: a részecskeméret-változás fordítottan arányos a részecskeszám-változás köbgyökével:

$$\frac{d(t)}{d(0)} = \left(\frac{N(0)}{N(t)} \right)^{1/3} \quad (31)$$

Ide behelyettesítjük a (29) összefüggést, valamint a (31) összefüggést, rendezzük és kapjuk a teljes formulát monodiszperz aeroszokra:

$$d(t) = d(0) (1 + N_0 K t)^{1/3} \quad (32)$$

Ahhoz, hogy megbecsüljük a koaguláció jelentőségét egy adott koncentráció és a részecskeméret ismeretében, számoljuk ki, mennyi időre van szükség a részecskék számának feleződéséhez $t_{1/2}$, illetve a részecskeméret megduplázásához t_2 !

$$t_{1/2} = \frac{1}{N(0)K} \quad (33)$$

$$t_2 = \frac{7}{N(0)K}$$

Lássuk a kiszámolt értékeket táblázatosan, ha a koagulációs együttható értékét $K = 5 * 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$ értéknek vesszük:

Kezdeti részecskeszám-koncentráció (1/m ³)	Koncentráció felezési ideje (s)	Részecskeméret megduplázódásának ideje (s)
1,00E+10	2,00E+05	1,40E+06
1,00E+11	2,00E+04	1,40E+05
1,00E+12	2,00E+03	1,40E+04
1,00E+13	2,00E+02	1,40E+03
1,00E+14	2,00E+01	1,40E+02
1,00E+15	2,00E+00	1,40E+01
1,00E+16	2,00E-01	1,40E+00
1,00E+17	2,00E-02	1,40E-01
1,00E+18	2,00E-03	1,40E-02

3. táblázat Az aeroszol koncentráció felezési és a részecskeméret megduplázódásának ideje (saját szerkesztés)

Látjuk a táblázatból, hogy a koagulációnak csak extrém magas koncentrációban van jelentősége, feltételezve, hogy az aeroszol a mérési geometriában csak néhány másodpercig tartózkodik, a $N < 10^{13} \text{ 1/m}^3$ koncentrációnál valójában már nem kell számolni vele. Megjegyezzük, hogy a szerző által végzett ipari aeroszolszűrő-méréseknél a betáplált részecskeszám koncentráció $N = 1 \div 5 \cdot 10^9 \text{ 1/m}^3$ értéket vesz fel, és ez bőven elég az aeroszol HEPA szűrők hatásfok méréséhez, és még így is hígítót kell alkalmazni a bemeneti magas koncentráció méréséhez. Az is igaz azonban, hogy a fent említett méréseknél alkalmazott aeroszol nem monodiszperz, hanem jól követi a természetes aeroszol méret-eloszlást, amit az előző cikk 7. ábráján[previous_article] láthatunk, bár a lényegen nem változtat, reális koncentrációknál a koagulációs effektustól a méréseink során általában nem kell tartanunk.

Polidiszperz koaguláció során a folyamat egy kicsit (de nem nagyságrendileg!) gyorsabb, mint monodiszperz aeroszol esetében, ez a jelenség összetettebb, hiszen a folyamat mozgatórugója itt az, hogy a kis részecskék viszonylag nagy diffúziós képességgel kiülednek a nagyobb részecskék viszonylag nagy felületére. Ebben az esetben, figyelembe véve az eloszlás paramétereit, a részecskeméret-közéértéket *CMD* és az eloszlásfüggvény szórását σ_p , a koagulációs együttható számítására egy másik összefüggést vezettek le [2], amely tartalmazza az eloszlás nevezetes paramétereit:

$$\bar{K} = \frac{2kT}{3\nu} \left[1 + e^{\ln^2 \sigma_p} + \frac{2,49\lambda}{CMD} \cdot \left(e^{0,5 \cdot \ln^2 \sigma_p} + e^{2,5 \cdot \ln^2 \sigma_p} \right) \right] \quad (34)[2]$$

Ezzel a nem kicsit bonyolult összefüggéssel számolva a koagulációs együtthatóra kb. 50-60 %-kal nagyobb mennyiséget kapunk, ami azonos időintervallumokra mintegy 30-40 %-kal nagyobb koncentrációesést és 10-20 %-kal nagyobb részecskeméret-növekedést jelent, de látjuk, azok a számítások, amelyeket monodiszperz aeroszolra végeztünk, azért hogy meg tudjuk becsülni a koaguláció jelentőségét, továbbra is használhatóak, reális képet nyújtanak.

A RÉSZECSCKE KÖRÜLI ÁRAMLÁS JELLEGE

Néhány szót szólnunk kell arról, hogy hogyan befolyásolja az aeroszol részecskék viselkedését a közeg áramlásának jellege. A makroszkopikus tárgyak környezetében a közeg folyamatos, kontinuumként viselkedik, egyáltalán nem érződik diszkrét természete, hiszen a makroszkopikus felületeken a molekulák ütközése teljes mértékben kiegyenlíti egymást. Azonban amikor a részecskék mérete csökken, változást tapasztalunk, amiről már szót ejtettünk a részecskék csúszási faktorának tárgyalása során is. Az előzőekben megvizsgáltuk a teljesség igénye nélkül a részecskék tulajdonságait, viselkedését az adott közegben, most beszéljünk arról, hogy milyen képet mutat a részecskék körül a közeg áramlása, figyelembe véve azok méretét. Ehhez szükségünk lesz egy olyan dimenziómentes jellemzőre, amelynek segítségével jól le tudjuk írni a részecske – közeg viszonyt a vizsgált részecskék szempontjából. Ez a viszony visszavezethető mindösszesen két jellemző paraméterre, a közegre nézve, a közepes szabad úthosszra λ , másrészt, a részecske méretére d . A két mennyiség arányának kétszerese lesz az ún. Knudsen-szám. Fizikai értelme a Knudsen-számnak egyszerű: mennyire viselkedik részecskénk makroszkopikus testként, vagy mennyire kerülnek előtérbe a kis méretéből adódóan azok a tulajdonságok, amelyek kvázi gázzészecskévé teszik hasonlatossá:

$$Kn = \frac{2\lambda}{d} \quad (35)$$

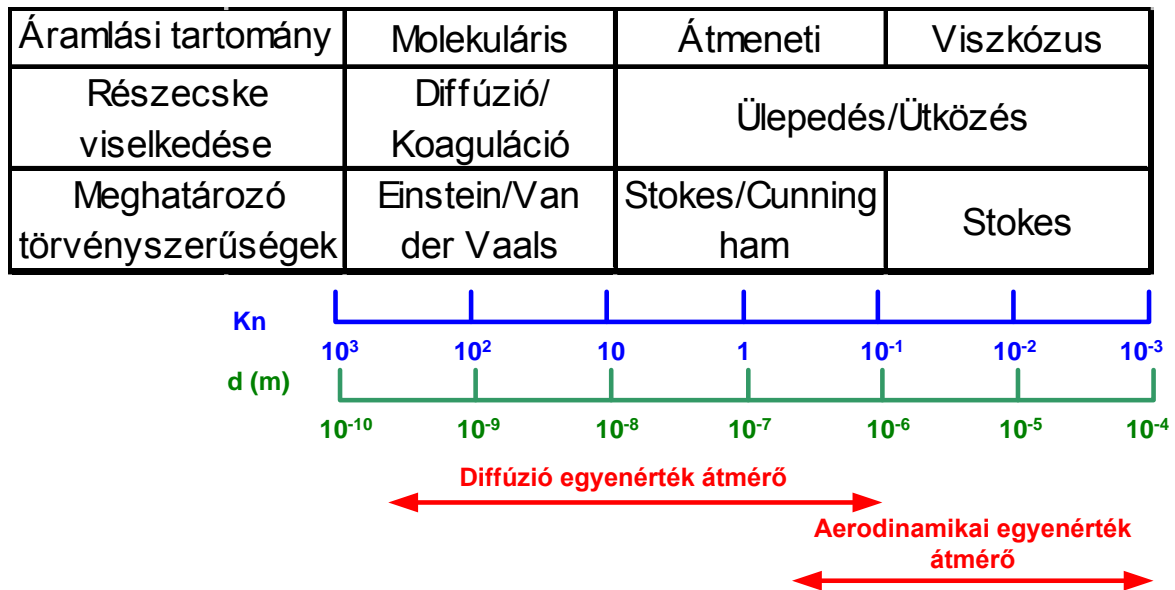
Három tartományt különböztetünk meg a részecske körüli áramlás szempontjából:

Viszkózus (kontinuum) tartomány: jellemzője a Knudsen-szám kis értéke: $Kn \ll 1$. Ebben a tartományban a részecskék makroszkopikus testekre jellemző tulajdonságokat mutat. Körülötte az áramlás jellegét az ülepedési Reynolds-szám határozza meg. A közegben a részecskék az áramlásnak megfelelően sodródik, viszonylag kis csúszási faktorral rendelkezik, ülepedését nagymértékben befolyásolja a közegellenállás, felületén egyenletesen ütköznek a közeg gázmolekulái, diffúziós tulajdonságai elhanyagolhatóak, könnyen kilép az áramlásból és ütköztetéssel leválasztható. A súrlódási erőt a Navier-Stokes egyenletekből vezetjük le, így a tartományt egyébként Stokes-tartománynak is nevezzük.

Molekuláris tartomány: $Kn \gg 1$, vagyis részecskénk apró, mozgása közelít a gázzészecskék Brown-mozgásához, mivel azokkal történő ütközése rendszertelen és mozgása során meghatározó. Számottevő diffúziós tulajdonságokat mutat, csúszási faktora nagy, $C_c \gg 1$, jól követi az áramvonalakat. A molekuláris diszperziós hatások (Van der Waals) is, igaz csekély mértékben, de befolyásolják viselkedését.

Átmeneti (Knudsen-) áramlás tartománya: a két előző típus közötti, $Kn \sim 1$. Részecskénk viselkedését még alapvetően a közeg súrlódása befolyásolja, de már számottevő csúszási faktorral rendelkezik, az ütközések már nem egyenlítik ki egymást, a közeg már nem teljesen viszkózus. Megjelennek a diffúziós tulajdonságok, még ki lehet léptetni az áramlásból, ütköztetéssel leválasztani.

Ha az előzőek alapján röviden össze akarjuk foglalni az aeroszolok azon főbb tulajdonságait, amelyek számunkra, és főleg mérés-technika szempontjából fontosak, valahogy úgy tudnánk ezt megközelíteni, ahogy az alábbi ábrán látjuk:



5. ábra Összefoglaló ábra az aeroszol részecskék közegben való viselkedéséről (a szerző szerkesztése)

Természetesen a különböző tartományok közötti átmenet elmosódik, inkább arról van szó, hogy a részecskék méretének (esetleg a közeg termodinamikai állapotának) változásakor fokozatosan egyes tulajdonságok erősödnek, mások háttérbe szorulnak. A tisztaterek légterének állapotára vonatkozó mérések alapvetően a $10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6}$ m-es méret intervallumot fogják át, és mellesleg, ez az a mérettartomány, amelybe tartozó részecskék, ha nagy mennyiségben kerülnek az atmoszférába, akár globális, több földrészt magába foglaló területeken terjedhetnek szét és mennyiségüknek megfelelő effektusokat okozva [20][21][22][23]. A HEPA szűrőket tartalmazó szűrő-szellőztető berendezések vizsgálata [6][7] a $3 \cdot 10^{-7}$ m alatti kumulatív csatornától a 10^{-5} m-es nagyságig terjed, míg az előző cikkben [6] tárgyalt HEPA és finom részecskeszűrők vizsgálata a $3 \cdot 10^{-7}$ m-es, illetve a $4 \cdot 10^{-7}$ m-es mérettartomány mérésén alapszik. Ez a $10^{-7} - 10^{-5}$ m-es mérettartomány mintegy határterülete az átmeneti és a viszkózus tartománynak, ahol a részecskék körüli áramló közeg kontinuumként viselkedik, számottevő csúszási képességgel, erősen korlátozott diffúziós tulajdonságokkal. Ebben a tartományban a részecskék mechanikai paramétereiknél fogva, $2 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-7}$ m-es egyenátmérőig még tehetetlenségi impaktorokkal szeparálhatóak, ami létfontosságú az egyezményes aeroszol frakciók [9] mintázása szempontjából.

ÖSSZEGZÉS, KÖVETKEZTETÉSEK

A jelen cikkben – ahogy a bevezetőben is történt rá utalás – a kedves Olvasóval megismerkedtünk az aeroszolok legfontosabb fizikai tulajdonságaival, az áramló rendszerekben való viselkedésükkel, amelyek meghatározzák az áramló rendszer falaival és a különböző akadályokkal (szűrő, impaktor, stb.) való kölcsönhatásaikat. Ezek jól leírják azokat a sajátosságokat, amelyekről a cikksorozat következő részeiben szót ejtünk. Lássuk, mi az, ami most kimaradt (persze, szintén a teljesség igénye nélkül). Nem esett szó például a termodiffúzióról, amit Soret-effektusnak is hívnak, valamint a részecskék Coulomb-töltéséről és a fal közötti elektrosztatikus hatásról, amelyek a részecskék lerakódásához vezethetnek. Ezek olyan jelenségek, amelyek segíthetik a szűrés hatásfokának javulását, vagy pl. a mintavételezés során veszteséget is okozhatnak, és bizonyos esetekben számolnunk kell velük. Mindazonáltal, eléggé megalapoztuk az aeroszolokkal kapcsolatos tudásunkat ahhoz, hogy a továbbiakban folytathassuk barangolásunkat az aeroszolokkal való műveletek világában.

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] P., KULKARNI, P. A., BARON, K., WILLEKE: *Aerosol measurement: Principles, Techniques, and Applications*, Third Edition, John Wiley & Sons, 2011, ISBN 9780470387412, DOI: 10.1002/9781118001684
- [3] W. C HINDS: *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, 2012, ISBN 1118591976, 9781118591970
- [4] K. W. LEE & H. CHEN: *Coagulation Rate of Polydisperse Particles*, *Aerosol Science and Technology*, 3:327-334, 1984, DOI: 10.1080/02786828408959020
- [5] J. H. VINCENT: *Aerosol Science for Industrial Hygienists*, Elsevier Science, 1995, ISBN 008 042029X
- [6] J. 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] J. S BROWN, T. GORDON, O. PRICE, B. 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] J. STRNADEL, B. ŠIŠKA, I. MACHAČ: *Dynamic shape and wall correction factors of cylindrical particles falling vertically in a Newtonian liquid*, *Chemical Papers* 67 (9) 1245–1249 (2013), DOI: 10.2478/s11696-012-0285-5
- [12] P. F. DECARLO, J. G. SLOWIK, D. R. WORSNOP, P. DAVIDOVITS, AND J. L. JIMENEZ: *Particle Morphology and Density Characterization by Combined Mobility and Aerodynamic Diameter Measurements. Part 1: Theory*, *Aerosol Science and Technology*, 38:1185–1205, 2004, ISSN: 0278-6826 print / 1521-7388 online, DOI: 10.1080/027868290903907
- [13] G. SCHEUCH & J. HEYDER: *Dynamic Shape Factor of Nonspherical Aerosol Particles in the Diffusion Regime*, *Aerosol Science and Technology*, 1990, 12:2, 270-277, DOI: 10.1080/02786829008959345
- [14] CSURGAI J., ZELENÁK J., NAGY G., MOLNÁR L., PINTÉR I., BÄUMLER E., SOLYMOSI J.: *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.

- [15] MANGA L.: *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)
- [16] CSURGAI J.: *A Magyar Honvédségben alkalmazott sugárhelyzet prognosztizálási és értékelési eljárások továbbfejlesztése számítógépes megvalósítással*, Haditechnika 34:(1) pp. 6-12. (2000)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] ÁCS B., CSÓK L., CSURGAI J., GORICSÁN I., HALÁSZ L., LAJOS T., PINTÉR I., SOLYMOSI J., VINCZE Á., ZELENÁK J.: *ABV-anyagok terjedésének numerikus, számítógépes szimulációja*, Haditechnika 39:(1) pp. 13-19. (2005)
- [20] PADÁNYI J., FÖLDI L.: *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.)
- [21] JÓZSEF P.; LÁSZLÓ F.: *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
- [22] DOBOR J.; KOSSA GY.; PÁTZAY GY.: *Atomerőművi balesetek és üzemzavarok tanulságai 2.*, Hadmérnök, XII. évfolyam, 4. szám, 2015. december
- [23] L., 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