

OTDK 2022/2023

Gombási Róbert Krisztián

Ülepedés

Tartalomjegyzék:

- 1. Bevezetés:** A kutatás célja és gyakorlati felhasználhatósága
- 2. Elméleti modell:**
 - a) Korábbi kutatások a témában
 - b) Fizikai alapok
 - c) Saját eredmények
- 3. Kísérleti eszközök és módszerek:**
 - a) 1-es számú kísérleti eszköz
 - i. A konstrukció
 - ii. Mérési előkészületek
 - iii. Mérés menete
 - iv. Mérési pontatlanságok forrása
 - b) 2-es számú kísérleti eszköz
 - i. A konstrukció
 - ii. Mérési előkészületek
 - iii. Mérés menete
 - iv. Mérési pontatlanságok forrása
 - c) Adatok kinyerése a mérésekből
 - d) Mérésekhez felhasznált anyagok
- 4. Eredmények és elmélet összehasonlítása**
- 5. Összegzés**
- 6. Felhasznált szakirodalom**

Abstract:

Mindenki tudja, hogy ha egy folyadékba, a folyadék sűrűségénél nagyobb sűrűségű anyagot teszünk, az lesüllyed a folyadékra aljára. A jelenleg használatban lévő ülepítési rendszerek arra az egyszerű elvre támaszkodnak, hogy a folyadék sűrűségétől függően a szennyező anyagok a fenékre, vagy a felszínre kerülnek. Ezen gépek, jelenleg az áramlásokat többnyire zavaró jelenséggént kezelik.

A természetben ritkán megfigyelhető jelenség lép fel bizonyos körülmények teljesülésével, viszont a körülmények mesterségesen költséghatékonyan előállíthatók. Az elméleti háttér egyes részein vannak kidolgozott részek, de kutatásomban arra törekedtem, hogy ezeket egyesítsem és így a geometriai értelmezés határain belül (Navier- Stokes vagy numerikus szimulációk nélkül), azok határait kibővítve megmutassam, hogy a bonyolult áramlástani egyenleteket is le lehet írni egyszerűen, szimulációk használata nélkül is.

Kutatásom során az irodalomban új, rendkívül egyszerű és szemléletes összehasonlító képletet sikerült felfedeznem, mely megadja, hogy két zárt rendszer közül melyikben ülepedik le a törmelék hamarabb.

A zárt és véges részecskeszámú ülepitésnél viszont jelentősen gyorsítható az ülepedés folyamata, melynek gyakorlati felhasználhatósága például a vér komponenseire való bontása, vagy egyéb laboratóriumi ülepitések.

Az elméleti eredmények gyakorlati felhasználása, egy adott részecskeméretre fókuszált csőátmérőt jelent, melyben az adott méretű szemcsék rövidebb idő alatt válnak el azonos mértékben a víztől, mint a gyakorlatban használt megfelelőiknél.

1. Bevezetés:

Mindenki tudja, hogy ha egy folyadékba, a folyadék sűrűségénél nagyobb sűrűségű anyagot teszünk, az lesüllyed. Az ülepedés időtartamát többféle módon lehet befolyásolni, melyek közül vannak adott feltételek (például: folyadékok jellemzői bizonyos körülmények között). Viszont, ha megdöntjük az ülepitő kádat, vagy csövet, akkor bizonyos körülmények teljesülésével különös jelenségre lehetünk figyelmesek, egy örvény jelenhet meg az ülepitőben, amely képes lehet drasztikus mértékben csökkenteni az ülepedéshez szükséges időt.

A kutatás során azt vizsgáltam, hogy milyen döntési szögtartomány optimális az ülepitéshez, így csökkentve az ülepedéshez szükséges időt, ezzel maximalizálni az ülepités sebességét, mind ezt amellet, hogy meddig és milyen pontossággal lehet geometria keretein belül maradva leírni, egy bonyolult áramlástani összefüggést, numerikus megoldás nélkül leírni, vagyis a geometriai leírás és értelmezés kiterjesztése.

(Végeselem módszerrel pontosabb leírást adni, míg a Navier-Stokes egyenletek használata nem célszerű, mert nem folyadékról, gázzal vagy akár elegyről/keverékről van szó, hanem az abban található, nem folyadékként viselkedő részecskékről is.)

A mérnöki gyakorlatban is megfigyelhető a jelenség felhasználása, a lamellás ülepítőkben (Lamellar settlers), ellenben ott csak az ülepítési felület növelésére használják nagyméretű (nem kolloidok) részecskék ülepítésére alkalmas.

2. Elmélet

a) Korábbi kutatások a témában:

A jelenség felfedezése egy véletlennek köszönhető és a felfedezője Boycott után nevezték el (Boycott effect). Boycott kutatási területe az orvostudomány volt és kissé rendetlen, ennek köszönhető, hogy míg kutatásai során vért ülepített rendezetlenségében egy kémcsövet nekitámasztott az állványnak, majd észrevette, hogy sokkal gyorsabban komponenseire válik szét a vér.

A folyadékok anyagi állandóinak a környezeti hatások (hőmérséklet) miatt bekövetkező változását teljes mértékben a szakirodalomból vettem át, és kísérleteim során állandónak tekintettem a folyadékok sűrűségét és viszkozitását, de az alábbi összefüggésekkel le tudom írni, hogy hogyan viselkedne a rendszer különböző körülmények között vizsgálva.

$$\rho_l = \frac{\rho_{lT0}}{1 + \alpha \Delta T} \quad (1)$$

Ahol ρ_l a folyadék sűrűsége, ρ_{lT0} a folyadék referenciasűrűsége adott hőmérsékletre, α a hőtágulási együttható, ΔT a referenciahőmérséklettől való előjeles eltérés, valamint a viszkozitás értékét leíró egyenlet [5]:

$$\eta(T) = A e^{\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

Ahol η a folyadék viszkozitása A egy anyagi állandó (referenciaérték), E az aktiválási energia, R az egyetemes gázállandó, T pedig az abszolút hőmérséklet kelvinben megadva.

A szakirodalomban számos publikáció jelent meg, melyek mindegyike a Ponder-Nakamura-Kuroda (PNK) elméletre hivatkozik, ellenben kutatásom során nem találkoztam olyan cikkel, amely leírná az elmélet hátterét. Az elméletem nekem is erre az elméletre épít, az egyenlet pedig a következő:

$$\frac{dh}{dt} = -v \left(1 + \frac{h}{D} \sin(\alpha) \right) \quad (3),$$

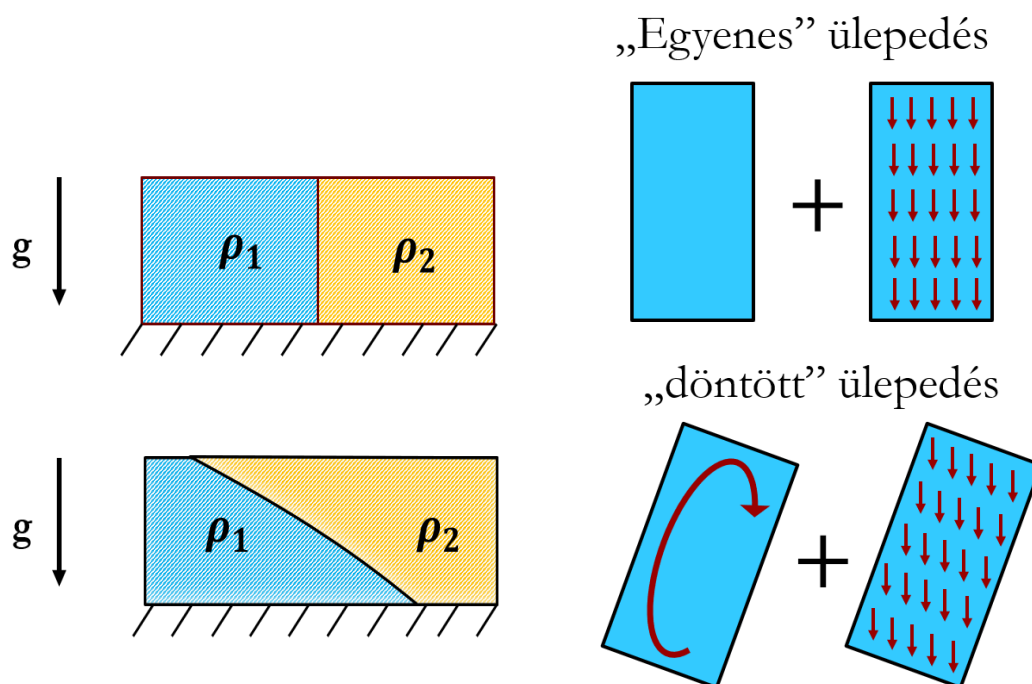
ahol v az ülepedés sebessége (ülepedési határvonal sebessége döntetlen esetben, lásd később), h az ülepedési határvonal aktuális magassága (az ülepedési határvonal részecskékben gazdag és a részecskékben szegény folyadékréteg határa, melyet gyakorlatban nehézkes lehet meghatározni, mivel általában egy harmadik átmeneti zóna is képződik (részecskéket alacsony számban tartalmazó zóna) a két réteg között), D az aktuális ülepitő átmérője vagy lamella távolsága, míg $\sin(\alpha)$ az ülepitő, vagy lamellák döntési szögének szinusza. [1]

Az elméletben le van írva, hogyan viselkedne a rendszer különböző részecskeméretekre, viszont a kolloidok ülepitését már nem írta le, ezért az ezt leíró összefüggést szakirodalomból vettem át, melyet a Cunningham-féle korrekciós faktor ír le. [6]

b) Fizikai alapok:

Annak magyarázata, hogy az ülepedés jelentősen gyorsítható az ülepitő megdöntésével az ülepedőben kialakuló örvénnyel magyarázható, melynek a lefele tartó ága lehetővé teszi a részecskék számára, hogy nagyobb reál sebességet érjenek el, mivel az egyensúlyi sebesség (lásd később) a folyadék és a részecske egymáshoz viszonyított maximális sebessége.

Az örvények kialakulása az oldalirányba fellépő sűrűséggradienssel magyarázható, a részecskékkel gazdag rétegekben fellép egy oldalirányú erő és elmozdulás, melyet klasszikusan két különböző sűrűségű folyadék különválásakor láthatunk, ha egyenlő folyadékszint mellett megszüntetjük a kettő elválasztó falat (összeengedjük):



(a) Örvénylés kialakulása két különböző sűrűségű folyadék határán. (b) Az örvénylés hajtóereje a zárt ülepitőben.

Modellemben az összes ülepedő részecskét közel egyforma gömbnek tekintettem, a rendszer egyszerűségének megőrzése céljából. A részecske gyorsulását az alábbi egyenletből kapjuk:

$$m \frac{dv}{dt} = F_g - F_b - F_d = F_g - F_d - F_b \quad (4),$$

ahol m a részecske tömege, F_g a gravitációs erő, F_b a felhajtóerő, míg F_d a közegellenállási erő (drag force).

Ebből az erők rendre:

$$F_g = \rho_p g V \quad (5)$$

$$F_b = \rho_l g V \quad (6)$$

$$F_d = C_d(\pi r^2) \left(\frac{1}{2} \rho_l v^2 \right) = \frac{\pi}{2} C_d \rho_l r^2 v^2 \quad (7)$$

Ahol C_d a közegellenállási tényező, πr^2 a részecske legnagyobb keresztmetszete, ρ_l a folyadék sűrűsége, míg v^2 a folyadék és a részecske relatív sebessége.

A Reynolds szám meghatározza, hogy milyen közegellenállási összefüggést kell használnunk (szimpla/négyzetes). A méréseinkből adódott, hogy a gyorsabb részecskék sem érték el a Reynolds szám kritikus értékét gömbökre vonatkoztatva, mely $Re_{crit}=0,4$ (critical Reynolds number) míg az általam mért érték $Re=0.29$ – $Re=600$ volt. Mivel $Re < Re_{crit}$ így a részecskék folyadékhoz viszonyított mozgására ténylegesen adhat a Stokes törvény leírást (kis részecskék esetén). A nagyobb részecskék mozgására leírást ad az átmeneti fázis egyenlete, melyben a közegellenállási erőt más képlettel kell leírunk, de ettől a tartománytól jellemzően nem voltak eltérő adatok. (természetesen lehetnek részecskék, melyek meghaladják az $Re=1000$ de nem jellemző, mert mélyen ez alatt vannak az értékek).

$$Re = \frac{v_t \rho_l 2r}{\eta} \quad (8)$$

Ahol, v_t a részecske (maximális) sebessége, ρ_l a folyadék sűrűsége, $2r$ a részecske átmérője, η pedig a folyadék viszkozitása.

$$C_d = \frac{24}{Re}, \text{ ha } Re < 10 \quad (9)$$

Ahol Re a Reynolds szám, de ilyenkor a Stokes féle ülepedési törvényt használjuk.

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (10)$$

ha $10 < \text{Re} < 1000$

A Stokes törvényből ($\text{Re} < 10$) adódik, hogy

$$v_t = \frac{2r^2 g(\rho_p - \rho_l)}{9\eta} \quad (11),$$

ahol v_t az egyensúlyi sebesség (terminal velocity), r a részecske sugara, g a gravitációs gyorsulás, $\rho_p - \rho_l$ a részecske és a folyadék sűrűségkülönbsége és η a folyadék viszkozitása (dynamic viscosity).

A nagyobb részecskék mérettartományban a különböző üledékeket a folyadékatomok nem befolyásolják jelentősen, így a Brown mozgás és az ütközések elhanyagolhatóak, viszont, ha kolloidokat ülepítünk ezt is figyelembe kell vennünk (főleg nagy belső energiával rendelkező közegekben, mint a magas hőmérsékletű folyadékok és a gázok), mert a részecskék egy nagyságrendbe eshetnek a atomokkal/molekulákkal vagy az ezekből másodlagos kötések által kialakuló csoportosulásokkal, így az egyenletet ilyen esetekben ki kell egészíteni a Cunningham-féle korrekciós faktorról (Cunningham slip factor), mely egy szorzótényezővel bővíti a számlálót a fentebb említett ülepedési sebességre így a képlet:

$$v_t = \frac{C_c 2r^2 g(\rho_p - \rho_l)}{9\eta} \quad (12),$$

ahol C_c a Cunningham- féle eltolási faktor, melynek értéke $r > \approx 7 \mu\text{m}$ -re (levegőre) $C_c=1$, $r < \approx 7.5 \mu\text{m}$ -re:

$$C_c = 1 + \frac{\delta_f}{2r} \left(\alpha + \beta \frac{2r\gamma}{\delta_f} \right) \quad (13)$$

Ahol C_c a Cunningham-féle korrekciós faktor, α, β, γ anyagi állandók, míg δ_f a szabad út, melyet az alábbi módon számolhatunk:

$$\delta_f = \frac{1}{\pi(r_1 + r_2)n} \quad (14)$$

Ahol r_1 és r_2 az ütköző részecskék sugara (folyadék molekuláris mérete és a részecskeméret) n pedig az átlagos részecskesűrűség:

$$n = \frac{N}{V} \quad (15)$$

N az ülepítőben található összes részecske száma, V az ülepítő teljes térfogata.

A nagyobb részecskékre $0.4 < Re < 1000$ az alábbi módon:

A nem gömbalakú részecskék korrekcióját egy cikkből vettem át [4], miszerint:

$$\Phi = \frac{s}{S} \quad (16)$$

Ahol s az azonos térfogatú, de gömb alakú részecske felszíne, S a részecske tényleges felszíne, Φ egy arányszám (a kettő hányadosa), amennyiben $\Phi > 0.67$, azaz a részecske izometrikus.

Ebben az esetben a közegellenállás (cikk alapján) jól közelíthető (átmeneti közegellenállási szakaszban) a következő illesztett egyenlettel:

$$C_d = \frac{24}{Re} [1 + Re^{0.0964+0.5565\Phi} (8.1716e^{-4.0655\Phi})] + \frac{Re \cdot 73,69e^{-5.0748\Phi}}{Re + 5.378e^{6.2122\Phi}} \quad (17)$$

Ahol az együtthatók a cikkből származnak és illesztett paraméterek.

Ez a leírási forma a folyadéknál kisebb sűrűségű részecskék mozgását (v_t) is leírja (természetesen negatív irányba), így az ülepedési határvonal mozgását is.

Fontos megemlíteni, hogy az ülepedésnél az ülepedési határvonal mozgásának sebességére van szükségünk, nem csak az egyensúlyi sebességre, melyet a következő módon kaphatunk meg:

$$C = \frac{\frac{\Sigma m_p}{V}}{m_p} (18),$$

Ahol C a részecskesűrűség, V az ülepítő térfogata, Σm_p az ülepítőben található összes részecske együttes tömege, $\frac{\Sigma m_p}{V}$ a részecskék tömegkoncentrációja, m_p pedig egy részecske tömege.

$$J = C v_t (19),$$

Ahol J az ülepedési fluxus, C a részecskesűrűség v_t pedig az egyensúlyi sebesség.

$$N = \frac{\Sigma m_p}{m_p} (20),$$

N a részecskék száma.

A kísérletek során a mérési pontatlanságot 5%-os ülepedetlenséget használtam, mely a gyakorlatban azt jelenti, hogy végbementnek tekintek egy ülepedési folyamatot, ha 95%-a a részecskéknek leülepedett az edény aljára, nagy szögű döntések esetén az oldalfalra, azaz a cél, hogy N értéke meghaladja:

$$N_v = 0.95 \frac{\Sigma m_p}{m_p} (21),$$

Értékét, ahol N_v a befejeződött ülepedéshez tartozó leülepedett részecskék száma.

$$\sigma = \frac{N_v}{A} (22),$$

Ahol σ kívánt részecskekoncentráció adott A felületen, mely az ülepítő aljának területe.

Az ennek végbemeneteléséhez szükséges időt így megkaphatjuk:

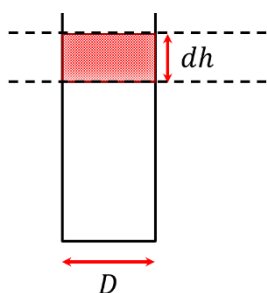
$$\tau = \frac{\sigma}{J} (23),$$

Ahol τ a döntetlen állapotú ülepedéshez szükséges idő, ebből:

$$v = \frac{h_0}{\tau} (24),$$

Amiből végül megkapjuk az ülepedési határvonal sebességét döntetlen esetben (v).

Ahogy korábban kifejtettem, nem találtam semmilyen dokumentációt a levezetésről, (természetesen lehetséges, hogy van, így nem mondhatom egyértelműen, hogy saját eredmény) ezért levezettem. Az ülepedést egy döntetlen tartályban csak egy módon értelmezhetjük:

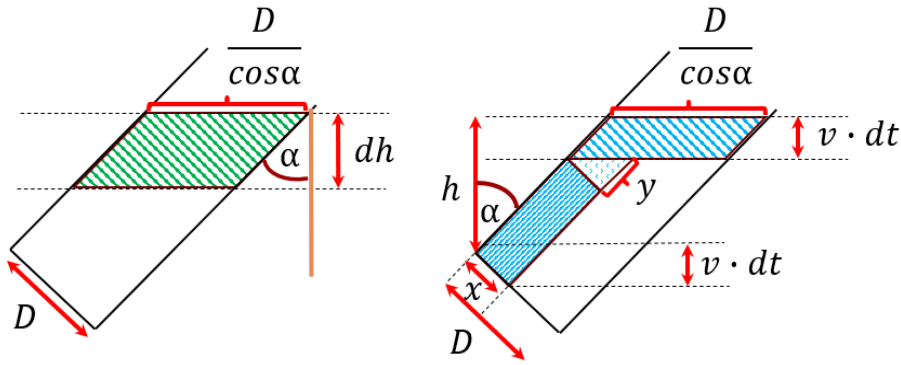


Ahol D az ülepítő átmérője és a dh a dt időintervallum alatt kitisztuló felső, még szennyezett folyadékréteg 2 dimenzióban vett területe:

$$Terület = dh * D$$

(c) Az egyenes ülepítőben dt idő alatt kitisztuló folyadék

Ha megdöntjük az ülepítő tartály, akkor 2 megközelítéssel élhetünk, az egyik, hogy a folyadék felső, még szennyezett rétegje tisztul ki az előző analógia szerint, a másik pedig, hogy minden részecske egyenesen a próbál „lefele” haladni (nem feltétlenül a cső alja felé, hanem a gravitációs erő vektorjával egy irányba, mivel mind a két megközelítés helytálló, ezért az ezen alakzatok által közre zárt területnek egyenlőnek kell lennie, az ábra szerint:



$$dh \cdot \frac{D}{\cos \alpha} = \frac{D}{\cos \alpha} \cdot v \cdot dt + \frac{h - v \cdot dt}{\cos \alpha} \cdot \sin \alpha \cdot v \cdot dt + \frac{\sin^2 \alpha \cdot v^2 \cdot (dt)^2}{2tg\alpha} \quad (25)$$

(d) Az ülepedési határvonal mozgását leíró egyenlet geometriai levezetése. Ahol dh a dt időintervallum alatt kitisztuló folyadékréteg magassága, D az ülepitő átmérője, α az ülepitő és a vertikális tengely által bezárt szög, h a folyadék legkisebb mérhető mélysége az ülepitőben, v a folyadékban szabadon eső részecskék átlagos/egyensúlyi sebessége, míg X és Y kijelölnek egy háromszöget (vízszintes tengellyel), a jobb oldali (kék) ábrán, melynek területét elhanyagoljuk, a $(dt)^2$ miatt.

Ha átrendezzük a fent látható egyenletet (a jobb oldali utolsó (háromszög) tagot elhagyva), megkapjuk a cikkekben hivatkozott egyenletet.

$$\frac{dh}{dt} = -v \left(1 + \frac{h}{D} \sin(\alpha) \right) \quad (3), \text{ paraméterek lásd feljebb}$$

Ezen egyenletet megoldva h -ra:

$$h = \frac{(D + h_0 \sin(\alpha)) e^{-\frac{v \sin(\alpha) t}{D}} - D}{\sin(\alpha)} \quad (26)$$

ahol, h az ülepedési határvonal aktuális magassága, h_0 az ülepedési határvonal kezdeti magassága ($t=0$ és $v_e=0$ pillanatban), e az Euler-féle szám

Ha az egyenletet egyenlővé tesszük 0-val megkapjuk, az egyenletet, melyt átrendezve megkapjuk az ülepedési időt megadó egyenletet:

$$h = 0 = \frac{(D + h_0 \sin(\alpha)) e^{-\frac{v \sin(\alpha) t}{D}} - D}{\sin(\alpha)}$$

$$t = \frac{D \ln \left(\frac{D + h_0 \sin(\alpha)}{D} \right)}{v \sin(\alpha)} \quad (27)$$

Az egyenlet ugyan pontosan megadja, hogy milyen kezdeti feltételekkel milyen ülepedési időre számíthatunk, de ennél szemléletesebben is meg lehet adni, olyannyira, hogy ránézésre meg lehessen mondani (szinte az összes főbb paraméterről), melyik ülepedés fog hamarabb lejátszódni.

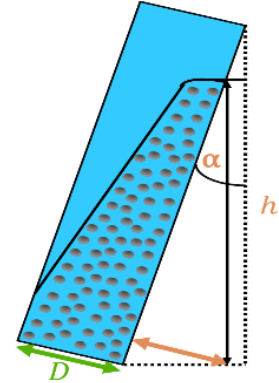
Definiálhatunk egy általánosan ülepedési felezési időnek elnevezett értéket, melyet az alábbi módon kapunk meg:

$$D + h \sin(\alpha) = (D + h_0 \sin(\alpha)) e^{-\frac{v \sin(\alpha) t}{D}} \quad (28)$$

Az (1)-es egyenlet átrendezéséből kaptuk a fenti egyenletet, melyből $D + h \sin(\alpha) = h^*$ geometriai jelentése:

így:

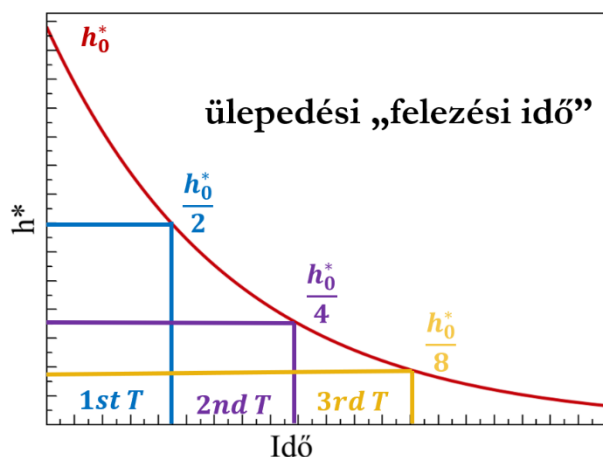
$$h^* = h_0 e^{-\frac{v \sin(\alpha) t}{D}} = h_0 2^{-\frac{t}{T}} \quad (29)$$



(e) h^* geometriai értelmezését segítő ábra

Ahol T az ülepedési felezési idő, melyet az egyenletből kifejezve:

$$T = \frac{D \ln(2)}{v \sin(\alpha)} \quad (30)$$



Ahol h^* nem azonos h -val, ez a levezetésnél eltolt görbe y tengellyel vett metszete.

(f) Az üledési felezési idő analógiájának szemléltetése.

Fontos megemlíteni, hogy mivel az ülepítő hossza nem befolyásolja az üledési felezési időt, ezért csak egyenlő, hosszú ülepítők (vagy arányosítottak) esetén használható.

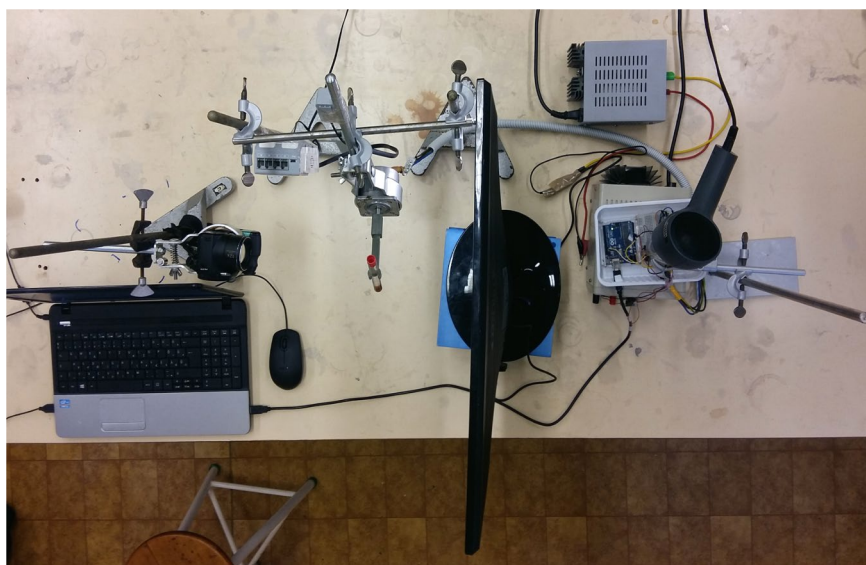
3. Kísérleti eszközök és módszerek:

Kísérleteimet két külön mérési módszerrel végeztem, melyeknek a kivitelezése és a mérési módszere is nagymértékben eltérő, így ezeket egymás referenciájaként használtam, így alátámasztva, hogy az egyik és másik módszerrel mért eredmények (a különböző mérési pontatlanságok ellenére is) ténylegesen tükrözik a folyamat dinamikáját.

a) 1-es számú kísérleti eszköz:

i. A konstrukció

Az elsőszámú kísérleti eszközöm egy komplexebb, hardware-rel és software-rel rendelkező gép, melyet itt látható kép (a) ábrázol:



(g) Az 1-es számú kísérleti eszközöm.

Az itt látható eszköz arra szolgált, hogy magas minőségű videókat készíthessek a folyamatról, melyet később videóelemzéssel feldolgoztam és így nyertem ki eredményeket belőle. Ezen kísérleti eszköz két fő részből tevődik össze, a videó rögzítő- és az aktív mozgatót végző részből.

A videórögzítő egy kamerából és a hozzátartozó állványból, valamint egy a polárszűrő rétegétől megfosztott monitorból áll. A monitorra azért volt szükség, mert homogén és fényes hátteret biztosított, mely az általam használt ülepítők falán átvilágítva jobban kirajzolja a részecskék elhelyezkedését, mintha csak passzívan (megvilágító fény nélkül) rögzítettem volna. A monitor táplálását egy labortáppal oldottam meg, mely így állandó feszültséget kapott.

Az aktívan mozgó rész egy léptetőmotorból, az ezt kiszolgáló egyéb szükséges berendezésekből, valamint egy a döntés szögét mérő giroszkópból áll. A léptetőmotor arra szolgált, hogy felkeverje a tartályban lévő ülepítendő részecskéket, lehetőleg homogén módon a folyadékban, majd ezután stabilan tartsa ennek pozícióját. Az ülepítőt a motorhoz 3D nyomtatott fogókkal oldottam meg. A léptetőmotor vezérlését Arduino-val oldottam meg, melyet egy számítógépről tápláltam (amelyen a Software is futott), míg az üzemi feszültséget itt is egy labortáppal oldottam meg. A döntést úgy oldottam meg, hogy az egész motort (így a hozzacsatolt ülepítőt is) a felfogatás tengelyén lehet dönteni, és a motorral együtt a giroszkóp is elfordul, így mértem és állítottam a döntés szögét.

ii. Mérési előkészületek:

A mérések elvégzésére az előkészületeket a megfelelően híg keverék előállítása és légmentes levárása jelentette. A légmentes levárással azért van szükség, mert a légbuborékok jelen mérésben hatalmas hibákat és ugrásokat okozhat (a felrázást követően a légbuborékok nem feltétlenül a üleptető tetején a légréteghez közel találhatók, így befolyásolnák az eredményeket, azáltal, hogy áthaladnának az üleptető téren) ezért kerülni kellett ezeket. A légmentes lezárást az üleptető peremének a folyadékszint alá való süllyesztése, majd ebben az állapotban történő lezárása jelentette. Az így elkészült légmentesen zárt üleptetőt a léptetőmotor kimenetéhez rögzíttem.

iii. Mérés menete:

A mérési előkészület lépései után beállítom a mérőműszereket (rákapcsolom az üzemi feszültséget) és elindítom a kamerát, valamint a programot, mely elvégzi a szükséges átfordításokat, az üledék felkeverésére, megvárom míg lefut a program (rázás vége), majd az ülepedési folyamat végbementét is, végül kikapcsolom a kamerát.

iv. Mérési pontatlanságok okai:

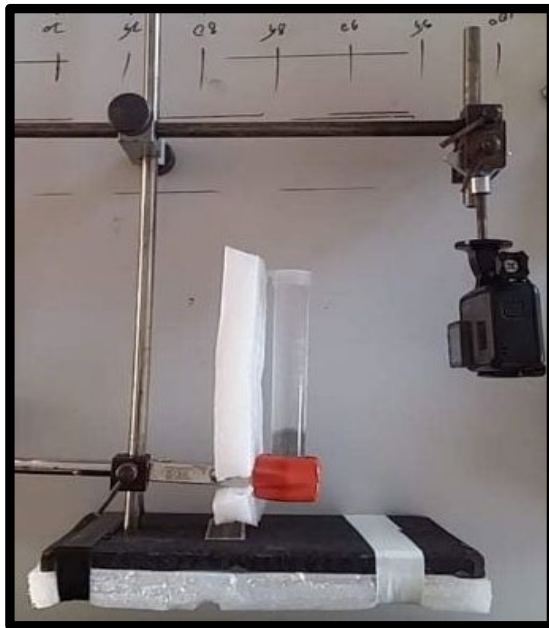
A mérés során visszatérő pontatlanságokat okozhat a forgatásokból és a megállításokból fakadó örvénylések, a folyadék tehetetlensége miatt.

b) 2-es számú kísérleti eszköz:

A kettes számú mérőműszer sokkal egyszerűbb konstrukció, és mérési elve is más, így referenciaként tudtam használni. A mérés pontossága is kisebb (mássága mérésének pontatlansága és mérete miatt), és a mérésekben a kezdeti részecskeelhelyezkedés is diverzebb, így a mérési eredmények is nagyobb szórást mutatnak.

i. A konstrukció:

A kettes számú mérési műszer lényegében egy vázszerkezetre erősített ülepítő és egy kamera, mely folyamatosan csak az ülepítőt filmezi, de ezen kívül semmilyen elektronikát nem tartalmaz (dinamikusan mozgó részeket sem). A vázszerkezet alján egy rugalmas szivacsréteg található, melynek feladata az ütések (mechanikai) tompítása.



(h) A kettes számú mérőműszer.

ii. Mérési előkészületek:

A mérési előkészületek nagyon hasonlóak az első számú műszeréhez, előkészítem az ülepítőt a már ismertetett módon (lásd fentebb), majd az ülepítőt többnyire egy kémcsőfogóval hozzáfogom a vázszerkezethez (képen látható módon) rögzítek rá

egy homogén fehér háttérrel és egy akciókamerát (felfüggesztése egyszerűbb, mint egy klasszikus kameráé, nem a gyorskamera miatt).

iii. Mérés menete:

A mérés sok emberi erőt igényel, mert fel kellett keverni az üledéket, így az egész szerkezetet, mert gyakorlati szempontból jobb volt egyben mozgatni a szerkezetet (nyugalomba helyezés után egyből mér). Kezdetben élesítettem a kamerát, majd felráztam a szerkezetet a lehető legfinomabban leraktam egy vízszintes felületre, hogy minimalizáljam a lökéshullám (shockwave) okozta erőhatásokat, majd magára hagyva a rendszert megvártam, míg minden leülepedett, majd begyűjtöttem a mérési adatokat tartalmazó videót.

iv. Mérési pontatlanságok okai:

A kettes számú kísérleti eszköznél a legnagyobb mérési pontatlanságot a lökéshullám okozta (asztalra való lehelyezéskor), valamint pontatlanságot okozhatott a folyadék tehetetlenségéből adódó áramlások kialakulása (felkeverés után).

c) Adatok kinyerése a mérésekből:

Az adatokat a mérési videók elemzésével a Tracker alkalmazás használatával. Ahogyan leírtam a mérési videókban nem teljesen egyértelműen eldönthető az ülepedési határvonal elhelyezkedése, így a videókból többszöri elemzéssel kapott értékek átlagát vettem a mérési pontoknak, így sokkal egyenletesebb görbéket kaptam.

- d)** A kísérletek megkezdése előtt rengeteg anyagok (folyadék és részecske) kombinációt kipróbáltam két okból is: az első, hogy képes legyen jól bemutatható kísérleti eszközt készíteni (mennyi ideig tart a jelenség végbemenetele), a második, pedig a határfeltételek meghatározására, hogy hol érdemes mérni, és hol nem alakul ki az általam keresett jelenség.

Az általam használt folyadékok között szerepel a víz, etil-alkohol, paraffinolaj, vízüveg, glicerin, és a méz, de ahogyan kifejtettem, a nagy sűrűségű és/vagy felületi feszültséggel rendelkező folyadékok nem alkalmasak a jelenség előállítására, így a végső kísérletek vízben, etil-alkoholban és paraffinolajban lettek elvégezve.

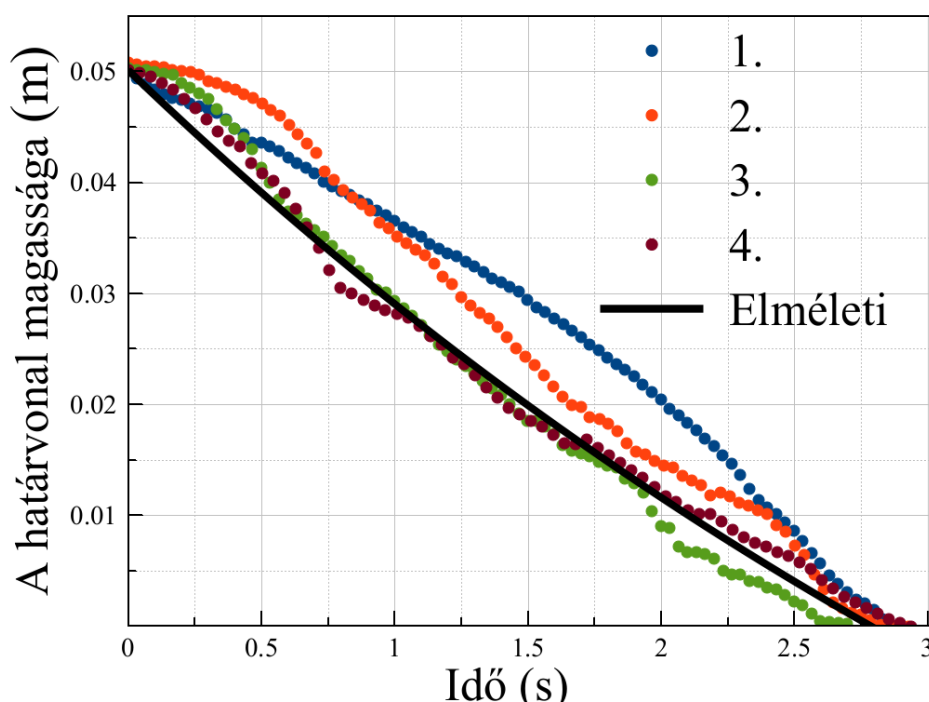
A részecskeként használt gömbök közül is rengeteg féle lett kipróbálva, mint például a dekorgyöngy (fémről készült gyöngyök), különböző műanyagok (legtöbb lebeg), iongyöngyök, különböző darált fűszerek (több okból sem voltak jók, de demonstrációs célra jól használhatóak) és nyomjelző műanyagok is, valamint sót használtam, mint izometrikus részecskéket. A kísérletekből kitűnt, hogy a fémről készült gyöngyöknek és az őket potenciálisan körülvéző folyadéknak túl nagy a sűrűségkülönbsége, ahhoz, hogy észlelhető legyen az ülepedési időbeli különbség az egyenes és a döntött eset között. A darált fűszerek nem voltak megfelelőek, mert alakjuk és tömegük közel sem volt egyforma, ezen felül homogén testeknek sem lehet nevezni ezeket. A nyomjelző műanyagot csak alkoholban, vagy paraffinban lehetett ülepíteni (közel azonos a sűrűsége a vízzel), valamint az iongyöngyöket lehetett minden használható folyadékban ülepíteni, ellenben változott a térfogatuk, így a sűrűségük is, ami adott egy fajta bizonytalanságot, így az volt a kísérletek meghatározó részecskéje. Az általam használt műanyagok mind úsztak így csak arra lehet használni, hogy nem csak az ülepítés részére ad valós leírást a geometriai formula, hanem az elválasztásra, függetlenül attól, hogy felúsznak a felszínre, vagy lesüllyednek az aljára.

e) Mérési pontatlanság számlagos értékei:

Az időmérést pontosnak tekintettem, mert harmadmásodpercekre volt bontva a folyamat és a különböző lefolyások többnyire nem produkáltak jelentős eltéréseket.

Az ülepedési határvonal meghatározása a videolemezes és a többszöri azonos beállítások legnagyobb mért eltérése volt, melynek számlagos értéke ± 0.5 cm volt jellemzően.

A folyadékok sűrűségét irodalmi és mért értékek összehasonlításával (ellenőrzésként) kaptuk, a mérésekből legtöbb esetben az irodalmi értékeket kaptam vissza, így azokat használtam, de különböző folyadékoknál, mint a glicerín vagy az alkohol a mért adatot használtam (4 mérés átlagolt értéke), mert a koncentrációfüggő érték:



(i) 4 mérés és az elméleti görbe, a mérések szemléltetése.

A sűrűségértékek 3 tizedesjegy pontossággal használtam.

A folyadékok viszkozitását is hasonlóan irodalmi értékek és az általam mért értékek összehasonlításával történt, a viszkozitás mérésére a Stokes törvény alapján nagy méretű (hosszúkás) mérőhengerbe ismert tömegű és térfogatú üveggolyót ejtettem, videóra vettem ezen golyó lesüllyedését és videóelemzéssel megállapítottam a sebességét, majd az egyenletet átrendezve kapjuk, hogy a viszkozitás:

$$\eta = \frac{2r^2 g(\rho_p - \rho_l)}{9v_e} \quad (31)$$

képlettel kapható meg.

A részecskék sugarát mikroszkóppal, mértem ismert lyukmérettel rendelkező szűrőkön, a sűrűségüket pedig számoltam a tömeg és térfogat hányadosából.

A szögmérés az első mérőműszernél $\pm 2^\circ$ -os mérési pontatlansággal történt (mérőműszer pontatlansága), míg a második kísérleti eszköznél a szögbe állítás is hasonló pontatlanságot ad, mert ugyan precíz szöget bezáró eszközhöz volt igazítva, tartalmazhat egy emberi hibát is.

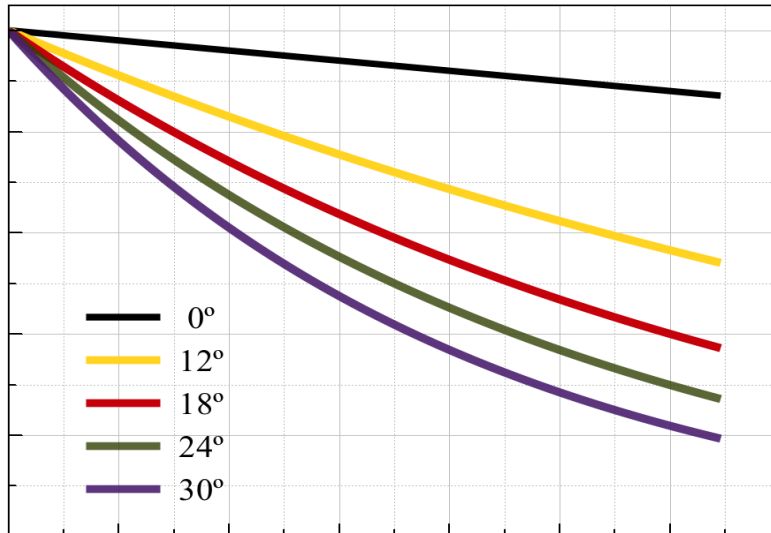
A csőátmérők mérése tólméterrel történt, így viszonylag nagy (három tizedesjegy) pontosságú mérési eredményeket produkált, melyek megegyeztek a csövek névleges belső átmérőjével.

Az ülepedés befejezettségét akkor tekintettem teljesnek, amikor a részecskék 95%-a leülepedett az ülepítő aljára vagy az oldalára (nagy döntési szögeknél).

v_t a kísérleteim során szintén egy mért paraméter, így izometrikus (és egyéb alakú) részecskék átlagos terminális sebességét is meg lehet határozni, ezt is videóelemző szoftverrel mértem, a mérés pontatlansága, az egyensúlyba való beállással néha megjelenő fluktuáció.

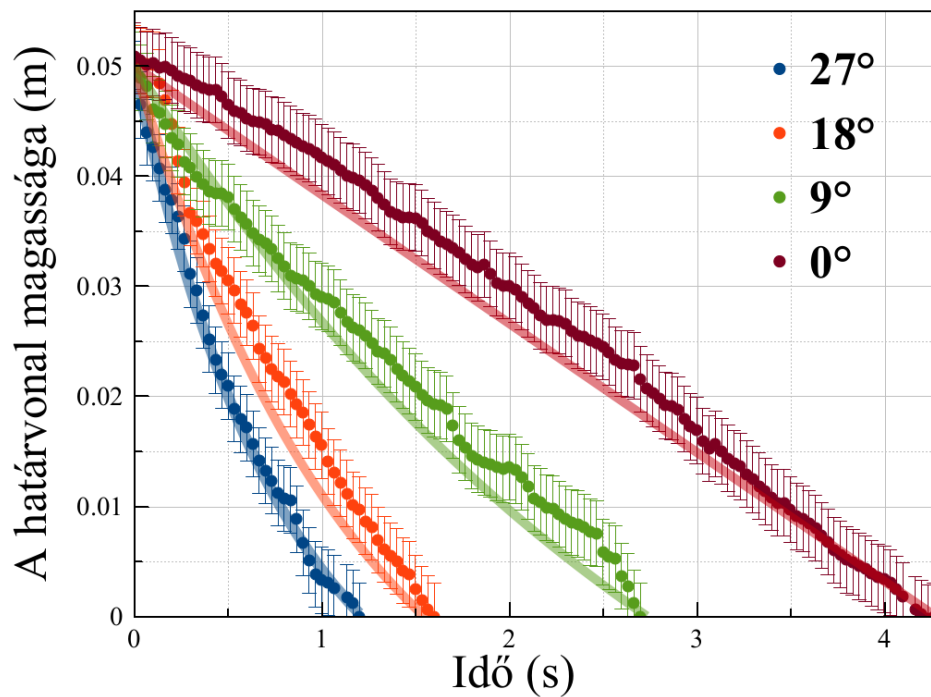
4. Eredmények és elmélet összehasonlítása

A (3) egyenlet alapján azt várjuk, hogy a döntés szögének növelésével az ülepedési idő csökken:



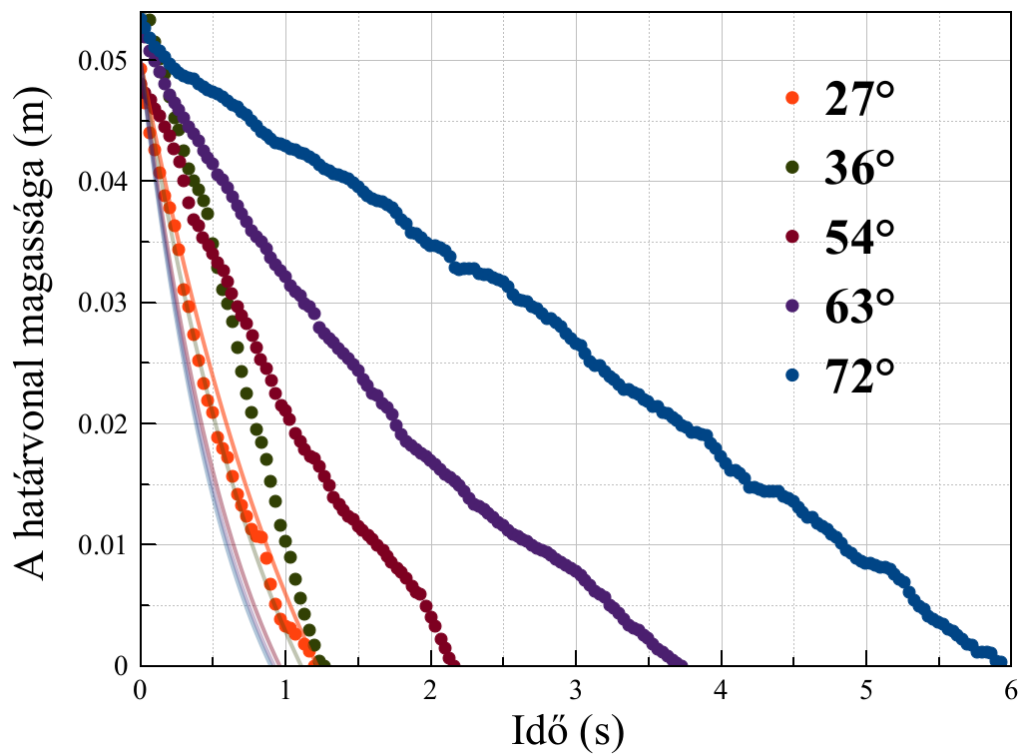
(j) Az elméletből következő várható határvonal hely-idő függvénye.

A kísérletekből egyértelműen látszik, hogy ez a tendencia nagyjából 30°-ig tökéletesen működik:



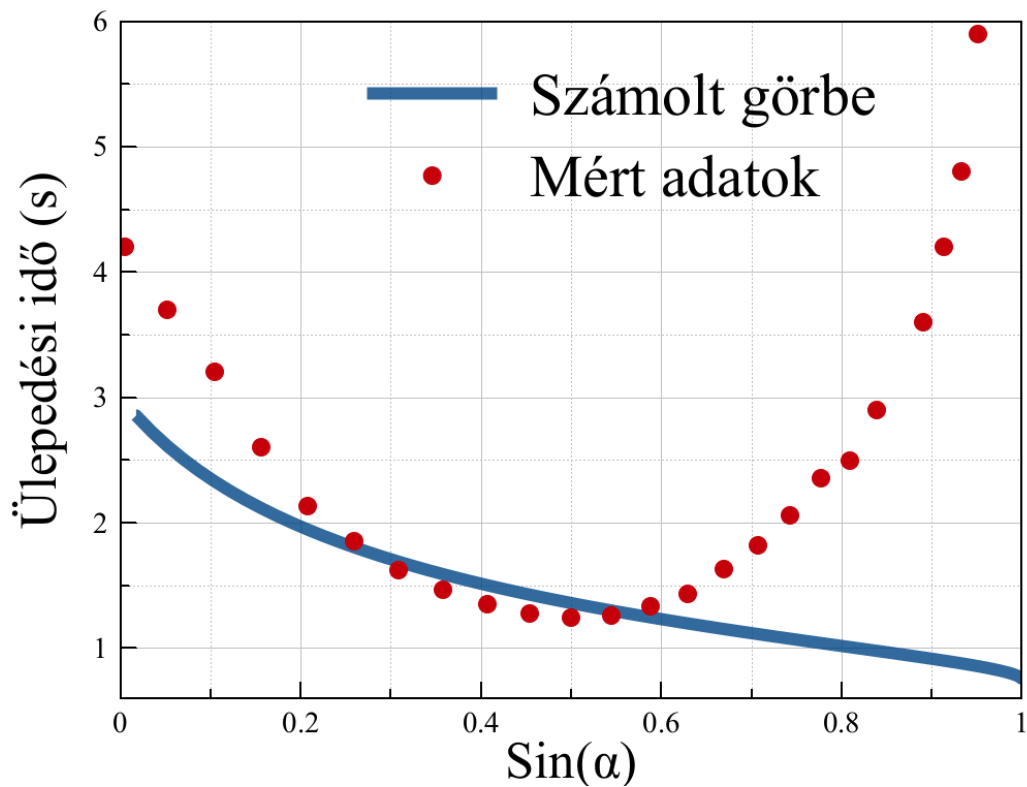
(l) A határvonal hely-idő grafikonja és a határvonal mért hely-idő pozíciója különböző döntési szögek esetén. Adatok: víz és iongyöngyökkel végezve, $v \approx 0.012 \text{ m/sec}$, $D = 0.015 \text{ m}$.

Ellenben az elmélet jelentős eltérést kezd mutatni a valóságtól 30° felett, mert míg az elmélet egyre rövidebb ülepedési időket mutat, addig a gyakorlatban egyre nagyobb az ülepedés tényleges ideje, melynek az oka az elhanyagolt súrlódás:



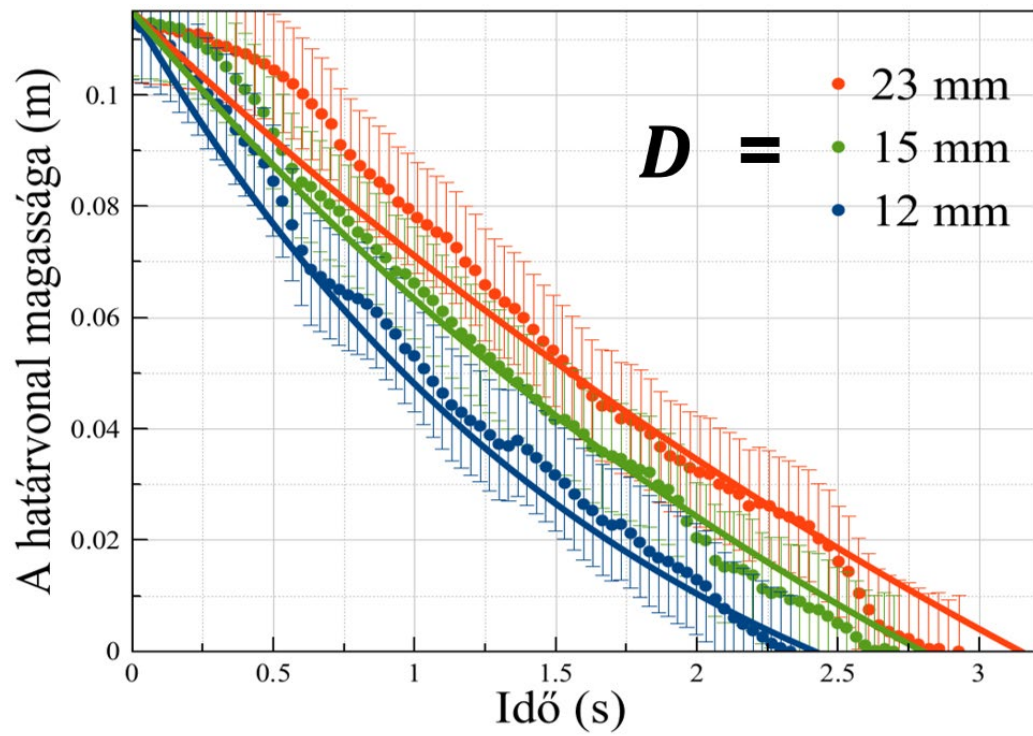
(m) Az elméleti görbék 30° feletti döntési szögekre, valamint az ezekhez tartozó Adatok: víz iongyöngyök, $v \approx 0.012 \text{ m/sec}$, $D = 0.015 \text{ m}$

Az elmélet szerinti ülepedési idők és a ténylegesen mért ülepedési idők:



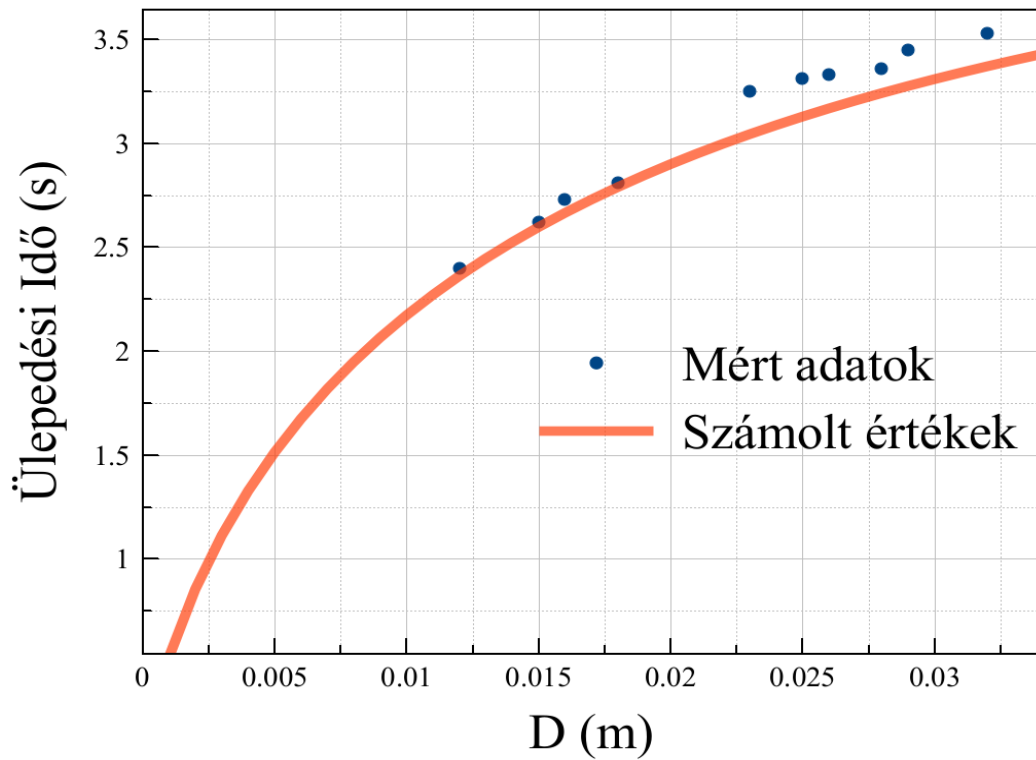
(n) Az ülepedési idő elméleti szögfüggése, valamint a mért ülepedési idők különböző döntési szögekre. Adatok: etil-alkohol, gyöngy, $D=0.012\text{m}$, $v=0.017\text{m/s}$, $h_0=0.05\text{m}$.

Az elméletből kiszámolható, hogy a nagyobb keresztmetszethez nagyobb ülepedési idő is tartozik, melynek egyszerű magyarázata, hogy nagyobb mennyiségű folyadékot kell mozgásra bírnia azonos mennyiségű részecskének, így optimálisabb kisebb keresztmetszetű csőben ülepíteni:



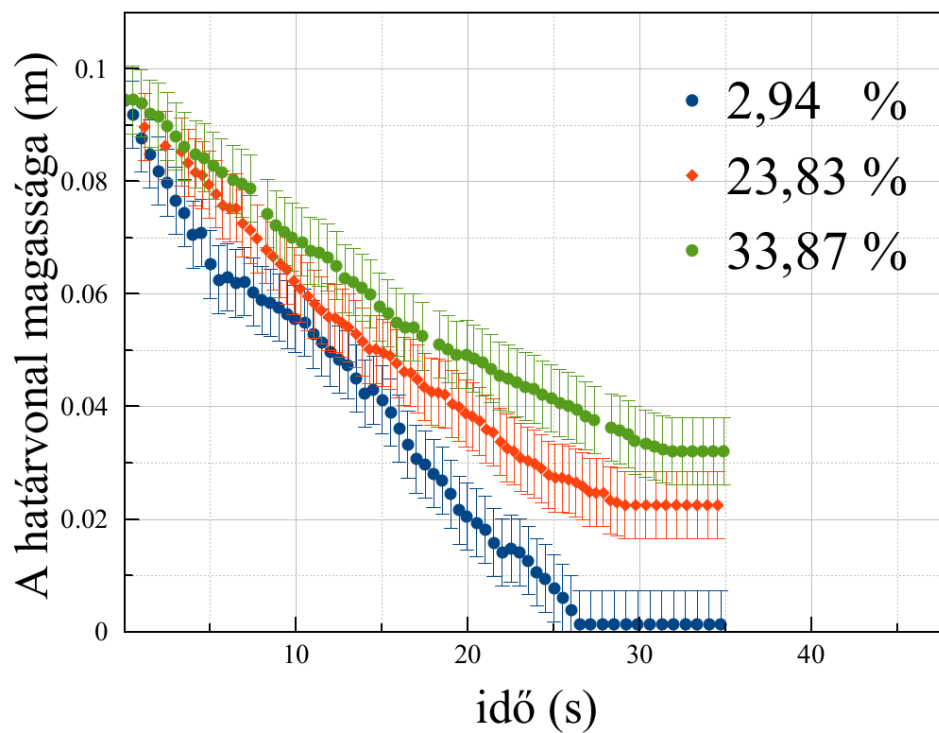
(o) Az átmérő hatása az ülepedési határvonal sebességére. Adatok: etil-alkohol, gyöngy, $v=0.02\text{m/s}$, Döntés szöge $\alpha=18^\circ$.

Valamint a kísérletek eredményei és az ehhez számolt elméleti görbe:



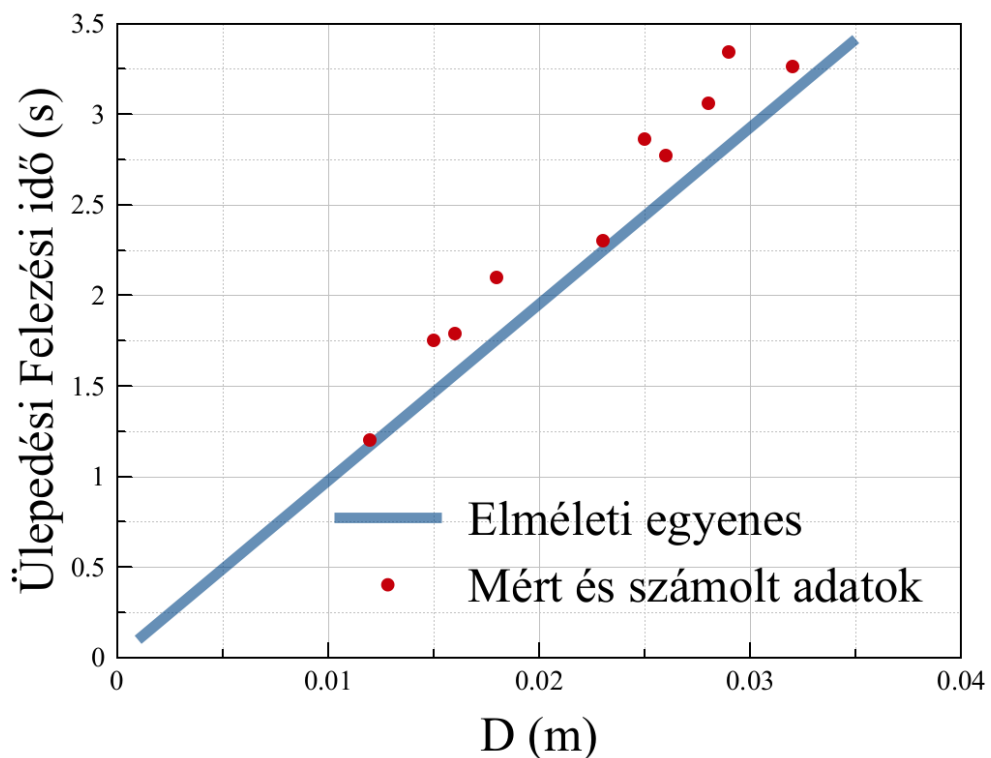
(p) Az ülepedési idő és az átmérő kapcsolata. Adatok: etil-alkohol, iongyöngy
 $v=0.022\text{m/s}$ döntés szöge $\alpha=18^\circ$, $h_0=0.05\text{m}$.

Ahogy az az elméletből is következik, ha nagyobb a részecskék száma lassabban fog bekövetkezni az ülepedés:



(q) Különböző térfogati koncentrációjú ülepitések. Adatok: paraffinolaj, só
 $D=0.015\text{m}$ döntés szöge $\alpha=18^\circ$, $v=0.003\text{m/s}$.

Az ülepedési felezési idő remekül szemlélteti, hogy mely kezdeti feltételeknél mely folyamat fog gyorsabban, illetve lassabban lejátszódni, de fontos észbe tartani, hogy felezési időként a nagyobb érték gyorsabb lefolyást eredményez:



(r) Az ülepedési felezési idő és a keresztmetszet kapcsolata. Adatok: etil-alkohol, iongyöngy, döntés szöge $\alpha=18^\circ$, ($h_0=0.05\text{m}$ a mérésben), $v=0.022\text{m/s}$.

Az adatokból egyértelműen leolvasható, hogy az elmélet kis szögekre jó közelítést ad (0° - 15°), a legjobb egyezést a 15° - 30° (és a 30° körüli) tartományban kapjuk, majd az elmélet 30° -tól nagyobb döntési szögekre nem ad magyarázatot, mert itt már nagyobb szerep jut az elméletben elhanyagolt súrlódásnak.

5. Összegzés:

Az szakirodalomból átvett korábbi eredmények, mint a határvonal mozgását leíró differenciálegyenlet, a folyadékok sűrűség és viszkozitás leíró egyenletek, valamint a közegellenállási erő sebességfüggését eldöntő Reynolds szám.

Saját, hozzáadott érték, a különböző esetek szemléletes összehasonlítására felhasználható, míg az egyéb leírások csak komolyabb számításokkal enged belátást nyerni a paraméterek tényleges befolyásoló hatására, addig könnyen érthető és a határfeltételek betartása mellett egyértelmű eredményt adó, radioaktív bomlás analógiájára épülő relatív ülepedési-állapotot leíró egyenlet.

A felvázolt egyenletek és a mért értékek viszonylag jól illeszkednek az optimális döntési szögek körül, annak ellenére, hogy a jelenség lefolyásában egyértelműen nagy szerepe van a fallal való súrlódásnak és a folyadékon belüli ellenállásnak. A geometriai leírás ebben a problémában helyesen ad tendenciákat meg és analitikusan könnyen számolható.

Mindennapi felhasználásban kevésbé felhasználható, de zárt ülepitési például a vér komponensekre bontásában nagymértékben csökkentheti az ülepedési időt, ha kisebb keresztmetszetű és hosszabb csövet használunk.

6. Felhasznált szakirodalom:

[1] Efstathios E. Michaelides, Zu-Jia Xu (2005). ResearchGate,
A Numerical Simulation of the Boycott Effect.
DOI:10.1080/00986440590477971

[2] Stephan Fuchs (2014).

ResearchGate, Lamella settlers for storm water treatment -Performance and design recommendations

DOI:10.2166/wst.2013.698

- [3] Tony McKean, Brian Bourke, Warren Mitchell, Lara Caplygin, Rory McKeown, 31 August to 2 September 2010, 73rd Annual Water Industry Engineers and Operators' Conference Bendigo Exhibition Centre

NOVEL APPLICATION OF A LAMELLA CLARIFIER FOR IMPROVED
PRIMARY TREATMENT OF DOMESTIC WASTEWATER

- [4] A. HAIDER and O. LEVENSPIEL

Chemical Engineering Department, Oregon State University, Corvallis, OR 97331
(U.S.A.) (Received September 19, 1988)

Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles

- [5] Brian G. Higgins

Department of Chemical Engineering and Materials Science University of
California, Davis 2014

Viscous Models for Liquids: Temperature Dependence

- [6] J Res Natl Inst Stand Technol. 2005 Jan-Feb; 110(1): 31–54.

Published online 2005 Feb 1.

doi: 10.6028/jres.110.005