

NEM-NEWTONI FLUIDUMBAN ÜLEPEDŐ GÖMB JELENSÉGÉNEK IRODALMI ÁTTEKINTÉSE

LITERATURE SUMMARY ON THE PHENOMENON OF SPHERE SETTLING IN NON-NEWTONIAN MEDIA

Suller Lili*, Vadászné Dr. Bognár Gabriella**, Dr. Faitli József***

ABSTRACT

Nanofluids are increasingly used in engineering practice due to their exceptional thermal properties. They are used in the automotive industry, cooling and lubricating systems, electronics, air conditioning, chemical processing and even in the solar industry as well as hydraulic transport. Understanding the behavior of nanofluids is crucial for being able to predict the design parameters and hence designing more optimal, more efficient equipment. One of the basic phenomena of rheology is a sphere settling in a fluid. In this paper, a brief review of the literature on this topic is given.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki gyakorlatban egyre több területen alkalmaznak nanofluidumokat kedvező hővezetési és hőátadási tulajdonságaik miatt. A nanofluidumok speciális kétfázisú rendszerek, melyekben szilárd részecskék (pl.: nano méretű fémporok, oxidok, szén nanocsövek) vannak elosztatva egy alapfolyadékban. A szilárd részecskék jelenléte jelentősen javítja az alapfolyadék hővezető képességét, hőátadási tulajdonságait és befolyásolja a keverék folyási viselkedését. Széles körben használják őket hűtőrendszerekben és kenőanyagként, mivel jobb hővezető képességgel és magasabb viszkozitási értékekkel rendelkeznek, mint a legtöbb hagyományos folyadék. Ezért széles körben használják őket az autópárhuzban, ahol a hatékony hűtés rendkívül fontos, az elektronika területén, légkondicionáló rendszerekben, vegyiparban gyártási folyamatok során valamint napenergiái-rendszerekben is egyre több helyen előfordulnak. A hidraulikus szállítás területén (például a bányászatban), amikor csővezetékekben nagymennyiségű szemcsés anyagot szállítanak folyadék-áramban, fontos az, hogy a különböző méretű szemcsék hogyan befolyásolják a keverékáramlás jellemzőit. Energiahatékony szállítás csak úgy tervezhető, ha ezt figyelembe tudjuk venni.

A nanofluidumok tulajdonságainak és viselkedésének megértése igen fontos mérnöki szempontból, mivel segít abban, hogy kisebb veszteségekkel és nagyobb hatékonysággal működő berendezéseket lehessen tervezni.

A szemcsemozgás egyik alapvető áramlástanai jelensége egy közegetől nagyobb sűrűségű gömbnek a gravitációs erőter hatására való süllyedése. Ezt a jelenséget végtelen kiterjedésű newtoni közegek esetén Stokes írta le elsőként egyfázisú közegekben. Azonban a gömb süllyedését jelentősen befolyásolhatja a nano- vagy akár nagyobb méretű részecskék jelenléte a folyadékban, mivel módosíthatja a határfelületi erőket, illetve az áramlási teret a süllyedő gömb körül. Ezen a területen számos kutatást végeztek, hogy minél pontosabban le tudjuk írni a részecskesüllyedés jelenségét nem-newtoni közegek esetében és meg tudjuk becsülni a süllyedési sebességet.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalomban számos esetet találhatunk a fent leírt jelenség vizsgálatára.

Faitli [1] a részecske üledés jelenségét tanulmányozta egy- és kétfázisú newtoni és nem-newtoni fluidumokban. Megállapította, hogy bár számos modell létezik nem-newtoni közegekben való szemcsemozgás leírására, ezek csak az adott esetre alkalmazhatóak és nem univerzálisak. Ezen a téren Wilson et al. érték el nagyobb áttörést. Bevezettek egy olyan univerzális és egyszerűen alkalmazható mérnöki megoldást, amivel meg lehet állapítani a részecske süllyedési végsebességét. Bevezették az *egyenértékű newtoni abszolút viszkozitás* fogalmát, melynek ismeretében nem-newtoni közegek esetében is alkalmazhatóak a newtoni összefüggések.

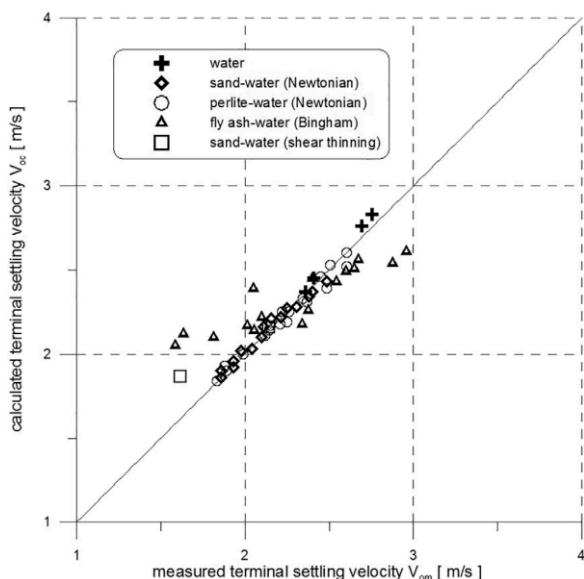
Faitli részletesen foglalkozott durva diszperz szilárd-folyadék rendszerekkel. Felvetett egy hipotézist, melyet „durva diszperz rendszerek kontinuitási elméletének” nevezett. Az elmélet szerint a durva diszperz rendszer viselkedését (kontinuumszerű, diszkrét elemes, vagy kevert) a folyamat (berendezés, vagy jelenség) és a diszpergált anyag jellemző méretének aránya határozza meg. A hidraulikus szállítás esetében Faitli felvetése szerint a berendezés jellemző mérete a lamináris alaprteg vastagsága a cső falának közelében. Az ettől a mérettől kisebb szemcsék és a folyadék a csőben egy kontinuum viselkedésű finom szuszpenziót alkot, amely hiába kétfázisú, mégis egyfázisú közegnek tekinthető és értelmezhető a reológiaja. Ez a hordozó kvázi egyfázisú

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

*** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet

folyadék szállítja a diszkrét elemekként viselkedő durvább szemcséket. Fajti célja az volt, hogy bebizonyítsa az elmélet érvényességét a szemcsemozgás jelenségére is. Ennek érdekében ülepedési kísérleteket végeztek három különböző szilárd granulátum felhasználásával (finomszemcsés üveghomok – Fehérvárcsurgó, perlit – Pálháza, ligniterőműi szállópernye – Gyöngyös). A szuszpenziók alapfolyadékáa víz volt. A kísérletek során négy különböző átmérőjű (28, 30, 38, 40 mm) acél golyó ülepedése került megfigyelésre. A reológiai és az ülepedési kísérleteket saját készítésű berendezésekben (csőreométer és ülepedésvizsgáló) végezte. Kétféle teszt sorozatot hajtott végre, az első newtoni fluidumokban történő ülepedés vizsgálatára szolgált, a második nem-newtoni finom szuszpenziókkal történt. A méréseket követően összefüggések segítségével meg lehetett határozni a süllyedési végsebességet. A kutatás eredményeként meg lehet állapítani, hogy a finom szuszpenzióban ülepedő gömb esetében a közeget kontinuumként lehet kezelni, mivel a mért és a számolt eredmények jó egyezést mutattak (1. ábra).



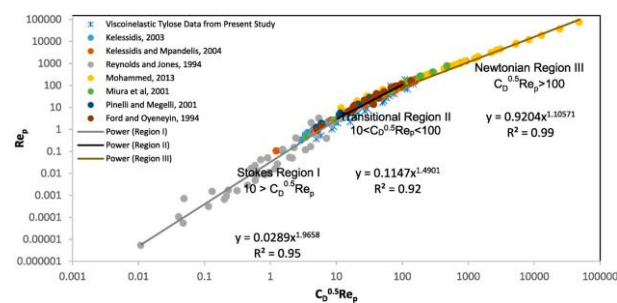
1. ábra. Állandósult ülepedési sebesség mért és számolt értékei [1]

Okesanya és szerzőtársai [2] rugalmas és rugalmatlan viszkózus folyadékokat vizsgáltak. A kutatásaik során arra törekedtek, hogy számszerűsítsék a folyadék rugalmasságának hatását olyan viszkoelasztikus és viszkoinelasztikus folyadékokra, melyeket a hatványtörvény szerint lehet jellemezni. A kísérleteik során üveg, acél, kerámia és cirkónium gömböket használtak. A mérések során kétféle polimerből és desztillált vízből készítették szuszpenziót. A kétféle polimer (hidrolizált poliakrilamid és carboximetil cellulóz) eltérő rugalmassági tulajdonságokkal rendelkeztek. A nyírási viszkozitás és a viszkoelasztikus tulajdonságok meghatározáshoz viszkozimétert alkalmaztak, illetve rezgési méréseket végeztek.

A kísérletek során PIS (Particle Image Shadowgraphy) módszert alkalmaztak a gömb alakú szilárd részecskék ülepedési sebességének meghatározására. A kapott eredmények hitelesítésére standard newtoni folyadékkal (vízzel) is elvégezték az ülepedési kísérleteket. Az eredmények jól illeszkedtek a közegellenállási görbére.

A tanulmányban több mint 25 polimer-víz mintát vizsgáltak különféle rugalmassági tulajdonságokkal, eltérő részecske mérettel és sűrűséggel. A reológiai mérések kimutatták, hogy mindegyik folyadék hatványtörvény alapján viselkedett.

A szerzők ezt követően egy $Re_p - C_D^{0.5} Re_p$ ellenállási görbe felvételét javasolták. Az Re_p a részecske Reynolds szám, C_D pedig az ellenállási tényező. A görbén három szakaszt lehetett megfigyelni. Az első az un. Stokes szakasz tartomány, a második pedig a newton turbulens tartomány. Mind a három szemcse körüláramlási tartományon külön kell meghatározni a részecske Reynolds számot. Ezt követően meg lehet határozni az ülepedési sebességet.



2. ábra. Ellenállási görbe (viszkoinelasztikus folyadékok) [2]

A számolt értékek és így a modell megfelelését a szerzők statisztikailag értékelték. Kétféle módszert alkalmaztak, a százalékos átlagos abszolút eltérést és a négyzetes középhiba módszert.

A statisztikai értékelés jó egyezést mutatott a mért és a modellt alapján számolt adatok között.

Moseley és szerzőtársai [3] két tixotróp folyadékban egymást követően süllyedő függőlegesen egytengelyű gömb mozgását vizsgálták. Figyelembe vették a folyadék relaxációs idejét (azt az időtartamot, amely alatt a folyadék visszarendeződik az eredeti szerkezetébe), mivel ez jelentős hatással van a viszkozitásra, és így az ülepedő részecskék sebességére is. A kutatás során nem-newtoni xantán-glicerol-víz folyadékban végeztek ülepedési kísérleteket.

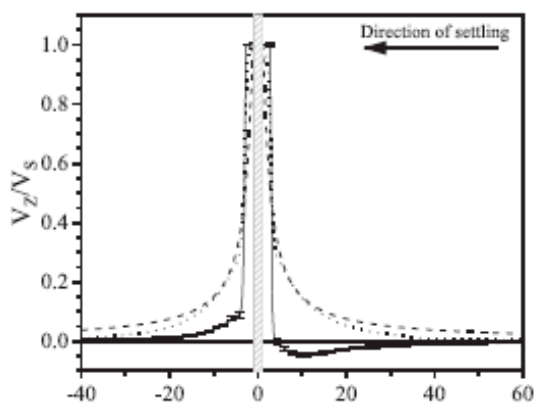
A szerzők abból a felvetésből indultak ki, hogy newtoni folyadékban két egytengelyű gömb ülepedési sebessége azonos, azonban függ a gömbök középpontjainak távolságától. A gömbök távolságának csökkenésével egyre nő a sebességük a hidrodinamikai kölcsönhatások miatt. Newtoni folyadék esetében Faxén első törvénye alapján lehet meghatározni a folyadék sebességét. Ez a feltevés képezte a kutatás alapját.

A kísérletek megkezdése előtt xantán oldatokat készítettek, melyeket 30 napig pihentettek, hogy megszabaduljanak a légbuborékoktól. A folyadékok reométerben történő vizsgálata során megállapították, hogy a folyadék körülbelül 5 perc alatt rendeződik vissza az eredeti szerkezetébe.

Az ülepedési kísérletek során 1,5 mm átmérőjű edzett rozsdamentes acélgolyókat ülepítettek. A kísérletek során kétféle mérési módszert alkalmaztak. Az egyik módszer optikai, mely egy kamera felszerelését jelentette. Ezzel mérték az acélgolyók ülepedési sebességét. A süllyedő szemcsék sebességét PIV (Particle Imaging Velocimetry) eljárással mérték.

A rendelkezésre álló összefüggések alapján kiszámították az ülepedési sebességet és jó egyezést tapasztaltak a mért adatokkal. Tehát ez megfelelő alapként szolgál arra az esetre, amikor két egytengelyű gömb ülepszik egymás után ugyanabban a folyadékban. Ehhez ismét Faxén első törvényéből indultak ki és a számítások során a PIV alapján mért és átszámított folyadék sebességeket használták fel a gömbök ülepedési sebességének meghatározásához. Az eredmények alacsony Re_p mellett jó egyezést mutattak a kísérleti eredményekkel.

Nem newtoni folyadékok esetében a szerzők két fő különbséget azonosítottak a newtoni folyadékokhoz képest.



3. ábra. Folyadék sebesség profi nem newtoni folyadékban ülepedő gömb esetében [3]

Az egyik a folyadék sebessége. A sebességprofil ebben az esetben nem szimmetrikus egy ülepedő gömb előtt és után. Negatív nyomvonal figyelhető meg. A nem newtoni folyadék sebességprofilja a gömb előtt hasonló alakú, mint a newtoni folyadékoké, azonban a gömb után negatív tartományba süllyedt, és a minimális pont után lassan újra elérte a nullát.

A második különbség a nem-newtoni folyadékok látszólagos viszkozitása. Megfigyelhető, hogy amikor két függőlegesen egytengelyű gömb tixotróp, folyadékban ülepszik, a második gömb nagyobb sebességgel halad, mivel az első gömb csökkenti a folyadék látszólagos viszkozitását. Ennek a jelenségnek a leírásához a szerzők a következő feltételezéseket tették.

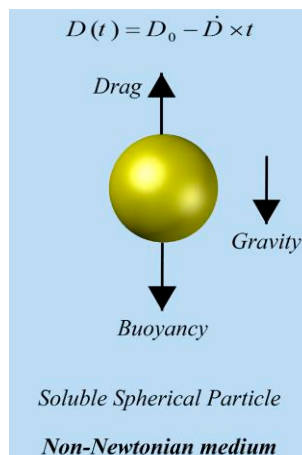
a.) az első gömb sebessége megegyezik a newtoni folyadékban ülepedő egyetlen gömb sebességével, mivel még nem történt kölcsönhatás.

b.) A második gömb sebessége a látszólagos viszkozitási aránnyal szorozható, mielőtt a hidrodinamikai kölcsönhatásokat figyelembe vennék.

c.) a folyadék látszólagos viszkozitásának nyíróerő hatására bekövetkező csökkenése nem jelentős.

Ezen kritériumok alapján a szerzők kiszámították az első és a második gömb ülepedési sebességét. Az eredmények és a mért értékek jó közelítéssel egyeztek a $d/r < 7$ tartományban. A szerzők megállapítják, hogy a folyadék látszólagos viszkozitásának csökkenése nagyrészt a tixotropikus tulajdonságának köszönhető (kb. 28%). Ezért arra a következtetésre jutottak, hogy a nyíróerő hatására bekövetkező látszólagos viszkozitás csökkenés ezekben az esetekben nem olyan jelentős. Azt is megállapították, hogy $d/r < 30$ körül a folyadékban visszaáramlási zóna alakul ki. Ebben a tartományban a számított és a mért értékek között sokkal nagyobb eltérés volt megfigyelhető.

Dogonchi és szerzőtársai [4] a kollokációs módszer (CM) segítségével vizsgálták egy oldódó gömb ülepedési mozgását nem newtoni folyadékban. Kutatásaik során tanulmányozták a különböző paraméterek hatását az oldható részecske sebességére és gyorsulására.



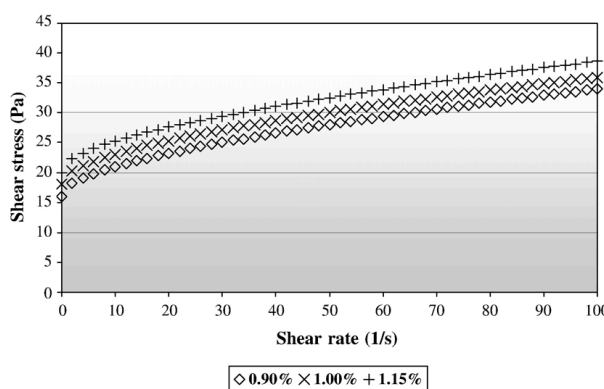
4. ábra. Nem newtoni folyadékban ülepedő oldható részecske sematikus ábrája [4]

Különböző sűrűségű és átmérőjű részecskékkel végezték el a kollokációs számításokat, és megpróbálták meghatározni, hogy ezek a változó paraméterek milyen hatással vannak a részecske folyadékban való mozgására. A kutatás során azt a feltételezést tették, hogy az átmérő lineárisan változik az oldódás során.

A szerzők a következő megállapításokat tették:

1. kisebb kezdeti átmérő esetén a részecske sebessége és gyorsulása is kisebb
2. a részecske kezdeti átmérőjének csökkentésével az gyorsabban éri el a végsebességet
3. minél gyorsabban csökken a részecske átmérője, annál kevesebb időre van szüksége a végsebesség eléréséhez.

Gumulya és szerzőtársai [5] egy általános modell kidolgozásán dolgoztak, amely leírja két azonos, függőlegesen egytengelyű gömb viszkoelasztikus folyadékban történő süllyedésének viselkedését. A kísérleteket egy függőleges, átlátszó csőben végezték, melynek négyzet alakú volt a keresztmetszete. A tesztszó méreteit úgy választották meg, hogy a falhatás elhanyagolható mértékű legyen. A várakozásoknak megfelelően a szerzők azt tapasztalták, hogy az első gömb nem sokkal a kísérleti csőbe való belépése után elérte végsebességét. A második gömb azonban lényegesen nagyobb sebességgel haladt át a folyadékon. Egy idő után a két gömb ütközött és egymáshoz tapadt, ami miatt azonos sebességgel haladtak tovább. Egy másik fontos megállapítás, hogy közvetlenül az ütközés előtt az első gömb gyorsult, míg a második gömb lassult.



5. ábra. Mért nyírási diagramok [5]

A kísérletekből nyert nyírási diagramon jól látható, hogy nagy nyírási sebességek esetén közel lineáris a görbe, azonban kisebb értékeknél egyre inkább eltér a görbe a lineáris közelítő egyenestől. A kísérletekből származó értékek nagy része az alacsony sebességű tartományba esik. Ennek következtében a szerzők megállapították, hogy a Casson modell jobban le tudja írni az ülepedési jelenséget, mint a lineáris Bingham modell. Az ülepedő gömbök sebességének leírására a szerzők a két gömb kísérleti csőbe való bejuttatása közötti időeltérés dimenzió nélküli formában történő kifejezését javasolták. A gömbök sebességének számított értékei nagyfokú egyezést mutattak a kísérleti eredményekkel a $Re^* < 4$ tartományban. A magasabb Re^* értékek esetében a javasolt egyenlet nem tudja pontosan leírni a gömbök sebességét.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt években számos kutatás irányult a nem-newtoni folyadékok viselkedésének a vizsgálatára és megértésére. Ezeknek a kutatásoknak az egyik célja, hogy feltárják az áramlástani alapjelenségek körülményeit. Az egyik ilyen alapjelenség a gömb ülepedése. A témában jelentős mennyiségű kutatás történt, amelyeknek az eredményeképpen rendelkezésünkre állnak különféle nem-newtoni folyadékoknak a kísérletek során mért adatai. A legtöbb

kutatás célja egy teljesen univerzális modell megalkotása volt, ami azonban még nem született meg. Helyette olyan összefüggések állnak a rendelkezésünkre, amelyek bizonyos folyadéktípusok kisebb, vagy nagyobb Re tartományában alkalmazhatóak.

4. SUMMARY

In recent years, numerous studies have focused on investigating and gaining a deeper understanding of the behavior of non-Newtonian fluids. One of the main objectives of these studies was to understand the basic conditions of fundamental rheology phenomena.

One of the most important fundamental phenomena is the settling of a sphere in non-Newtonian fluids.

A considerable number of studies have been conducted in this field, resulting in an extensive amount of experimental data describing the behaviour and parameters of various non-Newtonian fluids.

Many of these studies aimed to create a universally accurate model; however, such a model has yet to exist. What we do have is a considerable number of empirical correlations to predict the behavior of specific non-Newtonian fluids with reasonable accuracy and limitations.

5. IRODALOM

- [1] FAITLI J.: *Continuity theory and settling model for spheres falling in non-Newtonian one- and two-phase media*, International Journal of Mineral Processing Vol.169, 2017, pp. 16-26, <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.09.010>
- [2] OKESANYA T., ABDUKARIMOV A., KURU E.: *Generalized models for predicting the drag coefficient and settling velocity of rigid spheres in viscoelastic and viscoinelastic power-law fluids*, Journal of Petroleum Science and Engineering Vol 191, 2020, 107077 <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107077>
- [3] MOSELEY K., FAIRWEATHER M., HARBOTTLE D.: *Settling dynamics of two identical vertically aligned spheres in a thixotropic fluid*, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 271, 2019, 104146 <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2019.104146>
- [4] DOGONCHI A.S., SEYYEDI S.M., HASHEMI-TILEHNOEE M., GANJI D.D.: *Investigation of sedimentation process of soluble spherical particles in a non-Newtonian medium*, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 530, 2018, pp. 532-537 <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.004>
- [5] GUMULYA M.M., HORSLEY R.R., WILSON K.C.: *The settling of consecutive spheres in viscoplastic fluids*, International Journal of Mineral Processing, Vol.82, 2007, pp. 106-115 <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.11.005>