

Új eljárás finomszemcsés laza képződmények szemcseeloszlásának meghatározására az ASTA mérőeszközzel

Kovács Balázs¹ – Tolner László² – Czinkota György² – Szacsuri Gábor³ – Czanik Péter⁴

¹GÁMA-GEO Kft, 3519 Miskolc, Bencések útja 111.

²Elemez Kft. Budapest, Falk Miksa u.

³Miskolci Egyetem, Hidrogeológiai-Mérnökgeológiai Tsz., 3515 Miskolc-Egyetemváros

⁴Szent István Egyetem, Talajtani és Agrokémiai Tsz, 2100 Gödöllő, Páter K. u. 1.

1 Bevezetés

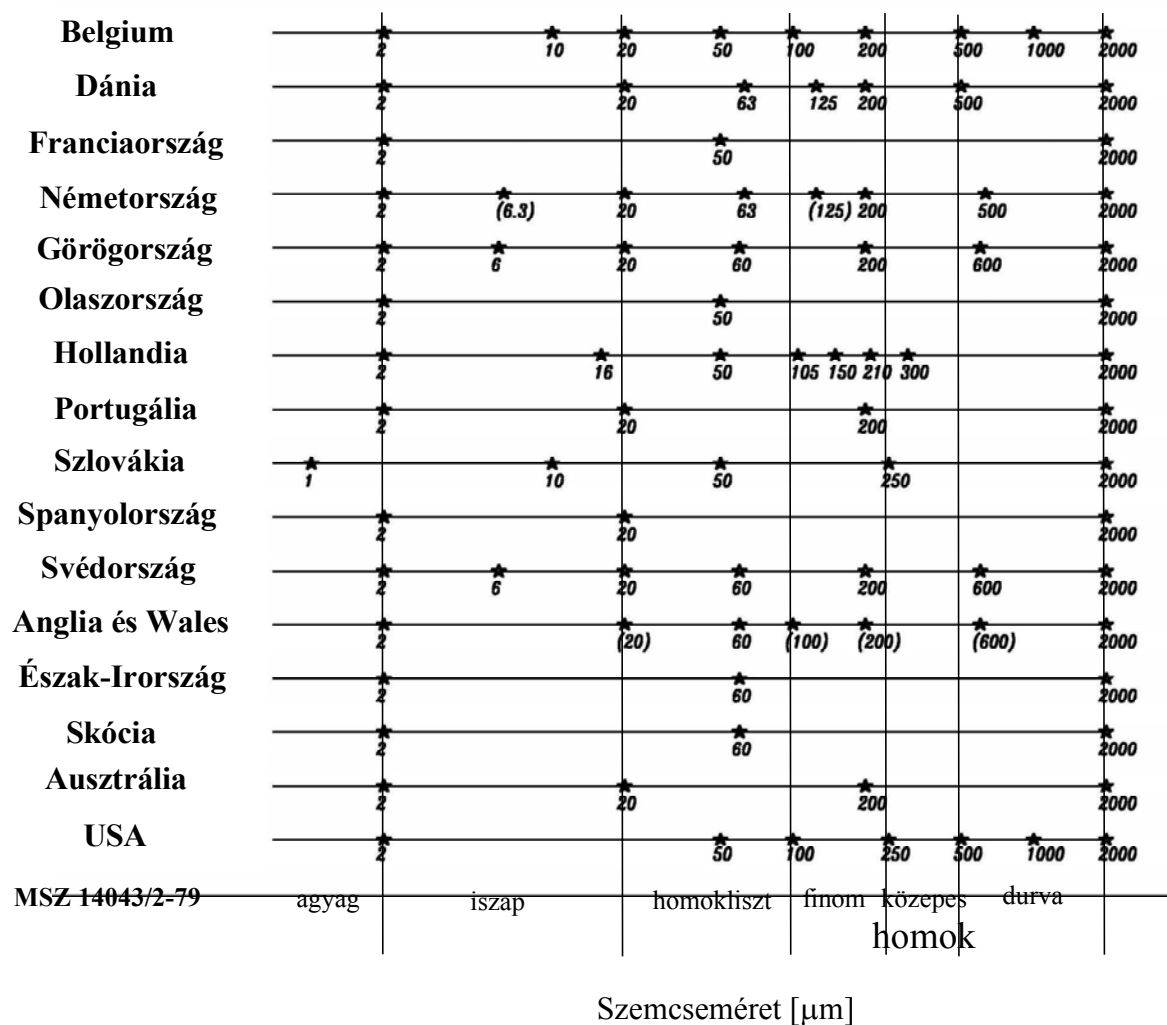
A földtani képződmények, mezőgazdasági talajok egyik legjellemzőbb paramétere a szemcseméret eloszlás. A mezőgazdasági talajok fizikai, kémiai, vízgazdálkodási, végső soron a tápanyag-gazdálkodási tulajdonságai jelentős mértékben függenek az iszap és agyagméretű frakció szemcseméret eloszlásától

A geotechnikában a szemcseeloszlás meghatározására 0,1 mm feletti részecskeméret esetén a közet száraz vagy nedves szitálását alkalmazzák, míg a képződmény viselkedését alapvetően meghatározó finom frakció szemcseeloszlási görbéjének felvételére a nagy munkaerő-igényes és közepes mérési pontosságú hidrometrálás (areometrálás), illetve a Köhn-pipettás módszer terjedt el.

A továbbiakban a finom frakció szemcse-eloszlása meghatározásának problémáival foglalkozunk. A hidrometrálás során – főképpen az első két órában szinte folyamatosan észleléseket kell végezni, ennek következtében a mérés a laboránst gyakorlatilag teljesen lefoglalja. Gáspár (1957) készített egy olyan időbeosztást, mellyel 1 fő összesen 10 db minta mérését végezheti el. Problémát jelent, hogy több mérés esetén a leolvasások időpontja éjszakára is eshet, tekintettel az akár 2 napig is elhúzódó mérésekre.

Alapvető probléma a szemcseeloszlás meghatározásánál, hogy bár sok szakterület (mezőgazdaság, talajtan, hidrogeológia, geotechnika, stb.) használja a szemcseeloszlást a laza kőzetek jellemzésére, mégis egymástól eltérő szemcseméret-határokat (szemcseméret intervallumokat) használnak a képződmények elkülönítésére. Az 1. ábra néhány országban a talajtanban alkalmazott szemcseméret határokat mutatja be.

Mind a talajtanban, mind a geotechnikában szokás a szemcseeloszlási görbe alapján további talajfizikai jellemzőket becsülni, pl. szivárgási tényező meghatározása Zamarin-módszerrel, egyenlőtlenségi együttható meghatározása, a talajtanban pedotranszfer-függvényekkel talajok vízgazdálkodási jellemzőinek számítása. Ezeket a számításokat a szemcseeloszlási görbe 2 vagy több pontja alapján határozzuk meg és általánosságban igaz, hogy a pontok darabszámának növelésével a számítás pontossága is egy határig növelhető.



1. ábra: A mezőgazdasági talajosztályozáshoz használt szemcseméret határok a világ néhány országában, illetve a talajmechanikában szabványos talajosztályozás összehasonlítása

A felsoroltak miatt célszerűnek látszott egy olyan berendezésnek a kifejlesztése, amellyel a mérés automatizálható, tetszőleges számú minta tetszőleges gyakorisággal történő mérése végezhető egyben, a méréssel párhuzamosan a teljes mérési dokumentáció elkészíthető, és amely alkalmas származtatott mennyiségek meghatározására a szemcseeloszlási görbe alapján.

A szemcseeloszlás meghatározására a mérés technikában már számos új módszert dolgoztak ki. A talajtan területén legalapvetőbb és legszélesebb körben alkalmazott megoldásokat Gee and Bauder (1986) foglalták össze, de számos alternatív módszer is ismeretes a nemzetközi szakirodalomban (pl. Stuyt (1992); Oliveira et al. (1997) és Starr et al. (2000)). Filep és Ferencz (1999) áttekintést ad a leggyakrabban alkalmazott szemcseméret eloszlási rendszerekről a talajtani kutatásokban. A geotechnikai gyakorlatban alkalmazott

szemcseeloszlási vizsgálatokat (hagyományos és Pappfalvi-féle areométer, Köhn-pipettás vizsgálat) Kézdi (1964) foglalta össze, ugyanakkor az MSZ 18288/2-84 szabványban az Atterberg-féle iszapolás, az Andreasen-pipettás, szedimentációs mérleges, továbbá a szívócsöves meghatározás is szerepel, mely módszereket a mai napig alkalmazzák. A talajok talajmechanikai szempontból történő megnevezését szemcseméret alapján az MSZ 14043/2-79 szabvány, a szemcseméret-eloszlás meghatározás szabályozását az MSZ 14043/3-79 MSZ 18288/2-84 és szabványok foglalják össze.

A korábban említett egyéb, pl. lézeres és röntgensugárral történő szemcseméret eloszlás-meghatározás problémája, hogy ezekkel a drága műszerekkel csak 1-1 minta vizsgálata végezhető egyidejűleg, továbbá igen nagy hátránya, hogy a mérés alapelve eltér a szabványosított ülepedéses vizsgálatoktól. Amennyiben a mérés alapelve eltérő, akkor a két elven mért eredmények összevethetősége igen korlátozott, gyakorlatilag nem megoldható. Mivel a gyakorlatban a finom szemcsefrakció szemcseméret-eloszlásának szabványos mérése a korábbiakban ülepedéses elven alapult, ezért a komparatív, új megoldásnak is ülepedéses vizsgálatnak kell lennie.

A felsorolt megfontolások vezettek a számítógép vezérelt ASTA berendezés kifejlesztéséhez, mely jelenleg a prototípus előkészületi fázisban van és mellyel a korábbi mérések további a gyakorlatban jelentős hátrányai (pl. az üvegeszközök pl. Pappfalvi-féle areométer) törékenysége) is kiküszöbölhetők.

2 Az alkalmazott mérés alapelve

A talajtani gyakorlatban ritkábban, azonban a geológiai vizsgálatok során széleskörűen elterjedt szemcseméret eloszlás vizsgálati módszer a hidrométeres eljárás. Ebben az esetben egy úszót (areométer) helyezünk a megfelelően előkészített talajszuszpenzióba, melynek bemerülése a szuszpenzió átlagos sűrűségétől függ.

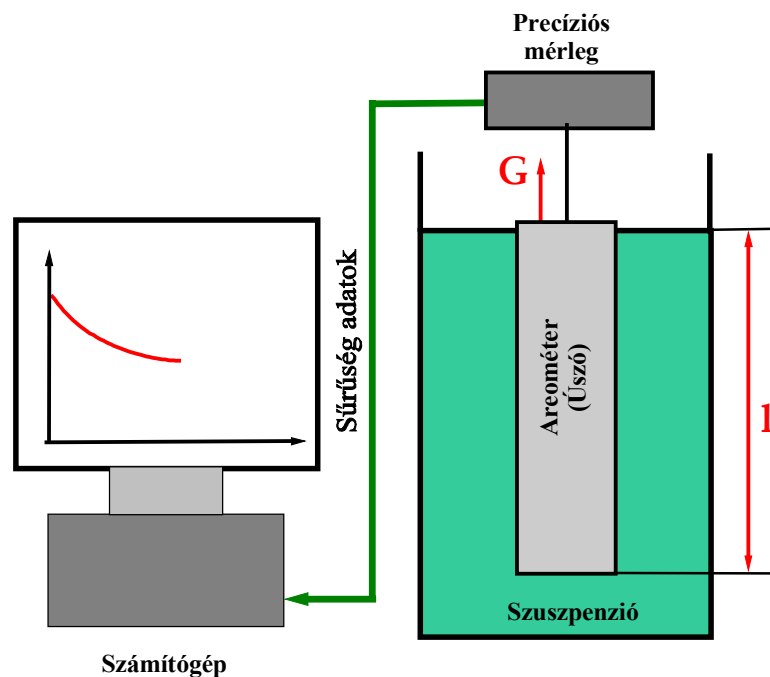
A szuszpenzió sűrűségét a folyadékfázis és a benne található lebegő anyag tömegösszegének teljes térfogattal képzett hányadosaként számítjuk. A szuszpenzió aktuális sűrűségét az ülepedés során egy mélységtartományban mérjük, ha az ülepedő szilárd szemcsék a mért tartományt a mérés során elhagyják (kiülepednek), a vizsgált térrészben a sűrűség csökken, ezáltal az ülepedés sebessége egyszerű sűrűség méréssel követhetővé válik. A hidrométeres módszernek igen nagy előnye, hogy a talajtanban leggyakrabban alkalmazott pipettás eljárással azonos fizikai elv alapján méri a szemcseméretet (Stokes-törvény) csak a detektálás módjában tér el a két megoldás egymástól. Mivel a hidrométeres eljárás esetében nincs mintavétel, csupán az úszó (areométer) szintjét kell leolvasni, nincs elvi akadálya a

tetszőleges sűrűségű mintavételnek, mely lehetővé teszi, hogy ne csak egyes előre meghatározott szemcseméret frakciók esetében szerezzünk adatokat az ülepedés előrehaladtáról, hanem gyakorlatilag folyamatosan, illetve tetszőleges sűrűségben olvassuk le a szuszpenzió sűrűségét. A leolvasás sűrűsége ennél a módszernél tulajdonképpen a felhasználástól függ, vagyis akár különböző finomságú görbék is kaphatók az alkalmazási igényeknek megfelelően.

A klasszikus hidrométeres eljárás esetében az areométer elvékonyított szárán levő beosztás adott időszakokban történő leolvasásával határozzuk meg az egyes frakciókhoz tartozó sűrűség, és ezen keresztül a nem kiülepedett („lebegő”) anyag mennyiség értékeit. A Pappfalvi-féle areométer annyiban egyszerűsíti a mérést, hogy az eszköz leolvasásával azonnal a lebegő szemcsék tömegét kapjuk meg, 100 g bemért anyag, 20°C hőmérséklet és 2680 kg/m³ átlagos szemcsesűrűség esetén.

Mivel a mérést kezdetben sűrű időközönként kell elvégezni, továbbá az üvegeszközön jelentős a meniszkusz okozta hiba, a hosszú mérés alatt jellemző a hőmérséklet változása, ezért a fáradságos mérést számos hiba terheli, melyek egy részét igen nehéz korrigálni.

Az areométer szintjének érzékelése a technika jelenlegi szintjén, könnyen automatizálható. Megfelelő érzékenységgű, számítógéppel összekötött digitális mérleggel bármikor megoldható a felhajtóerő változás érzékelése és a számítógép merevlemezén történő tárolása, melyből az úszó (hidrométer) bemerülési szintje azonnal számítható (2. ábra).



2. ábra A mérés egy lehetséges megoldása (Nemes et. al. 2002)

Ez a megoldás a módszer laboratóriumi kipróbálására, a módszer fejlesztésére kiválóan alkalmas, azonban a nagy pontosságú mérlegek borsos ára és kényessége miatt nagyszámú minta vizsgálatára alkalmatlan. Egy 10 mérőhelyes berendezés több millió forintos költséget jelentene, ami a megoldást teljesen gazdaságtalanná teszi, ezért nem is terjedt el a gyakorlatban.

Annak érdekében, hogy a kifejlesztett módszer a lehető legnagyobb mértékben kompatibilis legyen az eddigi vizsgálati eljárásokkal, az azonos fizikai elv korlátait is magával kell hordoznia, vagyis a lassú ülepedés miatt egy mérés ideje fizikai törvények által meghatározott, melyen változtatni csak a gravitációs tér vagy az ülepítő erő növelésével lehetne, amely elvileg ugyan nem kizárt (pl. centrifuga alkalmazása), de jelentős költségekkel jár.

3 Az úszó henger súlynövekedésének számítása ülepedő részecskék hatására

A részecskék ülepedési sebessége a Stokes-törvény alapján egyértelműen számítható a részecskeméretből és egyéb a rendszerre jellemző állandókból, így elég, ha rendszerünkben a sebesség-koncentráció függvényt számítjuk ki. Ennek érdekében a következő számítási lépéseket kell elvégezni.

Egy homogén részecskeméretű és ezzel adott sebességű és koncentrációjú, homogén szuszpenzió sűrűség változása az idő függvényében.

A szuszpenzió tömege a vizes oldat és a szuszpendált anyag tömegének összege:

$$m = m_w + c \cdot m_p,$$

ahol

m a szuszpenzió tömege, kg;

m_w a vizes oldat tömege, kg;

m_p a részecske tömege, kg;

c a részecske koncentrációja, kg/kg.

Adott térfogat esetén a szuszpenzió sűrűsége:

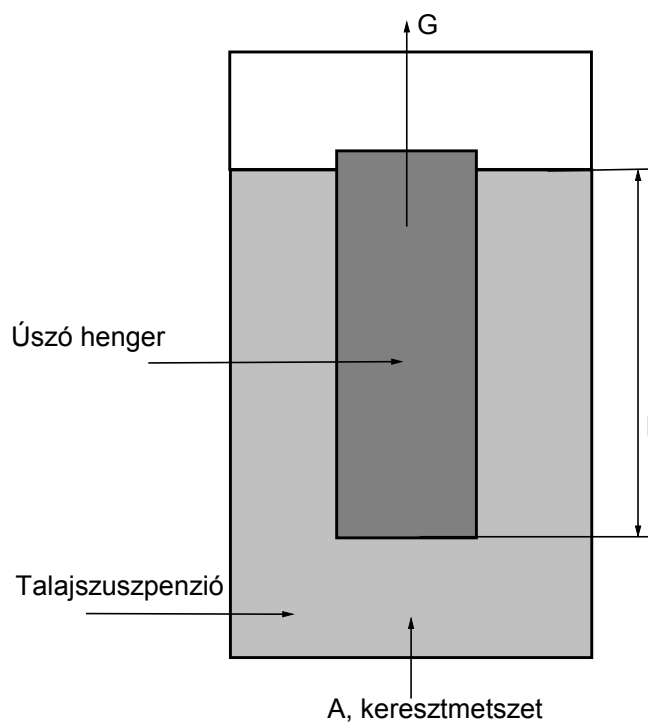
$$\rho = \rho_w + c \cdot (\rho_p - \rho_w),$$

ahol

ρ a szuszpenzió sűrűsége, kg.m⁻³;

m_w a vizes oldat sűrűsége, kg.m⁻³;

m_p a részecske sűrűsége, kg.m⁻³.



3. ábra A jelölések értelmezése

Az ülepedés egyenletes, tehát egy adott szuszpenzió oszlop átlagsűrűsége egyenletesen csökken az idő multával:

$$\rho = \frac{\rho_w + (\rho_p - \rho_w) \cdot c \cdot (l - v \cdot t)}{l},$$

ahol

l az oszlop magassága, m (3. ábra);

v az ülepedés sebessége, m.sec⁻¹;

t az eltelt idő, sec.

Ez a folyamat mindaddig tart, míg az összes részecske el nem hagyja a vizsgált mélységet, utána beáll az eredeti oldatsűrűség, amely ez után már nem változik, tehát ezen a ponton az eddig egyenletesen csökkenő függvény egy vízszintes egyenessel leírhatóvá válik. Ebből következik, hogy a fenti függvény nem használható a teljes időtartományra. A kiterjesztés érdekében módosítani kell a következő formában:

$$\rho = \frac{\rho_w + (\rho_p - \rho_w) \cdot c \cdot [\text{abs}(l - v \cdot t) + (l - v \cdot t)]}{2 \cdot l},$$

mely függvény már a teljes időtartományban helyesen írja le a folyamatot.

Mivel a célunk a heterodiszperz szuszpenziók leírásának megadása, ezért a továbbiakban ezt a függvény-alakot kell használnunk, mivel a részecskék egy része a folyamat során már kiüledett, miközben a lassabban ülepedő részecskék még sűrűség változást okozhatnak. A fent leírt képlet segítségével leírhatjuk egy, a szuszpenzióba teljesen bemerülő hengeres testre ható erőket meghatározó részfolyamatokat.

1. Ráülepedés:

A henger súlyának növekedését tulajdonképpen a fokozatosan a hengerre ülepedő részecskék súlya okozza:

$$\Delta G_i = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot A \cdot (\rho_p - \rho_w) \cdot c_i \cdot [abs(b - v_i \cdot t) + (b - v_i \cdot t)],$$

ahol

g a nehézségi gyorsulás, $9.81 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$;

b a henger feletti szuszpenzió oszlop magassága, m.

2. A henger tetején levő anyag leülepedése miatti súlynövekedés:

$$\Delta G_i = -\frac{a}{2 \cdot b} \cdot g \cdot A \cdot (\rho_p - \rho_w) \cdot c_i \cdot [abs(b - v_i \cdot t) + (b - v_i \cdot t)],$$

ahol a a henger magassága, m.

3. A henger melletti anyag ülepedése miatti súlynövekedés:

$$\Delta G_i = -\frac{a}{2 \cdot l} \cdot g \cdot A \cdot (\rho_p - \rho_w) \cdot c_i \cdot [abs(l - v_i \cdot t) + (l - v_i \cdot t)],$$

ahol l a henger aljától mérhető teljes szuszpenzió oszlop magassága, m.

Egy általános helyzetben t idő elteltével a szemcsék kiülepedése miatt az areométer felfüggesztésére ható teljes súlynövekedést az i -edik ülepedési sebességtartományhoz tartozó részecskék következtében az alábbi képlet adja meg:

$$\Delta G_i = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot A \cdot (\rho_p - \rho_w) \cdot c_i \cdot \left\{ \frac{a}{l} \cdot [abs(l - v_i \cdot t) + (l - v_i \cdot t)] + \left(1 + \frac{a}{b} \right) \cdot [abs(b - v_i \cdot t) + (b - v_i \cdot t)] \right\}$$

A teljes súlynövekedést a különböző (összes, még a szuszpenzió mért tartományában található) részecske ülepedési sebességtartományára számított súlynövekmények összege adja:

$$\Delta G = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot A \cdot (\rho_p - \rho_w) \cdot \sum_{i=0}^{v_{\max}} c_i \cdot \left\{ \frac{a}{l} \cdot [abs(l - v_i \cdot t) + (l - v_i \cdot t)] + \left(1 + \frac{a}{b}\right) [abs(b - v_i \cdot t) + (b - v_i \cdot t)] \right\}$$

A sebesség-koncentráció eloszlás görbe egy sokparaméteres függvény illesztésével előállítható (Czinkota et al.,2002).

4 Az automatikus szemcseméret-eloszlás meghatározási vizsgálat megvalósításának műszaki lehetőségei

Nagyszámú minta rutinvizsgálatára több (5-10 db) párhuzamos mérőcella alkalmazását feltételezi, melyek lehetnek azonos számítógéphez kötve. Ilyen feltételek mellett célszerű a mérőegységeket a lehető legegyszerűbb és legolcsóbb és lehetőség szerint könnyen kezelhető, (rázásra, leejtésre nem érzékeny, nem törékeny, stb.) módon összeállítani.

Olyan egyszerűen megvalósítható megoldásokat kerestünk, melyek igen kis elmozdulást és/vagy erőváltozást képesek érzékelni kellő sebességgel, a mérőrendszer nagyon kis zavarása nélkül, és a kapott jeleket digitális formában valamilyen átviteli vonalon a számítógéphez képesek továbbítani.

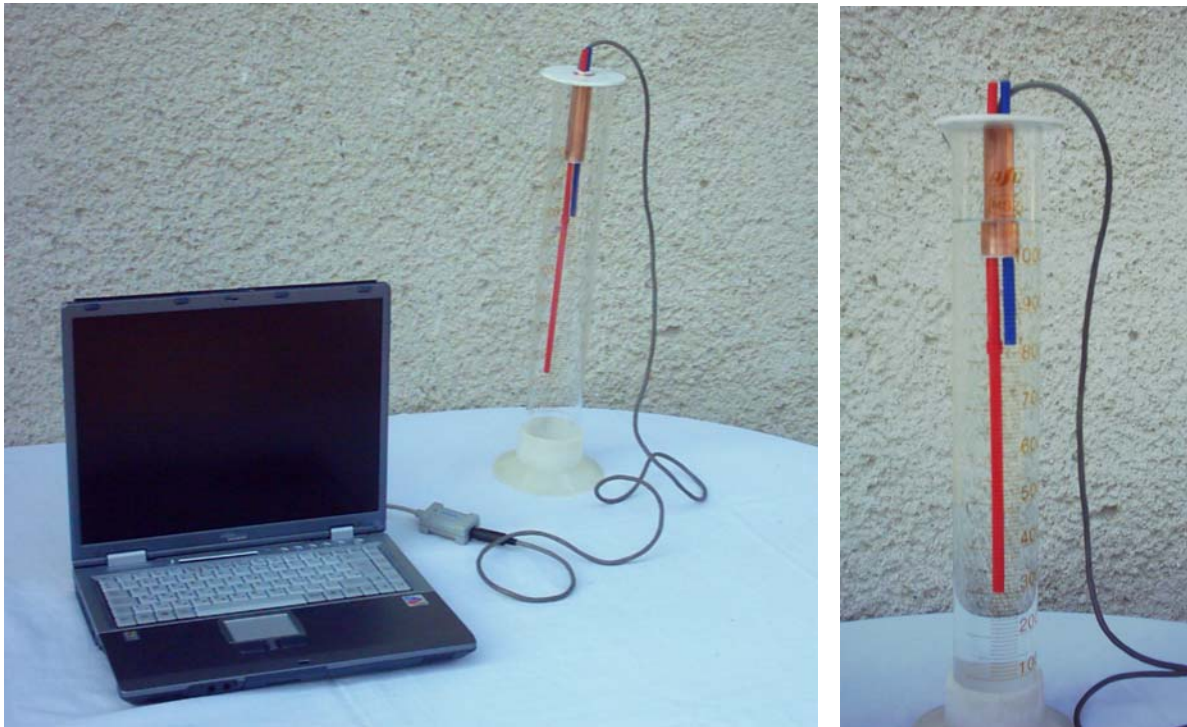
Lehetséges megoldásként a következők jönnek számításba:

- Nyúlásmérő bélyegek – megfelelő megoldás, azonban az áruk a vezérlő elektronikával együtt igen magas a megfelelő precíziós kialakításban;
- Diódasoros optikai szenzorok – közepesen magas áron képesek megvalósítani a mérést az úszó mozgásának akadályozása nélkül, azonban az óhatatlanul felfreccsenő talajszuszpenzió lehetetlenné teheti a mérést;
- Michelson interferométer – egyáltalán nem zavarja az úszó mozgását, azonban drágább a mérlegnél is és érzékeny a talajszuszpenzióval szennyezésre;
- Lineáris elmozdulás érzékelők (LVDT) – megfelelő az áruk, azonban a kereskedelemben kapható celláknak túl nagy a súrlódása, így jelentősen meghamisítják az úszó elmozdulását;
- Nyomásmérő integrált áramkörök – ideális megoldást jelentenének, mivel mozgó alkatrész nélkül tehetnék megvalósíthatóvá a mérést, azonban a kereskedelmi forgalomban kapható alkatrészek érzékenysége nem megfelelő a feladathoz;
- Induktív érzékelők – ezek elég olcsón előállíthatók, nem lineárisak, azonban kalibrálhatók;
- Kapacitív érzékelők – ezekkel a vízszintet lehet nagyon pontosan érzékelni, megfelelő konstrukció esetén alkalmas a feladatra.

Az érzékelési pontok között eltelt időnek kizárólag az érzékelés és az átviteli vonalak sebessége, illetve a merevlemez tároló kapacitása szab határt, emiatt a mintavételi gyakoriság néhány kipróbált összeállításnál akár néhány századmásodperc is lehetett.

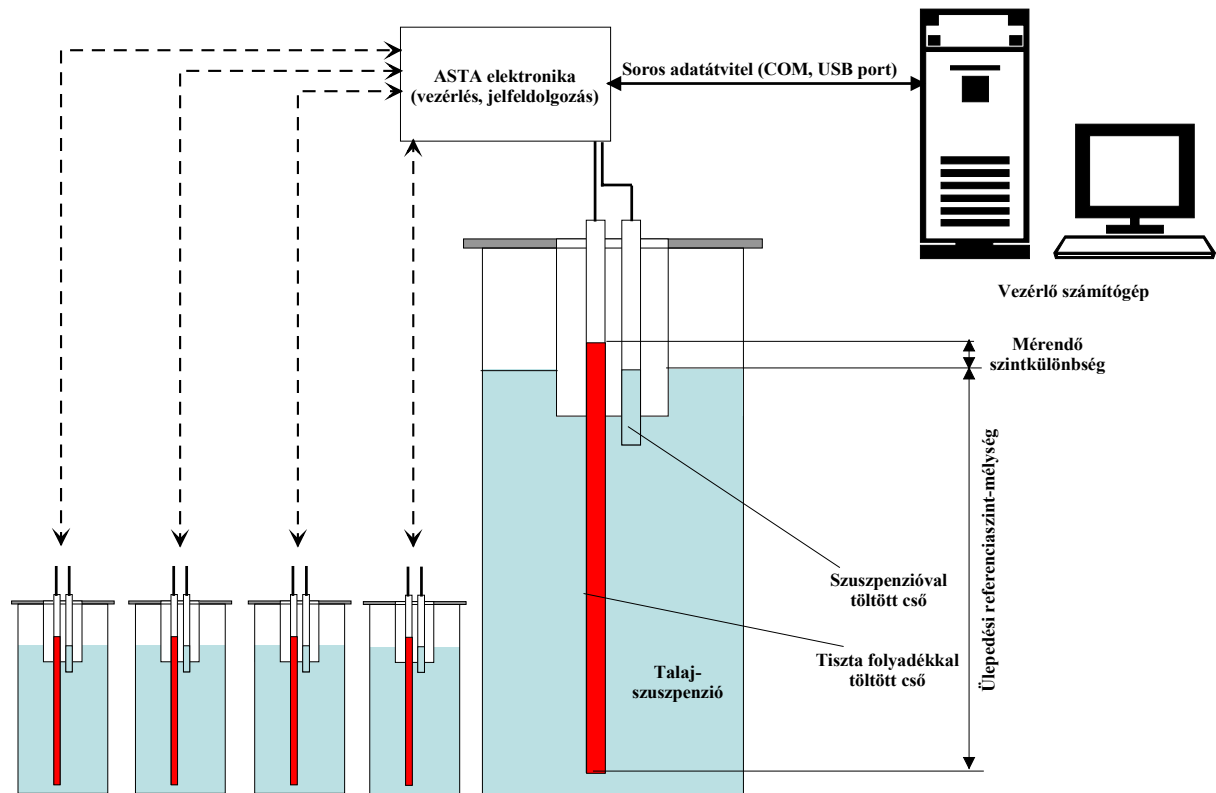
5 Az ASTA berendezés bemutatása és a mérés kiértékelése

A berendezés prototípusát a 4. ábra mutatja be.



4. ábra: Az ASTA készülék prototípusa

Az ASTA készülék a mérés során két csövön keresztül érintkezik a talajszuszpenzióval. Az egyik cső a mérendő szuszpenzió nyomását közvetíti a jeladóhoz, míg a másik csövet a talajszuszpenzió készítéséhez felhasznált tiszta oldattal vagy vízzel töltjük meg. A két csőben kialakuló folyadékszint között a tapasztalat szerint a mérés elején 3-5 mm szintkülönbség van, amely a mérés végére teljesen kiegyenlítődik. A berendezés használata során bármilyen a mérési eredményeket meg nem hamisító vegyszert (vízüveg, nátrium-karbonát oldat, lítium-karbonát oldat, nátrium-pirofoszfát, stb.) alkalmazhatunk a szemcsék diszpergálására, mert a referencia tisztaoldat és a szuszpenzió között szintkülönbségeket mérjük (5.ábra).

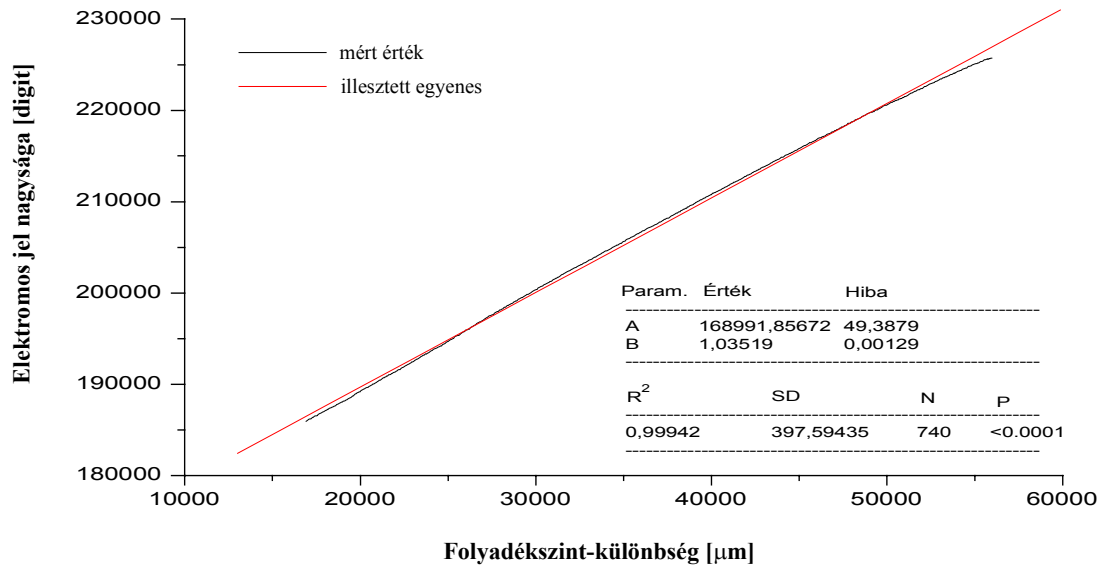


5. ábra a berendezés sematikus vázlata

A feladat ennek a maximálisan 3-5 mm szintkülönbségnek az érzékelése és mérése egy érzékeny elektronikus mérőfejjel. Az ASTA berendezés kapacitív mérőfejjel készült, mellyel elvileg 1-2 μm , gyakorlatilag 10 μm folyadékszint-különbségek érzékelhetők. Mivel mindkét cső azonos kialakítású és anyagú, ezért a szintkülönbségek tekintetében a meniszkusz problémája nem jelentkezik.

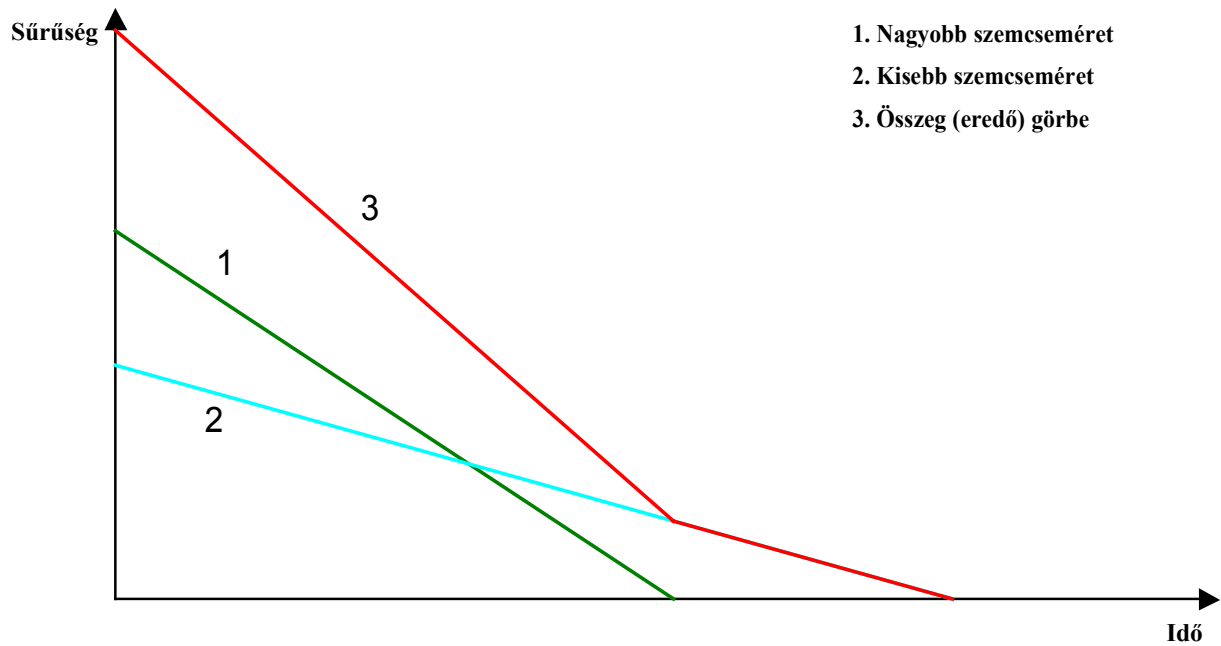
A mérőfej érzékenységét és linearitását laboratóriumban vizsgáltuk (6. ábra). A kalibrációs görbén jól látszik, hogy a mérőfej által adott elektromos jel gyakorlatilag lineárisnak tekinthető.

A mérőfejjel a folyadékszint-különbség csökkenését, azaz a sűrűség csökkenését észleljük. A sűrűségváltozásból a szemcseméret eloszlás meghatározásának megértéséhez először vizsgáljunk egy mono-, majd egy bidiszperz rendszert, mely egy nagyobb, illetve egy kisebb szemcseméretű halmaz vizes szuszpenziója.



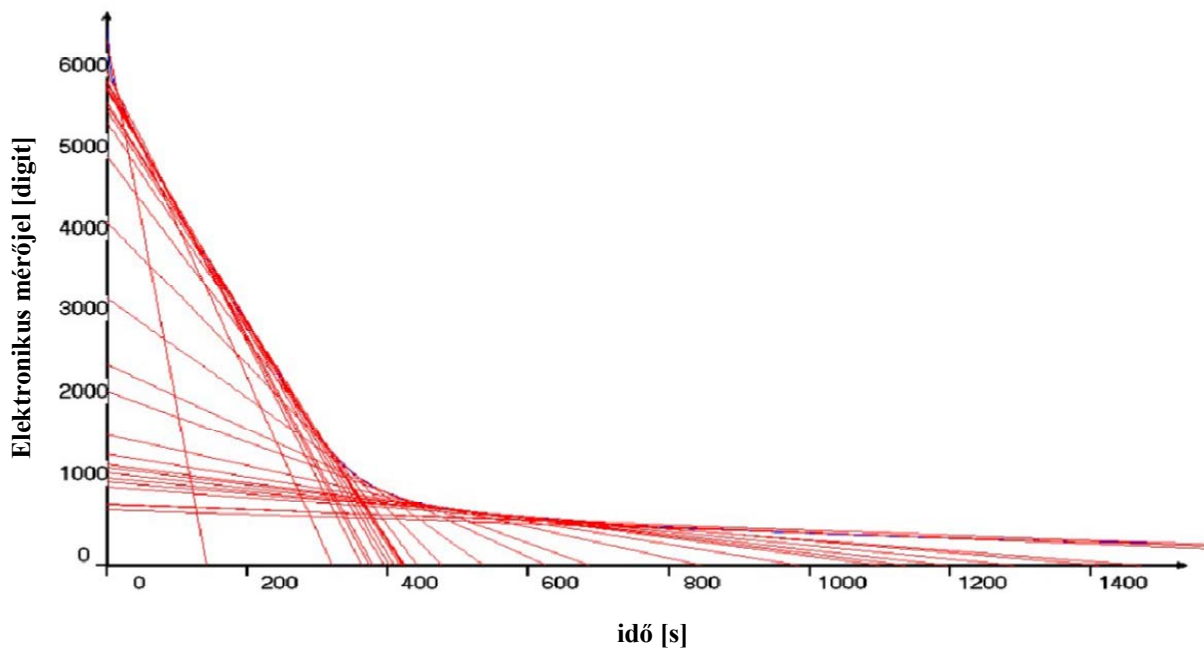
6. ábra: A mérőfej által adott jel linearitása

Amennyiben az ülepedés sebessége állandó, ami a Stokes törvényből következik, akkor monodiszperz rendszer esetén a sűrűség változása lineáris, mindaddig, amíg a legutolsó, a mérés kezdetén legmagasabb helyzetben található részecske le nem süllyed a referencia-pont alá. Ezután a sűrűség konstans, megegyezik a tiszta folyadék sűrűségével (7. ábra, 1. görbe). Amennyiben a monodiszperz rendszert a kisebb szemcsékből állítjuk elő, akkor a sűrűség-idő függvény hasonló, csak lassabban következik be a folyadék kitisztulása, illetve a konstans sűrűség kialakulása (7. ábra, 2. görbe). Bidiszperz rendszerben a két folyamat együtt zajlik le, aminek következtében a két sűrűség-idő függvény eredőjét kapjuk eredményként (7. ábra, 3. görbe). Mivel a talajszuszpenzió egy polidiszperz rendszer, a mért sűrűségcsökkenést, mint véges, de nagyszámú monodiszperz rendszer együtteseként kezelhetjük, azaz végesen sok darabszámú lineáris sűrűség-változási függvény összegeként értelmezhetjük. Az elmélet addig igaz, amíg a szemcsék egymás mozgását nem akadályozzák, azaz a szuszpenzió kellően híg, amit a szabványos mérési eljárás biztosít.



7. ábra: Mono- és bidiszperz rendszerek sűrűség-idő karakterisztikája

Mivel a teljes rendszert nagyszámú monodiszperz rendszer együtteseként kezelhetjük, ezért a mérés során kapott sűrűség-idő függvényt véges, de tetszőleges ponthoz húzott érintővel „szemcseméret”-tartományokra bonthatjuk (8. ábra).



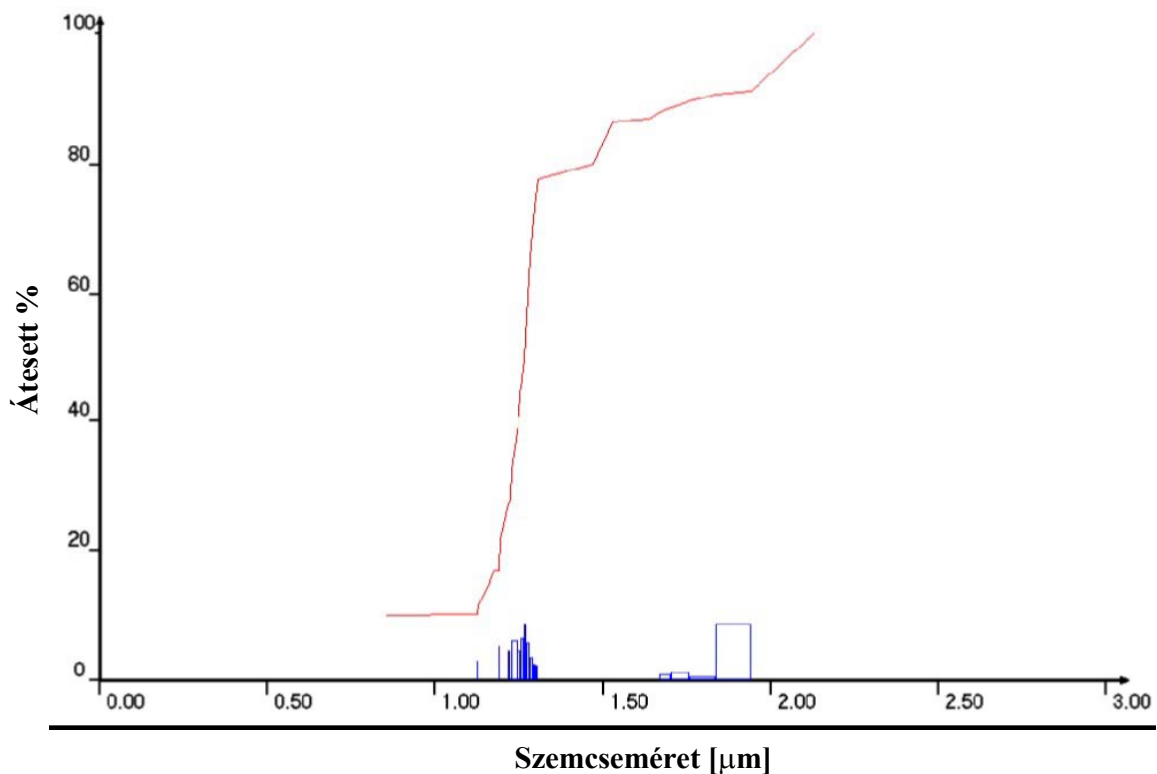
8. ábra: Mért elektronikus jel-idő függvény felbontása érintősereggel

Az érintők metszéspontja az ordinátával arányos az adott részecske mennyiségével a szuszpenzióban, míg abszcissza mentén az érintősereg töréspontjai között mért távolság adja meg az adott szemcseméret referencia pont alá süllyedéséhez szükséges maximális időt,

vagyis a süllyedési sebességet, amiből a folyadék sűrűsége és viszkozitása ismeretében a szemcse átlagos mérete visszszámítható:

$$r[\mu m] = 10^6 \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot \eta [Pa \cdot s] \cdot h [m]}{2 \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot (\rho - \rho_{viz}) \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot t [sec]}}$$

A szemcseméret tartományokhoz tartozó ordináta-metszetek alapján meghatározott anyagmennyiségeket ezek után normáljuk, így megkapjuk a hagyományos szemcseeloszlási görbét (9. ábra).



9. ábra. Egy talajpor ASTA berendezéssel meghatározott szemcseeloszlása

6 Irodalomjegyzék

- Czinkota, I., Nemes A., Czinkota Gy., Tolner L., Kovács B. and Pachepsky Ya.A.(2002) :An automated system for the quasi-continuous measurement of the particle-size distribution. ASA-CSSA-SSSA Annual Meetings, Indianapolis, IN, USA, 10-14 November, 2002.
- Filep, G. - G. Ferencz. 1999. Ajánlás a talajok szemcseméret-eloszlás alapján történő osztályozásának pontosítására. Agrokémia és Talajtan, 48. 305–320.
- Gáspár L (1957): Közúti talajmechanikai laboratóriumi és munkahelyi vizsgálatok, Közlekedési Dokumentációs Vállalat, Budapest
- Gee, G.W. - J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.
- Kézdi Á. (1964): Talajmechanikai praktikum, Tankönyvkiadó, Budapest

- Nemes A. - Czinkota I. - Czinkota Gy. - Tolner L. - Kovács B. (2002): An Automated System for the Quasy-Continous Measurement of Particle Size Distribution Proc. World Conf. on Soil Sciences, Bangkok, 2002, p150.
- Oliveira, J.C.M., C.M.P. Vaz, K. Reichardt and D. Swartzendruber. 1997. Improved soil particle-size analysis by gamma ray attenuation. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 23-26.
- Starr, G.C., P. Barak, B. Lowery and M. Avila-Segura. 2000. Soil particle concentrations and size analysis using a dielectric method. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 858-866.
- Stuyt, L.C.P.M. 1992. The water acceptance of wrapped subsurface drains. Ph.D. Thesis, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands. (LU-1468) 305p.