

## **Automatikus finomfrakció szemcseméret-eloszlás meghatározás**

Kovács Balázs<sup>1</sup> – Czinkota Imre<sup>2</sup> - Tolner László<sup>3</sup> – Czinkota György<sup>3</sup> – Szacsuri Gábor<sup>4</sup> – Czanik Péter<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GÁMA-GEO Kft, 3519 Miskolc, Bencések útja 111.

<sup>2</sup>Szent István Egyetem, Talajtani és Agrokémiai Tsz, 2100 Gödöllő, Páter K. u. 1.

<sup>3</sup>Elemez Kft. Budapest, Falk Miksa u.

<sup>4</sup>Miskolci Egyetem, Hidrogeológiai-Mérnökgeológiai Tsz., 3515 Miskolc-Egyetemváros

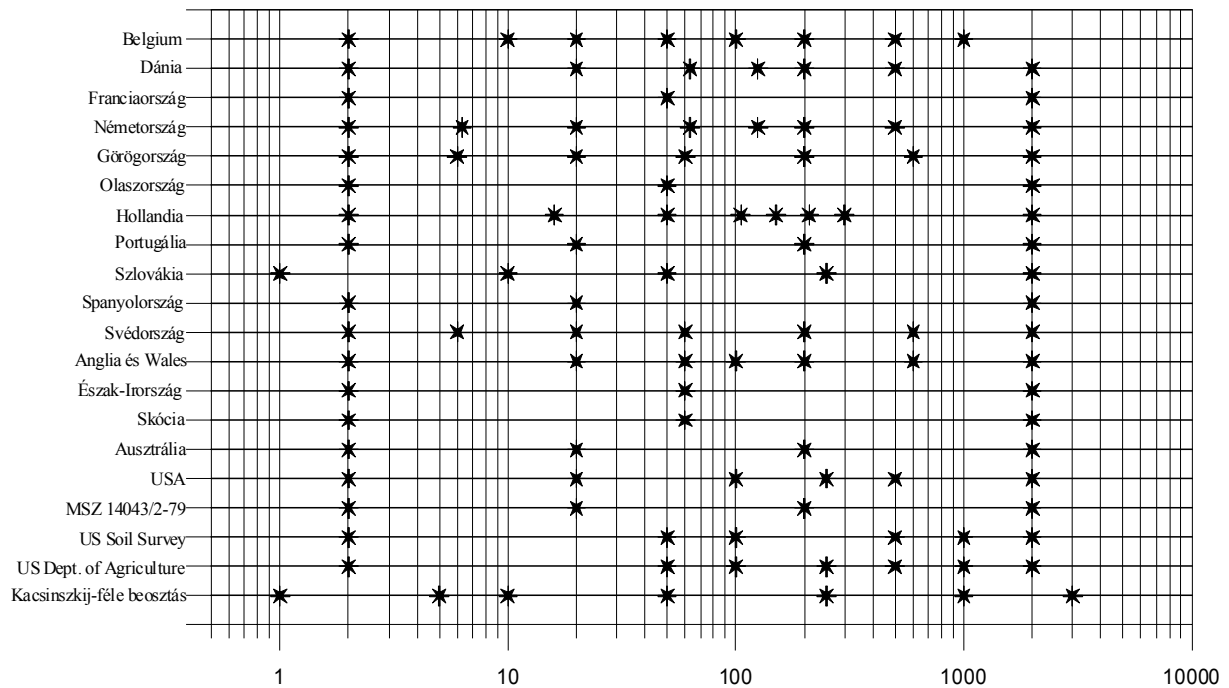
### **1. Bevezetés**

A szemcseméret eloszlás meghatározása valamennyi talajjal foglalkozó szakma egyik legalapvetőbb laboratóriumi vizsgálata. A szemcseméret eloszlás nemcsak a vizsgált képződmény nevét határozza meg, hanem ezen túlmenően a fizikai, kémiai viselkedését, jellemzőit is. A mezőgazdasági talajok esetében a fizikai, kémiai, vízgazdálkodási, végső soron a tápanyag-gazdálkodási tulajdonságokat befolyásolja az iszap és agyag méretű frakció szemcseméret eloszlása, de ugyanígy a geotechnikában is szemcseméret eloszlástól függ pl. az agyagok konzisztencia jellemzői (folyási, sodrási és zsugorodási határ), illetve az abból számított indexjellemzők (folyási, konzisztencia index) nagysága. Egyes porózus képződmények vízvezető képességét döntően befolyásolja a képződményen belül a finom frakció jelenléte vagy hiánya: ez az, amiért a teljes szemcseeloszlási görbe figyelembevételével alapvető fontosságú a szivárgási tényező részecskeméret eloszlás alapján történő számításánál (pl. Zamarin-módszer). A környezetvédelemmel kapcsolatos geotechnikai vizsgálatok során ugyancsak fontosak a finom szemcsemérettel rendelkező alkotórészek. Ezek általában nagy fajlagos felülettel, töltések szempontjából kiegyenlítetlenséggel, ezért a szorpciós folyamatok során nagy aktivitással rendelkeznek, ennek megfelelően egy képződmény szennyezőanyag megkötő képessége, vízfelvevő képessége, stb. mind részben a szemcseméret-eloszlásnak is a függvénye.

A felsoroltak miatt a talaj típusa, a földtani képződmény nevének meghatározásán túlmenően a szemcseméret eloszlás pontos ismerete a vizsgált képződmény viselkedésének, talajtani, agrokémiai, geotechnikai jellemzőinek meghatározását is elősegíti.

A jelenlegi szemcseméret eloszlás meghatározó módszerek korszerűsítése egyrészt történhet az egyes frakciók tömegarányának pontosabb meghatározásával, másrészt a görbe pontjainak sűrűbb felvételével.

Ez utóbbi, azaz a szemeloszlási görbe pontjainak sűrítése azért is igen fontos, mert a különböző szakterületek (mezőgazdaság, talajtan, hidrogeológia, geotechnika, stb.) egymástól eltérő szemcseméret-határokat (szemcseméret intervallumokat) használnak a képződmények jellemzésére, és a szabványban rögzített szemcseméret határok országonként is eltérnek egymástól (1. ábra). Amennyiben a felvett görbe pontjai kellően sűrűn követik egymást, azaz a görbe kvázi-folytonos, akkor bármely nemzeti vagy szakterületi szabvány szerint pontosan meghatározható mind a képződmény neve, mind a görbe alapján származtatható valamennyi jellemző.



1. ábra:

A világ néhány országa és szervezete által alkalmazott szemcseméret-tartományok határai

Mivel a szemcseeloszlás meghatározása egy alapvető laboratóriumi rutinvizsgálat, ezért a laboratóriumokban tömegesen végeznek ilyen vizsgálatokat, ami felveti a mérés automatizálásának szükségességét.

A geotechnikai gyakorlatban 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 munkaerő-igényes és közepes mérési pontosságú hidrometrálás (areometrálás), illetve a pipettás módszer terjedt el.

A durva frakció vizsgálata gépi szitálással felgyorsítható, bár nem automatizált. A hidrometrálás (areometrálás), illetve a pipettás módszerek alkalmazásánál - főképpen az első két órában - szinte folyamatosan észleléseket kell végezni, ennek következtében a mérés a laboránst teljesen lefoglalja. Gáspár (1957) készített egy olyan időbeosztást, mellyel 1 fő összesen műszakonként 10 db minta mérését végezheti el. Tíznél több párhuzamos kézi-mérés esetén a leolvasások időpontja éjszakára is eshet, ami további problémát jelent.

A felsoroltak alapján egy olyan szemcse-eloszlás meghatározó berendezés kifejlesztése volt a célunk, amely a korábbinál nagyobb mérési pontosságú és mérési gyakoriságú, automatikusan üzemeltethető, párhuzamosan elvileg tetszőleges számú agyag-iszap minta vizsgálatára alkalmas, egyben a méréshez kapcsolódóan a dokumentáció is azonnal elkészíthető, továbbá - a talajtanban pedotranszfer függvényeknek nevezett összefüggések segítségével - a mért szemcseeloszlási görbe alapján származtatott mennyiségeket is képes számítani.

## 2. A szemcseméret eloszlás meghatározására alkalmazott módszerek

A szemcseeloszlás meghatározására a mérés technikában már számos módszert dolgoztak ki. A talajtan területén legalapvetőbb és legszélesebb körben alkalmazott megoldásokat Gee and Bauder (1986), illetve Filep és Ferencz (1999) foglalták össze. A geotechnikai gyakorlatban alkalmazott szemcseeloszlási vizsgálatok (hagyományos és Pappfalvi-féle areométer, Köhn-pipettás vizsgálat) áttekintését a Talajmechanikai praktikum (Kézdi, 1964) és az MSZ 18288/2-84 szabvány (Atterberg-féle iszapolás, Andreasen-pipettás, szedimentációs mérleges,

a szívócsöves meghatározás) tartalmazza. (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 finom frakció szemcseméret-eloszlásának mérési módszereit két csoportra bonthatjuk: az ülepedésen alapuló módszerekre és az egyéb fizikai elven alapuló mérési módszerekre.

## 2.1. A nem ülepedéses elven történő mérési módszerek

A nem ülepedési elven működő módszerek általános hibája, hogy a mérés során kis mintamennyiséget vizsgálunk, melynek reprezentativitását nehéz biztosítani. Problémát jelent, hogy az ülepedéstől eltérő fizikai elven történő mérés miatt a gyakorlatban jobban elterjedt ülepitéses vizsgálatok eredményeivel az eredmények nem vagy csak korlátozott mértékben vethetők össze. A módszerek alkalmazásának további hátránya, hogy a drága műszerekkel csak 1-1 minta vizsgálata végezhető egyidejűleg.

### 2.1.1. Coulter-counter módszer

Coulter-counter módszerrel igen finom szemcsék mérete határozható meg. A híg talaj-szuszpenziót egy szűk, két elektródával ellátott kapillárison kell átvezetni. A kapillárison áthaladó szemcsék az elektródák által képzett elektromos teret módosítják azáltal, hogy ideiglenesen megnövelik a rendszer impedanciáját. A mérési elv szerint az impedancia-változás a szemcse térfogatával arányos, amiből az egyes szemcsék mérete számítható. Bár a mérési tartomány általában 0,5-1000 µm az egyes műszerek esetén, a talaj-szuszpenziók esetében a mérés problémás, mert a mintában lévő levő néhány nagyobb vagy anizometrikus szemcse a nehezen tisztítható mérő kapillárist eltömik, ráadásul a kapilláris eltömődése esetén a mérést újra kell kezdeni.

### 2.1.2. Lézerfény diffrakcióján alapuló mérési módszerek

A lézerfény szóródásán alapuló módszereket 0,02-5000 µm szemcseméret tartományban szokás alkalmazni. A berendezések egy vagy két, eltérő hullámhosszú lézerfényt (pl. kék és piros) bocsátanak a híg talaj-szuszpenziót tartalmazó tégelyre, majd az áteső szórt fényt egy érzékelő lencserendszerrel gyűjtik és analizálják. A szuszpenzió átjutott lézerfény energiája arányos szuszpenzióban található szemcsék mennyiségével, így igen híg szuszpenziót kell használnunk, annak érdekében, hogy értékelhető szórt fény intenzitást kapjunk. A mérést nehezíti, hogy a részecske méretében jelentkező anizotrópia befolyásolja a fény szóródását, továbbá zavaró lehet a szuszpenzió színe és a különböző ásványi anyag tartalmú részecskék eltérő fényelnyelése, törésmutatója.

## 2.2 Az ülepedés elvén alapuló módszerek

A részecskék ülepedési sebessége a Stokes-törvény alapján számítható a részecskeméretből és egyéb a rendszerre jellemző paraméterekből:

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

ahol

r - a gömb alakú szemcse sugara,

$h$  - az ülepedési út  
 $\eta$  - a folyadék dinamikai viszkozitása  
 $\rho$  - a szemcsék sűrűsége  
 $\rho_{\text{víz}}$  - a víz sűrűsége  
 $t$  - az ülepítés kezdete óta eltelt idő

A mérések során a folyadék felszínétől mért ismert mélységben mintát veszünk vagy mérést végzünk különböző időpontokban és a mért paraméter (tömeg, sűrűség) változásából számítjuk a szemcseméret eloszlását azzal a feltételezéssel, hogy a mintában az adott időpontban, az ismert mélységben csak a Stokes-törvény által meghatározott szemcseméretnél kisebb szemcsék lehetnek, mivel a nagyobbak már az adott szintnél mélyebbre süllyedtek.

### 2.2.1. A hidrometrálás (areométeres mérés)

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 talaj-szuszpenzióba, melynek bemerülése a szuszpenzió átlagos sűrűségétől függ (2. ábra).



2. ábra

#### A Pappfalvi-féle hidrométer

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

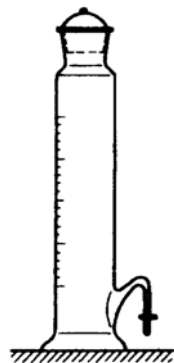
módjában tér el a két megoldás egymástól. Mivel a hidrométeres eljárás esetében nincs mintavétel, csupán az úszó (areométer) szintjét kell leolvasni, nincs elvi akadálya a tetszőleges sűrűségű mintavételnek, mely lehetővé teszi, hogy ne csak egyes előre meghatározott szemcseméret frakciók esetében szerezzünk 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/m<sup>3</sup> 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.

### 2.2.2 Atterberg-féle iszapolás

Az Atterberg-féle iszapolás során az 1-250 µm nagyságú szemcsékből álló szuszpenzió mérésére speciális Atterberg-féle iszapolóhengert használunk (3. ábra). A hengernek az alsó részén kivezetés található, melyen keresztül a hengerből a zagyot csapon keresztül adott időpillanatban le lehet engedni. A vizsgálat során a hengerben rázással homogenizált szuszpenziót készítünk. A hengert állni hagyjuk, majd egy ismert idő elteltével a zagyot két részre választjuk: az ismert időpontig kiülepedett részek a hengerben maradnak, míg a szuszpenzióban maradt szemcséket a csapon keresztül a hengerből egy gyűjtőedénybe engedjük. Ezután az iszapoló hengerben lévő maradékból újabb szuszpenziót készítünk, amivel a szétválasztási kísérletet minimálisan ötször megismételjük. A külön edényekben felfogott szuszpenziókat bepárolva megkapható az egyes szemcseméret-tartományokhoz tartozó szemcsék mennyisége.



3. ábra

Az Atterberg-féle iszapolóhenger  
(MSZ 18288/2-84)

### 2.2.3. Szedimentációs mérleg

A szedimentációs mérleg nyeles tányérja a szuszpenzióba lóg bele, melyre a szuszpenzióból szemcsék ülepednek ki. A kiülepedett szemcsék tömegét a mérés indulásától számított

különböző időpontokban mérjük, és ebből számítjuk a szemcsék tömegszázalékban kifejezett arányát. A szedimentációs mérleggel 1-125  $\mu\text{m}$  nagyságú szemcsék mérése végezhető el.

#### 2.2.4. Andreasen-pipettás mérés

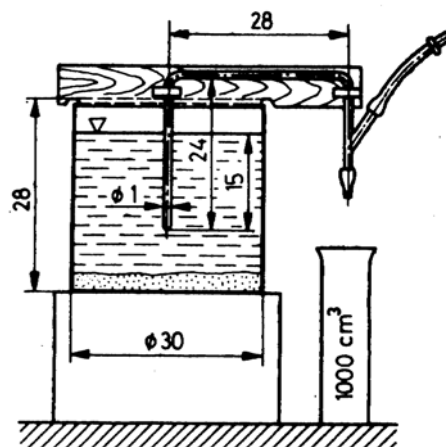
A mérés során a vizsgálni kívánt szemnagyságok Stokes törvényből meghatározott ülepedési sebességének megfelelő időpontokban az Andreasen-féle készülékben (4. ábra) lévő talajszuszpenzióból 15  $\text{cm}^3$  térfogatú mintát veszünk, és a minta bepárlásával határozzuk meg a szemcseméret tartományhoz tartozó tömegarányokat. Az Andreasen-készülék cm beosztású, 2150  $\text{cm}^3$  térfogatú ülepítőhenger, melyhez csiszolatos csatlakozással illeszkedik a háromfuratú csappal, továbbá mérőjellel ellátott, 15  $\text{cm}^3$  térfogatú pipetta, amelyből szívócső nyúlik az ülepítőhengerbe. Az ülepítőhenger beosztása segítségével a folyadékszint és a szívócsővég közötti távolság határozható meg.



4. ábra  
Az Andreasen-féle ülepítőhenger  
(MSZ 18288/2-84)

#### 2.2.5. Szívócsöves mérés

A mérés hasonlít az Andreasen pipettás méréshez, csak ebben az esetben a 20  $\mu\text{m}$ -nél kisebb méretű szemcsékből álló szuszpenzióból, a hőmérséklettől függő ülepedési sebességnek megfelelő időpontban szívócsöves berendezéssel (5. ábra) mintát veszünk és közelítő tömegarányukat bepárlás útján meghatározzuk.



5. ábra

## A szívócsöves berendezés (MSZ 18288/2-84)

### 2.2.6. Ellenáramoltatásos módszer

A módszerrel magas porfrakció-tartalmú talajok vizsgálhatók. Ebben a rendszerben az ülepedés az ülepedési sebességgel ellentétes irányba áramló vízben folyik. A folyadék áramlási sebességének változtatásával történik meg az egyes szemcsefrakciók szétválasztása (Kopczyk-módszer). (Stefanovits, 1992)

### 2.3. A mérési megoldások értékelése a kidolgozandó új eljárás szempontjából

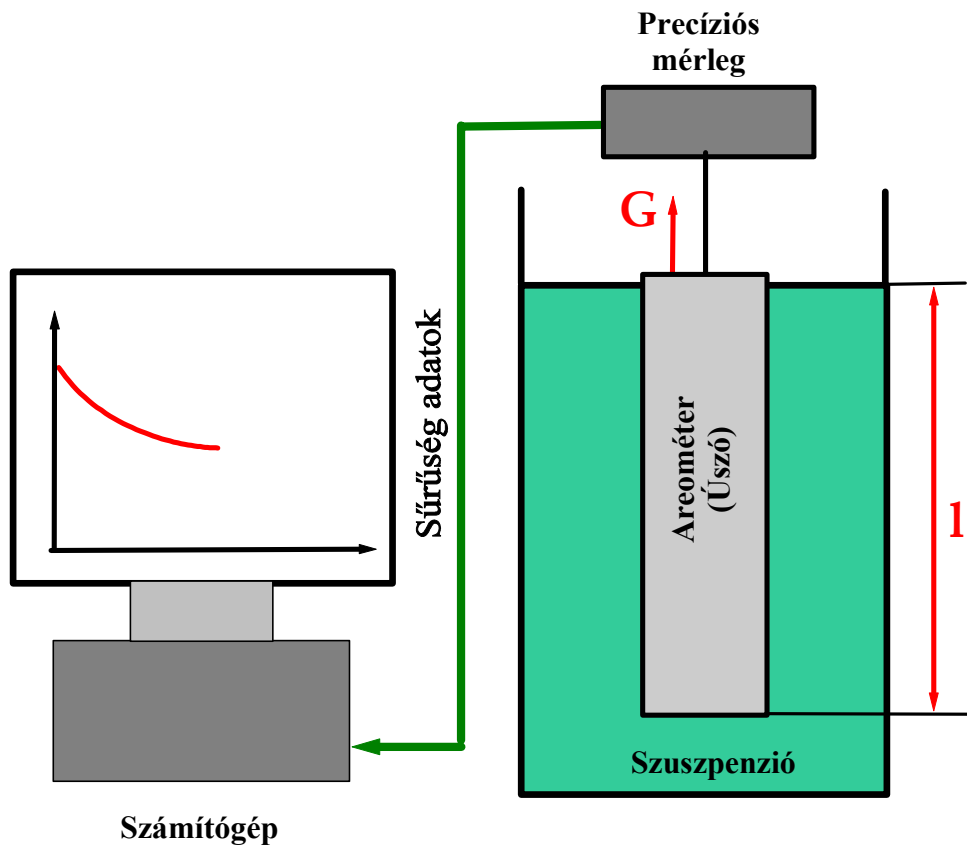
Mivel a gyakorlatban a finom szemcsefrakció szemcseméret-eloszlásának szabványos mérése mind a talajtanban, mind a geotechnikában a korábbiakban ülepedéssel elven alapult, ezért a komparatív, új megoldásnak is ülepedéssel vizsgálatnak kell lennie. A szabványos mérésektől eltérő elven működő berendezéseket a sejtbiológiában, az orvostudományban régóta alkalmazzák, ahol kicsi és jól meghatározható mérettartományba esnek a mérendő részecskék. A talajtanban és geotechnikában a szemcsék mérete és alakja tág határok között változik, ezért a fejlesztés kizárólag ülepedéssel elven működő berendezésekre koncentrált.

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 ülepedítő erő növelésével lehetne, amely elvileg ugyan nem kizárt (pl. centrifuga alkalmazása), de jelentős költségekkel jár.

A mérési megoldások közül kizártuk a minta szuszpenzióból történő kivételével járó módszereket (Andreasen-pipetta, szívócsöves berendezés), mert ezeknél a nagyobb pontosságú szemcseméret-eloszlási görbe felvétel sűrű mintavétellel járna, ami a szuszpenzió térfogatának csökkenéséből eredő hibákat jelentősen megnövelné. Ezen túlmenően a sok minta utófeldolgozása (bepárlás, bemérés) is munka- és költségigényes lenne.

Az Atterberg-féle iszapolás a sok mechanikai munkafázis (leeresztés, újrafeltöltés, homogenizálás sorozatai) és az utófeldolgozás miatt nem alkalmas az automatikus mérésre.

Az areométer szintjének érzékelése, illetve a szedimentációs mérleges mérés a technika jelenlegi szintjén, könnyen automatizálható. Megfelelő érzékenységű, számítógéppel összekötött digitális mérleggel bármikor megoldható a felhajtóerő, illetve a kiülepedett szemcsék tömegváltozásának érzékelése és a számítógép merevlemezén történő tárolása, melyből a szemcseméret eloszlás közvetve kiszámítható (6. ábra).



6. ábra:  
A számítógéppel vezérelt szemcseméret-eloszlás 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.

A módszer a gyakorlatban több problémával járt, mivel a korábban kifejlesztett mérleges készüléknél alkalmazott laboratóriumi mérlegek soros kimenetét nem nagysűrűségű adatátvitelre fejlesztették ki, ezért a mérési gyakoriság növelésével a hibás kommunikáció okozta adatvesztés a megoldás végső alkalmazásának akadályává vált (7. ábra).

Összefoglalva megállapítható, hogy a leginkább megfelelő megoldás a hidrometrálás vagy a szedimentációs mérleges mérés, azonban a mérőeszköz ilyen kialakítása egyrészt a labormérlegek adatátviteli korlátai, másrészt a magas ár miatt nem látszott kivitelezhetőnek.



7. ábra: Mérleges kialakítású szemcseeloszlás-mérő műszer

### 3. A hidrosztatikus elven működő ASTA berendezés

A használatos mérési rendszerek elemzése vezetett a számítógép vezérelt ASTA berendezés kifejlesztéséhez, mely jelenleg a prototípus fázisban van és mellyel a korábbi mérések további a gyakorlatban jelentős hátrányai (pl. az üvegeszközök, pl. Pappfalvi-féle areométer törékenysége) is kiküszöbölhetők.

#### 3.1. Az alkalmazott mérési rendszer

Az ASTA készülék (8. ábra) a mérés során két csövön keresztül érintkezik a talajszuszpenzióval. Az egyik cső a mérendő szuszpenzió aktuális felszínének szintjét közvetíti a jeladóhoz, míg a másik a mérendő szuszpenzió és a tiszta oldat sűrűségének különbségétől függő szintet mér. Ezt úgy érjük el, hogy a másik csövet a talajszuszpenzió készítéséhez felhasznált tiszta oldattal, vagy vízzel töltjük meg. A két csőben található folyadékoszlop egymással egyensúlyban van, és feltételezve, hogy a zagy sűrűsége kezdetben  $1025 \text{ kg/m}^3$  és a mérőcső 35 cm mélyen nyúlik bele a talajszuszpenzióba, akkor a folyadékszint-különbség a két cső között:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = h_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} - h_1 = h_1 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) = 0,35 \cdot \frac{1025}{1000} - 0,35 = 0,00875$$

ahol

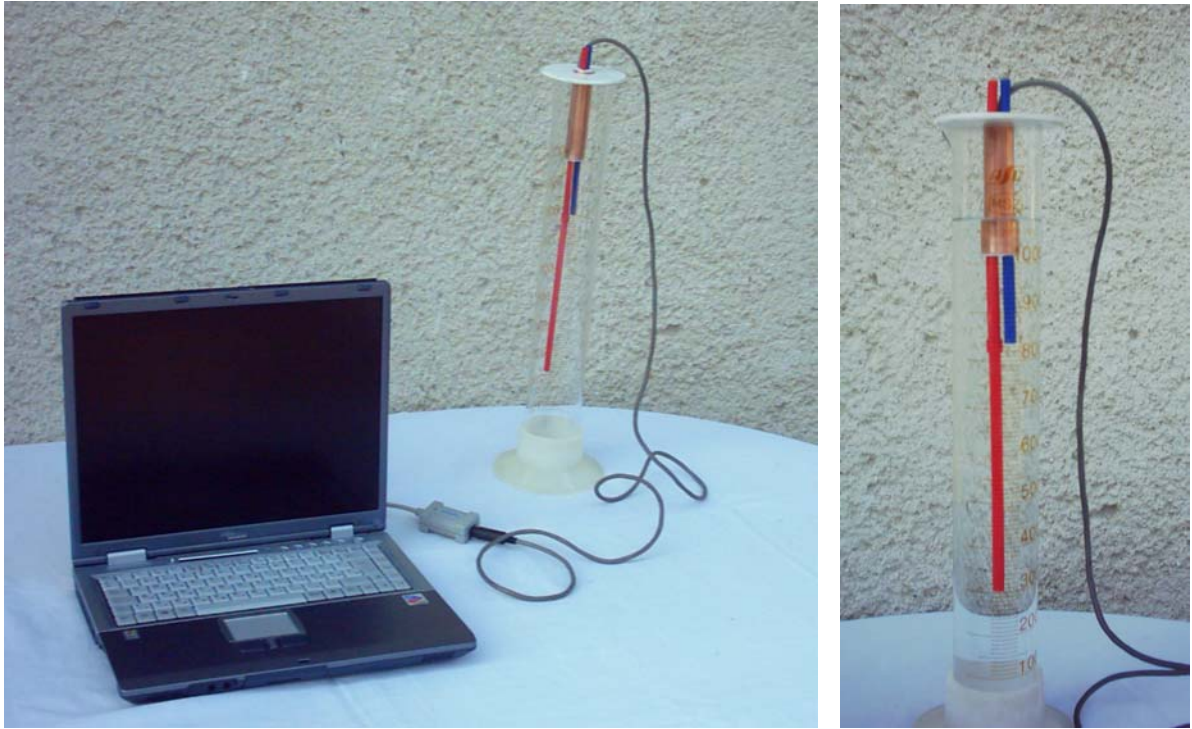
$h_1$  a folyadékoszlop magassága a szuszpenzióban [m]

$h_2$  a tiszta folyadékoszlop magassága [m]

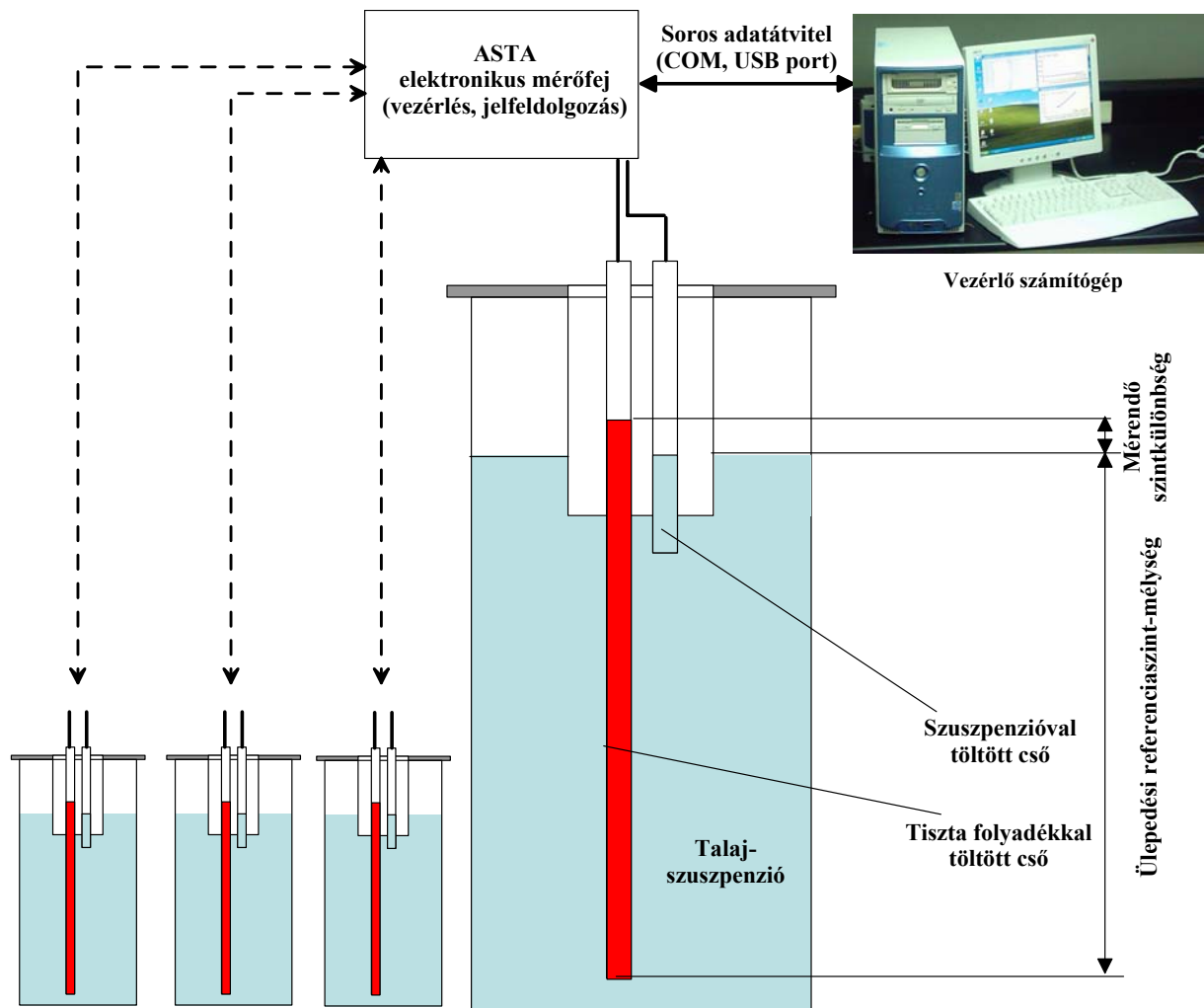
$\rho_1$  a szuszpenzió kezdeti sűrűsége [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$\rho_2$  a tiszta folyadék sűrűsége [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

A két csőben kialakuló folyadékszint között a tapasztalat szerint a mérés elején minimálisan 3-5 mm szintkülönbség van, mely a szuszpenzió sűrűségének és a mérőcső hosszának növelésével akár 1 cm-t elérheti. Ez a folyadékszint-különbség 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 diszpergáló oldat és a szuszpenzió között szintkülönbségeket mérjük (9.ábra).



8. ábra: Az ASTA készülék prototípusa



9. ábra

A berendezés sematikus vázlata

A feladat ennek az általában 3-8 mm-től teljes kiegyenlítődésig csökkenő szintkülönbségnek az érzékelése és mérése egy érzékeny elektronikus mérőfejjel.

A mérőfej tekintetében olyan egyszerűen megvalósítható megoldásokat kerestünk, melyek igen kis folyadékszint-változást, elmozdulást, esetleg erőváltozást képesek érzékelni kellő sebességgel, az ülepedő rendszer minimális megzavarásával, és melyek a kapott jeleket digitális formában valamilyen átviteli vonalon a számítógéphez képesek továbbítani.

A következő lehetséges megoldásokat vizsgáltuk meg:

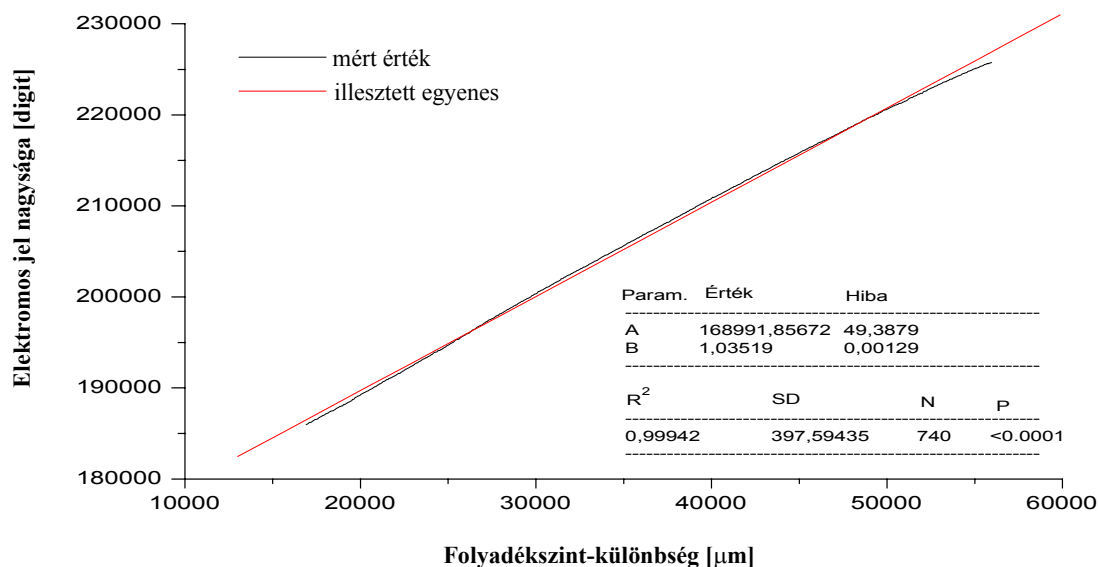
- **Nyúlásmérő bélyegek** – megfelelő megoldás, de a megfelelően precíziós kialakítású bélyegek ára a vezérlő elektronikával együtt igen magas;
- **Diódasoros optikai szenzorok** – közepesen magas áron képesek megvalósítani a mérést, azonban az óhatatlanul felfreccsenő talajszuszpenzió lehetetlenné teheti a mérést;
- **Michelson-interferométer** – megfelelő megoldás kialakítható, de drágább a laboratóriumi mérlegnél, és érzékeny a talajszuszpenzióval szennyezésre;
- **Lineáris elmozdulás érzékelők (LVDT)** – megfelelő az árak, azonban a kereskedelemben kapható celláknak túl nagy a sűrűsége, így jelentősen meghamisítják a folyadékoszlop változásból eredő elmozdulást;

- **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** – előnye az olcsón előállíthatóság, de a mért jel a folyadékszint-változással nem lineáris. Az induktív érzékelőket kalibrálni lehet, de valamennyi mérőcella más nagyságú jelet ad, ami a kedvezőtlen;
- **Kapacitív érzékelők** – ezekkel a folyadékszinteket nagyon pontosan lehet érzékelni, ezért megfelelő konstrukció esetén ezek a legalkalmasabbak a feladatra.

Az ASTA berendezés kapacitív érzékelőt alkalmaz, mellyel elvileg 1-2  $\mu\text{m}$ , a mérési zajok miatt gyakorlatilag 5-10  $\mu\text{m}$  folyadékszint-különbségek érzékelhetők. Mivel mindkét cső azonos kialakítású és anyagú, ezért a szintkülönbségek tekintetében a meniszkusz problémája nem jelentkezik.

A mérési gyakoriságnak 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.

A mérőfej érzékenységét és linearitását laboratóriumban vizsgáltuk (10. ábra). A kalibrációs görbén jól látszik, hogy a mérőfej által adott elektromos jel gyakorlatilag lineárisnak tekinthető és a mérőfej névleges érzékenysége  $\approx 1 \mu\text{m}/\text{digit}$ .



10. ábra: A mérőfej által adott jel linearitása

### 3.2. A számítás-menete, az érintősereges számítási módszer

A mérőfejjel a két cső közötti folyadékszint-különbség csökkenését, azaz a sűrűség csökkenését észleljük. A sűrűség csökkenést az adott időpillanatban már kiüledett, azaz a mérőcső szintje alá süllyedt részecskék vizsgált térfogatból való eltávozása okozza.

Monodiszperz rendszer esetén (azaz ha egyfajta méretű részecske van a rendszerben) a sűrűség változása lineáris, mindaddig, amíg a legutolsó, a mérés kezdetén legmagasabb helyzetben található részecske le nem süllyed a referencia-pont, azaz a mérőcső végpontja alá,

mivel az ülepedési sebesség állandó (Stokes-törvény alapján). Ezután a sűrűség állandóvá válik, mert valamennyi szemcse „kiülepedett”, ezért a sűrűség megegyezik a tiszta folyadék sűrűségével (11. ábra, 1. görbe).

Amennyiben a monodiszperz rendszer a korábinál kisebb méretű szemcsékből áll, akkor a sűrűség-idő függvény hasonló, csak lassabban következik be a folyadék kitisztulása kisebb az ülepedési sebesség), illetve később áll be az állandó, a tiszta folyadéknak megfelelő sűrűség (11. ábra, 2. görbe).

A sűrűség időbeli változását egy adott részecskeméret (ezzel adott ülepedési sebességű) homogén szuszpenzió esetén a következő módon számíthatjuk ki.

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

- $\rho$  a szuszpenzió sűrűsége,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- $\rho_w$  a vizes oldat sűrűsége,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- $\rho_p$  a részecske sűrűsége,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

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

- $l$  a referenciapont mélysége, m ;
- $v$  az ülepedés sebessége,  $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ ;
- $t$  az eltelt idő, sec.

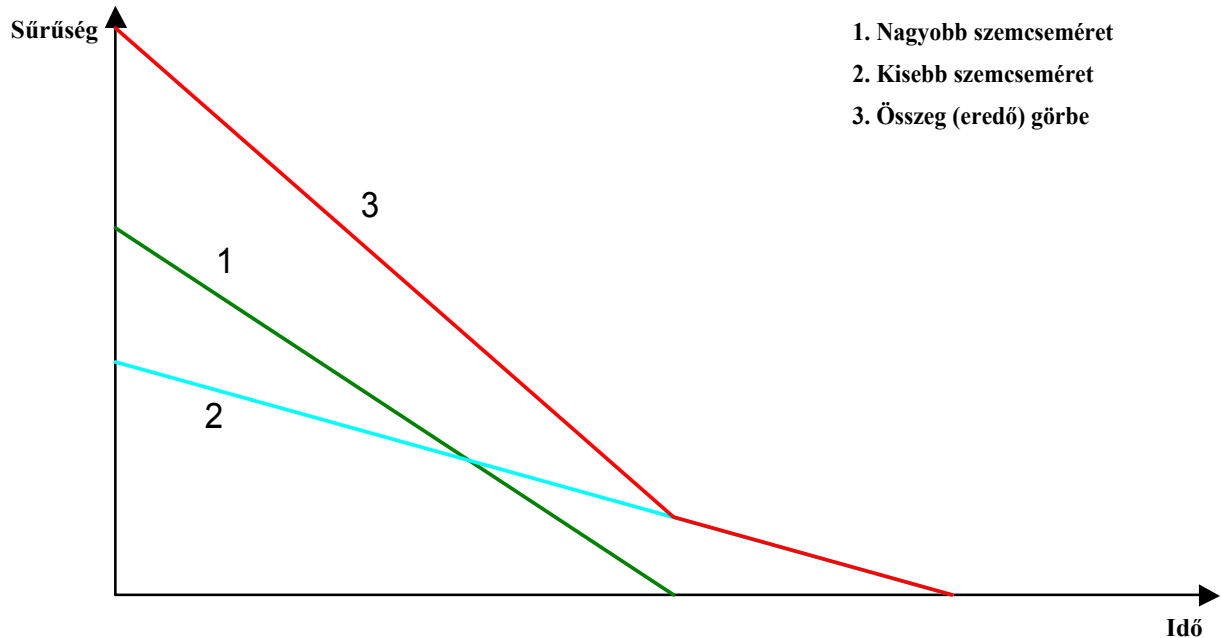
Ez a folyamat mindaddig tart, míg az összes részecske el nem hagyja a vizsgált mélységet ( $t=l/v$ ), utána beáll az eredeti oldatsűrűség, amely ez után már nem változik, tehát ezen a ponton az eddig egyenletesen csökkenő függvény egy vízszintes egyenessel leírhatóvá válik. Ebből következik, hogy a fenti függvény nem használható a teljes időtartományra, csak addig az időpontig, amíg a sűrűség változik, azaz amíg van részecske a referenciapont felett.

Ahhoz, hogy a  $t=l/v$  időpont után is a folyamatra igaz legyen a függvény azt 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 (Nemes, et. al. 2002).

Bidiszperz rendszerben, mely egy nagyobb, illetve egy kisebb szemcseméretű halmaz vizes szuszpenziója, a két folyamat együtt zajlik le, aminek következtében a két sűrűség-idő függvény eredőjét kapjuk eredményként (11. ábra, 3. görbe).



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

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. Ez az elmélet mindaddig igaz, amíg a szemcsék egymás mozgását nem akadályozzák, azaz a szuszpenzió kellően híg, amit a szabványos mérési eljárás biztosít.

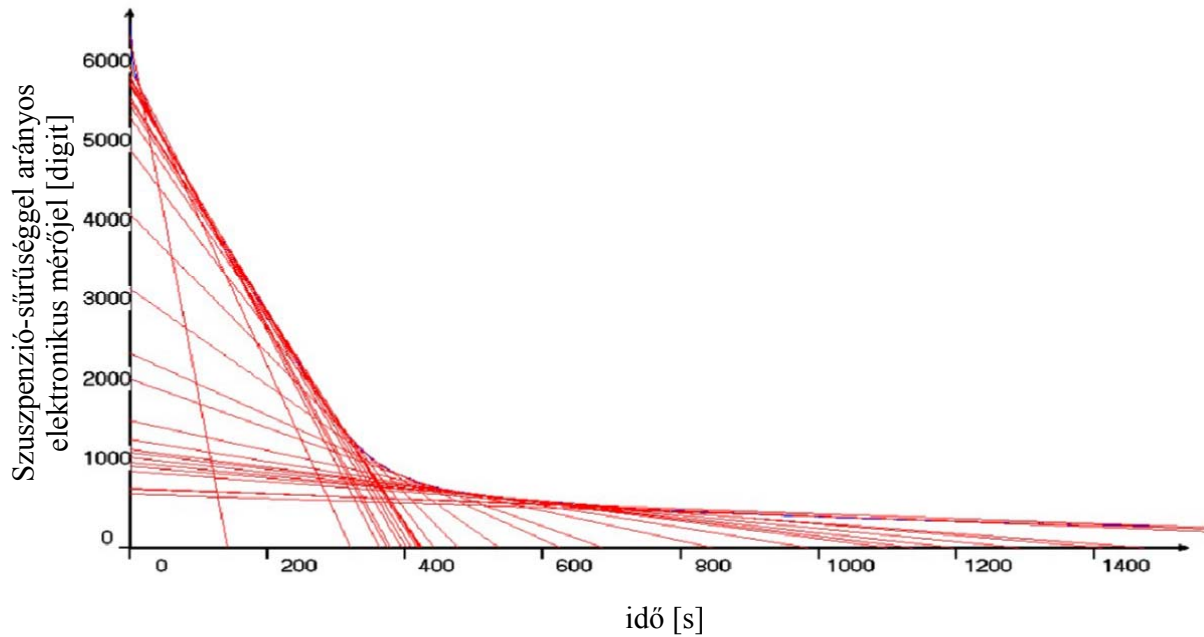
Ekkor

$$\rho = \frac{\rho_w + (\rho_p - \rho_w) \cdot \sum_{i=1}^n c_i \cdot [abs(l - v_i \cdot t) + (l - v_i \cdot t)]}{2 \cdot l}$$

ahol

n a különböző méretű részecskék száma, melyek méretüknek megfelelő  $v_i$  sebességgel süllyednek.

Mivel a teljes rendszert nagyszámú monodiszperz rendszer együtteseként kezelhetjük, ezért a mérés során kapott sűrűség-idő függvényt véges, de tetszőleges ponthoz húzott érintővel fiktív „szemcseméret”-tartományokra bonthatjuk (12. ábra).

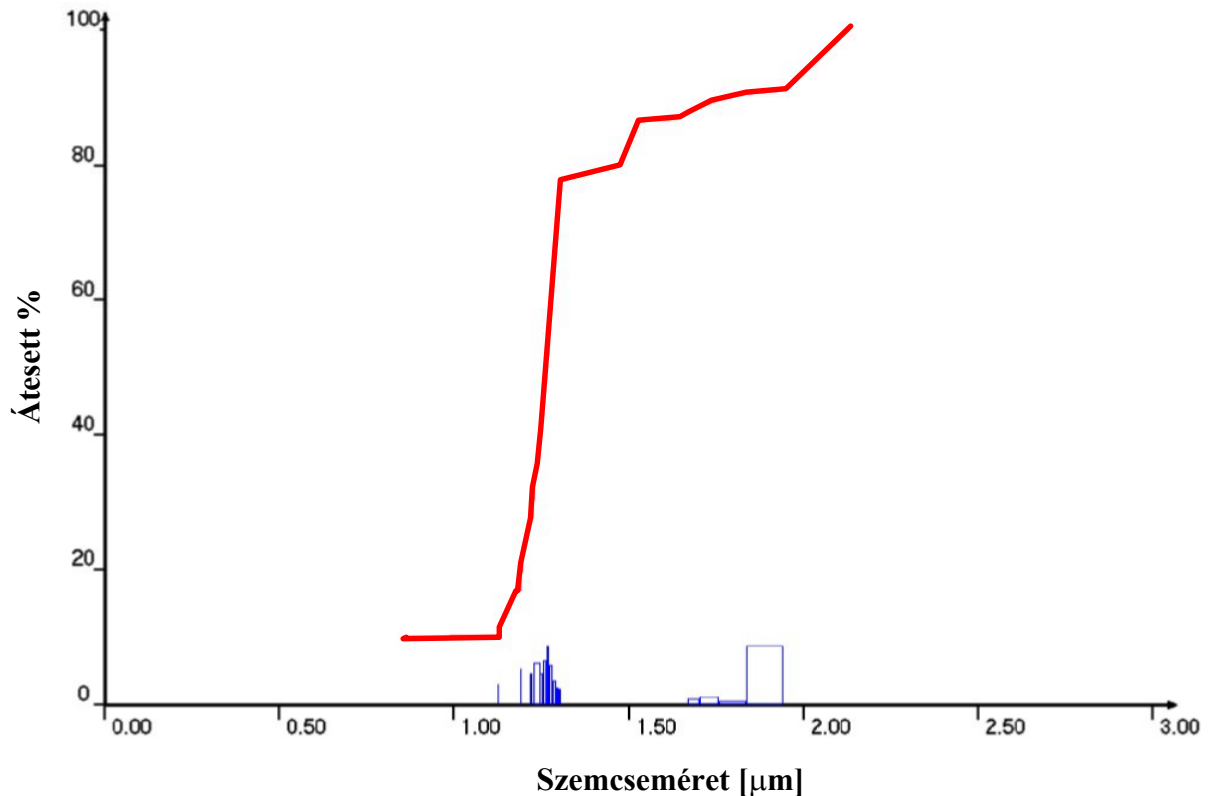


12. ábra

Mért elektronikus jel-idő függvény (azaz sűrűség-idő függvény) felbontása érintősereggel

A 11. ábrán is látható módon az érintők metszéspontja az ordinátával arányos az adott részecske mennyiségével a szuszpenzióban, míg abszcissza mentén az érintősereg (12. ábra) 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 a Stokes-törvény segítségével visszaszámítható.

A szemcseméret tartományokhoz tartozó ordináta-metszetek alapján meghatározott anyagmennyiségeket ezek után normáljuk, így megkapjuk a hagyományos szemcseeloszlási görbét (13. ábra). A levezetés és a számítás rámutat arra a tényre, hogy a sűrűség-idő függvény ismerete elégséges a szemcseméret eloszlás függvény meghatározásához, függetlenül a bemért anyag mennyiségétől. A sűrűség-idő függvény deriváltjának változása egyértelműen meghatározza a szuszpenzióban lévő szemcsék méretét és tömegarányát, de azok abszolút nagyságát nem.



13. ábra. Egy talaj ASTA berendezéssel meghatározott szemcseeloszlása

## Összefoglalás

A finom talajfrakció szemcseméret-eloszlásának ismert meghatározási módjai (hidrométeres eljárás, pipettás mérési módszerek) munkaigényesek, továbbá a szemcseméret-eloszlási görbe kevés pontjának meghatározását teszik lehetővé, ezért szükségesnek tartottuk egy automatikus, kvázi-folytonos szemcseeloszlási görbe felvételére alkalmas berendezés kidolgozását.

Az ASTA névre keresztelt mérőeszköz képes az iszapolási vizsgálat során a szuszpenzió-sűrűség kvázifolytonos észlelésére. A kidolgozott érintősereges számítási módszerrel a szuszpenzió-sűrűség időbeli változása és annak változási sebessége alapján meghatározhatók ismert méretű szemcsék százalékos arányai és ennek segítségével megrajzolható a szemcseméret eloszlási görbe.

Mivel egy számítógép elvileg tetszőleges számú ASTA cellát vezérelhet, ezért lehetőség van nagyszámú párhuzamos mérés elvégzésére.

A berendezés teszt-példányai elkészültek, melyekkel a közeli hónapokban független külföldi laboratóriumokban és egyetemeken végeznek méréseket.

A fejlesztést az Országos Tudományos Kutatási Alap T 32506 és T 037667 témaszámokon folyó kutatásai támogatják.

## **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, in: Kézdi Á. (1964): Talajmechanikai praktikum, Tankönyvkiadó, 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
- MSZ 14043/3-79: Talajmechanikai vizsgálatok: Szemeloszlás meghatározása
- MSZ 18288/2-84: Építési kőanyagok szemszerkezeti és szennyeződési vizsgálata: Szemmegoszlás vizsgálata ülepítéssel.
- 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.
- Stefanovits P (1992): Talajtan, Mezőgazda Kiadó
- Stefanovits P – Filep Gy – Füleky Gy (1999): Talajtan, Mezőgazda Kiadó
- Szacsuri G. – Czinkota Gy. – Czanik P.(2004): A new automated method for the quasi-continuous determination of the particle-size distribution, MicroCAD'2004 konferencia előadásai, Miskolc, 2004 (közlésre elfogadva, nyomtatás alatt)