

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, sodrásai 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 figyelembevétele 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.

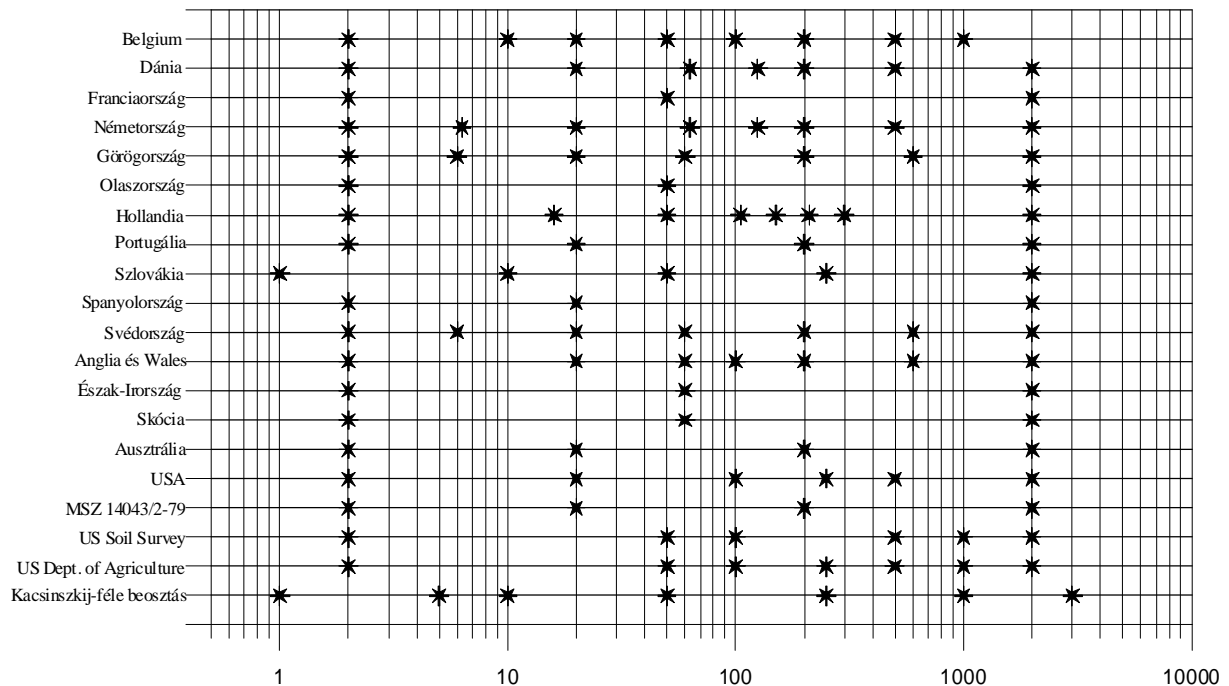
A felsoroltak miatt a talaj típusa, a földtani képződmény nevének meghatározásán túlmenően a szemcseméret eloszlás pontos ismerete a vizsgált képződmény viselkedésének, talajtani, agrokémiai, geotechnikai jellemzőinek meghatározását is elősegíti.

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 országoként 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.

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 világ néhány országa és szervezete által alkalmazott szemcseméret-tartományok határai

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. Tíznel 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.

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.

▪ 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 ülepedéses 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.

▪ 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.

▪ 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 anizotropia befolyásolja a fény szóródását, továbbá zavaró lehet a szuszpenzió színe és a különböző ásványi anyag tartalmú részecskék eltérő fényelnyelése, törésmutatója.

Az ülepedés elvén alapuló módszerek

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

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

ahol

r - a gömb alakú szemcse sugara,

h - az ülepedési út

η - a folyadék dinamikai viszkozitása

ρ - a szemcsék sűrűsége

ρ_{víz} - a víz sűrűsége

t - az ülepedés 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.

▪ 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).

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 akadály 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.

▪ 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. (MSZ 18288/2-84)

▪ 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 µm nagyságú szemcsék mérése végezhető el.

▪ 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 cm³ térfogatú mintát veszünk, és a minta bepárlásával határozzuk meg a szemcseméret tartományhoz tartozó tömegarányokat. Az Andreasen-készülék cm beosztású, 2150 cm³ térfogatú ülepítőhenger, melyhez csiszolatos csatlakozással illeszkedik a háromfuratú csappal, továbbá mérőjellel ellátott, 15 cm³ térfogatú pipetta, amelyből szívócső nyúlik az ülepítőhengerbe. Az ülepítőhenger beosztása segítségével a folyadékszint és a szívócsővég közötti távolság határozható meg. (MSZ 18288/2-84)

▪ Szívócsöves mérés

A mérés hasonlít az Andreasen pipettás méréshez, csak ebben az esetben a 20 µm-nél kisebb méretű szemcsékből álló szuszpenzióból, a hőmérséklettől függő ülepedési sebességnek megfelelő időpontban szívócsöves berendezéssel mintát veszünk és közelítő tömegarányukat bepárlás útján meghatározzuk (MSZ 18288/2-84)

▪ 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 (Kopecký-módszer). (Stefanovits, 1992)

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 ülepedéses elven alapult, ezért a komparatív, új megoldásnak is ülepítéses 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 ülepítéses 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 ülepítő 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 érzékenységgű, számítógéppel összekötött digitális mérleggel bármikor megoldható a felhajtóerő, illetve a kiüledett szemcsék tömegváltozásának érzékelése és a számítógép merevlemezén történő tárolása, melyből a szemcseméret eloszlás közvetve kiszámítható.

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 nagyszűrűségű adatátvitelre fejlesztették ki, ezért a mérési gyakoriság növelésével a hibás kommunikáció okozta adatvesztés a megoldás végső alkalmazásának akadályává vált (2. 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.



2. ábra: Mérleges kialakítású szemcseeloszlás-mérő műszer

▪ Talajszuszpenzió sűrűség változásának mérésére

A mérleges megoldás hátrányainak kiküszöbölésére a talajszuszpenzió sűrűség változásának mérésére szolgáló készülék kifejlesztését tűztük ki célul, amely képes a sűrűség-változással arányos elektromos jellemző mérésére, és a mért adatok tárolására és digitális jelek formájában történő továbbítására további feldolgozás céljából.

Jellemzők:

- működési elv
- mechanikai felépítés
- elektromos felépítés
- kommunikáció
- energiaellátás
- mérési tartomány
- működési tartomány
- kezelés
- tárolás

A fejlesztés során, mint mérendő elektromos jellemző mennyiség többféle lehetőség felmerült melyek tulajdonságai az alábbi táblázatban foglalhatók össze.

Elektromos jel	Mérhetőség	Mech konstrukció	Pontosság	Zavarvédetség
kapacitás	könnyű	egyszerű	jó	jó
induktivitás	könnyű	bonyolultabb	kiváló	jó
fény	könnyű	bonyolult	jó	kiváló
ultrahang	nehezebb	bonyolult	közepes	jó

A fenti szempontok figyelembevételével a jelen megvalósítás kapacitás-mérésen alapul.

A kapacitásváltozás egyszerűen konvertálható frekvenciaváltozássá, mely azonnal feldolgozható és digitális adattá alakítható.

▪ A szintkülönbségen elven működő 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.

▪ 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 méri. 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 kg/m^3 és a mérőcső 35 cm mélyen nyúlik bele a talajszuszpenzióba, akkor a folyadékszint-különbség a két cső között:

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

ahol

h_1 a folyadékoszlop magassága a szuszpenzióban [m]

h_2 a tiszta folyadékoszlop magassága [m]

ρ_1 a szuszpenzió kezdeti sűrűsége [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

ρ_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).

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.

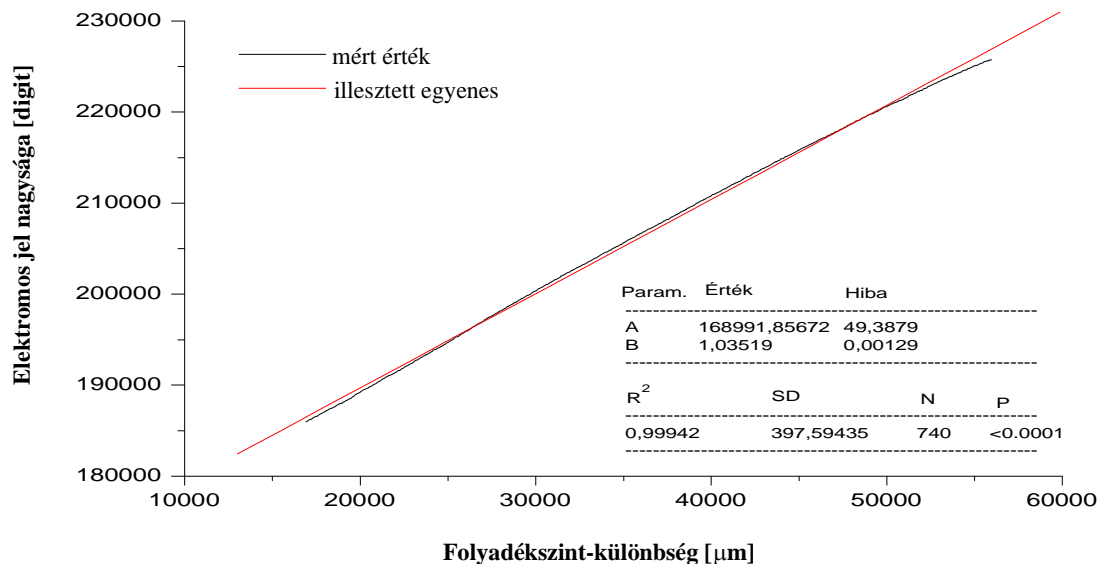
A következő lehetséges megoldásokat vizsgáltuk meg:

- **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 áruk, azonban a kereskedelemben kapható celláknak túl nagy a sűrűsége, így jelentősen meghamisítják a folyadékoszlop változából 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 μm , a mérési zajok miatt gyakorlatilag 5-10 μm 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 (3. ábra). A kalibrációs görbén jól látszik, hogy a mérőfej által adott elektromos jel gyakorlatilag lineárisnak tekinthető és a mérőfej névleges érzékenysége $\approx 1 \mu\text{m}/\text{digit}$.



2. ábra: A mérőfej által adott jel linearitása

▪ A hidrosztatikus elven működő berendezés

Sajnos a fent leírt, elkészített és több mintán kipróbált berendezésnek van egy hibája, ami a felületi feszültségből adódik. Ugyanis olyan kis szintkülönbségeket kell mérni, ahol apró szennyeződések felületi módosító hatása is a kapilláris emelkedés megváltoztatásán keresztül számottevő hibát eredményezett, még akkor is, ha maga a detektor kellő érzékenységű volt. Ennek a berendezésnek az előnyeit kihasználva és hátrányait kiküszöbölendő született meg az elektronikus areométer. Ahol az elmozdulás már néhány (3-6) cm, de a detektor azonos a fent ismertetett megoldással.

Egy olyan areométer, melynek nyakában egy vezető réteg helyezkedik el, ez az egyik fegyverzet, a másik fegyverzet a talajszemcséket tartalmazó oldat, melynek magassága, és ezzel a kondenzátor kapacitása változik az ülepedés során. A szigetelő az areométer üvegből készült nyaka. A mérő áramkör, az áramforrásként alkalmazott nikkkel-metáldhidrid akkumulátorral az areométer hasában helyezkedik el. (3.ábra)

A fő probléma ennek az eszköznek a megalkotásával, hogy az egész mérő számítógépet az areométerbe kellett elhelyezni és az egész mérés során keletkezett adathalmazt is tárolni kell a mérés végéig. Sőt, ami még kellemetlenebb egy olyan áramforrást is kellett alkalmazni mely kellő megbízhatósággal szolgáltat energiát a mérés és az azt követő adatmentés folyamán, továbbá kellően sok töltési-kisütési ciklust kibír, hiszen az egész rendszer légmentesen lezárva van elhelyezve egy üvegeszköz belsejében. Elvileg lehetne bontható kapcsolattal lezárni eszközünket, azonban ez minden elem, illetve akkumulátor cseréjén az eszköz újralibrálásával járna, ami a felhasználó számára nagyon kényelmetlenné tenné az eszköz használatát.



3. ábra Digitális areométer fényképe

Általános leírás

A készülék főbb egységei:

- **Kapacitív érzékelő:**

kétszer kettő félhenger alakú fém fegyverzet külön a mérő és a referenciakapacitás mérésére.

- **Kapacitás-frekvencia konverter:**

a kapacitással arányos periódusidejű négyszögjelet szolgáltat

- **Vezérlő:**

kis fogyasztású, nagy sebességű programozható mikrokontroller, amely a legkevesebb kiegészítéssel alkalmas frekvencia (periódusidő), hőmérséklet (feszültség) mérésre nagy pontossággal.

Jellemzői: Megbízható működés, újraprogramozhatóság, ár, beszerezhetőség, kis méret.

- **Tápellátás:**

5V max 100mA

- **Interfész:**

RS485: ipari szabvány, max. 64 eszköz egy sínen, zavarvédett, ipari környezetben is jól használható.

RS485-USB konverterrel közvetlen PC kapcsolat megoldható

- **Hőmérséklet indikátor:**

10Kohm névleges ellenállású termisztor feszültségosztó fesz. változásának mérése.

Elektromos felépítés:

A *mérő és referencia kapacitás* egyik fegyverzete közvetlenül a 2 db C-F konverter bemeneteire, míg másik fegyverzeteik a mérőreferencia (GND) ponthoz csatlakoznak. A C-F konverter frekvenciajele egy NOR kapuból kialakított digitális multiplexeren keresztül a kontroller CAPTURE_IN bemenetére kerül.

A *hőmérsékletmérő* feszültségosztó feszültségjele a kontroller A/D_IN bemenetére csatlakozik.

A soros adatok az SN75LBC176 *interfészen* keresztül jutnak a külső adatkábel adat érpárjára. Az adatkábel 2 további vezetéke a tápellátást biztosítja.

Kiegészítő áramkörök:

5V LDO DC-DC konverter

4V-os *feszültségreferencia* a mérő áramkörök részére.

A fegyverzetek geometriája és a kapacitás közötti összefüggés:

Amennyiben a keresztmetszetet állandónak tekintjük és a fegyverzetek végein fellépő térerősség inhomogenitástól eltekintünk akkor szimmetria okokból a kapacitás a fegyverzetek között levő dielektrikum hosszának lineáris függvénye.

Osztott dielektrikum (víz-levegő) esetén:

$$C_{eredő} = \varepsilon_{v\acute{z}} C_e x + \varepsilon_{leveg\ddot{o}} C_e (l - x)$$

ahol:

$\varepsilon_{v\acute{z}}$: a víz dielektromos állandója (≈ 80)

$\varepsilon_{leveg\ddot{o}}$: a levegő dielektromos állandója (≈ 1)

l : a fegyverzetek hossza

x : vízoszlop hossza a fegyverzetek között ($0 \leq x \leq l$)

C_e : hosszegységnyi kapacitás ($x=1, \varepsilon_r = 1$)

ebből:

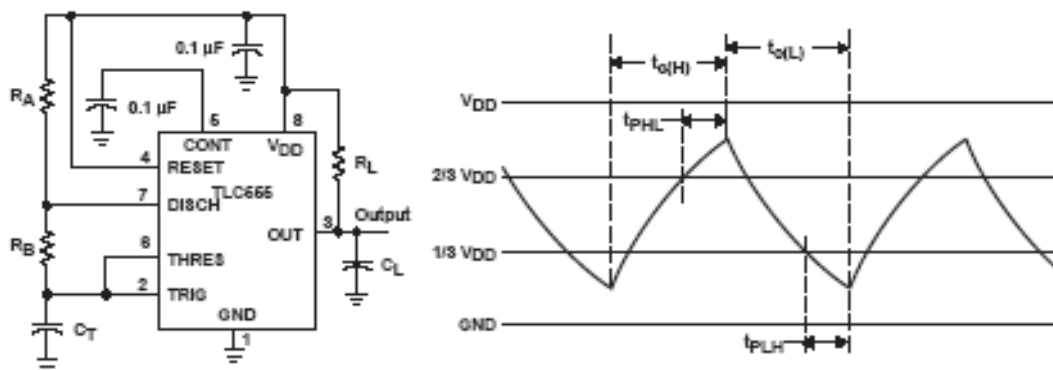
$$C_{eredő} = (\varepsilon_{v\acute{z}} - 1) C_e x + C_e l$$

Így:

$$C_{min} = \varepsilon_{leveg\ddot{o}} C_e l$$

$$C_{max} = \varepsilon_{v\acute{z}} C_e l$$

C-f konverter:



$$t_{c(H)} = C_T R_A R_B \ln \left[3 - e^{\frac{-t_{PHL}}{C_T R_B t_{on}}} \right] t_{PHL}$$

$$t_{c(H)} = C_T R_B r_{on} \ln \left[3 - e^{\frac{-t_{PHL}}{C_T R_A R_B}} \right] t_{PLH}$$

egyszerűsítve és az exponenciális tagot elhagyva:

$$t_{c(H)} \approx C_T R_A R_B \ln 2$$

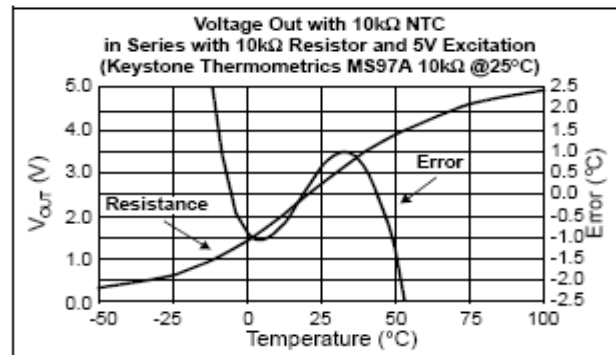
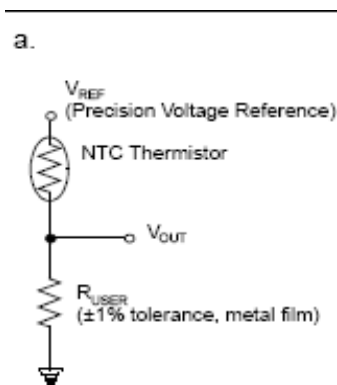
$$t_{c(L)} \approx C_T R_B \ln 2$$

a kimeneti hullámforma teljes periódusának kitöltési tényezője:

$$\frac{t_{c(L)}}{t_{c(H)} + t_{c(L)}} \approx 1 - \frac{R_B}{R_A + 2R_B}$$

$$\frac{t_{c(H)}}{t_{c(H)} + t_{c(L)}} \approx \frac{R_B}{R_A + 2R_B}$$

Ezen összefüggésekből C_{max} és C_{min} ismeretében R_A és R_B a kívánt mérési frekvenciatartományhoz kiszámolható.



Hőmérsékletmérés:

$$V_{out} = V_{ref} \frac{R_{Th}}{R_{th} + R_{Serial}}$$

A termisztor ellenállás változása a hőmérséklet függvényében nem lineáris azonban egy szűkebb tartományban viszonylag kis hibával lineárisnak tekinthető, illetve szoftverrel kompenzálható.

A hiba a +5...+30°C tartományban nem haladja meg az 1°C-t

A feszültségosztó áramkör kimeneti feszültségét közvetlenül a 10 bites A/D-vel:

$$V_{refmin} = 0V$$

$$V_{refmax} = 4V$$

$$R_{Th(20°C)} = 12683\Omega$$

$$R_{Th(30^{\circ}C)}=7942\Omega$$

$$V_{20^{\circ}C}=2.24V$$

$$V_{30^{\circ}C}=1.77V$$

az A/D által mért adat :

$$N = N_{max} \frac{V_{in}}{V_{max}}$$

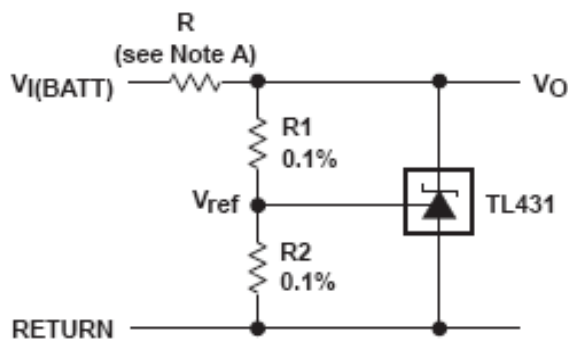
így a két szélsőértékre:

$$N_{20^{\circ}C} = 572$$

$$N_{30^{\circ}C} = 453 \text{ és a felbontás : } 0.08 \frac{^{\circ}C}{digit}$$

Kiegészítő áramkörök

4V feszültségreferencia



$$V_{Batt}=5V$$

$$V_{Out}=4V$$

$$R_1=6k\Omega$$

$$R_2=10k\Omega$$

▪ Mérőállomás paraméterek:

Működési hőmérséklet tartomány: 15...30°C

Tárolási hőmérséklet tartomány: 0...70°C

Tápfeszültség: 8...12V ==

Áramfelvétel: max.20mA

▪ Soros interfész:

SN75LBC176 RS485 serial interface

19200 bps

8bit, No parity 1 Stopbit

fizikai paraméterek:

impedancia: 110ohm

max. állomásszám: 64

végpontok közti távolság max. 30m

▪ Mikrokontroller szoftver:

A program feladata a mikrokontroller megfelelő paramétereinek beállítása, perifériák inicializálása, a frekvencia (időtartam) mérés, hőmérsékletmérés, az adattárolás és a kommunikáció.

Kommunikáció:

Az adatforgalmat a vezérlő PC kezdeményezi egy parancskeret küldésével, amely tartalmazza a parancskódot és a mérőállomás címét. Az így megszólított mérőállomás válaszképpen adott időn belül egy adatkeretet küld, benne az állomás címével és az adatokkal. Mindkét kerettípust nyitó és záró kód fogja közre és ellenőrző összeg byte-tal védett.

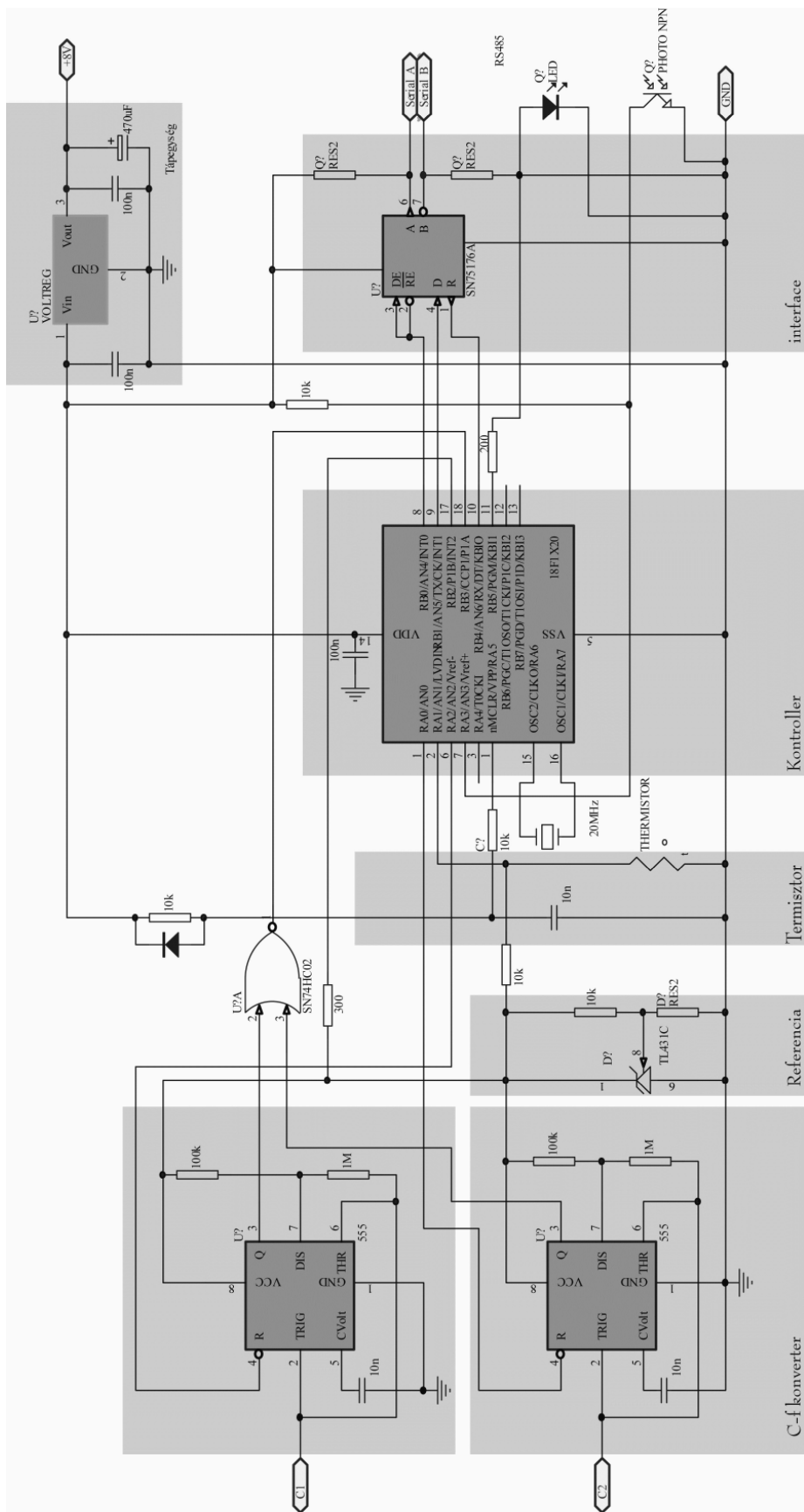
bitidő: $1/19200 \text{ s} = 52\mu\text{s}$

1byte : $1 \text{ start} + 8\text{adat} + 1\text{stop} = 520\mu\text{s}$

teljes időtartam: 17.7 ms

egy mérő adatforgalom teljes időkerete: 20ms

64 mérőállomás teljes adatforgalmának időtartama: 1.28s



4. ábra Elvi kapcsolási rajz

Adatértékelés, az érintősereges számítási módszer

A mérőfejjel a két cső közötti folyadékszint-különbség csökkenését, avagy az areométer besüllyedését azaz a sűrűség csökkenését észleljük. A sűrűség csökkenést az adott időpillanatban már kiülepedett, 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 (5. ábra, 1. görbe).

Amennyiben a monodiszperz rendszer a korábbinál 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 (5. 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

ρ a szuszpenzió sűrűsége, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

ρ_w a vizes oldat sűrűsége, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

ρ_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.

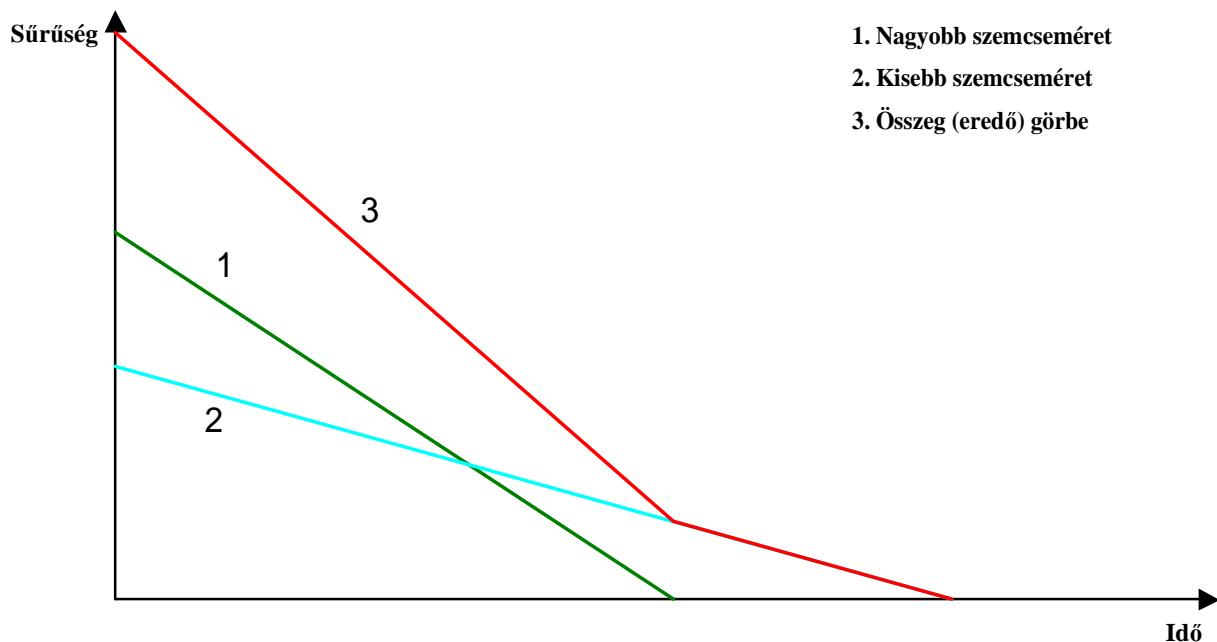
Ez a folyamat mindaddig tart, míg az összes részecske el nem hagyja a vizsgált mélységet ($t=l/v$), utána beáll az eredeti oldatsűrűség, amely ez után már nem változik, tehát ezen a ponton az eddig egyenletesen csökkenő függvény egy vízszintes egyenessel leírhatóvá

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:

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

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 (5. ábra, 3. görbe).



5. 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

A legkisebb frakció megkeresése: Elvileg az ülepedés végtelen ideig tarthat, az egyre kisebb szemcsefrakciók ülepedési sebessége a Stokes-törvény alapján számítható tetszőleges szemcseméret esetében is. Azonban van egy elvi határa az ülepedő részecskeméretnek, ez pedig a Brown mozgás. Abban az esetben, ha a Brown mozgás sebessége az adott szemcse esetében összemérhető az ülepedés sebességével, a Stokes törvény természetesen érvényét veszti. Az ennél kisebb részecskéket már megnövelt gyorsulással, pl. centrifugában lehet ülepedéssel vizsgálni. Ez az elvi határ a következőképpen számítható:

w : a részecske egy szabadsági fokra eső energiája

k : Boltzmann állandó

T : hőmérséklet, K,

m : a részecske tömege, kg

r : a részecske sugara, m

ρ : a részecske sűrűsége, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

ρ_0 : a folyadék sűrűsége, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

η : a folyadék viszkozitása, Pa.s

$$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$$

esetünkben 298 K

$$\text{esetünkben } 2500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\text{esetünkben } 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\text{esetünkben } 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

A Brown mozgást végző részecskék átlagos energiája megegyezik az őket lökdöső molekulák átlagos energiájával. Így felírható, hogy

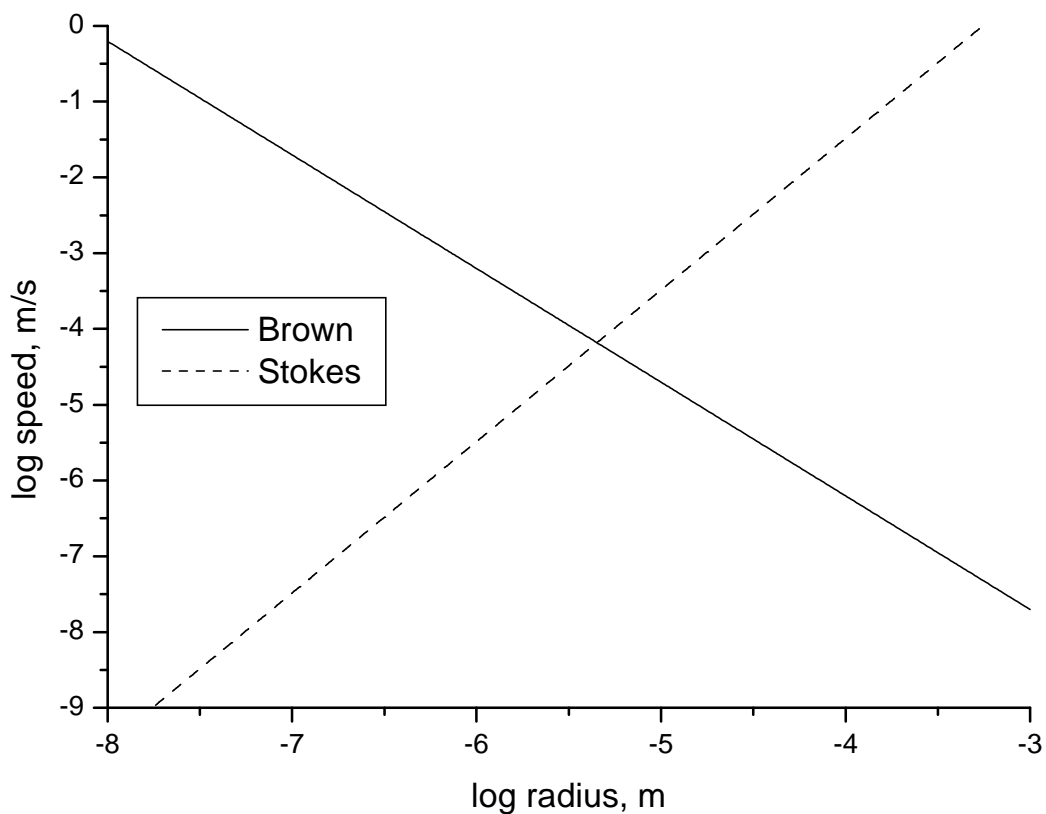
$$w = \frac{3}{2}kT, \quad w = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho \cdot \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \Pi \cdot v^2$$

Ebből behelyettesítve a kinetikus energia képletéből az átlagos sebesség számítható

$$v = \sqrt{\frac{9 \cdot k \cdot T}{4 \cdot \rho \cdot \Pi \cdot r^3}}, \quad \text{egy adott irányban: } v = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{4 \cdot \rho \cdot \Pi \cdot r^3}}$$

A fentihez hasonlóan a Stokes törvényből számítható az ülepedés sebessége:

$$v = \frac{2 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot g \cdot r^2}{9 \cdot \eta}$$



6. ábra A Stokes féle ülepedési sebesség, és az egy irányú Brown mozgás átlagos sebességének összehasonlítása a szemcseméret függvényében (log-log ábrázolásban)

Az ábráról leolvasható, hogy a lefelé-felfele irányuló Brown-mozgás sebességének logaritmusai egyenlő -4.18 (ez $6.6 \cdot 10^{-5}$ m/s – ot, vagyis 0.066 mm/s-ot jelent) ha a szemcseméret logaritmusai $-5,36$ (ez $4.4 \cdot 10^{-6}$ m-t, vagyis $4,4$ μ m-t jelent). Ennél apróbb szemcsék esetében a gravitációs erő és a folyadéksúrlódás figyelembe vételével levezetett Stokes törvény biztosan hibásan írja le a folyamatot, hiszen a súrlódás elsősorban nem a gravitációs erő által felgyorsított részecskékre hat, hanem a Brown-mozgással mozgó részecskékre. A becslés alapján látható, hogy az ülepitéses módszer nem alkalmas agyagfrakciók pontos méret szerinti szétválasztására, (általában <2 μ m frakció) elvi számításokkal, esetleg kalibrációval alkalmas lehet ezek kimérésére. (Ez egyébként a mérőelrendezés geometriájától függően kb. 1 órás ülepedési időt jelent)

A fenti levezetés és számítás alapján megállapíthatjuk, hogy elegendő a Stokes törvény alapján történő számításnál az 1 μ m- nél nagyobb tartományt számolni. Így számításainknál nyugodtan kezdhetjük az 1 μ m-nek megfelelő időpontban az első érintő húzását.

A mérési adatok: a vizsgálati időpontok x ($x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$) és a hozzájuk tartozó felhajtó erő értékek y ($y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$) adják a mérési adatpárokat. Ezekre kell illeszteni egy olyan egyenest, amely az adott frakcióra jellemző x_0 értéknél metszi az x tengelyt. A számított modell pontjai y_c ($y_{c1}, y_{c2}, \dots, y_{ci}, \dots, y_{cn}$) az

$$y_c = a \cdot x + b$$

általános egyenlettel adhatók meg. Egy olyan egyenes a és b paraméterei, amely az x_0 ponton áthalad a következő levezetéssel megkapott képlettel határozható meg:

A modell az x_0 értéknél metszi az x tengelyt, tehát itt az y_c értéke nulla

$$0 = a \cdot x_0 + b$$

ebből b értékét kifejezve:

$$b = -a \cdot x_0$$

b értékét az általános egyenletbe behelyettesítve a következő egyenletet kapjuk:

$$y_c = a \cdot x - a \cdot x_0 = a \cdot (x - x_0)$$

A zárójelen belüli kifejezés az x érték transzformáltja x_t

$$x_t = (x - x_0)$$

Ezt a jelölést felhasználva az egyenes egyenlete a következő formulával adható meg:

$$y_c = a \cdot x_t$$

Regresszióval azokat a függvény-paramétereket határozzuk meg, amely függvénnyel számolt y_c és a mért y értékek között mért eltérések négyzetösszege (SQ) minimális:

$$SQ = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ci})^2$$

Az előbbieken levezetett egyenes egyenletébe különböző a paraméter értékeket helyettesítve különböző SQ értékeket kapunk. Ezek közül regresszióval azt az a értéket határozzuk meg amelynél az SQ érték minimális.

Egy folytonos függvény minimumában a függvény deriváltja a 0 értéket veszi fel. A deriválás előtt érdemes az összefüggést a következők szerint átalakítani:

$$SQ = \sum_{i=1}^n (y_i^2 - 2 \cdot y_i \cdot y_{ci} + y_{ci}^2)$$

y_c helyett az egyenes egyenletét behelyettesítve az a paramétert is tartalmazó alakot kapjuk:

$$SQ = \sum_{i=1}^n (y_i^2 - 2 \cdot y_i \cdot a \cdot x_{ii} + a^2 \cdot x_{ii}^2)$$

A szummázás tagonként is elvégezhető:

$$SQ = \sum_{i=1}^n y_i^2 - 2 \cdot a \cdot \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_{ii}) + a^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_{ii}^2$$

Az a szerinti derivált értéke a minimális SQ értéknél nulla:

$$\frac{dSQ}{da} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_{ii}) + 2 \cdot a \cdot \sum_{i=1}^n x_{ii}^2 = 0$$

A kapott algebrai egyenletből a értéke kifejezhető:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_{ii})}{\sum_{i=1}^n x_{ii}^2}$$

Az eredeti x értékeket tartalmazó kifejezést az x transzformálását megadó összefüggés visszahelyettesítésével kapjuk meg:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \cdot (x_i - x_0))}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}$$

b paraméter értéke, pedig a korábban megadottak szerint számolható:

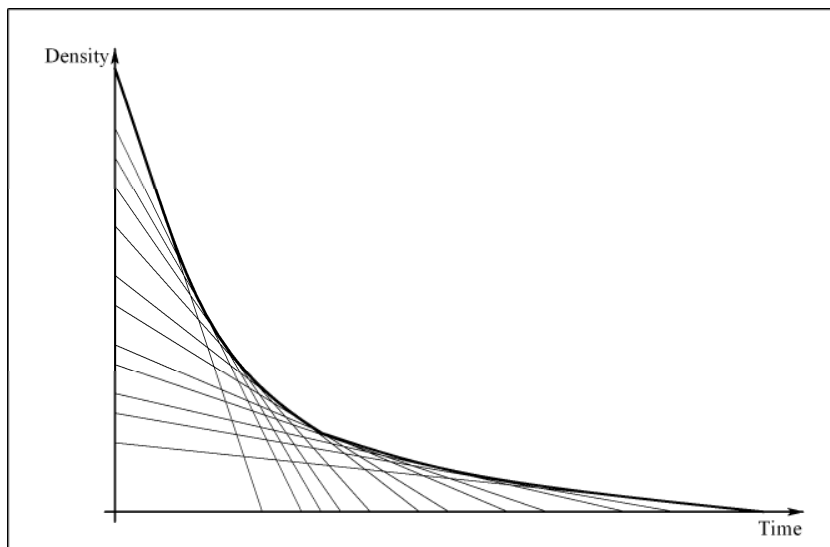
$$b = -a \cdot x_0$$

A fent levezetett adott ponton átmenő lineáris regresszió számítást alkalmazhatjuk az adott szemcsefrakciók számítására. A számítás lépései

1. frakcióhatárok előzetes megadása

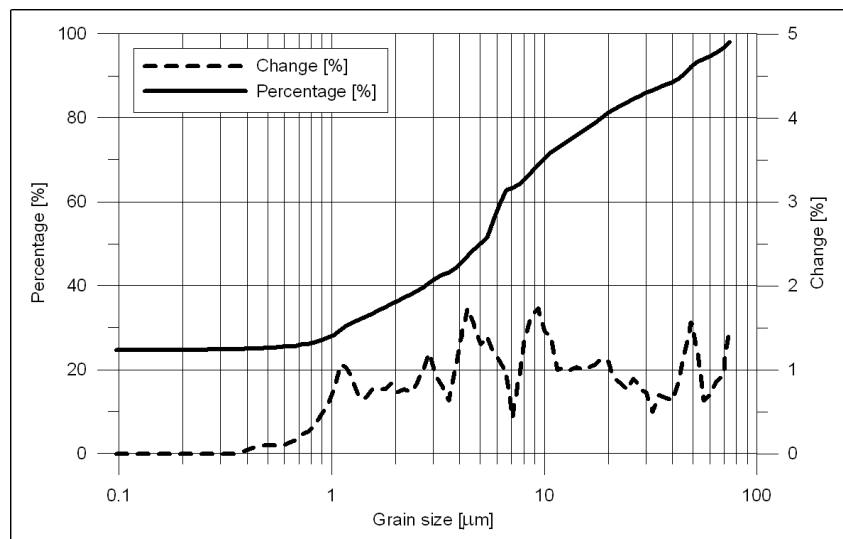
2. lépésben a végtelen, valójában a fentebb becsült $1 \mu\text{m}$ -es pontból érintőt húzunk a görbéhez, numerikusan ezt egy iterációval lehet megoldani, vagyis az egyenes meredekségét változtatva meg kell keresni annak a két metszéspont között annak a szelőnek az egyenletét, mely a lehető legjobban illeszthető a mért adatokra. Ennek az egyenesnek az Y-tengelymetszete fogja adni az $1 \mu\text{m}$ -nél kisebb frakció tömegét.

A 7. ábrán, ilyen több frakciós iterációt láthatunk.



7. ábra. Egy sűrűség – idő grafikon értékelése érintő módszerrel

A fenti iterációt ismételve, minden kívánt frakcióra megkaphatjuk az Y tengelymetszeteket, így a teljes szemcseméret eloszlást számíthatjuk.



8. ábra Egy valódi mérés kumulált és differenciál szemcseméret eloszlása

ASTA szemcseméret-eloszlásmérő rendszer PC szintű szoftverei

A leírt matematikai és vezérlési feladatokat egy Windows operációs rendszer alatt, PC-n futó szoftverrendszer valósítja meg. A Tajvanban kipróbált 64 mérőhelyes rendszer meghajtására készült a PSDMEAS nevű program, az adatok kiértékelésére készült a PSDCALC nevű program. Mindkét program DELPHI nyelven készült és tesztelten működik.

Az ASTA rendszer validálása:

Anyag és módszer

A készített berendezés validálásának érdekében négy tipikus magyar talajtípust használtunk, melyeknek fizikai félesége különbözött egymástól. A talajok származása és hagyományos módszerrel mért szemcseméret eloszlása az táblázatban látható.

mark	name	>0.25 mm	0.25- 0.05 mm	0.05- 0.02 mm	0.02- 0.01 mm	0.01- 0.005 mm	0.005- 0.002 mm	<0.002 mm
1	Gödöllő	9.3 %	27.3 %	8.8 %	7.3 %	5.9 %	5.5 %	36.1 %
2	Dráva1	0.7 %	14.9 %	18.3 %	13.2 %	12.1 %	13.4 %	27.6 %
3	Józsefmajor	0.8 %	6.1 %	25.8 %	15.1 %	8.9 %	6.9 %	36.6 %
4	Karcag	1.9 %	3.7 %	17.9 %	16.5 %	12.0 %	10.2 %	38.0 %

1.Táblázat A használt talajminták szemcseeloszlása

A talajminták szemcseméret eloszlását megmértük hagyományos pipettás módszerrel, és ASTA módszerrel négy ismétlésben. Első lépésben meghatároztuk a négy ismétlés alapján az eredeti sűrűség-idő függvények konfidencia sávját. Majd az átlagos sűrűség-idő függvényt használtuk a szemcseméret eloszlás meghatározására érintő módszerrel. Erre a célra a már elkészült PSDCALC kiértékelő programot használtuk. A kapott kvázi folytonos kumulatív szemcseméret eloszlás görbéből a hagyományos magyar szemcsefrakcióknak megfelelő értékeket kiválogattuk (kumulált görbe esetén ez igen könnyű, csak a határmérethez tartozó

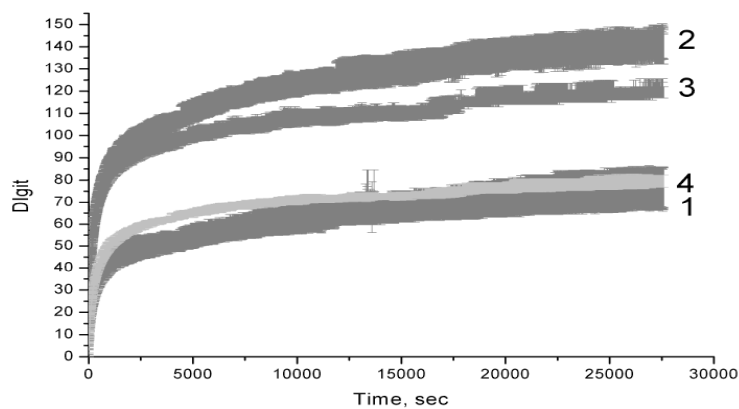
értékeket ki kell másolni). Ez után háromtényezős varianciaanalízissel vetettük össze az új és hagyományos módszerrel mért szemcsefrakció adatokat. A háromtényezős varianciaanalízis jól használható erre a feladatra, hiszen a maradékszórás helyettesíthető a kölcsönhatásshórással.

Eredmények és értékelésük

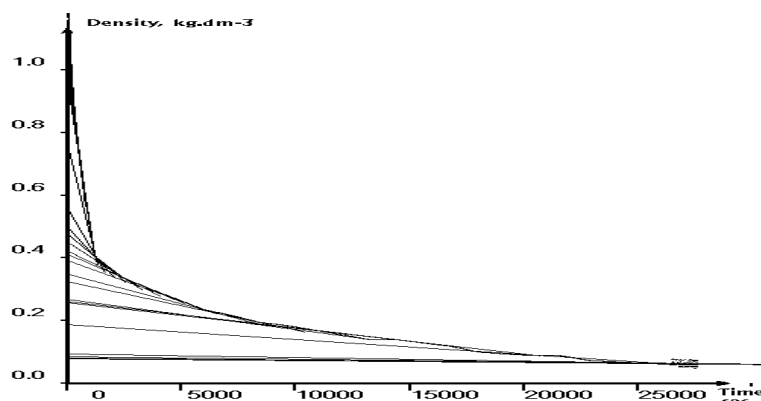
Az eredeti sűrűség-idő függvények konfidencia sávja látható a Figure 1.

Az első részben (kb. 3000-8000 másodperc intervallumban) mind a négy talajra kapott sűrűség értékek szignifikánsan különböznek egymástól. Később a Gödöllői és Karcagi talajok statisztikailag egyformának bizonyultak, míg a többi talaj továbbra is eltért egymástól.

A 2.-6 ábrán az érintőmódszeres számítások grafikonjai láthatók. Majd a 3 ábrán a kapott kumulatív szemcseméret eloszlásokat láthatjuk. Látható, hogy a szemcseméretek a tartomány több részén jelentősen eltérnek egymástól. Sajnos a számítás nemlinearitása miatt az eredeti függvények statisztikai elemzése nem vihető át matematikailag korrekt módon a szemcseeloszlás függvényekre. Ezért az átlagos eloszlásfüggvényeket vetettük össze varianciaanalízissel a pipettás módszer eredményeivel. Ez látható a 3. táblázatban.



9. ábra. A mért eredmények sűrűség-idő függése és konfidencia sávja



10. ábra a 2. minta véges érintői a számolás során.

Minta szám	1	1	2	2	3	3	4	4
Méret mm	CONV	FIT	CONV	FIT	CONV	FIT	CONV	FIT
<0.002	36.1	35.1	27.6	26.1	36.6	34.0	38.0	38.0
<0.005	41.6	40.3	41.0	34.4	43.5	37.9	48.2	42.2
<0.01	47.5	54.2	53.1	53.0	52.4	53.4	60.2	58.6
<0.02	54.8	65.2	66.3	70.9	67.5	71.0	76.7	72.6
<0.05	63.6	71.9	84.6	81.2	93.3	79.5	94.6	80.5
<0.25	90.9	86.8	99.5	98.1	99.4	100	98.3	100
0.25>	100	100	100	100	100	100	100	100

2.Táblázat Részecskeméret eloszlás a pipettás módszer frakcióiban, CONV: pipetta módszer, FIT: Areométer módszer

Size. mm	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.25	>0.25	average
CONV	34.6	43.6	53.3	66.3	84.0	97.0	100.0	68.4
FIT	33.3	38.7	54.8	69.9	78.3	96.2	100.0	67.3
average	33.9	41.1	54.1	68.1	81.2	96.6	100.0	67.8
LSD(5%)	4.8							

3.Táblázat Variancia táblázat a pipettás módszer frakcióiban, CONV: pipetta módszer, FIT: Areométer módszer

A 2 és 3 táblázaton látható, hogy nincs szignifikáns eltérés két alkalmazott eljárással kapott eredmények között, kivéve a 0,05 mm frakciót. Ez azt jelenti, hogy a vizsgált hét frakcióból hat esetben azonos eredményt kapunk a két módszerrel így kijelenthetjük, hogy a két módszer a vizsgált frakciókban egymással egyenértékű, így egymást helyettesítheti a vizsgálatok során.

Összefoglalás

A kutatás célja egy olyan szemcse-eloszlás meghatározó berendezés kifejlesztése volt a célunk, amely a korábnál 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.

A fenti probléma megoldására végül megszületett az elektronikus areométer. Ez egy olyan areométer, melynek nyakában egy vezető réteg helyezkedik el, ez az egyik fegyverzet, a másik fegyverzet a talajszemcséket tartalmazó oldat, melynek magassága, és ezzel a kondenzátor kapacitása változik az ülepedés során.

Az areométer besüllyedését azaz a sűrűség csökkenésének időfüggését mérjük közvetlenül. A sűrűség csökkenést az adott időpillanatban már kiülepedett, azaz a mérőcső szintje alá süllyedt részecskék vizsgált térfogatból való eltávozása okozza. Ebből elméleti megfontolásokat alkalmazva kidolgoztuk a szemcseméret eloszlás számítására alkalmas véges érintők (FIT) módszerét.

A készített berendezés validálásának érdekében négy tipikus magyar talajtípust használtunk, melyeknek fizikai félesége különbözött egymástól. Kimutattuk, hogy nincs szignifikáns eltérés két alkalmazott eljárással kapott eredmények között, kivéve a 0,05 mm frakciót. Ez azt jelenti, hogy a két módszer a vizsgált frakciókban egymással egyenértékű, így egymást helyettesítheti a vizsgálatok során.

Summary

To continuously measurement of PSD we worked out an digital areometer. The device is equipped a capacitive sensors on the neck of the areometer, which can measure the changes of water levels nearby the neck of the areometer in 10 μm precision with $<1 \mu\text{m}$ errors. The typical level changes are 3-5 cm, The measured signals are stored in the memory of equipment and after the end of measurement the database is downloaded to the to the controller computer.

Because the whole system can be managed as the aggregation of many mono-disperse systems, it is possible to divide the measured density-time function into grain-size fractions with tangent lines drawn to finite but optional points. For calculating the settling speed of given fraction, these tangent lines are very good tools, because the changing speed of density is equal to the multiplication of settling speed and mass of given fraction.

The aim of validate research is to test and validate a developed automated continuous particle size method. The particle size of these samples was measured by both the conventional pipette method and the automated method. Based on statistical analysis the results of used pipette method and continuous aerometer method at used soil samples, give statistically equal results in the average and all fraction except the 0,05 mm fraction. It means the continuous areometer method compatible with conventional method.