

A talajok mechanikai összetétel vizsgálata pipettás ülepitéses módszerrel: a hazai és a nemzetközi szabvány szerinti eljárások összehasonlítása és konverziója

¹MAKÓ András – ^{1,2*}HERNÁDI Hilda – ¹BARNA Gyöngyi – ³BALÁZS Réka –
¹MOLNÁR Sándor – ⁴LABAN CZ Viktória – ^{1,2}TÓTH Brigitta – ¹BAKACSI Zsófia

¹MTA ATK, Talajtani és Agrokémiai Intézet, Budapest

²PE GK, Növénytermesztési és Talajtani Tanszék, Keszthely

³MTA CSFK, Földtani és Geokémiai Intézet, Budapest

⁴SZIE MKK, Környezettudományi Intézet, Talajtani és Agrokémiai Tanszék, Gödöllő

Bevezetés

A mechanikai összetételt (MÖ) és a fizikai féleséget (textúra), mint a különböző méretű elemi talajrészecskék eloszlását jellemző kvantitatív és kvalitatív jellemzőket, a talajok legfontosabb tulajdonságai közt tarthatjuk számon. A MÖ a talajok számos egyéb tulajdonságát befolyásolhatja (MAKÓ et al., 2017b) és a talajok osztályozása vagy a földminősítés során is fontos diagnosztikai kritérium (SZABOLCS et al., 1966; JASSÓ et al., 1989; TÓTH, 2009; IUSS WORKING GROUP WRB, 2015). A MÖ vizsgálatok változatos módszertanát a talajtan számos tudományterülete és a társtudományok (földrajztudomány, geokémia, talajmechanika, hidrológia stb.) széles köre alkalmazza. Éppen a MÖ vizsgálatok általános elterjedtsége az oka annak, hogy napjainkban párhuzamosan számos mérési módszer létezik, e módszerek különféle mintaelőkészítési eljárásokat javasolnak, illetve a mérési eredmények változatos szemcseméret-kategóriák százalékos megoszlását mutatják be, melyeket (országoként vagy tudományterületenként) eltérő módon értékelnek, különböző textúra-csoportokat (fizikai féleség kategóriákat) képezve.

A fentiek miatt fontos kiemelni, hogy a MÖ eredmények közzlése során minden esetben részletesen közölni kell a vizsgálatok során alkalmazott előkészítési eljárásokat, a mérési módszert, a vizsgálatokhoz használt mérőműszert (típus, tartozékok, műszerbeállítások stb.), illetve a mért szemcseméret-csoportok (pl. agyag-, por-, iszapfrakció) mérethatárait és az egyes textúra-csoportok (pl. homokos vályog, agyagos vályog stb.) képzésének módszertanát. Fontos megismerni továbbá az alkalmazott eljárások előnyeit és korlátait, a mérési eredmények összehasonlíthatóságát más, általánosan használt módszerek eredményeivel (SHEIN,

Postai cím: HERNÁDI HILDA, PE Georgikon Kar, 8360. Keszthely, Deák Ferenc u. 16.

E-mail: hhilduci@gmail.com

A cikk a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk nem kereskedelmi célból bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közzlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek.

2009; RYŻAK & BIEGANOWSKI, 2011; SOCHAN et al., 2015; MAKÓ et al., 2017a,b). A hazai talajtani gyakorlatban legáltalánosabban használt az ún. „pirofoszfátos szítás-ülepítéses, pipettás” módszer (MSZ-08-0205-78) (a továbbiakban „MSZ” módszer), míg a nemzetközi szabványok közül a korábbi (ISO/DIS 11277:1994; továbbiakban „ISO/DIS”), illetve az újabb (ISO 11277:2009(E); továbbiakban „ISO”) szítás-ülepítéses, pipettás módszerek a legismertebbek.

A MÖ vizsgálata során a mérés első lépése – a durva vázrészek (>2 mm) eltávolítása után – a talajaggregátumok roncsolása elemi alkotóelemekké, illetve az elemi részecskék tartós diszpergálása. A talajok kötőanyagként általában szerves anyagokat, vas-(oxi)hidroxidokat és karbonátokat tartalmaznak, melyek különféle kémiai előkezelésekkel a részecskék felületéről leoldhatók és a talajszuszpenzióból eltávolíthatók (GEE & BAUDER, 1986). A kémiai előkezelések különfélék lehetnek. A *humuszanyagok*, mint legfőbb szerkezetképző komponensek eltávolítására általában hidrogén-peroxid oldatot használnak, ami egyes módszereknél nagyon híg koncentrációjú (1–3%-os) (MATHIEU & PIELTAIN, 2003), a régebbi ún. „nemzetközi A módszernél” 6 %-os (DI GLÉRIA et al., 1957), míg az ISO/DIS és ISO módszerek esetében 30%-os. A *karbonátok* eltávolítása hagyományosan általában híg (0,05 M) sósavval történik (ld. „Asztapov módszer”) (DI GLÉRIA et al., 1957; KACHINSKY, 1965); az ISO/DIS és ISO módszertan az 1 M sósav oldat használatát javasolja opcionálisan (amennyiben a talaj tömegszázalékos mésztartalma 2%-nál nagyobb). A francia módszertan a 10%-nál nagyobb CaCO₃ tartalmú talajokban a mész kivonására az erőteljesen roncsoló sósav helyett KCl oldat hozzáadását ajánlja a mikroaggregátumok dezaggregálására (MATHIEU & PIELTAIN, 2003). A talajrészecskéket összetapasztó vas-(oxi)hidroxidok eltávolítására az ISO/DIS és ISO módszerek – opcionálisan – Na-ditionit hozzáadását javasolják Na-citrát-Na-bikarbonát puffer közegben. Számos hazai és nemzetközi tapasztalat azt mutatja, hogy a kémiai előkezelésekkel nemcsak a talajaggregátumokat választjuk szét, hanem – az előkezelés módjától függően – bizonyos talajásványokat is elroncsolhatunk, illetve kioldhatunk a talajból (LAVKULICS & WIENS, 1970; MAKÓ et al., 2002; MIKUTTA et al., 2005; BALÁZS et al., 2011; SCHULTE et al., 2016).

A kémiai előkezelések során a további cél az – aggregátumokból felszabadított – elemi részecskék diszpergálása a negatív töltésű adszorpciós helyek nagy elektronegativitású kationokkal (alkálifém kationok, általában Na⁺ vagy Li⁺ ionok) történő telítésével. Az adszorbeált alkálifém ionok nagy hidrát burkuk segítségével megakadályozzák a részecskék újbóli összetapadását. Az Egyesült Államokban, Oroszországban és több európai országban egyaránt elterjedt a Na-pirofoszfát alkalmazása az előkezelések során. A Na-pirofoszfát Na⁺ ionja lecseréli a Ca⁺⁺ ionokat a talajkolloidok felületéről, peptizáló hatásával elősegíti az elemi részecskék tartós diszpergált állapotának kialakulását. Ugyanakkor feltehetőleg némiképp képes megbontani a talajban ragasztóanyagként jelenlévő Ca-vegyületek (Ca-humát, -karbonát stb.) kötéseit is. Ez a tapasztalat vezethetett el oda, hogy némely módszertan (mint például az MSZ módszer is) előkészítésként – az egyéb kémiai előkészítő eljárások teljes elhagyásával – kizárólag a Na-pirofoszfátos előkezelést alkalmazza, melynek során a talajszuszpenzióhoz hozzáadandó Na-pirofoszfát oldat mennyiségét az Arany-féle kötöttségi szám függvényében

határozzák meg. A felszabaduló Ca^{++} ionok vízben oldhatatlan Ca-pirofoszfát formájában megkötődnek, a szuszpenzió szilárd fázisában a homokfrakció mennyiségét – mesterségesen – megnövelve (KACHINSKY, 1965; MIKUTTA et al., 2005). A Na-pirofoszfáthoz hasonló hatású diszpergálószer az ISO/DIS és ISO módszerek által ajánlott Na-hexametafoszfát, vagy a régebbi szabványok által a kis mésztartalmú talajok előkezelésére az ún. „Vageler előkészítés” során javasolt Li-karbonát is (DI GLÉRIA et al., 1957). A régi nemzetközi szabvány („nemzetközi A módszer”) diszpergáló szerként 1 M Na-hidroxid oldat hozzáadását írja elő (DI GLÉRIA et al., 1957). Egyes amerikai módszerkönyvek kémiai diszpergálásra 1–20%-os ammónium-hidroxid oldat használatát ajánlják (SHEIN, 2009).

A MÖ vizsgálatok során a kémiai diszpergálást a mechanikai diszpergálás követi. Ez általában a talajszuszpenzió különböző ideig történő rázatását vagy keverését jelenti különböző típusú eszközökkel. Az ultrahangos diszpergálást leginkább a lézerdiffrakciós MÖ méréseknél alkalmazzák, az ülepitéses módszereknél ritkábban használatosak (GENRICH & BREMNER, 1972; SOCHAN et al., 2012; 2015).

A MÖ vizsgálatok következő lépése a részecskék különböző mérettartományú frakciókba történő elkülönítése és az egyes frakciókba eső mennyiségek meghatározása. A szétválasztandó frakciók száma és mérettartománya országonként és tudományterületenként nagy változatosságot mutat (RODERICK, 1966; NEMES et al., 1999). A legáltalánosabb az agyag-, por- és homokfrakciók elkülönítése, illetve a „főfrakciók” „alfrakciókra” (pl. finom por, durva por stb.) történő megosztása. Az agyagfrakció felső mérethatára általában 0,002 mm (pl. MSZ; JURY et al., 1991; ISO), de az orosz talajtani iskola általában a 0,001 mm-es mérethatárt fogadja el (SHEIN, 2009), míg egyes kutatók és mérnöki szabványok a 0,005 mm-t rögzítik, mint az agyagfrakció felső mérethatárát (SHAW & ALEXANDER, 1936; GOST 12536-79; GEE & OR, 2002). A porfrakció felső mérethatára az előzőnél még nagyobb változatosságot mutat. A legelterjedtebb és legrégebbi mérethatár a 0,02 mm (ATTERBERG, 1912), ez volt sokáig a hazai talajtani vizsgálati módszertanban is a por/homok határ (DI GLÉRIA et al., 1957). 1938-tól vezették be az USDA módszertanba a 0,05 mm-es por/homok mérethatárt, mely aztán fokozatosan elterjedt az egész világon (LYON et al., 1943); a legutóbbi évekig a nemzetközi szabványokban is ez szerepelt (ISO/DIS). 1947-től az Amerikai Geofizikai Unió a 0,062 mm-t fogadta el a porfrakció felső mérethatárának (AGU, 1947); a jelenlegi ISO módszer pedig egy ehhez hasonló értéket (0,063 mm) rögzít, mint por/homok mérethatárt. A homokfrakció felső határa általában 2 mm, ez alól kivétel az orosz klasszifikációs rendszer 1 mm-es mérethatára (SHEIN, 2009). Az „alfrakciók” felosztása még az eddigieknél is nagyobb változatosságot mutat.

A szítás-ülepitéses módszereket az 1700-as évek elejétől használták a különböző méretű talajrészecskék elválasztására tapasztalati alapon (MILLER et al., 1988). Szitával a homokfrakciót (vagy annak egy részét) különítjük el az ülepités megkezdése előtt. A jelenleg érvényben lévő ISO módszer a 0,063 mm feletti, az ISO/DIS módszer a 0,05 mm feletti teljes homokfrakciót, míg az MSZ módszer csak a 0,25 mm feletti durva homok frakciót választja le szitálással. Az ülepitéses módszerek elméleti alapjául szolgáló Stokes-törvény 1904-től ismert (HALL, 1904).

A mérések során az ülepedési sebességek kiszámításához ismerni kell az ülepedő talaj sűrűségét (MATTHEWS, 1991). Az MSZ módszer előírja a talajok piknométerrel, vizes közegben történő sűrűség meghatározását (látszólagos sűrűség), azonban a tényleges gyakorlat az, hogy a sűrűség mérése vagy a lényegesen egyszerűbb mérőlombikos eljárással történik (FILEP, 1995), vagy az üleptetés során a talajok átlagsűrűségével ($2,65 \text{ g cm}^{-3}$) számolnak. Az ISO/DIS és ISO módszer is a talajok átlagsűrűségét veszi alapul. Befolyásolhatja az ülepedési sebességet az ülepedő szuszpenziók hőmérséklete is. Ezt egyes eljárások a szuszpenziókat tartalmazó üleptítő hengerek termosztálásával oldják meg, de sokkal gyakoribb – az MSZ, illetve az ISO/DIS és ISO módszereknél is ez a megoldás – a hőmérsékleti korrekciós táblázatok alkalmazása. A különböző mérési módszerek – kiemelten a lézerdiffrakción alapuló mérési eljárások – szemcsefrakció elkülönítésre vonatkozó tapasztalatait előző közleményünkben foglaltuk össze (MAKÓ et al., 2017b).

A MÖ mérési eredmények értékelése során gyakran használunk ún. háromszögdiagramokat, hogy a táblázatos formában kapott mérési eredményeket „átfordítsuk” fizikai féleség kategóriákra. A háromszögdiagramok (az azokban alkalmazott fizikai féleség kategóriák száma, illetve agyag-, por- és homokszázalékban megadott „tartomány-határa”) országonként és szakterületenként szintén különbözőek (MOEYS, 2014), de legáltalánosabban elterjedtnek az ún. USDA textúra-diagram tekinthető (USDA, 1993).

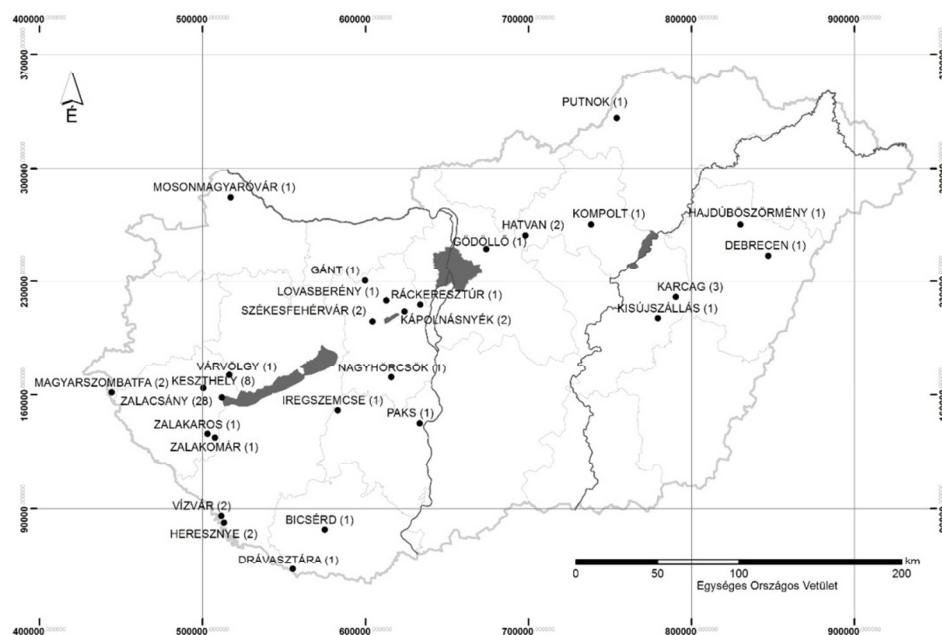
A különféle MÖ meghatározási eljárásokat megismerve felmerül a kérdés, hogy mely mérési, illetve előkészítési módszer tekinthető szakmai szempontból leginkább elfogadhatónak. A kérdés megválaszolásához hozzásegíthet bennünket, ha a mechanikai összetétel mérési eredményeket összevetjük egymással, illetve olyan egyéb talajfizikai paraméterekkel (pl. fajlagos felület, képlékenységi mutatók, vízgőzadszorpció stb.), melyek kapcsolata tudományosan igazolt a MÖ eredményekkel (MAKÓ et al., 2002; MAKÓ & HERNÁDI, 2010). Jelen közleményünkben egy, az ország főbb talajtípusait reprezentáló talajfizikai adatbázison hasonlítjuk össze az MSZ és az ISO/DIS módszerrel meghatározott MÖ vizsgálati eredményeket, vizsgáljuk kapcsolatukat egyéb talajfizikai tulajdonságokkal, illetve bemutatjuk a két módszer mérési eredményei közti konverzió egy lehetőségét.

Anyag és módszer

A talajok leírása

A MÖ vizsgálatok adatbázisának talajmintái 69 talajszelvény 339 különböző genetikai szintjeiből származnak (*I. ábra*). A hazai osztályozás szerint tekintve, a vizsgálatba bevont szelvények csaknem kétharmada erdőtalaj, közel azonos arányban található mezősegi illetve réti, vagy öntéstalajok (14 és 11%), 9% a váz- vagy közethatású talajok aránya, két szelvény pedig szikes (Karcag). A feltárt 44 erdőtalaj szelvény zöme Zala-megyében, illetve Keszthely környékén található, ezek elsősorban Ramann-féle, illetve agyagbemosódásos barna erdőtalajok.

Pszudoglejes barna erdőtalajt Magyarzombatfán tártunk fel. A vizsgált mezőségi szelvények többsége karbonátos (két szelvény kivételével), jellemzően vályog, agyagos vályog fizikai féleségű. Réti és öntéstalajok zömében a Tiszántúlon, a Mezőföldön, illetve a Dráva mentén kerültek feltárára, nagy részük nehéz mechanikai összetételű, háromnegyedük karbonátos. Humuszkarbonát, futóhomok és rendzina talajok egy-két szelvénnyel képviseltetik magukat az adatbázisban.



1. ábra

A mechanikai összetétel adatbázis talajmintáinak származási helye (zárójelben a feltárt szelvények száma)

A talajminták alapvizsgálatait a hazai talajvizsgálati módszertan szerint végeztük el (MSZ-08-0206-2-78; Buzás, 1988; 1993). Az adatbázisból – az eredmények megbízhatóságának növelése céljából – kiszűrtük az extrém kicsi és nagy pH-jú ($\text{pH}_{\text{DV}} \leq 5,5$, $\text{pH}_{\text{DV}} \geq 9,5$), a nagy humusztartalmú (humusz % ≥ 5) és nagy mésztartalmú (CaCO_3 % ≥ 35) talajmintákat (ez összesen 3%-ot jelent). Későbbi következtéseink tehát azokra a talajmintákra érvényesek, melyek az előbbi tulajdonságaik alapján a megadott értelmezési tartományba esnek.

A mechanikai összetétel vizsgálatok

Összehasonlító MÖ vizsgálatokat végeztünk az MSZ (MSZ-08-0205-78) és az ISO/DIS (ISO/DIS 11277:1994) módszerekkel. Választásunk azért esett a régebbi ISO/DIS szabványra az újabb ISO (ISO 11277:2009(E)) szabvány helyett, mert

a., a két módszertan közt nincs lényeges elvi különbség;

b., az ISO módszer az ISO/DIS módszerhez képest olyan módszertani egyszerűsítéseket tartalmaz, ami ugyan könnyebbé teszi a munkát, de – megítélésünk szerint – csökkenti a mérések pontosságát;

c., az ISO/DIS módszer az ISO módszerrel ellentétben a 0,05 mm-es por/homok mérethattárral számol, ami lényegesen egyszerűsíti az MSZ módszerrel történő összehasonlítást.

1. táblázat

A mechanikai összetétel adatbázis főbb talajtani jellemzői

Tulajdonság (1)	Átlag (2)	Szórás (3)	Minimum	Maximum
ISO_agyag ^a (m%)	31,63	11,41	4,01	72,90
ISO_por ^b (m%)	43,54	13,48	5,04	79,39
ISO_homok ^c (m%)	24,84	18,83	0,71	89,71
MSZ_agyag ^a (m%)	24,58	12,13	1,90	56,80
MSZ_por ^b (m%)	44,00	13,53	6,20	78,50
MSZ_homok ^c (m%)	30,94	19,55	1,93	83,93
Arany-féle kötöttség	45	12	19	96
pH(H ₂ O)	7,5	0,9	4,4	9,4
humusz (m%)	1,7	1,5	0,0	10,6
CaCO ₃ (m%)	6,9	9,5	0,0	48,2

^aagyag, agyag frakció (< 0,002 mm); ^bpor, por frakció (0,002–0,05 mm); ^chomok, homok frakció (0,05–2,0 mm), nemzetközi (ISO/DIS) ill. magyar szabvány (MSZ) szerinti előkészítéssel (N=339)

Az MSZ módszernél a talajok mérőlombikos eljárással meghatározott sűrűség értékei alapján számoltuk a részecskék ülepedési sebességét, illetve a pipettázási időket és mélységeket. Az ISO/DIS szabvány esetében – a módszerhez igazodóan – az átlagsűrűség (2,65 g cm⁻³) értékek szerint dolgoztunk. A méréseket szobahőmérsékleten végeztük, mindkét módszernél hőmérsékleti korrekciókkal számolva, a Pannon Egyetem Georgikon Karának Növénytermesztési és Talajtani Tanszékén.

Az ISO/DIS módszer nem írja le egyértelműen, hogy mely esetben kell elvégezni a humuszanyagok roncsolásán túl a mész és a vas-(oxi)hidroxidok

eltávolítását, ezt a vizsgálatot végző döntésére bízta, ami nagyfokú bizonytalanságot okoz a mérési eredmények összehasonlíthatóságában. Ebből a megfontolásból a teljes mintaanyagon elvégeztük mindhárom ragasztóanyag eltávolítását a javasolt módszertan szerint. A kezelések során alkalmazott reagensek mennyiségét – az ISO/DIS szabványnak megfelelően – a humusz-, a mész- és a vas-(oxi)hidroxid tartalomhoz igazítottuk.

Az ISO/DIS módszer esetében a mérési eredményeket vagy az összes talaj százalékában adhatjuk meg (ilyenkor a százalékos agyag-, por- és iszapfrakció, illetve humusz és mésztartalom együttesen adja a 100%-ot), vagy a diszpergált talaj százalékában (ebben az esetben a mért agyag-, por és homoktartalom összege a 100%). A számolások során a mérés kezdetekor bemért talaj mennyisége és a mért agyag-, por- és homokfrakció, valamint az alapvizsgálatokból származó humusz- és mésztartalom összes mennyisége közti különbséget „előkészítési veszteségként” határoztuk meg (az a kioldott vagy a centrifugálás után kolloidális formában lebegő állapotban maradt talajásvány mennyiség, mely az előkészítések során elöntésre került; a vizsgált talajok esetében maximálisan 25,3 % volt). Ezt a talajmennyiséget egyezményesen az agyagfrakció részeként értelmeztük és korrekcióként hozzáadtuk a ténylegesen mért agyagtartalomhoz. (Az előkészítési veszteség „kezelésére” egyébként nem találtunk utalást az ISO/DIS szabványban, és a vonatkozó szakirodalmakban is csak elvéve (pl. KUBOTA, 1972).) Mind az összes talaj százalékában, mind pedig a diszpergált talaj százalékában megadott MÖ eredmények az ily módon korrigált agyag mennyiségeket tartalmazzák. Megfontolandó, hogy melyik eredményközlés agyag-, por- és homokfrakció adatai vehetők össze jobban az MSZ módszer adataival. Előzetes korrelációs vizsgálataink és szakmai megfontolások (pl. hogy a három szemcsefrakció összege 100% legyen) után arra a következtetésre jutottunk, hogy az ISO/DIS módszer eredményeiből a diszpergált talaj százalékában megadott frakciókat választjuk ki az összehasonlító vizsgálatok céljára.

Az MSZ és ISO módszerekkel végzett MÖ vizsgálatok eredményeit és a talajtani alapvizsgálati adatokat tartalmazó talajfizikai adatbázis lehetőséget nyújtott arra, hogy megvizsgáljuk az MSZ módszer eredményeinek ISO/DIS módszerű adatokká történő konverziójának esélyét és a kialakított becslési eljárás megbízhatóságát. Olyan konverziós módszer kidolgozására törekedtünk, mely az MSZ módszer eredményei mellett a talajok alapvizsgálati adatait is felhasználja a becslés során.

Statistikai vizsgálatok

A konverziós módszer kidolgozásához az eredeti adatbázist 2/3 – 1/3 arányban „becslő” és „teszt” részadatbázisokká bontottuk. A „becslő” adatállományon történt a konverziós egyenletek kidolgozása, míg a „teszt” adatállomány a módszer validálására szolgált. Az előzetes adatelemzések után lineáris regressziós módszerrel (SPSS Statistics, Regression, Automatic linear modeling (LINEAR), Standard model, Best subsets, AICC information criterion, 10 component models) vizsgáltuk a talajok MSZ módszer szerinti százalékos agyag-, por- és

homoktartalma, a humusz- és mésztartalma, illetve a desztillált vizes szuszpenzióban mért pH-ja, (független változók) és az ISO/DIS módszer szerinti százalékos agyag-, por- és homoktartalma (függő változók) közti kapcsolatot. Előzetes tapasztalataink alapján a becslő egyenletekbe bevontuk a független változók transzformált (négyzetes, logaritmikus és reciprokok és szorzatok) alakjait is (TÓTH et al., 2015; MAKÓ et al., 2017a).

A fenti módon kialakított pedotranszfer függvények (PTF) pontosságát a determinációs koefficiens (R^2) és az átlagos négyzetes eltérés négyzetgyöke (RMSE) (m%) (1. egyenlet) alapján vizsgáltuk:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad [1]$$

ahol y_i az ISO/DIS módszerrel mért agyag-, por- vagy homoktartalom, \hat{y}_i a becsült agyag-, por- vagy homoktartalom, N a mintaszám.

A becslések megbízhatóságát a „teszt” adatállományon vizsgáltuk, a fenti statisztikai mutatókkal.

A talajadatbázis mintáit ezután az USDA háromszögdiagram alapján fizikai féleség szerint kategorizáltuk az R program (R Core Team, 2013) 'soiltexture' programcsomagjának (MOEYS, 2014) algoritmusai alapján. Az MSZ és ISO/DIS módszerekkel mért, illetve a kidolgozott PTF-ekkel becsült agyag-, por- és homoktartalmak alapján meghatározott fizikai féleség kategóriákat összehasonlítottuk egymással, vizsgáltuk azok megegyezőségét („megegyezőségi mátrix” vizsgálatok). Szintén a fenti programcsomag alkalmazásával megrajzoltuk az USDA háromszögdiagramokat a mért és becsült MÖ adatok, fizikai féleség kategóriák vizuális összehasonlítása céljából, majd a textúra háromszögdiagramok MÖ adatait az agyag – por – homok százalék koordinátákból X – Y koordinátarendszerbe konvertáltuk (MOEYS, 2009). Kiszámoltuk a kétdimenziós Kernel sűrűségfüggvényt ('TT.kde2d()'), majd egy visszakonvertálás után ábráztuk a háromszögdiagramokon a mért és a becsült MÖ adatok adatszerkezetének szemléltetése végett (MOEYS, 2014). A Kernel sűrűségbecslés széles körben elterjedt módszer a megfigyelések sűrűségének kódolására és az adatok kiterjedésének térbeli ábrázolására (SIMONOFF, 1996; VENABLES & RIPLEY, 2002).

A MÖ adatok összehasonlítása bonyolult feladat, hiszen ezek a mérési eredmények kompozit adatok, melyeknek az összege 100%. Ez azt jelenti, hogy az egyik frakció növekedése a többi frakció csökkenését eredményezi, vagyis az egyes frakciók eloszlása nem független egymástól. Ennek a problémának egy megoldási lehetőségeként a 'soiltexture' R csomag ('TT.css2xy()') segítségével az USDA háromszögdiagramokon ábrázolt (a két módszerrel mért és a becsült) MÖ adatokat X-Y koordinátarendszerbe konvertáltuk, majd kiszámoltuk az MSZ és az ISO/DIS módszerrel mért, illetve a PTF-ek segítségével becsült és az ISO/DIS módszerrel mért pontok távolságát (MOEYS, 2009). Ezt a dimenzió nélküli változót használtuk ezután a mért és becsült eredmények összehasonlítására, a becslési módszer

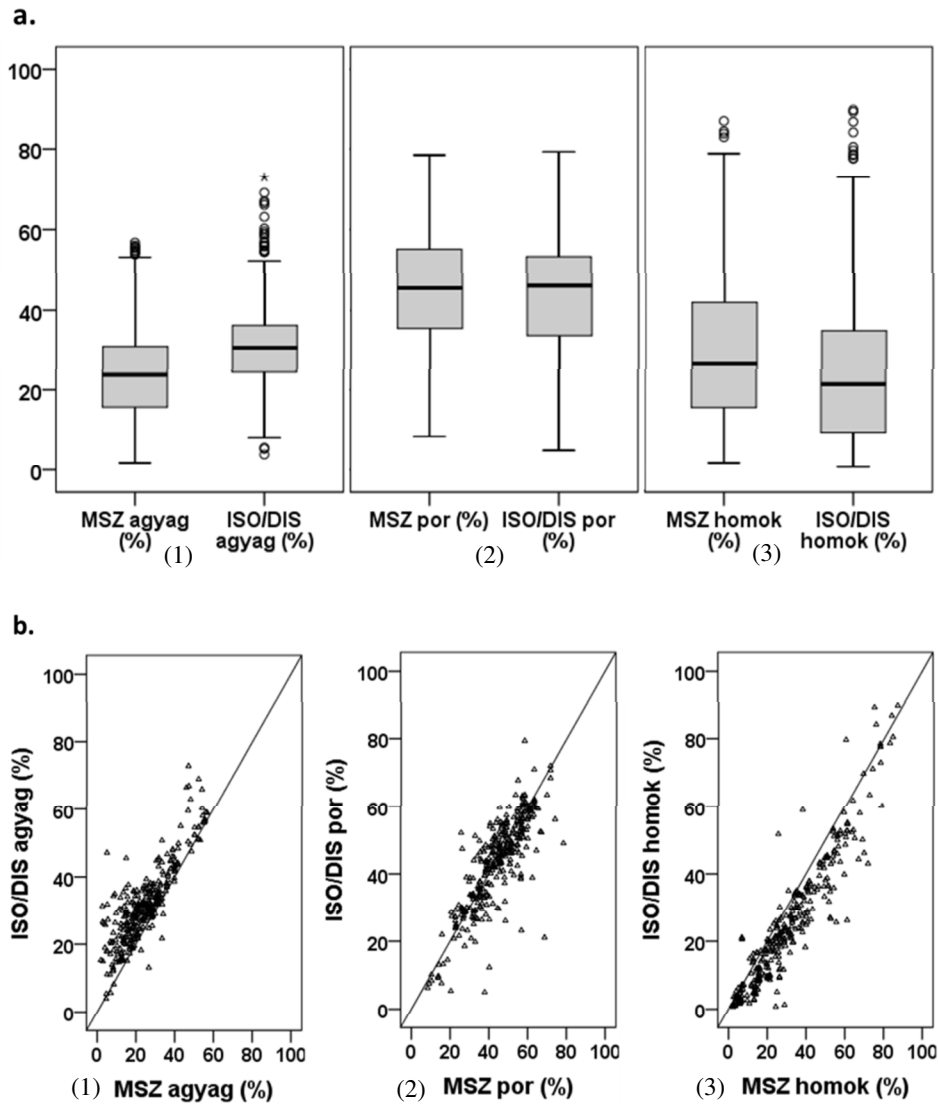
hatékonyságának jellemzésére. Az egyes frakciók páronkénti összehasonlítására a T-próbát alkalmaztuk (SPSS Statistics, Paired-Samples T test). Megvizsgáltuk továbbá, hogy mely MÖ vizsgálati módszer eredményei korrelálnak jobban a két leggyakrabban használt közvetett fizikai féleség meghatározási módszer (a talajok Arany-féle kötöttsége és higroszkóposága) vizsgálati eredményeivel.

Eredmények és következtetések

A vizsgálatokba vont talajok mind talajgenetikailag, mind pedig fizikai és kémiai tulajdonságaikban nagyfokú heterogenitást mutatnak (1. táblázat). A 2/a. ábra boxplot és a 2/b. ábra pontdiagramjain összehasonlítottuk az MSZ és ISO/DIS módszerrel meghatározott MÖ vizsgálatok eredményeit. Az agyag- ($< 0,002$ mm), por- ($0,002$ – $0,05$ mm) és homokfrakció ($> 0,05$ mm) átlagos értéke $24,6$ – $44,5$ – $30,9\%$ volt az MSZ módszer szerint, míg az ISO/DIS módszer alapján $31,6$ – $43,5$ – $24,9\%$ mértünk. Látható, hogy az ISO/DIS szabványnál alkalmazott előkezelések némiképp megváltoztatták a frakciók arányait: az agyagtartalom szignifikánsan nőtt, míg a portartalom kisebb mértékben, a homoktartalom nagyobb mértékben igazolhatóan csökkent. Ennek oka főként az volt, hogy az MSZ módszernél az elemi részecskék a talajminták egy részénél „pseudofrakciók” formájában mikroaggregátumként ülepednek a mérések során a Na-pirofoszfátos kémiai és a 6–10 órás fizikai (rázatás) diszpergálás ellenére. Az agyagfrakció egy része ilyenkor a mikroaggregátumokban organominerális kötésben marad és a por- vagy homokfrakció részeként mérjük vissza (FEDOTOV et al., 2007). Egy másik lehetséges ok a nagy karbonát-tartalmú talajoknál a por- és homokfrakcióba eső karbonát darabkáknak (esetleges konkréciók vagy kőzettörmelékek talajdarálás utáni törmelékeinek) a sósavas előkezelés során történő kioldódása lehet.

A 2/b. ábrán az is jól látható, hogy a talajok tulajdonságaitól függően eltérő mértékben változtak meg a frakciók arányai: néhány esetben az ISO/DIS módszer alkalmazása – az általános trenddel szemben – az agyagtartalom csökkenését, illetve a homoktartalom növekedését eredményezte és az esetek egy részében nem volt megfigyelhető a frakciók arányainak megváltozása. A portartalmak esetében volt a legnagyobb a szórás: közel megegyező esetben történt portartalom csökkenés és növekedés. Az ISO/DIS módszer esetében az MSZ módszer eredményeihez viszonyított agyagtartalom csökkenések nagy valószínűséggel módszertani okokra vezethetők vissza. Az előkészítések során az agyagfrakciót alkotó ásványok egy része degradálódott (vas-(oxi)hidroxidok kioldódása, agyagásványok átalakulása), „előkészítési veszteségként” előtérésre került, amelyet az eredmények kiszámításakor valószínűleg nem a megfelelő mértékben vettünk figyelembe (BALÁZS et al., 2011). Az ISO/DIS homokfrakció MSZ módszer eredményeihez viszonyított esetenkénti növekedésének egyik elképzelhető oka lehet a módszertől függően különböző mennyiségű vízben oldhatatlan Ca-hexametafoszfát, illetve Ca-pirofoszfát részecskék képződése a diszpergálás során (KACHINSKY, 1965). A porfrakciók arányának nagy változatossága pedig valószínűleg azzal magyarázható, hogy – a talajokban eredetileg meglévő kötőanyagok mennyiségétől és a talajok

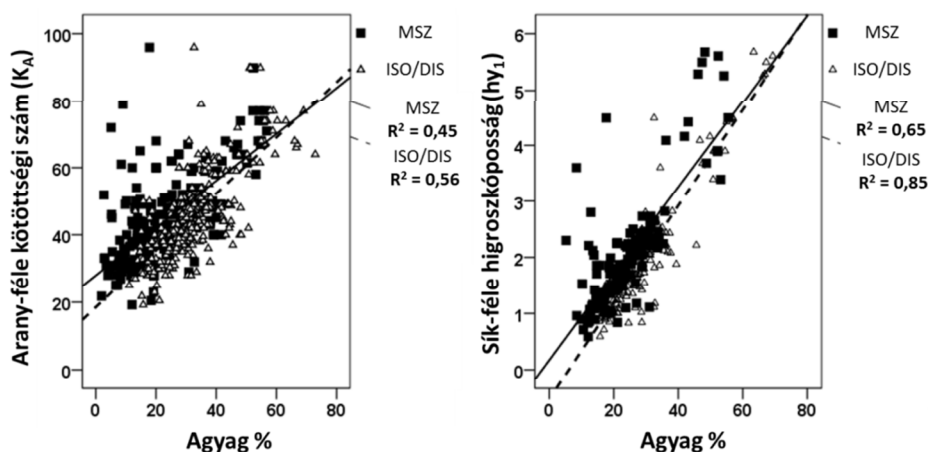
szerkezetességétől függő mértékben – az előkészítések hatására egyrészt a talajok nagyobb, a homokfrakcióba eső aggregátumainak szétesésével megnövekedett nemcsak az agyag, hanem a por mérettartományba eső részecskék mennyisége is, másrészt a por mérettartományba eső mikroaggregátumok is széteshettek kisebb alkotóelemekre, miáltal le is csökkenhetett a porfrakció mennyisége.



2. ábra

A két módszerrel meghatározott mechanikai összetétel frakciók összehasonlítása

A továbbiakban megvizsgáltuk, hogy mely MÖ vizsgálati módszer eredményei tekinthetők szakmai szempontból pontosabbaknak. Ismert, hogy az Arany-féle kötöttségi számot (a képlékenység felső határát), illetve a Sík-féle higroszkóposzást (monomolekuláris rétegű vízgőzadszorpciót) elsősorban a talajok agyagtartalma határozza meg. A 3. ábrán bemutatott eredmények szerint mind a talajok Arany-féle kötöttségi számával, mind pedig a higroszkóposzásti értékekkel szorosabb kapcsolatot mutatott az ISO/DIS módszerrel mért ($R^2 = 0,56$ és $0,85$), mint az MSZ módszerrel mért ($R^2 = 0,45$ és $0,65$) agyagtartalom, így az eredmények várakozásainknak megfelelően igazolták az ISO/DIS vizsgálatok nagyobb pontosságát. (A szakirodalomból ismert, hogy mind a kötöttségi szám, mind pedig a higroszkóposzást az agyagtartalomtól kívül számos egyéb talajtulajdonság függvénye. Ezért az összefüggések mindkét módszer esetében valószínűleg jónak tekinthetők (DI GLÉRIA et al., 1957).) A fentiekből az következik, hogy amennyiben a MÖ mérések eredményeit kutatási céllal, nagyobb pontossággal kívánjuk meghatározni, célszerű a jóval idő- és eszközigényesebb ISO/DIS módszert alkalmaznunk. Szintén ez a módszer javasolható nemzetközi összehasonlító munkák során is (pl. az egyes talajok nemzetközi talajosztályozási rendszerekbe történő besorolásakor).



3. ábra

A talajok kétféle módszerrel mért agyagtartalmának kapcsolata az Arany-féle kötöttségi számmal és a Sík-féle higroszkóposzásttal

Amikor nem áll rendelkezésre laboratóriumi kapacitás az ISO/DIS szabvány szerinti mérésekre, vagy régebbi, MSZ módszer szerinti vizsgálati eredményeket kell összevetnünk nemzetközi mérési adatokkal, akkor célszerű lenne a két módszer eredményeit egymásnak megfeleltetni valamilyen módon. Ezért a továbbiakban megvizsgáltuk az MSZ módszertan szerint mért MÖ adatok ISO/DIS adatokká történő konverziójának lehetőségét. Vizsgálataink egyértelművé tették, hogy az

MSZ és az ISO/DIS módszertan eredményei közti különbség oka nagyrészt az, hogy az MSZ módszertannal csupán a szerkezeti elemek részleges dezaggregációját tudjuk elérni, az elemi részecskék egy része mikroaggregátum formában marad. Feltételeztük tehát, hogy a talajok szerkezetstabilitásának kialakításában szerepet játszó talajkomponensek mennyisége (humusz- és mésztartalom), illetve a szerkezetstabilitásra szintén ható talaj pH eredményesen bevonható független változóként a kidolgozandó becslőegyenletekbe. Ezek a talajtulajdonságok alapvizsgálati paraméterekként általában rendelkezésre állnak, szemben a talajok nehézkesebben mérhető vas-(oxi)hidroxid tartalmával, vagy a kicserélhető Na^+ tartalommal, mely talajtulajdonságok egyébként szintén befolyásolhatják az aggregátum-stabilitást. A 2. táblázat tartalmazza az ISO/DIS és az MSZ módszerrel mért MÖ frakciók közötti összefüggést leíró egyenleteket. A statisztikai vizsgálatok alátámasztják, hogy a két módszertan közötti konverziós függvényekben a MÖ-t jellemző frakciók mennyisége mellett valóban fontos független változó a talaj humusz- és mésztartalma, továbbá a vizes pH-ja.

2. táblázat

Az ISO/DIS agyag-, por és homokfrakciók becslésére javasolt pedotranszfer függvények

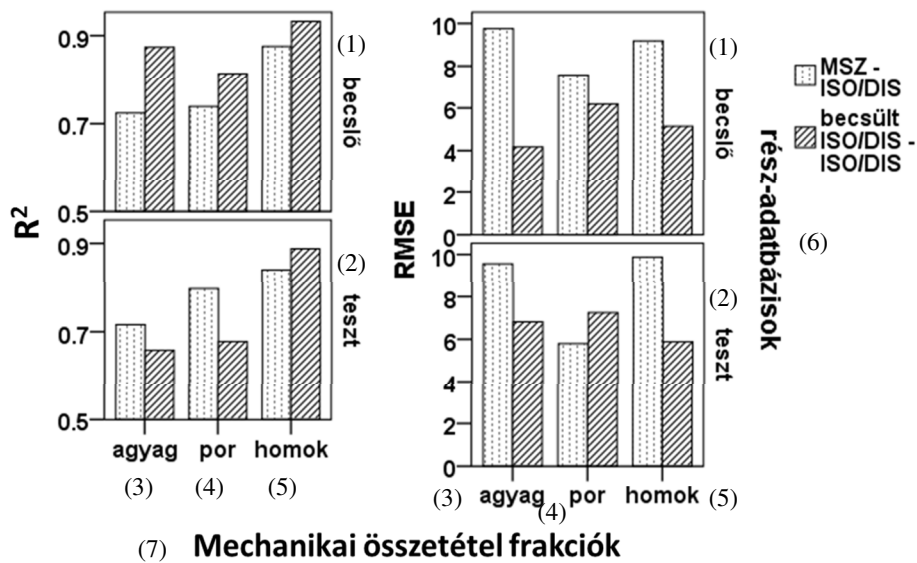
(1) becslt agyag _{ISO/DIS} * = 64,501 + 0,013 * (A _{MSZ}) ² - 641,424 * (1 / P _{MSZ}) - 0,019 * (A _{MSZ} * P _{MSZ}) + 0,011 * (CA) ² - 0,100 * (H _{MSZ} * OM) - 0,214 * (pH _{DV}) ² + 2,977 * (1 / OM) - 0,090 * (P _{MSZ} * OM) + 1,212 * (pH _{DV} * OM) - 0,007 * (OM _{MSZ} * CA) - 0,009 * (P _{MSZ} * H _{MSZ}) + 0,032 * (A _{MSZ} * pH _{DV}) - 0,859 * (OM) ² + 0,002 * (1 / CA) + 4,868 * OM
(2) becslt homok _{ISO/DIS} = - 3,828 + 475,114 * (1 / P _{MSZ}) + 0,009 * (H _{MSZ} * CA) - 0,008 * (CA) ² + 0,374 * H _{MSZ} + 0,005 * (A _{MSZ} * H _{MSZ}) - 0,002 * (A _{MSZ}) ² - 0,017 * (H _{MSZ} * OM) + 0,003 * (H _{MSZ}) ²
(3) becslt por _{ISO/DIS} = 100 - (becslt agyag _{ISO/DIS} + becslt homok _{ISO/DIS})

*A_{MSZ}, P_{MSZ}, H_{MSZ}: az MSZ módszerrel mért MÖ (agyag-, por-, homok-) frakciók (< 0,002 mm, 0,002–0,05 mm, > 0,05 mm) (%); OM: humusz tartalom (%); CA: CaCO₃ tartalom (%); pH_{DV}: desztillált vizes szuszpenzióban mért pH

A 4. ábrán láthatók a konverziós egyenletek hatékonyságát jellemző RMSE és R² értékek a becslő és teszt adatbázis részekén végzett vizsgálatok alapján. Az ábra alapján elmondható, hogy a pedotranszfer függvények alkalmazásával jelentősen sikerült egymáshoz közelíteni a mért és a becslt ISO/DIS frakciók mennyiségeit, általában nagymértékben csökkent az átlagos eltérés (RMSE). A becslő adatbázis esetében, az RMSE értékek az agyagfrakciónál 9,75-ről 4,19%-ra, a porfrakciónál 7,57-ről 6,19%-ra és a homokfrakciónál 9,18-ről 5,14%-ra csökkentek. A teszt adatbázis esetében az agyagfrakciónál 9,56-ről 6,81%-ra, a homokfrakciónál 9,88-ről 5,88%-ra csökkentek az RMSE értékek. A teszt adatbázis porfrakciónál kisebb mértékű (1,44%-os) RMSE növekedést tapasztaltunk, ami egyrészt a porfrakció számítási módjából következik (hiszen ennél a frakciónál adódnak össze az agyag- és homokfrakciók becslési hibái), másrészt azt is mutatja, hogy a porfrakció

becslése a legkevésbé megbízható. Az R^2 értékek esetében a becslő adatbázison egyöntetűen kismértékű növekedés tapasztalható (agyag-, por és homokfrakciónál 0,15; 0,07 és 0,05 értékkel nőtt), míg a teszt adatbázison az agyag- és portartalomnál a regressziós kapcsolat kismértékű (R^2 : 0,06 és 0,12) csökkenését, a homoktartalomnál kismértékű (R^2 : 0,05) növekedését tapasztaltuk. Ezek az eredmények szintén alátámasztják azt a fenti tapasztalatunkat, miszerint a javasolt becslési módszer szerint a portartalom számítása kevésbé megbízható. (A becslési eljárás kidolgozása során – a fentiekhez leírtakhoz hasonlóan – megkíséreltük olyan pedotranszfer függvények kidolgozását is, amikor az ISO/DIS agyag- és portartalmat, vagy a por- és homoktartalmat becsültük az MSZ frakciók és az alapvizsgálati paraméterek ismeretében, és a harmadik homok- vagy agyagfrakciót számítottuk az összegek 100%-ból történő kivonásával, azonban ezek a változatok a bemutatott konverziós függvényeknél rendre gyengébb hatékonyságot mutattak.)

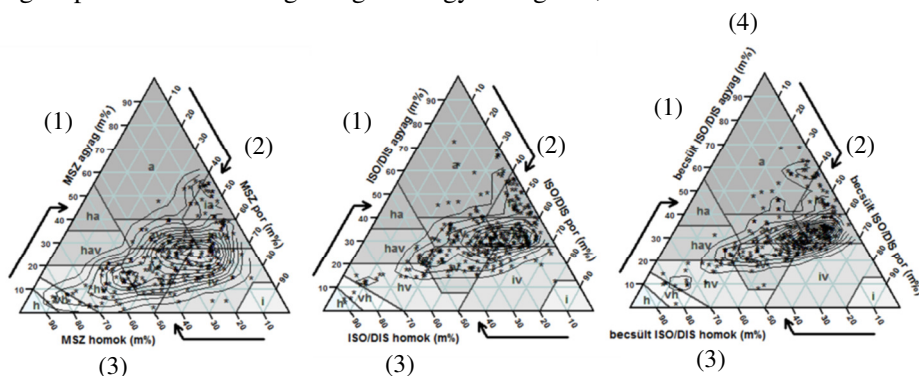
Meg kell jegyeznünk ugyanakkor – az ide vonatkozó kutatási tapasztalatok alapján –, hogy az R^2 értékek kevésbé informatívak a MÖ frakció becslések megbízhatóságáról, hiszen nem tükrözik megfelelően a frakciók „alul-”, vagy „felülbecslését” (LIN, 1989; LIN et al., 2002; FISHER et al., 2017; MAKÓ et al., 2017a).



4. ábra

A javasolt konverziós egyenletek becslési pontosságának és megbízhatóságának bemutatása (R^2 : a mért MSZ és ISO/DIS frakciók, illetve az MSZ frakciókból becsült és mért ISO/DIS frakciók közti determinációs koefficiens; RMSE: a mért MSZ és ISO/DIS frakciók, illetve az MSZ frakciókból becsült és mért ISO/DIS frakciók közti átlagos négyzetes eltérés négyzetgyöke (m%))

Egy másik lehetőség a konverziós becslő egyenletek kiértékelésére az, amikor az agyag-, por- és homokfrakciókat összevonva együtt értékeljük úgy, hogy a talajokat elhelyezzük az USDA háromszögdiagramon és vizsgáljuk a fizikai féleség kategóriák egymásnak való megfeleltethetőségét. Az 5. ábrán az MSZ és ISO/DIS módszerekkel mért, illetve a konverziós egyenletekkel MSZ frakciókból számított ISO/DIS MÖ adatokat helyeztük el háromszögdiagramokon. A diagramok alapján megállapítható, hogy a mért adatpontok térbeli szerkezete az MSZ és az ISO/DIS módszerek esetében meglehetősen eltérő. Az MSZ módszer szerint a legtöbb talaj a vályog (77 db), az iszapos vályog (77 db) és a homokos vályog (48 db) fizikai féleség kategóriába sorolható, míg az ISO/DIS mérési pontok zöme az iszapos agyagos vályog (93 db), az agyagos vályog (72 db) és a vályog (54 db) kategóriába oszthatók. A becsült ISO/DIS MÖ adatok szerkezete közelít a mért ISO/DIS adatszerkezethez, bár annál kicsit koncentráltabb: az iszapos agyagos vályog (104 db), az agyagos vályog (70 db) és a vályog (54 db) fizikai féleség kategóriák az uralkodóak itt is. Elmondható, hogy a két módszerrel mért MÖ adatok alapján osztályozott fizikai féleség kategóriák egymással 40,1%-os egyezést mutattak, míg a mért és MSZ MÖ-ből konverziós egyenletekkel becsült ISO/DIS adatok alapján megállapított fizikai féleség kategóriák egyezősége 66,7%-os volt.



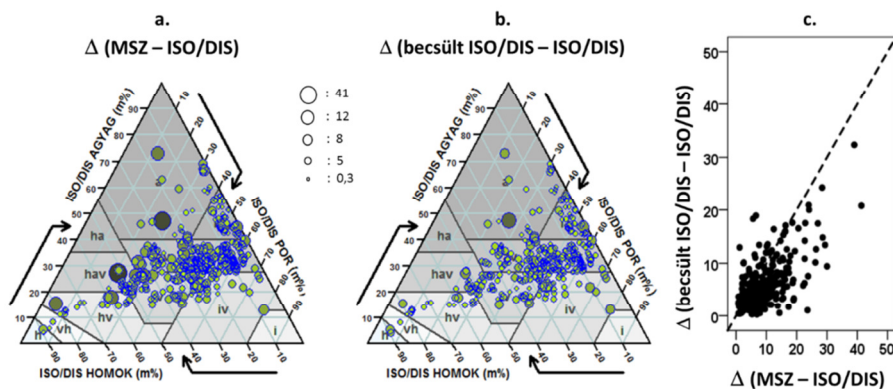
5. ábra

A különféle módszerekkel mért és a konverziós egyenletekkel becsült mechanikai összetétel eredmények összehasonlítása USDA háromszögdiagramokon, a Kernel sűrűségfüggvény ábrázolásával

A „megegyezőségi mátrix” jól mutatja, hogy a javasolt becslési módszerrel jelentős mértékű hasonlóság-javulás érhető el az MSZ és az ISO/DIS adatállományok közt. Ez az összehasonlító módszer azonban inkább kvalitatívnak tekinthető; nem tájékoztat arról, hogy ha különböző fizikai féleség kategóriákba sorolódnak a különböző módszerekkel mért, illetve becsült adatok, akkor az eltérés a pontpárok között mekkora. Erre a célra végeztük el a távolság számításokat, melynek eredményeit a 6. ábrán mutatjuk be. Az MSZ – ISO/DIS összehasonlításban általában nagyobb a pontpárok egymástól való távolsága (az átlagos távolság 9,0 (max. 40,3; min. 0,8), míg az MSZ-ből konverziós egyenlettel

becsült ISO/DIS – ISO/DIS összehasonlításában 5,5 (max. 32,3; min. 0,3)). Az általunk vizsgált mintáknál tehát általánosságban elmondható, hogy – a homok textúrájú talajok kivételével – az összes fizikai féleség kategóriában a konverziós egyenletekkel jelentősen javul az MSZ és ISO/DIS módszerekkel mért eredmények egyezősége.

Végül megvizsgáltuk, hogy milyen a javasolt pedotranszfer függvény segítségével ISO/DIS adatokká átkonvertált agyagtartalmak kapcsolata az Arany-féle kötöttséggel és a Sík-féle higroszkópossággal. Megállapítható, hogy a regressziós kapcsolatok a konverzió hatására kis mértékben szintén javultak (K_A -agyag_{MSZ}: $R^2=0,45$; K_A -agyag_{becsült ISO/DIS}: $R^2=0,51$; hy_1 -agyag_{MSZ}: $R^2=0,65$; hy_1 -agyag_{becsült ISO/DIS}: $R^2=0,73$). Ez azt mutatja, hogy ha a becslési módszer az ISO/DIS mérési módszert pontosságában nem is képes kiváltani, de használata kutatási munkákban, összehasonlító vizsgálatokban mindenképp javasolható, amennyiben csak az MSZ MÖ vizsgálatra van lehetőségünk, vagy régebben mért MSZ MÖ adatok állnak rendelkezésünkre.



6. ábra

A MÖ pontpárok térbeli távolsága a.) az MSZ MÖ és ISO/DIS MÖ, valamint b.) MSZ MÖ-ből pedotranszfer függvénnyel konvertált ISO/DIS és mért ISO/DIS MÖ háromszögdiagramokon ábrázolva (a nagyobb buborékok az egymástól messzebb, a kisebbek az egymáshoz közelebb elhelyezkedő pontpárokat jelölik, c.) a távolságok egymáshoz viszonyított aránya mintánként

A kutatás következő szakaszában tovább kívánjuk pontosítani mind az ISO/DIS mérési módszert, mind pedig a konverzió lehetőségét. Többek közt arra keressük a választ, hogy mivel magyarázható a mérési eljárás során tapasztalható (néhány esetben igen nagymértékű) előkészítési veszteség, mennyire függ ez a talajok genetikai típusától, talajsvány-összetételétől és az egyéb talajtulajdonságoktól. Vizsgálni kívánjuk továbbá, hogy a MSZ–ISO/DIS MÖ konverzió mennyiben tehető pontosabbá, megbízhatóbbá egyéb talajtulajdonságok ismeretében, illetve hogy a talajok aggregátum-stabilitását kifejező egyéb

mérőszámok milyen összefüggést mutatnak a két módszerrel mért MÖ eredmények eltéréseivel.

Összefoglalás

Az ország főbb talajtípusait reprezentáló talajfizikai adatbázison összehasonlítottuk az MSZ-08-0205-78 és az ISO/DIS 11277:1994 módszerrel meghatározott mechanikai összetétel vizsgálati eredményeket, megvizsgáltuk kapcsolatukat egyéb talajfizikai tulajdonságokkal (Arany-féle kötöttség és Sík-féle higroszkóposság), illetve bemutattuk a két módszer mérési eredményei közti konverzió egy lehetőségét.

Tapasztalataink szerint az ISO/DIS szabványnál alkalmazott előkezelések némiképp megváltoztatták a szemcsefrakciók arányait: az agyagtartalom szignifikánsan nőtt, míg a portartalom kisebb mértékben, a homoktartalom nagyobb mértékben igazolhatóan csökkent, melynek valószínűsíthető magyarázata az, hogy az MSZ módszernél az elemi részecskék egy része mikroaggregátum formában marad. Eredményeink igazolták az ISO/DIS vizsgálatok nagyobb pontosságát: mind az Arany-féle kötöttségi számok, mind a higroszkóposági értékek szorosabb kapcsolatot mutattak az agyagtartalom ISO/DIS módszerrel mért értékeivel, mint az MSZ módszerrel mért agyagtartalom adatokkal.

Az általunk javasolt pedotranszfer függvények alkalmazásával a becsült ISO/DIS frakciók mennyiségeit jelentősen sikerült közelíteni a mért értékekhez. Tapasztalataink szerint a konverziós módszer az agyag- és homokfrakciók becslésére jobban, a porfrakciókéra kevésbé megbízható. Pontosságában a becslési módszer jelen formájában az ISO/DIS mérési módszert ugyan nem képes kiváltani, de használata kutatási munkákban, összehasonlító vizsgálatokban mindenképp javasolható, amennyiben csak az MSZ módszer szerinti mechanikai összetétel vizsgálatokra van lehetőség, vagy régebben mért MSZ mechanikai összetétel adatok állnak rendelkezésre.

Kulcsszavak: mechanikai összetétel, előkészítési eljárások, pedotranszfer függvények

Kutatásunk a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFI Alapból valósult meg (KH 124765 és K119475 sz. NKFI pályázatok).

Irodalom

- AGU, 1947. Report of the subcommittee on sediment terminology. Transactions of American Geophysical Union. **28**. 936–938.
- ATTERBERG, A., 1912. Die mechanische Bodenanalyse und die Klassifikation der Mineralboden Schruedens. Internationale Mitteilungen für Bodenkunde. **2**. 312–342.

- BALÁZS, R., NÉMETH, T., MAKÓ, A., KOVÁCS KIS, V. & KERESZTES, M., 2011. A mechanikai összetétel meghatározása során alkalmazott minta-előkészítés talajászványtani hatása. In: LIII. Georgikon Napok. Keszthely. 2011. szept. 29-30. 73–83.
- BUZÁS I. (szerk.), 1988. Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 2. A talajok fizikai-kémiai és kémiai vizsgálati módszerei. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest. p. 243.
- BUZÁS I. (szerk.), 1993. Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 1. A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata. Inda 4231 Kiadó. Budapest. p. 357.
- DI GLÉRIA, J., KLIMES-SZMIK, A. & DVORACSEK, M., 1957. Talajfizika és kolloidika. Akadémia Kiadó. Budapest.
- FEDOTOV, G.N., SHEIN, E.V., PUTLYNEV, V.I., ARKHANGEL'SKAYA, T.A., ELISEEV, A.V. & MILANOVSKII, E.Y. 2007. Physicochemical bases of differences between the sedimentometric and laser diffraction techniques of soil particle-size analysis. *Eurasian Soil Science*. **40**. 281–288.
- FILEP GY., 1995. Talajvizsgálat. Debreceni Agrártudományi Egyetem. Debrecen.
- FISHER, P., AUMANN, C., CHIA, K., O'HALLORAN, N. & CHANDRA, S., 2017. Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis. *PLoS ONE* 12(5): e0176510. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176510>
- GEE G.W. & OR D., 2002. Particle-Size Analysis. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods* (Eds.: DANE J.H. & TOPP G.C.). Madison, WI. 255–293.
- GEE, G. W. & BAUDER, J. W., 1986. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. 383–411.
- GENRICH, D. A. & BREMNER, J. M., 1972. A reevaluation of the ultrasonic vibration method of dispersing soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **36**. 944–947.
- GOST (State Standard) 12536-79., 1979. Soils. Methods of laboratory particle-size and microaggregate-size distributions.
- HALL, A.D., 1904. The mechanical analysis of soils and the composition of the fractions resulting therefrom. *J. Chem. Soc. Trans.* **85**. 950–963.
- ISO 11277: 2009 (E). Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO/DIS 11277:1994. Soil quality; determination of particle size distribution in mineral soil material; method by sieving and sedimentation following removal of soluble salts, organic matter and carbonates.
- IUSS WORKING GROUP WRB., 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.
- JASSÓ F. (szerk.), 1989. '88 útmutató a nagyméretarányú országos talajtérképezés végrehajtásához. Agroinform Kiadó. Budapest.
- JURY, W.A., GARDNER, W.R. & GARDNER, W.H., 1991. *Soil Physics*. 5th Edition, John Wiley and Sons, New York.
- KACHINSKY, N.A., 1965. *Soil Physics*. Moscow. (in Russian)
- KUBOTA, T., 1972. Aggregate-formation of allophanic soils: effect of drying on the dispersion of the soils. *Soil Science and Plant Nutrition*. **18**. 79–87.

- LAVKULICS, L.M. & WIENS, J.H., 1970. Comparison of organic matter destruction by hydrogen peroxide and sodium hypochlorite and its effects on selected mineral constituents. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **34**. 755–758.
- LIN, L. 1989. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*. **45**. 255–268.
- LIN, L., HEDAYAT, A.S., SINHA, B. & YANG, M., 2002. Statistical methods in assessing agreement. *Journal of the American Statistical Association*. **97**. 257–270.
- MAKÓ, A. & HERNÁDI, H., 2010. A talajok szemcseösszetételének vizsgálata során alkalmazott különböző előkészítési módszerek összehasonlító értékelése. In: TÖRÖK Á. & VÁSÁRHELYI B. (szerk): *Mérnökgeológia, kőzetmechanika*. 101–108.
- MAKÓ, A., MÁTÉ, F., TÓTH, M., LÁSZLÓ, K. & NÉMETH, T., 2002. A különböző szabványos módszerek szerint mért agyagtartalom és néhány egyéb talajfizikai paraméter összefüggésének vizsgálata. XVI. Országos Környezetvédelmi Konferencia és Szakkiállítás. Siófok. 2002. szeptember 11–13. 231–239.
- MAKÓ, A., TÓTH, G., WEYNANTS, M., RAJKAI, K., HERMANN, T., TÓTH, B., 2017a. Pedotransfer functions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values. *European Journal of Soil Science*, doi: 10.1111/ejss.12456.
- MAKÓ, A., VARGA, T., HERNÁDI, H., LABANCS, V. & BARNA, GY., 2017b. Talajminták lézeres szemcseanalízisének módszertani tapasztalatai. *Agrokémia és Talajtan*. **66**. 223–250.
- MATHIEU, CL. & PIeltaIN, F., 2003. *Analyse chimique des sols. Méthodes choisies*. Editions Tec & Doc – Lavoisier, Paris.
- MATTHEWS, M.D., 1991. The effect of grain shape and density on the size measurement. In: *Principles, methods, and applications of particle size analysis* (Ed.: SYVITSKI, J.P.M.). Cambridge University Press. Cambridge. 22–33.
- MIKUTTA, R., KLEBER, M., KAISER, K. & JAHN, R., 2005. Review: organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **69**. 120–135.
- MILLER, M. P., RADCLIFFE, D. E. & MILLER, D. M., 1988. An historical perspective on the theory and practice of soil mechanical analysis. *J. Agron. Education*. **17**. 24–28.
- MOEYS, J., 2009. The Soil Texture Wizard R functions for plotting, classifying and transforming soil texture data *Pedometron*. **28**. 7–10.
- MOEYS, J., 2014. The soil texture wizard: R functions for plotting, classifying, transforming and exploring soil texture data. http://cran.r-project.org/web/packages/soiltexture/vignettes/soiltexture_vignette.pdf
- MSZ-08-0205-78. MÉM Ágazati Szabvány 1979. A talaj fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságainak vizsgálata, Budapest.
- MSZ-08-0206-2-78. MÉM Ágazati Szabvány 1979. A talaj egyes kémiai tulajdonságainak vizsgálata. Laboratóriumi vizsgálatok (pH-érték, szódában kifejezett fenoltalein lúgosság, vízben oldható összes só, hidrolitos /y1-érték/ és kicserélődési aciditás /y2-érték/).
- NEMES, A., WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., OUDE VOSHAAR, J.H., 1999. Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma*. **90**. 187–202.

- R CORE TEAM, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- RODERICK, G.L., 1966. A history of particle-size limits. Special report. Iowa State University. http://publications.iowa.gov/17268/1/IADOT_hr99_History_Particle_Limits.pdf
- RYŻAK, M. & BIEGANOWSKI, A., 2011. Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser diffraction method. J. Plant Nutr. Soil Sci. **174**. 624–633.
- SCHULTE, P., LEHMKUHL, F., STEININGER, F., LOIBL, D., LOCKOT, G., PROTZE, J., FISCHER, P. & STAUCH, G., 2016. Influence of HCl pretreatment and organo-mineral complexes on laser diffraction measurement of loess–paleosol-sequences. Catena. **137**. 392–405.
- SHAW, T.M. & ALEXANDER, L.T., 1936. A note on mechanical analysis and soils texture. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Proceedings of Soil Science Society of America. **1**. 303–304.
- SHEIN, E.V., 2009. The particle-size distribution in soils: problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification. Eurasian Soil Science. **42**. 284–291.
- SIMONOFF, J.S., 1996. Smoothing methods in statistics. Springer-Verlag, New York.
- SOCHAN, A., BIEGANOWSKI, A., BARTMIŃSKI, P., RYŻAK, M., BRZEZIŃSKA, M., DĘBICKI, R., STUCZYŃSKI, T. & POLAKOWSKI, C., 2015. Use of the laser diffraction method for assessment of the pipette method. Soil Sci. Soc. Am. J. **79**. 37–42.
- SOCHAN, A., BIEGANOWSKI, A., RYŻAK, M., DOBROWOLSKI, R. & BARTMIŃSKI, P., 2012. Comparison of soil texture determined by two dispersion units of Mastersizer 2000. Int. Agrophys. **26**. 99–102.
- SZABOLCS I. (Szerk.), DARAB K., FÓRIZS J.-NÉ, FÖLDVÁRI GY., JASSÓ F. & VÁRALLYAY GY., 1966. A genetikus üzemi talajtérképezés módszerkönyve. Országos Mezőgazdasági Minőségvizsgáló Intézet (OMMI). Budapest.
- TÓTH, B., WEYNANTS, M., NEMES, A., MAKÓ, A., BILAS, G. & TÓTH, G. 2015. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. European Journal of Soil Science., **66**,. 226–238.
- TÓTH G., 2009. Hazai szántóink minősítése a D-e-Meter rendszerrel. Agrokémia és Talajtan. **58**. 227–242.
- USDA, 1993. Soil Survey Division Staff. Soil survey manual. 18. chapter 3. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. http://soils.usda.gov/technical/manual/print_version/chapter3.html.
- VENABLES, W.N. & RIPLEY, B.D., 2002. Modern applied statistics with S. Fourth edition. Springer.
- YANG, H., 2013. The case for being automatic: introducing the automatic linear modeling (LINEAR) procedure in SPSS Statistics. Multiple Linear Regression Viewpoints. **39**. 27–37.

Particle size distribution analysis using the pipette method: comparison and conversion of Hungarian and international standards

¹A. MAKÓ, ^{1,2*}H. HERNÁDI, ¹G. BARNA, ³R. BALÁZS, ¹S. MOLNÁR, ⁴V. LABAN CZ, ^{1,2}B. TÓTH and ¹Z. BAKACSI

¹Institute for Soil Science and Agricultural Chemistry, Centre for Agricultural Research, Hungarian Academy of Sciences, Budapest

²Department of Crop Production and Soil Science, Georgikon Faculty, University of Pannonia, Keszthely

³Institute for Geological and Geochemical Research, Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Hungarian Academy of Sciences, Budapest

⁴Department of Soil Science and Agricultural Chemistry, Institute of Environmental Sciences, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, Szent István University, Gödöllő

Summary

The particle size distribution (PSD) values obtained for a soil database representing the main Hungarian soil types using the Hungarian standard (MSZ-08-0205-78) and the international standard (ISO/DIS 11277:1994) were compared with the pipette method. The relationship between these PSDs and other physical soil characteristics (upper limit of plasticity according to Arany, water vapour adsorption according to Sík) was also analysed, and a suggestion was made of how these results could be converted into each other.

Experience showed that the pre-treatments applied as part of the ISO/DIS method may change the ratio of particle size fractions: there was a significant increase in the clay content, while the silt content decreased to a lesser and the sand content to a greater extent, possibly because some of the particles remain in micro-aggregate form when the MSZ method is used. The results confirmed the greater accuracy of the ISO/DIS method: the clay contents measured with the ISO/DIS method exhibited stronger correlations with the upper limit of plasticity according to Arany and with hygroscopicity values than those measured with the MSZ method.

The estimated ISO/DIS fractions became much closer to the measured ones when the suggested pedotransfer functions were applied. The conversion method proved to be more reliable for the prediction of clay and sand content than for silt content. In its present form the estimation method is not suitable for replacing the ISO/DIS method, but it could be of good service in research and comparative analysis in cases where only the MSZ method can be used or where only old MSZ PSD data exist.

Key words: particle size distribution, pre-treatment methods, pedotransfer functions

Tables and figures

Table 1. Main parameters of the PSD soil database. (1) Parameter. (2) Mean. (3) Deviation. ^a, clay fraction (< 0.002 mm); ^b, silt fraction (0.002–0.05 mm); ^c, sand fraction (0.05–2.0 mm), after preparation according to the international (ISO/DIS) and Hungarian (MSZ) standards (N=339).

Table 2. Suggested pedotransfer functions to estimate ISO/DIS clay, silt and sand fractions. (1) estimated clay_{ISO/DIS} (2) estimated sand_{ISO/DIS} (3) estimated silt_{ISO/DIS}; ^{*}A_{MSZ}, P_{MSZ}, H_{MSZ}: clay, silt and sand fractions measured by the MSZ method (< 0.002 mm, 0.002–0.05 mm, > 0.05 mm) (%); OM: humus content (%); CA: CaCO₃ content (%); pH_{DV}: pH measured in distilled water. Estimated silt_{ISO/DIS} = 100 – (estimated clay_{ISO/DIS} + estimated sand_{ISO/DIS}).

Figure 1. Origin of the soil profiles making up the PSD soil database (number of soil profiles in brackets).

Figure 2. Comparison of the particle size fractions measured using the two methods. (1) Clay. (2) Silt. (3) Sand.

Figure 3. Relationship between the clay contents measured using the two methods and the upper limit of plasticity according to Arany and the hygroscopicity value according to Sík.

Figure 4. Accuracy and reliability of the suggested conversion functions (R²: coefficients of determination for fractions measured using the MSZ and ISO/DIS methods, and for ISO/DIS fractions estimated from MSZ fractions or measured; root mean square errors (RMSE) of fractions measured using the MSZ and ISO/DIS methods, and of ISO/DIS fractions estimated from MSZ fractions or measured (w/w%) (1) Training dataset. (2) Test dataset. (3) Clay. (4) Silt. (5) Sand. (6) Datasets. (7) PSD fractions.

Figure 5. Comparison of PSD values measured using the two methods or estimated with pedotransfer functions on USDA textural triangles, presented using Kernel density functions. (1) Clay. (2) Silt. (3) Sand. (4) Estimated.

Figure 6. Spatial distance of PSD point pairs between a) MSZ PSD and ISO/DIS PSD; b) measured ISO/DIS PSD and ISO/DIS PSD estimated from measured MSZ PSD (larger bubbles represent point pairs that are farther apart and smaller ones those that are closer together); c) ratio of this distance for each sample.