

Folyadék-visszatartás, folyadékvezetés és porozitás összefüggései vízzel és/vagy szerves folyadékkal telített talajokban I. Folyadék-visszatartó képesség – Szemle

^{1,2}HERNÁDI Hilda, ²BARNA Gyöngyi és ²MAKÓ András

¹Pannon Egyetem, Georgikon Kar, Keszthely

²Magyar Tudományos Akadémia, Agrártudományi Kutatóközpont,
Talajtani és Agrokémia Intézet, Budapest

A talaj szilárd fázisa által közrezárt póruster nagysága és a pórusok méret szerinti eloszlása meghatározza a talajok fontosabb fizikai (pl. mechanikai sajátságok, légáteresztő-, vízvezető- és víztartó-képesség), kémiai (pl. diffúziós anyagáramlások, szén- és tápanyagdinamika) és biológiai tulajdonságait (pl. mikrobiológiai aktivitás, gyökérfejlődés) (pl. HORN, 2004; HAJNOS et al., 2006; SMUCKER et al., 2007; BEN-HUR et al., 2009; ALAOUI et al., 2011; AKBARI & GHOSHAL, 2015). A pórusrendszer ismerete nélkül nem érthetők meg a talajfunkciók és nem számszerűsíthetők a talajban lejátszódó folyamatok. A víz áramlása telítetlen porózus közegben a Richards-egyenlet alapján modellezhető, melynek két legfontosabb tényezője a víztartó- és a vízvezető-képesség. A víz és a szerves folyadékfázisú szennyező anyagok terjedésének, transzportjának szimulációjához elengedhetetlen a közeg porozitása, folyadékvezető- és visszatartó képessége közötti összefüggés lehetőség szerint minél pontosabb számszerűsítése. A matematikai, statisztikai módszerek és a modellezés technikai hátterét biztosító számítástechnikai fejlesztések hatására a porózus közegben történő vízmozgás szimulációs modellezése jelentős fejlődésen ment keresztül az elmúlt 70 évben. A víztől eltérő polaritású folyadékokra vonatkozóan e hidrológiai jellemzők számítása azonban mind a mai napig a porózus közeg jelentős leegyszerűsítését, ún. ideálisan porózus közeget feltételezve lehetséges. Tanulmányunkban áttekintést kívánunk nyújtani azokról a fontosabb kutatásokról, melyek a „normál” (természetes állapotú) és a szerves folyadékokkal szennyezett talajok pórusrendszerét jellemző folyadék-visszatartó és a folyadékvezető képességet, illetve e két fontos, a vízforgalmat vagy a szennyezés-terjedést szimuláló modellek számára nélkülözhetetlen talajtulajdonság kapcsolatát vizsgálták.

A talaj pórusrendszere

A talaj póruster az elemi szemcsék és a másodlagosan képződött aggregátumok által közrezárt tér (VÁRALLYAY, 1993), illetve a pórusok által képzett hálózat (pl. FATT, 1956; CUSHMANN, 1990; ALAOUI et al., 2011). Az összporozitás a talajok pórusainak összterfogata. A pórusok méret szerinti megoszlása a differenciált porozitás. Az előbbi a köolajiparban használatos pórusterfogattal analóg kifejezés, amely a folyadék tárolására és szállítására alkalmas pórusok összességét jelenti (*storage and transmission pores*) (BOULDING, 1995). Az utóbbi pedig a gyakorlat-

ban az effektív porozitással jellemezhető – amely, a folyadékmozgás számára elérhető egymással összeköttetésben álló pórusok összessége. A talaj pórusrendszere hidrológiai szempontból általánosan két fő pórustérre különíthető el, az ún. szerkezeti/strukturális (*structural pores*) és a mechanikai összetétellel (*particle size distribution*, PSD) jellemezhető/mátrix pórusok (*textural/matrix pores*) alkotják (BEVEN & GERMANN, 1982). A strukturális pórusok elsődlegesen az aggregátumok közötti (*interaggregate pore*), illetve az elsődleges szemcsék között kialakuló, míg a mátrix pórusok az aggregátumokon belüli (*intraaggregate pores*) pórustérrel azonosíthatóak (TISDALL & OADES, 1982). A talajpórusok mérete – átlagos geometriai átmérője – alapján az összes pórustér makropórusokra (*macropores*) és mikropórusokra (*micropores*) osztható fel. A két pórustér hidrológiai funkciója eltérő aszerint, hogy a hidrológiai folyamatok elsődlegesen a gravitáció, vagy a kapillaritás által meghatározottak (*gravitational and capillary pores*). A pórustér ezen elemei – összeköttetések révén – hierarchikus rendszert alkotnak (*structural hierarchy*) (CUSHMANN, 1990).

A makropórusok nagy vonalakban a szerkezeti pórusoknak feleltethetőek meg (BOUMA és munkatársai (1977) szerint makropórus az, amelyek átmérője szignifikánsan nagyobb, mint annak a pórusnak az átmérője, mely az elemi szemcsék egyszerű elrendeződésével alakul ki). BEVEN és GERMANN (1982) összefoglaló táblázatában a makropórusok mérettartománya megközelítőleg 1–60 μm , és az ennek megfelelő nyomás értéke a -0,1 – -10 kPa tartományba esik. KODEŠOVÁ és munkatársai (2008) többlépcsős átfolyási kísérleteinek eredményei szerint a gravitációs pórusokat makropórusok (átm.: >1 470 μm : 20 kPa) és viszonylag nagyméretű kapillaris pórusok alkotják (40–1 470 μm : 20–700 kPa). A mikropórusok maximális ekvivalens átmérőjéhez rendelhető nyomás jól korrelál a porózus közeg vízre vonatkoztatott levegőbelépési küszöbértékével (*air entry pressure* – P_{ce}) (pl. BRAUDEAU & MOHTAR, 2004), amely kulcsfontosságú érték mind a telített, mind a telítetlen, egy-, illetve több fázisú áramlás szimulációjához (SCHAAP & VAN GENUCHTEN, 2006; FREDLUND & HOUSTON, 2013; ALIZADEH & PIRI, 2015; ANDERSON et al., 2015). A hidrológiai folyamatokban játszott szerepük alapján a szerkezeti pórusok (makropórusok) is feloszthatóak, kísérleti adatokon alapuló csoportokra – ezt a gyakorlatban még nem alkalmazzák – (pl. BOUMA et al., 1977), illetve az SSSA (*Soil Science Society of America*, 2008) által elfogadott rendszerben méret szerint osztályozhatóak (BREWER, 1977).

A texturális pórusokon belül is eltérő lehet a kapillarisok által meghatározott, folyadék visszatartást és mozgást biztosító, valamint a mikroléptékű kölcsönhatások által meghatározott, csak a folyadék visszatartására képes, elsődlegesen adszorpciós pórustér (BEVEN & GERMANN, 1982). Utóbbinak eleme az agyagásványok rétegei közötti pórustér is (*internal porosity*) (MAKÓ & HERNÁDI, 2012).

A pórusméret-határok és a Laplace–Young-egyenlet értelmében hozzájuk rendelhető kapillaris nyomás (P_c) értékeket definiálni kell a szimulációs modellezésben, hiszen a különböző alakú és méretű szemcsék által közrezárt pórusok eltérő módon és eltérő mértékben befolyásolhatják a folyadékfázisú transzportfolyamatokat (HILLEL, 1998). Ezzel párhuzamba hozhatóak a víztartó képesség görbéi (*soil water retention curves* – SWRC) ún. nevezetes pontjai is – szántóföldi és minimális

vízkapacitás, holtvíztartalom. A vízkapacitás értékek az adott talajban, porózus közegben, a különböző erőkkel (pl. kapilláris, adszorpciós) visszatartott folyadék mennyiségének határértékei (*I. táblázat*). A vízkapacitás értékekkel a talaj pórusviszonyai (VORONIN, 1980; STEFANOVITS et al., 1999) és szerkezetessége is jellemezhető (RAJKAI et al., 2015). A folyadék-visszatartó-képesség görbék illesztésének pontosságát jelentős mértékben befolyásolhatja az, hogy a talajok által adszorpciós erőkkel visszatartott folyadék mennyiségére vonatkozóan rendelkezünk-e információval, elsősorban mért adatokkal (VAN GENUCHTEN & NIELSEN, 1985; NIMMO, 1997; TULLER et al., 1999; SHEIN et al., 2004; TULLER & OR, 2005).

A pórusok méret szerinti eloszlása (*pore size distribution* – PoSD) és a kapilláris nyomás–folyadékteleltettség (*pressure saturation* – P_c -S) közötti összefüggéseket hazánkban elsők között KLIMES-SZMIK Andor (1962) foglalta össze. A szerző a talaj pórussterén belül funkciók szerint kötött, kapilláris, kapilláris-gravitációs, illetve a gravitációs víz pórussterét különítette el. A duzzadás okozta porozitásváltozás szempontjából kiemelkedő jelentőségűnek ítélte meg a kapilláris-gravitációs pórus-tér szerepét, melynek határaiként a minimális és a kapilláris vízkapacitás értékeket jelölte meg. AMER, (2012), KLIMES-SZMIK (1962) felosztásához hasonlóan a hidrológiai jellemzők alapján osztotta fel a víztartó képesség függvény alapján meghatározható pórusméret-eloszlási függvényt 1, 33 és 1 500 hPa P_c határértékekkel az alábbi csoportokra: gyorsan és lassan leürülő pórusok (*rapidly and slowly drainable pores*), nagy kapilláris átmérőjű és víztartó pórusok (*coarse capillary and water holding pores*) és kis kapilláris átmérővel jellemezhető pórusok (*fine capillary pores*).

A makro- és mikropórusok közötti javasolt P_c határérték 33 kPa (~ pF 2,5), amely összefüggésbe hozható a szántóföldi vízkapacitáshoz rendelhető átlagos kapilláris nyomás értékkel (SHEIN et al., 2004; NEMES et al., 2008). A szabadföldi vízkapacitás értéke STEFANOVITS és munkatársai (1999) szerint pF 2,3 és 2,5 közötti (9,4–14,9 μm), a kötött, kapilláris víz és a kapilláris-gravitációs víz és gravitációs víz pórustere a pF 2,5 és 1,7 értékekkel jellemezhető. Eltérő azonban a pórusok méret és funkció szerinti besorolása a szakirodalomban a különböző erőkkel szemben visszatartott folyadék mennyiségéhez rendelhető kapilláris nyomás – illetve a Laplace–Young-egyenlettel a P_c ismeretében számítható pórusátmérő – értékekre vonatkozóan. GREENLAND (1977) például pF 5,8; 3,8; 1,8, illetve 0,8 határral jellemzi a kötött, maradvány, illetve a tárolt víz pórussterét, a vizet szállító pórusokat és repedéseket. Míg STEFANOVITS (1981) szerint az adszorpciós, kapilláris, kapilláris-gravitációs, illetve gravitációs pórus-tér határáként a pF 4,17; 2,47, illetve 1,7 értékek jelölhetőek ki (*I. táblázat*). A talaj pórusrendszere jellemezhető közvetlen módszerekkel (pl. mikromorfológiai vizsgálatok, komputer tomográfiai mérések – elsősorban az összporozitás meghatározása), illetve közvetetten (pl. a nitrogén-gáz adszorpciós, vagy a higanyporozimetriás eljárások, illetve a szerves folyadékok leürülési görbéi alapján – effektív porozitás), de nincsen egységes módszer, amely a talajok teljes pórusméret-tartományban alkalmazható lenne (NIMMO, 2004; HAJNOS et al., 2006; LIPIEC et al., 2012; RASA et al., 2012). A különböző mérési módszerekkel és berendezésekkel eltérő pórusméret-tartomány jellemezhető megfelelő pontossággal Míg a mért víztartó-képesség görbék alapján 95 és 150 000 nm közöt-

ti, a higanyporozitméteres eljárásokkal 3,7–7500 nm, illetve a nitrogéngőz-adszorpciós izotermákkal 1,6–60 nm pórusméret-tartományban jellemezhető a talaj porozitása. A Laplace–Young-egyenlet ugyanakkor a PoSD és SWRC közötti összefüggés fordított irányú értelmezését, és ezáltal a folyadékviszatarató-képesség alapján az effektív porozitás meghatározását is lehetővé teszi (pl. DEXTER, 2004; REYNOLDS et al., 2009; ALAOUİ et al., 2011). (Az effektív porozitás az adott folyadékra vonatkozóan a szabad folyadékáramlást biztosító, egymással összeköttetésben álló pórusok által kialakított tér.)

1. táblázat

A talajok pórusrendszerének különböző csoportosítása, a csoportok hatáértékeként kijelölt kapilláris nyomás/szívóerő értékek (pF), illetve az azokhoz – a Laplace–Young-egyenlettel – meghatározható ekvivalens pórusátmérő értékek (μm – zárójelben)

STEFANOVITS		SSSA**			GREENLAND, 1977	
1981*	1999	Pórusok csoportjai		1997		
				Kripto	4,48< (<0,1)	5,8<(<0,005)
4,2< (0,2–20)	4,17< (<0,2)	Finom	Mikro	Ultramikro	4,48–2,78 (0,1–5)	3,8–5,8 (0,5–0,005)
				Mikro	2,78–2,0 (5–30)	
4,2–2,5 (10–60)	2,47 (0,2–10)	Közepes	Mezo	Mezo	2,0–1,6 (30–75)	1,8–3,8 (50–0,5)
	1,77 (10–50)	Közepesen durva		Makro	1,6 (75<)	
1,7 (60)	0,48 (50–1000)	Durva	Makro			0,8–1,8 (500–50)
	1000<	Igen durva (repedések)	Mega			<0,8 (500<)

Megjegyzés: * az adszorpciós, kapilláris, kapilláris-gravitációs, illetve gravitációs pórustér határáként kijelölt pF értékek (STEFANOVITS, 1981); **A makropórusok továbbá <1000, 1000–2000, 2000–5000, illetve 5000 μm < határértékkel, durva, közepes, finom és nagyon finom kategóriákra oszthatóak fel (SSSA, 2008).

Talajok pórusszerkezetének megváltozása talaj/víz rendszerekben

A talaj össziporozitását és pórusméret-eloszlását elsősorban a szilárd fázist alkotó elemi szemcsék és szerkezeti elemek (aggregátumok) minősége és méret szerinti eloszlása határozza meg, de közvetve számos kémiai, fizikai és biológiai talajjellemző befolyásolhatja (pl. aggregátum-összetétel és stabilitás, szervesanyag-, karbonát- és agyagásvány-tartalom) (LE BISSONNAIS & ARROUAYS, 1997; LADO et al., 2004; ASSOULINE, 2006; MAMEDOV et al., 2006; BEN-HUR et al., 2009).

A talajpórusok térfogata, alakja, mérete, kontinuitása és eloszlása nem konstans, a porozitás-viszonyok – természetes és antropogén tényezők hatására (pl. fagyás-olvadás, tömörítő hatások), fizikai és kémiai körülményektől függően – időben változhatnak (*heterogeneous in continuous or discontinuous sense*) (DULLIEN, 1979).

A szerkezet, illetve a szerkezetváltozás hatása a modellezés több léptékében is megnyilvánul. A talajt alkotó agyagásványok duzzadásával pl. mikro-léptékben megváltozhat a pórusok mérete és alakja, megváltoztatva a reprezentatív elemi térfogatra (REV) vonatkoztatható hidrológiai jellemzők (víztartó- és vezetőképesség) értékét. (A REV közepes léptéknek (*local/mezo scale*) tekinthető; az az elemi térfogat, amelyben a vizsgált változó értéke állandó – BRAUN et al., 2005). A talajszerkezet megváltozása kihatással van a modellezés szempontjából makro-léptékű folyamatokra is (pl. vízgűjtő szinten számszerűsített eróziós hatások) (ROTH et al., 1999; LEHMANN & OR, 2009). A pórustér természetes vagy mesterséges (pl. talajművelés) hatásokra bekövetkező változását (pl. duzzadás-zsugorodási folyamatok, tömörödés, dezaggregáció) és ezek összefüggéseit a talaj fizikai, mechanikai és agronómiai jellemzőivel „közepes” léptékben sokan vizsgálták már (pl. LE BISSONNAIS & ARROUAYS, 1997; GHEZZEHEI & OR, 2000; OR et al., 2000; ASSOULINE, 2006; BEN-HUR & LADO, 2008; DEXTER et al., 2008; ALAOUİ et al., 2011). KUTILEK és NIELSEN (1994), FERRERO és LIPIEC (2000) tapasztalati alapján a tömörödés hatására bekövetkező pórustérfogat változás a szélsőségesebb nyomásértékeken (alacsony (0–10 kPa) és magas (300–1500 kPa) tartományban) jelentősebb – a makroporozitás általában csökken, míg a mikroporozitás nő. A talajokban található, kevésbé aggregálódott, lazán kötődő ásványszemcsék és a szerves alkotóelemek a talajra ható hidraulikus gradiens nagyságának függvényében az áramló folyadékkal együtt mozoghatnak (MITCHELL & MADSEN, 1987). Az agyagásvány szemcsék duzzadás hatására bekövetkező diszperziója során keletkező apróbb „szemcsék” a minta pórusait eltömíthetik, csökkentve a makroporozitást. Kimosódva viszont akár növelhetik is a pórustérfogatot (LI & ZHANG, 2009).

A folyadék és szilárd fázis kölcsönhatások szerepét a hidraulikai jellemzők változásában azért nehéz számszerűsíteni, mert hatásukat a porózus közegben lejátszó egyéb folyamatok (pl. tömörítő hatások, kapilláris folyadékáramlás) hatása elfedheti. További nehézséget okoz, hogy e kölcsönhatásokat jellemző mutatók értéke térben irányfüggő – anizotróp (PENG & HORN, 2005; 2007). A talaj agyagásványainak duzzadása mind az adszorpciós, mind a kapilláris folyadék visszatartóképességet meghatározza (pl. BRAUDEAU & MOHTAR, 2004; CHERTKOV, 2004). A pórusszerkezet duzzadás hatására bekövetkező változásait a hidrológiai modellszámításokban elsők között GERKE és VAN GENUCHTEN (1993) vette figyelembe – az

akkor általánosan alkalmazott merev (nem duzzadó) közeget feltételező számítási eljárásoktól (*classical rigid approach*) eltérően. A duzzadási és zsugorodási folyamatok számszerűsíthetők például a víztartó-képességet jellemző ötparaméteres van Genuchen-egyenlet inverzét képezve (PENG & HORN, 2005; 2007). A normalizált effektív pórustérfogat és ahhoz rendelhető telítettség összefüggését leíró függvény eltérő mértékű porozitás-változással jellemezhető tartományokra oszthatóak fel (pl. a zsugorodás esetében „*structural, proportional, residual and zero shrinkage zones*”), melyek különböző matematikai összefüggésekkel számszerűsíthetők. A tartományok határértékeit ugyanazok a talajtulajdonság befolyásolhatják, melyek közvetlenül és közvetve összefüggésbe hozhatóak a talaj porozitásával (pl. szerkezet, szervesanyag-tartalom).

A tömörödési és duzzadási folyamatok következtében változó nyírófeszültség, kapillaris potenciál és a pórusok deformációja közötti összefüggések leírására vonatkozóan elméleti szinten pl. ASSOULINE (2002) tett kísérletet. Tapasztalatai alapján a makroporozitás érzékenyebben reagál a tömörítő hatásokra. LI és ZHANG (2009) kísérleti eredményei pedig azt mutatták, hogy a telítési-száradási ciklusok során lezajló duzzadási-zsugorodási folyamatok következtében a mikroporozitás változása lehet jelentősebb. Általánosságban a makroaggregátumok közötti kötőerők mértéke kisebb, mint a mikroaggregátumok közötti kötőerőké (TISDALL et al., 1997; SIX et al., 2004).

Az aggregátum-stabilitás változása dinamikus folyamat, a finomabb pórusok mennyiségének növekedésével növekedhet az aggregátumok közötti összeköttetési pontok lehetséges száma (FERRERO et al., 2007) – mely a stabilitás növekedését eredményezi, befolyásolva a hidrológiai jellemzőket (víztartó- és vízvezető-képesség) is.

A PoSD megváltozásának jó indikátora a térfogattömeg (*bulk density* – BD) változása. A tömődöttség és a PoSD összefüggések tanulmányozhatóak a BD és az SWRC közötti, illetve a BD és vízvezető-képesség (K_h) közötti összefüggések számszerűsítésével (pl. AHUJA et al., 1998; ASSOULINE, 2006). A makroporozitás tömörítő hatásokra történő megváltozása jobban közelíthető a relatív tömődöttség érték (*relative compactness*) ismeretében végzett számításokkal (pl. HÅKANSSON & LIPIEC, 2000), amellyel a duzzadási-zsugorodási folyamatok is jól jellemezhetőek (DEXTER et al., 2008). Általános tapasztalat azonban, hogy legpontosabban az SWRC alapján számszerűsíthető a PoSD megváltozása (ALAOUI et al., 2011).

Az SWRC tapasztalati függvényeit alkalmazzák a talajminőség indikátoraként is, a belőle levezethető különböző index értékekkel: pl. S-index (*soil structural quality* – DEXTER, 2004), SI (*structural index* – LEVY & MAMEDOV, 2002; NORTON et al., 2006), IWC (*integral water capacity* – ASGARZADEH et al., 2014), valamint az egy vagy többmódusú SWRC alapján meghatározott vízkapacitási görbék egyéb statisztikai mutatóinak (pl. medián, módusz, ferdeség, csúcosság értékek stb.) számításával (REYNOLDS et al., 2009; RAJKAI et al., 2015). Több indikátor együttes használatát javasolták MUELLER és munkatársai (2010). Az S-index – az SWRC inflexiósponti meredeksége – (DEXTER, 2004) összefüggésbe hozható a megmunkálhatósággal, áteresztőképességgel és szerkezeti stabilitással is (pl. CALCIU et al., 2011).

A talajszerkezet és pórustér, illetve a folyadék visszatartó-képesség közötti összefüggések számszerűsítése ma is kihívást jelentő feladat a talajtani, talajfizikai, agronómiai és hidrológiai kutatásokban (PACHEPSKY & RAWLS, 2004; PACHEPSKY et al., 2006a, b). Javasolt a számszerűsíthető és minőségi talajfizikai tulajdonságok szerkezetre vonatkozó kombinált hatásainak értékelése és a minőségi jellemzők együttes figyelembevétele (AHUJA et al., 1985; LIN et al., 1999). Egyes szerzők a szervesanyag-tartalom szerkezetalakító hatásának jelentőségét emelték ki (pl. RAWLS et al., 2003; RAJKAI et al., 2015).

A pórus szerkezet megváltozása víz/szerves folyadék/szilárd fázis rendszerben

A víz áramlása telítetlen porózus közegben a Richards-egyenlet alapján számszerűsíthető. A Richards-egyenlet két legfontosabb tényezője a víztartó- és vízvezető-képesség függvény. A vízzel nem elegyedő szerves folyadék (*nonaqueous phase liquid* – NAPL)/szilárd fázis rendszer általánosan elfogadott leegyszerűsítése a modellezési számítások során, hogy a közeg ideálisan porózus (*ideal porosity*), homogén (*homogeneity*), izotróp (*isotropy* – a makroszkópos tulajdonságok értéke az áramlás irányától független) és az, hogy a szilárd fázis a folyadékfázissal nem lép kölcsönhatásba (*noninteracting*).

A levegő, és a higany a NAPL típusú szerves folyadékokhoz hasonlóan – a talaj szilárd fázisával csak kismértékű kölcsönhatást mutató folyadékfázisnak tekinthető. Ezen alapul pl. a szerves folyadékvezető-képesség légáteresztő-képesség alapján történő meghatározása (pl. COREY, 1986; MAKÓ et al., 2009), az NAPL-visszatartó képesség meghatározása higanyporozimetriás mérések eredményei alapján, illetve a talajok szerves folyadék-gőz adszorpciójának jellemzése különböző típusú gázokkal (pl. nitrogén) felvett adszorpció-izotermákkal (AMYX et al., 1960; LOWEL & JOEN, 1984; MAKÓ & HERNÁDI, 2012). A víz ezzel szemben a talajjal jelentősebb mértékű kölcsönhatásba léphet. A poláros víz és az apoláros NAPL, illetve a talaj szilárd fázisa által alkotott rendszerek eltérő viselkedését feltételezve vizsgálható pl. a talajok aggregátum-stabilitása, illetve valódi és látszólagos sűrűsége/fajsúlya (KEMPER & ROSENAU, 1986; LEBISSONNAIS, et al., 1989; BUZÁS, 1993; HILLEL, 1998).

A vízre vonatkoztatott relatív sűrűsége alapján víznél kisebb (LNAPL) és annál nagyobb sűrűségű (DNAPL) típusú szennyezőanyagok különíthetők el. E két csoport felszín alatti terjedésének szimulációja némiképpen eltérő matematikai számításokkal határozható meg. Az NAPL-szilárd fázis és víz-szilárd fázis rendszerek hidrofizikai jellemzői sok esetben jelentős mértékben különböznek a szilárd fázis tulajdonságai (szerkezet, aggregátum-stabilitás, PSD, reológiai tulajdonságok, agyagásvány-, karbonát és szervesanyag-tartalom stb.) és a fázisok közötti kölcsönhatások (duzzadási-zsugorodási folyamatok, hiszterézis jelenségek, dezaggregáció, repedések keletkezése stb.) következtében (FERNANDEZ & QUIGLEY, 1985; LENHARD & BROOKS, 1985; BRADFORD & LEIJ, 1995; GRABER & MINGELGRIN, 1998; RUBIN et al., 1998; DICARLO et al., 2000; MAKÓ & HERNÁDI, 2012; ASGARZADEH, et al., 2014). Mikromorfometriai vizsgálatok (pl. LENHARD & BROOKS, 1985; KODEŠOVÁ et al., 2008) és digitális képazonosítási eljárások (pl.

CHERIAN et al., 2014) eredményei is igazolták, hogy a talaj-folyadék rendszer szerkezeti változásai a pórustér jellemzőit olyan mértékben megváltoztathatják, hogy mind a víz-, mind az NAPL-visszatartó és -vezetőképesség is az eredeti talajtól eltérő lehet. Egyes NAPL típusú folyadékok az agyagásvány-rétegek közé is bejuthatnak (MURRAY & QUIRK, 1982; ANDERSON et al., 1985; IZDEBSKA-MUCHA & TRZCIŃSKI, 2008).

Az agyagásvány-tartalom és típus a talajok porozitás-változásának mértékét is meghatározza (LENHARD & BROOKS, 1985; CHEN et al., 1987; MATMON & HAYDEN, 2003). Az 1:1 típusú kaolinit agyagásványtartalmú, aggregált talajok finom pórusai és szűk csatornái a víz és NAPL telítéskor elérhetőek, míg a 2:1 típusú (duzzadó) agyagásványokat tartalmazó talajok pórustere a duzzadáskor jelentősen csökken, megváltoztatva, növelve a folyadékok belépési küszöbnyomás értékét is (vízre vonatkozó P_{ce} értéke 1,94 hPa-ról 7,04 hPa-ra emelkedett) (MATMON & HAYDEN, 2003). A duzzadási folyamat során bekövetkező szerkezeti változások folyadék-beszivárgást csökkentő hatását tapasztalták a makropórusos vízáramlásra (pl. JARVIS et al., 2002), illetve NAPL típusú növényvédőszer megkötődését vizsgáló kísérleteik során KODEŠOVÁ és munkatársai (2008) is. A kaolinit ásványok esetében a plaszticitási index kis értékének köszönhetően gyakori flokkuláció vezethet a pórusszerkezet, és ezáltal a hidraulikai talajtulajdonságok megváltozásához (VAN OLPHEN, 1963; CHEN et al., 1987; DRAGUN, 1998). NAGARAJARAO (1994) vízzel és xilollal meghatározott deszorpciós izotermái alapján a víz/szilárd fázis, illetve szerves folyadék/szilárd fázis rendszer 0,2 μm feletti pórusátmérővel jellemezhető alkotóelemeinek effektív porozitásbeli eltérése 0–150 hPa nyomástartományban elsősorban az aggregátumok stabilitásával összefüggésben alakul. 150 hPa nyomásérték felett az effektív porozitás eltérését főként az agyagásványok mennyisége és minősége befolyásolja. A monomolekuláris NAPL- és vízborítottság, illetve az ezekhez rendelhető átlagos nyomásérték szintén eltérőek lehet – részben a folyadékok különböző fizikai és kémiai tulajdonságai (sűrűség, viszkozitás, terjedési koefficiens stb.), illetve a folyadék és szilárd fázisok között fellépő különböző mértékű kölcsönhatások következtében (BAVER, 1956; VORONIN, 1980; LOWEL & JOEN, 1984; MAKÓ, 1995; MAKÓ et al., 1995). Mindemellett a monomolekuláris NAPL-borítottság értékét is befolyásolja az agyagásványok mennyisége és minősége (HERNÁDI et al., 2011).

A talajok NAPL- és víztartó-képességét is jelentős mértékben meghatározza a talaj fizikai félesége. A homokos-vályog talajok gravitációs pórusai víz és NAPL telítés esetén is gyorsabban leürülnek, mint a finomabb PSD-vel jellemezhető talajok pórustere (pl. RAJKAI, 1988; MAKÓ & HERNÁDI, 2012). A víz és DUNASOL180/220 – aromás komponenseket nem tartalmazó LNAPL típusú – modellfolyadékkal meghatározott SWRC értékek azonban nyomástól és a talaj fizikai féleségétől függően eltérő mértékben különböznek. A P_c növekedésével a kétféle polaritású folyadékkal mérhető folyadékviszátartó-képesség közötti különbség csökken, és kevésbé függ a PDS-től, mint a telítettségi nedvességtartalom értékek. Jelentős az eltérés a különböző folyadékokkal meghatározott SWRC (VG) telített nedvességtartalmával (θ_s) és inflexiós ponti meredekségével (α) összefüggésbe hozható illesztési paraméterek között. E paraméterek várható értékét – a víz-

tartó-képesség görbék illesztésénél tapasztaltakhoz hasonlóan – továbbá a talaj fizikai és kémiai jellemzői (BD, PSD, humusz- és karbonát-tartalom stb.), illetve az e paraméterek között tapasztalható összefüggések is meghatározzák (MAKÓ & HERNÁDI, 2012). MAKÓ és HERNÁDI (2016) vizsgálati eredményei szerint a talajok folyadékviszatarató-képességéből meghatározott (össz)porozitása és differenciált porozitása is különböző lehet a folyadék polaritásától és a talaj fizikai féleségtől, szerkezetességétől függően. Eltérőek az illesztett víztartó- és NAPL-viszatarató képesség görbék alapján – a folyadékok felületi feszültsége, nedvesítő képessége és sűrűsége függvényében – a P_c értékekhez rendelhető ekvivalens pórusátmérek. Eltérés tapasztalható a pórusméreteloszlást jellemző derivált, normalizált folyadékviszatarató-képesség függvények statisztikai paramétereiben (csúcosság, inflexiós pont elhelyezkedése stb.). Az NAPL telítés esetén – a víztelítettséghez képest – a P_c modális értéke a makropórusok felé tolódott el, ami igazolhatja a folyadékok polaritásától függő mértékű porozitás változására, illetve az agyagszigetelések hatékonyságára vonatkozó korábbi kutatások eredményeit (pl. ANDERSON & BROWN, 1981; BUDHU et al., 1990; GRABER & MINGELGRIN, 1994).

A talaj pórusrendszerének víztartó-képessége

A talajok víztartó-képességének mérése számos módszerrel lehetséges. Hazánkban a kapilláris nyomás-potenciál meghatározására a kis tenziótartományokban ($pF \leq 2,7 \sim \leq 500$ kPa) az ún. porózuslap-módszert, a nagyobb tenzió tartományokban ($pF > 2,7 \sim > 500$ kPa) a nyomásmembrános mérési módszert szabványosították, így széles körben e módszerek terjedtek el. (VÁRALLYAY, 1973; RAJKAI, 1993; MSZ-08 0205-78). A minták egyrétegű folyadékborítottságának (monomolekuláris rétegborítottság) a Sík-féle vagy a Kuron-féle higroszkóposági értékek feleltethetők meg, egyezményesen ezt tekintik a víztartó képesség görbe végpontjának ($pF 6,2$) (DI GLÉRIA et al., 1957). Nemzetközi és hazai viszonylatban egyaránt elterjedt a porózus kerámialapos módszerek alkalmazása (SMITH & MULLINS, 2001; MAKÓ & HERNÁDI, 2012; ISO 11274:2009). Napjaink kutatásai szerint ígéretes eredményekkel szolgálhatnak – az elsősorban a geomérnöki gyakorlatban elterjedt és az Amerikai Egyesült Államokban szabványosított (ASTM, 1996) centrifugás eljárások, illetve az ún. szűrőpapír módszer, mellyel a folyadékviszatarató-képesség szinte teljes nyomástartományban felvehető (0–30 000 kPa) (pl. CHANDLER & GUTIERREZ, 1986; SCHINDLER et al., 2010).

A napjainkban alkalmazott különböző célú szimulációs modellekben (pl. SWAP – VAN DAM, 2000; HYDRUS 1-D – ŠIMŮNEK, et al., 2005) általában nem a mért folyadékviszatarató-képesség értékek, hanem a mért vagy számítással meghatározott közelítő (továbbiakban „becsült”) értékekre illesztett víztartó-képesség görbék paraméterei szerepeltethetők bemeneti talajhidrológiai jellemzőként. Az illesztési paraméterek közvetlen meghatározására is számos közelítő eljárást dolgoztak már ki a talajtanban (CORNELIS et al., 2001; WÖSTEN et al., 2001; MCBRATNEY et al., 2002; NEMES et al., 2003; PACHEPSKY & RAWLS, 2004).

A víztartó-képesség becslő módszerek alapvetően két típusba sorolhatók, a fizikai modell alapú becslések (szemifizikus és geometriai alapú eljárások) és az

empirikus módszerek (a pedotranszfer függvények többsége és a parametrikus eljárások).

Egymódusú parametrikus függvények

A víztartóképeség-görbék illesztésére leggyakrabban alkalmazott hidraulikai függvények a BROOKS és COREY (BC – 1964), BRUTSAERT (BR – 1966), illetve a három-, négy- és ötparaméteres VAN GENUCHTEN (VG – 1980) egyenletek. A BC modell azért elterjedt a környezetvédelmi és hidrológiai gyakorlatban, mert alkalmazásával közvetlenül meghatározható a belépési küszöbnyomás értéke (P_{ce}); kitevője pedig a közeg porozitását jellemzi. A VG függvény α paraméterének inverz értéke elméletileg ugyan megfeleltethető a P_{ce} értéknek, de vitatható, hogy pontosan milyen összefüggés is van közöttük (VAN GENUCHTEN, 1980). A numerikus modellezésben való alkalmazhatóság szempontjából a VG és BR modell előnye, hogy folytonos (deriválható), így lehetőség van a vízvezető-képesség, illetve relatív átteresztés meghatározására kidolgozott összefüggésekkel kombinált alkalmazásukra. A BC függvény a J-alakkal jellemezhető, általában a durvább fizikai féleségű talajok esetében ad jobb pontosságú közelítést, míg a VG függvények a finom textúrájú, eredeti szerkezetű talajok SWRC leírására javasolhatóak (flexibilisebbek és pontosabbak) (VAN GENUCHTEN & NIELSEN, 1985; ASSOULINE, 2006). A függvényparaméterek fizikai tartalma elsősorban akkor értelmezhető, ha az illesztés során a kiindulási és határértékek adottak (pl. VAN GENUCHTEN, 1980; VEREECKEN et al., 2011). A különféle függvények illesztési paraméterei egymásba átszámíthatóak (pl. CARSEL & PARISH, 1988; MOREL-SEYTOUX et al., 1996; ASSOULINE, 2006; GHEZZEHEI et al., 2007). RAWLS és BRAKENSIEK (1985), illetve CARSEL és PARISH (1988) a VG és BC függvényparaméterek javasolt átlagértékeit tartalmazó táblázatokat készítettek a mért víztartó- és vízvezető-képesség adatok statisztikai elemzésével.

Mind a kapilláris, mind pedig az adszorpciós erők által visszatartott víz mennyisége, illetve az SWRC alapján számított effektív porozitás jelentős mértékben függ a hiszterézis jelenségektől (KOOL & PARKER, 1987; LENHARD & PARKER, 1987; LUCKNER et al., 1989; HUANG et al., 2005; RUDIYANTO et al., 2015). A hiszterézis jelenségek következtében a fő leürülési (*main drainage curves*) és nedvesítési görbék (*main imbibition curves*) mellett végtelen számú görbét (*scanning curves*) kaphatunk attól függően, hogy milyen telítettségénél indul el a leürítési vagy a nedvesítési folyamat. Ennek megfelelően a fő leürülési görbe látszólagos (*apparent*) és az elsődleges leürülési görbével meghatározható tényleges (*effective*) és a hiszterézistől függően ezektől eltérő aktuális telítettségi értékei különbözőek lehetnek. Az aktuális telítettség meghatározásának kiindulópontját az ún. fordulópont (*reversal point*) jelenti – ahol a telítési/leürülési görbék váltják egymást.

A hiszterézis jelenségeket számszerűsítő közelítő eljárások kiindulópontja a paraméterbecsléssel meghatározott fő leürülési görbe, illetve annak illesztési paraméterei. A telítési és leürülési görbék két egymástól független pórusméret-eloszlással jellemezhetőek. A folyadék visszatartó-képesség görbének csak meghatározott „régiója” érintett a hiszterézis jelenségek által (*independent domain model* –

POULOVASSILIS, 1962). Ugyanakkor ezen elméleti „geometriai régiók” valójában egymástól nem függetlenek, a valós pórusterek egymással összeköttetésben állnak (*dependent domain model*). A P_{ce} figyelembevételével elhatárolható az a tartomány, amely a hiszterézis jelenségeket nem mutatja – de attól nem független (MUALEM & BERIOZKIN, 2009). A fő telítési és leürülési görbék egy mért függvény értékeiből is megfelelő pontossággal származtathatóak az illesztési paraméterek peremfeltételeit képezve (pl. a nedvesedési és leürülési görbét leíró VG függvény inflexiósponti meredekségét jellemző α_w illetve α_d paraméterre vonatkozóan: $\alpha_w > \alpha_d$ (KUTILEK & NIELSEN, 1994), akár egyszerű szorzással is: $\alpha_w = 2 \times \alpha_d$ (WATSON, 1965; LUCKNER et al., 1989). Figyelembe véve, hogy a leürülési és nedvesedési görbék alapján – adott P_c mellett – meghatározható folyadéktelítettség eltérő (elsődlegesen a „pórustorok”, illetve a „pórustest” átmérőértékeinek függvénye), ún. arányossági tényező bevezetését javasolták KOOL és PARKER (1987), illetve HUANG és munkatársai (2005) is.

A telítési és nedvesedési görbék – mint lehetséges szélső értékek – között felvett ún. „scanning görbék” meghatározására PARKER és LENHARD (1987) a VG egyenlet módosított verzióját képezte. HASSANIZADEH és GRAY (1993) termodinamikai alapú összefüggést dolgoztak ki a hiszterézisgörbék meghatározására. Az összefüggés elméleti alapja az, hogy a folyadékok horizontális áramlása a Gibbs-féle szabadenergia változás gradiense mentén történik, amely a telítettség, a határfelületi görbület (*specific interfacial area*) és a folyadéknomás függvénye. A P_c és S függvényében változó határfelületi görbület értékeknek megfeleltetett hiszterézisgörbék az ún. dinamikus eljárásokkal (*multistep outflow*) meghatározott P_c – S görbéket jól közelítik (HELD & CELIA, 2001; CHEN, 2006). A pórushálózati modellezésben, illetve mikro- és makroléptékű összefüggések számszerűsítésére egyaránt alkalmazhatóak (JOEKAR-NIASSAR et al., 2010). Gyakorlati alkalmazásban azonban a P_c – S függvényt általában az elsődleges vagy fő leürülési görbével jellemzik – részben azért, mert a legtöbb mérési módszer ezek meghatározására alkalmas.

Víz tartó-képesség meghatározása pedotranszfer függvényekkel

A hidrológiai és agronómiai modellezésben jelentős előrelépést hozott az az újítás, amely a már meglévő talajtani adataink hasznosítását célozta meg. A többnyire könnyen, olcsón és rutinszerűen mérhető talajtulajdonságok (PSD, BD, szervesanyag- és karbonát-tartalom stb.) a szükségesnek ítélt, de nehezen, költség- és időigényesen meghatározható talajjellemzők értékeire átszámíthatóak (transzformálhatóak) (BOUMA, 1989) ún. pedotranszfer függvényekkel (*pedotransfer function* – PTF). A PTF-ek képzésének lehetősége kezdetben számos szakterületen újdonságot jelentett, legjelentősebb előrelépés azonban a talaj hidraulikai jellemzőinek becslésében történt (PACHEPSKY et al., 2015). Mára már számos olyan adatbázist hoztak létre, amelyek alkalmasak a PTF-ek képzésére, fejlesztésére és a hidraulikai jellemzők becslésének alapját jelenthetik (HYPRES – WÖSTEN et al., 1999; ISRIC-WISE – BATJES, 2009; HUNSODA – NEMES, 2003; MARTHA – MAKÓ et al., 2010; EU-HYDI – WEYNANTS et al., 2013, stb.). A kidolgozott PTF-ek egy része számítógépes programokba (ROSETTA – SCHAAP et al, 2001; Neuro

Multistep – MINASNY et al., 1999; SOILPAR 2.0 – ACUTIS, 2002; TALAJTANonc – FODOR & RAJKAI, 2005; k-Nearest – NEMES et al., 2008, stb.) és ún. döntéstámogató rendszerekbe is beépített (pl. SINFERS – MCBRATNEY et al., 2002) (PACHEPSKY & RAWLS, 2004; MAKÓ & HERNÁDI, 2012).

A mintázat-felismerésen (*discovering pattern in data*) alapuló ún. adatbányászati eljárások (*data mining techniques*) az 1990-es éveket követően terjedtek el, az elektronikus eszközök tárolókapacitásának növekedésével és a jelentős méretű adathalmazok kezelésére alkalmas szoftverek fejlesztésével. E technikai előrelépéssel lehetővé vált a talaj fizikai félesége mellett a minőségi információk számbavétele a becslés során. E minőségi jellemzők a becslő összefüggésben legtöbb esetben csoportosító – kategória típusú – független változóként felhasználhatóak (pedotranszfer szabályok; *pedotransfer rules* – PTR). A becslés során a talaj szerkezete, altípusa, vagy taxonómiai kategóriája, a feltalaj és az altalaj, a talaj színe, vagy a talajképző kőzet (PACHEPSKY & RAWLS, 2004; TÓTH et al., 2006; MAKÓ & HERNÁDI, 2012), illetve a talajban uralkodó agyagásvány összetétel (WÖSTEN et al. 2001), a porozitás (WALCZAK et al., 2006) is felhasználható független változóként, illetve lehetséges a hidrológiai jellemzők többszintű csoportosítása is (*consecutive grouping*) mindezen jellemzők kombinát alkalmazásával (pl. BRUAND et al., 2003).

A talaj hidraulikai jellemzőit becslő PTF-ek képzése és fejlesztése során felhasználható talajjellemzők feltérképezésének és a változók közötti kapcsolatok vizsgálatának eredményei számos összefoglaló műben megtalálhatók (PACHEPSKY & RAWLS, 2004; RAJKAI, 2004; SAXTON & RAWLS, 2006; VERECKEN et al., 2011). A PTF-ekkel végzett becslő eljárások pontosságát és megbízhatóságát kifejező statisztikai mutatókról (determinációs együttható, empirikus szórás, standard hiba számítása stb. a munka- és teszt adatállományra vonatkozóan) szintén több szakirodalmi összefoglaló munka is készült (pl. WÖSTEN et al., 2001; PACHEPSKY & RAWLS, 2004; SCHAAP, 2004). A víztartó-képesség becslő PTF-ek alkalmazhatóságát tesztelő tanulmányok eredményei szerint a pontbecslő módszerek (*point PTF*) pontossága általában meghaladja a görbebecslő eljárásokat (*parametric PTF*). E két becslő egyenlet típus pontossága közötti, általában nagyságrendnyi eltérést nem meghaladó mértékű különbsége részben azzal magyarázott, hogy különböző nyomáson más-más talajjellemzők befolyásolhatják a folyadékviszatarató-képesség értékek alakulását (TOMASELLA et al., 2000; PACHEPSKY et al., 2004; VERECKEN et al., 2011). A görbebecslő PTF típusú összefüggésekkel az illesztett SWRC értékeit határozzuk meg, így az illesztés hibája szintén csökkentheti a PTF-ek pontosságát (SCHAAP, 2004). Az adott nyomáson mérhető folyadékviszatarató-képesség értékek eloszlása a normál eloszlástól némiképpen eltérő lehet és a függő és független változók közötti összefüggések sok esetben nem lineárisak, ezért javasolt a becsült paraméterek logaritmikus értékeinek, illetve a becslő változók transzformált (logaritmikus, szorzat, reciprok és négyzet) értékeinek használata is a becslőfüggvényekben (pl. VERECKEN et al., 2011). A görbebecslő eljárások pontosságát korlátozhatja, hogy a hidraulikai függvények paraméterei között gyakran szoros összefüggés tapasztalható és általában maximum 1 500 kPa-ig vannak mért adatok, így az e feletti nyomásértékhez tartozó nedvességtartalmak a függvényillesztést követő-

en meghatározott, extrapolált értékek (TIETJE & TAPKENHINRICHES 1993; CORNELIS et al., 2001).

Mindamellett meghatározó és alapvető kérdések merülnek fel minden további vizsgálat során – a teljesség igénye nélkül: Van-e olyan talajjellemző, amellyel pontosítható a PTF-ekkel végzett becslés? Hogyan lehet a PTF-ek pontosságát számszerűsíteni? Milyen mértékű az egyes hidrofizikai mutatókat meghatározó talajjellemzők szerepe a becslés során? Mi határozza meg azok fontosságát, jelentőségét? Hogyan határozható meg a modellek bemeneti és kimeneti paramétereinek minősége, az adatállományból eredő bizonytalanság és a modell bizonytalansága? Kérdéses továbbá a PTF-ekkel végzett becslés léptékfüggése, ígéretes kutatási terület a paraméterek közötti összefüggések feltárása, a szintetikus adatállományok fejlesztése és a különböző léptékű becslések megfelelő bemeneti változóinak megválasztása is (PACHEPSKY et al., 2015).

Szemifizikus és geometriai alapú összefüggések

Az SWRC, PoSD és a talajok szemcséinek és aggregátumainak méret szerinti eloszlása (PSD; illetve GSD – *grain size distribution*) közötti összefüggés számszerűsíthető félempirikus/szemifizikus összefüggésekkel is – hasonlóságot feltételezve a kumulált PSD vagy GSD és az SWRC/PoSD függvények között (pl. ARYA & PARISH, 1981; RAJKAI et al., 1981; HAVERKAMP & PARLANGE, 1986; ARYA et al., 1999; HWANG & POWERS, 2003), vagy az SWRC fraktál elvű megközelítésével is (TYLER & WHEATCRAFT, 1989; RIEU & SPOSITO, 1991; WÖSTEN et al., 1999; GHARBANIAN-ALAVIJEH & MILLÁN, 2011). Az SWRC/PoSD – és a folyadékvezető-képesség – PSD alapú pontos becslésének egyik legfontosabb feltétele a PSD adatok pontossága, reprezentativitása (CAMPBELL & SHIOZAWA, 1992). A PSD meghatározási módszerek azonban országonként, egyes esetekben szakterületenként is különbözőek lehetnek (NEMES, 2003). Az általánosan alkalmazott szedimentációs eljárások mellett ígéretes eredményekkel szolgálnak a lézeres szemcseanalizátorral végzett mérések, mellyel a PSD folyamatos függvénye vehető fel 0,01–2 000 μm átmérő-tartományban (pl. KONERT & VANDENBERGHE, 1997; RYZAK & BIEGANOWSKI, 2011; MAKÓ et al., 2017). Ugyanakkor limitált alkalmazhatóságáról számos publikált vizsgálati eredmény található a szakirodalomban. Javasolt a szemcsék alak eltéréseit figyelembe vevő “*shape*” faktorok képzése és alkalmazása az eredmények számításához (pl. KONERT & VANDENBERGHE, 1997).

A parametrikus modellek és a PSD függvényből kiinduló SWRC meghatározás 1990-es évek előtt képzett generációjának elvi háttere a póruster jelentős leegyszerűsítése, mely szerint a talaj pórusrendszere egymástól független kapillaris csövek-ként képezhető le (*bundle of parallel capillary tubes* – BPC modell); víztartó képessége a Laplace–Young-egyenlet értelmében a kapillarisok átmérőjével arányos – vízvezető képessége a Poisseuille-törvény alapján számolható. A folyadék-visszatartó-képesség azonban eltérő lehet a szemcsék és az aggregátumok átlagos és medián átmérőinek értéke, a pórusok felülete és elrendeződése (ARYA & PARISH, 1981; CAMPBELL & SHIOZAWA, 1992; ASSOULINE & ROUAULT, 1997), az aggregá-

tumok stabilitása (TISDALL & OADES, 1982; SIX et al., 2000) és a talaj agyag- és humusztartalmának mértéke szerint (DEXTER et al., 2008; RAJKAI et al., 2015).

A póruster geometriai alapú leképezése az 1950-es évek előtti kőolajipari kutatásokra vezethető vissza. GRATON és FRASER (1935) egy elméleti porózus közeg – különböző elrendezésű, de rendezetten elhelyezkedő szabályos gömbszerű részecskékből alkotott rendszer – tulajdonságait vizsgálták és számították a folyadékok mozgását meghatározó hidrofizikai jellemzőket telítés és leürülés esetén. A porózus közeg gömbszerű alkotóelemek által bezárt terek hierarchikus rendszereként értelmezése a többfázisú transzport folyamatok modellezésében a pórushálózat modellekben jelent meg először (FATT, 1956). A pórussintű folyadékmozgások tanulmányozásának gyakorlati jelentősége a víztartó-képesség közelítő függvények esetében elsősorban az, hogy a hidrológia területén e szemlélet segítette az újabb típusú – a talaj porozitásviszonyaiból kiinduló statisztikai alapú hidraulikai függvényillesztési eljárások kidolgozását (pl. lognormál PSD – CAMPBELL & SHIOZAWA, 1992; KOSUGI, 1999; Weibull PSD – ASSOULINE et al., 1998; TULLER & OR, 2005).

TULLER és munkatársai (1999) számszerűsítették a pórusok szögletességének mértéke és folyadék-visszatartása közötti kapcsolatot, felhasználva a Laplace–Young-egyenlet által definiált összefüggést a kapilláris nyomás és a folyadékok határfelületén kialakuló görbületi sugár között. A porózus közeget sokszögletű és repedésszerű formákból álló hálózatként képezi le. Ez a megközelítés a valóságot jobban közelítő alapot szolgáltat a felszín alatti folyadékterjedést és szennyezőanyag-transzportot szimuláló modellezésnek; lehetőséget ad az adszorpciós folyamatok és folyadékfilmek mozgását leíró összefüggések számszerűsítésére (*film and corner flow*) (DULLIEN, 1979; TULLER et al., 1999; TULLER & OR, 2005).

Többmódusú parametrikus függvények

Általános tapasztalat, hogy az egymódusú szemcseeloszlást feltételező parametrikus függvények csak az „átlagos” nedvességtartalom értékeknek megfeleltethető nyomástartományban illeszthetők megfelelő pontossággal. Az illesztés és a PTF típusú becslés hibája is jelentős lehet, a folyadékviszatarató-képesség görbék szélső nyomásértékein, a „száraz” és a telítettséghez közeli nedvesség tartományokban (*dry and wet ends of hydraulic functions*) (VAN GENUCHTEN & NIELSEN, 1985; ROSS et al., 1991; NIMMO, 1997; TULLER & OR, 2005; PRIESACK & DURNER, 2006).

Azok a talajok, amelyek nagyon heterogén pórusméret eloszlással jellemezhetőek, ún. „kettős porozitású rendszerként” (*dual porosity systems*) képezhetőek le. A víztartó-képesség görbe ez esetben lehet, pl. a van Genuchten függvények szuperpozíciójával képzett két módusú hidraulikai függvény (DEXTER et al., 2008), vagy statisztikai alapú kétmódusú pl. KOSUGI (1994) függvény. E függvények jelentik a később kifejlesztett ún. multimodális függvényillesztési (pl. DURNER, 1994) vagy a pórusok lognormál eloszlását feltételező bimodális eljárások (ROMANO & NASTA, 2016), illetve a mátrix és szerkezeti pórusok folyadékviszatarátását eltérő függvényekkel közelítő eljárások (pl. ROSS & SMETTEN, 1993) kiindulópontját. Matematikailag a számítás paraméterigénye nagyobb, ám az eredmények jóval pontosabbak lehetnek, mint az egymódusú függvények alapján közelített folyadékviszatarató-

képesség értékek (ROSS & SMETTEN, 1993; DURNER, 1994; ROMANO & NASTA, 2016), ugyanakkor a függvényillesztési paraméterek fizikai tartalma ez esetben nehezen értelmezhető (NIMMO et al., 2007).

A multimodális illesztési eljárások ugyan lehetővé tették a makroporozitás hatásának figyelembevételét a víztartó-képesség meghatározása során, a századfordulóra érve azonban továbbra is kérdéses maradt, hogy az SWRC görbék száraz végpon-ti értékeinek becslése hogyan pontosítható (ROSS et al., 1991; CAMPBELL & SHIOZAWA, 1992; KHLOSI et al., 2006; SILVA & GRIFOLL, 2007). A kapillaritás mellett jelentős szerepe van a folyadékviszatar-tó-képesség értékek alakulásában a gőz- és folyadékfázisú adszorpciós folyamatoknak is (pl. TULLER & OR, 2001, 2005; LEBEAU & KONRAD, 2010). A vízre vonatkozóan (a Kelvin-egyenlet alapján, 298,15 K hőmérsékleten) 10^4 kPa átlagos elméleti kapilláris nyomásérték-határ alatt (LEBEAU & KONRAD, 2010) a kapilláris erők hatását meghaladják az adszorpciós és kondenzációs folyamatokat meghatározó erők (intermolekuláris erők, ion-dipólus és van der Waals kölcsönhatások). E nyomástartományban a folyadékáramlás különböző vastagságú folyadékfilmek formájában megy végbe (TULLER & OR, 2005). A multimodalitás számszerűsítéséhez hasonlóan az SWRC függvény ez esetben is „szakaszokra osztható fel”, melyek egymástól eltérő egyenletekkel jellemezhetőek. FAYER és SIMONS (1995) a kapillárisok által meghatározott folyadékviszatar-tó-képesség tartományt a szigmoid jellegű KOSUGI (1996: K1) függvénnyel, míg az adszorpció által meghatározott folyadékviszatar-tó-képességet CAMPBELL és SHIOZAWA (1992: CS) logaritmikus függvényével jellemezte. A teljes nyomástar-tomány folyadékviszatar-tó-képességének elemzéséhez azonban ez esetben is szükséges a görbék közötti „átfedés” tanulmányozása, és az egyenletek „harmonizálása” (a kapilláris értelmezés szerint „nagy” nyomáson (10^4 kPa) a kis kapillárisok telítet-tek, míg a film-áramlást leíró elmélet változó vastagságú filmet feltételez a telítetlen kapillárisokban (FAYER & SIMON, 1995; KHLOSI et al., 2008).

A talajpórusok NAPL-visszatar-tó képessége

A talajok NAPL-visszatar-tó képességének mérésére alkalmas eljárásokat (pl. higany-injektálás, porózus kerámialapok, centrifugák és nyomáscellák alkalmazása, röntgen és gamma sugárgyengítéssel eljárások, illetve a digitális képalkotási technika-k) magyarul MAKÓ és HERNÁDI (2012) mutatta be.

Nemzetközi szinten egyes eljárások szabványosítottak, míg a legtöbb módszer-tani útmutatókban található meg (pl. AMYX et al., 1960; KLUTE & DIRKSEN, 1986; LAL & SHUKLA, 2004). A talajok szerves folyadék-gőz-adszorpciója meghatározható – a higroszkóposági mérésekhez hasonlóan – különböző páratelítettségű térbe helyezett talajminták egyensúlyi tömegének mérésével, illetve valamilyen apoláris folyadékkal (pl. higany) vagy gázzal (pl. nitrogén) mérhető adszorpciós izoterma felvételével is (MAKÓ & HERNÁDI, 2012).

Az NAPL típusú szennyezőanyagok felszín alatti mozgását szimuláló modellek-ben jellemzően a mért vagy számított víztartó-képesség értékek ismeretében (pl. FORSYTH, 1988; SLEEP, 1995), vagy az arra illesztett SWRC illesztési paramétereit felhasználva (pl. PARKER et al., 1985; CHEN et al., 1999) számíthatóak a folyadék-

terjedés jellemzésére szolgáló kimeneti adatok. A nem vizes fázisú szennyező anyagra vonatkozó – adott folyadékteleltetés mellett meghatározható – kapilláris nyomás értékek ($P_{c\ nw}$) ún. skálázási eljárással – a folyadékjellemzőkből képzett hányados felhasználásával – számíthatók át a vízre vonatkoztatott kapilláris nyomásból ($P_{c\ w}$). A víz és NAPL típusú szennyezőanyagokra vonatkozó összefüggések közötti átszámítás/skálázás kiindulópontja a LEVERETT, illetve LEVERETT és LEWIS 1941-ben, különböző osztályozottságú homok-mintákkal végzett kísérletek eredményei alapján képzett egyenlete. A Leverett-típusú skálázás elvi háttere a póruster leegyszerűsítése (ideálisan porózus közeg).

A vízre vonatkozó P_c -S összefüggések jelentik a kiindulópontot a telítetlen fázisú folyadékvezető-képesség és a modellezésben másodlagosan meghatározott relatív áteresztőképesség/relatív vízvezető-képesség (k_r) számításához (MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN, 1980; PARKER & LENHARD, 1987; CHEN et al., 1999). A dinamikus eljárásokkal végzett vizsgálatok eredményei alapján egyes szerzők a Leverett-egyenlet pontosítását javasolták pl. a folyadékok sűrűségéből képzett hányadossal, a határfelületi feszültségek ismeretében, a nedvesedési szög és a porozitás, illetve differenciált porozitás figyelembevételével (pl. LENHARD & PARKER, 1987; DEMOND & ROBERTS, 1991; DANE et al., 1992; BRADFORD & LEIJ, 1995; MOSELEY & DHIR, 1996; İSHAKOĞLU & BAYTAŞ, 2005). A módosított verziók elméleti alapja azonban azonos, a Leverett-egyenlet hibáit nem küszöbölték ki (MAKÓ & HERNÁDI, 2012). Az átszámítás pontossága függ a folyadékok és a szilárd fázis közötti kölcsönhatások különbözőségétől (duzzadás-zsugorodás, dezaggregáció stb.), mely elsősorban a nagy agyagtartalmú és/vagy szerkezetes talajok esetében együtt jár az effektív pórusméret-eloszlás megváltozásával (ANDERSON et al., 1985; LENHARD & BROOKS, 1985; BRADFORD & LEIJ, 1995; RUBIN et al., 1998; MAKÓ & HERNÁDI, 2012).

Az NAPL típusú szennyezőanyagokra vonatkozó folyadékviszatartható-képesség görbék esetében nem ismert, hogy átlagosan milyen nyomásértéknek feleltethető meg a kapilláris és adszorpciós, illetve csak adszorpciós erők által visszatarthatott szerves folyadék mennyisége.

A két folyadékfázis egyidejű jelenléte esetén a dinamikus eljárásokkal meghatározható hidrológiai jellemzők és a folyadék-, illetve szilárd fázis tulajdonságai közötti összefüggések vizsgálatát célzó kutatások eredményei mutattak rá először az NAPL telítettség elvi maximumát megszabó maradvány víz (*irreducible water saturation*), valamint a maradvány NAPL telítettség (*residual NAPL saturation*) pontos meghatározásának fontosságára is a modellezés során. A felszín alatti egy vagy több folyadékfázis terjedési és áramlási folyamatainak modellezésében fontos szerepe van a belépési küszöbnyomás értékeknek. (E küszöbnyomás a legnagyobb effektív pórusátmérő értékhez rendelhető kapilláris nyomás, melyen megindul a nem-nedvesítő fázis belépése a porózus közegbe – általánosság szerint az alábbi nedvesedési sorrend mellett: víz/NAPL/levegő). A maradvány telítettség és a belépési küszöbnyomás értéke is eltérő lehet a folyadék jellemzőitől, a talajtulajdonságoktól (ECKBERG & SUNADA, 1984; PARKER et al., 1991; POWERS et al., 1992; IMHOFF et al., 1994; 1997; ZHOU & BLUNT, 1997; BRADFORD et al., 2003;

O'CARROL et al., 2004) és a telítési sorrendtől függően (HOAG & MARLEY, 1986; FREDLUND & XING, 1994; OOSTROM et al., 2005; HUANG et al., 2009).

A P_c -S, illetve P_c -S- k_r összefüggések pontosítására vonatkozóan környezetvédelmi célú modellek fejlődésében a maradvány szerves folyadékfázis telítettség becslésében mutatkozott előrelépés. A maradvány NAPL telítettség mértéke először az 1990-es években képzett modellekben szerepelt, konstans értékkel, mely átlagértékeket tartalmazó táblázatokból határozható meg szubjektíven megállapított hasonlóság alapján, vagy számítható pl. a maradvány víztelítettség értékekből a folyadékok határfelületi feszültsége ismeretében, pl. LENHARD és PARKER (1987) módszertana szerint (MAKÓ & HERNÁDI, 2012). A víz maradvány telítettsége a hidrológiai értelmezés szerint – az a folyadéktartalom, melynél a talaj relatív áteresztése nullára csökken – meghatározható az SWRC függvény paramétereiként (VAN GENUCHTEN, 1980), illetve a k_r -P függvény illesztésével (LENHARD et al., 2004). A századfordulót követően képzett összefüggések szerint a maradvány NAPL-telítettség változóként (WIPFER & VAN DER ZEE, 2001; VAN GEEL & ROY, 2002; OOSTROM & LENHARD, 2003; LENHARD et al., 2004; OOSTROM et al., 2005) vehető számításba.

Általánosságban véve az NAPL típusú szennyezőanyagok P_{ce} értéke kisebb (3–20 kPa) mint a vízé, így nagyobb pórusokat képes telíteni adott nyomáson, mint a víz – így kisebb effektív pórustérrel jellemezhető (LENHARD & BROOKS, 1985). A vízre vonatkozó P_{ce} érték a BC függvény esetében illesztési paraméter. Részben ez az oka a BC függvény népszerű alkalmazásának a többfázisú transzportmodellezésben is. A $P_{ce w}$ egyes statisztikai alapú SWRC függvényekben is szerepel illesztési paraméterként (pl. KOSUGI, 1999) és kidolgozták a paraméterek közötti konverzió lehetőségét is (pl. ASSOULINE, 2006). SCHAAP és VAN GENUCHTEN (2006) a vízvezető-képesség közelítő meghatározásának pontosítására tettek javaslatot kicsi, de nem nulla értékű P_{ce} figyelembevételével a VG P_c -S, illetve a k_r meghatározásánál. Az NAPL típusú szennyezőanyagokra vonatkozó P_{ce} értékek a modellekben közvetett módon meghatározottak.

A VG egyenletek használatosak a legtöbb szimulációs modellben a talaj víztartó képességének leírására (CORNELIS et al., 2001) és jól alkalmazhatóak a talajok szervesfolyadék-visszatartó képesség görbéinek közvetlen illesztésére is (RATHFELDER & ABRIOLA, 1996; CHEN et al., 1999; MAKÓ et al., 2004).

A talajok NAPL-visszatartó képessége jobb pontossággal meghatározható a PTF típusú becsülő egyenletekkel az alapvizsgálati talajjellemzők (a százalékos agyag-, por, illetve homoktartalom, karbonát- és szervesanyag-tartalom, térfogattömeg) ismeretében, mint a Leverett-egyenlettel. Javíthatja a becslés pontosságát a részletesebb PSD adatok (pl. különböző, méret szerint elkülönített PSD frakciók mért értékei), illetve a becsülő-változók transzformált (logaritmikus, inverz, szorzat és hatvány) értékeinek felvétele az egyenletbe. A magasabb nyomástartományban (>1500 kPa – extrapolált értékek) azonban a becslés pontossága kisebb és a görbebecslő eljárások eredményei kevésbé közelítik jól a mért értékeket, mint a pontbecslő egyenletek.

A paraméterbecslés kritikus pontja a VG függvény α paraméterének meghatározása a vizsgálatba vonható, egyszerűen meghatározható alapvizsgálati talajjellemzők használatával. A függvényillesztés pontossága ugyanakkor növelhető az egyré-

tegű NAPL-borítottság értékek és az illesztés kiindulási feltételei és határértékei ismeretében (feltételes nemlineáris regresszió). A PTF típusú becslő eljárások kidolgozásának fő korlátja, hogy nem áll rendelkezésre olyan nagy mennyiségű és reprezentatív adatot tartalmazó adatállomány, mint a víztartó-képesség meghatározására képzett PTF típusú becslő függvények kidolgozását lehetővé tevő hidrológiai és talajfizikai adatbázisok (MAKÓ & HERNÁDI, 2012).

Összefoglalás

A víztartó-képesség meghatározása, eszközeit és módszertanát tekintve, jelentős előrelépéseken ment keresztül az elmúlt megközelítőleg 60 évben, mind a közvetlen mérések, mind a modellek területén, például a dinamikus, spektroszkópiai és digitális képazonosítási eljárások kidolgozása, fejlesztése, illetve a mintázatfelismerésen alapuló pedotranszfer típusú becslő eljárások fejlesztése, validálása, beépítése szoftverekbe, almodellekbe. A póruster hierarchikus hálózati rendszerként való új értelmezésével, illetve a geometriai alapú, a szemifizikus, majd a statisztikus közelítő eljárásokkal lehetővé vált a póruster és az abban lejátszódó folyamatok mind pontosabb jellemzése.

A talaj víztartó-képességét – és ezáltal a pórusméret-eloszlását is – többmódusú függvénnyel jellemző egyszerű, vagy összetett összefüggések lehetőséget nyújtanak a porozitás, illetve a porozitás-változási jelenségek, folyamatok (aggregátumstabilitás, tömődöttség változása, pórusdeformációs jelenségek stb.) tanulmányozására, valamint a hiszterézis számszerűsítésére és mind pontosabb meghatározására, akár az SWRC teljes nyomástartományában.

A modellezés különböző léptékeiben értelmezett talajjellemzők közötti összefüggések vizsgálatához a hidrológiai talajtulajdonságokat és az áramlási folyamatokat egyaránt meghatározó talajszerkezet szerepének számszerűsítése mind a mai napig kihívást jelent a talajtani, hidrológiai, környezetvédelmi szakterületen dolgozó kutatók számára.

Az NAPL típusú szennyezőanyagok felszín alatti terjedését szimuláló modellek jellemzően a víztartó-képesség használatával állítják fel az NAPL-visszatartó képességre (elsődleges bemeneti paraméter) alkalmazott összefüggéseket. Ezen összefüggések nem veszik figyelembe a különböző fizikai-, kémiai és fizikokémiai tulajdonságokkal jellemezhető folyadékok, illetve a folyadékok és a szilárd fázis között lezajló különböző mértékű kölcsönhatások jelentőségét (duzzadás, dezaggregáció stb.). Több különböző környezetvédelmi célú kutatás (hulladéklerakók agyagszigetelésének kompatibilitási tesztjei, mikromorfológiai vizsgálatok, illetve dinamikus NAPL visszatartó- és vezetőképesség mérési módszertan fejlesztésére vonatkozó vizsgálatok stb.) eredményei alapján a víztartó-képességből kiinduló számítási eljárások alkalmazhatósága a talajok NAPL-visszatartó képességének meghatározására megkérdőjelezhető.

Megoldást jelenthet, hogy a víztartó-képesség görbék illesztésére alkalmazott parametrikus eljárásokkal az NAPL-visszatartó képesség görbék is meghatározhatóak. A különböző polaritású folyadékokkal felvett folyadékviszátartó-képesség görbék alaki jellemzői alapján igazolt a differenciált porozitás különböző mértékű

megváltozása a talaj vízzel és nem vizes fázisú szerves folyadékokkal való telítése során. A víztartó-képesség becslésére képzett szemifizikus és empirikus eljárások kidolgozásának és fejlesztésének módszertana szerint az NAPL-visszatartó képesség meghatározására alkalmas PTF típusú becslő összefüggések is képezhetőek, melyek pontossága elsősorban 0–1500 kPa nyomástartományban megfelelő. A porozitásváltozás mértékére vonatkozóan a víz- és NAPL-visszatartó képesség görbék alapján meghatározott pórusméret-eloszlási görbék statisztikai jellemzői nyújthatnak információt. A multimodális függvények alkalmazásával lehetővé válhat az NAPL-visszatartó képesség görbék végponti értékei és a becslésbe vont talajtulajdonságok közötti összefüggések pontosabb feltérképezése. Szükséges a PTF típusú NAPL-visszatartó képesség becslő eljárások fejlesztése; pl. az NAPL-visszatartó képesség görbék meghatározására alkalmas parametrikus eljárás megválasztása; a többfázisú folyadéktranszport modellezésben kulcsfontosságú telítettségi értékek (pl. maradvány telítettség), illetve az azokhoz rendelhető kapilláris nyomás (pl. belépési küszöbnyomás) meghatározása és a folyadékviszataró-képesség görbék függvény paramétereit közötti konverziós lehetőségek kidolgozása.

Kulcsszavak: víztartó-képesség, NAPL visszatartó képesség, porozitás, talaj-szerkezet

Kutatásunkat T048302 sz. OTKA és a K119475 sz. NKFI pályázatok, valamint az Emberi Erőforrások Minisztériuma Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával végeztük.

Irodalomjegyzék

- ACUTIS, M. & DONATELLI, M., 2002. SOILPAR 2.00: Software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Eur. J. Agron.* **8.** (3–4) 373–377.
- AHUJA, L. R., BAMES, B. B., CASSEL, D. K., BRUCE, R. B. & NOFZIGER, D. L., 1988. Effect of assumed unit gradient during drainage on the determination of unsaturated hydraulic conductivity and infiltration parameters. *Soil Sci.* **145.** 235–243.
- AHUJA, L.R., NANEY, J. W. & WILLIAMS, R. D., 1985. Estimating soil water characteristics from simpler properties or limited data. *Soil Sci Soc. Am. J.* **49.** 1100–1105.
- AKBARI, A. & GHOSHAL, S., 2015. Bioaccessible porosity in soil aggregates and implications for biodegradation of high molecular weight petroleum compounds. *Environ. Sci. Technol.* **49.** 14368–14375.
- ALAOUI, A., LIPIEC, J. & GERKE, H. H., 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil Till. Res.* **115–116.** 1–15.
- ALIZADEH, A. H. & PIRI, M., 2014. Three-phase flow in porous media: A review of experimental studies on relative permeability. *Rev. Geophys.* **52.** 468–521.
- AMER, 2012. Prediction of hydraulic conductivity as related to pore size distribution in unsaturated soils. *Soil Sci.* **174.** (9) 508–515.
- AMYX, J. W., BASS, D. M. & WHITTING, R. L., 1960. Petroleum reservoir engineering. Physical properties. McGraw-Hill Book Company. New York.

- ANDERSON, D. A. & BROWN, K. W., 1981. Organic leachate effects on the permeability of clay liner. In: Proceedings of the seventh annual research symposium on land disposal: Hazardous Waste. EPA-600/9-81-002b. Cincinnati, OH. US.
- ANDERSON, D. C., BROWN, K & THOMAS, J. C., 1985. Conductivity of compacted clay soils to water and organic liquids. *Water Management & Research*. **3**. 339–349.
- ANDERSON, M. P., WOESSNER, W. W. & HUNT, R. J., 2015. *Applied Groundwater modeling*. 2nd ed. Elsevier.
- ARYA, L. M., LEIJ, F. J., SHOUSE, P. J. & VAN GENUCHTEN, M. TH., 1999. Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. *Soil Sci. Am. J.* **63**. 1063–1070.
- ARYA, L. M. & PARIS, J. F., 1981. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **45**. 1023–1030.
- ASGARZADEH, H., MOSADDEGHI, M. R., DEXTER, A. R., MAHBOUBI, A. A. & NEYSHABOURI, M. R., 2014. Determination of soil available water for plants: Consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*. **226–227**. 8–20.
- ASSOULINE, S., 2002. Modeling soil compaction under uniaxial compression. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **66**. 1784–1787.
- ASSOULINE, S., 2006. Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve. *Vadoze Zone J.* **5**. 554–563.
- ASSOULINE, S. & ROUAULT, Y., 1997. Modeling the relationships between particle and pore size distributions in multicomponent sphere packs: application to the water retention curve. *Colloids Surf. A Physicochem Eng. Asp.* **127**. 201–210.
- ASSOULINE, S., TESSIER, D. & BRUAND, A., 1998. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resour. Res.* **34**. (2) 223–231.
- ASTM, 1996. Standard test methods for determination of the soil water characteristic curve for desorption using hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, or centrifuge. ASTM, West Conshohcken, PA, USA <https://www.astm.org/Standards/D6836.htm>
- BATJES, N. H., 2009. Harmonized soil profile data for applications at global and continental scales: updates to the WISE database. *Soil Use and Management*. **25**. 124–127.
- BAVER, L. D., 1956. *Soil Physics*. 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- BEN-HUR, M. & LADO, M., 2008. Effects of soil wetting conditions on seal formation, runoff, and soil loss in arid and semiarid soils. *Adv. Ser. Agric. Res.* **46**. 191–202.
- BEN-HUR, M., YOLCU, G., UYSAL, H., LADO, M. & PAZ, A., 2009. Soil structure changes: aggregate size and soil texture effects on hydraulic conductivity under different saline and sodic conditions. *Aust. J. Soil Res.* **47**. 688–696.
- BEVEN, K. J. & GERMANN, P. F., 1982. Macropores and water flow in soils. *Wat. Resour. Res.* **18**. (5) 1311–1325.
- BOULDING, R. S., 1995. *Practical handbook of soil vadose zone and groundwater contamination*. Boca Raton, Fla.
- BOUMA, J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B. A. (ed.), *Adv. Soil. Sci.* **9**. 177–213.
- BOUMA, J. A., BOERSMA, A. J. & SCHOONDERBEEK, D., 1977. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **41**. 945–950.

- BRADFORD, S. A. & LEIJ, F. J., 1995. Wettability effects on scaling two- and three-fluid capillary pressure-saturation relations. *Environ. Sci. Technol.* **29**. 1446–1455.
- BRADFORD, S. A., RATHFELDER, K. M., LANG, J. & ABRIOLA, L. M., 2003. Entrapment and dissolution of DNAPL in heterogeneous porous media. *J. Contam. Hydrol.* **67**. 133–157.
- BRAUDEAU, E., & MOHTAR., R. H., 2004. Water potential in nonrigid unsaturated soil-water medium. *Water Resour. Res.* **40**. W05108.
- BRAUN, C., HELMING, R. & MANTHEY, S., 2005. Macro-scale effective conductivity relationship for two-phase flow processes in heterogeneous porous media with emphasis on the relative permeability-saturation relationship. *J. Contam. Hydrol.* **76**. 1–2. 47–80.
- BREWER, R., 1977. Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley & Sons. NY.
- BRUAND, A., FERNANDEZ, P. N. & DUVAL, O., 2003. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use Manage.* **19**. 232–242.
- BROOKS, R. H., & COREY, A. T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap.* 3. Colorado State Univ., Fort Collins.
- BRUTSAERT, W., 1966. Probability laws for pore size distributions. *Soil Sci.* 101. 85–92.
- BUDHU, M., GIESE, R. F., CAMPBELL, G. JR. & BAUMGRASS, L., 1991. The permeability of soils with organic fluids. *Can. Geotech. J.* **28**. 140–147.
- BUZÁS I. (ed.), 1993. Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszertankönyv. 1. INDA 4231 Kiadó. Budapest.
- CALCIU, I., SIMOTA, C. VIZITIU, O. & PĂNOIU, I., 2011. Modelling of soil water retention properties for soil physical quality assessment. *Res. J. Agric. Sci.* **43**. (3) 35–43.
- CAMPBELL, G. S. & SHIOZAWA, S., 1992. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. In: *International workshop on indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils* (eds.: VAN GENUCHTEN, M. T., LEIJ, R. J. & LUND, L. J.) 317–328. Univ. of California. Riverside.
- CARSEL, R. F. & PARRISH, R. S., 1988. Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* **24**. 755–769.
- CHANDLER, R. J. & GUTIERREZ, C. I., 1986. The filter paper method of suction measurement. *Géotechnique*. **36**. 265–268
- CHEN, L., 2006. Hysteresis and dynamic effects in the relationship between capillary pressure, saturation and air-water interfacial area in porous media. Ph.D. thesis. University of Oklahoma. OK.
- CHEN, J., HOPMANNS, J. W. & GRISMER, M. E., 1999. Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability functions. *Adv. Water Res.* **22**. 479–493.
- CHEN, S., LOW, P. F., CUSHMAN, J. H. & ROTH, C. B., 1987. Organic compound effects on swelling and flocculation of Upton montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Am J.* **51**. 1444–1450.
- CHERIAN, C., ARNEPALLI, D. N. DOGGA, T. S. S., RAVITEJA, N. B., GORLE, S. V. & BALRAJ, N. M., 2014. Assessment of grain-size and pore-size distribution using digital image analysis. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference. IGC-2014*. December 18–20. Kakinada. India.

- CHERTKOV, V. Y., 2004. A physically-based model for the water retention curve of clay pastes. *J. Hydrol. (Amsterdam)*. **286**. 203–226.
- COREY, A. T., 1986. Air permeability. In: *Methods of Soil Analysis*. (ed.: KLUTE, A.) 2nd ed. Agronomy monograph 9. ASA and SSSA. Madison, WI. 1121–1136.
- CORNELIS, W. M., RONSYN, J., MEIRVENNE, M. V. & HARMAN, R., 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**. 638–648.
- CUSHMANN, J. H., 1990. *Dynamics of fluids in hierarchical porous media*. Academic press. San Diego. CA.
- DANE, J. H., OOSTROM, M. & MISSILDINE, B. C., 1992. An improved method for the determination of capillary pressure-saturation curves involving TCE, water, and air. *J. Contam. Hydrol.* **11**. 69–81.
- DEMOND, A. H. & ROBERTS, P. V., 1991. Effects of interfacial forces on the two-phase capillary-pressure relationships. *Water Resources Research*. **27**. 423–437.
- DEXTER, A. R., 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. **120**. 201–214.
- DEXTER, A. R., CZYZ, E. A., RICHARD, G. & RESZKOWSKA, A., 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pores spaces in soil. *Geoderma*. **143**. 243–253.
- DI GLÉRIA, J., KLIMES-SZMIK, A. & DVORACSEK, M., 1957. *Talajfizika és kolloidika*. Akadémia Kiadó. Budapest.
- DICARLO, D. A., SAHNI, A. & BLUNT, M. J., 2000. Three-phase relative permeability of water-wet, oil-wet, and mixed-wet sandpacks. *SPE J.* **5**. (1) 82–91.
- DRAGUN, J., 1998. *The soil chemistry of hazardous materials*. Amherst scientific publishers. Amherst. Massachusetts.
- DULLIEN, F. A. L., 1979. *Porous media, fluid transport and pore structure*. Academic Press Inc. New York.
- DURNER, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.* **30**. 211–223.
- ECKBERG, D. K. & SUNADA, D. K., 1984. Nonsteady three-phase immiscible fluid distribution in porous media. *Water Resour. Res.* **20**. 1891–1897.
- FAYER, M. J., & SIMMONS, C. S., 1995. Modified soil water retention functions for all matric suctions. *Water Resour. Res.* **31**. (5) 1233–1238.
- FATT, I., 1965. The network model of porous media I. Capillary pressure characteristics. *Trans AIME*. **207**. 141–159.
- FERNANDEZ, F. & QUIGLEY, R. M., 1985. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. *Can. Geotech. J.* **22**. 205–214.
- FERRERO, A. & LIPIEC, J., 2000. Determining the effect of trampling on soils in hillslope woodlands. *Int. Agrophys.* **14**. 9–16.
- FERRERO, A., LIPIEC, J., TURSKI, M. & NOSALEWICZ, A., 2007. Stability and sorptivity of soil aggregates in grassed and cultivated sloping vineyards. *Polish J. Soil Sci.* **XL** (1) 1–8.
- FODOR, N. & RAJKAI, K., 2005. Számítógépes program a talajok fizikai és vízgazdálkodási jellemzőinek egyéb talajjellemzőkből történő számítására (TALAJTANonc 1.0). *Agrokémia és Talajtan.* **54**. 25–40.
- FORSYTH, P. A., 1988. Simulation of nonaqueous phase groundwater contamination. *Adv. Water Resour.* **11**. 74–83.

- FREDLUND, D. G. & HOUSTON, S. L., 2013. Interpretation of soil-water characteristic curves when volume change occurs as soil suction is changed. In: *Advances in unsaturated soils* (eds.: CAICEDO et al.) Taylor & Francis Group. London.
- FREDLUND, D. G. & XING, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.* **31**. (3) 521–532.
- GERKE, H.H. & VAN GENUCHTEN, M. T., 1993. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resour. Res.* **29**. 305–319.
- GHANBARIAN-ALAVIJEH, B. & MILLÁN, H., 2009. The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point. *Geoderma*. **151**. 224–232.
- GHEZZEHEI, T. A. & OR, D., 2000. Dynamics of soil aggregate coalescence governed by capillary and theoretical processes. *Water Resour. Res.* **36**. 367–379.
- GHEZZEHEI, T. A., TIMOTHY, J. K. & SU, W. W., 2007. Correspondance of the Gardner and van Genuchten-Mualem relative permeability function parameters. *Water Resour. Res.* **43**. W10417.
- GRABER, E. R. & MINGELGRIN, U., 1994. Clay swelling and regular solution theory. *Environ. Sci. Technol.* **28**. 2360–2365.
- GRATON, L. C. & FRASER, H. J., 1935. Systematic packing of spheres with particular relation to porosity and permeability. *J. Geology*. **43**. 785–909.
- GREENLAND, D. J., 1977. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? *Phil. Trans. Royal Soc. London*. **281**. 193–208.
- HAJNOS, M., LIPIEC, J., SWIEBODA, R., SOKOŁOWSKA, Z. & WITKOWSKA-WALCZAK, B., 2006. Complete characterization of pore size distribution of tilled and orchard loamy soil using water retention curve, mercury porosimetry, nitrogen adsorption, and water desorption methods. *Geoderma*. **135**. 307–314.
- HÅKANSSON, I. & LIPIEC, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.* **53**. 71–85.
- HAVERKAMP, R. & PARLANGE, J.-Y., 1986. Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: I. Sandy soils without organic matter. *Soil. Sci.* **142**. 325–339.
- HASSANIZADEH, S. M., & GRAY, W. G., 1993. Thermodynamic basis of capillary pressure in porous media. *Water Resour. Res.* **29**. 3389–3405.
- HELD, R. J. & CELIA, M. A., 2001. Modeling support of functional relationships between capillary pressure, interfacial areas and common lines. *Adv. Water Resour.* **24**. 325–343.
- HERNÁDI, H., MAKÓ, A., KOVÁCS, J. & CSATÁRI, T., 2011. The NAPL retention of mineral mixture series containing different clay minerals. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **44**. (1–4) 390–396.
- HILLEL, D., 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego, CA. USA.
- HOAG, G. E. & MARLEY, M. C., 1986. Gasoline residual saturation in saturated uniform aquifer materials. *J. Environ. Eng.* **112**. 586–604.
- HORN, R., 2004. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**. 1131–1137.
- HUANG, H. C., TAN, Y. C., LIU, C. W. & CHEN, C. H. 2005. A novel hysteresis model in unsaturated soil. *Hydrological Processes*. **19**. 1653–1665.

- HUANG, M., FREDLUND, D. G. & FREDLUND, M., 2009. Estimation of SWCCs from grain-size distribution curves for loess soils in china. [www. soilvision.com](http://www.soilvision.com).
- HWANG, S. I. & POWERS, S. E., 2003. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **67**. 1103–1112.
- IMHOFF, P. T., JAFFÉ, P. R. & PINDER, G. F., 1994. An experimental study of complete dissolution of a nonaqueous phase liquid in saturated porous media. *Water Resour. Res.* **30**. (2) 307–320.
- ISHAKOGLU, A. & BAYTAS, A. F., 2005. The influence of contact angle on capillary pressure–saturation relations in a porous medium including various liquids. *Int. J. Eng. Sci.* **43**. (8–9) 744–755.
- 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.
- IZDEBSKA-MUCHA, D. & TRZCIŃSKI, J., 2008. Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure. *Geologija. Vilnius.* **50**. Supplement. 68–74.
- JARVIS, N. J., ZAVATTARO, L., RAJKAI, K., REYNOLDS, W. D., OLSEN, P.-A., MCGECHAN, M., MECKE, M., MOHANTY, B., LEEDS-HARRISON, P. B. & JACQUES, D., 2002. Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma.* **108**. (1–2) 1–17.
- JOEKAR-NIASSAR, V., HASSANIZADEH, S. M. & DAHLE, H. K., 2010. Non-equilibrium effects in capillarity and interfacial area in two-phase flow: Dynamic pore-network modelling, *J. Fluid. Mech.* **655**. 38–71.
- KHLOSI, M., CORNELIS, W. M., DOUAIK, A., VAN GENUCHTEN, M. T. & GABRIELS, D., 2008. Performance evaluation of models that describe the soil water retention curve between saturation and oven dryness. *Vadose Zone J.* **7**. (1) 87–96.
- KLIMES-SZMIK A., 1962. A talaj pórusterének beosztása a víz mozgása alapján. *Agrokémia és Talajtan.* **1**. 41–54.
- KLUTE, A. & DIRKSEN, C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods* (ed.: KLUTE, A.). 2nd. Edition. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin. 703–735.
- KEMPER, W. D. & ROSENAU, R. C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: *Methods of soil analysis. Part 1* (ed.: KLUTE, A.). 2nd edition. Agronomy monograph. 9. ASA and SSSA. Madison. WI. 425–442.
- KODEŠOVÁ, R., VIGNOZZI, N., ROHOŠKOVÁ, M., HÁJKOVÁ, T., KOČÁREK, M., PAGLIALI, M., KOZÁK, J. & ŠIMŮNEK, J., 2009. Impact of varying soil structure on transport processes in different diagnostic horizons of three soil types. *J. Contam. Hydrol.* **104**. 107–125.
- KONERT, M. & VANDENBERGHE, J., 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology.* **44**. 523–535.
- KOOL, J. B. & PARKER, J. C., 1987. Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* **23**. 105–114.
- KOSUGI, K., 1994. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water. Resour. Res.* **30**. (4) 891–901.
- KOSUGI, K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* **32**. (9) 2697–2703.

- KOSUGI, K., 1999. General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore size distribution. *Soil. Sci. Am. J.* **63**. 270–277.
- KUTILEK, M. & NIELSEN D., 1994. *Soil Hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt.
- LADO M., PAZ A. & BEN-HUR M., 2004. Organic matter and aggregates size interaction in saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**. 234–242.
- LAL, R. & SHUKLA, M. K., 2004. *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker. New York.
- LE BISSONNAIS, Y. & ARROUAYS, D., 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.* **48**. 39–48.
- LEBEAU, M. & KONRAD, J.-M., 2010. A new capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* **46**. W12554.
- LEVERETT, M.C., 1941. Capillary behavior in porous solids. *Trans. AIME.* **142**. 152–169.
- LEVERETT, M. C. & LEWIS, W. B., 1941. Steady flow of gas-oil-water mixtures through unconsolidated sands. *Trans. Society of Petroleum Engineering America, Institute of Mining Engineering.* **142**. 107–116.
- LEHMANN, P., & OR, D., 2009. Evaporation and capillary coupling across vertical texture contrasts in porous media. *Phys. Rev. E.* **80**. (4) 046318.
- LENHARD, R. J. & BROOKS, R. H., 1985. Comparison of liquid retention curves with polar and nonpolar liquids. *Soil Sci. Am. J.* **49**. 816–821.
- LENHARD, R. J., OOSTROM, M. & DANE, J. H., 2004. A constitutive model for air-NAPL-water flow in the vadose zone accounting for immobile, non-occluded (residual) NAPL in strongly water-wet porous media. *J. Contam. Hydrol.* **71**. 261–282.
- LENHARD, R. J. & PARKER, J. C., 1987. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow, 2. Permeability-saturation relations. *Water Resour. Res.* **23**. (12) 2197–2206.
- LEVY, G. J. & MAMEDOV, A. I., 2002. High-energy-moisture-characteristic aggregate stability as a predictor for seal formation. *Soil Sci. Am. J.* **66**. 1603–1609.
- LI, X. & ZHANG, L. M., 2009. Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil. *Can. Geotec. J.* **46**. (2) 129–141.
- LIN, H. S., MCINNES, K. J., WILDING, L. P. & HALLMARK, C. T., 1999. Effects of soil morphology on hydraulic properties: II. Hydraulic pedotransfer functions. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **63**. 955–961.
- LUCKNER, L. M., VAN GENUCHTEN, M. T. & NIELSEN, D. R., 1989. A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface. *Water Resour. Res.* **25**. 2187–2193.
- LOWEL, S. & JOEN, E. S., 1984. *Powder surface area and porosity*. 3rd edition. Chapman & Hall. London.
- MAKÓ, A., 1995. A talaj szilárd fázisa és a szerves folyadékok kölcsönhatásai. Kandidátusi értekezés. Keszthely.
- MAKÓ, A., ELEK, B., DUNAI, A. & HERNÁDI H., 2009. Comparison of nonaqueous phase liquids conductivity and air permeability of different soils. *Commun. Soil.Sci. Plant Anal.* **40**. (1) 787–799.
- MAKÓ A. & HERNÁDI H., 2012. *Kőolajszármazékok a Talajban: Talajfizikai Kutatások*. Pannon Egyetem. Veszprém. Magyarország.

- MAKÓ, A., & HERNÁDI, H., 2016. Comparison the pore size distribution of soils saturated by water and NAPL. 23rd International Poster Day and Institute of Hydrology Open Day. Transport of water, chemicals and energy in the soil – plant – atmosphere system. 10th november 2016. 108-124.
- MAKÓ, A., MÁTÉ, F., MARTELLI, G. & CIET, P., 1995. Szénhidrogének gőzadszorpciója különféle talajokon. *Agrokémia és Talajtan*. **44**. 153–180.
- MAKÓ, A., MÁTÉ, F., NÉMETH, T. & TÓTH, M., 2004. Talajminták szerves folyadék-visszatartási izotermáinak meghatározása. Talajtani Vándorgyűlés. Kecskemét, 2004. augusztus 24–26.
- MAKÓ, A., RAJKAI, K., HERNÁDI, H. & HAUK, G., 2014. Comparison of different settings and pretreatments in soil particle size distribution measurement by laser-diffraction method. *Agrokémia és Talajtan*. **63**. 19–28.
- MAKÓ, A., TÓTH B., HERNÁDI H., FARKAS CS., MARTH P., 2010. Introduction of the Hungarian Detailed Soil Hydrophysical Database (MARTHA) and its use to test external pedotransfer functions. *Agrokémia és Talajtan*. **59**. 29–38.
- MAKÓ, A., VARGA, T., HERNÁDI, H., LABANCZ, V., BARNA, G., 2017. Talajminták lézeres szemcseanalízisének módszertani tapasztalatai. *Agrokémia és Talajtan*. **66**. 223-250.
- MAMEDOV, A. I., HUANG, C. & LEVY, G. J., 2006. Antecedent moisture content and aging duration effects on seal formation and erosion in smectitic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**. 832–843.
- MATMON, D. & HAYDEN, N. J., 2003. Pore space analysis of NAPL distribution in sand-clay media. *Adv. Water Resour.* **26**. 773–785.
- MCBRATNEY, A. B., MINASNY B., CATTLE S. R. & VERVOORT R. W. 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*. **109**. 41–73.
- MINASNY, B., MCBRATNEY, A. B. & BRISTOW, K. L., 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*. **93**. 225–253.
- MITCHELL, J. K. & MADSEN, F. T., 1987. Chemical effects on clay hydraulic conductivity. In: Proc. Speciality Conference on Geotechnical practice for waste disposal. 87–116.
- MOREL-SEYTOUX, H. J., MEYER, P. D., NACHABE, M., TOURNA, J., VAN GENUCHTEN, M. T. & LENHARD, R. J., 1996. Parameter equivalence for the Brooks-Corey and van Genuchten soil characteristics: Preserving the effective capillary drive. *Water Resour. Res.* **32**. 1251–1258.
- MOSELEY, W. A. & DHIR, V. K., 1996. Capillary pressure–saturation relations in porous media including the effect of wettability. *Journal of Hydrology*. **178**. 33–53.
- MSZ-08 0205-78, 1979. A talaj fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságainak vizsgálata. MÉM, Budapest
- MUALEM, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* **12**. 513–521.
- MUALEM, Y. & BERIOZKIN, A., 2009. General scaling rules of the histeretic water retention function based on Mualem’s domain theory. *Eur. J. Soil. Sci.* **60**. 652–661.
- MUELLER et al., 2010. Assessing agricultural soil quality on a global scale. 9th World Congress of Soil Science : Soil solutions for a changing world 1–6 August 2010. Brisbane. Australia. Published on DVD.

- MURRAY, R. S. & QUIRK, J. P., 1982. The physical swelling of clays in solvents. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **46**. (4) 865–868.
- NAGARAJARAO, Y., 1994. Pore size distribution measurements in swell-shrink soils. *J. Plant. Nutr. Soil. Sci.* **157**. (2) 81–85.
- NEMES, A., ROBERTS, R. T., RAWLS, W. J., PACHEPSKY, Y. A. & VAN GENUCHTEN, M. T., 2008. Software to estimate -33 and -1500 kPa soil water retention using the non-parametric k-nearest neighbor technique. *Environ. Modell. Softw.* **23**. (2) 254–255.
- NEMES, A., SCHAAP, M. G. & WÖSTEN, J. H. M., 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Sci. Soc. A. J.* **67**. 1093–1102.
- NIMMO, 1997. Modeling structural influences on soil water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **61**. 712–719.
- NIMMO, J. R., 2004. Porosity and pore size distribution. V. 3. In.: *Encyclopedia of soils in the environment* (ed.: HILLEL, D.) 295–303. London. Elsevier.
- NIMMO, J. R., HERKELRATH, W. N. & LAGUNA LUNA, A. M., 2007. Physically based estimation of soil water retention from textural data: general framework, new models, and streamlined existing models. *Vadose Zone J.* **6**. 766–773.
- NORTON L. D., MAMEDOV A. I., HUANG C. & LEVY G. J., 2006. Soil aggregate stability as affected by long-term tillage and clay mineralogy. *Adv. Geocol.* **38**. 422–429.
- O'CARROLL, D. M., BRADFORD, S. A. & ABRIOLA, L. M., 2004. Infiltration of PCE in a system containing spatial wettability variations. *J. Contam. Hydrol.* **73**. 39–63.
- OOSTROM, M., DANE, J. H. & WIETSMA, T. W., 2005. Removal of carbon tetrachloride from a layered porous medium by mean of soil vapor extraction enhanced by desiccation and water table reduction. *Vadose Zone J.* **4**. 1170–1182.
- OOSTROM, M. & LENHARD, R. J., 2003. Carbon tetrachloride flow behavior in unsaturated hanford calcic material: an investigation of residual nonaqueous phase liquids. *Vadose Zone J.* **2**. 25–33.
- PACHEPSKY, Y. A., GUBER, AK K., VAN GENUCHTEN, M. T., NICHOLSON, T. J., CADY, R. E., ŠIMŮNEK, J. & SCHAAP, M. G., 2006b. Model abstraction techniques for soil water flow and transport. NUREG/CR-688.
- PACHEPSKY, Y., RAJKAI, K. & TÓTH, B., 2015. Pedotransfer in soil physics: trends and outlook. A review. *Agrokémia és Talajtan.* **64**. (2) 339–360.
- PACHEPSKY, Y. A. & RAWLS, W. J. (eds.), 2004. *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*. Elsevier. Amsterdam.
- PACHEPSKY, Y. A., RAWLS, W. J. & LIN, H. S., 2006a. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma.* **131**. 308–316.
- PARKER, J. C., KAYTAL, A. K., KAULARACHI, J. J., LENHARD, R. J., JOHNSON, T. J., JAYARAMANN, K., UNLU, K. & ZHU, J. L., 1991. Modelling multiphase organic chemical transport in soils and groundwater. Final report. EPA/600/2-91/042. Environmental protection Agency. Washington, DC.
- PARKER, J. C., KOOL, J. B. & VAN GENUCHTEN, M. T., 1985. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experimnets by parameter estimation: II. Experimental studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**. 1354–1359.
- PARKER, J. C. & LENHARD, R. J., 1987. A model of hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: 1. Saturation-pressure relations. *Water Resources Res.* **23**. 2187–2196.

- PENG, X. & HORN, R., 2005. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types. *Soil Sci. Soc. A. J.* **69**, 584–592.
- PENG, X. & HORN, R., 2007. Anisotropic shrinkage and swelling of some organic and inorganic soils. *Eur. J. Soil Sci.* **58**, 98–107.
- POULOVASSILIS, A. 1962. Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains. *Soil Sci.* **93**, 405–412.
- POWERS, S. E., ABRIOLA, L. M. & WEBER JR., W. J., 1992. An experiment investigation of NAPL dissolution in saturated subsurface systems: steady state mass transfer rates. *Water Resour. Res.* **28**, 2691–2705.
- PRIESACK, E. & DURNER, W. 2006. Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function. *Vadose Zone J.* **5**, 121–124.
- RAJKAI K., 1988. A talaj víztartó képessége és különböző talajtulajdonságok összefüggésének vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan.* **36–37**, 15–30.
- RAJKAI K., 1993. A talajnedvesség energiaállapotának meghatározása. In: *Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerek*. 1. A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata (Szerk.: BUZÁS, I.). INDA 4231 Kiadó. Budapest. 143–161.
- RAJKAI K., 2004. A víz mennyisége, eloszlása és áramlása a talajban. MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet. Budapest.
- RAJKAI, K., TÓTH, B., BARNA, GY., HERNÁDI, H., KOCSIS, M. & MAKÓ, A., 2015. Particle-size and organic matter effects on structure and water retention of soils. *Biologia.* **70**, (11) 1456–1461.
- RAJKAI K., VÁRALLYAY GY., PACSEPSZKIJ, J. A. & CSERBAKOV R. A., 1981. pF-görbék számítása a talaj mechanikai összetétele és térfogattömege alapján. *Agrokémia és Talajtan.* **30**, 409–438.
- RASA, K., EICKHORST, T., TIPPKÖTTER, R. & YLI-HALLA, M., 2012. Structure and pore system in differently managed clayey surface soil as described by micromorphology and image analysis. *Geoderma.* **173–174**, 10–18.
- RATHFELDER, K. & ABRIOLA, L. M., 1996. The influence of capillarity in numerical modelling of organic liquid redistribution in two-phase systems. *Adv. Water Resour.* **21**, (2) 159–170.
- RAWLS, W. J. & BRAKENSIEK, D. L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: *Watershed Management in the 1980s. Proceeding of Symposium of Irrig. Drainage Div., Denver, CO., April 30–May 1, 1985.* ASCE. NY. 293–299.
- RAWLS, W. J., PACHEPSKY, Y., RITCHIE, J. C., SOBECKI, T. M. & BLOODWORTH, H., 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma.* **116**, 61–76.
- REYNOLDS, W. D., DRURY, C. F., TAN, C. S., FOX, C. A. & YANG, X. M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma.* **152**, 252–263.
- RIEU, M. & SPOSITO, R., 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and water properties: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55**, 1231–1238.
- ROMANO, N. & NASTA, P., 2016. How effective is bimodal soil hydraulic characterization? Functional evaluations for predictions of soil water balance. *Eur. J. Soil Sci.* **67**, 523–535.
- ROSS, P. J. & SMETTEM, R. J., 1993. Describing soil hydraulic properties with sums of simple functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **57**, 26–29.

- ROSS, P. J., WILLIAMS, J. & BRISTOW, K. L., 1991. Equation for extending water-retention curves to dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55**. 923–927.
- ROTH, K., VOGEL, H-J. & KASTEEL, R., 1999. The scale way: A conceptual framework for upscaling soil properties. In *Modeling of transport processes* (eds.: FEYEN, J. & WIYO, K.) 477–490. Wageningen Press. Wageningen. NL.
- RUBIN, H., NARKIS, N. & CARBERRY, J., 1998. *Soil and Aquifer Pollution. Non-aqueous Phase Liquis – Contamination and Reclamation*. Springer-Verlag. Berlin.
- RUDIYANTO, R., SAKAI, M., VAN GENUCHTEN, M. T., ALAZBA, A. A., SETIAWAN, B. I. & MINASNY, B., 2015. A complete soil hydraulic model accounting for capillary and adsorptive water retention, capillary and film conductivity, and hysteresis. *Water Resour. Res.* **51**. WR017703.
- RYŽAK, M. & BIEGANOWSKI, A., 2011. Methodological aspects of determining sl particle-size distribution using laser diffraction method. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* **174**. 62–633.
- SAXTON, K. E. & RAWLS, W. J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**. 1569–1578.
- SCHAAP, M.G., 2004. Accuracy and uncertainty in PTF predictions. In: *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology* (eds.: PACHEPSKY, Y. & RAWLS, W. J.) 33–43. Elsevier. Amsterdam.
- SCHAAP, M. G., LEIJ, F., J. & VAN GENUCHTEN, M. T., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* **251**. 163–176.
- SCHAAP, M. G. & VAN GENUCHTEN, M. T., 2006. A modified Mualem-van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone J.* **5**. 27–34.
- SCHINDLER, U., DURNER, W., VON UNOLD, G. & MÜLLER, L., 2010. Evaporation method for measuring unsaturated hydraulic properties of soils: extending the measurement range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **74**. 1071–1083.
- SHEIN, E. V., GUBER, A. K. & DEMBOVETSKY, A. V., 2004. Key soil water contents. In: *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology* (eds.: PACHEPSKY, Y. & RAWLS, W. J.) 241–252. Amsterdam. Elsevier.
- SILVA, O., & GRIFOLL, J., 2007. A soil-water retention function that includes the hyper-dry region through the BET adsorption isotherm. *Water Resour. Res.* **43**. W11420.
- ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. T. & ŠEJNA, M., 2005. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable-saturated media. Ver. 3. Department of Environmental Sciences. University of California Riverside. Riverside. CA.
- SIX, J., BOSSUYIT, H., DEGRYZE, S. & DENEFF, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* **79**. 7–31.
- SIX, J., PAUSTIAN, K., ELLIOTT, E. T. & COMBRINK, C., 2000. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **64**. 681–689.
- SLEEP, B. E., 1995. A method of characteristic model for equation at state compositional simulation of organic compounds in groundwater. *J. Contam. Hydrol.* **17**. (3) 189–212.

- SMITH, K. A. & MULLINS, C. E., 2001. Soil and environmental analysis: Physical methods. Marcel Dekker Inc. New York.
- SMUCKER, A. J. M., PARK, E. J., DORNER, J. & HORN, R., 2007. Soil micropore development and contributions to soluble carbon transport within macroaggregates. *Vadose Zone J.* **6**. 282–290.
- SSSA, 2008. Soil Science Society of America: Glossary of soil science terms. Mad WI.
- STEFANOVITS P., 1981. Talajtan. Mezőgazda Kiadó. Budapest.
- STEFANOVITS P., FILEP, GY., & FÜLEKY, GY., 1999. Talajtan. Mezőgazda Kiadó. Budapest.
- TIETJE, O. & TAPKENHINRICHS, M., 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **57**. 1088–1095.
- TISDALL, J. M., & OADES, J. M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* **33**. 141–163.
- TISDALL, J. M., SMITH, S. E. & RENGASAMY, P., 1997. Aggregation of soil by fungal hyphae. *Aust. J. Soil Res.* **35**. 55–60.
- TOMASELLA, J., HODNETT, M. G. & ROSSATO, L., 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **64**. 327–338.
- TÓTH, B., MAKÓ, A., RAJKAI, K., KELE, SZ. G., HERMANN, T. & MARTH, P., 2006. Use of soil water retention capacity and hydraulic conductivity estimation in the preparation of soil water management maps. *Agrokémia és Talajtan.* **55**. 49–58.
- TULLER, M. & OR, D., 2001. Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: film and corner flow in angular pore space. *Water Resour. Res.* **37**. (5) 1257–1276.
- TULLER, M. & OR, D. 2005. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents. *Water. Resour. Res.* **41**. W09403.
- TULLER, M., OR, D. & DUDLEY, L. M., 1999. Adsorption and capillary condensation in porous media: Liquid retention and interfacial configurations in angular pores. *Water Resour. Res.* **35**. (7) 1949–1964.
- TYLER, S. & WHEATCRAFT, S., 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **53**. 987–996.
- VAN DAM, J. C., 2000. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation, and case studies. PhD-thesis. Wageningen University. Wageningen. The Netherlands.
- VAN GEEL, P. J. & ROY, S. D., 2002. A proposed model to include a residual NAPL saturation in a hysteretic capillary pressure-saturation relationship. *J. Contam. Hydrol.* **58**. 79–110.
- VAN GENUCHTEN, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**. 892–898.
- VAN GENUCHTEN, M. T. & NIELSEN, D. R., 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae.* **3**. (5) 615–628.
- VAN OLPHEN, H., 1963. An introduction to clay colloid chemistry. Interscience Publ. New York.
- VÁRALLYAY GY., 1973. A talaj nedvességpotenciálja és új berendezés annak meghatározására alacsony (atmoszféra alatti) tenzió-tartományban. *Agrokémia és Talajtan.* **22**. 1–22.

- VÁRALLYAY GY., 1993. A fizikai talajféleség meghatározása. In: BUZÁS, I. (ed.) Talaj- és agro-kémiai vizsgálati módszerkönyv. 1. A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata. INDA 4231 Kiadó. Budapest. 45–57.
- VERECKEN, H., WEYNANTS, M., JAVAUX, M., PACHEPSKY, Y., SCHAAP, M. G. & VAN GENUCHTEN, M. T., 2011. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone J.* **9**. 795–820.
- VORONIN, A. D., 1980. The structure-energy conception of the hydrophysical properties of soils and its practical applications. *Pochvovedeniye*. **12**. 35–46.
- WALCZAK, R. T., MORENO, F., SŁAWINSKI, C., FERNANDEZ, E. & ARRUE, J. L., 2006. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *J. Hydrol.* **329**. 3–4. 527–533.
- WATSON, K. K., 1965. Non-continuous Porous Media Flow. Rep. 84. Water Research Laboratory, Univ. New South Wales, Manly Vale, NSW. Australia.
- WEYNANTS, M. et al., 2013. European Hydropedological Data Inventory (EU-HYDI). EUR – Scientific and Technical Research Series 26053. Publications Office of the European Union. Luxembourg.
- WIPFER, E. L. & VAN DER ZEE, S. E. A. T. M., 2001. A set of constitutive relationships accounting for residual NAPL in the unsaturated zone. *J. Contam. Hydrol.* **50**. 53–77.
- WÖSTEN, J. H. M., LILLY, A., NEMES, A. & LE BAS, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*. **90**. 169–185.
- WÖSTEN, J. H. M., PACHEPSKY, Y. A. & RAWLS, W. J., 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* **251**. 123–150.
- ZHOU, D. & BLUNT, M., 1997. Effect of spreading coefficient on the distribution of light non-aqueous phase liquid in the subsurface. *J. Contam. Hydrol.* **25**. (1–2) 1–19.

Correlations between porosity, fluid retention and conductivity in soils saturated with water and/or non-aqueous phase organic liquids

I. Water and organic liquid retention – A review

^{1,2}H. HERNADI, ²G. BARNA and ²A. MAKÓ

¹Geogikon Faculty, University of Pannonia, Keszthely

²Institute for Soil Science and Agricultural Chemistry, Centre for Agricultural Research, Hungarian Academy of Sciences, Budapest

Summary

Methods for measuring and predicting water retention and conductivity have improved enormously over the last 60 years (e.g. elaboration and application of dynamic and spectroscopic measurement techniques, digital image analysis methods, the development of pedotransfer functions (PTF) based on equations and pattern recognition and their incorporation into software and submodels). Using the new theoretical approach for the representation of pore space as a hierarchical net-

work, the estimation of these hydrological properties based on geometry, semi-physics and statistics offers the increasingly correct characterisation of pore space, fluid transport and migration processes. The multimodal representation of soil water retention (SWR), together with multimodal pore size distribution (PoSD), makes it possible to quantify dynamic changes in and deformation of the pore system (through swelling/shrinking, compaction, disaggregation, etc.) or the phenomenon of hysteresis more accurately, even over the entire pressure range. Finding correlations between porosity and structural and hydrological properties on different scales and quantifying their relationships continue to be challenging topics in the fields of soil physics, hydrology and environmental sciences.

Improvements in models for the simulation of non-aqueous phase organic liquid transport (NAPL) in porous media have not touched on the determination of the primary input parameter in these models, i.e. the NAPL retention of soils, which can still only be determined indirectly from water retention. These calculations neglect the magnitude of the various extents of interaction between the solid phase and fluids with different physical, chemical and physicochemical properties. The results of environmental research (compatibility tests on the clay liners of waste disposal, micromorphological analysis, applicability tests on dynamic methods for measuring NAPL retention and conductivity, etc.) question the accuracy and reliability of scaling methods based on water retention. Nevertheless, the parametric techniques used for fitting water retention curves could well be suitable for fitting NAPL retention curves as well. Similar to the use of PTFs for predicting SWRC, NAPL retention could also be approximated sufficiently well with PTFs in the pressure range of 0–1500 kPa. The statistical parameters of PoSD curves determined from normalized derived fluid retention functions for NAPL and water could provide information on dynamic changes in porosity. The application of multimodal functions could help us to obtain more accurate knowledge on correlations between the endpoint saturation values of NAPL retention curves and the soil properties used for estimation, thus leading to improvements in PTF-type methods for estimating NAPL retention ability. Further investigations are needed, e.g. for the selection of the appropriate parametric functions and for the determination of key saturation points in multiphase transport modelling (e.g. immobile and residual saturation) and the corresponding pressure values. Additional research will be required on the possibility of conversion between the parameters of the fitted characteristic functions.

Key Words: water retention, NAPL retention, porosity, soil structure