

A Kovács-féle retenciós függvény továbbfejlesztése

Koncsos László, Murányi Gábor

Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (e-mail: muranyi.gabor@emk.bme.hu)

DOI: 10.59258/hk.14996



Kivonat

A telítetlen talajzónában a telítettség és a szívási potenciál közti kapcsolat leírásában fontos szerepe van a retenciós függvénynek. Ennek leírására számos függvénykapcsolat létezik, a legelterjedtebb a van Genuchten-féle retenciós görbe. A görbe paramétereinek meghatározásához laboratóriumi vizsgálatok szükségesek. A Kovács-féle retenciós függvény (Kovács 1968) előnye, hogy paramétereinek fizikai jellegűek és független mérések révén előállíthatók. Hátránya, hogy alacsonyabb szívási tartományban túlbecsüli a talaj telítettségét. A kutatás célja volt, hogy a Kovács-féle összefüggés továbbfejlesztésével kiküszöböljük ezt a hibát és a 3D Soil Hydraulic Database of Europe v1.0 adatbázis segítségével összehasonlítsuk a van Genuchten-féle leírással. Az összevetéshez a két módszer eredményeinek eltéréseiből számított négyzetes középérték hibát (RMSE) számítottuk, a kalibráció során a paraméterek optimalizálásával minimalizáltuk. A javítást a szívómagasságra bevezetett korrekciós függvényel valósítottuk meg. A van Genuchten és az eredeti Kovács retenciós függvény közt számított RMSE átlaga 0,0613, addig a van Genuchten és a módosított Kovács függvény között az RMSE átlaga 0,0145. Tehát a módosítással 4,3-szeres javítást sikerült elérni. A módosított szívómagasság korrekciós tényezőjének értékei és az átlagos kapilláris emelőmagasság értékei közt polinomiális kapcsolatot mutattunk ki, mellyel a módosított összefüggés számítása egyszerűsíthető, a paraméterek száma redukálható. Az egyszerűsítés bevezetésével az RMSE átlaga 0,0150 értékre adódott, amely ugyan 3%-os romlást jelent, de az eredeti Kovács függvényhez képest a javítás még így is jelentős maradt. A számításokat több, mint 600 monitoring kútra végeztük el, ezen túl az optimalizáláshoz 30 darab véletlenszerűen kiválasztott monitoring kútra összehasonlító elemzést végeztünk a kutak fűrészminta adataiból származtatható és a 3D Soil Hydraulic Database of Europe v1.0 adatbázis van Genuchten retenciós görbe paramétereiből számítható átlagos kapilláris emelőmagasságokra. A kétféle módon meghatározott átlagos kapilláris emelőmagasság értékek közt az összefüggés gyengének bizonyult, a korreláció $R^2 < 0,25$. Az összevetés rávilágított, hogy az adatbázis további finomítása szükséges, melyhez az új, javított Kovács-féle összefüggés alkalmasnak mutatkozik pedotranszfer (talajtani kutatások során kapott becslő) függvényként.

Kulcsszavak

Víz tartóképeség-görbe, telítetlen zóna, van Genuchten modell, Kovács modell, talaj hidrofizikai tulajdonság adatbázis.

Improvement of the Kovács water retention model

Abstract

In the unsaturated soil zone (vadose zone), the relationship between saturation and suction potential plays a crucial role in describing the connection, known as the water retention curve (WRC). Various models for the WRC exist, with the most widely used being the van Genuchten model. Determining the parameters of the van Genuchten model requires laboratory investigations. The advantage of the Kovács water retention model lies in its physically interpretable parameters that can be derived through independent measurements. However, a drawback is its tendency to overestimate soil saturation in lower suction ranges. This paper focuses on addressing this issue by improving the Kovács model and comparing it with the van Genuchten model using the 3D Soil Hydraulic Database of Europe v1.0. For comparison, the root mean square error (RMSE) was calculated between the results of the two methods, with parameter optimization during calibration. The improvement was achieved by a suction correction function. The average RMSE value between the van Genuchten and the original Kovács model was 0.0613, while between the van Genuchten and the modified Kovács model, the average RMSE value was result 0.0145. Therefore, the modification resulted in a 4.3-fold improvement. Polynomial correlation was established between the values of the suction correction factor and the equivalent capillary rise, simplifying the computation of the modified function. With this simplification, the average RMSE value reduced to 0.0150. This represents a 3% degradation, but the improvement remains significant compared to the original Kovács function. The computations were performed for over 600 monitoring wells during optimization. Comparative analysis was conducted for 30 randomly selected monitoring wells, comparing the equivalent capillary rise derived from borehole data with the equivalent capillary rise derived from the parameters of the van Genuchten model from the 3D Soil Hydraulic Database of Europe v1.0. The correlation between the equivalent capillary rise determined by the two methods proved weak, with a correlation coefficient of $R^2 < 0.25$. This comparison highlighted the need for further refinement of the soil hydraulic database, for which the new and improved Kovács water retention model proves suitable as a pedotransfer function.

Keywords

Water retention curve, vadose zone, van Genuchten model, Kovács water retention model, soil hydraulic database

BEVEZETÉS

A szivárgó vízmozgás a telítetlen zónában a vízszállítását leíró speciális egyenlettel írható le. A Richards egyenlet (Richards 1931) központi szerepet játszik többek között az osztott paraméterű hidrológiai modellekben, ahol mind a párolgás számításában, mind a Darcy-modell (Darcy

1856) felső peremértékeinek meghatározásában talajnedvesség, illetve fluxus adatokat szolgáltat.

A háromfázisú zónában meghatározó jelentőségű a retenciós függvény, amely a víztartalom (vagy a telítettség) és a szívási potenciál közötti egyensúlyi kapcsolatot írja le.

A retenciós függvény matematikai leírására számos formula született (*van Genuchten 1980, Kovács 1981, Aubertin és társai 2003, Too és társai 2014*). Ezek közül a van Genuchten féle függvény a leginkább elterjedt (*van Genuchten 1980*). Paramétereinek meghatározására laboratóriumi vizsgálatok szolgálnak; a pontbéli mintavételre alapuló kísérleti eredmények térbeli kiterjesztése a paraméterek térképi interpolációját követeli meg. Ilyen eredmény például a 3D Soil Hydraulic Database of Europe at 250 m resolution (EU-SoilHydroGrids ver. 1.0) (röviden: EUSHG) adatbázis. Az ingyenesen hozzáférhető EUSHG adatbázis (<https://eusoil-hydrogrids.rissac.hu/250.php>) (*Tóth és társai 2017*) a Soil-Grids (www.soilgrids.org) (*Hengl és társai 2017*) alapján került kiszámításra hidraulikai pedotranszfer függvényekkel (*Tóth és társai 2015*).

A talajfizikai és modell-paraméterek térbeli interpolációja során a retenciós függvénynek olyan megfogalmazása előnyös, amelyben a függvény paraméterei fizikai alapokkal rendelkeznek. Ilyen függvény pl. a Kovács-féle retenciós függvény, amelynek paraméterei (porozitás, talaj szemcseátmérő) mérhető mennyiségek, legalább közvetett módon. Ilyen például az EUSHG adatbázis, az AGRO-TOPO adatbázis (*Várallyay és társai 1979, 1980, MTA TAKI 1991*) vagy a DOSOREMI adatbázis (*Pásztor és társai 2017*). A Kovács-féle függvényt széles körben elemezték, mérési megalapozása is megtörtént, azonban ismert hátránya az, hogy kötött talajok esetében az alacsonyabb szívási tartományban túlbecsüli a telítettség értéket (*Aubertin és társai 2003, Mbonimpa és társai 2006*). Ennek a bizonytalanságnak a kiküszöbölése a jelen munka célkitűzése, a Kovács-féle függvény továbbfejlesztése által. Célnk a javasolt továbbfejlesztés bemutatása és széleskörű vizsgálata. Ezt oly módon kísérjük meg, hogy a mértékadó leírásnak tekintett van Genuchten-féle függvényt országos léptékben, adatbázisok elemzésével összehasonlítjuk az új függvénnyel. Végül célunk egy olyan algoritmusra javaslat kidolgozása, amely alkalmas a fizikai alapokon nyugvó, új, javított Kovács-féle retenciós görbe felhasználására pedotranszfer függvényként.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A kapilláris víztartalom a póruseloszlás lineáris függvénye, ugyanis a kapilláris emelőmagasság fordítottan arányos a pórusmérettel. Az adhéziót, mint a nedvességtartalmat befolyásoló másik fizikai hatást, befolyásoló Van der

Waals erő, a vízfilm vastagságával (ebből következően a víztartalommal) függ szorosán össze (*Kovács 1968*).

Fentiek következtében levezethető a víztartalom és a potenciál közötti (1) elméleti összefüggés is (*Kovács 1981*):

$$S_{\Psi}^K = 1 - \left[\left(\frac{h_{c0}}{\Psi} \right)^2 + 1 \right] \left[1 - 1,4 \cdot 10^{-3} \left(\frac{h_{c0}}{\Psi} \right)^{1/6} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} h_{c0}^{3/2} \right] \exp \left[- \left(\frac{h_{c0}}{\Psi} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$S = w/\varepsilon \quad (2)$$

$$\Psi = -p/\gamma \quad (3)$$

ahol S_{Ψ}^K a telítettség Kovács szerint egy adott szívómagasságban [cm^3/cm^3 , azaz -], (az S telítettség kifejezhető a (2) képlet szerint is), Ψ a szívómagasság [cm] a (3) összefüggés szerint, h_{c0} az átlagos kapilláris emelőmagasság [cm], ε a hézagterfogat [-], w a talaj víztartalma [-], p a vízfázisban uralkodó negatív nyomás (feszültség) [kN/m^2], és γ a víz térfogatsúlya [kN/m^3]. A továbbiakban a „K” rövidítés az eredeti Kovács-féle retenciós összefüggésre utal. Az átlagos kapilláris emelőmagasság a szakirodalom szerint a porozitás és a hatékony szemátmérő függvényében fejezhető ki a (4) egyenlettel:

$$h_{c0} = 0,075 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\alpha}{d_h} \quad (4)$$

ahol d_h a hatékony szemátmérő [cm], amely olyan monodiszperz rendszer részecskéinek mérete, amelynek összfelülete a valódi, modellezett talaj szemcsefelületével azonos, valamint a valódi és azzal ekvivalens rendszer porozitása is azonos, α pedig az alaktényező. Az alaktényező az (5) összefüggés szerint számítható:

$$\alpha = \frac{F \cdot D}{V} \quad (5)$$

ahol F a talajszemcse felülete [cm^2], D a talajszemcse köré rajzolható gömb átmérője [cm], és V a talajszemcse térfogata [cm^3]. A szakirodalom szerint az alaktényező a szabályos geometriai formájú részecskéknél a következőként alakul: gömb esetén $\alpha = 6$; kocka és oktaéder esetén $\alpha = 10,4$; tetraéder esetén pedig $\alpha = 18$ (*Kovács 1981*). Az 1. táblázatban az átlagos kapilláris emelőmagasság értékére a szabvány felező szitasor szerinti egyes talajrészekre nagyságrendi becslést adunk. A táblázatba foglalt értékek számítása során az egyszerűsítés végett egységesen $\alpha = 10$ alaktényezőt és $\varepsilon = 0,45$ hézagterfogatot feltételeztünk.

1. táblázat. Az átlagos kapilláris emelőmagasság becslése egyes szemcsés talajok esetén
Table 1. Estimation of equivalent capillary rise height for some granular soils

Talaj frakció megnevezése	Szemátmérő felső határa, d [cm]	Átlagos kapilláris emelőmagasság, h_{c0} [cm]
Közepes homok	0,0250	36,7
Nagyon finom homok	0,0062	147,8
Iszap	0,0016	572,9
Nagyon finom iszap	0,0004	2 291,7
Agyag	0,0002	4 583,3

Az (1) összefüggés nagy előnye, hogy paraméterei fizikai jellegűek, és független mérések révén előállíthatóak. Az egyenlet kapilláris csőhálózat modell alapján lett levezetve és elméletben teljesen megalapozott (*Kovács 1981*).

Már Kovács is felhívta a figyelmet, hogy az elméleti görbének (1) három jellegzetes szakasz van. A felső, csaknem függőleges része az adhéziós tartományt tükrözi; ezt egy enyhén ereszkedő rész követi, amelyben a víztartalom hir-

telen nő a szívófehértség csökkenése mellett, majd végül egy közel függőleges görbeszakasz kapcsolja a retenciós függvényt az egységnyi telítettségi értékhez, amely a telített zóna határa. Az (1) függvény a fenti karakterisztikát követi. A retenciós függvény három szakaszos jellege gyakran nem figyelhető meg finom homokos talajok esetében. A szívómagasság függvényében a kohéziós talajokra jellemző, fokozatosan csökkenő víztartalom (telítettség) rajzolódik ki. Ez visszavezethető a retenciós görbe meghatározása során előidézett szívásra és az ebből adódó expanzióra (fellazulásra). Ez a jelenség a valóságban a talajszlop súlya alatt nem következik be (Kovács 1981). Megjegyezzük, hogy pl. az EUSHG adatbázis összes retenciós függvénye ilyen – azaz fokozatosan csökkenő telítettséget mutat a szívási potenciál csökkenése mellett.

A fenti megfigyelés az (1) függvény korrekcióját igényli. A matematikai korrekció konkrét megvalósítására Kovács nem tett javaslatot, de a jelenség értékelése során egyenértékűséget feltételezhetünk a minta expanziója és az (1) függvényben a szívómagasság átalakítása között. Mivel a megfigyelések szerint a talajminta expanziója csak kötött talajoknál fordul elő, feltételeztük, hogy a függvény-korrekciót a talaj kötöttségét jellemző h_{c0} függvényében kell felírni.

Feltételeztük a fenti megfigyelést legegyszerűbb módon kielégítő lineáris transzformációt, amit a (6) egyenlet ír le. Ez a transzformáció nem elégíti ki a peremfeltételi összefüggést, amely szerint $\Psi = 0$ mellett $S = 1$. E problémát az alábbi Monod-típusú függvénnyel (7) (Monod 1949) küszöböltük ki:

$$\Psi^* = \Psi + a \cdot h_{c0} \quad (6)$$

$$a = a_0 \cdot \frac{\Psi}{\beta h_{c0} + \Psi} \quad (7)$$

ahol Ψ^* a korrigált szívómagasság [cm], a , a_0 és β pedig korrekciós tényezők [-]. A modellkísérleti tapasztalatok szerint $\beta \cdot h_{c0} \ll h_{c0}$, és így gyakorlati szempontból jó eredmény érhető el $\beta = 0,05$ konstans érték felvételével. Mint a (7) összefüggésből látható, $\Psi = 0$ esetén $a = 0$; Ψ növekedésével pedig $\frac{\Psi}{\beta h_{c0} + \Psi} \rightarrow 1$, így $a \rightarrow a_0$. A (7) egyenletet a (6) képletbe helyettesítve a (8) összefüggéssel bevezetjük a korrigált szívási potenciált:

$$\Psi^* = \Psi + a_0 \cdot \frac{\Psi}{\beta h_{c0} + \Psi} \cdot h_{c0} \quad (8)$$

A módosított Kovács-féle retenciós függvény pedig az eredetivel formailag azonos, de a szívási potenciál a (8) összefüggés szerint számítandó. A továbbiakban az „MK” rövidítés a módosított Kovács-féle retenciós összefüggésre utal, számítása pedig a (9) képlettel történik:

$$S_{MK}^* = 1 - \left[\frac{h_{c0}}{\Psi^*} + 1 \right] \left[1 - 1,4 \cdot 10^{-2} \left(\frac{h_{c0}}{\Psi^*} \right)^{1/6} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} h_{c0}^{3/2} \right] \exp \left[- \left(\frac{h_{c0}}{\Psi^*} \right)^2 \right] \quad (9)$$

A (9) függvénynek három paramétere van, h_{c0} , ε és a_0 (amely Ψ^* kiszámításához szükséges). Ψ^* számítása során $\beta = 0,05$ állandónak tekinthető, csak az a_0 korrekciós tényező értékét kell meghatározni. Tehát a (9) összefüggéshez kalibrálandó a h_{c0} , ε és a_0 értéke. Amennyiben $a_0 = 0$ az eredeti Kovács-féle retenciós

függvényt kapjuk. Ezeket a korrekciós megfontolásokat mérési eredmények alapján igazolni kell.

Az összehasonlító elemzések elvégzéséhez az EU-SoilHydroGrids ver. 1.0 (EUSHG) szabadon elérhető adatbázist alkalmaztuk. A mért adatok alapján történő összehasonlításhoz az Operatív Vízhány Értékelő és Előrejelző Rendszer (OVÉER) adatbázisát alkalmaztuk (<https://aszalymonitoring.vizugy.hu/>). Néhány talajvíz monitoring kút esetén rendelkezésünkre állt a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézetet (VITUKI) eredeti talajfizikai fűrészminta adatbázisa. A talajvíz monitoring kutak adatbázisát és a mért talajvízszint idősorokat (1961-2013) az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) bocsátotta rendelkezésünkre. Vizsgálataink helyszínül az Alföldet választottuk, mert ott a fizikai talajféleségek sokaságán (1. ábra) tesztelhetőek a leírt összefüggések.

EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

Retenciós függvények összehasonlító elemzése

A retenciós függvény paramétereit becsülő eljárások kidolgozásának célja, hogy segítségükkel többnyire olcsón és könnyen mérhető talajtani (pedológiai) adatok (pl. szemeloszlás, porozitás) alapján kiszámíthatóak legyenek a költség- és időigényesen meghatározható talajjellemzők értékei (pl. pF görbe paramétere).

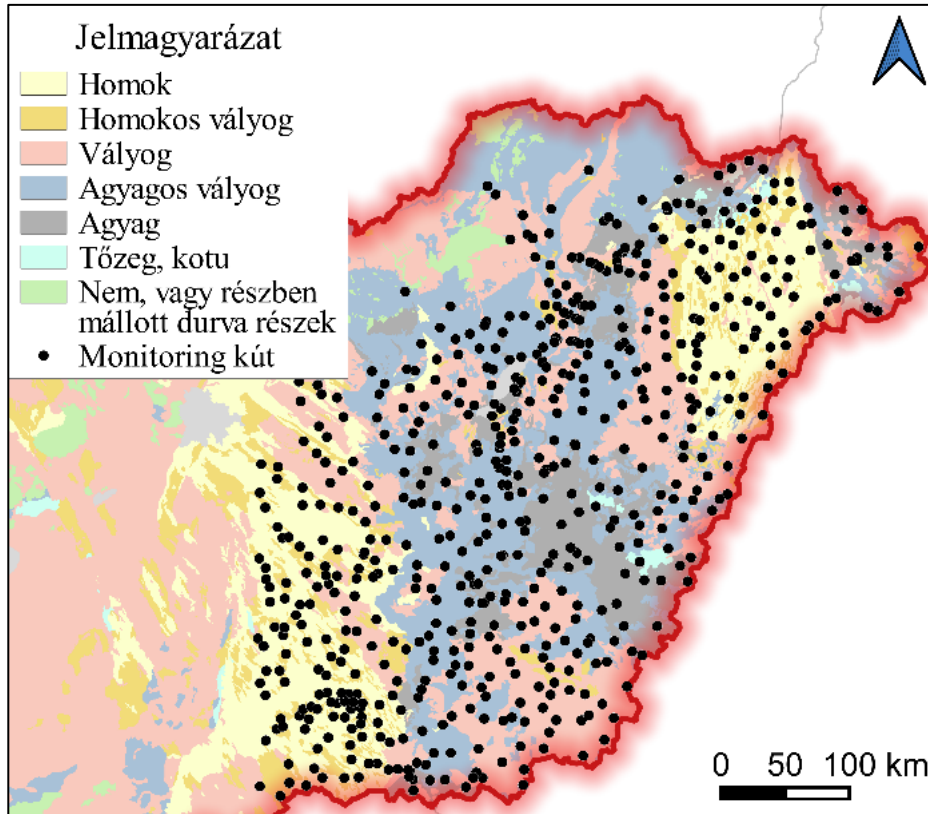
Ebben a folyamatban a Kovács függvény továbbfejlesztését egy országos lefedettségű adatbázis segítségével ellenőriztük. Az alkalmazási példa az EUSHG adatbázis. Az adatbázis 2 m mélységig hét talajmélységben tartalmaz talaj hidrofizikai tulajdonságokat (THT). Létrehozásának célja, hogy teljes kontinentális lefedettségű THT adatokat biztosítson, amelyek lehetővé teszik a hidrológiai, ökológiai, légköri, mezőgazdasági vagy egyéb környezeti modellezést kontinentális és regionális léptékben. Az adatbázis tartalmazza a van Genuchten féle retenciós függvény paramétereit $\overline{p_{vG}} = [s_0, \alpha_{vG}, n]$ a következő talajrétegekben: 0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm, 100-200 cm, és 200 cm alatt (Tóth és társai 2015, 2017, Hengl és társai 2017).

A módosított Kovács-féle függvény (9) alkalmazhatóságának előfeltétele az, hogy a (10) van Genuchten féle retenciós összefüggéshez (a továbbiakban: „vG”) nagyfokú hasonlóságot mutasson.

$$S_{vG}^* = S_0 + \frac{1 - S_0}{[1 + (\alpha_{vG} \cdot \Psi)^n]^m} \quad (10)$$

ahol S_{vG}^* az egyensúlyi telítettség [-] a Ψ szívómagasság mellett vG (10) alapján, S_0 a reziduális víztartalom [-], n és m [-] kitevők ($m \cong 1 - \frac{1}{n}$) és az α_{vG} [cm^{-1}] szorzó az egyenlet paramétere (van Genuchten 1980).

Az általunk módosított Kovács-féle retenciós függvényt a magyarországi talajvíz monitoring rendszer Dunától keletre fekvő kútjainál elemeztük; itt a vG görbe paramétereit letöltöttük az EUSHG adatbázisból. A monitoring pontokat azért választottuk, hogy az adatbázis retenciós függvényeit összehasonlíthassuk mérési eredményekkel. A kiválasztott monitoring kutak száma 623, elhelyezkedésüket az 1. ábra szemlélteti. Az összes elemzett retenciós görbe száma $7 \times 623 = 4361$.



1. ábra. A vizsgált kutak elhelyezkedése az AGROTOPO fizikai talajfésleség térképen ábrázolva
(Alaptérkép forrása: MTA TAKI 1991)

Figure 1. Location of the investigated monitoring wells on the AGROTOPO physical soil types map
(Base map: MTA TAKI 1991)

Minden monitoring pontban és minden réteg-mélységben előállítottuk a (10) egyenlet szerinti vG retenciós függvényeket. A 0-4,2 pF potenciál-tartományt $n = 500$ egyforma $d\Psi$ távolságban levő pontra osztottuk (11):

$$\Psi_i = i \cdot d\Psi, i = 1, \dots, 500 \quad (11)$$

E pontokban meghatároztuk (10) alapján $S_{\Psi_i}^{vG}$ ($i = 1, \dots, 500$) a vG telítettség értékeket. Ezen potenciál értékeknél az MK függvény valamely paraméter-vektora mellett meghatároztuk a $S_{\Psi_i}^{MK}$ ($i = 1, \dots, 500$) értékeket is. Ezek alapján képeztük a (12) célfüggvényt, mely célja, hogy a két módszer eredményéből számított átlagos négyzetes hiba négyzetgyökének (RMSE) az értéke a legkisebb legyen.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{\Psi_i}^{vG} - S_{\Psi_i}^{MK})^2} \quad (12)$$

ahol $S_{\Psi_i}^{vG}$ a vG retenciós görbe (10) alapján számított telítettség a Ψ_i szívómagasságnál, $S_{\Psi_i}^{MK}$ az MK retenciós görbe (9) alapján számított telítettség a Ψ_i

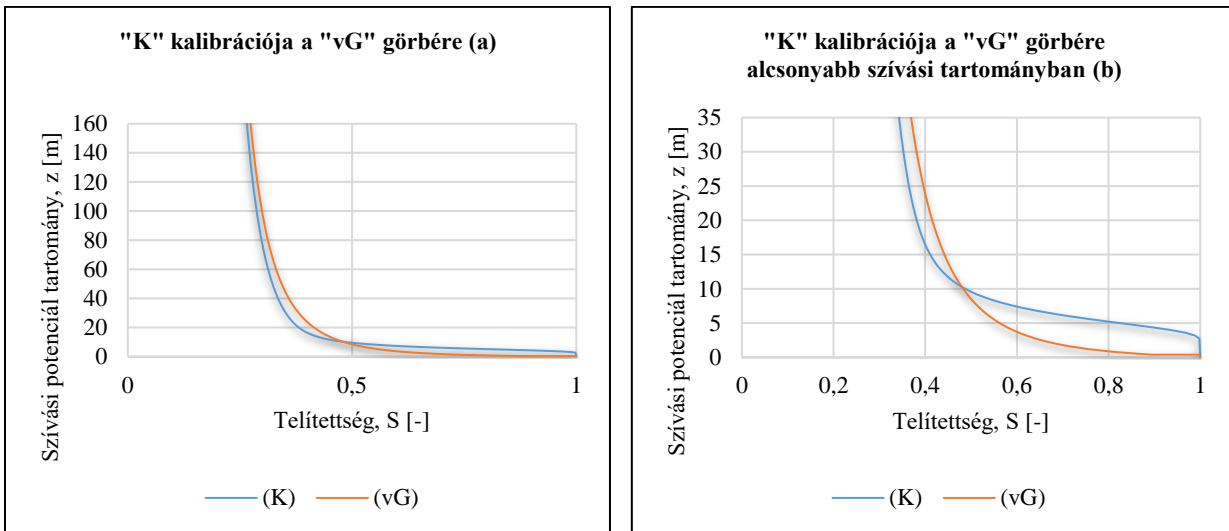
szívómagasságnál, és n a 0- 4,2 pF tartományon felvett pontok száma, esetünkben $n = 500$.

A (12) célfüggvény minimumát a BLIND-féle sztochasztikus optimalizációs módszerrel (Koncsos és társai 1995) határoztuk meg, az MK függvény paramétereinek szisztematikus változtatásával. A módosított Kovács-féle retenciós függvény minimumánál az ε porozitás [-], h_{c0} átlagos kapilláris emelő magasság [cm], és az a_0 expanzió-korrekciós tényező [-] optimális értéket vesz fel. Ezen értékeknél az MK függvény és a vG függvény absztrakt távolsága a legkisebb.

A kalibrációt végrehajtottuk az összes monitoring pontra és az összes talajrétegre, ami a EUSHG adatbázisban az 1. ábra pontjaiban előfordul.

A fenti elemzést megismételtük $a_0 = 0$ értékre, ami az eredeti Kovács-féle (a továbbiakban „K”) retenciós függvény optimális paraméter értékeit adja [(1) egyenlet]

Példaként az 1657 kódjelű monitoring pontnál látható a kétféle közelítés eltérő jellege és pontossága; a 2.a és 2.b ábra rámutat az eredeti Kovács-féle függvény gyenge pontjára is:

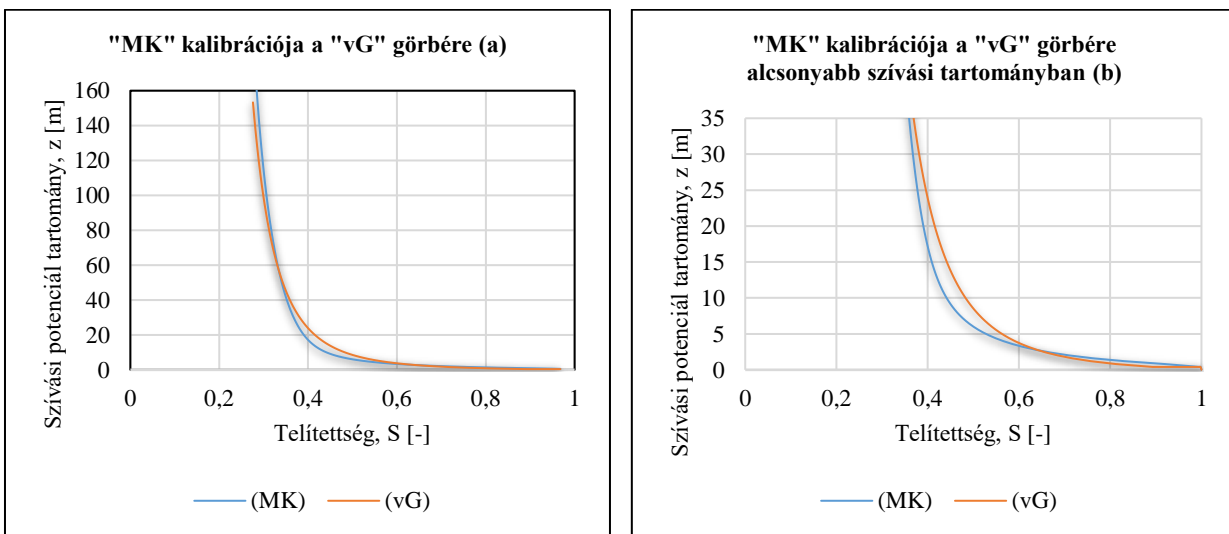


2. ábra. Eredeti Kovács-féle retenciós függvény (K) kalibrációja a van Genuchten-féle retenciós görbére (vG) a 1657 kódjelű monitoring pontban (réteg: 200 cm alatt). a) balra a kalibráció eredménye a 0-160 m szívási potenciál tartományban ($R^2 = 0,89$, $RMSE = 0,068$); b) jobbra: ugyanez a 0-35 m tartományban

Figure 2. Calibration of the original Kovács retention function (K) to the van Genuchten retention curve (vG) at the monitoring point code 1657 (layer: below 200 cm). a) to the left, the calibration result in the suction potential range of 0-160 m ($R^2 = 0.89$, $RMSE = 0.068$); b) to the right: the same in the 0-35 m range

Mint a 2. ábrán látható, az eredeti Kovács-féle retenciós görbe (K) a pF 0-4.2 tartományban a van Genuchten (vG) függvényt $RMSE = 0,068$ értékkel közelíti, viszont az alacsony pF értékek (0-35 m) mellett az egyensúlyi telítettséget jelentősen túlbecsüli a van Genuchten-féle függvényhez

képest. A módosított Kovács féle (MK) összefüggés az egész tartományon hasonlóan jó közelítést produkál (3. ábra), mint a van Genuchten féle (8) egyenlet. A közelítés hibája: $RMSE = 0,013$, ami az eredeti hibát ötödére csökkenti, a két görbe között $R^2 = 0,971$ korrelációt eredményez.

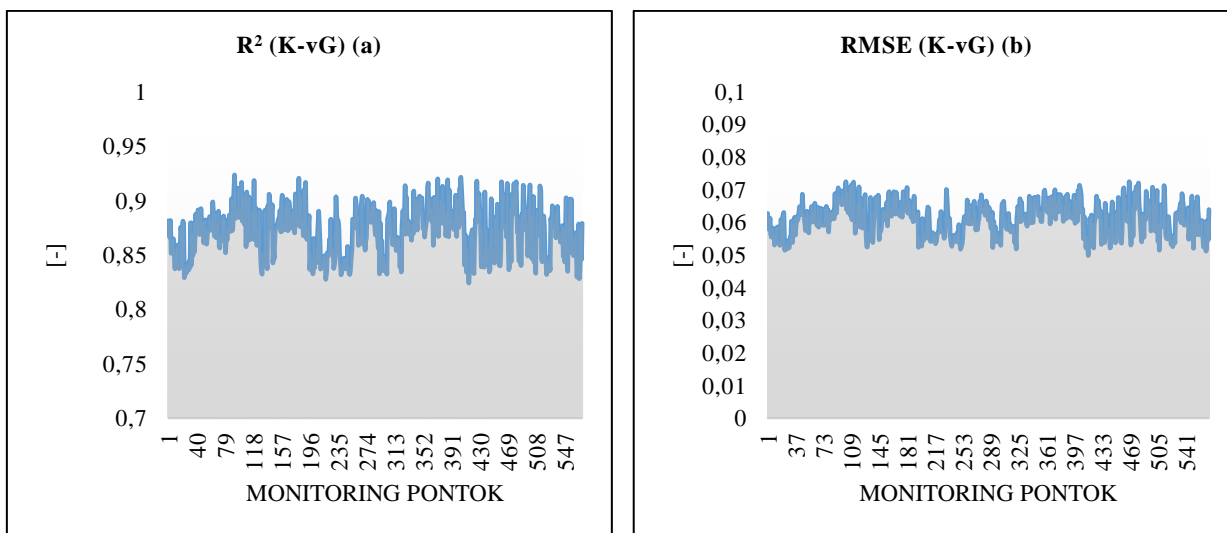


3. ábra. Módosított Kovács-féle retenciós függvény (MK) kalibrációja a van Genuchten-féle retenciós görbére (vG) az 1657 kódjelű monitoring pontban (réteg: 200 cm alatt). a) balra a kalibráció eredménye a 0-160 m szívási potenciál tartományban; b) jobbra ugyanez a 0-35 m tartományban ($R^2 = 0,971$, $RMSE = 0,013$)

Figure 3. Calibration of the modified Kovács retention function (MK) to the van Genuchten retention curve (vG) at the monitoring point code 1657 (layer: below 200 cm). a) to the left, the calibration result in the suction potential range of 0-160 m ($R^2 = 0.89$, $RMSE = 0.068$); b) to the right: the same in the 0-35 m range

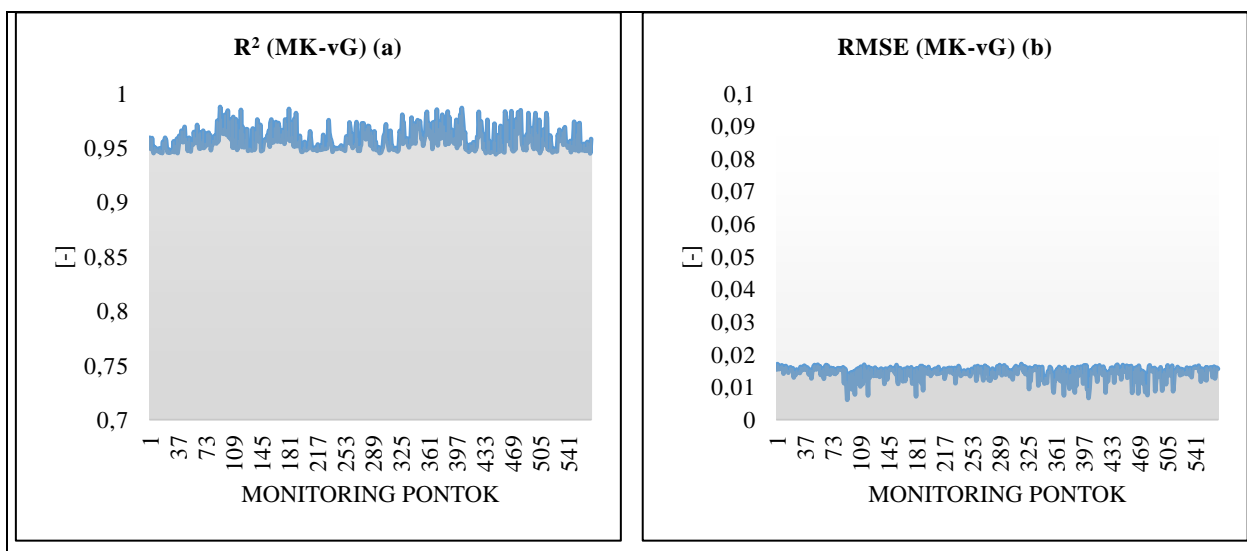
Matematikai értelemben tehát adva voltak minden monitoring pont esetében a $\overline{p_{vG}} = [s_0, \alpha_{vG}, n, m]$ paraméter értékek, továbbá az ε porozitás. A kalibráció szolgáltatotta a $[h_{c0}, a_0]$ értékeket, ε

értéke rögzített volt a kalibrációban. A vizsgált monitoring rendszerre végrehajtott kalibráció eredményét mind a K, mind az MK közelítésre a 4. és 5. ábrák mutatják.



4. ábra. Az eredeti Kovács (K) és a van Genuchten (vG) retenciós függvény közötti R^2 és RMSE érték az optimalizáció után. a) balra R^2 érték, b) jobbra RMSE érték.

Figure 4. The R^2 and RMSE values between the original Kovács (K) and the van Genuchten (vG) retention function after optimization. a) R^2 value to the left, b) RMSE value to the right.



5. ábra: A módosított Kovács (MK) és a van Genuchten (vG) retenciós függvény közötti R^2 és RMSE érték az optimalizáció után. a) balra R^2 érték, b) jobbra RMSE érték.

Figure 5. The R^2 and RMSE values between the modified Kovács (MK) and the van Genuchten (vG) retention function after optimization. a) R^2 value to the left, b) RMSE value to the right.

A 4. ábra a kalibrált eredeti Kovács függvény (K) és a van Genuchten retenciós görbék (vG) közötti korrelációs-négyzet és RMSE (lásd (12) egyenlet) értékeket mutatják monitoring pontonként. Ezek a jellemzők a vG függvény K típusú függvénnyel való közelítésének minőségét mérik. Az 5. ábra ugyanezen kapcsolatokat mutatja a módosított Kovács függvény (MK) alkalmazásával.

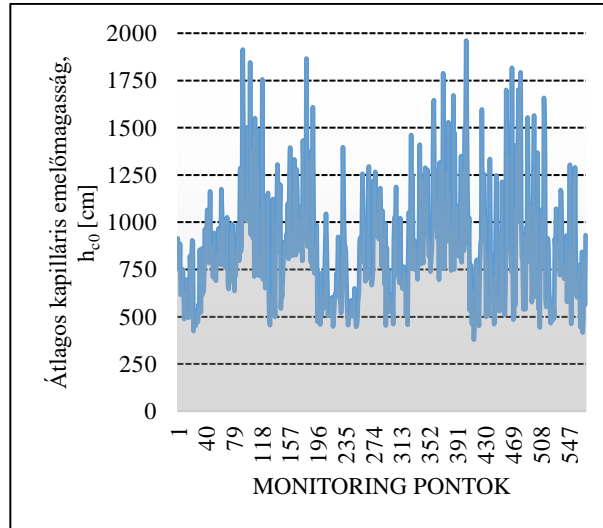
Átlagolva az összes pont eredményét, azt látjuk a 2. táblázatban, hogy az MK függvény az RMSE vonatkozásában 4,3-szer jobb eredményt ad, alapvetően az alacsony pF tartományban jelentkező hiba kiküszöbölésével.

Az MK függvény kalibrált h_{c0} paraméterét monitoring pontonként a 6. ábra mutatja. Az 1. táblázat alapján látható, hogy ez a h_{c0} szemcseméretre való (4) kapcsolatá-

ból kiolvashatóan szinte mindenhol az iszap tartományt jelenti. Az AGROTOPO országos talajfizikai térkép alapján (lásd 1. ábra alaptérkép) azonban számos monitoring pontban várnánk homok talajtípus előfordulását. Ez utal arra, hogy a EU-SoilHydroGrids ver1.0 előállításánál alkalmazott pedotranszfer függvényt valószínűleg javítani kell.

2. táblázat. Statisztikai mutatók átlagértékei K-vG és MK-vG függvények összehasonlítására
Table 2. Average values of statistical indicators for the comparison of K-vG and MK-vG functions

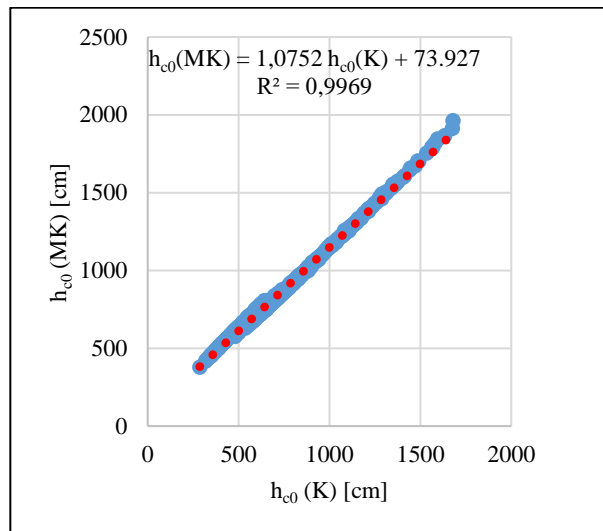
átlagok	K-vG	MK-vG
RMSE	0,061289	0,014539
R^2	0,872766	0,958002



6. ábra: Az MK függvény kalibrált átlagos kapillaris emelőmagasság értékei az egyes monitoring kutaknál
 Figure 6. Values of the calibrated equivalent capillary rise height of the MK function for the investigated monitoring wells

Az MK és K függvényekkel való közelítés kalibrálása során nyert optimális h_{c0} értékek között erős lineáris kapcsolat figyelhető meg, melyet az összes monitoring ponthoz kapcsolódó eredmény alapján a 7. ábrán mutatunk be. A diagramon feltüntettük a kapcsolatot leíró egyenes egyenletét

is, melyen látható, hogy a meredekség 1,0752, mely közel áll a tökéletes kapcsolatot leíró 1,0 értékhez. Ezt mutatja a korreláció négyzet $R^2 = 0,9969$ értéke is. Az egyenletből leolvasható, hogy az MK átlagosan nagyjából 73,9 cm-rel nagyobb h_{c0} értéket számít K függvényhez képest.

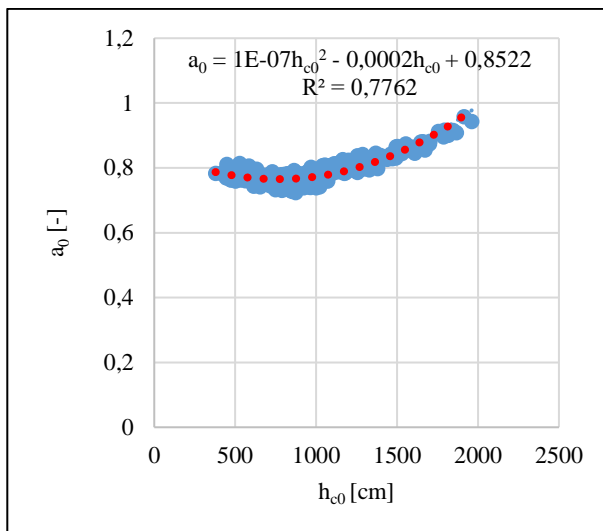


7. ábra: Az (MK) és (K) függvény közelítések kalibrációja során nyert h_{c0} [cm] értékek kapcsolata
 Figure 7. Relationship of h_{c0} [cm] values obtained during the calibration of (MK) and (K) function approximations

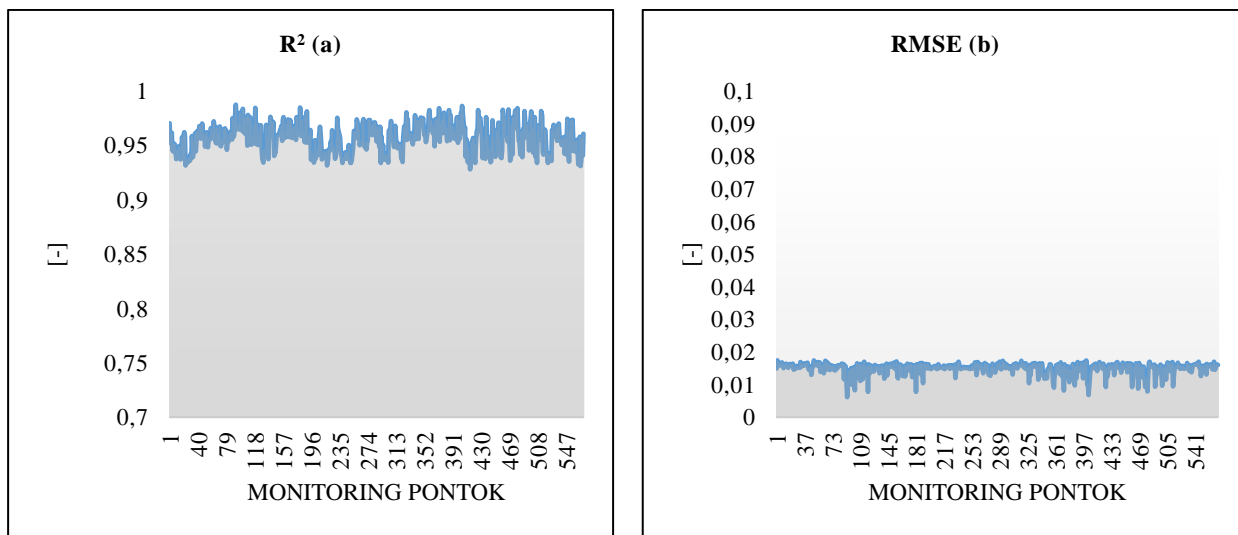
A kalibrált a_0 értékekre h_{c0} függvényében nyert polinomiális kapcsolat a (13) egyenlettel adható meg. A kapcsolat statisztikailag erősnek ($R^2 = 0,78$) adódott, és lehetőséget ad a kalibrálandó paraméterek számának redukálására:

$$a_0 = 10^{-7} h_{c0}^2 - 0.0002 h_{c0} + 0.852 \quad (13)$$

Ha a kalibráció folyamatából az a_0 paramétert kizárjuk, és ehelyett a (13) összefüggés alapján számoljuk h_{c0} függvényében, akkor az eredeti K közelítéshez képest a javítás mégis jelentős marad (9. ábra). A továbbiakban ezt módszert MK* jelöli.



8. ábra. Az a_0 paraméter kapcsolata a h_{c0} paraméterrel a monitoring pontoknál a kalibrációs elemzések alapján
 Figure 8. Relationship between a_0 parameter and h_{c0} parameter at the monitoring points based on the calibration analyses

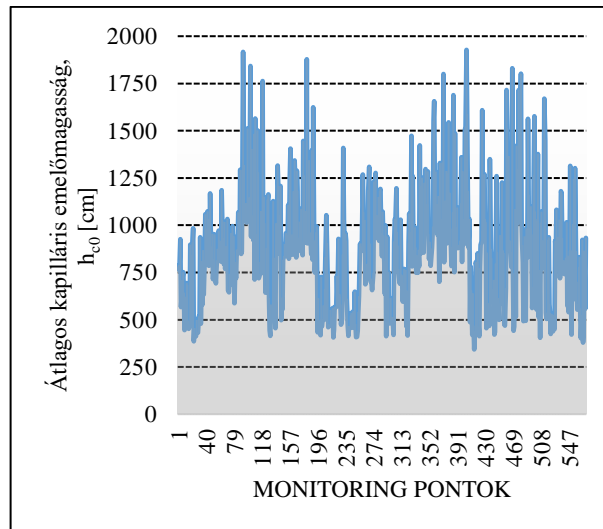


9. ábra. MK* kalibrációja alapján a van Genuchten függvényhez illeszkedés minősége az a_0 (13) egyenlettel történő közelítésével.
 a) balra R^2 érték, b) jobbra RMSE érték
 Figure 9. Based on MK*'s calibration, the quality of the fit to the van Genuchten function by approximating a_0 with equation (13). a) R^2 value to the left, b) RMSE value to the right

Az MK* paraméterszám redukálásának hatását az MK közelítés 3 paraméteres kalibrációjával összevetésben a 3. táblázat mutatja. Mint látható, az RMSE növekedése az MK 3 paraméteres kalibrációjához képest átlagosan 3%-os, ami nem jelentős.

3. táblázat. Statisztikai mutatók átlagértékei MK-vG és MK*-vG függvények összehasonlítására
 Table 3. Average values of statistical indicators for the comparison of MK-vG and MK*-vG functions

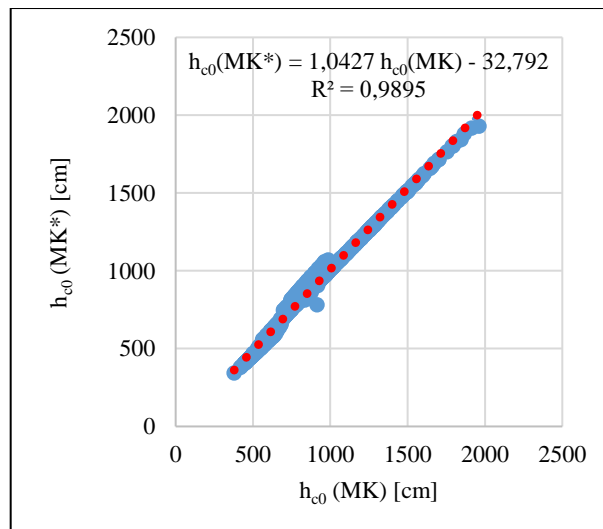
átlagok	MK-vG	MK*-vG
RMSE	0,014539	0,0150302
R^2	0,958002	0,9570389



10. ábra. Az MK* függvény kalibrált átlagos kapillaris emelőmagasság értékei az egyes monitoring kutaknál
 Figure 10. Values of the calibrated equivalent capillary rise height of the MK* function for the investigated monitoring wells

Az MK* függvény kalibrált h_{c0} paramétereit monitoring pontonként a 10. ábra mutatja. Ha összevetjük a 6. ábrán szereplő MK függvény kalibrált h_{c0} paraméterekkel, látható, hogy közel azonosak, az egyezés jó. Az MK és MK* függvényekkel való közelítés során nyert h_{c0} értékek között erős lineáris kapcsolat figyelhető meg, melyet az összes monitoring ponthoz kapcsolódó eredmény alapján

a 11. ábrán mutatunk be. A diagramon feltüntettük a kapcsolatot leíró egyenes egyenletét is, melyen látható, hogy a meredekség 1,0427, mely közel áll a tökéletes kapcsolatot leíró 1,0 értékhez. Ezt mutatja a korreláció négyzet $R^2 = 0,9895$ értéke is. Az egyenletből leolvasható, hogy az MK* átlagosan nagyjából 32,8 cm-rel kisebb h_{c0} értéket számít MK függvényhez képest.



11. ábra. Az (MK*) és (MK) függvény közelítések során nyert h_{c0} [cm] értékek kapcsolata
 Figure 11. Relationship of h_{c0} [cm] values obtained of (MK*) and (MK) function approximations

Ellenőrzés mért adatok alapján

Az EUSHG feltételezett hibájának – azaz bizonyos talajtípusok térképi hiányának – a bizonyítására felhasználtuk a talajvízszint monitoring kutaknál rendelkezésre álló közvetlen, mérésen alapuló megfigyeléseket (OVÉER). Rendelkezésünkre álltak a megfigyelési pontokon a kutak eredeti talajfizikai fűrészmintái (VITUKI). Az adatbázisokból kinyerhető adatok, amelyek szükségesek a számításokhoz:

- A szemeloszlási görbe alapján a d_{10} , szitán áthullott 10 tömegszázalékhoz tartozó névleges átmérő [cm].
- A d_{60} , szitán áthullott 60 tömegszázalékhoz tartozó névleges átmérő [cm].

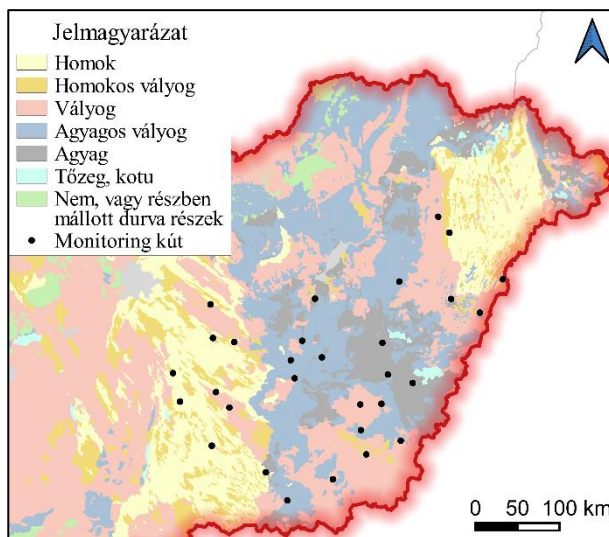
- A C_U egyenlőtlenségi mutató [-] ($C_U = d_{60}/d_{10}$).
- Az ε porozitás értéke.

Kovács (1981) alapján, a C_U érték ismeretében d_h/d_{10} arány interpolációval előállítható (becsülhető), majd második lépésben d_{10} értéket ismerve d_h hatékony szemátmérő is számítható. A d_h/d_{10} arányokat a 4. táblázatban foglaljuk össze. Ha az egyenlőtlenségi mutató értéke 1,00 alatt van, akkor a talaj egyszemcsésnek tekinthető, rosszul osztályozott. 5,00 alatt még folyósodásra hajlamosnak tekinthető. Minél magasabb az érték annál jobb a szemcsék eloszlása.

4. táblázat. Az egyenlőtlenségi mutató és a d_h/d_{10} arány kapcsolata Kovács (1981) alapján
 Table 4. The relationship between the uniformity coefficient and the d_h/d_{10} ratio based on Kovács (1981).

C_U	1,00	1,50	2,00	3,00	5,00	10,00	15,00	20,00
d_h/d_{10}	1,00	1,30	1,59	1,95	1,92	2,25	2,25	2,25

Véletlenszerűen kiválasztottunk 30 észlelő állomást (12. ábra) az OVÉER adatbázisból, amelyekre elérhető volt a szemeloszlási görbe (illetve annak nevezetes pl. d_{10} és d_{60} értékei) a VITUKI adatbázisból.



12. ábra. Az összehasonlító elemzés monitoring pontjai, amelynek eredeti fúrási adatait felhasználtuk.
 Alaptérkép: AGROTOPO (MTA TAKI 1991)

Figure 12. The monitoring points of the comparative analysis, whose original drilling data were used.
 Base map: AGROTOPO (MTA TAKI 1991).

Ezután a (4) egyenlet segítségével meghatároztuk a szemeloszlási görbék információi alapján nyerhető h_{c0} paraméter értéket a (9) egyenletben bemutatott módosított Kovács-féle retenciós görbéhez. Az eredményt a vizsgált monitoring pontokban a 5. táblázat mutatja be.

5. táblázat. A szemeloszlási görbék alapján meghatározott h_{c0} paraméter a kiválasztott monitoring pontokban
 Table 5. The h_{c0} parameter determined on the basis of the grain size distribution curves in the selected monitoring points

Kút kód	d_{10} [mm]	C_U [-]	d_h/d_{10} [-]	d_h [cm]	ε [-]	$h_{c0, ADAT}$ [cm]
2608	0,056	2,50	1,79	0,0100	0,42	102,0
2793	0,007	8,30	2,25	0,0016	0,44	605,0
2124	0,002	10,00	2,25	0,0005	0,45	2 029,0
2176	0,055	3,10	1,95	0,0107	0,44	91,0
2826	0,005	8,70	2,25	0,0010	0,41	1 056,0
2648	0,010	5,50	2,20	0,0022	0,41	491,0
2073	0,001	75,00	2,25	0,0002	0,45	4 068,0
2810	0,003	12,10	2,25	0,0007	0,47	1 320,0
2771	0,001	12,90	2,25	0,0002	0,43	5 230,0
2638	0,002	5,00	1,92	0,0004	0,41	2 902,0
2626	0,002	6,10	2,20	0,0004	0,42	2 615,0
2357	0,080	2,12	1,75	0,0140	0,42	74,0
2365	0,088	1,92	1,40	0,0123	0,44	77,0
1124	0,077	1,82	1,35	0,0104	0,44	91,8
2581	0,006	14,50	2,25	0,0012	0,44	771,0
2645	0,003	12,00	2,20	0,0006	0,40	2 076,0
2103	0,002	10,80	2,25	0,0005	0,42	1 918,0
1384	0,110	2,00	1,59	0,0175	0,45	52,0

Kút kód	d_{10} [mm]	C_U [-]	d_h/d_{10} [-]	d_h [cm]	ε [-]	$h_{c0, ADAT}$ [cm]
2484	0,003	10,90	2,25	0,0008	0,45	1 195,0
1361	0,100	2,10	1,60	0,0160	0,44	61,0
2784	0,007	2,30	1,60	0,0010	0,44	917,8
2355	0,016	8,10	2,25	0,0036	0,44	265,2
2184	0,008	22,60	2,25	0,0017	0,41	628,0
2133	0,003	7,06	2,25	0,0008	0,44	1 247,8
2314	0,014	22,40	2,25	0,0032	0,42	328,8
2790	0,002	3,00	1,95	0,0004	0,44	2 447,6
2796	0,004	17,90	2,25	0,0009	0,45	1 044,6
2326	0,003	20,80	2,25	0,0006	0,44	1 631,7
2412	0,095	1,08	1,00	0,0095	0,40	118,4
2123	0,003	24,00	2,25	0,0006	0,44	1 697,0

A (12) összefüggés minimalizálásával nyert kalibrált MK paramétereket a teljes adatbázisra végrehajtott opti-

malizációból kigyűjtöttük, és a vG görbe paramétereivel együtt a 6. táblázatban mutatjuk be.

6. táblázat. Az EUSHG adatbázis vG paramétereit és a vG típusú görbére optimalizált MK függvény paramétereit az összehasonlító elemzésben

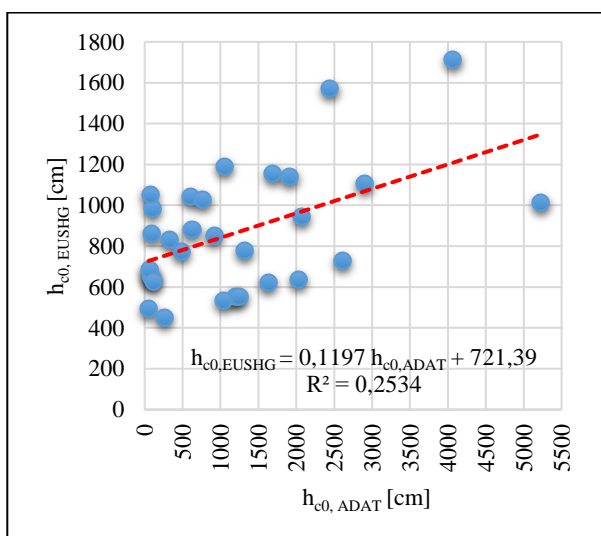
Table 6. The vG parameters of the EUSHG database and the parameters of the MK function optimized for the vG type water retention curve in the comparative analysis

Kút kód	EUSHG vG paraméterek				EUSHG alapján kalibrált MK paraméterek	
	$S_{0,vG}$ [-]	α_{vG} [cm ⁻¹]	n_{vG} [-]	ε [-]	$h_{c0, EUSHG}$ [cm]	a_0 [-]
2608	0,092	0,020	1,255	0,42	984,0	0,756
2793	0,088	0,019	12,424	0,44	1 043,0	0,770
2124	0,094	0,033	13,406	0,45	636,0	0,759
2176	0,089	0,023	12,816	0,44	863,0	0,750
2826	0,095	0,015	12,293	0,41	1 189,0	0,769
2648	0,095	0,025	12,946	0,41	772,0	0,738
2073	0,087	0,013	11,842	0,45	1 714,0	0,880
2810	0,091	0,026	13,159	0,47	779,0	0,746
2771	0,091	0,020	1,25	0,43	1 011,0	0,769
2638	0,094	0,018	12,345	0,41	1 106,0	0,781
2626	0,093	0,027	12,939	0,42	726,0	0,740
2357	0,092	0,020	1,255	0,42	1 052,0	0,780
2365	0,095	0,033	13,319	0,45	654,8	0,780
1124	0,095	0,032	13,362	0,45	643,4	0,760
2581	0,090	0,020	1,27	0,44	1 025,5	0,780
2645	0,098	0,021	12,608	0,40	946,3	0,770
2103	0,091	0,020	12,414	0,43	1 141,8	0,810
1384	0,094	0,042	13,787	0,45	494,4	0,780
2484	0,095	0,039	13,563	0,45	554,4	0,780
1361	0,090	0,030	1,32	0,44	682,2	0,770
2784	0,091	0,022	12,994	0,44	850,6	0,740
2355	0,095	0,054	13,823	0,45	448,0	0,810
2184	0,094	0,021	12,839	0,41	878,2	0,740
2133	0,095	0,038	13,562	0,45	554,6	0,780

Kút kód	EUSHG vG paraméterek				EUSHG alapján kalibrált MK paraméterek	
	$S_{0,vG}$ [-]	α_{vG} [cm^{-1}]	n_{vG} [-]	ε [-]	$h_{c0, EUSHG}$ [cm]	a_0 [-]
2314	0,092	0,025	12,886	0,42	829,4	0,760
2790	0,089	0,014	12,039	0,44	1 573,0	0,850
2796	0,094	0,042	1,361	0,45	533,3	0,790
2326	0,094	0,036	13,357	0,45	621,8	0,790
2412	0,096	0,037	1,313	0,40	628,4	0,790
2123	0,087	0,019	12,481	0,45	1 154,9	0,810

Látható, hogy a korrelációs kapcsolat nagyon alacsony ($R^2 = 0,25$) az EUSHG adatbázis alapján és a mért értékek alapján meghatározott h_{c0} értékek között (13. ábra). A két paraméter eltérő jellegét az okozza, hogy az EUSHG retenciós függvény esetében a homok-tartomány gyakorlati-

lag hiányzik, pedig a térségi adatbázisok, mint az AGRO-TOPO (1. és 12. ábra alaptérkép) ilyen jeleznek, továbbá a fűrási adatok is ezt támasztják alá. Itt tehát az adatbázis további finomítása szükséges. Erre a fenti algoritmus, mint pedotranszfer függvény alkalmasnak látszik.



13. ábra. A mért értékekből számított átlagos kapilláris emelőmagasság ($h_{c0, ADAT}$ [cm]) és az EUSHG adatbázis vG retenciós görbe paramétereire kalibrált MK közelítések során nyert $h_{c0, EUSHG}$ [cm] értékek kapcsolata

Figure 13. The relationship between the equivalent capillary rise height calculated from the measured values ($h_{c0, ADAT}$ [cm]) and the $h_{c0, EUSHG}$ [cm] values obtained during MK approximations calibrated to the vG retention curve parameters of the EUSHG database

ÖSSZEFOGLALÁS

A Kovács-féle, elméleti alapon levezetett talajnedvesség (K) retenciós görbe továbbfejlesztését céloztuk meg. E függvény ugyan fizikai paraméterekkel (porozitás, átlagos kapilláris emelőmagasság) rendelkezik, de általánosságban felrótt hibája, hogy az alacsony szívási potenciál értékek mellett a talaj telítettséget jelentősen túlbecsüli. A görbe javítását a szívási potenciál korrigálásával oldottuk meg, ahol a korrekció a potenciál lineáris transzformációjához vezetett. A változtatás egy új korrekciós paraméter bevezetését is jelenti egyben. Így a módosított Kovács-féle (MK) retenciós függvény három paraméteres. Elemeztük, hogy az új függvény mennyire képes hasonló eredményt produkálni, mint a széles körben elterjedt van Genuchten-féle (vG) retenciós függvény. Az elemzésünket az EUSHG adatbázis mintegy 600 talajvízszint vizsgáló monitoring kútjánál letöltött vG paramétereken végeztük. E monitoring pontokban a pF 0- 4,2 szívási potenciál tartományban (500 függvénypontra) kiszámítva a vG görbe telítettség értékeit, kalibráltuk az MK függvény-közelítés paramétereit.

A kalibrációt 7 talajrétegben ismételtük meg. Átlagolva az összes pont eredményét, azt látható, hogy az MK függvény az RMSE vonatkozásában 4,3-szer jobb eredményt ad, alapvetően az alacsony pF tartományban jelentkező hiba kiküszöbölésével, mint az eredeti K függvény. A telítettség vonatkozó RMSE érték átlaga 0,014, ami gyakorlatilag a van Genuchten függvényvel ekvivalens leírást jelent. Vizsgáltuk az új korrekciós paraméter eliminálhatóságát a modelltől. Kifejezve értékét az átlagos kapilláris emelőmagasság (h_{c0}) polinomiális függvényében, a vG függvényhez való hasonlóságot mérő átlagos RMSE elhanyagolható mértékben romlott. Így a van Genuchten-féle retenciós függvényt közelítő, jól értelmezhető fizikai tartalommal rendelkező leírást nyertük a talajnedvesség retenciónak. Ez a képessége az MK függvénynek alkalmas arra, hogy pedotranszfer függvényként használjuk. Az EUSHG adatbázis, és a monitoring pontok furatmintái szemeloszlási adatainak felhasználásával bemutattuk ennek algoritmusát is, egyben az EUSHG javítására vonatkozó javaslatot is megfogalmaztunk.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A TKP-6-6/PALY-2021 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg. A közleményben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg. Ez úton is köszönjük az Országos Vízügyi Főigazgatóságnak, hogy elérhetővé tette számunka a talajvíz monitoring kutak adatbázisát.

IRODALOMJEGYZÉK

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., Chapuis, R.P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*. 40(6). pp. 1104-1122. <https://doi.org/10.1139/t03-054>

Darcy, H. (1856). Les Fontaines publiques de la ville de Dijon: Paris, Victor Dalmont, p. 647. plus 28 plates.

Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G.B.M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE* 12(2): e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>

Koncsos L., Schütz, E., Windau, U. (1995). Application of a comprehensive decision support system for the water quality management of the river Ruhr, Germany. In: Simonovic, S.P., Kundzewicz, Z., and Rosbjerg D. (ed.) *Modelling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resources Systems*. ISBN 0-947571-59-0. Wallingford, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. IAHS Press (1995) p. 434. pp. 97-106.

Kovács Gy. (1968). Characterization of Molecular Forces Influencing Seepage by Means of the pF Curve. *Agrokémia és talajtan*, 17 (sup). pp. 1-12.

Kovács Gy. (1981). Seepage Hydraulics. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam; Oxford, New York. p. 730.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., Bussière, B. (2006). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovács (MK) model and statistical models. *Canadian Geotechnical Journal*. 43(8). pp. 773-787.

<https://doi.org/10.1139/t06-044>

Monod, J. (1949). The growth of bacterial cultures. *Annual Review of Microbiology*. 3. pp. 371-394. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>

MTA TAKI (1991). Magyarország Agrotopográfiai Adatbázisa. Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet. Budapest.

Pásztor L., Laborczi A., Szatmári G., Takács K., Illés G., Szabó J. (2017). Mi várható a megújult hazai talaj téradat infrastruktúráról? In: Balázs B. (ed.) *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VIII*. ISBN 978-963-318-638-1. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen. http://giskonferencia.unideb.hu/arch/GIS_Konf_kotet_2017.pdf. pp. 277-285. Letöltve: 2023.08.17.

Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*. 1 (5). pp. 318-333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>

Too, V., Omuto, C., Biamah, E., Obiero, J. (2014). Review of Soil Water Retention Characteristic (SWRC) Models between Saturation and Oven Dryness. *Open Journal of Modern Hydrology*, 4. pp. 173-182. doi: <https://doi.org/10.4236/ojmh.2014.44017>

Tóth B., Weynants, M., Nemes A., Makó A., Bilas G., Tóth G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *Eur J Soil Sci*, 66. pp. 226-238. <https://doi.org/10.1111/ejss.12192>

Tóth B., Weynants, M., Pásztor L., Hengl, T. (2017). 3D Soil Hydraulic Database of Europe at 250 m resolution. *Hydrol. Process*. <https://doi.org/10.1002/hyp.11203>

van Genuchten, M.T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44. pp. 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Várallyay Gy., Szócs L., Murányi A., Rajkai K., Zilahy P. (1979). Magyarország termőhelyi adottságait meghatározó talajtani tényezők 1:100.000 méretarányú térképe I. *Agrokémia és Talajtan* 28. pp. 363-384. ISSN 0002-1873

Várallyay Gy., Szócs L., Murányi A., Rajkai K., Zilahy P. (1980). Magyarország termőhelyi adottságait meghatározó talajtani tényezők 1:100.000 méretarányú térképe II. *Agrokémia és Talajtan* 29. pp. 35-76. ISSN 0002-1873

A SZERZŐK



KONCSOS LÁSZLÓ egyetemi tanár, a BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék korábbi vezetője. 1981-ben szerzett építőmérnöki diplomát, 1989-ben egyetemi doktori címet, 1997-ben PhD fokozatot és 2009-ben habilitált. Kutatási területei: hidrológiai, hidrodinamikai és vízminőségi folyamatok – utóbbin belül pedig különösen a nem-pontszerű szennyezések – modellezése; döntéstámogató rendszerek és optimalizációs módszerek fejlesztése, valamint légszennyezések transzmissziója. Tagja a Magyar Hidrológiai Társaságnak és a Nemzetközi Vízsövetségnek (International Water Association).



MURÁNYI GÁBOR okleveles infrastruktúra-építőmérnök, MSc diplomáját 2019-ben a BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszéken szerezte. Jelenleg a Vízi Közmű és Környezetmérnöki tanszék negyedéves doktorandusz hallgatója. Kutatási témája az alternatív árvízvédelmi megoldások stratégiai lehetőségeinek tudományos megalapozása. A Magyar Hidrológiai Társaság és a Magyar Víz- és Szennyvíztechnikai Szövetség, valamint a BME Zielinski Szilárd Építőmérnöki Szakkollégium Vízépítő Tagozatának senior tagja.