

Édesvíztárolók szivárgási paramétereinek meghatározása a Csókás-eljárás alkalmazásával

SZABÓ N. P.^{1,2,@}, DOBRÓKA M.^{1,2}, HURSÁN L.¹

¹ Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

² MTA–ME, Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

@E-mail: norbert.szabo.phd@gmail.com

Csókás János (1918–2000) a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének egykori professzora 1995-ben publikált a szivárgási tényező, a vízhozam- és egyéb vízminőségi paraméterek meghatározására alkalmas karotázskiértékelési eljárást. A módszer laza törmelékes, üledékes kőzetekben alkalmazható, mely a nukleáris és fajlagosellenállás-adatok alapján a szemcseátmérők ismerete nélkül adja meg a szivárgási tényező folytonos szelvényét. A tanulmányban összehasonlítást végzünk a standard Kozeny–Carman- és a Csókás-modell között. Ennek keretében szintetikus adatok feldolgozásával megvizsgáljuk a módszer pontosságát és zajérzékenységét. Majd terepi szelvényadatok felhasználásával bemutatjuk, hogy a Csókás-eljárással és a magadatokon alapuló Kozeny–Carman-módszerrel becsült szivárgástényező-értékek jól korrelálnak. A Csókás-eljárással kapott eredményeket megerősítik a Hazen-formula alapján számított tapasztalati és a feltáró faktoranalízisen alapuló többváltozós statisztikus kiértékelési eredmények is. A Csókás-eljárás és a faktoranalízis együttes alkalmazásával meghatározzuk néhány közetfizikai paraméter és a szivárgási tényező *in situ* regressziós kapcsolatát. Csókás professzor alapvető törekvése az volt, hogy a víztárolók vizsgálatához szükséges közetfizikai és szivárgási paramétereket a fűrőlyuk-szelvényekből származtassa. Ezt az alap gondolatot követve a módszer továbbfejlesztése ma is aktuális lehet. Az eljárás bemenő paramétereit ugyanis a korszerű mérések alapján pontosabban határozhatjuk meg, amivel tovább javíthatjuk a kiértékelés hatékonyságát a tárolókőzetek kutatása és az édesvízkészletek kitermelése során.

Szabó, N. P., Dobróka, M., Hursán, L.: Filtration parameters of freshwater aquifers estimated from well logs using the Csókás method

János Csókás (1918–2000), professor of the Department of Geophysics, University of Miskolc, published a well-logging interpretation method suitable for the determination of hydraulic conductivity, rate of water flow and other water quality parameters in 1995. The method can be applied in loose clastic sedimentary rocks, which provides the continuous log of hydraulic conductivity based on nuclear logging and resistivity data without knowing the grain sizes. In this study, a comparison between the standard Kozeny–Carman and the Csókás model is made. In its framework, the accuracy and noise sensitivity of the method is tested by processing of synthetic data. A good correlation between hydraulic conductivity estimated by the Csókás procedure and core data underlying the Kozeny–Carman method is shown on real well-logging data. Those of the empirical Hazen formula as well as a multivariate statistical method using factor analysis verify the results obtained with the Csókás method. During the field experiments, regression relations between some petrophysical parameters and hydraulic conductivity are revealed by the cooperative application of the Csókás method and factor analysis. The pursuit of Csókás professor was that the petrophysical and hydraulic parameters necessary for the investigation of groundwater reservoirs should be obtained only from well logs. Following this basic idea, the recent development of the method could be still actual. Since advanced instruments can measure the input parameters of the procedure more accurately the efficiency of interpretation can be further improved during the exploration of aquifers and the efficient exploitation of freshwater resources.

Beérkezett: 2015. július 29.; *elfogadva:* 2015. szeptember 16.

Bevezetés

A szivárgási tényező a hidrogeológiai kutatás egyik kulcsparamétere, mely egységnyi hidraulikus gradiens esetén megszabja, hogy az adott kőzetben a víz milyen sebességgel szivárog. A szivárgási tényező egyaránt jellemzi a pórusfolyadékot és a kőzetet, mivel elsődleges porozitású kőzetekben függ a pórusvíz sűrűségétől és viszkozitásától, a szemcsemérettől, a porozitástól (agyagtartalomtól) és a víztelítettségétől. A hagyományos labormérések és próbaszivattyúzások általában helyi információt szolgáltatnak, melynek kiterjesztését a fúrás teljes hosszára vagy egy nagyobb területre a geofizikai mérésekkel valósíthatjuk meg. A felszíni geofizikai módszerek alkalmazásával néhány olyan kapcsolódó paraméter (elektromos vezetőképesség, szeizmikus sebesség, T_2 lecsengési idő) meghatározható, melyből a szivárgási tényező területi változására lehet következtetni. E módszereket Rubin és Hubbard (2005) és Kirsch (2009) könyveikben részletesen tárgyalják. A szivárgási jellemzők vertikális eloszlását a fűrőlyuk-geofizikai mérésekkel tudjuk nyomon követni. Ezek előnye a számos fizikai jellemző *in situ* megfigyelése és a nagy adatsűrűség, ahol az értelmezést kevésbé terheli a többértelműség problémája, mint a felszíni geofizikai módszerek esetében. Több fúrás adatrendszerének együttes feldolgozásával és a felszíni geofizikai mérések bevonásával a fúrások közötti korreláció is megvalósítható. A különböző forrásból kapott szivárgási tényezők hasonlóságának és kiterjeszthetőségének kérdését Zilahi-Sebess és szerzőtársai (2007) vizsgálták.

A fűrőlyuk-szelvényezési módszereket széles körben használják az ásvány- és fluidumkutatásban (Serra 1984). Hidrogeofizikai problémák megoldásakor a szelvényértelmezők legfőbb feladata a víztároló rétegek vastagságának, porozitásának, víztelítettségének (néhol a gáztelítettségnek), agyagosságának, kőzetmatrix-térfogatának és a szivárgási tényezőjének meghatározása. Szinte valamennyi, szénhidrogén-kutatásban használatos szelvényezési módszer felhasználható a vízkutatásban (Alger, Harrison 1987). A természetes gamma- intenzitás-, természetespotenciál- és fajlagosellenállás-szelvényeket közettani azonosításra, a rétegvastagság és az agyagtartalom meghatározására használjuk. A porozitás meghatározására nukleáris (sűrűség- és neutron-porozitás-) szelvényezést alkalmazunk. Többféle, különböző behatolási mélységgel és vertikális felbontóképességgel rendelkező fajlagosellenállás-szonda használható a fűrőlyuk körüli elárasztási profil és a víztelítettség meghatározására. A szelvényezési programok általában technikai méréseket is tartalmaznak, melyek hasznos információval szolgálnak a fűrőlyuk átmérőjéről, a pórusfolyadék nyomásáról, a hőmérséklet-eloszlásról, a termelvény áramlási sebességéről és összetételéről. Az akusztikus lyuktelevízió a lyukfal állapotáról tájékoztat, és repedezett kőzetekben a szerkezeti elemek azonosítására használjuk. A hagyományos szelvényezési technikák mellett korszerű eszközök is bevonhatók a víztároló rétegek kiértékelésébe. Például a pórustérben szabadon áramló víztérfogat, pórusméret-eloszlás és a szivárgási tényező meghatározására fejlesztették ki a

nukleáris mágnesesrezonancia (NMR) módszer speciális szondáját (Walsh et al. 2013). Az olajipari szondákkal mért NMR adatokból a pórusfolyadék viszkozitása is származtatható (Allen et al. 1997). A fenti módszerek segítségével néhány közetfizikai mennyiség viszonylag nagy pontossággal kiszámítható, például a porozitás és az agyagtartalom általában néhány százalékos hibával becsülhető. Ezzel szemben a szivárgási tényező becslési hibája elérheti az egy/(másfél) nagyságrendet, így a fűrőlyukszelvényekkel elsősorban a hidraulikus vezetőképesség megváltozását határozhatjuk meg.

Konzolidálatlan törmelékeny üledékek szivárgási tényezőjének számításához a porozitás és a szemcseátmérők előzetes ismerete szükséges. Geofizikai mérések hiányában általában a kútteszt- vagy kőzetmagokon mért laboradatokat használják fel és terjesztik ki a kutatási területre. Számos regressziós összefüggés ismeretes, például a porozitás, kötött víztelítettség és a permeabilitás vagy a Stoneley-féle hullámterjedési sebesség és a permeabilitás között, azonban ezek megfelelő alkalmazásához pontosan ismernünk kell a helyi regressziós együtthatókat. A sűrű magmintavétel elkerülése érdekében Csókás (1995) kidolgozott egy karotázskiértékelési eljárást, mely kizárólag a fűrőlyukszelvényekből becsüli a permeabilitást és a szivárgási tényezőt. A szerző e módszert a konszolidálatlan édesvíztárolók esetére ajánlotta. Felhasználva Alger (1971) kísérleteit, a Hazen-féle effektív szemcseátmérőt kapcsolatba hozhatjuk a formációtényezővel, mely utóbbi a karotázsmérésekkel közvetlenül meghatározható. A Csókás-formula a víztárolók valódi fajlagos ellenállását és porozitását tartalmazza, melyből a szivárgási tényező a fűrőlyuk teljes hosszára becsülhető. Emellett lehetőséget ad a fajlagos felület, a kritikus áramlási sebesség és a szűrő műszaki adatainak ismeretében a maximális homokmentes vízhozam számítására. E paraméterek ismeretében a felszín alatti vizek kitermelésére a legalkalmasabb eljárás kiválasztható.

Csókás professzor munkájának folytatásaként e tanulmányban összehasonlító vizsgálatot végzünk az általa kidolgozott eljárás és a szemeloszlás-adatok ismeretén alapuló Kozeny–Carman-módszer között. Elsőként szintetikus adatok felhasználásával a paraméterbecslés pontosságát és zajérzékenységet vizsgáljuk. A Jászberényi Vízmű egy fúrásában mért adatrendszer újrafeldolgozva elvégezzük a fenti modellek közötti összehasonlítást. Továbbá a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban bemutatjuk, hogy a Csókás-eljárással becsült szivárgási tényező-szelvény jól korrelál a Kozeny–Carman-modell alapján meghatározott eredményekkel. A szelvényadatok együttes statisztikai feldolgozásával is foglalkozunk. A Csókás-módszerrel és a faktoranalízissel nyert értelmezési eredményeket a magmintákon végzett mérések hitelesítik. A faktoranalízis lehetőséget teremt az agyagtartalom és a szivárgási tényező független eljárással történő becslésére. Ennek alapján megadjuk a baktalórántházi területen a közetfizikai paraméterek és a szivárgási tényező regressziós kapcsolatát és a korrelációs együtthatókat. Az eredmények erős korrelációt mutatnak a szivárgási tényező és a közetfizikai mennyiségek között.

Szelvényértelmezés a Kozeny–Carman-modell alapján

A Darcy-egyenlet a hidrogeológia egyik alapegyenlete, amely a folyadék áramlását írja le porózus közegben:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{k}{\Phi \mu} \nabla p, \quad (1)$$

ahol k (m^2) jelöli a közet permeabilitását, Φ a porozitást, μ (Ns/m^2) a dinamikai viszkozitást, $\mathbf{u}$ (m) a folyadék relatív-elmozdulás-vektorát, t (s) az időt és p (N/m^2) a pórusnyomást. A szivárgási tényező $K = k\rho g/\mu$ (m/s) mint származtatott mennyiség kifejezi, hogy milyen sebességgel képes a folyadék átáramolni a pórustérben. A szivárgási tényező egyaránt függ a közetmátrix és a pórusvíz tulajdonságaitól, a rétegvíz ρ_w (g/cm^3) sűrűségétől és viszkozitásától, a szemcseméret-eloszlástól, a porozitástól, a víztelítettségtől (S_w) és a g (cm/s^2) a nehézségi gyorsulástól.

A szivárgási tényező és a szemcseméret kapcsolatát elsőként Hazen (1892) írta le:

$$K = C_H d_{10}^2, \quad (2)$$

ahol C_H a Hazen-féle együttható (0,4–10 közötti érték) és d_{10} (mm) a mértékadó (effektív) szemcseátmérő, melynél a teljes minta súlyának egy tizede finomabb szemcséket tartalmaz. A Kozeny-egyenlet (1927) (2)-nél megbízhatóbb becslést ad, ezt később Carman (1937) módosította. A Kozeny–Carman-egyenlet szerint a szemcsék közötti porozitású közet egy kapilláriscsatornákból álló rendszernek tekinthető, amelyben a Navier–Stokes-egyenlet érvényesül. A Kozeny–Carman-egyenletet mint standard modellt széles körben használják a vízáradó rétegek szivárgási tényezőjének becslésére (Bear 1972)

$$K = \frac{\rho_w g}{\mu} \frac{d^2}{180} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2}, \quad (3)$$

ahol d (cm) a hatékony szemcseátmérő (K mértékegysége cm/s). A (3) egyenlet $\Phi^3/(1-\Phi)^2$ tagja a közet tömörségével van összefüggésben. A hatékony szemcseátmérő annak a homodiszperz gömbhalmaznak az átmérője, melyből felépített azonos tömörségű szemcsék felülete az adott szemcseméret-eloszlású (eredeti) mintáéval egyezik meg. A fúrásokból vett közetmintákat felhasználva a hatékony (domináns) szemcseátmérő a szemeloszlási görbék nevezetes értékeiből megbecsülhető (Juhász 2002):

$$d = \frac{d_{10} + d_{60}}{2} \sqrt{\frac{d_{10}}{d_{60}}}, \quad (4)$$

ahol d_{10} (cm) és d_{60} (cm) a 10% és 60%-os kumulatív gyakorisághoz tartozó szemcseátmérő. A (3) egyenletben szereplő porozitást karotázsszelvényekből származtatjuk. Az édesvízzel teljesen telített ($S_w = 1$) agyagos homokrétegek effektív porozitása – a levegőteltettséget tartalmazó kifejezést elhanyagolva – a gamma–gamma mérésből számítható:

$$\Phi = \frac{\rho_{sd} + V_{sh}(\rho_{sh} - \rho_{sd}) - \rho_b}{\rho_{sd} - 1}, \quad (5)$$

ahol ρ_b (g/cm^3) a szondával mért közetsűrűség, ρ_{sd} (g/cm^3) és ρ_{sh} (g/cm^3) a homok és az agyag sűrűségét jelölik. Az (5) egyenletben szereplő agyagtartalom fiatal üledékes közetekben az alábbi tapasztalati egyenletből számítható (Larionov 1969):

$$V_{sh} = 0,083 \left[2^{3,7 \left(\frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \right)} - 1 \right], \quad (6)$$

ahol GR (cps) a természetes gamma-sugárzás intenzitása, $GR_{\min}$ (cps) és $GR_{\max}$ (cps) a természetes gamma-szelvény szélső értékei a víztároló szakaszon. A (6) egyenlet nem függ a pórusvíz tulajdonságaitól, azonban a kiértékelésnél óvatosságot igényelnek olyan kőzetek, melyek radioaktív, nem agyag típusú ásványokat, illetve uránban vagy tóriumban gazdag vízzel kitöltött repedéseket tartalmaznak.

A hatékony szemcseátmérő és a porozitás kapcsolatának meghatározása után a (3)–(6) egyenletet alkalmazva egy, a folytonos szivárgási tényezőt leíró görbét kapunk a teljes szelvényezett szakaszon. A fenti módszer a közetfizikai mennyiségeket a szelvények egyedi feldolgozásával (több, egymástól független lépésben) származtatja. Azonban léteznek ennél fejlettebb módszerek is, melyek a bemenő petrofizikai jellemzőket egy közös eljárásban határozzák meg. Ha az ismeretlenek száma egyenlő a megfigyelt szelvények számával, a szonda válaszfüggvényei lineáris egyenletrendszerként kezelhetők, amelyeket grafikusán vagy numerikusan is meg lehet oldani. Ha az ismeretlenek számánál több adattípust mérünk, általában valamilyen statisztikus vagy inverziós eljárás használható a közetfizikai paraméterek kinyerésére. Inverz modellezés alkalmazása esetén a modellparamétereket (porozitás, víztelítettség, agyagtartalom, mátrix részarány) közös optimalizációs eljárásban becsüljük meg (Drahos 2005). Az inverz modellezésnek további előnye, hogy a közetfizikai paraméterek becslési hibáit is megadja, amelyekkel az inverziós eredmények pontosságát és megbízhatóságát számszerűen jellemezhetjük (Menke 1984).

A Csókás-eljárás bemutatása

A Csókás-formula a (3) egyenlet empirikusan módosított formája, mely az édesvízzel telített laza törmelékeny kőzetek mértékadó szemcseátmérője és formációtényezője közötti összefüggésen alapul. Ezt a kapcsolatot Alger (1971) írta le, aki összekapcsolta az effektív szemcseátmérőt az Archie-féle formációfaktoral, ezzel hidat képezve a vízáradó rétegek szivárgási tényezője és a karotázsmérések között.

A vízzel telített kőzetek formációtényezője (F) a közet R_0 (ohmm) és a pórusvíz R_w (ohmm) fajlagos ellenállásának arányával adható meg:

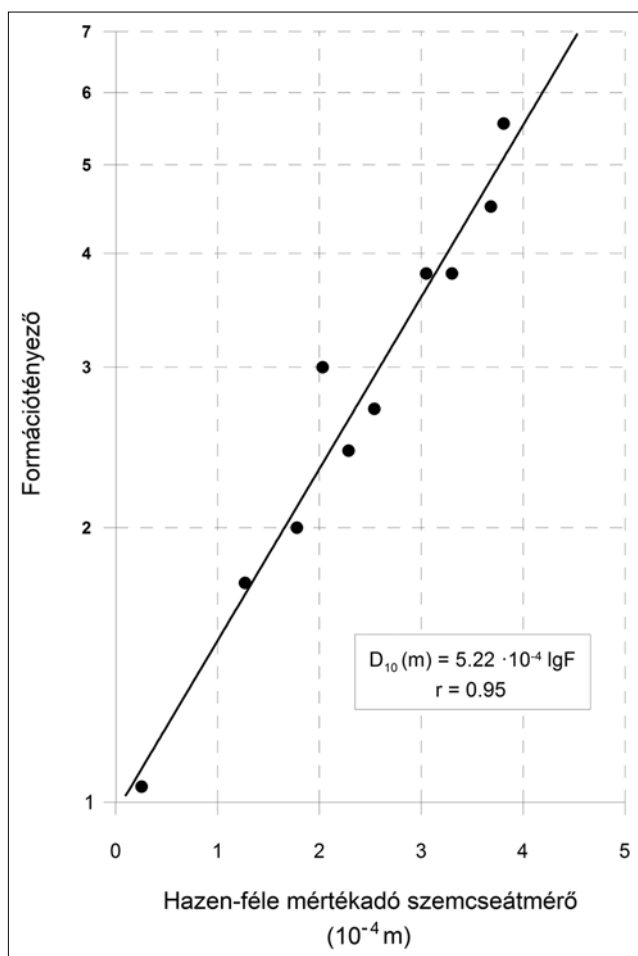
$$F = R_0/R_w. \quad (7)$$

Alger (1971) egyenes arányosságot talált a formációtényező és az édesvízzel telített üledékek laboratóriumban meghatározott szemcseátmérője között, ami ellentétben azzal

a megfigyeléssel, amelyet a szénhidrogén-mezők esetén tapasztalunk (sós vízzel telített tárolók). E megfigyelések alapján a szitaelemzéssel meghatározott Hazen-féle effektív szemcseátmérő az alábbi összefüggésben áll konszolidálatlan üledékek formációtényezőjével:

$$d_{10} = C_d \lg F, \quad (8)$$

ahol C_d állandó javasolt értéke $5,22 \cdot 10^{-4}$ (m). A (8) egyenlet $F \leq 10$ formációtényezőjű, nem túl rosszul osztályozott üledékek esetén érvényes. E követelmény a felszínközeli törmelékeny víztároló rétegeknél általában teljesül. Vizsgálatai alapján Alger (1971) különböző típusú fűrőlyuk-szelvényezési módszerek olajiparból való átvételét javasolta, aminek megfelelően azok adaptálhatók az édesvíztároló agyagos homokok kiértékelésében. A (8) regressziós kapcsolatot az 1. ábra szemlélteti, ahol a Pearson-féle korrelációs együttható $r = \text{cov}(d_{10}, F) / (\sigma_{d10} \sigma_F)$ szoros kapcsolatot mutat a fenti változók között. A domináns szemcseátmérőt más forrásból is megadhatjuk. Az $U = d_{60}/d_{10}$ egyenlőtlenségi együttható mint alakparaméter a szemeloszlás-görbe formáját jellemzi, és számszerűsíti a szemcsék osztályozottságának mértékét. Kovács (1972) homokok egyenlőtlenségi együtthatóját kapcsolatba hozta a hatékony szemcseátmérő-



1. ábra A mértékadó szemcseátmérő és a formációtényező kapcsolata édesvíztároló üledékekben
Figure 1 Alger's empirical relation between formation factor and Hazen's effective grain-size in freshwater-bearing sediments

vel: $d/d_{10} = 1,919 \lg U + 1$. Rosszul osztályozott üledékeknel ($U > 5$) az U mennyiség fordítottan arányos a szivárgási tényező logaritmusával. Jól osztályozott homokokra ($2.0 \leq U \leq 2.5$) az előző egyenlet

$$d = 1,671 d_{10} \quad (9)$$

formában írható, ekkor az előzőek figyelembevételével a (7) és (8) egyenlet összevonásával előáll

$$d = 1,671 C_d \lg (R_0/R_w), \quad (10)$$

melyben R_0 a hosszú szondával mért fajlagosellenállás-értékekből, míg R_w természetespotenciál-szelvényből vagy vízkémiai elemzésből származtatható (Csókás 1995).

A szivárgási tényező meghatározásához a felszín alatti képződmények agyagtartalmának és effektív porozitásának előzetes ismerete szükséges. E két mennyiséget az (5) és (6) formula alapján számíthatjuk. Archie (1942) számos közetminta laboratóriumi méréséből az alábbi összefüggést találta:

$$F = a/\Phi^m, \quad (11)$$

ahol m a cementációs kitevő (kevésbé kompaktált üledékeknel $m \approx 1,5-1,7$), míg a jelöli a tekervényességi együtthatót ($a \approx 1$). E két mennyiség a közet texturális tulajdonságait írja le. Mivel értékük egy-egy nagyobb intervallumon konstansnak tekinthető, így a zónaparaméterek körébe soroljuk ezeket. Alger (1971) kimutatta, hogy elsődleges porozitású édesvízzel telített üledékekben a formációtényező nemcsak a porozitástól függ, hanem a pórusvíz fajlagos ellenállásától és a szemcsemérettől is. Ogbe és Bassiouni (1978) a tekervényességi együtthatót a porozitással és a formáció faktorról kapcsolta össze:

$$a^2 = [(R_0/R_w)\Phi]^{1,2}. \quad (12)$$

Kovács (1972) a szivárgási tényező meghatározása érdekében a (3) egyenletet megfelelően módosította:

$$K = \frac{1}{5} \frac{g}{\nu} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2} \left(\frac{d}{\alpha} \right)^2, \quad (13)$$

ahol α a szemcsék átlagos alakú tényezője, amely homokokra 7–11 közötti érték (átlagosan 10-nek vehető). A víz kinematikai viszkozitása $\nu = \mu/\rho$ (m^2/s) kifejezhető a formáció hőmérsékletének függvényében. A gravitációs gyorsulás és a víz kinematikai viszkozitásának aránya $g/\nu = 5,517 \cdot 10^4 C_t$ ($\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$), ahol a C_t dimenziótlan hőmérsékletfüggő együttható kiszámítható a $C_t = 1 + 3,37 \cdot 10^{-2}T + 2,21 \cdot 10^{-4}T^2$ formula alapján (a T °C-ban helyettesítendő).

Pirson (1963) tette közzé a Kozeny-egyenletnek egy másik alakját:

$$K = \frac{1}{5} \frac{g}{\nu} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2} \left(\frac{1}{aS} \right)^2, \quad (14)$$

ahol S (1/m) jelöli a közetszemcsék fajlagos felületét. A (13), (14) egyenlet összehasonlításából az alábbi összefüggés származtatható:

$$(d/\alpha)^2 = a^{-2} S^{-2}. \quad (15)$$

Gálfi és Liebe (1981) több empirikus formulát megvizsgált a homokok és kavicsok fajlagos ellenállása és szivárgási tényezője között. Édesvíztartalmú üledékekben az elektromos áram nehezen folyik át a szemcsék között, sokkal inkább azok felületén. Így a fajlagos ellenállás fordítottan arányos a közetszemcsék fajlagos felületével. Azt feltételezve, hogy a szemcsék gömb alakúak a fajlagos felület kiszámítható:

$$S = 6(1 - \Phi)/d. \quad (16)$$

A (10) és (16) egyenletből adódódik:

$$S^2 = \frac{36(1 - \Phi)^2}{[1,671C_d \lg(R_0/R_w)]^2}. \quad (17)$$

A Csókás-féle szivárgási tényező m/s egységben a (13), (14) és (17) egyenlet alapján számítható:

$$K = C_k \frac{\Phi^3}{(1 - \Phi)^4} \frac{[\lg(R_0/R_w)]^2}{[(R_0/R_w)\Phi]^{1,2}}, \quad (18)$$

ahol $C_k = 855,7 \cdot C_i C_d^2$ az arányossági állandó. Csókás (1995) szerint a jó vízátlós szivárgási tényezője $K > 10^{-6}$ m/s, míg a vízzáróké $K < 3 \cdot 10^{-8}$ m/s. A Csókás-formula egyedisége abban rejlik, hogy a (18) egyenletben szereplő paraméterek mindegyike karotázsszelvényekből meghatározható, így a fúróluk mentén folytonos (*in situ*) becslés adható a szivárgási tényezőre.

A Csókás-módszer lehetőséget ad a víztárolókhoz köthető további paraméterek meghatározására. A víz áramlásának következtében tangenciális feszültségek ébrednek a közetszemcsék felületén. A kritikus áramlási sebesség (v_c), amelynél a d_{10} méretű szemcsék a lyukfal irányában elmozdulnak, a szivárgási tényezőből becsülhető (Schmieder 1975):

$$v_c \cong 2(d_{10})^{1/2} \cong (1/15)(K)^{1/2}, \quad (19)$$

ahol v_c és K m/s egységben, míg d_{10} mm-ben helyettesítendő. A homokmentes kitermelés érdekében (19) felhasználásával megállapíthatjuk az optimális szivattyúzási ütemet. A kritikus sebességet meghaladva fenn áll annak a kockázata, hogy a víz minősége romlik, és a kút elhomokosodik. A kút

felvevőképessége m^3/s egységben $Q_{\max} = 2\pi r_0 h_0 v_c$, ahol r_0 (m) a szűrő sugara és h_0 (m) annak a hossza. Gyakorlati tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy a nagyobb vízhozam érdekében jóval nagyobb sebességértékeket is alkalmazhatunk a (19) egyenletben javasoltnál. Ennek az az oka, hogy a kútkiképzés utáni tisztító szivattyúzás a kút közvetlen környezetében növeli a mértékadó szemcseátmérő értékét és ezzel a hozzá tartozó kritikus sebességet is. A szemeloszlásadatok felhasználásával a kritikus sebességre realisztikus becslés adható, melyből az optimális vízhozam l/perc egységben kifejezhető:

$$Q_{\max} = 120\pi r_0 h_0 10^{0,446 \lg d + 0,1654}, \quad (20)$$

ahol v_c -t m/s és d -t mm egységben adjuk meg (Kassai, Jambrik 1986). A (20) egyenlet a 0,09–5 mm közötti szemcseméret-tartományban alkalmazható.

A Csókás-eljárás vizsgálata szintetikus adatokon

A Csókás-eljárást először ismert modellen teszteljük. A modellparaméterek két csoportját különböztetjük meg: úgy mint réteg- és zónaparamétereket. Az előbbieket rétegenként változtatjuk, míg az utóbbiak a vizsgált intervallumon (víztároló zóna) gyakorlatilag változatlanok. Ismertnek tételezzük fel az alábbi rétegjellemzőket: porozitás (POR), agyagtartalom (VSH), homoktérfogat (VSD), mértékadó szemcseátmérő (D_{10}) és hatékony szemcseátmérő (D). A konszolidálatlan formáció 2. és 4. rétege durva homok, míg a többi alacsony permeabilitású iszap. A rétegsor teljesen édesvízzel telített ($SW = 1$), melyben az alábbi szintetikus szelvényeket használjuk fel: természetes gamma-intenzitás (GR), természetes potenciál- (SP), neutron-neutron intenzitás (NN), sűrűség (DEN), sekély- és mélybehatólítás szondával mért fajlagos ellenállás (RS és RD). A bemenő adatokat és a közetösszetettelt a 2. ábra mutatja.

Az elméleti szelvényeket előremodellezéssel számítjuk. A teljesen vízzel telített agyagos homokrétegek modellparaméterei és a fúrólukszelvények kapcsolatát az alábbi szonda-válaszegyenletek írják le (Alberty, Hashmy 1984):

$$GR = \frac{VSH \cdot GRSH \cdot DESH + VSD \cdot GRSD \cdot DESD}{DEN} + GRSD, \quad (21)$$

$$SP = SP SH \cdot VSH - C \lg \frac{RMF}{RW} (1 - VSH), \quad (22)$$

$$NN = POR \cdot NNMF + VSH \cdot NNSH + VSD \cdot NN SD, \quad (23)$$

$$DEN = POR \cdot DEMF + VSH \cdot DESH + VSD \cdot DESD, \quad (24)$$

$$RS = \left[\left(\frac{VSH^{(1-0,5 VSH)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{m/2}}{(a \cdot RMF)^{1/2}} \right) \right]^{-2}, \quad (25)$$

$$RD = \left[\left(\frac{VSH^{(1-0,5 VSH)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{m/2}}{(a \cdot RW)^{1/2}} \right) \right]^{-2}, \quad (26)$$

$$POR + VSH + VSD = 1. \quad (27)$$

A (21)–(26) egyenletek zónaparamétereinek értékeit az 1. táblázat tartalmazza. A (27) anyagmérlegegyenlet az egy-
ségi közöttfogattra ír elő korlátozást. A szelvényadatok elméleti értékét a modellparaméterek (21)–(26) egyenletbe történő helyettesítésével kapjuk. Az így generált szintetikus (zajmentes) szelvényekhez véletlen zajt adva kvázimért karotázsszelvényeket állítunk elő. Tekintsük először az 5%-os Gauss-zajjal terhelt szelvények feldolgozását. A szivárgási tényezőt először a (3) Kozeny–Carman-egyenlet felhasználásával, majd a Csókás-modell alapján számítjuk (2. ábra). A (18) egyenlet C_k állandóját Alger (1971) javaslata alapján $3,2587 \cdot 10^{-4}$ -nek választjuk. Megállapítható, hogy a becsült szivárgási tényező szelvényei a zaj mértékének megfelelően szoros egyezést mutatnak.

A fűrőlyukszelvények pontossága eltérő, mely függ a szonda típusától, a szelvényezés műszaki adataitól és a földtani viszonyoktól. Ahhoz, hogy a valódi mérési körülményeket szimuláljuk, a szintetikus (zajmentes) adatokat különböző mértékű zajjal terheljük. A zajos adatok feldolgozásával kapott kiértékelési eredmények pontosságát az alábbi három mennyiséggel mérjük. A relatív adattávolság a különböző nagyságrendű és dimenziójú zajmentes és zajos adatok eltérését számszerűsíti:

$$D_a = \left[P^{-1} N^{-1} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^N \left(\frac{d_{pk}^{(0)} - d_{pk}^{(m)}}{d_{pk}^{(m)}} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100 \text{ (}\%), \quad (28)$$

ahol $d_{pk}^{(0)}$ és $d_{pk}^{(m)}$ a p -edik mélységben előállított k -adik (egzakt) szintetikus és zajos adat. A modelltávolság két különböző módszerrel becsült szivárgási tényező szelvénytávolságát adja meg:

$$D_m = \left[P^{-1} \sum_{p=1}^P \left(\frac{\lg K_p^{(I)} - \lg K_p^{(II)}}{\lg K_p^{(II)}} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100 \text{ (}\%), \quad (29)$$

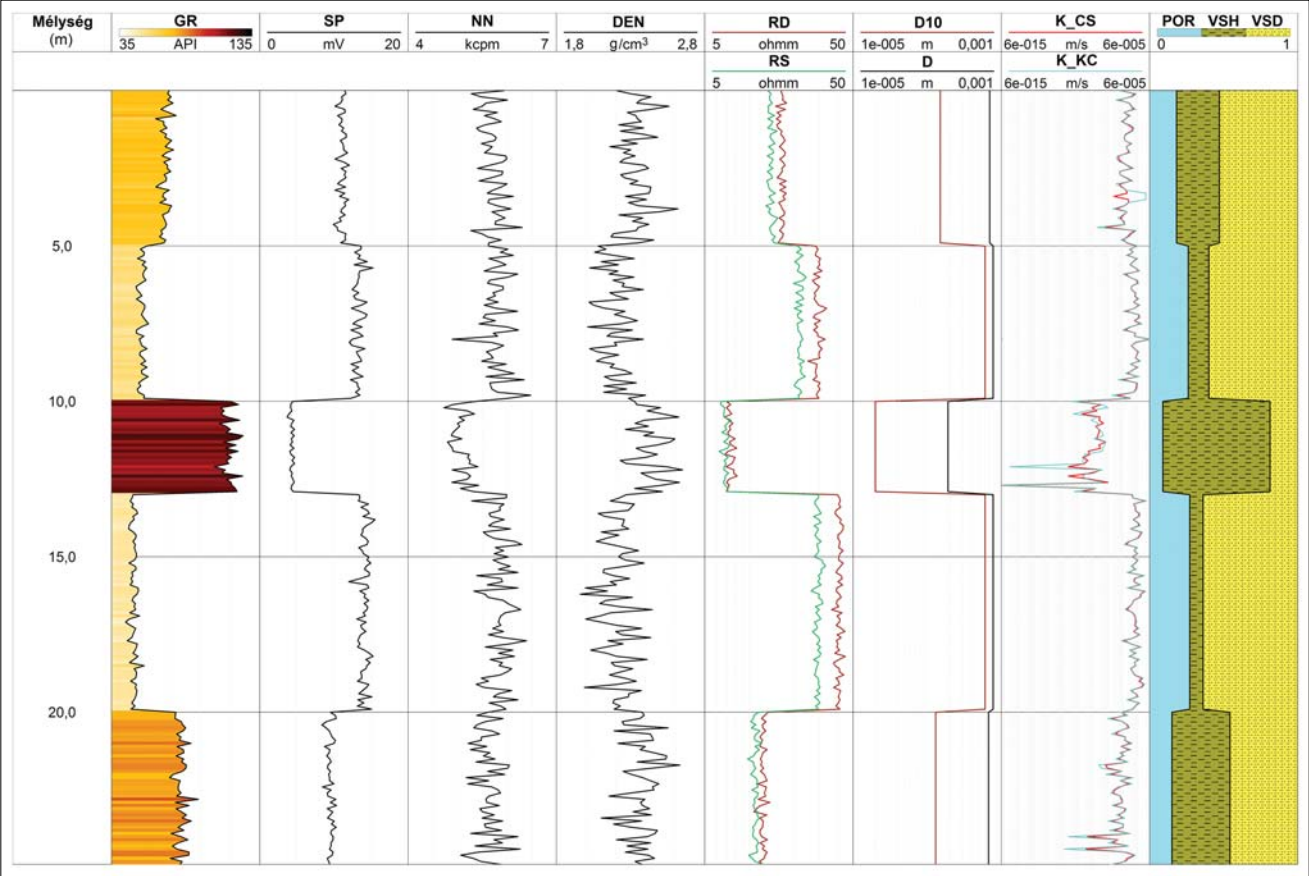
ahol $K_p^{(I)}$ és $K_p^{(II)}$ az első és második módszer alapján számított p -edik szivárgási tényezőt jelöli. A különböző forrásból becsült szivárgási tényezők kapcsolatának erősségét a Pearson-féle korrelációs együttható jellemzi

$$r = \frac{\text{cov}(K^{(I)}, K^{(II)})}{\left[\text{cov}(K^{(I)}, K^{(I)}) \text{cov}(K^{(II)}, K^{(II)}) \right]^{1/2}}, \quad (30)$$

ahol cov jelöli a minta kovariancia operátorát. A (30) formula a változók lineáris kapcsolata esetén nyújt optimális becslést. Nemlineáris függvénykapcsolat esetén a rangkorrelációt

1. táblázat Direkt feladat megoldása során alkalmazott zónaparaméterek
Table 1 Zone parameters used for forward modeling

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Állandó	Mértékegység
Természetes- γ -intenzitás	Agyag	<i>GRSH</i>	160	API
	Homok	<i>GRSD</i>	25	API
Természetes potenciál	Agyag	<i>SPSH</i>	0	mV
	Homok	<i>SPSD</i>	15,53	mV
	Hőmérsékleti koefficiens	<i>C</i>	70	–
Termikus- n^0 -intenzitás	Agyag	<i>NNSH</i>	4,8	kcpm
	Homok	<i>NNSD</i>	7,2	kcpm
	Iszapfiltrátum	<i>NNMF</i>	3,1	kcpm
Sűrűség	Iszapfiltrátum	<i>DEMF</i>	1,0	g/cm ³
	Agyag	<i>DESH</i>	2,55	g/cm ³
	Homok	<i>DESD</i>	2,65	g/cm ³
Fajlagos ellenállás	Iszapfiltrátum	<i>RMF</i>	9	ohmm
	Rétegvíz	<i>RW</i>	15	ohmm
	Agyag	<i>RSH</i>	2	ohmm
	Cementációs kitevő	<i>m</i>	1,5	–
	Szaturációs kitevő	<i>n</i>	1,9	–
	Tortuozitási koefficiens	<i>a</i>	1,0	–
Szivárgási tényező	Dinamikai viszkozitás	μ	0,019	Pa·s
	Nehézségi gyorsulás	<i>g</i>	981	cm/s ²



2. ábra 5% Gauss-zajjal terhelt szintetikus szelvények, a közetfizikai modell és a szivárgási tényező becslésének eredménye
Figure 2 Synthetic well logs contaminated with 5% Gaussian distributed noise, petrophysical model and results of hydraulic conductivity estimation

ós együttható (ρ) ad reális értéket a változók korrelációjának mértékére (Spearman 1904). A szivárgási tényező becslési pontossága függ a karotázsszelvények megbízhatóságától. Ennek vizsgálatára generáljunk különböző mértékű zajjal terhelt adatrendszereket. A (21)–(26) egyenletek alapján létrehozott szintetikus adatokat 1–10%-os Gauss-zajjal terheljük. Nem Gauss-eloszlású adatok szimulálására két további adatrendszert hozunk létre, melyek kiugró (az adatok véletlenszerűen kiválasztott 1/6 részéhez a meglévőnél háromszor nagyobb mértékű Gauss-zajt adunk) értékeket is

tartalmaznak. Az adatrendszereket külön-külön feldolgozva a 2. táblázatban foglalt eredményeket kapjuk. A (28) egyenlet alapján számított adattávolságok a második oszlopban találhatók. A Csókás- és a Kozény–Carman-módszerrel becsült szivárgástényező-szelvények (29) egyenlettel meghatározott modelltávolsága arányosan nő az adattávolsággal, míg azok (30) korrelációs együtthatója csekély mértékben csökken a zajszint növelésével. A Kozény–Carman- és a Csókás-modell alapján becsült szivárgási tényezők korrelációja nem normális eloszlású adatok, és szélsőséges hiba-

2. táblázat Zajérzékenységi tesztek eredményei
Table 2 Results of noise sensitivity tests

Zaj (eloszlás)	Adattávolság (%)	Modelltávolság (%)	Korrelációs együttható
0% Gauss	0	0,04	1,00
1% Gauss	1,01	0,85	1,00
2% Gauss	1,99	1,47	0,99
3% Gauss	3,05	2,06	0,99
4% Gauss	4,01	2,78	0,99
5% Gauss	5,02	3,58	0,99
5% Gauss + kiugró adatok	8,97	4,31	0,98
10% Gauss	10,06	6,31	0,98
10% Gauss + kiugró adatok	20,83	7,31	0,96

3. táblázat Zónaparaméterek választott értékei a K-564 sz. fúrásban
Table 3 Values of zone parameters chosen in borehole K-564

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Állandó	Mértékegység
Természetes- γ -kitérés	Agyag	<i>GRSH</i>	47	mm
	Homok	<i>GRSD</i>	0	mm
Természetes potenciál	Hőmérsékleti koefficiens	<i>C</i>	1,5	–
Hőmérséklet	Formáció	<i>TF</i>	15	°C
Sűrűség	Iszap	<i>DEM</i>	1,1	g/cm ³
Fajlagos ellenállás	Iszap	<i>RM</i>	9,31	ohmm
	Iszapfiltrátum	<i>RMF</i>	10,31	ohmm
Szivárgási tényező	Dinamikai viszkozitás	μ	0,019	Pa·s
	Nehézségi gyorsulás	<i>g</i>	981	cm/s ²

értékek mellett is erős. Megállapítható, hogy a Csókás-eljárással kapott eredmények ellentmondásmentesek, és a szivárgási tényező becsült értékeinek pontossága a várható mértékben függ a bemenő adatok hibájától.

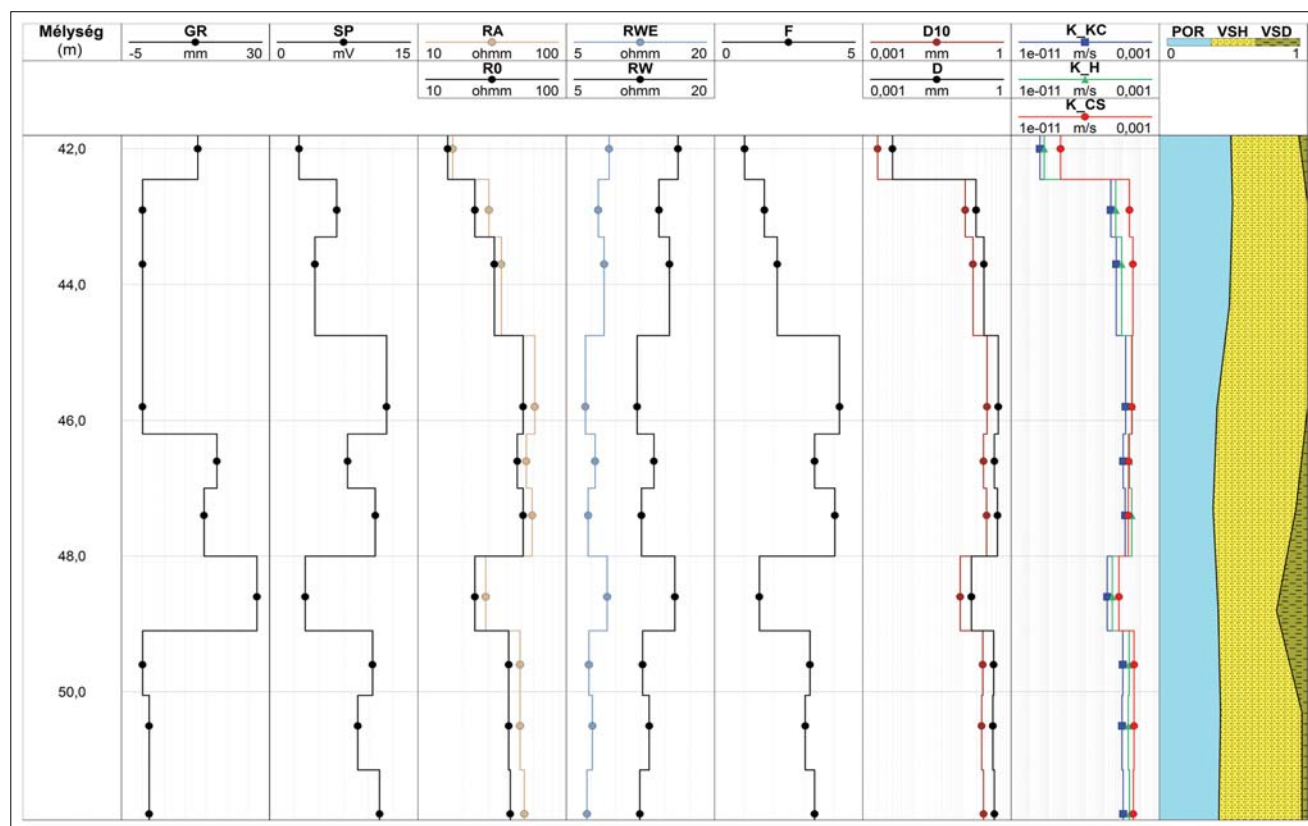
A Csókás eljárás vizsgálata terepi adatokon

1. Esettanulmány

Csókás (1995) az általa javasolt kiértékelési eljárást a Jászberényi Vízmű K-564 kútjában mért adatokon tesztelte. Je-

len tanulmányban újra feldolgozva a szelvényeket összehasonlítjuk a Csókás-módszert a Hazen-féle formulával és a Kozeny–Carman-módszerrel. A kis átmérőjű (320 mm) fúrásban a természetes-gamma-intenzitás- (*GR*), természetespotenciál- (*SP*), rövid normál és laterál szondával mért látszólagos fajlagosellenállás-szelvényt (*RA*) analóg berendezéssel (1:200 léptékben) rögzítették. A mért jeleket eredetileg a szerző elektrofácies elemzés alkalmazásával négyszögesítette. Az alkalmazott szonda-válaszgyenletek zónaparamétereit a 3. táblázat tartalmazza.

Az *SP* szelvényből a rétegvíz fajlagos ellenállása ($RW = 1,75 \cdot RWE$) becsülhető, ahol a rétegvíz ekvivalens fajlagos



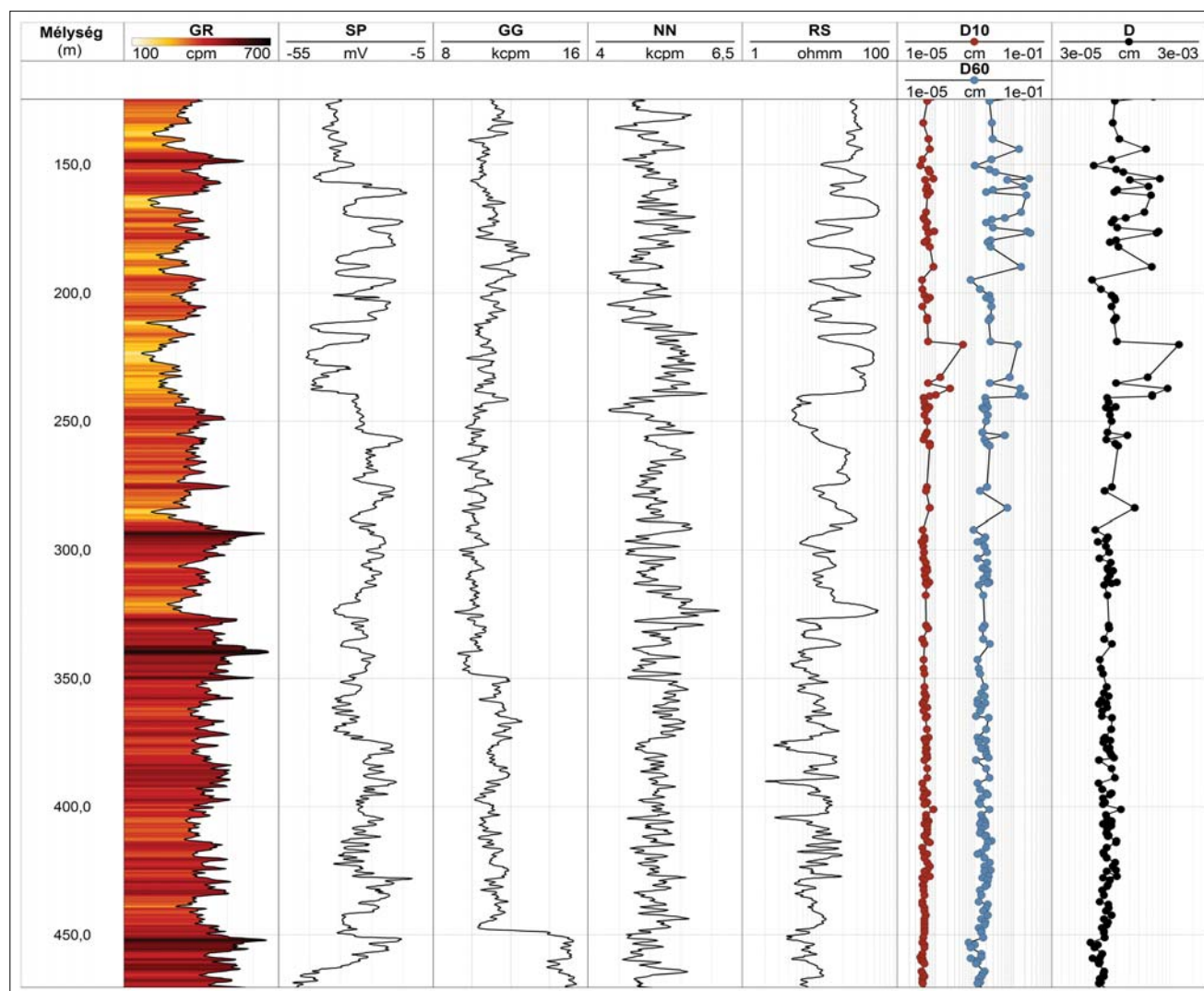
3. ábra Mért szelvények és a szivárgási tényező becslés eredményei K-564 sz. fúrásban
Figure 3 Observed borehole logs and result of hydraulic conductivity estimation in borehole K-564

ellenállása (RWE) a szelvényezett intervallumon 6,9–9,3 ohmm. Az RA szelvényt az iszapfiltrátum fajlagos ellenállása és a lyukátmérő hatásával korrigáljuk, melyet felhasználunk a valódi fajlagos ellenállás (RO), a formációtényező (F) és a porozitás (POR) számítására. A 3. ábra a bemenő szelvényeket (1–3. oszlop), a mérésekből származtatott paramétereket (4–5. oszlop), a mértékadó és hatékony szemcseátmérőt (6. oszlop) és a közetösszetételt tartalmazza (8. oszlop). A Csókás-eljárással számított szivárgástényező-szelvényt (K_{CS}) a 7. oszlop mutatja. A kiértékelési eredményeket megerősítik a (2) és (3) egyenlettel számított szivárgástényező-értékek. A Hazen-féle összefüggést a $K = 116 \cdot D^2$ formában alkalmazzuk, ahol a hatékony szemcseátmérőt (D) cm egységben adjuk meg (a 6. oszlopban a domináns szemcseátmérő mm egységben szerepel). A (29) egyenlet alapján számított modelltávolság a Csókás- és a Kozeny–Carman-féle szivárgási tényező (K_{KC}) szelvények között $D_m = 13\%$, míg ugyanaz 9,8% a Csókás- és a Hazen-féle módszerrel (K_H) számított szelvények között. A szűrőzött intervallumokon (41–47,5 m és 48–52 m) a

Csókás-módszerrel 632 l/perc hozamot határozhatunk meg, mely közel áll a próbaszivattyúzással kapott 550 l/perc értékhez (Csókás 1995).

2. Esettanulmány

További vizsgálatokat a Baktalórántháza-1 sz. fűrés adatának alapján mutatunk be. A geofizikai mérések elsődleges célja a szénhidrogén-kutatáshoz kapcsolódó földtani szerkezet vizsgálata volt. A rétegek szénhidrogént nem tartalmaznak, viszont jelentős termálvízkészlettel rendelkeznek. Jelen tanulmányban a 124–470 m szakaszt vizsgáljuk, ahol pleisztocén, majd alsó pannon üledékek váltakoznak, úgymint kavics, agyagos homok, agyagos közetliszt, agyagmárga és bitumenes agyag. A pórusokat édesvíz telíti. A pleisztocén és a pannon határa 240 m mélységben található. A természetes gamma-intenzitás (GR), természetes potenciál (SP), lyukátmérő (CAL), sekély behatolású szondával mért fajlagosellenállás- (RS), gamma-gamma- (GG) és neutron-neutron- (NN) szelvényeket a 4. ábra mutatja. Emel-



4. ábra | Mért szelvények és szemcseméret adatok a Baktalórántháza-1 sz. fűrésban
Figure 4 | Observed well logs and grain-size data in borehole Baktalórántháza-1

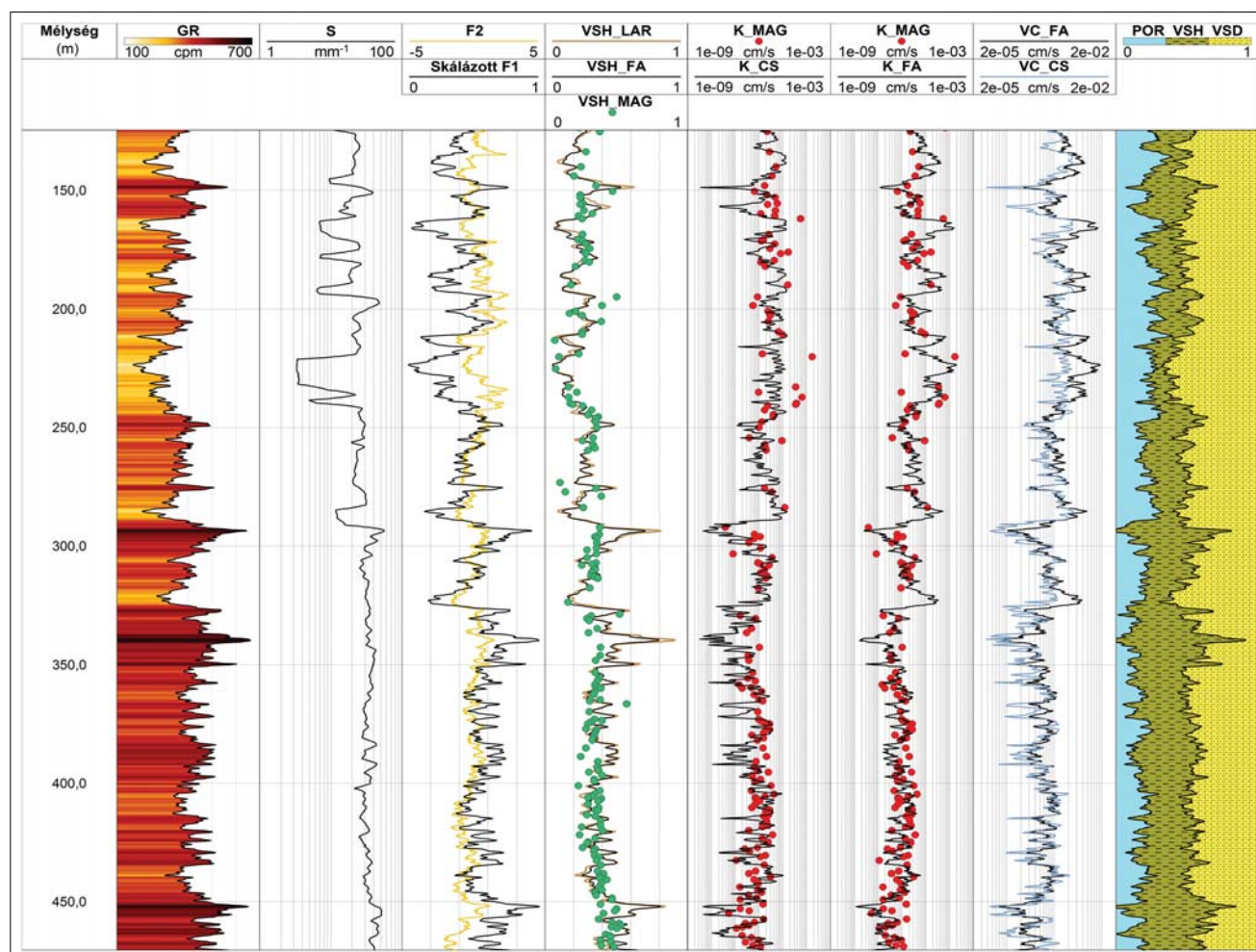
4. táblázat Zónaparaméterek választott értékei a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban
Table 4 Values of zone parameters chosen in borehole Baktalórántháza-1

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Állandó	Mértékegység
Természetes- γ -intenzitás	Agyag	$GRSH$	685	cps
	Homok	$GRSD$	188	cps
Termikus- n^0 -intenzitás	Agyag	$NNSH$	4	kcpm
	Homok	$NNSD$	7,5	kcpm
	Iszapfiltrátum	$NNMF$	1	kcpm
Fajlagos ellenállás	Cementációs tényező	m	2,15	–
	Tekervényességi együttható	a	0,62	–
Szivárgási tényező	Dinamikai viszkozitás	μ	0,019	Pa·s
	Nehézségi gyorsulás	g	981	cm/s ²

lett laboratóriumi mérésekből származó szemcseméret adatok is rendelkezésre állnak. A $D10$ és $D60$ értékek a szemeloszlás görbékből olvashatók le, míg a D hatékony szemcseátmérőt a (4) egyenlet alapján számíthatjuk.

A Csókás-eljárás alkalmazásához ismernünk kell az effektív porozitást (POR) és a formációtényezőt (F). A neutron-neutron mérésből a (23) egyenlettel a teljes porozitás

számítható, ahol a neutronsonda-válaszegyenlet konstansait a $NN-GG$ keresztmetszetről becsüljük (4. táblázat). A GR szelvényt felhasználó (6) egyenlet alapján az agyagtartalmat meghatározhatjuk (VSH_LAR), ahol a szelvénykonstansokat szintén a táblázat tartalmazza. A homok térfogata (VSD) az effektív porozitás és az agyagtartalom ismeretében (27) egyenletből kifejezhető. A formációtényező



5. ábra Becsült kőzetfizikai és szivárgási paraméterek szelvényei a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban

Figure 5 Well logs of estimated petrophysical and hydraulic parameters in borehole Baktalórántháza-1

általában az SP és $R0$ szelvényekből adódik. Mivel hiányzik a mély behatolású szondával mért fajlagosellenállás-szelvény, ezért itt a Humble-formulát alkalmazzuk a formáció-tényező becslésére ($F = 0,62/POR^{2,15}$). A (18) egyenleten alapuló Csókás-modell felhasználásával becsülhetjük a szivárgási tényezőt (K_{CS}) a szelvényezés teljes szakaszán. Emellett a (3) egyenlettel becsült szivárgási tényezők (K_{MAG}) a mintavételi helyeken adhatók meg (5. ábra 5. oszlop). A független módszerrel becsült eredmények jó egyezést mutatnak. A mintavételi helyekre a (29) egyenlettel számítható modell-távolság $D_m = 3,4\%$, ami szintén jónak mondható. A (30) korrelációs együttható $r = 0,96$ a Csókás- és a Kozeny–Carman-módszerrel meghatározott szivárgási tényezők között. A Csókás-eljárással a (19) egyenletből kiszámítható a VC_{CS} kritikus áramlási sebesség (7. oszlop), valamint a (16) egyenlettel megbecsülhető a szemcsék S fajlagos felülete (2. oszlop). Az utóbbi szelvényen jól elkülönülnek a vízáadó és vízzáró szakaszok, az előbbiek relatíve kis S értékekkel, míg az utóbbiak nagy S kitéréssel jelentkeznek.

A Csókás-eljárással kapott eredményeket a fúrólukszelvények többváltozós statisztikai vizsgálati eredményei is megerősítik. A faktoranalízisen alapuló eljárás a mért szelvényeket kevesebb számú statisztikai változóval (faktorokkal) helyettesíti, melyek különböző arányban osztják meg a mért információt. A első faktor felelős a bemenő adatok varianciájának legnagyobb hányadáért, míg a további faktorok egyre kisebb arányban tartalmazzák a mérési információt. A faktoranalízis a dimenziócsökkentésen túl alkalmas a szondákkal közvetlenül nem mérhető, rejtett közetfizikai mennyiségekre vonatkozó információ kinyerésére (Lawley, Maxwell 1962). Ebben a tanulmányban a statisztikai eljárással képzett faktorszelvényeket felhasználjuk a víztároló formációk közetfizikai/szivárgási paramétereinek becslésére és a kapott eredményeket összehasonlítjuk a Csókás-módszerrel kapott eredményekkel. Első lépésben a fúrólukszelvények faktoranalízisével meghatározzuk a rétegek agyagtartar-

talmát. Szabó és szerzőtársai (2014) tapasztalati kapcsolatot találtak az északkelet-magyarországi régió fiatal üledékei százalékos agyagtartalma és az első faktor között

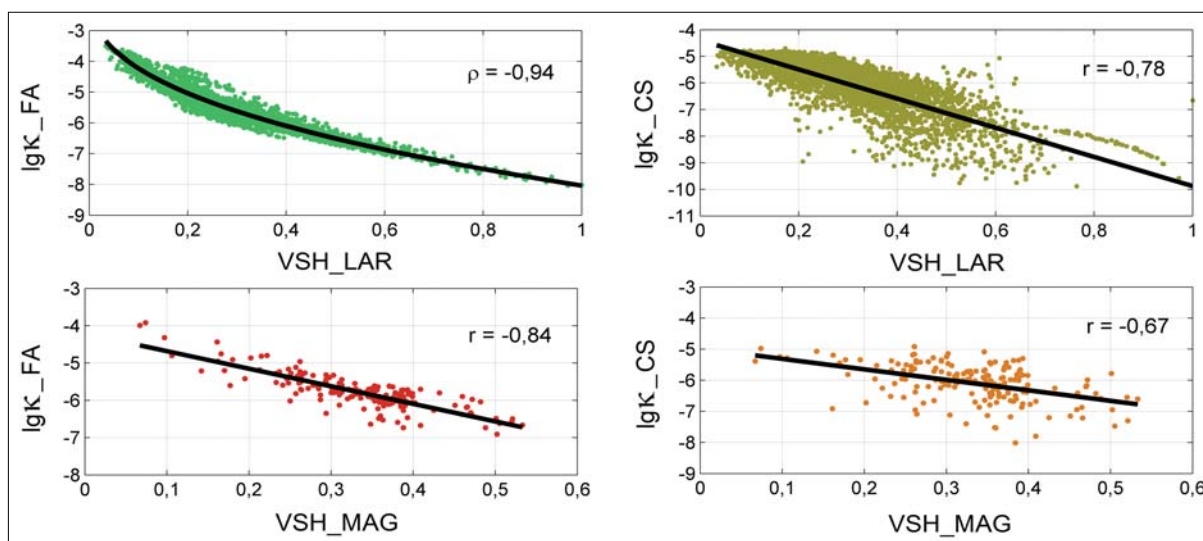
$$V_{sh} = 27,4 \exp\{0,015 F_1\} - 26,5, \quad (31)$$

ahol F_1 jelöli a 0–100 tartományban skálázott első faktorszelvényt. A faktorszelvények számítását a Baktalórántháza-1 fúrásban a *Magyar Geofizika* ugyanezen számában Szabó (2015) részletesen tárgyalja. Az első faktorból képzett agyagtartalom-szelvényt (VSH_{FA}) az 5. ábra 4. oszlopában találjuk, mely szoros egyezést mutat a VSH_{LAR} és a magadatokon alapuló VSH_{MAG} értékekkel. Az első faktorból közvetlenül szivárgástényező-szelvényt (K_{FA}) számíthatunk, melyet az ábra 6. oszlopa mutat. A faktoranalízissel és a Csókás-eljárással becsült szivárgástényező-szelvények modell-távolsága $D_m = 8,8\%$. A magmérésekkel összevetve mindkét módszer megfelelő becslést ad, a 150–250 m szakaszon a nagyobb szivárgási tényezők tartományában ($\sim 10^{-4}$ cm/s) a faktoranalízis eredménye a magmérésekhez közelebb áll.

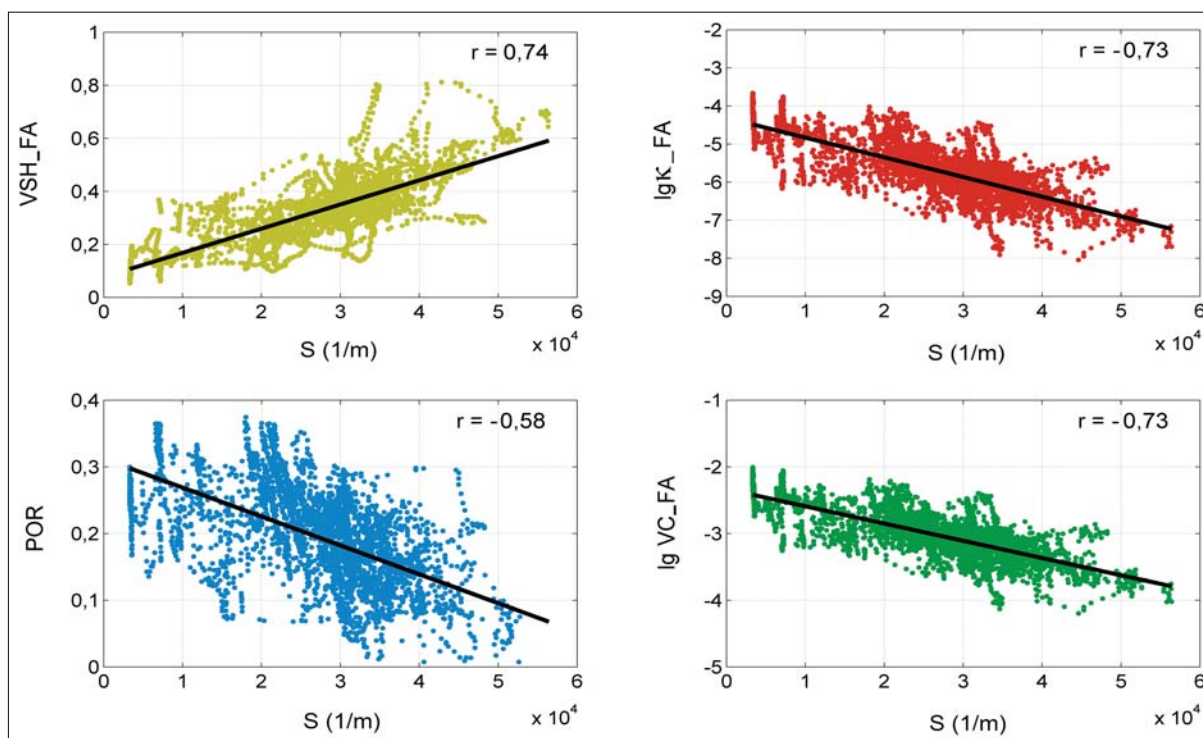
A Csókás-módszer és a faktoranalízis együttes alkalmazásával felfedhetjük a vizsgált közetfizikai paraméterek és a szivárgási tényező kapcsolatát. A faktoranalízissel becsült agyagtartalom és a $\kappa = K/K_0$ (ahol $K_0 = 1$ cm/s) dimenziótlán szivárgási tényező tízes alapú logaritmusai között gyenge, nemlineáris kapcsolat van, melynek regressziós függvénye:

$$\lg \kappa^{(FA)} = -6,17 (V^{(FA)})^{-2,15} + 0,49, \quad (32)$$

ahol a regressziós együtthatók 95%-os konfidenciaszint mellett: $c_{1,min} = -6,26$, $c_{1,max} = -6,07$, $c_{2,min} = -2,27$, $c_{2,max} = -2,03$, $c_{3,min} = 0,47$, $c_{3,max} = 0,50$. A rangkorrelációs együttható értéke ($\rho = -0,97$) a két változó erős kapcsolatát mutatja. A (6) formulával becsült agyagtartalom és a faktoranalízisen alapuló szivárgási tényező közötti korreláció szintén erős (6. ábra). A (32) egyenlet együtthatói kismértékben módosulnak: $c_1 = -6,339$ ($-6,556$, $-6,122$), $c_2 = -1,696$ ($-1,947$, $-1,446$), $c_3 = 0,398$ ($0,3719$, $0,424$). Az ábrán lát-



6. ábra Az agyagtartalom és szivárgási tényező regressziós kapcsolata a Baktalórántháza-1 fúrásban
Figure 6 Regression relation between shale volume and hydraulic conductivity in borehole Baktalórántháza-1



7. ábra A fajlagos felület és a közetfizikai paraméterek kapcsolata a Baktalórántháza-1 fúrásban
Figure 7 Regression relation between specific volume and petrophysical parameters in borehole Baktalórántháza-1

ható, hogy a Csókás-eljárással meghatározott szivárgási tényező logaritmusa és a Larionov-módszerrel számított agyagtartalom kapcsolata lineáris:

$$\lg \kappa^{(CS)} = -5,48 V^{(LAR)} - 4,39, \quad (33)$$

ahol az együtthatók becslési hibája: $a_{\min} = -5,627$, $a_{\max} = -5,34$, $b_{\min} = -4,44$, $b_{\max} = -4,34$. A korrelációs együttható értéke erős kapcsolatot mutat. A 6. ábra a szivárgási tényező és a magmérésből meghatározott agyagtartalom kapcsolatát is bemutatja. A 7. ábrán a (16) összefüggés alapján számított fajlagos felület hasonlítható össze a porozitással, az agyagtartalommal, a szivárgási tényezővel és a kritikus áramlási sebességgel. A szivárgás sebességének logaritmusa dimenziótlannak minősül, ahol $VC = v_c/v_0$ (ahol $v_0 = 1$ cm/s). A vizsgált tárolóparaméterek és a fajlagos felület között lineáris kapcsolat és (az agyagtartalom kivételével) fordított arányosság áll fenn. A korreláció mértéke a porozitás esetén közepes, a többi paraméter vonatkozásában erős.

Összefoglalás

A tanulmány bemutatja, hogy a Csókás-eljárás kielégítő becslést ad víztároló törmelékeny kőzetek szivárgási tényezőjére és a kapcsolódó közetfizikai jellemzőire. Az eredményeket megerősítik a klasszikus Kozeny–Carman-eljárással és a feltáró faktoranalízissel kapott becslések is. A szintetikus modellkísérletek eredményei ellentmondásmentesek még nagymértékű adattérbeli zaj alkalmazása esetén is. A terepi vizsgálatok során magadatokat is bevonunk az összehasonlíthatóság igazolására. A terepi tapasztalatok

szerint, a Csókás-eljárás optimális megoldást a 10-nél kisebb formációtényezőjű közepes vagy durvaszemcsés (jól osztályozott) üledékekre ad. Erősen cementált víztároló rétegek esetén a számítási eredmények jelentősen eltérhetnek a Kozeny–Carman-eljárástól kapottaktól. Finomszemcsés üledékeknél, például lösz esetén, egynél nagyobb nagyságrendű eltérést mutatnak a szivárgási tényezők, ami az Alger-formula felülvizsgálatát teszi szükségessé. A szemcseméret és a formáció tényező kapcsolatát ajánlatos a mérési területen meghatározni. Ehhez szemeloszlásadatok és megfelelően korrigált karotázsszelvények használata szükséges.

A Csókás-eljárás folytonos információval szolgál a szivárgási tényező fúróluk menti eloszlásáról, mely a mag- és a kúttesztadatok kiterjesztésében jól alkalmazható. A vízadók szivárgási jellemzői a fúrások közötti térrészre is interpolálhatók, ami javíthatja a felszíni geofizikai mérések hatékonyságát is. A faktoranalízis bevonásával a szomszédos fúrások adatainak egyetlen eljárásban történő kiértékelése is megvalósítható. A Csókás-módszer lehetőséget ad új, korszerű mérési eljárások felhasználására is. Például, az effektív porozitás nagyságának pontosabb meghatározására alkalmazzák laboratóriumban a nagy felbontású mikrotomográfiai és mágneses rezonanciás méréseket (Krakowska, Puskarczyk 2015). Ez utóbbi mérési technikát az USA-ban már vízkutató fúrásokban is alkalmazzák (Walsh et al. 2013). Az elektrokinetikus jelenség elmélete szerint porózus közegben a hatékony szemcseátmérő helyettesíthető az effektív pórussugárral, amely empirikus kapcsolatban áll a porozitással és a permeabilitással. Ezt a kapcsolatot laboratóriumban optikai képelemzéssel a pórusméret széles tartományán, valamint északi-tengeri magmintákon is igazolták

(Glover, Walker 2009). A Csókás-egyenlet levezetésében szereplő rétegvíz fajlagos ellenállását és a tekervényességi együtthatót azok becslési hibájukkal együtt a karotázsadatok intervalluminverziójával automatikusan meghatározhatjuk (Dobróka, Szabó 2011). Az effektív porozitás pontosabb meghatározásához szükséges agyagtartalom a szelvényadatok faktoranalízisével számítható (Szabó et al. 2014). A faktoranalízis a szivárgásitényező-szelvény független előállítására is felhasználható, ami tovább növelheti a kiértékelés megbízhatóságát (Szabó 2015). A fenti kutatási eredmények a Csókás-eljárás továbbfejlesztésére ösztönözhetik a hidrogeofizikus szakembereket, ami hasznos eszköze lehet a felszín alatti vízkészletek hatékonyabb felkutatásának és kitermelésének.

Köszönetnyilvánítás

Az első szerző (Sz.N.P.) a PD109408 sz. Ifjúsági OTKA projekt témavezetőjeként köszönetet mond az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatásáért. A második szerző (D.M.) mint a K-109441 sz. OTKA témavezetője köszönetet mond az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatásáért. Köszönetünket fejezzük ki Kormos Katalin és Kiss Anett doktoranduszoknak és Halmágyi Anett mesterszakos hallgatónak a tanulmány előkészítésében nyújtott segítségükért, Bucsai Szabó Lászlónak és Latrán Bélának a Bakta-lórántháza-1 fúrás mérési adataiért és együttműködésükért.

A tanulmány szerzői

Szabó Norbert Péter, Dobróka Mihály, Hursán László

Hivatkozások

- Alberty M., Hashmy K. 1984: Application of ULTRA to log analysis. SPWLA Symposium Transactions, Paper Z, 1–17
- Alger R. P. 1971: Interpretation of electric logs in fresh water wells in unconsolidated formation. SPE Reprint Series 1, 1–25
- Alger R., Harrison C. W. 1987: Improved fresh water assessment in sand aquifers utilizing geophysical well logs, Proceedings of 2nd International Symposium on Borehole Geophysics for Minerals, Geotechnical, and Groundwater applications, Colorado, USA
- Allen D., Andreani M., Badry R., Flaum C., Gossenberger P., Horowitz J., Singer J., White J. 1997: How to use borehole Nuclear Magnetic Resonance. Oilfield Review 9, 34–57
- Archie G. E. 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. SPE, Transactions of the AIME 146, 54–62
- Bear J. 1972: Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications Inc., New York
- Carman P. C. 1937: Fluid flow through granular beds. Transactions, Institution of Chemical Engineers 15, 150–166
- Csókás J. 1995: Vízáadó rétegek jellemző hozamának és a víz minőségének meghatározása geofizikai fúróluk szelvények alapján. Magyar Geofizika 35, 176–203
- Dobróka M., Szabó N. P. 2011: Interval inversion of well-logging data for objective determination of textural parameters. Acta Geophysica 59, 907–934
- Drahoš D. 2005: Inversion of engineering geophysical penetration sounding logs measured along a profile. Acta Geodetica et Geophysica 40, 193–202
- Gálfi J., Liebe P. 1981: Az elektromos fajlagos ellenállás és a szivárgási tényező kapcsolata törmelékes vízáadó kőzetekben. Vízügyi Közlemények 63, 437–448
- Glover P. W. J., Walker E. 2009: Grain-size to effective pore-size transformation derived from electrokinetic theory. Geophysics 74, E17–E29
- Hazen A. 1892: Some physical properties of sands and gravels. Massachusetts State Board of Health, Annual Report, 539–556
- Juhász J. 2002: Hidrogeológia. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Kassai F., Jambrik R. 1986: Vízbányászat II. Tankönyvkiadó, Budapest
- Kirsch R. (szerk.) 2009: Groundwater Geophysics. A Tool for Hydrogeology. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg
- Krakowska P. I., Puskarczyk E. 2015: Tight reservoir properties derived by nuclear magnetic resonance, mercury porosimetry and computed microtomography laboratory techniques. Case study of paleozoic elastic rocks. Acta Geophysica 63, 789–814
- Kovács Gy., 1972: A szivárgás hidraulikája. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Kozeny J. 1927: Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzungsber Akad. Wiss. 136, 271–306
- Larionov V. V. 1969: Fúrólukak radiometriája (oroszul). Nedra, Moszkva
- Lawley D. N., Maxwell A. E. 1962: Factor analysis as a statistical method. The Statistician 12, 209–229
- Menke W. 1984: Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic Press Inc., New York
- Ogbe D., Bassiouni Z. 1978: Estimation of aquifer permeabilities from electric well logs. The Log Analyst 19, 21–27
- Pirson S. J. 1963: Handbook of well log analysis. Prentice-Hall Inc., New York
- Rubin Y., Hubbard S. S. 2005: Hydrogeophysics. Water Science and Technology Library Series 50, Springer-Verlag, Dordrecht, Berlin, Heidelberg, New York
- Schmieder A. 1975: Vízvesztés és vízgazdálkodás a bányászatban. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- Serra O. 1984: Fundamentals of well-log interpretation. Elsevier, Amsterdam
- Spearman C. 1904: The proof and measurement of association between two things. The American Journal of Psychology 15, 72–101
- Szabó N. P., Dobróka M., Turai E., Szűcs P. 2014: Factor analysis of borehole logs for evaluating formation shaliness: a hydrogeophysical application for groundwater studies. Hydrogeology Journal 22, 511–526
- Szabó N. P. 2015: Faktoranalízisen alapuló új statisztikus eljárás a szivárgási tényező meghatározására. Magyar Geofizika 56/2, xxx–yyy
- Walsh D., Turner P., Grunewald E., Zhang H., Butler J. J., Reboullet E., Knobbe S., Christy T., Lane J. W., Johnson C. D., Munday T., Fitzpatrick A. 2013: A small-diameter NMR logging tool for groundwater investigations. Groundwater 51, 914–926
- Zilahi-Sebess L., Fancsik T., Török I., Kovács A. Cs. 2007: Szivárgási tényező becslés lehetőségei geofizikai mérések alapján. Magyar Geofizika 48, 99–111