

Édesvíztárolók szivárgási paramétereinek meghatározása a Csókás eljárás alkalmazásával

SZABÓ NORBERT PÉTER^{1,2}®, DOBRÓKA MIHÁLY^{1,2}, HURSÁN LÁSZLÓ¹

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

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

®E-mail: norbert.szabo.phd@gmail.com

Abstract

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 karotázs kiértékelési eljárást. A módszer laza törmelékes üledékes kőzetekben alkalmazható, mely a nukleáris és fajlagos ellenállás 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 szivárgási tényező 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 kőzetfizikai paraméter és a szivárgási tényező in-situ regressziós kapcsolatát. Csókás professzor alapvető törekvése az volt, hogy a víztárolók vizsgálatához szükséges kőzetfizikai és szivárgási paramétereket a fúrólukszelvényekből származtassa. Ezt az alap gondolatot követve a módszer továbbfejlesztése ma is aktuális lehet. Ugyanis az eljárás bemenő paramétereit a korszerű mérések alapján pontosabban meghatározhatjuk, mellyel tovább javíthatjuk a kiértékelés hatékonyságát a tárolókőzetek kutatása és az édesvízkészletek kitermelése során.

Norbert P. Szabó, Mihály Dobróka, László Hursán: 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.

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 fúrólukgeofizikai mérésekkel tudjuk nyomon követni. Ezek előnye a számos fizikai jellemző in-situ megfigyelése és a nagy adatsűrűség, ahol az értelmezést kevésbé terheli a többértelmezés 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 kiterjeszhetőségének kérdését Zilahi-Sebess és szerzőtársai (2007) vizsgálták.

A fúróluk szelvényezési módszereket széles körben használják az ásvány- és fluidum-kutatásban (Serra 1984). Hidrogeofizikai problémák megoldásakor a szelvényértelmezők legfőbb feladata a víztároló rétegek vastagságának, porozitásának, víztelítettségének (néhol a gáztelítettségnek), agyagosságának, kőzetmátrix térfogatának és a szivárgási tényezőjének meghatározása. Szinte valamennyi szénhidrogén-kutatásban használatos szelvényezési

módszer felhasználható a vízkutatásban (Alger és Harrison 1987). A természetes gamma-intenzitás, természetes potenciál és fajlagos ellenállás 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 fajlagos ellenállás szonda használható a fúróluk körüli elárasztási profil és a víztelítettség meghatározására. A szelvényezési programok általában technikai méréseket is tartalmaznak, melyek hasznos információt adnak a fúróluk 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 mágneses rezonancia (NMR) módszer speciális szondáját (Walsh és szerzőtársai 2013). Az olajipari szondákkal mért NMR adatokból a pórusfolyadék viszkozitása is leszámaztatható (Allen és szerzőtársai 1997). A fenti módszerek segítségével néhány kőzefizikai 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 fúróluk szelvényekkel elsősorban a hidraulikus vezetőképesség megváltozását határozhatjuk meg.

Konzolidálatlan törmelékes 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 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 karotázs kiértékelési eljárást, mely kizárólag a fúróluk szelvényekből 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 formáció tényezővel, mely utóbbi a karotázs mérésekkel közvetlenül meghatározható. A Csókás formula a víztárolók valódi fajlagos ellenállását és porozitását tartalmazza, melyből a szivárgási tényező a fúróluk teljes hosszára becsülhető. E mellett 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 zajérzékenységét vizsgáljuk. A Jászberényi Vízmű egy fúrásában mért adatrendszerrel újra feldolgozva 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, a baktalórántházi területen megadjuk a kőzetfizikai paraméterek és a szivárgási tényező regressziós kapcsolatát és a korrelációs együtthatókat. Az eredmények erős korrelációt mutatnak a szivárgási tényező és a kőzetfizikai 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 kőzet 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 kőzetmátrix 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 (1927) egyenlet (2)-nél megbízhatóbb becslést ad, amit később Carman (1937) módosított. A Kozeny-Carman egyenlet szerint a szemcseközi porozitású kőzet egy kapilláris csatornákból álló rendszernek tekinthető, amelyben a Navier-Stokes egyenlet érvényesül. A Kozeny-Carman egyenletet, mint standard modellt, széles körben használják a vízáadó 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 kőzet 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 kőzetmintákat 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 karotázis szelvényekből származtatjuk. Az édesvízzel teljesen telített ($S_w=1$) agyagos homok rétegek 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/cm³) a szondával mért közetsűrűség, ρ_{sd} (g/cm³) és ρ_{sh} (g/cm³) a homok és agyag sűrűségét jelölik. Az (5) egyenletben szereplő agyagtartalom fiatal üledékes kőzetekben 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 folytonos szivárgási tényező görbét kapunk a teljes szelvényezett szakaszon. A fenti módszer a kőzetfizikai mennyiségeket a szelvények egyedi feldolgozásával (több, egymástól független lépésben) származtatja. Azonban léteznek ennél fejlettebb módszerek is, melyek a bemenő petrofizikai jellemzőket közös eljárásban határozzák meg. Ha az ismeretlenek száma egyenlő a megfigyelt szelvények számával, a szonda válaszfüggvények 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 kőzetfizikai paraméterek kinyerésére. Inverz modellezés alkalmazása esetén a modellparamétereket (porozitás, víztelítettség, agyagtartalom, mátrix részarány) közös optimalizációs eljárásban becsüljük (Drahos 2005). Az inverz modellezésnek további előnye, hogy a kőzetfizikai 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 törmelékes kőzetek mértékadó szemcseátmérője és formáció tényezője közötti összefüggésen alapul. Ezt a kapcsolatot Alger (1971) írta le, aki összekapcsolta az effektív szemcseátmérőt az Archie-féle formáció faktorról, ezzel hidat képezve a vízáadó rétegek szivárgási tényezője és a karotázs mérések között.

A vízzel telített kőzetek formáció tényezője (F) a kőzet R_0 (ohmm) és a pórusvíz R_w (ohmm) fajlagos ellenállásának arányával adható meg

$$F = \frac{R_0}{R_w} . \quad (7)$$

Alger (1971) egyenes arányosságot talált a formáció tényező és az édesvízzel telített üledékek laboratóriumban meghatározott szemcseátmérője között, ami ellentétes azzal a megfigyeléssel, amit a szénhidrogén-mezők esetén tapasztalunk (sósvízzel telített tárolók). E megfigyelések alapján, a szitaelemzéssel meghatározott Hazen-féle effektív szemcseátmérő az alábbi összefüggésben áll konszolidálatlan üledékek formáció tényezőjével

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

ahol C_d állandó javasolt értéke $5.22 \cdot 10^{-4}$ (m). A (8) egyenlet $F \leq 10$ formáció tényezőjű nem túl rosszul osztályozott üledékek esetén érvényes. E követelmény a felszín közeli törmelékes víztároló rétegeknél általában teljesül. Alger (1971) vizsgálatai alapján különböző típusú fúróluk szelvényezési módszerek olajiparból való átvételét javasolta, melyek megfelelően adaptálhatók az édesvízi agyagos homokok kiértékelésében. A (8) regressziós kapcsolatot az *I. ábra* szemlélteti, ahol a Pearson-féle korrelációs együttható $r = \text{cov}(d_{10}, F) / (\sigma_{d_{10}} \sigma_F)$ szoros kapcsolatot mutat a fenti változók között. A domináns szemcseátmérőt más forrásból is megadhatjuk. Az $U = d_{60}/d_{10}$ egyenlőtlenégi együttható, mint alakparaméter, a szemeloszlás görbe formáját jellemzi és számszerűsíti a szemcsék osztályozottságának mértékét. Kovács (1972) homokok egyenlőtlenégi együtthatóját kapcsolatba hozta a hatékony szemcseátmérővel: $d/d_{10} = 1.919 \cdot \lg U + 1$. 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

$$d = 1.671 \cdot d_{10} \quad (9)$$

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

$$d = 1.671 \cdot C_d \lg \frac{R_0}{R_w} , \quad (10)$$

melyben R_0 a hosszú szondával mért fajlagos ellenállás értékekből, míg R_w a természetes potenciál szelvényből vagy vízkémiai elemzésből származtatható (Csókás 1995).

A szivárgási tényező meghatározásához a felszínalatti képződmények agyagtartalmának és effektív porozitásának előzetes ismerete szükséges. E két mennyiséget az (5)–(6) formulák alapján számíthatjuk. Archie (1942) számos kőzetminta laboratóriumi méréséből az alábbi összefüggést találta

$$F = \frac{a}{\Phi^m}, \quad (11)$$

ahol m a cementációs kitevő (kevésbé kompaktált üledékeknél $m \approx 1.5-1.7$), míg a jelöli a tekervényességi együtthatót ($a \approx 1$). E két mennyiség a kőzet texturális tulajdonságait írja le. Mivel értékük egy-egy nagyobb intervallumon konstansnak tekinthető, így a zónaparaméterek körébe soroljuk őket. Alger (1971) kimutatta, hogy elsődleges porozitású édesvízzel telített üledékekben a formáció tényező nemcsak a porozitástól függ, hanem a pórúsvíz fajlagos ellenállásától és a szemcsemérettől is. Ogbé és Bassiouni (1978) a tekervényességi együtthatót a porozitással és a formáció faktorról kapcsolta össze

$$a^2 = \left(\frac{R_0 \cdot \Phi}{R_w} \right)^{1.2}. \quad (12)$$

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

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

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

$$\left(\frac{d}{\alpha} \right)^2 = \left(\frac{1}{a \cdot S} \right)^2. \quad (15)$$

Gálfi and 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

$$S = 6 \frac{(1-\Phi)}{d}. \quad (16)$$

A (10) és (16) egyenletekből adódódik

$$S^2 = \frac{36(1-\Phi)^2}{\left(1.671 \cdot C_d \cdot \lg \frac{R_0}{R_w}\right)^2}. \quad (17)$$

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

$$K = C_k \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^4} \frac{\left(\lg \frac{R_0}{R_w}\right)^2}{\left(\frac{R_0}{R_w} \Phi\right)^{1.2}}, \quad (18)$$

ahol $C_k=855.7 \cdot C_t C_d^2$ az arányossági állandó. Csókás (1995) szerint a jó vízádók 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 karotázs szelvényekből meghatározható, így a fúróluk mentén folytonos (in-situ) becslés adható a szivárgási tényezőre.

A Csókás módszer lehetőséget ad a víztárolókhöz 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 elmozdulnak a lyukfal irányába a szivárgási tényezőből becsülhető (Schmieder 1975)

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

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 elhomokolódik. 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 sebesség értékeket 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. A szemeloszlás adatok felhasználásával a kritikus sebességre realisabb becslés adható, melyből az optimális vízhozam l/perc egységben kifejezhető

$$Q_{max} = 120 \pi r_0 h_0 \left(10^{0.446 \lg(d) + 0.1654} \right), \quad (20)$$

ahol v_c -t m/s és d -t mm egységben adjuk meg (Kassai és 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, úgymint réteg- és zónaparamétereket. Az előbbieket rétegenként változnak, míg az utóbbiak a vizsgált intervallumon (vízáró zóna) gyakorlatilag változatlanok. Ismertnek feltételezzük az alábbi rétegjellemzőket: porozitás (POR), agyagtartalom (VSH), homok térfogat (VSD), mértékadó szemcseátmérő (DIO) és hatékony szemcseátmérő (D). A konszolidálatlan formáció második és negyedik 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 mélybehatolású szondával mért fajlagos ellenállás (RS és RD). A bemenő adatokat és a közetösszetételt a 2. ábra mutatja.

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

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

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

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

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

$$RS = \left[\left(\frac{VSH^{(1-0.5 VSH)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{m/2}}{(a \cdot RMF)^{1/2}} \right) \right]^{-2}, \quad (25)$$

$$RD = \left[\left(\frac{VSH^{(1-0.5VSH)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{m/2}}{(a \cdot RW)^{1/2}} \right) \right]^{-2}, \quad (26)$$

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

A (21)–(26) egyenletek zónaparamétereinek értékeit az 1. táblázat tartalmazza. A (27) anyagmérleg-egyenlet az egységnyi közettérfogatra ír elő korlátozást. A szelvényadatok elméleti értékét a modellparaméterek (21)–(26) egyenletbe történő helyettesítésével kapjuk. Az így generált szintetikus (zajmentes) szelvényekhez véletlen zajt adva kvázi-mért karotázs szelvényeket állítunk elő. Tekintsük először az 5%-os Gauss-zajjal terhelt szelvények feldolgozását. A szivárgási tényezőt először a Kozeny-Carman ((3)) 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 szelvények a zaj mértékének megfelelően szoros egyezést mutatnak.

A fúrólukszelvények 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

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

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

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

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-operátort. A (30) formula a változók lineáris kapcsolata esetén nyújt optimális becslést. Nemlineáris függvénykapcsolat esetén a rangkorrelációs

együtthható (ρ) ad reális értéket a változók korrelációjának mértékére (Spearman 1904). A szivárgási tényező becslési pontossága függ a karotázs szelvények 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 Kozeny-Carman módszerrel becsült szivárgási tényező szelvények (29) egyenlettel meghatározott modelltávolsága arányosan nő az adattávolsággal, míg azok (30) korrelációs együtthatója csekély mértékben csökken a zajszint növelésével. A Kozeny-Carman és a Csókás modell alapján becsült szivárgási tényezők korrelációja nem normális eloszlású adatok és szélsőséges hibaértékek mellett is erős. Megállapítható, hogy a Csókás eljárással kapott eredmények ellentmondásmentesek és a becsült szivárgási tényező értékek pontossága a várható mértékben függ a bemenő adatok hibájától.

A Csókás eljárás vizsgálata terepi adatokon

Esettanulmány I.

Csókás (1995) az általa javasolt kiértékelési eljárást a jászberényi vízmű K-564 kútjában mért adatokon tesztelte. Jelen 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), természetes potenciál (SP), rövid normál és laterál szondával mért látszólagos fajlagos ellenállás szelvényt (RA) analóg berendezéssel (1:200 léptékben) rögzítették. A mért jeleket eredetileg a szerző elektrofációs elemzés alkalmazásával négyszögesítette. Az alkalmazott szonda válaszegyenletek zóna paramétereit a 3. táblázat tartalmazza.

Az SP szelvényből a rétegvíz fajlagos ellenállása ($RW=1.75 \cdot RWE$) becsülhető, ahol a rétegvíz ekvivalens fajlagos 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 formáció tényező (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 kőzetösszetételt tartalmazza (8. oszlop). A Csókás eljárással számított szivárgási tényező szelvényt (K_{CS}) a 7. oszlop mutatja. A kiértékelési eredményeket megerősítik a (2)–(3) egyenletekkel számított szivárgási tényező 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 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).

Esettanulmány 2

További vizsgálatokat a Baktalórántháza-1 sz. fúrás adatainak alapján mutatunk be. A geofizikai mérések elsődleges célja a szénhidrogén-kutatáshoz kapcsolódó földtani szerkezet vizsgálata volt. A rétegek szénhidrogént nem tartalmaznak, viszont jelentős termásvíz készlettel rendelkeznek. Jelen tanulmányban a 124–470 m szakaszt vizsgáljuk, ahol pleisztocén, majd alsó-pannon üledékek váltakoznak, úgymint kavics, agyagos homok, agyagos kőzetliszt, 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 fajlagos ellenállás (RS), gamma-gamma (GG) és neutron-neutron (NN) szelvényeket az 4. ábra mutatja. Emellett 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 formáció tényezőt (F). A neutron-neutron mérésből a (23) egyenlettel a teljes porozitás számítható, ahol a neutron-szonda válaszegyenlet konstansokat a NN – GG keresztábrából becsüljük (4. táblázat). A GR szelvényt felhasználó (6) egyenlet alapján az agyagtartalmat meghatározhatjuk (VSH_LAR), ahol a szelvény-konstansokat szintén a táblázat tartalmazza. A homok térfogata (VSD) az effektív porozitás és az agyagtartalom ismeretében (27) egyenletből kifejezhető. A formáció tényező általában az SP és RO szelvényekből adódik. Mivel hiányzik a mélybehatolású szondával mért fajlagos ellenállás 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 (29) egyenlettel számítható modelltávolság $D_m=3.4$ %, 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 vízázó szakaszok, az előbbieket relatíve kis S értékekkel, míg az utóbbiak nagy S kitéréssel jelentkeznek.

A Csókás eljárással kapott eredményeket a fúrólyukszelvények 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 hányadért, 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 és 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 fűrőlyukszelvények faktoranalízisével meghatározzuk a rétegek agyagtartalmát. Szabó és szerzőtársai (2014) tapasztalati kapcsolatot találtak az észak-kelet magyarországi régió fiatal üledékei százalékos agyagtartalma és az első faktor között

$$V_{sh} = 27.4e^{0.015 \cdot F'_1} - 26.5, \quad (31)$$

ahol F'_1 jelöli a 0–100 tartományba 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 szivárgási tényező szelvényt (K_FA) számíthatunk, melyet az ábra 6. oszlopa mutat. A faktoranalízissel és a Csókás eljárással becsült szivárgási tényező 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) dimenziótlan szivárgási tényező tizesalapú logaritmusa között gyenge nemlineáris kapcsolat van, melynek regressziós függvénye

$$\lg \kappa^{(FA)} = -6.17(V_{sh}^{(FA)})^{-2.15} + 0.49, \quad (32)$$

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

$$\lg \kappa^{(CS)} = -5.48V_{sh}^{(LAR)} - 4.39, \quad (33)$$

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 logaritmus a dimenziótlan mennyiség, ahol $VC=v_c/v_0$ (ahol $v_0=1$ cm/s). A vizsgált tároló-paraméterek és a fajlagos felület között lineáris kapcsolat és 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 törmelékes 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 formáció tényezőjű közepes vagy durva szemcsés (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, amely az Alger formula felülvizsgálatát teszi szükségessé. A szemcseméret és a formáció tényező kapcsolatát ajánlatos a mérési területen meghatározni. Ehhez szemeloszlás adatok és megfelelően korrigált karotázs szelvények használata szükséges.

A Csókás eljárás folytonos információt szolgáltat a szivárgási tényező fűrőlyuk menti eloszlásáról, mely a mag- és a kütteszt adatok kiterjesztésében jól alkalmazható. A vízadók szivárgási jellemzői a fűrások közötti térrészre is interpolálhatók, mely javíthatja a felszíni geofizikai mérések hatékonyságát is. A faktoranalízis bevonásával a szomszédos fűrások adatainak egyetlen eljárásban való 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 mikro-tomográfiai és mágneses rezonanciás méréseket (Krakowska és Puskarczyk 2015). Ez utóbbi mérési technikát az USA-ban már vízkutató fűrásokban is alkalmazzák (Walsh és szerzőtársai 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 and Walker 2009). A Csókás egyenlet levezetésében szereplő rétegvíz fajlagos ellenállását és a tekervényességi együtthatót azok becslési hibájukkal együtt a karotázs adatok intervallum inverziójával automatikusan meghatározhatjuk (Dobróka és Szabó 2011). Az effektív porozitás pontosabb meghatározásához szükséges agyagtartalom a szelvényadatok faktoranalízisével

számítható (Szabó és társai 2014). A faktoranalízis a szivárgási tényező szelvény független előállítására is felhasználható, mely tovább növelheti a kiértékelés megbízhatóságát (Szabó 2015). A fenti kutatási eredmények a Csókás eljárás továbbfejlesztésére ösztönözhetik a hidrogeofizikus szakembereket, mely hasznos eszköze lehet a felszín alatti vízkészletek hatékonyabb felkutatásának és kitermelésének.

Köszönetnyilvánítás

Az első szerző, mint a PD109408 sz. Ifjúsági OTKA projekt témavezetője köszönetet mond az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatásáért. A második szerző, 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, Bucsi Szabó Lászlónak és Latrán Bélának a Baktalórántháza-1 fúrás mérési adataiért és együttműködésükért.

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., Gossenberg P., Horkowitz 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: Vízadó rétegek jellemző hozamának és a víz minőségének meghatározása geofizikai fúrólýuk 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

- Drahos 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 vízadó 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
- 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 clastic rocks. *Acta Geophysica* 63, 789–814
- Juhász J., 2002: *Hidrogeológia.* Akadémiai Kiadó, Budapest
- 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
- Serra O., 1984: *Fundamentals of well-log interpretation.* Elsevier, Amsterdam
- Schmieder A., 1975: *Vízveszély és vízgazdálkodás a bányászatban.* Műszaki Könyvkiadó, Budapest

- 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, a megjelenő szám ?*
- Walsh D., Turner P., Grunewald E., Zhang H., Butler J. J., Reboulet 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

Táblázatok

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	GRSH	160	API
	Homok	GRSD	25	API
Természetes potenciál	Agyag	SPSH	0	mV
	Homok	SPSD	15.53	mV
	Hőmérsékleti koeff.	C	70	–
Termikus- n^0 intenzitás	Agyag	NNSH	4.8	kcpm
	Homok	NNSD	7.2	kcpm
	Iszapfiltrátum	NNMF	3.1	kcpm
Sűrűség	Iszapfiltrátum	DEMF	1.0	g/cm ³
	Agyag	DESH	2.55	g/cm ³
	Homok	DESD	2.65	g/cm ³
	Iszapfiltrátum	RMF	9	ohmm
Fajlagos ellenállás	Rétegvíz	RW	15	ohmm
	Agyag	RSH	2	ohmm
	Cementációs kitevő	m	1.5	–
	Szaturációs kitevő	n	1.9	–
	Tortuozitási koeff.	a	1.0	–
Szivárgási tényező	Dinamikai viszkozitás	μ	0.019	Pa·s
	Nehézségi gyorsulás	g	981	cm/s ²

2. táblázat: Zajérzékenységi tesztek eredményei

Table 2. Results of noise sensitivity tests

Zaj (eloszlás)	Adattávolság (%)	Modelltávolság (%)	Korrelációs eh.
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

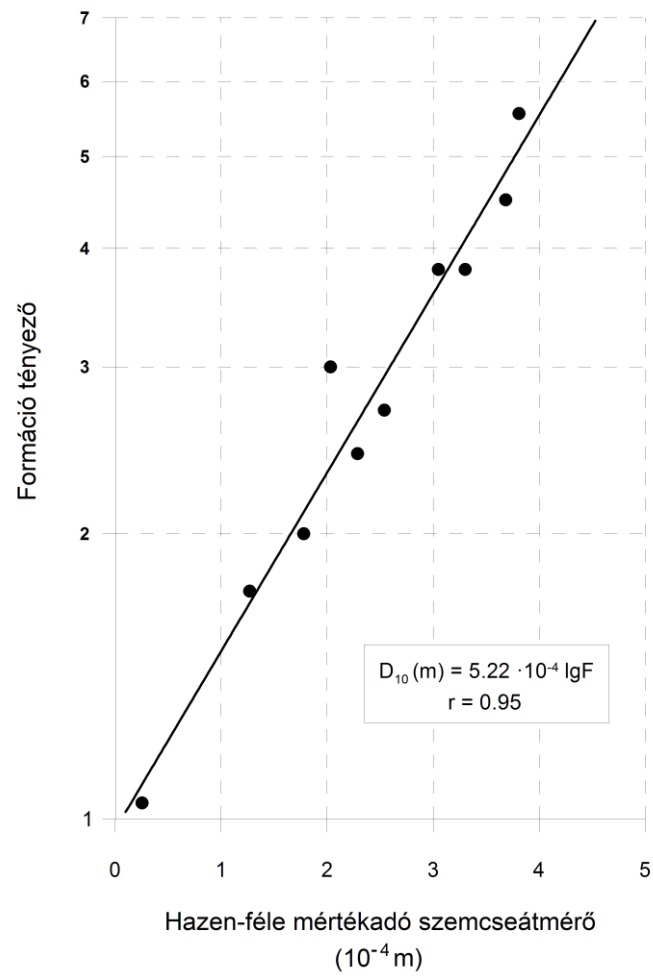
Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Állandó	Mértékegység
Természetes- γ kitérés	Agyag	GRSH	47	mm
	Homok	GRSD	0	mm
Természetes potenciál	Hőmérsékleti koeff.	C	1.5	-
Hőmérséklet	Formáció	TF	15	°C
Sűrűség	Iszap	DEM	1.1	g/cm ³
Fajlagos ellenállás	Iszap	RM	9.31	ohmm
	Iszapfiltrátum	RMF	10.31	ohmm
Szivárgási tényező	Dinamikai viszkozitás	μ	0.019	Pa·s
	Nehézségi gyorsulás	g	981	cm/s ²

4. táblázat: Zónaparaméterek választott értékei a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban

Table 4. Values of zone parameters chosen in borehole Baktalórántháza-1

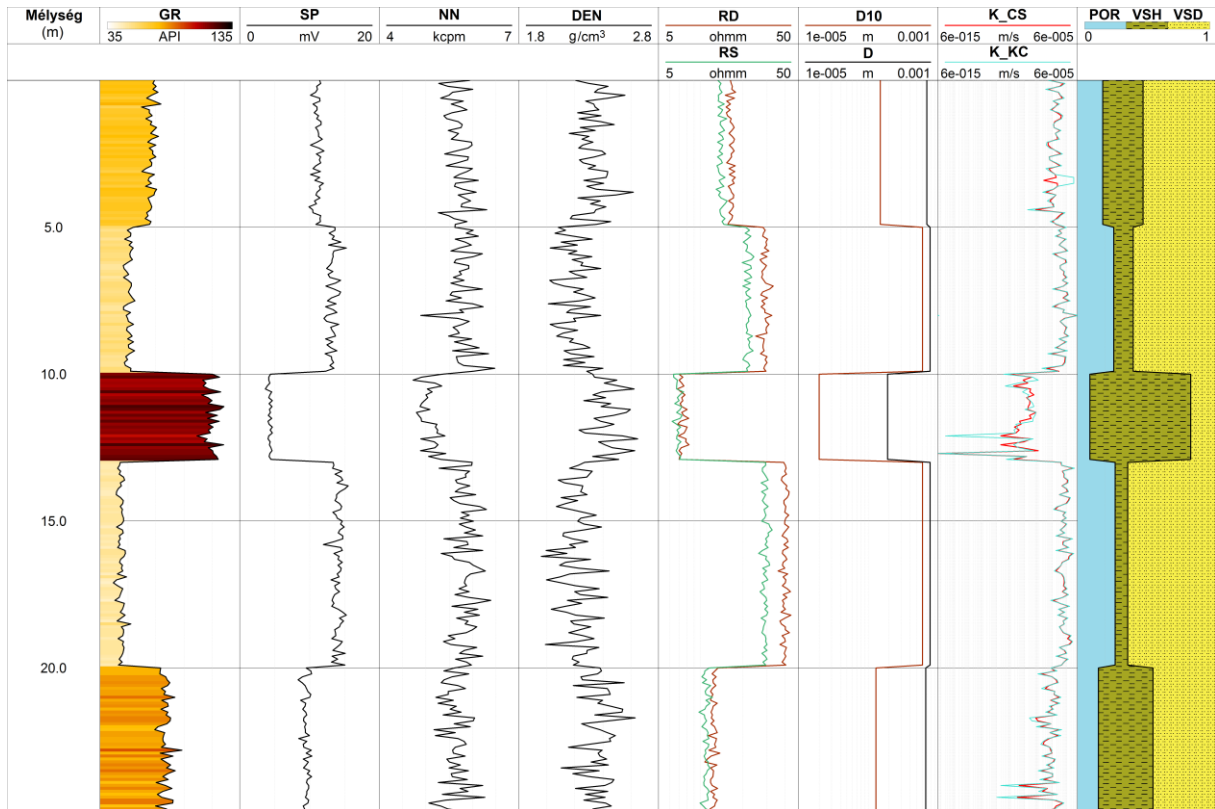
Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Állandó	Mértékegység
Természetes- γ intenzitás	Agyag	GRSH	685	cps
	Homok	GRSD	188	cps
Termikus- n^0 intenzitás	Agyag	NNSH	4	kcpm
	Homok	NNSD	7.5	kcpm
	Iszapfiltrátum	NNMF	1	kcpm
Fajlagos ellenállás	Cementációs tényező	m	2.15	-
	Tekervényességi eh.	a	0.62	-
Szivárgási tényező	Dinamikai viszkozitás	μ	0.019	Pa·s
	Nehézségi gyorsulás	g	981	cm/s ²

Ábrák



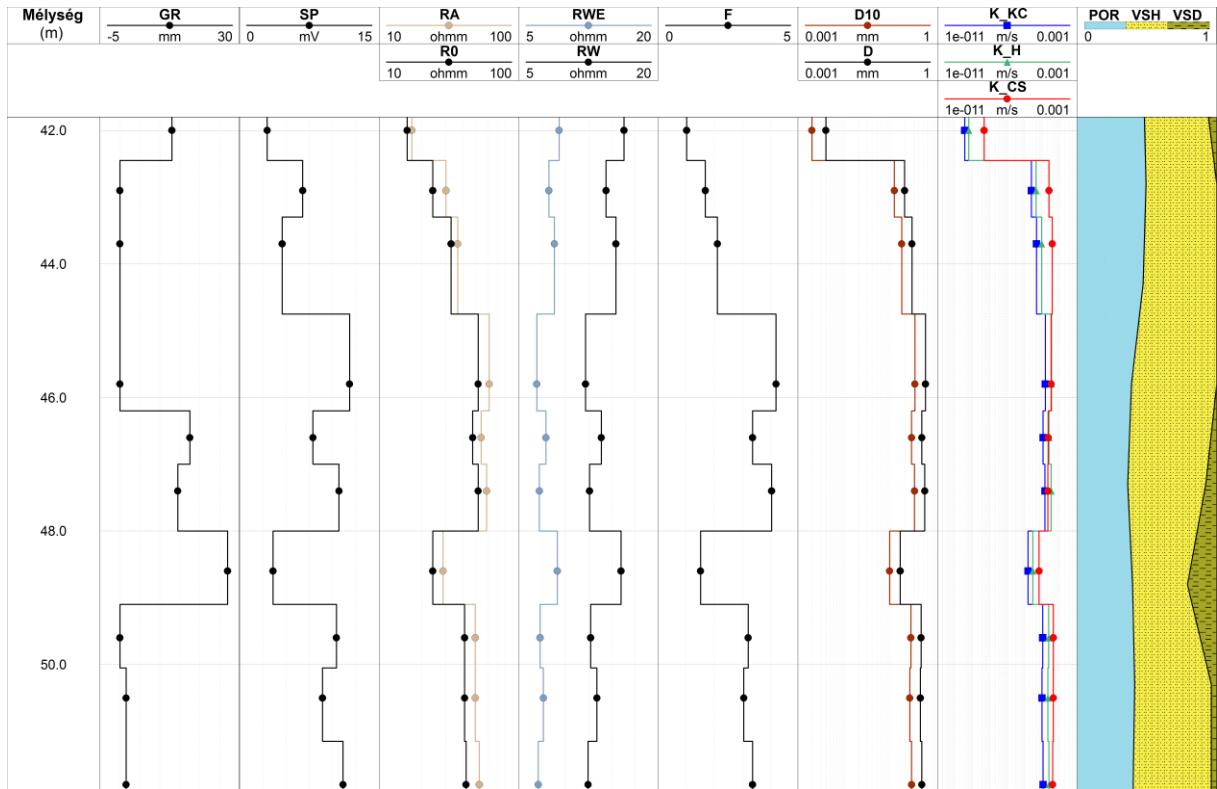
1. ábra: A mértékadó szemcseátmérő és a formáció tényező kapcsolata édesvítároló üledékekben

Figure 1. Alger's empirical relation between formation factor and Hazen's effective grain-size in freshwater-bearing sediments



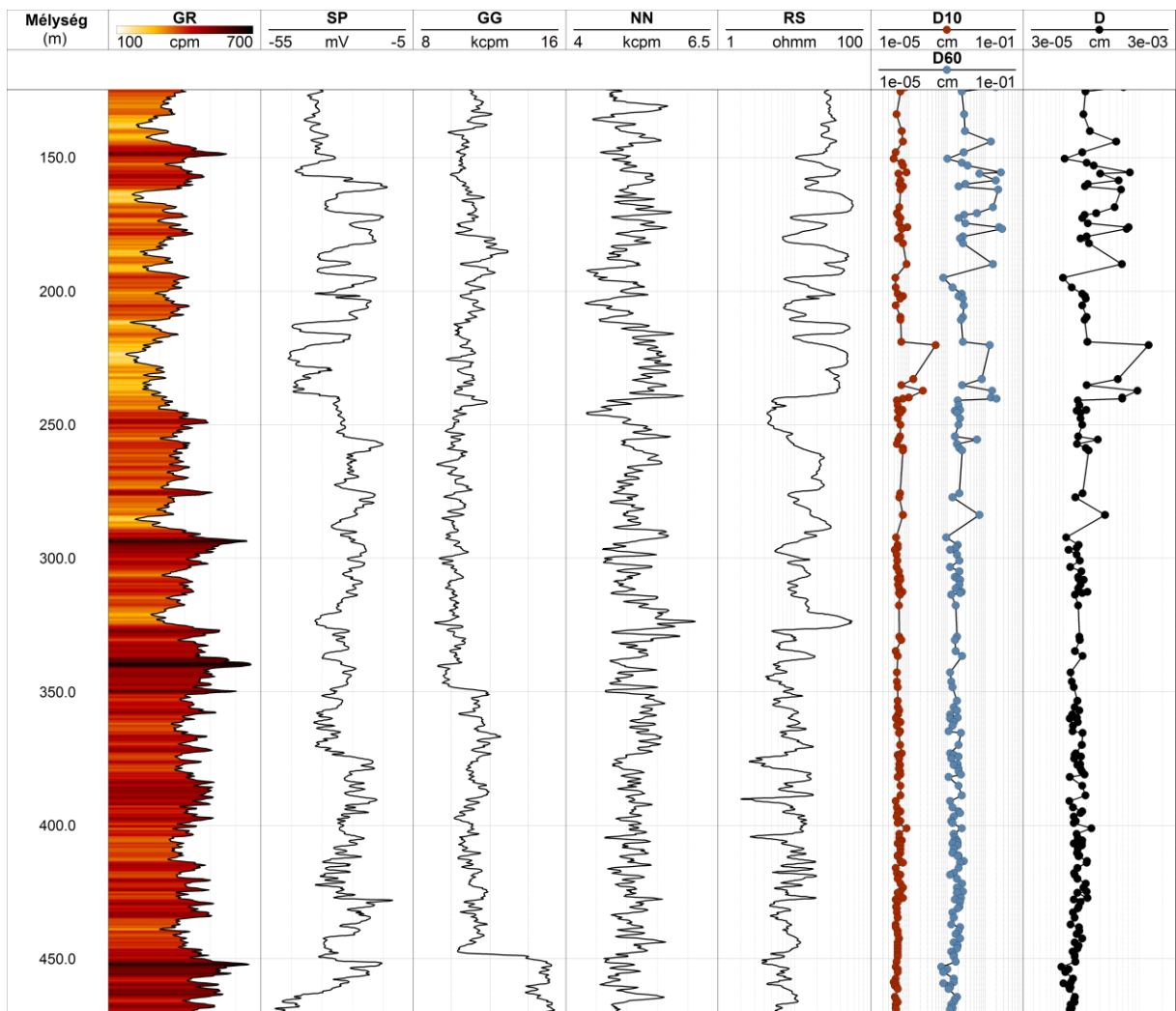
2. ábra: 5% Gauss zajjal terhelt szintetikus szelvények, a kőzetfizikai modell és a szivárgási tényező becslés eredménye

Figure 2. Synthetic well logs contaminated with 5 % Gaussian distributed noise, petrophysical model and results of hydraulic conductivity estimation



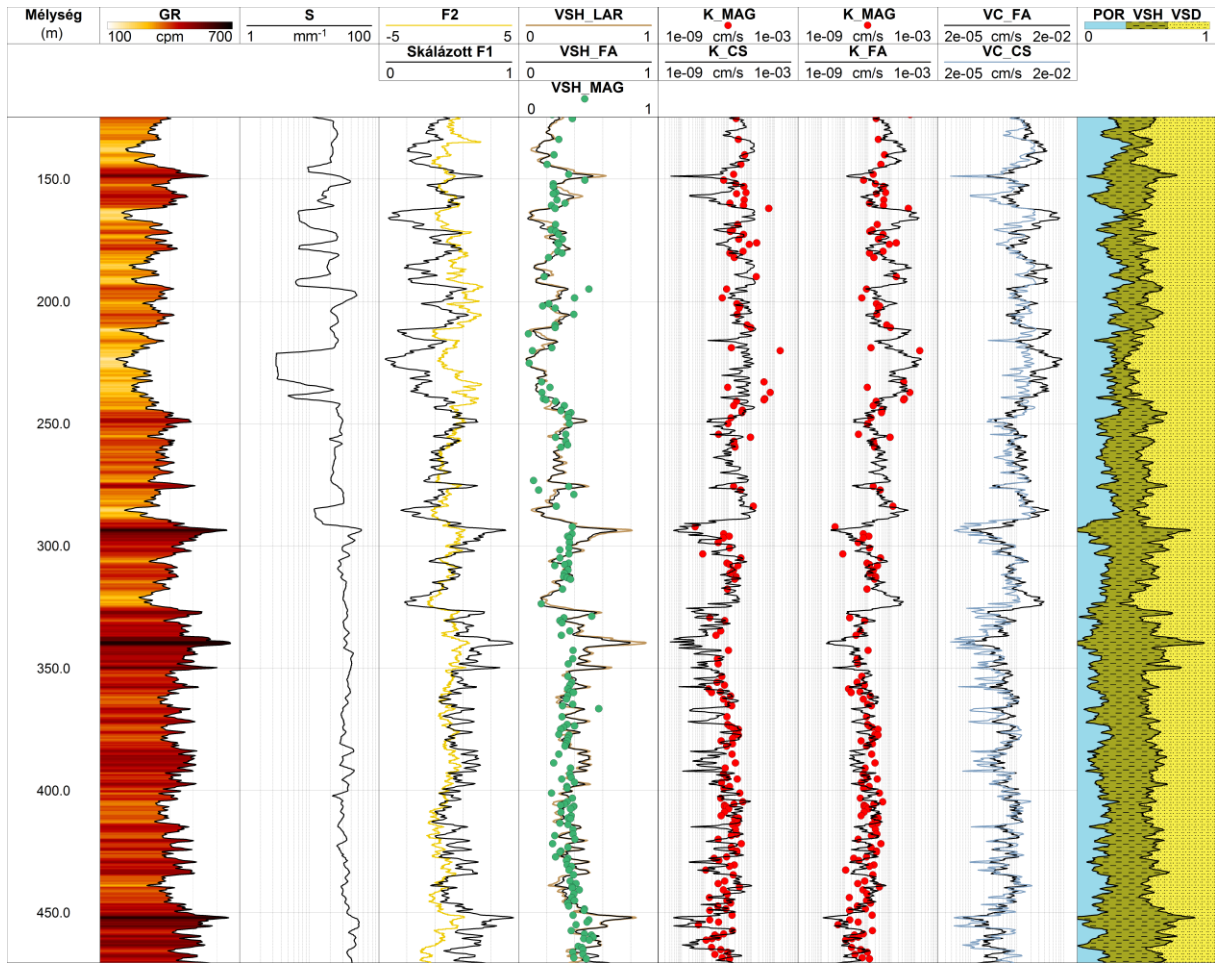
3. ábra: Mért szelvények és a szivargási tényező becslés eredményei K-564 sz. fúrásban

Figure 3. Observed borehole logs and result of hydraulic conductivity estimation in borehole K-564



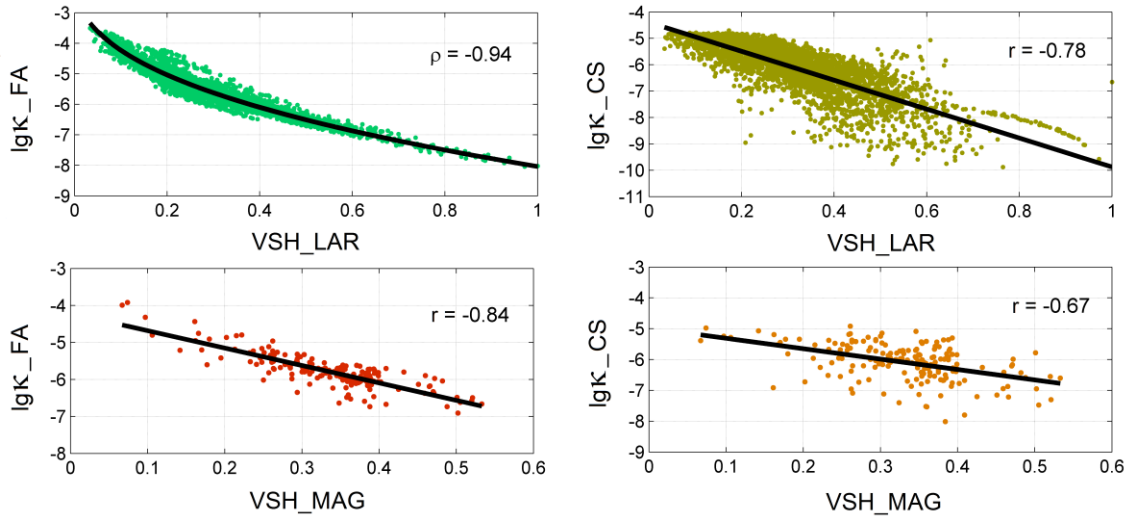
4. ábra: Mért szelvények és szemcseméret adatok a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban

Figure 4. Observed well logs and grain-size data in borehole Baktalórántháza-1



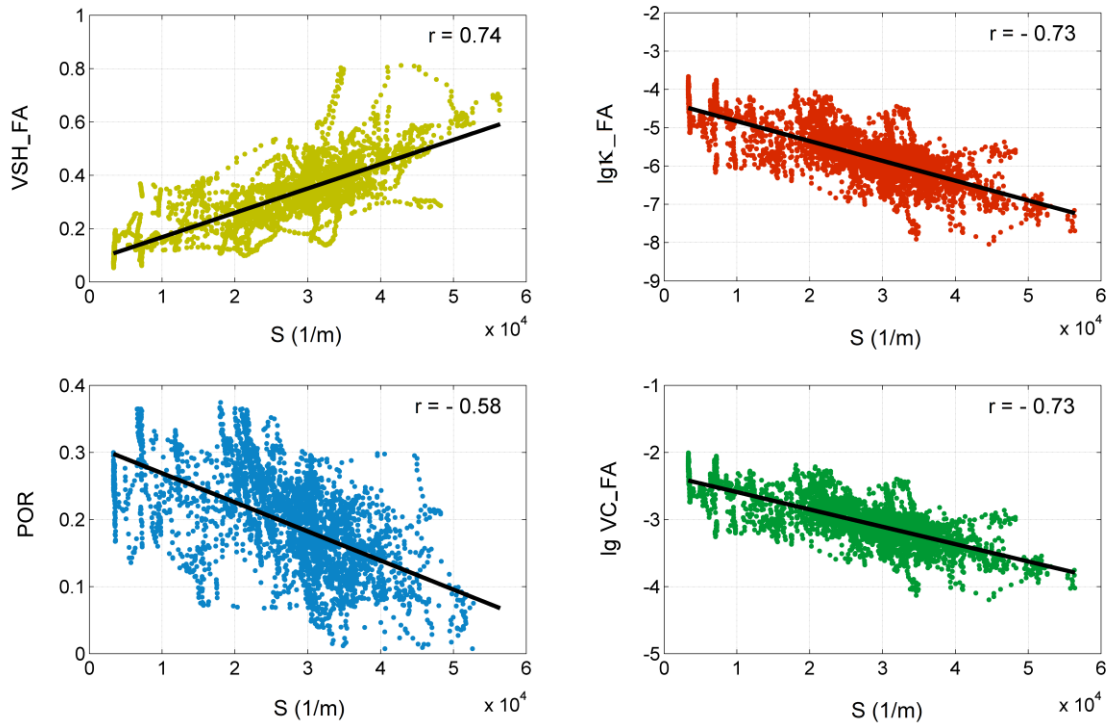
5. ábra: Becsült kőzetfizikai és szivárgási paraméterek szelvényei a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban

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



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 kőzetfizikai paraméterek kapcsolata a Baktalórántháza-1 fúrásban

Figure 6. Regression relation between specific volume and petrophysical parameters in borehole Baktalórántháza-1