

# Faktoranalízisen alapuló új statisztikus eljárás a szivárgási tényező meghatározására

SZABÓ N. P.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

<sup>2</sup> MTA–ME, Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

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

A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kifejlesztett faktoranalízisen alapuló statisztikus eljárással korábban az agyagtartalmat határoztuk meg a fűrőlyukszelvényekből. Folytatva az alkalmazási lehetőségeket, ebben a tanulmányban a víztárolók agyagtartalmával szorosan összefüggő mennyiséget, a szivárgási tényezőt származtatjuk a faktorszelvényekből. Szintetikus modellkísérleten és terepi alkalmazásokon mutatjuk be a kiértékelési eljárást, mely mind elsődleges, mind másodlagos porozitású kőzetekben jól alkalmazható. A faktoranalízis eredményei megfelelő egyezőséget mutatnak a Kozeny–Carman-modell alapján számított és a vízáadó formációk hidraulikai tesztjeiből származó szivárgási tényezők értékeivel. A fűrőlyukszelvények egyidejű statisztikai feldolgozásával folytonos *in situ* információ nyerhető a szivárgási tényezőről a fűrőlyuk teljes hossza mentén, mely többdimenziós faktoranalízis alkalmazása esetén kiterjeszhető a szomszédos fúrások közötti térrészre. A tanulmány célja egy új, független szelvényértelmezési eljárás bemutatása, mely hatékonyan használható fel a hidrogeofizikai kutatások során.

## Szabó, N. P.: New factor-analysis-based statistical method used for hydraulic conductivity estimation

Shale volume has been estimated earlier by a new statistical method developed at the Department of Geophysics, University of Miskolc, which is based on the factor analysis of well logs. As a continuation, this paper presents the derivation of hydraulic conductivity, strongly related to the shale content of aquifers, using the well logs of factor variables. Synthetic modeling experiments and field cases show the feasibility of the statistical procedure for groundwater formations with primary and secondary porosity. The results of factor analysis show a close fit to those of the Kozeny–Carman procedure and hydraulic aquifer tests. The simultaneous statistical processing of well logs gives continuous *in situ* information about hydraulic conductivity along the entire length of the borehole or between neighboring wells by using multidimensional factor analysis. The aim of the study is the presentation of a new (independent) well-logging interpretation method, which can be effectively used in hydrogeophysical exploration.

*Beérkezett:* 2015. július 9.; *elfogadva:* 2015. szeptember 16.

## Bevezetés

A szivárgási tényező a porózus és repedezett kőzetek vízvezető képességét jellemzi, melyet hidrogeológiai feladatok megoldása során a kőzetminták laboratóriumi vizsgálatával, kúttesztekkel vagy nagyobb léptékben tárolómodellezéssel határozzuk meg. Jelen tanulmányban a fűrőlyuk-geofizikai mérések tartományára szorítkozunk, ahol a szivárgási tényezőt a fűrőlyuk szűk környezete által befolyásolt karotázsszelvényadatokból többváltozós statisztikai eljárással szár-

maztatjuk. Porózus közegben a szivárgási tényezőt a szemcsemérettel vagy az effektív porúsátmérvével, a porozitással és a repedések jellemző tulajdonságaival hozzuk kapcsolatba. Elsődleges porozitású kőzetek kiértékelése során további texturális tulajdonságokat is figyelembe veszünk, például a cementációs kitevőt vagy a tekervényességi együtthatót (Archie 1942), melyek a szivárgási tényező meghatározására többnyire empirikus módszerek alkalmazását teszik lehetővé (Odong 2013, Idrysy, De Smedt 2007, Ross et al. 2007).

A fúróluk-geofizikai mérések az *in situ* vizsgálatok körébe tartoznak, melyeket a hidrogeofizikai alkalmazásoknál elsősorban a szivárgási tényező térbeli változásának (nagyságrendi) meghatározására használnak. A szénhidrogén-kutatásban a permeabilitást mint kapcsolódó mennyiséget direkt módon, a nukleárisrezonancia-szelvényezéssel (NMR) határozzák meg. E módszer felszíni geofizikai megfelelőjét a mágnesesrezonancia-szondázást egyre szélesebb körben használják a hidrogeofizikában is (Roy, Lubczynski 2003). Walsh és szerzőtársai (2013) az NMR eljárást nemrégiben környezeti és hidrogeológiai vizsgálatok számára mélyített kis átmérőjű fúrólukokra adaptálták. Bár az NMR szonda meglehetősen drága, előnye, hogy nemcsak az effektív porozitásról, hanem a pórusméret-eloszlásról és a pórusokat kitöltő fluidumok fizikai tulajdonságairól is informál, miáltal részletesebb képet kaphatunk a kőzetek szivárgási jellemzőiről. A permeabilitás becslésére szolgáló indirekt (*in situ*) módszerek a porozitás és a kötött víztelítettség előzetes meghatározásán alapulnak (Timur 1968). Alger (1966) édesvíztároló kőzetekre kapcsolatot talált a formációfaktor és az effektív szemcseátmérő között, ami lehetővé tette a szivárgási tényező fúrólukszelvényekből való számítását. Az édesvíztárolók kiértékelésének mélyfúrású geofizikai méréseken alapuló elméletét Alger és Harrison (1989) foglalta össze. Csókás (1995) átfogó kiértékelési eljárást javasolt a szivárgási tényező és egyéb vízminőség-jellemző paraméterek becslésére konszolidálatlan üledékek esetén. A Csókás-módszer a porozitás, a rétegvíz és a tárolókőzet fajlagos ellenállásának előzetes becslése alapján (kizárólag a karotázs-adatrendszerből) szolgáltatja a szivárgási tényező folytonos szelvényét. A víztároló szerkezeteknél feltételezett kőzetfizikai modell paramétereinek kinyerésére gyakran alkalmaznak egyéb determinisztikus vagy inverz modellezésen alapuló eljárásokat is, így például a fajlagosellenállás- és porozitásszelvényeken alapuló megközelítést Khalil és szerzőtársai (2011) alkalmazták, valamint Drahos (2005), Szabó és Dobróka (2013a) publikáltak inverziós módszert e célból.

A fenti adatfeldolgozási módszerek sikeres alkalmazása függ a karotázsszonda-válaszegyenletek és a zónaparaméterek megfelelő megválasztásától. Előfordul, hogy a modell és az adatok is jelentős hibával (vagy többértelműséggel) terhelték. Az értelmezés eredményei gyakran jelentősen eltérnek a magmintákon meghatározottaktól (vagy elmentmondanak azoknak), így a szivárgási tényező becslési hibája elérheti az egy-másfél nagyságrendet. A bizonytalanság csökkentésére a felszíni geofizikai és a karotázsméréseket megfelelően kombinálják. Perdomo és szerzőtársai (2014) a hidraulikus paramétereket az egyenáramú geoelektromos és fúrólukbeli fajlagosellenállás-mérések együttes alkalmazásával becsülték. Slater (2007) a felszíni indukált polarizációs méréseket fúrólukbeli áramlásméréssel, radartomográfiai és neutron-porozitásszelvényezéssel kombinálta. Guérin (2005) az elektromágneses módszerek alkalmazásának előnyeit hangsúlyozta a vízkutatásban. Dobróka és szerzőtársai (1991) felszín alatti bányák hidrogeológiai felmérése során a fúrólukbeli szeizmikus és bá-

nyabeli geoelektromos adatok együttes inverziójával megbecsülték a szeizmikus sebességet és fajlagos ellenállást, kiszámították a vízzáró rétegek vastagságát, valamint kiemelték a tektonikai zavarok, vetőzónák és a vízbeáramlás helyeit.

A standard kiértékelési eljárások mellett hasznos lehet egy-egy új (független) módszer bevonása a tároló értékelésbe, mivel az új és a meglévő módszerek együttes alkalmazása jelentősen javíthatja a kiértékelés eredményének pontosságát és megbízhatóságát. A tanulmányban egy többváltozós statisztikai módszert mutatunk be, mely a karotázsszelvényeket egyetlen eljárásban dolgozza fel a szivárgási tényező vertikális eloszlásának meghatározása céljából. A faktoranalízist általában nagyméretű statisztikai problémák változószámának csökkentésére és az adatrendszerben elrejtett, nem mérhető információk kinyerésére használják (Lawley, Maxwell 1962). A faktoranalízis földtudományi alkalmazásai azt mutatják, hogy a mérési adatokból származtatott új statisztikai változók (faktorok) a földtani szerkezetek számos kőzetfizikai jellemzőivel jól korrelálnak. Szabó (2011) üledékes kőzetek agyagtartalmának becslésére faktoranalízisen alapuló módszert vezetett be, mely több hazai és tengerentúli szénhidrogénmező fúrásaiban alkalmazhatónak bizonyult (Szabó, Dobróka 2013b). E tanulmányok azt mutatják, hogy a fúrólukszelvények varianciájának legnagyobb részéért felelős (első) faktor jó agyagindikátor, mellyel a litológiai egységek jól elkülöníthetők. A fenti eljáráshoz hasonlóan mérőszondázási adatok faktoranalízisével a felszínközeli rétegek víztelítettségét határozhatjuk meg (Szabó et al. 2012). Ez utóbbi tanulmány a faktoranalízis algoritmusának 2-D földtani szerkezetekre történő kiterjesztését és a neutronszelvény pótlásának lehetőségét is tartalmazza. A faktoranalízisen alapuló agyagtartalom meghatározásának módszerét hazai vízkutató fúrásokban Szabó és szerzőtársai (2014) vizsgálták, aminek eredményeként általános (közéltő) regressziós összefüggést találtak a kelet-magyarországi régióra. A módszert Asfahani (2014) Dél-Szíria nagy kiterjedésű bazaltos területének litológiai jellemzésére használta fel, ahol a nukleáris szelvényeket, beleértve a természetes-gamma-intenzitás-, sűrűség- és neutronporozitás-adatokat, valamint a rövid és hosszú normál szondával mért fajlagosellenállás-szelvényeket faktoranalízissel dolgozta fel. Seth és szerzőtársai (2015) a Bering-tenger törmelékes és diatomás üledékei agyagtartalmának meghatározására alkalmazta a faktoranalízisen alapuló eljárást.

Ebben a tanulmányban azt feltételezzük, hogy az első faktorszelvény megfelelően korrelál a szivárgási tényezővel, mely szoros kapcsolatban áll az elsődleges porozitással a kőzetek agyagtartalmával. A regressziós függvény ismeretében a szivárgási tényező közvetlenül előállítható a karotázs-adatrendszer faktoranalízisével. A statisztikus eljárás alkalmazhatóságát szintetikus modellkísérletek és terepi alkalmazások bizonyítják, ahol a faktoranalízissel kapott szivárgási tényezők értékét a laboratóriumi mérések eredményei és a kütteszt adatok is megerősítik.

## A Kozeny–Carman-modell

A Darcy-törvény szerint a szivárgási tényező ( $K$ ) a víz áramlásának Darcy-féle sebessége ( $q$ ) és a hidraulikus gradiens ( $dh/dl$ ) közötti sebesség dimenziójú arányossági tényező

$$q = K \frac{dh}{dl}, \quad (1)$$

mely elsődleges porozitású kőzetekben a pórusvíz sűrűségétől és viszkozitásától, a szemcseméret- és pórusméret-eloszlástól, a porozitás (agyagtartalom) nagyságától és a víztelítettségétől függ. A szivárgási tényező egyenesen arányos a permeabilitással, mely a vízáradó kőzet átteresztőképességét jellemzi. E kapcsolódó mennyiségek a fűrőlyuk-geofizikai mérésekből lezármasztathatók. A Kozeny–Carman-egyenletet széleskörűen alkalmazzák a szivárgási tényező becslésére, mely Bear (1972) alapján cm/s egységben:

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

ahol  $d$  (cm) a jellemző szemcseméret,  $\Phi$  a réteg porozitása,  $\rho_w$  (g/cm<sup>3</sup>) a pórusfolyadék sűrűsége,  $\mu$  (g cm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) a dinamikai viszkozitás és  $g$  (cm/s<sup>2</sup>) a nehézségi gyorsulás normálértéke. A Kozeny–Carman-egyenlet továbbfejlesztésével jelenleg is széles körben foglalkoznak. Srisutthiyakorn és Mavko (2015) a pórusgeometriát (ún. látszólagos pórusátmérő) és a tekervényességi együtthatót figyelembe véve módosította a (2) összefüggést. Dlubac és szerzőtársai (2010) nukleáris mágnesesrezonancia-mérésekből származtatták a Kozeny–Carman-egyenlet alapparamétereit, majd az új modellegyenletet vízzel telített agyagos homokkőmintákon tesztelték. E vizsgálatok azt mutatták, hogy a Kozeny–Carman-egyenlet megfelelő becslést ad anizotróp közegben is a szivárgási tényező értékére. Konszolidálatlan üledékes víztárolók szivárgási tényezőjének a Kozeny–Carman-modell alapján történő meghatározása, mely a szemcseméret és a porozitás értékének ismeretén alapul, tovább javítható a kompakció hatásának a figyelembevételével, ami a cementációs kitevő, tortuozitási együttható és egyéb texturális jellemzők bevonásával lehetséges. A (2) egyenletben szereplő  $d$  (cm) domináns szemcseátmérő szemeloszlás-vizsgálatából meghatározható (Juhász 2002)

$$d = \frac{d_{10} + d_{60}}{2} \sqrt{\frac{d_{10}}{d_{60}}}, \quad (3)$$

ahol  $d_{10}$  (cm) és  $d_{60}$  (cm) a kumulatív gyakorisági görbe 10% és 60%-ához tartozó szemcseátmérők. Mivel a kőzetminták elemzésével a szükséges szemcseátmérők meghatározhatóak, és a porozitás fűrőlyukszelvényekből becsülhető, a szivárgási tényező szelvénye (2) alapján számítható.

## A statisztikus eljárás elmélete

Jelen tanulmányban egy új statisztikai módszert mutatunk be, mely valamennyi szelvényt felhasználja a szivárgási tényező becslésére a vizsgált szakasz mentén. A faktoranalízis

következőképpen alkalmazható fűrőlyukszelvényeken. Tároljuk  $\mathbf{d}^l$  oszlopvektorban az  $l$ -edik szondához tartozó (mérhető) fizikai változó különböző mélységpontokban mért értékeit. Az összes szelvényadatot a  $\mathbf{D}$  adatmátrixba gyűjtjük össze

$$D_{il} = d_i^l, \quad (4)$$

ahol  $i = 1, 2, \dots, N$  a vizsgált szakaszon megfigyelt mélységpontok száma és  $l = 1, 2, \dots, L$  az alkalmazott lyukeszközök száma. A bemenő adatokat először standardizáljuk:

$$\hat{D}_{il} = \frac{(D_{il} - \bar{D}_l)}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_{il} - \bar{D}_l)^2}}, \quad (5)$$

ahol  $\bar{D}_l$  jelenti az  $l$ -edik szonda által mért adatok számtani átlagát. A faktoranalízis az  $N \times L$  méretű skálázott adatmátrixot az alábbi módon bontja fel

$$\hat{\mathbf{D}} = \mathbf{F}\mathbf{W}^T + \mathbf{E}, \quad (6)$$

ahol  $\mathbf{F}$  az adatokból származtatott új statisztikai változókat (faktorokat) tartalmazó  $N \times M$  méretű mátrix,  $\mathbf{W}$  az  $L \times M$  méretű faktorsúlyok mátrixa,  $\mathbf{E}$  az  $N \times L$  méretű hibakomponens-mátrix (T a mátrix transzponáltját jelöli). A dimenziócsökkentés során a mért változóknál kevesebb számú faktort állítunk elő ( $M < L$ ). Az  $\mathbf{F}$  mátrix oszlopai a faktorszelvényeket képviselik, míg a  $\mathbf{W}$  mátrix az egyes adattípusok faktorokra eső súlyait tartalmazza. A faktorsúlyok gyakorlatilag a faktorok és a bemenő adatok közötti korreláció mértékét adják meg.

Tételezzük fel, hogy a faktorok lineárisan függetlenek ( $N^{-1}\mathbf{F}^T\mathbf{F} = \mathbf{I}$ ), ekkor a standardizált adatok korrelációs mátrixa kifejezhető a faktorsúlyokkal

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= N^{-1}\hat{\mathbf{D}}^T\hat{\mathbf{D}} = N^{-1}(\mathbf{F}\mathbf{W}^T)^T(\mathbf{F}\mathbf{W}^T) + \mathbf{E}^2 \\ &= \mathbf{W}\mathbf{W}^T + \mathbf{\Psi}, \end{aligned} \quad (7)$$

ahol  $\mathbf{\Psi}$  a hibavariációk diagonális mátrixa, mely a mérési változók varianciájának közös faktorokkal nem értelmezhető részét képviseli. A faktorszelvények számítása érdekében először a faktorsúlyokat és a hibavariációkat az alábbi cél-függvény minimalizálásával egyszerre becsüljük meg (Móri 1999):

$$\Omega(\mathbf{W}, \mathbf{\Psi}) = \text{tr}(\mathbf{R} - \mathbf{W}\mathbf{W}^T - \mathbf{\Psi})^2, \quad (8)$$

ahol  $\text{tr}$  az argumentumban szereplő négyzetes mátrix nyomát jelöli. A  $\mathbf{W}$  és  $\mathbf{\Psi}$  mátrixokat ismertnek feltételezve a faktorok az alábbi log-likelihood függvény maximalizálásával származtathatók

$$\begin{aligned} \lg P &= -\frac{1}{2} [\lg |2\pi \mathbf{\Psi}| + \\ &+ (\hat{\mathbf{D}} - \mathbf{F}\mathbf{W}^T)\mathbf{\Psi}^{-1}(\hat{\mathbf{D}} - \mathbf{F}\mathbf{W}^T)^T] = \max. \end{aligned} \quad (9)$$

A (9) egyenlet Bartlett (1953) linearitásra vonatkozó hipotézise alapján az alábbi megoldásra vezet:

$$\mathbf{F}^T = (\mathbf{W}^T\mathbf{\Psi}^{-1}\mathbf{W})^{-1}\mathbf{W}^T\mathbf{\Psi}^{-1}\hat{\mathbf{D}}^T, \quad (10)$$

ahol az  $\mathbf{F}$  mátrix oszlopai a faktorok különböző mélységpontoknál becsült értékeit (faktorszelvényeket) tartalmaz

zák. Például az első oszlop az első faktort, mely a mérési adatok varianciáját legnagyobb részben magyarázza, a második oszlop a második faktort, a harmadik a harmadikat stb. számszerűsíti. A faktorok optimális számát statisztikai próbával (Bartlett 1950) vagy közelítő eljárással határozhatjuk meg (Jöreskog 2007). A nyers faktorokat a könnyebb fizikai értelmezhetőség érdekében általában a  $\mathbf{W}\mathbf{W}^T = \mathbf{W}^*\mathbf{W}^{*T}$  és  $\mathbf{W}^* = \mathbf{W}\mathbf{V}$  transzformációnak vetik alá, ahol  $\mathbf{V}$  egy megfelelően választott  $M \times M$  méretű ortogonális mátrix. A faktorsúlyokon végzett ortogonális transzformáció (geometriai értelemben forgatás) a faktorokra nézve egyenértékű megoldást eredményez. Ebben a tanulmányban az elforgatott faktorok előállítására a Kaiser (1958) által javasolt varimax módszerrel történik.

Bontsuk fel a standardizált mérési változók  $\mathbf{R}^* = \mathbf{R} - \Psi = \mathbf{W}\mathbf{W}^T$  redukált korrelációs mátrixát az SVD eljárással (Bronshtein et al. 2007)

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T, \quad (11)$$

ahol  $\mathbf{U}$  és  $\mathbf{V}$   $L \times L$  méretű ortogonális mátrixok, továbbá az  $\mathbf{S}$  diagonális mátrix a pozitív (csökkenő sorrendbe állított) szinguláris értékeket tartalmazza. A mérési adatokban rejlő földtani információk különböző mértékben jelennek meg a faktorokban. A mérési adatok teljes varianciáját az  $\mathbf{S}$  mátrix főátlóbeli elemeinek összege adja, míg a  $j$ -edik faktorra eső relatív varianciarányad:

$$\sigma_j = \frac{S_{e, jj}}{\text{tr}(\mathbf{S}_e)} \cdot 100 \text{ (%).} \quad (12)$$

A faktorok és a vízáadó rétegek közetfizikai paraméterei regresszióanalízissel hozhatók egymással kapcsolatba. Szabó és szerzőtársai (2014) nemlineáris (exponenciális) kapcsolatot találtak az első faktor (az  $\mathbf{F}$  mátrix első oszlopa) és konszolidálatlan vízáadó rétegek agyagtartalma között. A regressziós függvény együtthatói különböző kelet-magyarországi területeken közelítőleg megegyeztek. Elsődleges porozitású kőzetek szivárgási tényezője az agyagtartalommal fordítottan arányos (Benson, Trast 1995, Sallam 2006, Shevvin et al. 2006). Ennek alapján az feltételezhető, hogy az első faktor szintén érzékeny a szivárgási tényezőre. A tanulmányban szereplő szintetikus és terepi példák az első faktor és a  $\kappa = K/K_0$  (ahol  $K_0 = 1$  cm/s) dimenziótlan szivárgási tényező tízes alapú logaritmusának lineáris kapcsolatát mutatják:

$$\lg \kappa = \alpha F_1 + \beta, \quad (13)$$

ahol  $\alpha$  és  $\beta$  a mérési területre jellemző konstansok és  $F_1$  a tetszőleges intervallumba skálázott első faktor. A léptékváltást az alábbi formulával könnyen elvégezhetjük

$$F_1' = F_{1, \min}' + [(F_{1, \max}' - F_{1, \min}') / (F_{1, \max} - F_{1, \min})] (F_1 - F_{1, \min}), \quad (14)$$

ahol  $F_1$  és  $F_1'$  az első faktor becsült és skálázott értéke az adott mélységpontban,  $F_{1, \min}$  és  $F_{1, \max}$  az első faktorszelvény szélsőértékei,  $F_{1, \min}'$  és  $F_{1, \max}'$  az első faktor előírt új alsó és felső határa. A faktor – szivárgási tényező kapcsolat erősségének jellemzésére a Pearson-féle korrelációs koefficientet használjuk:

$$R = \text{cov}(\kappa, F_1') / (\sigma_\kappa \sigma_{F_1'}), \quad (15)$$

ahol  $\text{cov}$  a minta kovarianciaoperátor,  $\sigma_\kappa$  és  $\sigma_{F_1'}$  a szivárgási tényező és a skálázott első faktor tapasztalati szórása. Szintetikus modellkísérletek esetén ismert petrofizikai modellt tételezünk fel. Ekkor a modellen számított (hibátlan) és a zajjal terhelt (kvázimért) adatok eltérését a relatív adattávolsággal jellemezhetjük:

$$D_d = \sqrt{\frac{1}{NL} \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \left( \frac{d_{il}^{(m)} - d_{il}^{(sz)}}{d_{il}^{(m)}} \right)^2} \cdot 100 \text{ (%),} \quad (16)$$

ahol  $d_{il}^{(m)}$  és  $d_{il}^{(sz)}$  jelöli az  $l$ -edik mért és számított adatot az  $i$ -edik mélységpontban. A különböző forrásból becsült szivárgási tényezők kapcsolatának erősségét a (15) korrelációs együtthatóval mérhetjük.

## Szintetikus modellkísérletek

A faktoranalízisen alapuló eljárást elsőként szimulált geológiai környezetben teszteljük. A vizsgált üledékes formáció közetfizikai modelljét ismertnek tételezzük fel, melynek paraméterei az effektív porozitás ( $POR$ ), az elárasztott zóna víztelítettsége ( $SX0$ ), az érintetlen zóna víztelítettsége ( $SW$ ), az agyagtartalom ( $VSH$ ), a homoktartalom ( $VSD$ ), a domináns szemcseátmérő ( $D$ ) és a szivárgási tényező ( $K$ ). A konszolidálatlan üledéket homok- és agyagrétegek építi fel, melyek pórusterét édesvíz és gáz (levegő) tölti ki. A levegőtelítettség az  $SG = 1 - SW$  egyenletből számítható, mely mobilis ( $SGM = SX0 - SW$ ) és kötött ( $SGIR = 1 - SX0$ ) részekre bontható. Az öt réteg összetétele fentről lefelé: kőzetlisztes homok (átlagos porozitás 18%, melynek ~42%-a levegő és ~58%-a víz), finomszemcsés homok (24% átlagos porozitás, ~42% levegő és ~58% víz), agyag (12% átlagos porozitás, 100% víz), finomszemcsés homok (24% átlagos porozitás, ~35% levegő és ~65% víz) és agyagos homok (16% átlagos porozitás, 100% víz). A jellemző szemcseméreteket az irodalom alapján határozhatjuk meg (Wentworth 1922), míg a szivárgási tényezőt az (2) összefüggés alapján számíthatjuk.

A direkt feladat keretében a fenti modell alapján sűrűség ( $DEN$ ), természetes-gamma-intenzitás- ( $GR$ ), természetes-potenciál- ( $SP$ ), mélybehatolású szondával mért fajlagos ellenállás- ( $RD$ ), sekélybehatolású szondával mért fajlagos ellenállás- ( $RS$ ) és neutron-neutron-intenzitás- ( $NN$ ) szelvényadatokat számíthatunk. A víztároló formációban alkalmazott szondaválaszfüggvények a következők:

$$DEN = POR \left[ (SX0 \cdot DEMF) + (1 - SX0) DEG \right] + VSH \cdot DESH + VSD \cdot DESD, \quad (17)$$

$$GR = GRSD + \frac{(VSH \cdot GRSH \cdot DESH + VSD \cdot GRSD \cdot DESD)}{DEN}, \quad (18)$$

$$SP = VSH \cdot SPSH - C \cdot \lg\left(\frac{RMF}{RW}\right)(1 - VSH), \quad (19)$$

$$NN = POR \cdot NNF + VSH \cdot NNSH + VSD \cdot NNSD, \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sqrt{RD}} = \left[ \frac{VSH^{(1-VSH/2)}}{\sqrt{RSH}} + \frac{(\sqrt{POR})^m}{\sqrt{a \cdot RW}} \right] (\sqrt{SW})^n, \quad (21)$$

$$\frac{1}{\sqrt{RS}} = \left[ \frac{VSH^{(1-VSH/2)}}{\sqrt{RSH}} + \frac{(\sqrt{POR})^m}{\sqrt{a \cdot RMF}} \right] (\sqrt{SX0})^n, \quad (22)$$

$$POR + VSH + VSD = 1. \quad (23)$$

A (17)–(22) egyenletekben a térfogatjellemző mennyiségek mellett további zónaparaméterek is szerepelnek, melyek a közetmátrix, az agyag és a pórufolyadék fizikai tulajdonságait fejezik ki. A zónaparaméterek értékét a víztároló szakaszon állandónak tételezzük fel (1. táblázat). A mérési környezetre vonatkozó (23) anyagmérleg-egyenlet a modellparaméterekre ír elő korlátozást. A (17)–(22) egyenletekkel szintetikus adatokat számíthatunk, melyeket véletlen zajjal terhelve kvázimért szelvények állíthatók elő. A zajos adatok feldolgozásával megvizsgálható, hogy mennyire pontosan állítja elő a statisztikai eljárás az egzakt modell paramétereit. A szintetikus kísérletekkel a módszer teljesítő-képessége, stabilitása és zajérzékenysége vizsgálható.

A faktoranalízisen alapuló eljárást elsőként szintetikus modellen számított szelvényadatokon teszteljük. A modellparaméterek (*POR*, *SX0*, *SW*, *VSH*, *VSD*) aktuális értékeinek a (17)–(22) egyenletekbe való helyettesítésével hatféle szelvénytypust (*GR*, *SP*, *DEN*, *NN*, *RS*, *RD*) számítunk 250 mélységpontban, így az adatok száma 1500. A kvázimért adatrendszert úgy állítjuk elő, hogy a hibátlan adatokhoz zérus középértékű és a kívánt zajszinttel arányos szórású, Gauss-eloszlásból származó véletlen zajt adunk. Az 5% Gauss-zajt tartalmazó adatrendszer korrelációs mátrixát a 2. táblázat tartalmazza, mely szerint a mért változók viszonylag erősen korrelálnak.

A faktoranalízis eredményeként két faktort számítunk, melyek a mért adatok teljes varianciájának külön-külön a 90.8%-át és 9.2%-át magyarázzák. Az 5% Gauss-eloszlású zajjal terhelt szintetikus adatrendszer esetében a (8) egyenlet megoldásával számított faktorsúlyokat a 3. táblázat tartalmazza. Látható, hogy az első faktor leginkább a litológiai szelvényekkel, míg a második faktor a fajlagosellenállás-szelvényekkel korrelál. Ezek az eredmények összhangban vannak mélyfúrásokban kapott korábbi eredményekkel (Szabó 2011, Szabó, Dobróka 2013b, Szabó et al. 2014, Asfahani 2014). A faktorsúlyoknak a (10) egyenletbe történő helyettesítésével két faktort számítunk. A 0–100 tartományba skálázott első faktor és a szivárgási tényező lineáris kapcsolata az 1. ábrán látható. A regresszióanalízis eredményként kapott (13) modellegyenlet

**1. táblázat** | Szintetikus modellkísérletek során alkalmazott zónaparaméterek  
**Table 1** | Groundwater-zone parameters used for synthetic modeling experiments

Zónaparaméter	Definíció	Szimbólum	Konstans	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ -intenzitás	Agyag	<i>GRSH</i>	160	API
	Homok	<i>GRSD</i>	10	API
Természetes potenciál	Agyag	<i>SPSH</i>	0	mV
	Homok	<i>SPSD</i>	12,3	mV
	Hőmérsékleti tényező	<i>C</i>	70	–
Termikus- $n^0$ -intenzitás	Agyag	<i>NNSH</i>	4,0	kcpm
	Homok	<i>NNSD</i>	7,5	kcpm
	Pórus-fluidum	<i>NNF</i>	3,0	kcpm
Gamma-gamma (sűrűség)	Iszapfiltrátum	<i>DEMF</i>	0,9982	g/cm <sup>3</sup>
	Agyag	<i>DESH</i>	2,5	g/cm <sup>3</sup>
	Homok	<i>DESD</i>	2,65	g/cm <sup>3</sup>
	Gáz (levegő)	<i>DEG</i>	1,2 · 10 <sup>-3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
Fajlagos ellenállás	Iszapfiltrátum	<i>RMF</i>	8	ohmm
	Pórusfluidum	<i>RW</i>	12	ohmm
	Agyag	<i>RSH</i>	2	ohmm
Texturális paraméterek	Cementációs kitevő	<i>m</i>	1,5	–
	Szaturációs kitevő	<i>n</i>	2,0	–
	Tekervényességi együttható	<i>a</i>	1,0	–
Hidraulikai paraméterek	Dinamikai viszkozitás	$\mu$	0,019	g/cm · s
	Nehézségi gyorsulás	<i>g</i>	981	cm/s <sup>2</sup>

**2. táblázat** Szintetikus modellen számított fúrólúkszelvények korrelációs mátrixa  
**Table 2** Correlation matrix of noisy well logs calculated on synthetic model

	<i>SP</i>	<i>GR</i>	<i>DEN</i>	<i>NN</i>	<i>RS</i>	<i>RD</i>
<i>SP</i>	1	0,97	0,56	-0,84	-0,82	-0,80
<i>GR</i>	0,97	1	0,56	-0,86	-0,84	-0,82
<i>DEN</i>	0,56	0,56	1	-0,46	-0,51	-0,49
<i>NN</i>	-0,84	-0,86	-0,46	1	0,71	0,69
<i>RS</i>	-0,82	-0,84	-0,51	0,71	1	0,98
<i>RD</i>	-0,80	-0,82	-0,49	0,69	0,98	1

**3. táblázat** Szintetikus modellen számított szelvényadatok faktoranalízisével előálló faktorsúlyok  
**Table 3** Factor loadings derived from well logs calculated on synthetic model

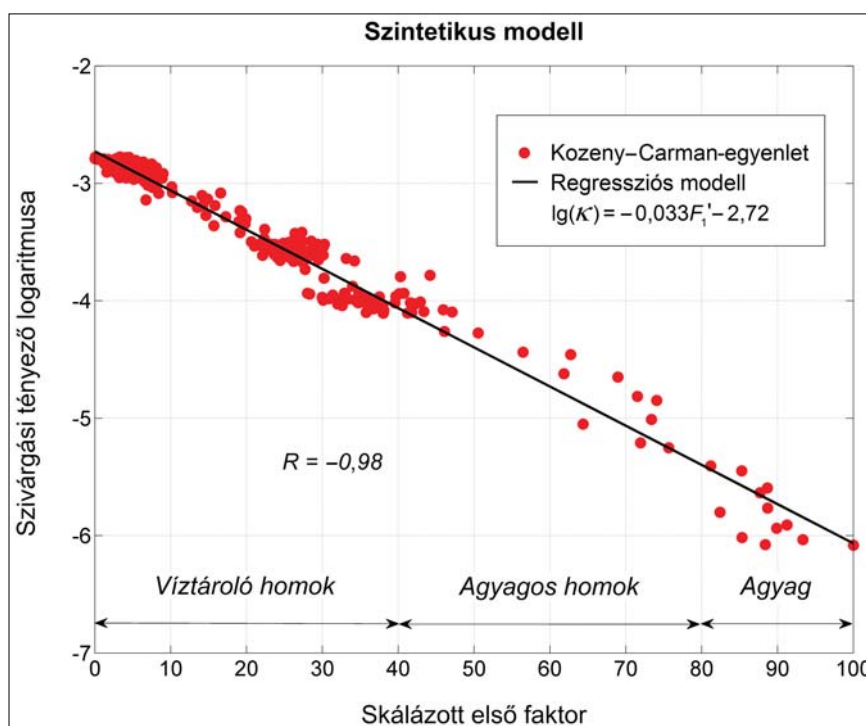
Faktor	$W^{(SP)}$	$W^{(GR)}$	$W^{(DEN)}$	$W^{(NN)}$	$W^{(RS)}$	$W^{(RD)}$
Első	0,97	0,98	0,55	-0,86	-0,80	-0,78
Második	-0,06	-0,08	-0,09	0,02	0,58	0,62

$$\lg \kappa = -0,033 F_1 - 2,72, \quad (24)$$

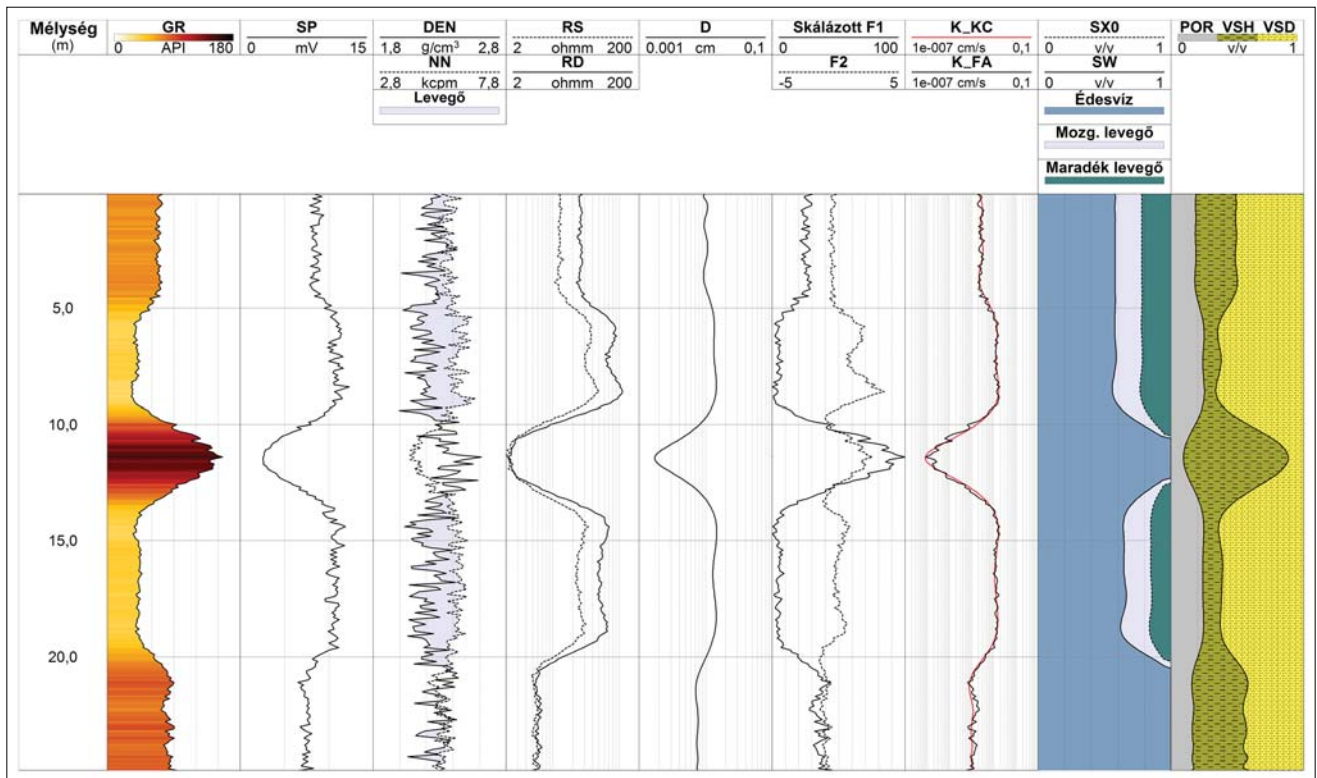
ahol a regressziós együtthatók hibahatárai 95%-os konfidenciaszint mellett:  $\alpha_{\min} = -0,034$ ,  $\alpha_{\max} = -0,032$ ,  $\beta_{\min} = -2,75$ ,  $\beta_{\max} = -2,70$ . A faktor – szivárgási tényező kapcsolat korrelációs együtthatójának értéke  $R = -0,98$ , mely erős korrelációt és a változók fordított arányosságát igazolja. A 2. ábra a bemenő szelvényeket (1–4. oszlop), a petrofizikai modellt (5., 8–9. oszlop) és a becsült faktorszelvényeket mutatja (6. osz-

lop). A (2) egyenletből számított egzakt ( $K_{KC}$ ) és a faktoranalízissel becsült ( $K_{FA}$ ) szivárgásitényező-szelvények megfelelő egyezést mutatnak. A  $R = 0,98$  korrelációs együttható szoros kapcsolatot számszerűsít.

A faktoranalízissel becsült paraméterek pontossága függ a bemenő adatokat terhelő zaj nagyságától. Az eljárás zajérzékenységének vizsgálatára a szintetikus modellen számított (hibátlan) szelvényadatokat különböző mértékű hibával terheljük. Az adatrendszerekhez tartozó (11) relatív adattávol-



**1. ábra** Szivárgási tényező és az első faktor kapcsolata 5% Gauss-zajjal terhelt szintetikus szelvények esetén  
**Figure 1** Hydraulic conductivity versus factor scores derived from synthetic well-logging data contaminated by 5% Gaussian distributed noise



**2. ábra** Szintetikus modellen számított fűrőlyukszelvények, faktoranalízissel számított faktorszelvények (F1, F2), szivárgásitényező-szelvények a Kozeny–Carman- (egzakt) formulával ( $K_{KC}$ ) és faktoranalízissel meghatározva ( $K_{FA}$ )  
**Figure 2** Theoretical well logs (track 1–4) calculated on synthetic model (tracks 5, 8–9), well logs of the extracted factors (track 6), hydraulic conductivity logs estimated from Kozeny–Carman (exact) equation and factor analysis (track 7)

ságot és a statisztikus kiértékelés eredményeit a 4. táblázat tartalmazza. Az adatrendszerek 1–10%-os Gauss-zajt tartalmaznak, emellett nem Gauss-típusú (aszimmetrikus eloszlású) adatrendszereket is generálunk úgy, hogy a Gauss-zajjal terhelt adatokhoz további kiugró értékeket (az adatok véletlenszerűen kiválasztott 10%-ához ötször nagyobb mértékű véletlen zajt) adunk. Az adatrendszerek faktoranalízisével minden esetben két faktort számítunk. A táblázatban látható, hogy a faktorsúlyok nagysága és előjele nem változik jelentősen, az első faktort befolyásoló litológiai szelvények súlyai csak kis mértékű csökkenést mutatnak a növekvő adattávolsággal. A szivárgási tényező és az első skálázott faktor kapcsolatára vonatkozó regressziós együtthatók nagy pontosságot és kis változást mutatnak. A becslési hibák egyenesen arányosak az adattávolsággal, nagyságuk relatíve kicsi még nagy adattérbeli zaj esetén is. A Pearson-féle korrelációs együttható ( $R$ ) értékei a két változó szoros kapcsolatát mutatják. A nem Gauss-eloszlású zajjal terhelt adatok numerikus vizsgálata azt mutatja, hogy a regressziós kapcsolat a kiugró hibák ellenére is jó közelítéssel érvényes. A szintetikus modellvizsgálatok tanúsága szerint a statisztikai eljárás stabil és megbízható.

### A statisztikus eljárás terepi alkalmazása

#### Faktoranalízis és a Kozeny–Carman-módszer összehasonlítása

A faktoranalízisen alapuló eljárás terepi alkalmazását elsőként a Baktalórántháza-1 sz. fúrás (Szabolcs-Szatmár-Be-

reg megye, Kelet-Magyarország) adatain mutatjuk be. A területen előzetesen végzett felszíni geofizikai vizsgálatok célja a földtani szerkezet megismerése és a szénhidrogén-potenciál felmérése volt. Bár kőolajat és földgázt nem találtak, a fúrás termásvíz kinyerésére alkalmasnak bizonyult. A fúrás legfelső 80–100 méterén pleisztocén korú üledékek találhatók, döntően homokok, melyben geoelektromos módszerrel csak a szemcseméret változását lehetett nyomon követni. A fűrőlyukszelvények a homokos összlet alatt agyagokat mutattak ki. A 100–160 m intervallumon ismét homokok települtek, melyet egy agyagos formáció követ, végül 5–15 m vastagságban durvaszemcsés rétegeket azonosítottak. A konszolidálatlan porózus-permeábilis rétegek jó minőségű vizet tárolnak. A pleisztocén és pannon üledék határa 240 m mélységben jelentkezik. A pannon korú agyagos komplexum főként agyagos homokból, kavicsból, agyagos kőzetlisztből, agyagos márgából és bitumenes agyagból áll. A faktoranalízist az agyagtartalom meghatározására korábban Szabó és Kormos (2012) alkalmazta. Jelen tanulmányban a fűrőlyukszelvények faktoranalízisével a rétegek szivárgási tényezőjét értékeljük ki a 105–486 m szakaszon. Ebben a mélységintervallumban 176 magmintát is gyűjtöttek, mely a Kozeny–Carman-egyenlet alkalmazása révén a faktoranalízistől függetlenül becslést nyújt a szivárgási tényezőre.

A faktoranalízisbe bevont szelvények a természetes-gamma-intenzitás ( $GR$ ), természetes potenciál ( $SP$ ), sekély behatolású szondával mért fajlagos ellenállás ( $RS$ ), gamma-

**4. táblázat** Faktoralízis zajérzékenységi vizsgálata különböző mértékű zajjal terhelt szintetikus karotázis-adattrendszerek felhasználásával  
**Table 4** Results of noise sensitivity tests of factor analysis using several noisy synthetic well-logging data sets

Zaj	$D_d(\%)$	$W^{(SP)}$	$W^{(GR)}$	$W^{(DBN)}$	$W^{(NN)}$	$W^{(BS)}$	$W^{(RD)}$	$\alpha_{\min}$	$\alpha$	$\alpha_{\max}$	$\beta_{\min}$	$\beta$	$\beta_{\max}$	$R^{(r,lg\kappa)}$
Gauss-eloszlás	1,0	0,99	0,99	0,88	-0,99	-0,83	-0,80	-0,031	-0,030	-0,030	-2,74	-2,73	-2,72	-0,99
	2,0	0,99	0,99	0,78	-0,97	-0,82	-0,78	-0,033	-0,032	-0,031	-2,74	-2,72	-2,71	-0,99
	3,0	0,98	0,98	0,68	-0,93	-0,80	-0,76	-0,032	-0,031	-0,030	-2,75	-2,73	-2,71	-0,99
	4,0	0,97	0,98	0,53	-0,90	-0,77	-0,74	-0,034	-0,033	-0,032	-2,75	-2,73	-2,71	-0,98
	5,0	0,97	0,98	0,55	-0,86	-0,80	-0,78	-0,034	-0,033	-0,032	-2,75	-2,72	-2,70	-0,98
Gauss-eloszlás és kiugró adatok	10,0	0,89	0,92	0,31	-0,57	-0,66	-0,60	-0,037	-0,035	-0,033	-2,60	-2,54	-2,49	-0,93
	1,66	0,98	0,98	0,77	-0,98	-0,77	-0,74	-0,032	-0,032	-0,031	-2,78	-2,76	-2,74	-0,99
	3,22	0,98	0,98	0,63	-0,92	-0,83	-0,80	-0,030	-0,029	-0,029	-2,77	-2,75	-2,74	-0,98
	5,28	0,95	0,98	0,32	-0,74	-0,77	-0,73	-0,035	-0,034	-0,033	-2,58	-2,55	-2,52	-0,98
	7,01	0,93	0,96	0,28	-0,71	-0,71	-0,68	-0,035	-0,034	-0,033	-2,70	-2,66	-2,63	-0,96
	7,98	0,93	0,94	0,49	-0,61	-0,74	-0,71	-0,039	-0,037	-0,036	-2,34	-2,29	-2,25	-0,96
	15,64	0,80	0,87	0,03	-0,39	-0,63	-0,54	-0,043	-0,040	-0,037	-2,38	-2,30	-2,22	-0,87

gamma-intenzitás ( $GG$ ) és neutron–neutron-intenzitás ( $NN$ ), melyeket közös statisztikai eljárásban dolgozunk fel. A statisztikai minta teljes adatszámja 19075. Az 5. táblázatban látható, hogy a mért változók közötti korreláció erőssége közepes. Az adatok redukált korrelációs mátrixának SVD felbontása azt mutatja, hogy a mért változók teljes varianciája két litológiai faktorról kifejezhető. Az első faktor az adatok varianciájának 82%-áért felelős, míg a második faktor magyarázza a megfigyelt információ 18%-át. A becült faktorsúlyokat a 6. táblázat tartalmazza, melyek a  $GR$  és  $RS$  szelvények első faktorra gyakorolt meghatározó szerepét hangsúlyozzák. Az első skálázott faktor és a (2) egyenlet alapján számított szivárgási tényező tízes alapú logaritmus közötti regressziós kapcsolatot a 3. ábra illusztrálja. A szivárgási tényező meghatározásánál a jellemző szemcseátmérőt a (3) összefüggés alapján számíthatjuk, melyben a  $d_{10}$  és  $d_{60}$  értéket a magminták szemeloszlási görbéiből adjuk meg. A Kozeny–Carman-egyenletben szereplő porozitást a neutronszelvényből határozzuk meg. A (20) válasz egyenletben szereplő zónaparamétereket a neutron–neutron–gamma-gamma keresztdiagramból olvashatjuk le ( $NNSD = 7,5$  kcpm,  $NNSH = 4,0$  kcpm,  $NNF = 1,0$  kcpm). Látható, hogy a (13) regressziós függvény jól közelíti az első faktor és a szivárgási tényező kapcsolatát. A Pearson-féle korrelációs együttható a lineáris kapcsolatot és a fordított arányosságot erősíti meg. Az eredményül kapott érték ( $R = -0,79$ ) erősen függ a szelvények hibájától és a magmintavételi helyek megadásának bizonytalanságától. A regressziós függvény

$$\lg \kappa = -0,046 F_1 - 3,38 \quad (25)$$

alakban írható fel, ahol a regressziós együtthatók 95%-os szignifikanciaszint mellett:  $\alpha = [-0,052, -0,041]$  és  $\beta = [-3,66, -3,11]$ . A fúrásban mért karotázisszelvényeket és a statisztikus kiértékelés eredményét a 4. ábra szemlélteti. A  $GR$  szelvény 240 m mélységben jelzi a pleisztocén és pannon komplexum határát. Az utóbbi főleg agyagos homokból, kőzetlisztből és márgából áll, míg az előbbi többnyire durvaszemcsés homok- és kavicsrétegek alkotják. A rétegsor tetején holocén árvízi üledékek találhatók. Az agyagtartalmat a Larionov (1969) által javasolt,  $GR$  szelvényen alapuló módszerrel és faktoranalízissel is meghatározhatjuk (Szabó et al. 2014). Az utolsó oszlopban  $VSH$  a Larionov-féle agyagtartalom-szelvényt jelöli. A porozitást ( $POR$ ) az  $NN$  és  $GR$  szelvényből, míg a homoktartalmat ( $VSD$ ) a (23) egyenletből számítjuk. Mivel a rétegek a teljes szakaszon vízzel telítettek, ezért az elárasztott és az érintetlen zóna víztelítettsége 100% ( $SX0 = SW = 1$ ). Az 5. oszlopban az első skálázott és a második faktorszelvény látható. A domináns szemcseátmérők a magmintavételi helyeken tüntethetők fel (6. oszlop). A mintavételi helyeken piros körök jelölik a (2) egyenlettel számított  $K_{MAG}$  szivárgásitényező-értékeket (7. oszlop). A faktoranalízissel meghatározott folytonos szivárgásitényező-szelvényt a  $K_{FA}$  görbe ábrázolja. A két független módszerrel meghatározott szivárgásitényező-értékek szoros illeszkedést mutatnak.



**5. táblázat** | A Baktalórántháza-1 fúrásban mért szelvények korrelációs mátrixa  
**Table 5** | Correlation matrix of well logs observed in Baktalórántháza-1

	SP	GR	GG	NN	RS
SP	1	-0,13	-0,42	-0,14	-0,01
GR	-0,13	1	0,36	0,05	-0,74
GG	-0,42	0,36	1	0,02	-0,33
NN	-0,14	0,05	0,02	1	-0,06
RS	-0,01	-0,74	-0,33	-0,06	1

**6. táblázat** | A Baktalórántháza-1 fúrásban mért szelvényekből számított faktorsúlyok  
**Table 6** | Factor loadings derived from well logs collected from Baktalórántháza-1

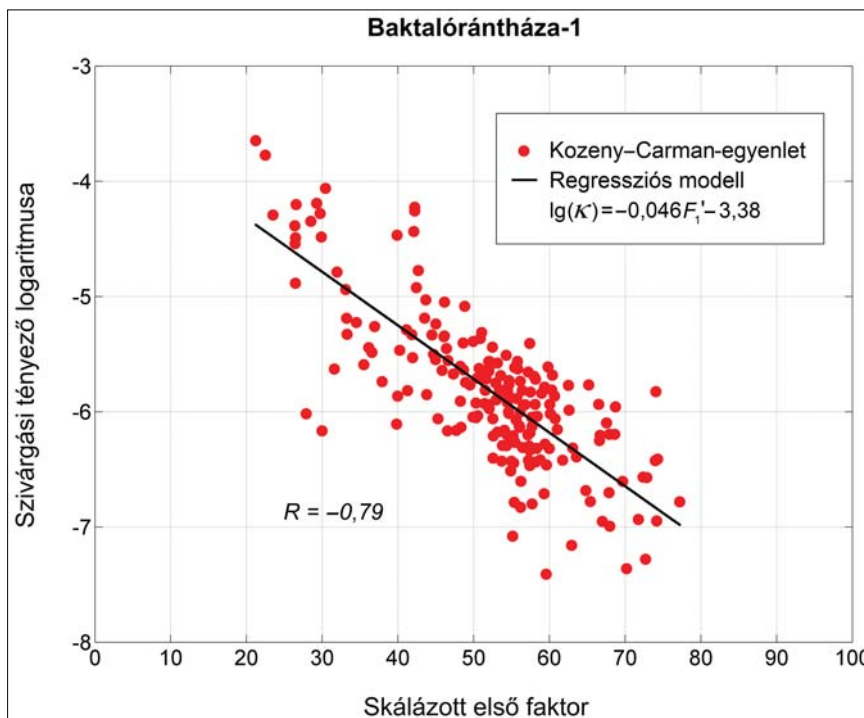
Faktor	$W^{(SP)}$	$W^{(GR)}$	$W^{(GG)}$	$W^{(NN)}$	$W^{(RS)}$
Első	-0,41	0,91	0,36	0,03	-0,79
Második	0,85	-0,15	-0,24	-0,18	0,21

**Faktoranalízis- és kütteszteredmények összehasonlítása**

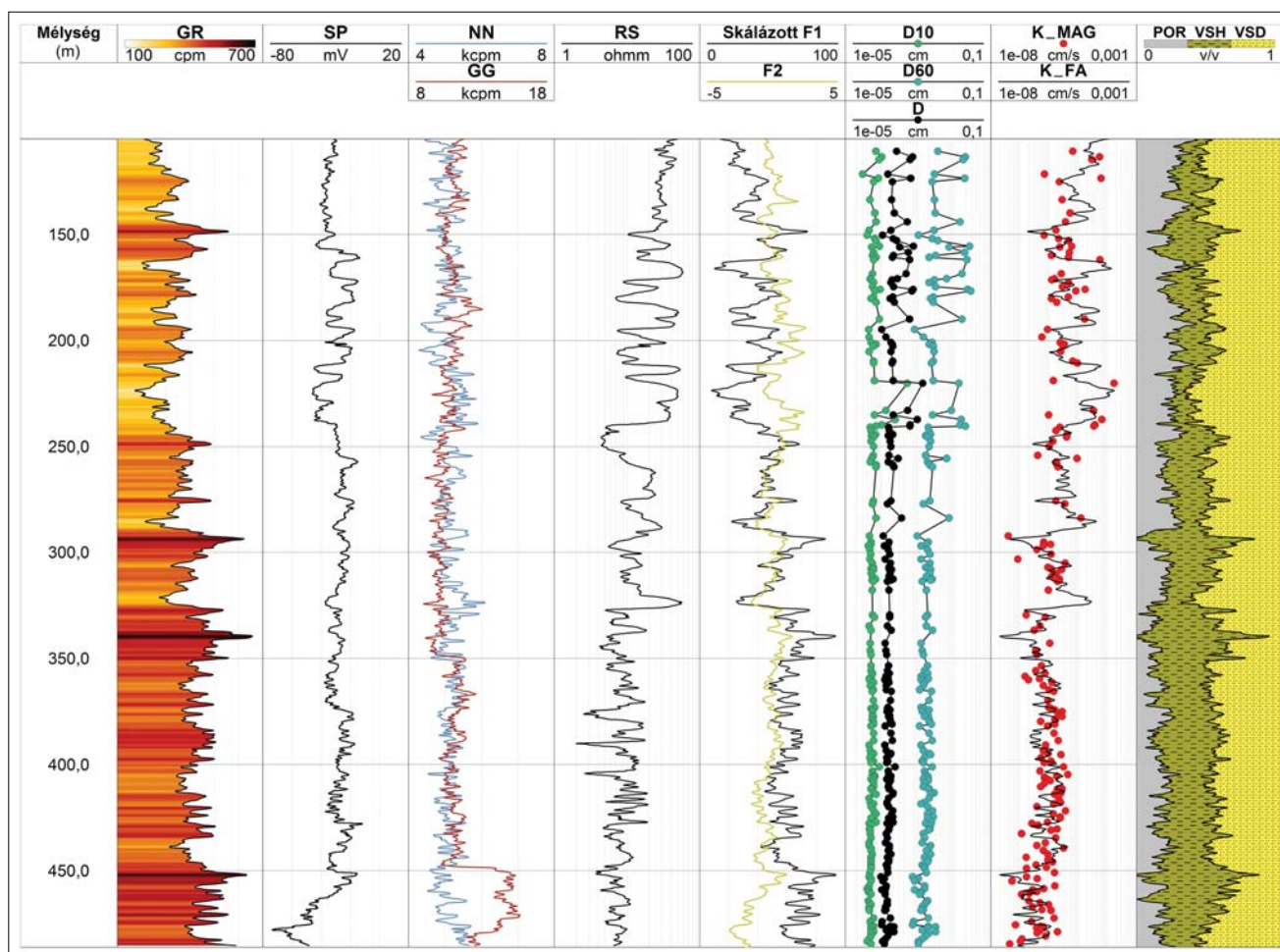
Az FL-800 jelű fúrást a Waupun (Fond du Lac megye, Wisconsin, USA) területén található ordoviciumi Sinnipee Csoport rétegtani és hidrogeológiai jellemzése céljából mélyítették. A USGS regionális vízföldtani projektjének célja az volt, hogy minél részletesebb földtani-geofizikai információt szerezzenek a felszín alatti vízkészletek gazdaságos felhasználása és védelme érdekében. Ehhez magmintákon laboratóriumi méréseket, valamint részletes fúróluk-geofizikai

és hidrogeológiai kutatásokat végeztek, melyek eredményét Dunning és Yeskis (2007) foglalta össze.

Az ordoviciumi Sinnipee Csoportot vízáadó alapkőzetnek tekintik, mely fentről lefelé a Galena, Decorah és a Platteville formációkból áll. Ezekre közvetlenül negyedidőszaki konszolidálatlan üledékek települtek vékony rétegek formájában. A vizsgált szakaszon a Sinnipee Csoport fő alkotó kőzete a dolomit és az agyagos dolomit. Kőzetmagokon végzett mérések alapján az elsődleges porozitás a dolomitban 2–4%, míg az agyagos szakaszokon maximum 10%. A dolomit tömör, melyben a repedések és a rétegzés síkjá-



**3. ábra** | Magadatokból számított szivárgási tényező és az első faktor regressziós kapcsolata a Baktalórántháza-1 fúrásban  
**Figure 3** | Regression relation between hydraulic conductivity calculated from core analysis and first factor derived from well logs measured in Baktalórántháza-1



**4. ábra** A Baktalórántháza-1 fúrásban mért karotázsszelvények, faktoranalízissel becsült első és második faktorszelvény (Skálázott F1, F2), szivárgásítényező-értékek magadatokból ( $K\_MAG$ ), faktoranalízissel becsült szivárgásítényező-szelvény ( $K\_FA$ )

**Figure 4** Well logs measured in Baktalórántháza-1 (tracks 1–4), well logs of first and second factors (track 5), hydraulic conductivity logs estimated from grain-size analysis made on core samples and factor analysis (track 7)

ban megjelenő párhuzamos elválások felelősek a másodlagos porozitásért és permeabilitásért. Ezeket a geometriai jellemzőket akusztikus lyuktelevízióval, irányított radarreflexiók, valamint fúrólukák közötti radartomográfiai mérésekkel határozták meg. Az akusztikus lyuktelevíziós mérések arra utalnak, hogy a víz elsősorban a rétegzés síkjában lévő elválások mentén áramlik. Néhány elszigetelt szakaszon a hidraulikai tesztek alapján horizontális szivárgási té-

nyezőt becsültek, melyek megfelelő egyezést mutattak a hőimpulzusos áramlásmérésből származó értékekkel. Ebben a tanulmányban az ún. „slug”-tesztekből becsült szivárgási tényezőt (Hvorslev 1951) hasonlítjuk össze a faktoranalízis eredményével.

Bontsuk fel az FL-800 fúrásban mért természetes-gamma-intenzitás- ( $GR$ ), rövid és hosszú szondahossz mellett mért neutron–neutron-intenzitás- ( $NN\_közeli$  és  $NN\_távoli$ ),

**7. táblázat** Az FL-800 fúrásban mért szelvények korrelációs mátrixa  
**Table 7** Correlation matrix of well logs measured in FL-800

	$GR$	$NN\_köz.$	$NN\_táv.$	$RES\_16$	$RES\_64$	$LAT.$	$TEMP$
$GR$	1	-0,52	-0,66	-0,65	-0,50	-0,69	-0,03
$NN\_köz.$	-0,52	1	0,59	0,46	0,40	0,47	0,12
$NN\_táv.$	-0,66	0,59	1	0,56	0,51	0,57	0,17
$RES\_16$	-0,65	0,46	0,56	1	0,92	0,98	0,36
$RES\_64$	-0,50	0,40	0,51	0,92	1	0,85	0,51
$LAT.$	-0,69	0,47	0,57	0,98	0,85	1	0,28
$TEMP$	-0,03	0,12	0,17	0,36	0,51	0,28	1

**8. táblázat** | Az FL-800 fúrásban mért szelvényekből számított faktorsúlyok  
**Table 8** | Factor loadings derived from well logs measured from FL-800

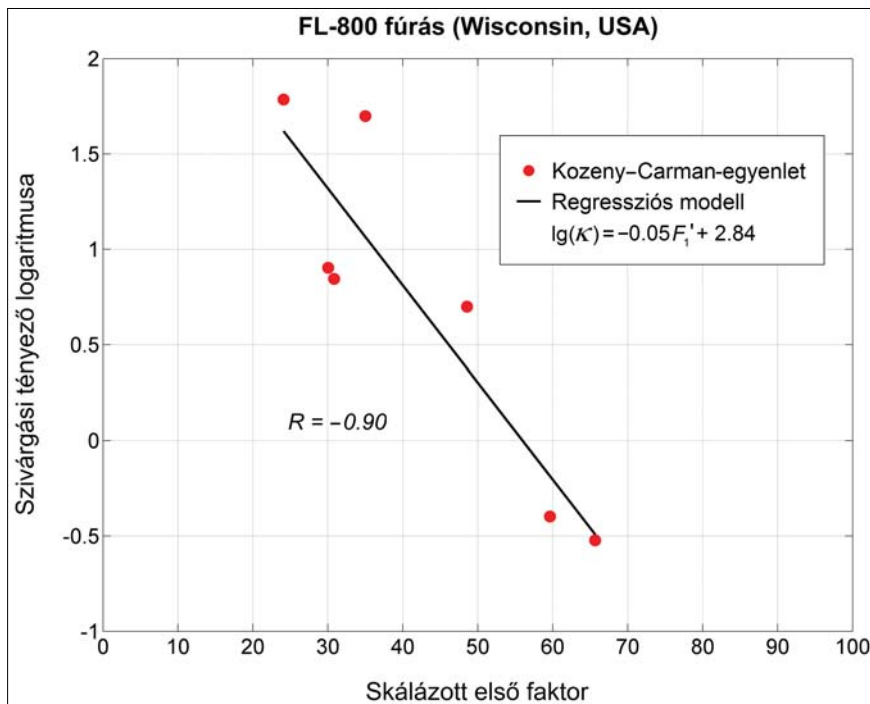
Faktor	$W^{(GR)}$	$W^{(NN-köz.)}$	$W^{(NN-táv.)}$	$W^{(RES\_16)}$	$W^{(RES\_64)}$	$W^{(LAT.)}$	$W^{(TEMP)}$
Első	-0,47	0,21	0,20	0,81	0,59	0,87	0,11
Második	-0,67	0,63	0,83	0,39	0,32	0,41	0,03
Harmadik	-0,02	0,11	0,17	0,44	0,73	0,29	0,59

fajlagosellenállás- ( $RES\_16$  – rövid normál,  $RES\_64$  – hosszú normál,  $LATERAL$  – gradiens) és hőmérséklet- ( $TEMP$ ) adatok mátrixát a (6) egyenletnek megfelelően! A faktoranalízissel feldolgozott szakaszon, amely az Egyesült Államokban használt NGVD-29 alapszínhez képest 910–750 láb (277,4–228,6 m) magasságban helyezkedik el, összesen 11298 adatot mértek. A 7. táblázatban található korrelációs mátrix a fúrólyukszelvények mérsékelt szoros kapcsolatát mutatja. A standardizált adatmátrix felbontásával három faktort számítottunk. A (11) felbontás eredményei azt mutatják, hogy a mért változók teljes varianciájának 79,1%-át az első faktor, 14,9%-át a második, a maradék 6%-át a harmadik faktor magyarázza. A faktorsúlyok a 8. táblázatban találhatóak, melyek az elsődleges porozitású kőzetekhez képest jelentős eltérést mutatnak. Az első faktor főként ellenállás-tényezőként értelmezhető, míg a litológiára vonatkozó információ megoszlik az első két faktor között. A második faktor korrelál erősebben a  $GR$  szelvényvel, ugyanakkor a második faktort a neutronszelvényvel indikált kötött víztartalom is jelentősen befolyásolja. A repedezett formációban az első faktor a fajlagos ellenállással egyenesen arányos, míg a természetes-gamma-szelvényvel fordított arányos-

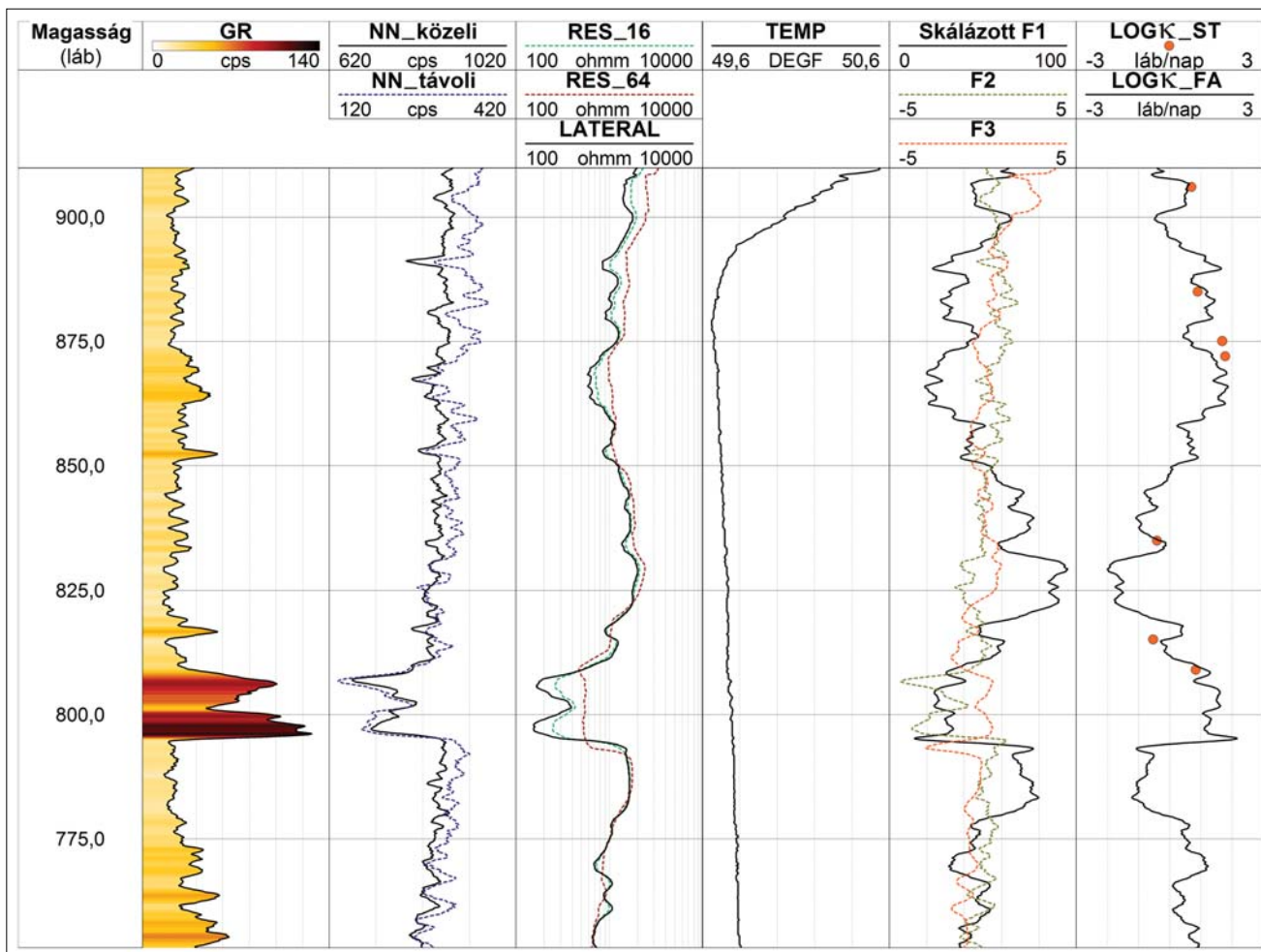
ságban áll. Mindezek mellett a küttesztekből számított szivárgási tényező és az első faktor kapcsolata erős (5. ábra), melyet az  $R = -0,90$  korrelációs együttható is igazol. A regressziós függvény  $K_0 = 1$  láb/nap ( $1 \text{ m/s} = 2,83 \cdot 10^5$  láb/nap) dimenziótlanító tényező mellett

$$\lg \kappa = -0,05 F_1 + 2,84, \quad (26)$$

ahol a 95%-os szignifikanciaszint mellett becsült regressziós együtthatók hibataromány:  $\alpha = [-0,08, -0,02]$  és  $\beta = [1,47, 4,21]$ . A Galena Dolomit és Decorah Formációk határa 810 láb (246,9 m) tengerszint feletti magasságban fut és a Platteville Formáció teteje 790 láb (240,8 m) körül található (6. ábra). A  $GR$  szelvény az agyagtartalom változásáról tájékoztat, mely maximum 40% a Decorah Formációban. A legnagyobb szivárgási tényezőjű formáció az agyagos dolomit, kb. 870 láb (265,2 m) környékén, amit áramlásméréssel is igazoltak. Ugyanitt az akusztikusimage-szelvények is sűrűn megjelenő, közel vertikális helyzetű repedéseket és rétegzés irányú elválásokat mutattak. Feltehetőleg a Decorah Formáció nagyobb effektív porozitása okozza a relatíve magasabb szivárgási tényezőt a Platteville Formáció masszív dolomitjához képest. Önmagában a kis  $NN$  beütés-

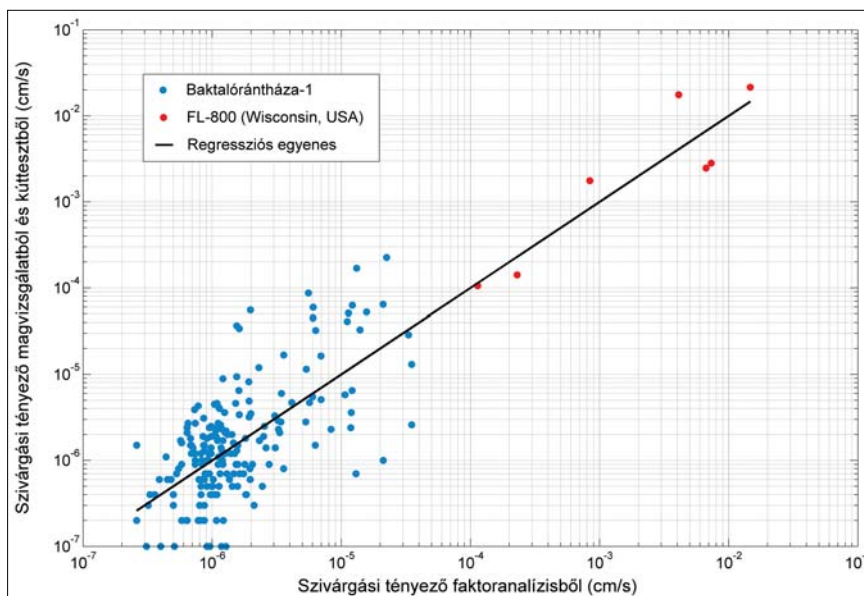


**5. ábra** | Kütteszt alapján számított szivárgási tényező és az első faktor regressziós kapcsolata az FL-800 jelű fúrásban  
**Figure 5** | Regression relation between hydraulic conductivity calculated from slug tests and first factor derived from well logs measured in FL-800



**6. ábra** Az FL-800 jelű fúrásban mért karotázsszelvények, faktoranalízissel becült első három faktorszelvény (Skálázott F1, F2, F3), a szivárgási tényező logaritmusát küttesztből ( $LOG\kappa_{ST}$ ) és faktoranalízissel becült szivárgásitényező-szelvény ( $LOG\kappa_{FA}$ )

**Figure 6** Well logs measured in FL-800 (tracks 1–4), first, second and third factor logs (track 5), hydraulic conductivity calculated from slug tests and factor analysis (track 6)



**7. ábra** Faktoranalízissel becült szivárgási tényező és a mag-, ill. küttesztadatokból származó szivárgási tényező regressziós kapcsolata

**Figure 7** Regression relation between factor analysis-derived hydraulic conductivity and hydraulic conductivity estimated from core analysis and slug tests

számok (megemelkedett látszólagos mészkőporozitás) és a nagy *GR* intenzitásértékek nagy agyagtartalmat, vagyis nem áteresztőképes kőzetet jeleznek. Mivel itt nem agyagról, hanem ordoviciumi agyagpaláról van szó, a kőzet irányított szövege az a tényező, melynek alapján az agyagos formációk a vízadók. Ez azonban nem következik sem a *GR*, sem pedig a *NN* szelvényekből, hanem kizárólag a különböző behatolású fajlagosellenállás-görbék repedezett zónabeli eltérése mutat rá a kőzet permeábilis mivoltára. Egyedül a fajlagos ellenállás csökkenése csak az agyagosság hatását mutatná. Emiatt van nagy jelentősége annak, hogy az első faktorra nemcsak a litológiai szelvények, hanem több különböző szondahosszal mért fajlagosellenállás-szelvény is jelentős hatást gyakorol. A faktoranalízis eredményeképpen kapott faktorszelvények a 6. ábra 5. oszlopában találhatóak. A 6. oszlopban a piros körökkel jelölt logaritmikusan szivárgási tényező  $LOG_{\kappa\_ST}$  értékei a „slug”-tesztekből származnak, míg a folytonos  $LOG_{\kappa\_FA}$  görbét faktoranalízissel becsültük.

## Diszkusszió

Az esettanulmányok a faktoranalízisen alapuló eljárás hatékonyságát mutatják két, egymástól eltérő felépítésű földtani környezetben. A magyarországi fúrásban megfelelő egyezést találtunk az első faktor és a mágnezésből származtatott szivárgási tényezők között. A 7. ábrán a Baktalórántháza-1 fúrásban becsült szivárgási tényező-értékek a  $10^{-7} < K < 10^{-4}$  cm/s tartományban jelentkeznek. A pleisztocén korú kőzetekben a keresztáramlás összetartozó pontjai nagyobb eltérést mutatnak a  $K_{FA} = K_{MAG}$  egyenletet ábrázoló (fekete) egyeneshez képest, míg a szóródás mértéke a kisebb szivárgási tényezőjű miocén formációban kisebb. Az USA-beli FL-800 fúrásban a faktoranalízisből és a kútesztekből becsült szivárgási tényező-értékek között még szorosabb illeszkedés jelentkezik. Itt a regressziós egyenes a  $10^{-4} < K \leq 10^{-2}$  cm/s intervallumon a  $K_{FA} = K_{ST}$  egyenlőséget mutatja. Az elvégzett szintetikus és terepi vizsgálatokból az a következtetés vonható le, hogy a statisztikus eljárás a vízadó formációk szivárgási tényezőjének meghatározására megfelelően alkalmazható.

## Összefoglalás

A tanulmányban egy többváltozós statisztikai eljárást javasolunk, mely víztároló képződményekben mért fúrólukszelvények egyidejű feldolgozásával állítja elő a szivárgási tényező folytonos szelvényét. A módszer jól alkalmazható a magminta-vételi és szivattyúzott szakaszok között a szivárgási tényező meghatározására, ill. interpolációjára. Szintetikus modellezési kísérletek azt mutatják, hogy a becslési eredmények pontosak és megbízhatók, valamint ellentmondásmentesek különböző mértékű és eloszlású adattérbeli zaj esetén is. A módszer alkalmazása során több változó mérésekből származó, nagyméretű statisztikai mintát dolgozunk fel, mellyel a becslési hiba hatékonyan csökkenthető az egyetlen szelvényen alapuló kiértékelési módszerekkel szemben. A statisztikus eljárás különösen hatékony lehet

több fúrás adatrendszerének faktoranalízise esetében, mely alkalmas a szivárgási tényező nagyobb területre vonatkozó térbeli változásának nyomon követésére.

A tanulmányban bemutatott példák megerősítik a (13) tapasztalati összefüggés érvényességét, az összefüggés regressziós együtthatóinak az adott mérési területre történő meghatározása javasolható. A tanulmányban közölt formula mag- vagy egyéb kúteszt- (például próbaszivattyúzási) adatok hiányában is megfelelő nagyságrendi becslést ad a szivárgási tényezőre. Korábbi eredményeinkre alapozva a módszert elsősorban törmelékeny víztárolók kiértékelésére javasoljuk, ahol az első faktor és az agyagtartalom között egyenes arányosság, ill. ugyanezen faktor és a szivárgási tényező között erős fordított arányosság áll fenn. A tanulmányban példával demonstráltuk a statisztikus eljárás alkalmazhatóságát repedezett kőzetekben is. Szemecseközi porozitással rendelkező kőzetekben az első faktor főleg az agyagtartalomra érzékeny, ahol a faktorsúlyok pozitív korrelációt mutatnak a litológiai szelvényekkel. Másodlagos vagy vegyes porozitású kőzetekben, ahol az ásványos összetétel és a pórusstruktúra összetettebb, az első faktortól eltérő tulajdonságok is befolyásolhatják (például a pórusstartalom vagy másodlagos permeabilitás). A repedezett kőzetekhez kapcsolódó faktorok értelmezését a jövőbeli kutatások során tovább kell vizsgálni. Jelen eredmények azt mutatják, hogy a fúróluk-geofizikai adatok faktoranalízise hasznos információt szolgáltat a vízadó kőzetek szivárgási jellemzőiről, ami jelentősen javíthatja a hidrogeológiai modell megbízhatóságát.

## Köszönetnyilvánítás

A szerző mint a PD109408 sz. Ifjúsági OTKA témavezetője köszönetet mond az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatásáért. Emellett köszönetét fejezi ki a Magyar Tudományos Akadémiának a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásáért. Külön köszönetet mond Dobróka Mihály professzornak előremutató tanácsiért, Kiss Anettnek, a tanulmány előkészítésében nyújtott segítségével, Bucsi Szabó Lászlónak és Latrán Bélának a Baktalórántháza-1 fúrás terepi adatainak és a mérési területre vonatkozó speciális ismeretek átadásáért, Drahos Dezsőnek és Zilahi-Sebess Lászlónak a tanulmány lektorálása során adott hasznos javaslatáért, valamint Charles P. Dunningnak, aki hozzájárult a FL-800 fúrás karotázis-adatrendszerének felhasználásához és közzétételéhez.

## A tanulmány szerzője

Szabó Norbert Péter

## Hivatkozások

- Alger R. P. 1966: Interpretation of electric logs in fresh water wells in unconsolidated formations. SPWLA 7th Annual Logging Symposium Transactions, pp. 1–25
- Alger R. P., Harrison C. W. 1989: Improved fresh water assessment in sand aquifers utilizing geophysical well logs. The Log Analyst 30, 31–44

- Archie G. E. 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *SPE, Transactions of the AIME* 146, 54–62
- Asfahani J. 2014: Statistical factor analysis technique for characterizing basalt through interpreting nuclear and electrical well logging data (case study from Southern Syria). *Applied Radiation and Isotopes* 84, 33–39
- Bartlett M. S. 1950: Tests of significance in factor analysis. *British Journal of Psychology* 3, 77–85
- Bartlett M. S. 1953: Factor analysis in psychology as a statistician sees it. *Nordisk Psykologi's Monograph Series* 3, Almqvist and Wiksell, Uppsala, pp. 23–34
- Bear J. 1972: *Dynamics of fluids in porous media*. Dover Publications, New York
- Benson C. H., Trast J. M. 1995: Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. *Clays and Clay Minerals* 43, 669–681
- Bronstein N., Semendyayev K. A., Musiol G., Muehlig H. 2007: *Handbook of Mathematics*, 5. kiadás, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Csókás J. 1995: Vízadó rétegek jellemző hozamának és a vízminőségének meghatározása geofizikai fűrőlyukszelvények alapján. *Magyar Geofizika* 35, 176–203
- Dlubac K., Knight R. 2010: An assessment of the use of the Kozeny-Carman relationship to estimate permeability in anisotropic materials from NMR data. *SEG Denver, 2010 Annual Meeting*, pp. 2644–2648
- Dobróka M., Gyulai Á., Ormos T., Csókás J., Dresen L. 1991: Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded in an underground coal mine. *Geophysical Prospecting* 39, 643–665
- Drahos D. 2005: Inversion of engineering geophysical penetration sounding logs measured along a profile. *Acta Geodetica et Geophysica Hungarica* 40, 193–202
- Dunning C. P., Yeskis D. J. 2007: Lithostratigraphic and hydrogeologic characteristics of the Ordovician Sinnipee Group in the vicinity of Waupun, Fond du Lac County, Wisconsin, 1995–96. *Scientific Investigations Report 2007–5114*, USGS, Reston
- Guérin R. 2005: Borehole and surface-based hydrogeophysics. *Hydrogeology Journal* 13, 251–254
- Hvorslev M. J. 1951: Time lag and soil permeability in groundwater observations. *Waterways Experimentation Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Bulletin* 36, Wicksburg
- Idrissy E. H. E., De Smedt F. 2007: A comparative study of hydraulic conductivity estimations using geostatistics. *Hydrogeology Journal* 15, 459–470
- Juhász J. 2002: *Hidrogeológia*. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Jöreskog K. G. 2007: Factor analysis and its extensions. In: Cudeck R., MacCallum R. C. (szerk.) *Factor analysis at 100 historical developments and future directions*. Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey
- Kaiser H. F. 1958: The varimax criterion for analytical rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23, 187–200
- Khalil M. A., Ramalho E. C., Monteiro Santos F. A. 2011: Using resistivity logs to estimate hydraulic conductivity of a Nubian sandstone aquifer in southern Egypt. *Near Surface Geophysics* 9, 349–355
- Larionov V. V. 1969: Radiometry of boreholes (orosz nyelven). Nedra, Moszkva
- Lawley D. N., Maxwell A. E. 1962: Factor analysis as a statistical method. *The Statistician* 12, 209–229
- Móri T. 1999: Főkomponens- és faktoranalízis. *ELTE Valószínűségelméleti és Statisztika Tanszék, egyetem jegyzet*, pp. 1–13
- Odong J. 2013: Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. *International Journal of Agriculture and Environment* 1, 1–8
- Perdomo S., Ainchil J. E., Kruse E. 2014: Hydraulic parameters estimation from well logging resistivity and geoelectrical measurements. *Journal of Applied Geophysics* 105, 50–58
- Ross J., Ozbek M., Pinder G. F. 2007: Hydraulic conductivity estimation via fuzzy analysis of grain size data. *Mathematical Geology* 39, 765–780
- Roy J., Lubczynski M. 2003: The magnetic resonance sounding technique and its use for groundwater investigations. *Hydrogeology Journal* 11, 455–465
- Sallam O. M. 2006: Aquifers parameters estimation using well log and pumping test data, in arid regions – Step in sustainable development. *The 2nd International Conference on Water Resources and Arid Environment*, pp. 1–12
- Seth V., Srivardhan V., Maiti S. 2015: Evaluation of formation shaliness using factor analysis of site-U1344A of IODP expedition 323 in the Bering Sea. *77th EAGE Conference and Exhibition, Extended abstract*, pp. 1–4
- Shevnin V., Delgado-Rodríguez O., Mousatov A., Ryjov A. 2006: Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. *Geofísica Internacional* 45, 195–207
- Slater L. 2007: Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: From petrophysical properties to aquifer geometries – A review. *Surveys in Geophysics* 28, 169–197
- Srisutthiyakorn N., Mavko, G. 2015: An Improved Kozeny–Carman for Irregular Pore Geometries. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015*, 3015–3019
- Szabó N. P. 2011: Shale volume estimation based on the factor analysis of well-logging data. *Acta Geophysica* 59, 935–953
- Szabó N. P., Dobróka M., Drahos D. 2012: Factor analysis of engineering geophysical sounding data for water saturation estimation in shallow formations. *Geophysics* 77, WA35–WA44
- Szabó N. P., Kormos K. 2012: Édesvíztároló rétegek agyagtartalmának meghatározása fűrőlyukszelvények faktoranalízise alapján. *Magyar Geofizika* 53, 80–90
- Szabó N. P., Dobróka M. 2013a: Float-encoded genetic algorithm used for the inversion processing of well-logging data. In: Michalski A. (szerk.) *Global optimization: Theory, developments and applications*. Mathematics Research Developments, Computational Mathematics and Analysis Series, Nova Science Publishers, New York
- Szabó N. P., Dobróka M. 2013b: Extending the application of a shale volume estimation formula derived from factor analysis of wireline logging data. *Mathematical Geosciences* 45, 837–850
- 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
- Timur A. 1968: An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationships. *SPWLA 9th Annual Logging Symposium*, 1968-J
- 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
- Wentworth C. K. 1922: A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30, 377–392