

Faktoranalízisen alapuló új statisztikus eljárás a szivárgási tényező meghatározására

SZABÓ NORBERT PÉTER^{1,2}

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 3515, Miskolc-Egyetemváros

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

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

Abstract

A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kifejlesztett faktoranalízisen alapuló statisztikus eljárással korábban az agyagtartalmat határoztuk meg a fúrólúkszervényekből. Folytatva az alkalmazási lehetőségeket, ebben a tanulmányban a víztárolók agyagtartalmával szorosan összefüggő mennyiséget a szivárgási tényezőt származtatjuk a faktorszervényekből. Szintetikus modellkísérleten és terepi alkalmazásokon keresztül 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 vízáradó formációk hidraulikai tesztjeiből származó szivárgási tényezők értékeivel. A fúrólúkszervények egyidejű statisztikai feldolgozásával folytonos in-situ információ nyerhető a szivárgási tényezőről a fúrólúk teljes hossza mentén, mely 2-D faktoranalízis alkalmazása esetén kiterjeszhető a szomszédos fúrások közötti térrészre. A tanulmány célja egy új független szervényértelmezési eljárás bemutatása, mely hatékonyan felhasználható a hidrogeofizikai kutatások során.

Norbert P. Szabó: 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 2-D 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.

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 fúrólukgeofizikai mérések tartományára szorítkozunk, ahol a szivárgási tényezőt a fúróluk szűk környezete által befolyásolt karotázs szelvényadatokból többváltozós statisztikai eljárással származtatjuk. Porózus közegben a szivárgási tényezőt a szemcsemérettel vagy az effektív porúsátmérővel, 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 és De Smedt 2007, Ross és szerzőtársai 2007).

A fúrólukgeofizikai 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 nukleáris rezonancia szelvényezéssel (NMR) határozzák meg. E módszer felszíni geofizikai megfelelőjét a mágneses rezonancia szondázást egyre szélesebb körben használják a hidrogeofizikában is (Roy és Lubczynski 2003). Walsh és szerzőtársai (2013) az NMR eljárást nemrégiben környezeti és hidrogeológiai vizsgálatok számára mélyített kisátmérőjű fúrólukakra adaptálták. Bár az NMR szonda meglehetősen drága, előnye, hogy nem csak az effektív porozitásról, hanem a porusméret-eloszlásról és a porusokat kitöltő fluidumok fizikai tulajdonságairól is informál, mellyel 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, mely lehetővé tette a szivárgási tényező fúrólukszelvényekből való számítását. Az édesvíztárolók kiértékelésének mélyfúrési 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, például a fajlagos ellenállás és porozitás

szelvényeken alapuló megközelítést Khalil és szerzőtársai (2011) alkalmazták, valamint inverziós módszert Drahos (2005), Szabó és Dobróka (2013a) publikáltak.

A fenti adatfeldolgozási módszerek sikeres alkalmazása függ a karotázs szonda-válaszegyenletek és a zónaparaméterek megfelelő megválasztásától. Előfordul, hogy a modell és az adatok is jelentős hibával (vagy többértelműséggel) terheltek. Az értelmezés eredményei gyakran jelentősen eltérnek (vagy ellentmondanak) a magmintákon meghatározottakkal, így a szivárgási tényező becslési hibája elérheti az egy-másfél nagyságrendet. A bizonytalanság csökkentésére a felszíni geofizikai és a karotázs méréseket megfelelően kombinálják. Perdomo és szerzőtársai (2014) a hidraulikus paramétereket az egyenáramú geoelektromos és fűrőlyukbeli fajlagos ellenállás mérések együttes alkalmazásával becsülték. Slater (2007) a felszíni indukált polarizációs méréseket fűrőlyukbeli áramlásméréssel, radartomográfiai és neutron-porozitásszelvényezéssel kombinálta. Guérin (2005) az elektromágneses módszerek alkalmazásának előnyeit hangsúlyozta a vízkutatásban. Dobróka és szerzőtársai (1991) felszínalatti bányák hidrogeológiai felmérése során a fűrőlyukbeli szeizmikus és bányabeli geoelektromos adatok együttes inverziójával megbecsülték a szeizmikus sebességet és fajlagos ellenállást, kiszámították a vízzáró rétegek vastagságát, valamint kimutatták 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 karotázs szelvényeket egyetlen eljárásban dolgozza fel a szivárgási tényező vertikális eloszlásának meghatározása céljából. A faktoranalízist általában nagyméretű statisztikai problémák változós számának csökkentésére és az adatrendszerben elrejtett, nem mérhető információk kinyerésére használják (Lawley és Maxwell 1962). A faktoranalízis földtudományi alkalmazásai azt mutatják, hogy a mérési adatokból származtatott új statisztikai változók (faktorok) a földtani szerkezetek számos közetfizikai jellemzőivel jól korrelálnak. Szabó (2011) üledékes kőzetek agyagtartalmának becslésére faktoranalízisen alapuló módszert vezetett be, mely több hazai és tengerentúli szénhidrogénmező fúrásaiban alkalmazhatónak bizonyult (Szabó és Dobróka 2013b). E tanulmányok azt mutatják, hogy a fűrőlyukszelvények varianciájának legnagyobb részéért felelős (első) faktor jó agyagindikátor, mellyel a litológiai egységek jól elkülöníthetők. A fenti eljáráshoz hasonlóan mérnökszondázási adatok faktoranalízisével a felszínközeli rétegek víztelítettségét határozhatjuk meg (Szabó és szerzőtársai 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, melynek eredményeként általános (közelítő) 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 neutron-porozitás adatokat, valamint a rövid és hosszú normál szondával mért fajlagos

ellenállás 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 porozitású 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 kútteszt 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 víztelítettségtől függ. A szivárgási tényező egyenesen arányos a permeabilitással, mely a vízadó kőzet átteresztőképességét jellemzi. E kapcsolódó mennyiségek a fúrólukgeofizikai 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, Φ a réteg porozitása, ρ_w (g/cm³) a pórusfolyadék sűrűsége, μ (g/cm·s) a dinamikai viszkozitás és g (cm/s²) 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 mágneses rezonanciamérésekből származtatták a Kozeny-Carman egyenlet alapparamétereit, majd az új modell egyenletet vízzel telített agyagos homokkő mintákon tesztelték. E vizsgálatok azt mutatták, hogy a Kozeny-Carman egyenlet megfelelő becslést ad anizotróp közegben is a szivárgási tényező értékére. Konzolidálatlan üledékes víztárolók szivárgási tényezője Kozeny-Carman modell alapján történő meghatározása, mely a szemcseméret és a porozitás értékének ismeretén alapul, tovább javítható a kompaktáció hatásának a figyelembevételével, mely a cementációs kitevő, tortuozitási együttható és egyéb

texturális jellemzők bevonásával lehetséges. A (2) egyenletben szereplő d (cm) domináns szemcseátmérő szemeloszlás vizsgálatból 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 meghatározhatók 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

$$D_{il} = \mathbf{d}_i^l, \quad (4)$$

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 transzponált jelölése). A dimenziócsökkentés során a mért változókénál 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

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

ahol Ψ a hibavarianciák diagonális mátrixa, mely a mérési változók variációjának közös faktorokkal nem értelmezhető részét képviseli. A faktorszelvények számítása érdekében először a faktorsúlyokat és a hibavarianciákat az alábbi célfüggvény minimalizálásával egyszerre becsüljük meg (Móri 1999)

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

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

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

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

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

ahol \mathbf{F} mátrix oszlopai a faktorok különböző mélységpontoknál becsült értékeit (faktorszelvényeket) tartalmazzák. Például az első oszlop az első faktort, mely a mérési adatok variációját 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 az $\mathbf{W}\mathbf{W}^T = \mathbf{W}^*\mathbf{W}^{*T}$ 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 előállítása 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 és szerzőtársai 2007)

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

ahol \mathbf{U} és \mathbf{V} $K \times K$ méretű ortogonális mátrixok, továbbá \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 variációját az \mathbf{S} mátrix főátlóbeli elemeinek összege adja, míg a j -edik faktorra eső relatív varianciarányad

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

A faktorok és a vízáradó rétegek közetfizikai paraméterei regresszió analízissel hozhatók egymással kapcsolatba. Szabó és szerzőtársai (2014) nemlineáris (exponenciális) kapcsolatot találtak az első faktor (az \mathbf{F} mátrix első oszlopa) és konszolidálatlan vízáradó rétegek agyagtartalma között. A regressziós függvény együtthatói különböző kelet-magyarországi területeken közelítőleg megegyeztek. Elsődleges porozitású kőzetek szivárgási tényezője az agyagtartalommal fordítottan arányos (Benson és Trast 1995, Sallam 2006, Shevlin és szerzőtársai 2006). Ez 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) dimenziótlanszivárgási tényező tizesalapú logaritmusának lineáris kapcsolatát mutatják

$$-\lg(\kappa) = \alpha F'_1 + \beta, \quad (13)$$

ahol α és β a mérési területre jellemző konstansok és F'_1 a tetszőleges intervallumba skálázott első faktor. A léptékváltást az alábbi formulával könnyen elvégezhetjük

$$F'_1 = F'_{1,min} + \frac{F'_{1,max} - F'_{1,min}}{F_{1,max} - F_{1,min}} (F_1 - F_{1,min}), \quad (14)$$

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 koefficienszt használjuk

$$R = \frac{\text{cov}(\kappa, F'_1)}{\sigma_\kappa \sigma_{F'_1}}, \quad (15)$$

ahol cov a minta-kovariancia operátor, σ_κ és $\sigma_{F'_1}$ a szivárgási tényező és a skálázott első faktor tapasztalati szórása. Szintetikus modellkísérletek esetén ismert petrofizikai modellt feltételezünk. Ekkor a modellen számított (hibátlan) és a zajjal terhelt (kvázi-mért) adatok eltérését a relatív adattávolsággal jellemezhetjük

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

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 modell kísérletek

A faktoranalízisen alapuló eljárást elsőként szimulált geológiai környezetben teszteljük. A vizsgált üledékes formáció közetfizikai modelljét ismertnek feltételezzük, melynek paraméterei az effektív porozitás (POR), elárasztott zóna víztelítettsége ($SX0$), érintetlen zóna víztelítettsége (SW), agyagtartalom (VSH), homok tartalom (VSD), domináns szemcseátmérő (D) és a szivárgási tényező (K). A konszolidálatlan üledéket homok és agyag rétegek építi fel, melyek pórusterét édesvíz és gáz (levegő) tölti ki. A levegőteltettség az $SG=1-SW$ egyenlethől 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 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:

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

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

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

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

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

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

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

A (17)–(22) egyenletekben a térfogatjellemző mennyiségek mellett további zónaparaméterek is szerepelnek, melyek a kőzetmátrix, agyag és a pórusfolyadék fizikai tulajdonságait fejezik ki. A zónaparaméterek értékét a víztároló szakaszon állandónak feltételezzük (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 kvázi-mért 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 teljesítőképessége, stabilitása és zajérzékenysége vizsgálható.

A faktoranalízisen alapuló eljárást elsőként szintetikus modellen számított szelvényadatokon teszteljük. A modellparaméterek (POR , $SX0$, SW , VSH , VSD) aktuális értékeinek (12)–(17) egyenletekbe való helyettesítésével hatféle szelvénytípust (GR , SP , DEN , NN , RS , RD) számítunk 250 mélységpontban, így az adatok száma 1,500. A kvázi-mért adatrendszer 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 azt mutatja, hogy 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 fajlagos ellenállás szelvényekkel korrelál. Ezek az eredmények összhangban vannak mélyfúrásokban kapott korábbi eredményekkel (Szabó 2011, Szabó és Dobróka 2013b, Szabó és szerzőtársai 2014, Asfahani 2014). A faktorsúlyok (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 regresszió analízis eredményeként kapott (13) modell egyenlet

$$\lg(\kappa) = -0.033F'_i - 2.72, \quad (24)$$

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. oszlop). A (2) egyenletből számított egzakt (K_{KC}) és a faktoranalízissel becsült (K_{FA}) szivárgási tényező 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 adattávolságot 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 %-hoz 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

kismértékű 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-Bereg 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 találhatóak, döntően homokok, melyben geoelektromos módszerrel csak a szemcseméret változását lehetett nyomon követni. A fúrólukszelvények 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 fúrólukszelvények 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 független 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-gamma intenzitás (GG) és neutron-neutron intenzitás (NN), melyeket közös statisztikai eljárásban dolgozunk fel. A statisztikai minta teljes adatszám 19,075. 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 becsült 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 (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 neutron szelvényből határozzuk meg. A (20) válaszegyenletben szereplő zónaparamétereket a neutron-neutron-gamma-gamma keresztmetszeteiből 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

$$\lg(\kappa) = -0.046F'_1 - 3.38 \quad (25)$$

alakban írható fel, ahol a regressziós együtthatók 95 %-os szignifikancia szint mellett: $\alpha = [-0.052, -0.041]$ és $\beta = [-3.66, -3.11]$. A fúrásban mért karotázs szelvényeket 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 előbbit 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 és szerzőtársai 2014). Az utolsó oszlopban VSH a Larionov-féle agyagtartalom szelvényt jelöli. A porozitást (POR) a NN és GR szelvényből, míg a homoktartalmat (VSD) a (23) egyenletből számítjuk. Mivel a rétegek a teljes szakaszon vízzel telítettek, ezért az elárasztott és érintetlen zóna víztelítettsége 100 % ($SX0=SW=1$). Az ötödik 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} szivárgási tényező értékeket (7. oszlop). A faktoranalízissel meghatározott folytonos szivárgási tényező szelvényt a K_{FA} görbe ábrázolja. A két független módszerrel meghatározott szivárgási tényező értékek szoros illeszkedést mutatnak.

Faktoranalízis és kúteszt eredmények összehasonlítása

Az FL-800 jelű fúrást a Waupun (Fond du Lac megye, Wisconsin, USA) területén található ordovíciumi Sinnipee Csoport rétegtani és hidrogeológiai jellemzése céljából mélyítették. A USGS regionális vízföldtani projektjének célja az volt, hogy minél részletesebb földtani-geofizikai információt szerezzenek a felszínalatti vízkészletek gazdaságos felhasználása és védelme érdekében. Ehhez magmintákon laboratóriumi méréseket valamint részletes fúrólukgeofizikai és hidrogeológiai kutatásokat végeztek, melynek eredményét Dunning és Yeskis (2007) foglalta össze.

Az ordovíciumi Sinnipee Csoportot vízadó 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 síkjában megjelenő párhuzamos elválások felelősek a másodlagos porozitásért és permeabilitásért. Ezeket a geometriai jellemzőket akusztikus lyuktelevízióval, irányított radar-reflexiók, valamint fúrólukák közötti radar-tomográfiai 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 tényezőt 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 $NN_{távoli}$), fajlagos ellenállás (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 alapszinthez képest 910–750 láb (277.4–228.6 m) magasságban helyezkedik el, összesen 11,298 adatot mértek. A 7. táblázatban található korrelációs mátrix a fúrólukaszelvények mérsékelt szoros kapcsolatát mutatja. A standardizált adatmátrix felbontásával három faktort számítunk. 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 találhatók, 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 neutron-szelvényvel indikált kötött víztartalom is jelentősen befolyásolja. A repedezett formációban az első faktor a fajlagos ellenállással egyenesen arányos, míg a természetes gamma szelvényvel fordított arányosságban áll. Mindezek mellett a küttesztekből számított szivárgási tényező és az első faktor kapcsolata erős (5. ábra), melyet a $R=-0.90$ korrelációs együttható is igazol. A regressziós függvény $K_0=1$ láb/nap ($1 \text{ m/s} = 2.83 \cdot 10^5$ láb/nap) dimenzióatlanító tényező mellett

$$\lg(\kappa) = -0.05F_1' + 2.84, \quad (26)$$

ahol a 95 %-os szignifikancia szint mellett becsült regressziós együtthatók hibatarományai: $\alpha = [-0.08, -0.02]$ 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, melyet áramlásméréssel is igazoltak. Ugyanitt az akusztikus image 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* beütésszámok (megemelkedett látszólagos mészkő-porozitás) és a nagy *GR* intenzitás értékek nagy agyagtartalmat, vagyis nem áteresztőképes kőzetet jeleznek. Mivel itt nem agyagról hanem ordoviciumi agyagpaláról van szó a kőzet irányított szövete az a tényező, ami alapján az agyagos formációk a vízádók. Ez azonban nem következik sem a *GR* sem pedig a *NN* szelvényekből, hanem kizárólag a különböző behatolású fajlagos ellenállás görbék repedezett zónabeli eltérése mutat rá a kőzet permeábilis mivoltára. Egyedül a fajlagos ellenállás csökkenés csak az agyagosság hatását mutatná. Emiatt van nagy jelentősége annak, hogy az első faktorra nemcsak a litológiai szelvények, hanem több különböző szondahosszal mért fajlagos ellenállás szelvény is jelentős hatást gyakorol. A faktoranalízis eredményeképpen kapott faktorszelvények a 6. ábra ötödik oszlopában találhatóak. A hatodik oszlopban a piros körökkel jelölt logaritmikus szivárgási tényező $LOG\kappa_{ST}$ értékek a „slug”-tesztekből származnak, míg a folytonos $LOG\kappa_{FA}$ görbét faktoranalízissel becsültük.

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 mágalemezéből 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 keresztábrán 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 vízádó formációk szivárgási tényezőjének meghatározására megfelelően alkalmazható.

Összefoglalás

A tanulmányban egy többváltozós statisztikai eljárást javasolunk, mely víztároló képződményekben mért fűrőlyukszelvények egyidejű feldolgozásával állítja elő a szivárgási tényező folytonos szelvényét. A módszer jól alkalmazható a magmintavételi és szivattyúzott szakaszok között a szivárgási tényező meghatározására, ill. interpolációjára. Szintetikus modellezési kísérletek azt mutatják, hogy a becslési eredmények pontosak és megbízhatók, valamint ellentmondás-mentesek különböző mértékű és eloszlású adattérbeli zaj esetén is. A módszer alkalmazása során több változó méréséből 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, melynek regressziós együtthatóit javasolt az adott mérési területre meghatározni. A tanulmányban közölt formula mag- vagy egyéb kútteszt (például próbaszivattyúzási) adatok hiányában is megfelelő nagyságrendi becslést ad a szivárgási tényezőre. Korábbi eredményeinkre alapozva a módszert elsősorban törmelékes 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. Szemcseközi 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 faktort más a litológiától eltérő tulajdonságok is befolyásolhatják (például a pórustartalom vagy másodlagos permeabilitás). A repedezett kőzetekhez kapcsolódó faktorok értelmezését a jövőbeli kutatások során tovább kell vizsgálni. Jelen eredmények azt mutatják, hogy a fűrőlyukgeofizikai adatok faktoranalízise hasznos információt szolgáltat a vízáadó kőzetek szivárgási jellemzőiről, mely 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 Professzor Úrnak előremutató tanácsáért, Kiss Anettnek, a tanulmány előkészítésében nyújtott segítségéért, 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 javaslataiért, valamint Charles P. Dunningnak, aki hozzájárult a FL-800 fúrás karotázs adatrendszerének felhasználásához és közzétételéhez.

Hivatkozások

- Alger R. P., 1966: Interpretation of electric logs in fresh water wells in unconsolidated formations. SPWLA 7th Annual Logging Symposium Transactions, 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, 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
- Bronshtein 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 fúrólýukszelvények 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*, 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 ground-water observations. *Waterways Experimentation Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Bulletin* 36, Wicksburg
- Idrýsy 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. 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 (oroszi 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, 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, 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, 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. 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

Táblázatok

1. táblázat: Szintetikus modellkísérletek során alkalmazott zónaparaméterek

Table 1. Groundwater-zone parameters used for synthetic modeling experiments

Zónaparaméter	Definíció	Szimbólum	Konstans	Mértékegység
Természetes- γ 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 ³
	Agyag	<i>DESH</i>	2.5	g/cm ³
	Homok	<i>DESD</i>	2.65	g/cm ³
	Gáz (levegő)	<i>DEG</i>	$1.2 \cdot 10^{-3}$	g/cm ³
Fajlagos ellenállás	Iszapfiltrátum	<i>RMF</i>	8	ohmm
	Pórus-fluidum	<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	μ	0.019	g/cm·s
	Nehézségi gyorsulás	<i>g</i>	981	cm/s ²

2. táblázat: Szintetikus modellen számított fúrólúkszervények korrelációs mátrixa

Table 2. Correlation matrix of noisy well logs calculated on synthetic model

	SP	GR	DEN	NN	RS	RD
SP	1	0.97	0.56	-0.84	-0.82	-0.80
GR	0.97	1	0.56	-0.86	-0.84	-0.82
DEN	0.56	0.56	1	-0.46	-0.51	-0.49
NN	-0.84	-0.86	-0.46	1	0.71	0.69
RS	-0.82	-0.84	-0.51	0.71	1	0.98
RD	-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

4. táblázat: Faktoranalízis zajérzékenységi vizsgálata különböző mértékű zajjal terhelt szintetikus karotázs adatrendszerek felhasználásával

Table 4. Results of noise sensitivity tests of factor analysis using several noisy synthetic well-logging data sets

Zaj	D_d (%)	$W^{(SP)}$	$W^{(GR)}$	$W^{(DEN)}$	$W^{(NN)}$	$W^{(RS)}$	$W^{(RD)}$	α_{min}	α	α_{max}	β_{min}	β	β_{max}	$R^{(F_1',lgk)}$
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
	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
Gauss-eloszlás és kiugró adatok	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

5. táblázat: 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: 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

7. táblázat: FL-800 fúrásban mért szelvények korrelációs mátrixa

Table 7. Correlation matrix of well logs measured in FL-800

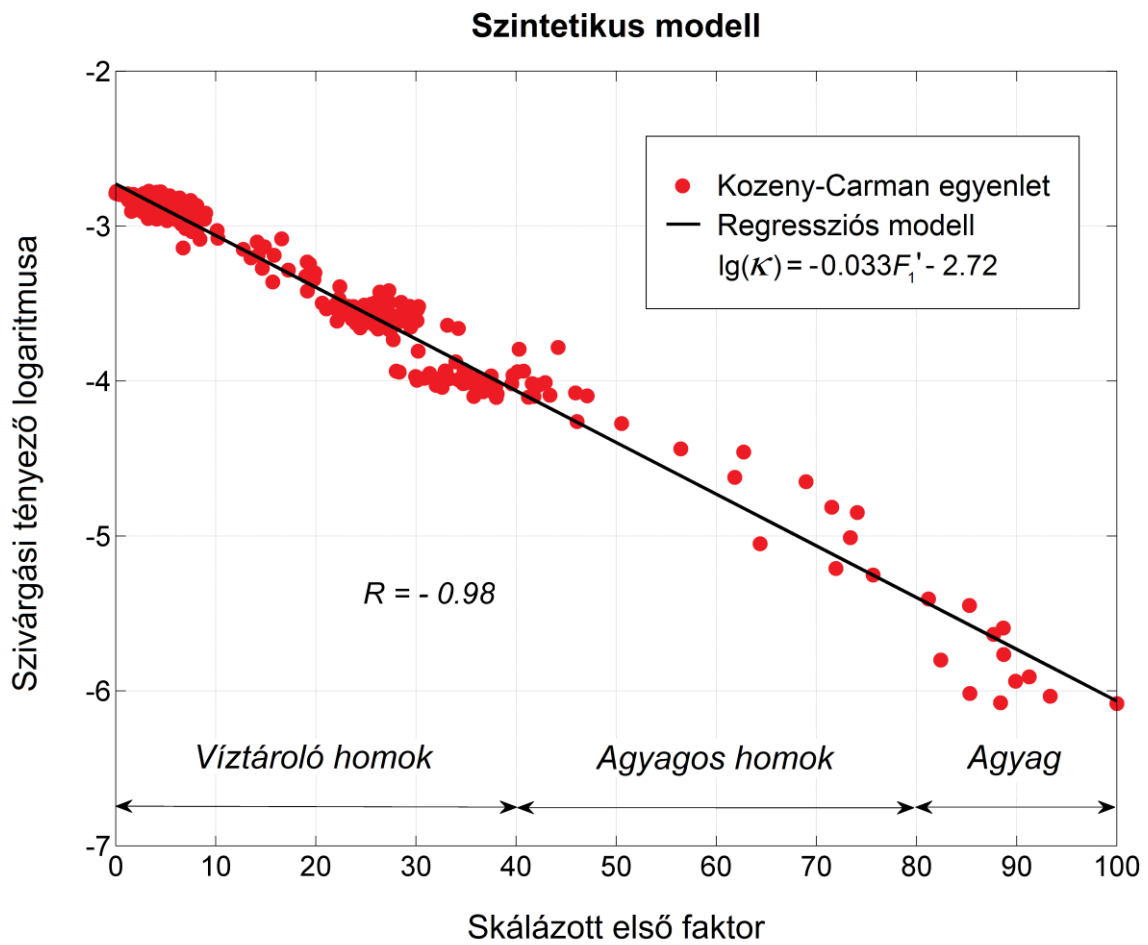
	GR	NN-köz.	NN-táv.	RES_16	RES_64	LAT.	TEMP
GR	1	-0.52	-0.66	-0.65	-0.50	-0.69	-0.03
NN-köz.	-0.52	1	0.59	0.46	0.40	0.47	0.12
NN-táv.	-0.66	0.59	1	0.56	0.51	0.57	0.17
RES_16	-0.65	0.46	0.56	1	0.92	0.98	0.36
RES_64	-0.50	0.40	0.51	0.92	1	0.85	0.51
LAT.	-0.69	0.47	0.57	0.98	0.85	1	0.28
TEMP	-0.03	0.12	0.17	0.36	0.51	0.28	1

8. táblázat: FL-800 fúrásban mért szelvényekből számított faktorsúlyok

Table 8. Factor loadings derived from well logs measured from FL-800

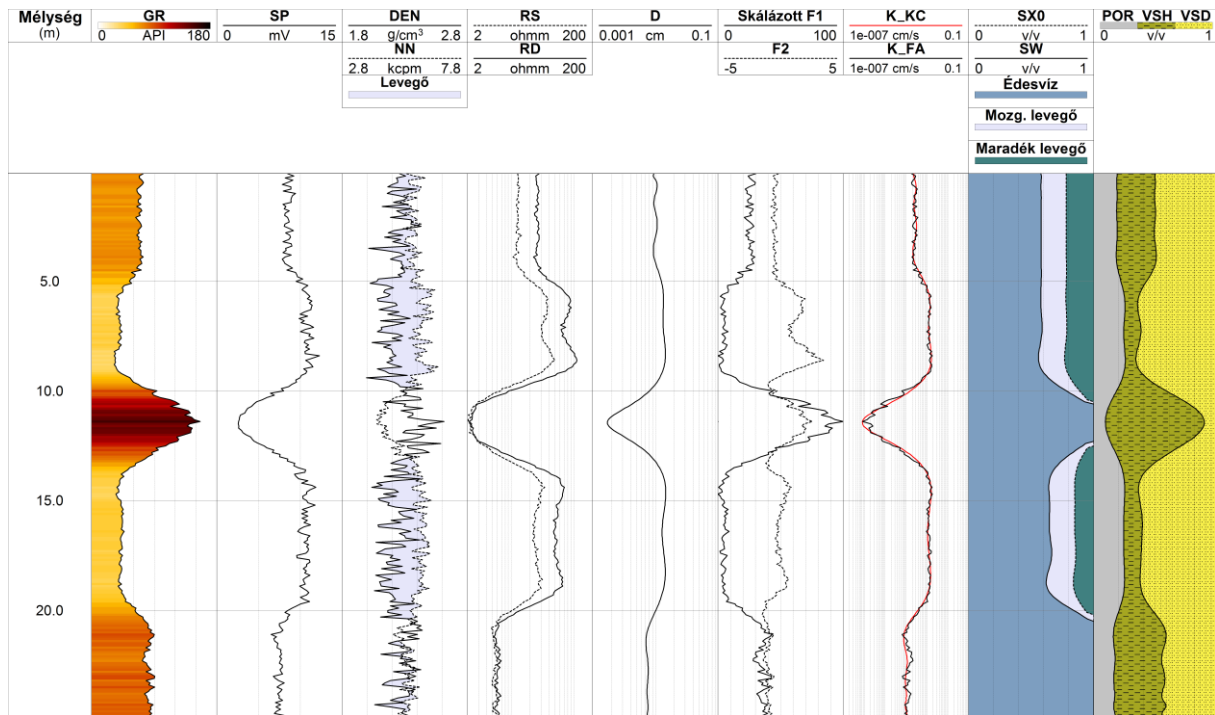
Faktor	W^(GR)	W^(NN-köz.)	W^(NN-táv.)	W^(RES_16)	W^(RES_64)	W^(LAT.)	W^(TEMP)
Első	-0.47	0.21	0.20	0.81	0.59	0.87	0.11
Második	-0.67	0.63	0.83	0.39	0.32	0.41	0.03
Harmadik	-0.02	0.11	0.17	0.44	0.73	0.29	0.59

Ábrák



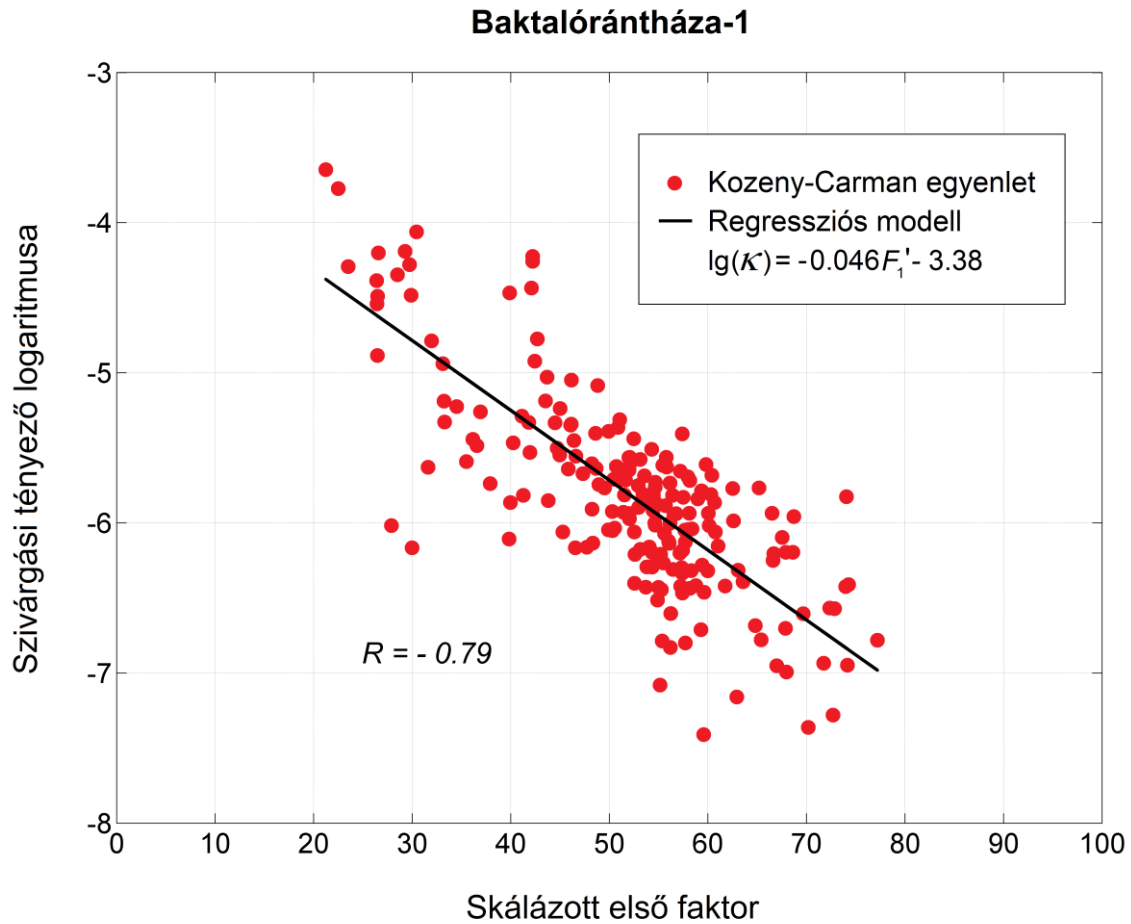
1. ábra: Szivargási tényező és az első faktor kapcsolata 5 % Gauss-zajjal terhelt szintetikus szelvények esetén

Figure 1. Hydraulic conductivity versus factor scores derived from synthetic well-logging data contaminated by 5% Gaussian distributed noise



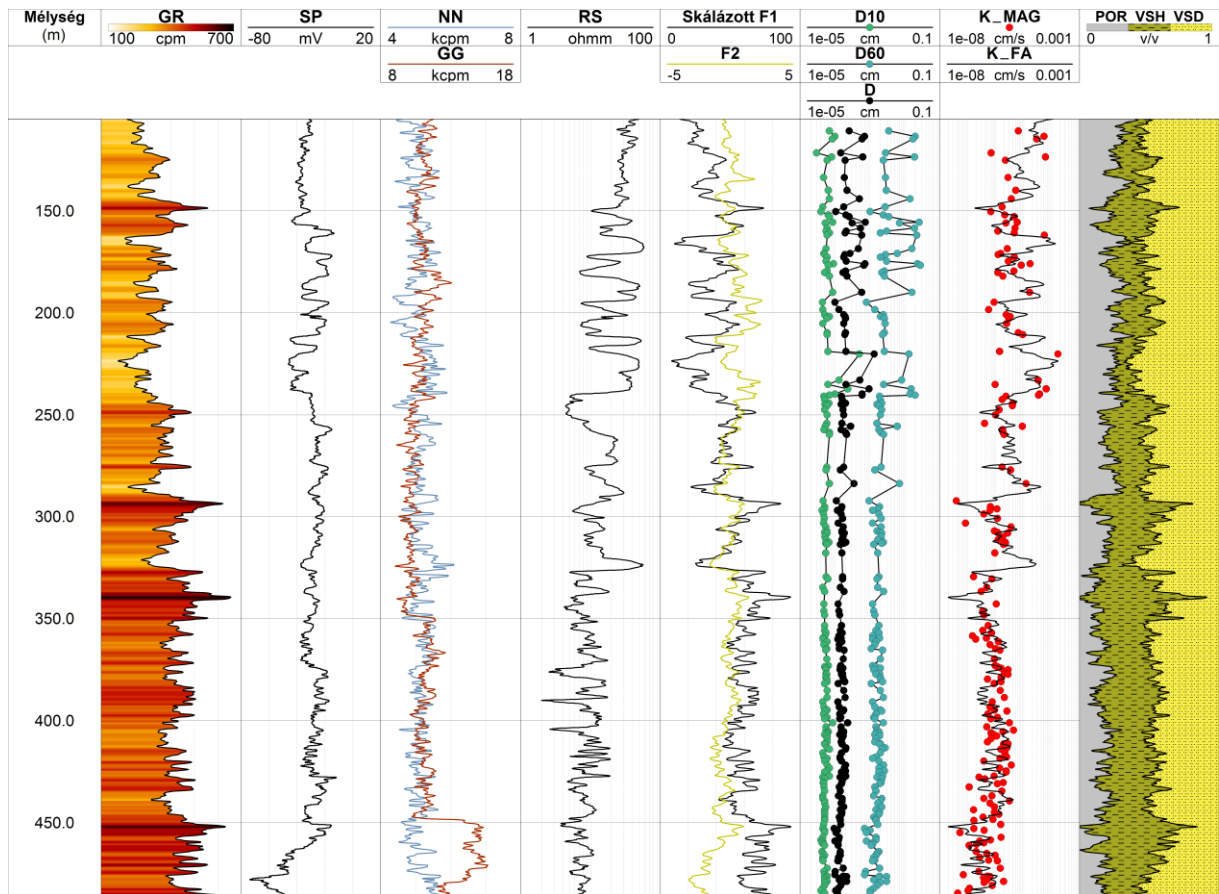
2. ábra: Szintetikus modellen számított fúrólúkszervények, faktoranalízissel számított faktorszervények (F1, F2), szivárgási tényező szervények a Kozeny-Carman (egzakt) formulával (K_KC) és faktoranalízissel meghatározva (K_FA)

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)



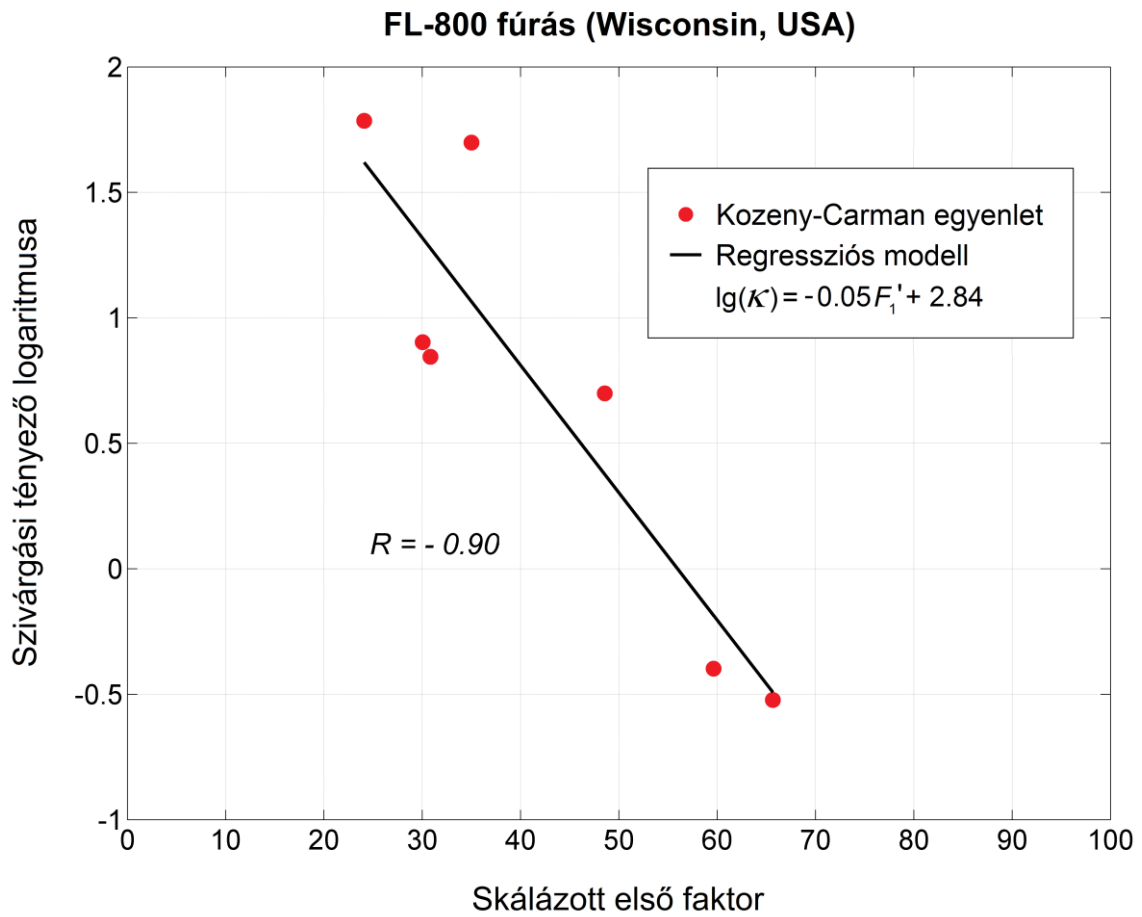
3. ábra: Magadatokból számított szivargási tényező és az első faktor regressziós kapcsolata Baktalórántháza-1 fúrásban

Figure 3. Regression relation between hydraulic conductivity calculated from core analysis and first factor derived from well logs measured in Baktalórántháza-1



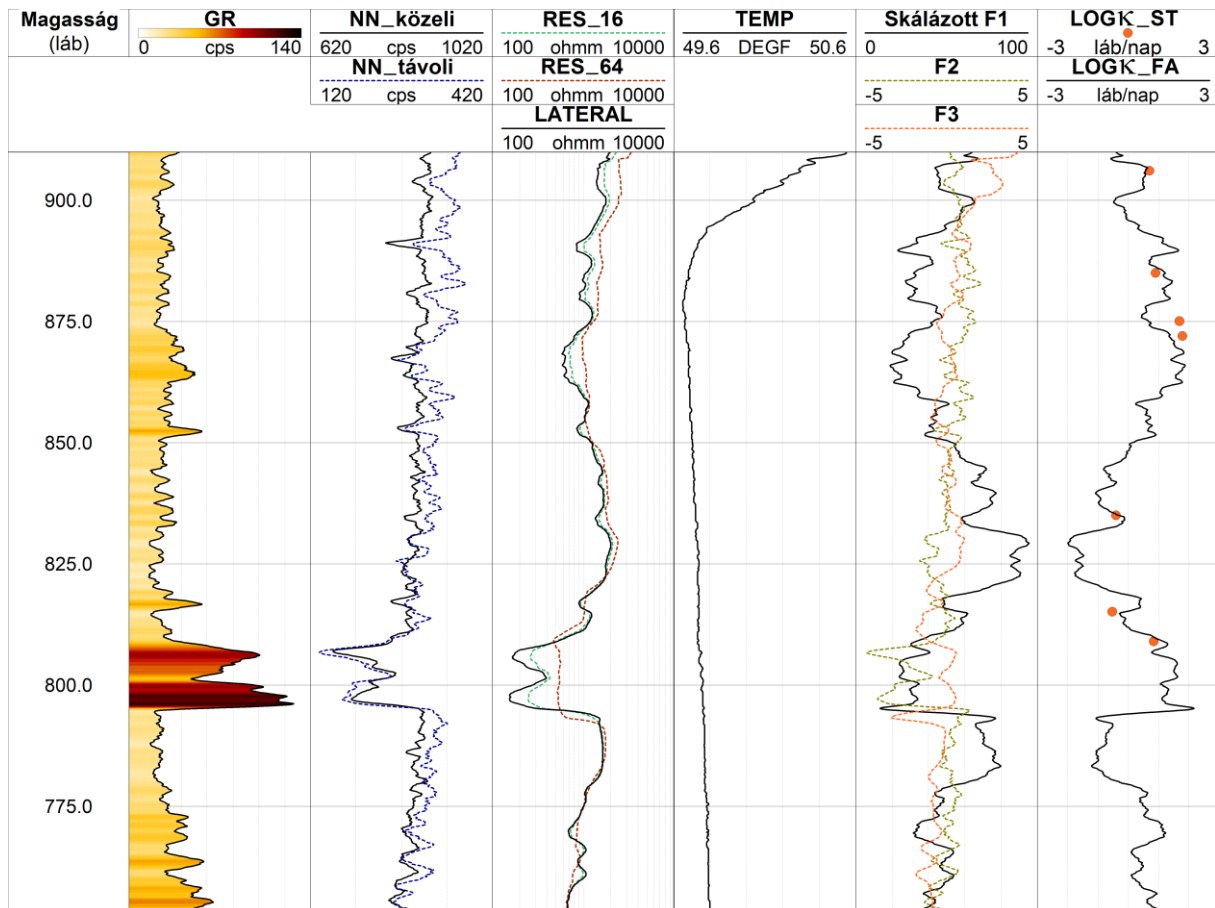
4. ábra: Baktalórántháza-1 fúrásban mért karotázs szelvények, faktoranalízissel becült első és második faktorszelvény (Skálázott F1, F2), szivárgási tényező értékek magadatokból (K_MAG), faktoranalízissel becült szivárgási tényező szelvény (K_FA)

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)



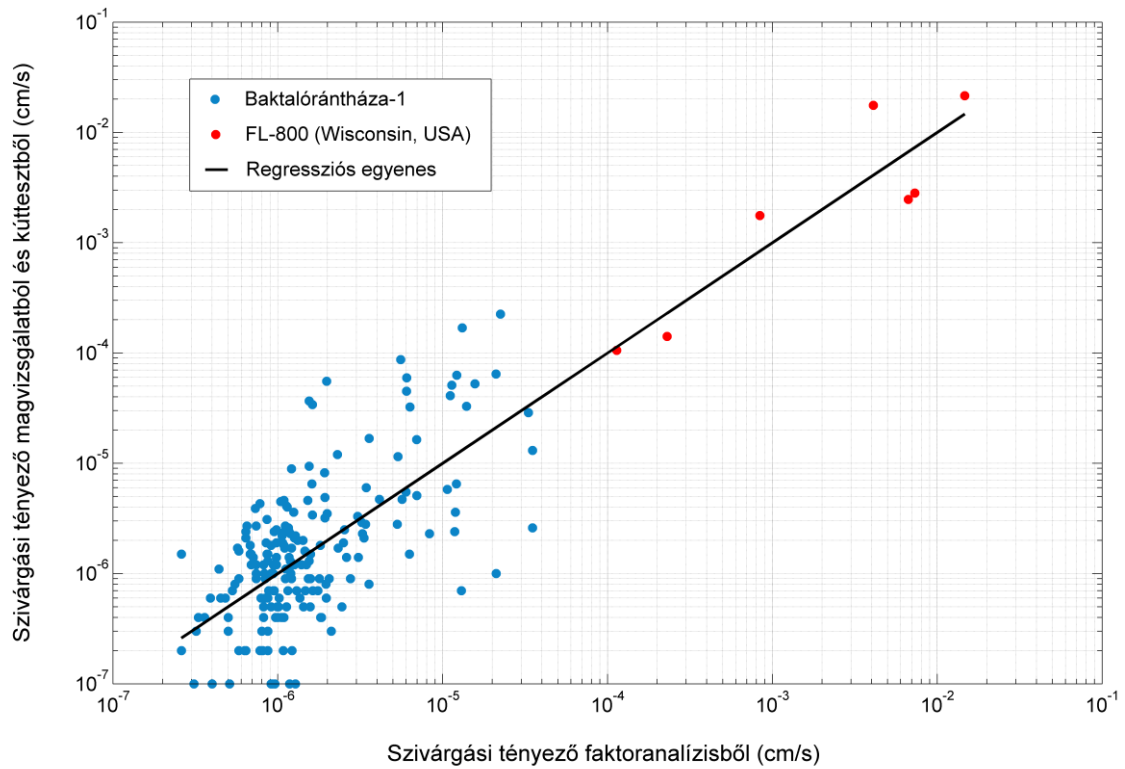
5. ábra: Kútteszt alapján számított szivárgási tényező és az első faktor regressziós kapcsolata FL-800 jelű fúrásban

Figure 5. Regression relation between hydraulic conductivity calculated from slug tests and first factor derived from well logs measured in FL-800



6. ábra: FL-800 jelű fúrásban mért karotázs szelvények, faktoranalízissel becsült első három faktorszelvény (Skálázott F1, F2, F3), szivárgási tényező logaritmusa kútesztből (LOGκ_ST) és faktoranalízissel becsült szivárgási tényezőszelvény (LOGκ_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 becsült szivárgási tényező és a mag- ill. kútteszt adatokból 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