

MTA doktori értekezés tézisei

**FÚRÓLYUK-GEOFIZIKAI ADATOK ÉRTELMEZÉSE
FAKTORANALÍZISSEL ÉS INVERZIÓS ELJÁRÁSOKKAL**

Írta
Szabó Norbert Péter

Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar,
Geofizikai és Térinformatikai Intézet, Geofizikai Intézeti Tanszék

Miskolc
2018

I. BEVEZETÉS

A földkéreg felső néhány kilométeres mélységtartományában alkalmazható fúróluk-geofizikai mérésekkel részletes in situ információt nyerhetünk a fúrás közvetlen környezetében elhelyezkedő kőzetek fizikai tulajdonságairól, a kőzettesteket elválasztó határfelületek helyzetéről és az ásványi nyersanyagok minőségéről és mennyiségéről. A mérési adatok feldolgozásával meghatározható kőzetfizikai jellemzők (porozitás, víztelítettség, agyagtartalom, áteresztőképesség) alapvető fontosságúak a szénhidrogének, vizek és szilárd ásványi nyersanyagok eredményes felkutatása, valamint a felszínközeli konszolidálatlan képződmények vizsgálata és a mérnöki/környezetvédelmi feladatok megoldása szempontjából. A szelvényértelmezés hatékonyságának, ill. a becsült petrofizikai jellemzők pontosságának és megbízhatóságának javítása érdekében a hagyományos determinisztikus és mélységpontonkénti inverziós módszerekkel szemben egyre inkább teret nyernek a nagyobb mélységintervallum adatrendszerét közös eljárásban feldolgozó együttes inverziós és robusztus statisztikai eljárások, melyek az olajipari és a felszínközeli alkalmazások szempontjából egyaránt nagy jelentőséggel bírnak.

A kőzetfizikai mennyiségek a szondaválaszfüggvények ismeretében kapcsolatba hozhatók a mérési adatokkal és az inverziós eljárással becsülhetők. A komputervezérelt szelvényértelmezés az 1980-as évek óta alkalmazza az inverziós módszereket elsősorban a szénhidrogén- és víztároló agyagos homokkövek vizsgálatára [1]. A meghatározható ismeretlenek számát egyrészt a véges számú mérésfajta, másrészt a hagyományosan alkalmazott mélységpontonkénti inverziós kiértékelési technika befolyásolja. A lokális inverzió keretében a szelvényezett szakaszon kismértékben túlhatározott inverz feladatok sorozatát oldjuk meg, melynek becslési pontosságát a mérési adatokat terhelő zaj erősen korlátozza. Mivel a pontonkénti inverzió egyszerre csak egyetlen mélységhez tartozó adatrendszert dolgoz fel, ezért nem alkalmas a ponttól távolabb eső rétegek fizikai tulajdonságainak meghatározására. A lokális inverziós eljárás direkt feladatára jellemző, hogy a válaszfüggvényekben szereplő nagyszámú állandót (zónaparamétert) előzetesen ismertnek kell feltételeznünk, melynek tapasztalati úton való megadása további bizonytalansággal terheli az inverzió eredményét.

A pontonkénti inverzió gyakorlatában a mérési változók és a kőzetfizikai modell paraméterei között fennálló nemlineáris függvénykapcsolatot a gyors számítás érdekében

linearizálják [2], mely abban az esetben szolgáltat kielégítő megoldást, amikor megfelelő mennyiségű és minőségű előzetes ismeret (startmodell) áll rendelkezésünkre. A lineáris inverziós módszerek legjelentősebb korlátja, hogy gradiens alapú optimumkeresés révén az inverz feladat célfüggvényének a kiindulási modell környezetébe eső helyi minimumában határozzák meg a megoldást. A linearizálás gyakran rosszul kondicionált egyenletrendszer megoldására vezet, mely jelentősen befolyásolhatja az inverziós eljárás stabilitását. A különféle regularizációs technikák alkalmazása ellenére az optimalizációs eljárás keresőmechanizmusa általában nem képes kiszabadulni a helyi szélsőértékből, ezért az eredmény továbbra sem lesz független a startmodell megválasztásától és az ismeretlenek számának növelésével fokozódik a többértelmű megoldás veszélye. A fenti tulajdonságok miatt a jelenlegi (ipari) gyakorlatban alkalmazott mélységpontonkénti inverziós eljárások hatékonysága és pontossága, valamint a meghatározandó ismeretlenek köre korlátozott.

II. AZ ELVÉGZETT KUTATÁSOK

A tudományos (PhD) fokozatom megszerzése (2005) óta mélyfúrási geofizikai adatok értelmezésének inverziós módszereivel, azok fejlesztésével foglalkoztam, folytatva a doktori értekezésemben összefoglalt kutatást [3]. A kutatómunkám célja olyan inverziós és többváltozós (feltáró) statisztikai eljárások fejlesztése, mellyel a közetfizikai, vízföldtani (szivárgási) és geotechnikai paraméterek pontosabb és megbízhatóbb, valamint folytonos meghatározása valósítható meg egy adott fúrásban vagy egyszerre több fúrásban. Doktori értekezésemben új fúrólyuk-geofizikai értelmezési eljárásokat mutatok be, melyek lehetővé teszik a hagyományos kiértékeléshez alkalmazott módszerekhez képest a közetfizikai mennyiségek és a nyersanyagkészletek hatékonyabb és megbízhatóbb meghatározását. A becsült paraméterek pontosságának és megbízhatóságának növelése mellett új közetfizikai ismeretleneknek inverziós eljárás keretében való (automatikus) meghatározására törekszem. A pontonkénti inverziót felváltottam olyan inverziós módszerekkel (intervalluminverzió és genetikus meta-algoritmikus eljárás), melyek keretében nagymértékben túlhatározott inverz feladatot megoldva egyrészt jelentősen növelhető a becslési pontosság, másrészt a direkt feladatban szereplő zónaparaméterek az inverziós eljárással meghatározhatók. A zónaparaméterek ily módon történő (objektív) előállítása egyedülálló a mélyfúrási geofizikai adatok értelmezése területén, mely egyaránt hasznos az inverz, ill. a direkt feladat megoldásának javítása szempontjából. A kifejlesztett inverziós és faktoranalízisen alapuló módszereknél a linearizált megközelítés helyett globális optimalizációra alapoztam az

optimumkeresést [4], mellyel a mért és a számított adatok illeszkedésének javítása mellett a megoldás startmodell-függetlensége is megvalósítható.

A többváltozós statisztikai eljárásokat rutinszerűen alkalmazzák a mélyfúrási geofizika gyakorlatában, elsősorban a szénhidrogén-tárolók és a litológia azonosítására, közetfizikai összefüggések meghatározására, valamint hiányzó fúrólyukszelvények pótlására. A faktoranalízist eredetileg a mérési változók által meghatározott adattér dimenziójának csökkentésére fejlesztették ki [5], melynek földtudományi felhasználása lehetővé teszi a mérési adatokban lévő közös információ kiemelését, továbbá olyan litológiai és közetfizikai sajátságoktól függő (rejtett) változók feltárását, melyek a geofizikai műszerekkel közvetlenül nem mérhetők. A szakirodalomban megjelent tanulmányok általában a származtatott statisztikai változók (faktorok) és a különböző mérésfajták kapcsolatának elemzésével foglalkoznak. E felhasználási lehetőség kiszélesítésén túl, a kutatásaim során alapvető törekvésem volt, hogy a faktorok és a közetfizikai paraméterek között megfelelő mennyiségi összefüggést találjak és ez alapján az utóbbiakat független szelvényértelmezési módszerrel meghatározzam. Új többváltozós, faktoranalízis alapú statisztikai módszereket fejlesztettem, melyekkel a szénhidrogén- és a vízkutatás számára kiemelt fontossággal bíró közetfizikai jellemzők (agyagtartalom, víztelítettség, neutronporozitás és szivárgási tényező) és bizonyos származtatott paraméterek (száraz sűrűség) hatékonyan becsülhetők, továbbá az ismeretlenek meghatározása, ill. a laboratóriumi információk a fúrások közötti térrészre kiterjeszthetők.

A kutatómunkámat a Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszékén végeztem, ahol kollégáim több évtizede eredményesen és nemzetközileg elismert módon foglalkoznak a földtani szerkezetek közetfizikai és geometriai jellemzőinek geofizikai inverziós módszerekkel történő meghatározásával, valamint a geostatisztikai módszerek fejlesztésével. A mélyfúrási geofizikai módszerfejlesztések a Tanszék kiemelt kutatási témái között szerepeltek az elmúlt két évtizedben. A 2003 és 2016 között általam kifejlesztett kiértékelési/értelmezési eljárások és azok szoftveres implementációja jelentős szakmai részét képezték a Tanszék és a MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt. szolnoki Petrofizikai Osztály közötti hosszú távú kutatás-fejlesztési együttműködésnek. Az itt kifejlesztett intervalluminverziós eljárás és a faktoranalízis hazai olajipari bevezetésében aktívan részt vállaltam. Az intervalluminverziós módszer fejlesztésére jelentős ösztönzést adott a „Mélyfúrási geofizikai adatok feldolgozási/kiértékelési hatékonyságának növelése intervalluminverziós eljárással” c. MOL Nyrt. által támogatott kutatás. Ebből kiindulva további módszerfejlesztést végeztem,

aminek eredményeit a projektben résztvevő kutatók eredményeivel összevonva társszerzős publikációkban jelentettük meg [34]–[43]. Az első tézisben foglalt eredmények kiinduló pontját a [12] társszerzőkkel publikált cikk képezi, melynek alapgondolatát a genetikus algoritmus bevonásával továbbfejlesztettem, és mint kombinált intervalluminverziós algoritmust mutatom be az értekezésben (III. fejezet 1. pont). Az ehhez kapcsolódó globális optimalizációs módszer intervalluminverzióba történő bevezetését - társszerzős eredményekkel együtt - könyvfejezetben publikáltam [21]. A második tézisben (III. fejezet 2. pont) foglalt kutatási eredményt, mely a texturális jellemzők intervalluminverzióval való meghatározását tartalmazza konferencia előadásban mutattam be [37], majd társszerzős eredményekkel összevonva a [32] publikációban tettük közzé. A bonyolult szénhidrogén-tároló képződmények vizsgálata ugyancsak részét képezte a MOL Nyrt. megbízásából végrehajtott tanszéki kutatásoknak, ahol a metamorf kőzetekre vonatkozó fejlesztés eredményét elsőként konferencián mutattam be [34], majd azokat továbbfejlesztve társszerzős eredményekkel együtt a [29] publikációban jelentettük meg. A 4–6. tézisekben (III. fejezet 4–6. pont) szereplő valamennyi faktoranalízisre alapozott szelvénykiértékelési eljárást önálló kutatási eredményekre és elsőszerzős közleményekre alapozom [9]–[11], [13]–[14], [16]–[19], [22], [24]–[26], [28], [30]–[31], [33]. A kifejlesztett iteratív faktoranalízis mérnökgeofizikai szondázási adatokon való legújabb alkalmazását társszerzőkkel publikáltam [8], melynek algoritmusát Balogh [6] doktori (PhD) értekezésében a Steiner-féle leggyakoribb érték módszerével továbbfejlesztette, valamint javította az első faktor és a víztelítettség regressziós kapcsolatát. Az utolsó tézisben (III. fejezet 7. pont) foglalt genetikus meta-algoritmikus inverziós eljárással elért eredményeket egy idén megjelent egyszerzős (D1 rangsorolású) közlemény mutatja be [7].

Az értekezésben bemutatott módszerek vizsgálatához, ill. a szintetikus és terepi adatokon történő teszteléshez számítógépi algoritmust és programot fejlesztettem. A doktori értekezésben szereplő új értelmezési eljárások alkalmazhatóságát a fúrásos kutatás különböző mélységtartományaiban (felszínközeli, víztároló és szénhidrogén-tároló zóna) megvizsgáltam, azokat hazai és amerikai egyesült államokbeli fúrásokban mért adatrendszereken teszteltem. A környezet- és mérnökgeofizika gyakorlatában alkalmazott mérnökgeofizikai szondázási mérések statisztikai és inverziós feldolgozási lehetőségeit is hazai (valódi) mérési adatokon mutattam be, melyekkel a felszínközeli konszolidálatlan (telítetlen) üledékek kőzetfizikai és geotechnikai paraméterei térbeli eloszlásáról nyerhetünk információt, továbbá a hiányzó mérési szelvényeket faktoranalízissel előállíthatjuk. A mérési eszköztár jövőbeli kibővítésével

(szerves fluoreszcencia és gerjesztett polarizációs adatok integrálásával) a kifejlesztett eljárások tovább növelhetik a kinyerhető információ mennyiségét és javíthatják a becslés megbízhatóságát. Az értekezésben szereplő új, globális inverziós és feltáró statisztikai módszerek hidrogeofizikai alkalmazásai lehetővé teszik a víztároló képződmények kőzetfizikai és szivárgási jellemzőinek még hatékonyabb meghatározását, valamint a próbaszivattyúzási és a magvizsgálati adatok területi kiterjesztését. Végül az olajipari mélyfúrési geofizikai adatok intervalluminverziójával és faktoranalízisével a tárolókőzetek térfogatmodellje tovább finomítható, az intervalluminverziós eljárás túlhatározottsága (a faktoranalízissel meghatározott kőzetfizikai paraméterek állandónak való rögzítésével) növelhető, a zónaparaméterek az inverziós eljárás keretén belül (automatikusan) meghatározhatók, valamint pontosabb és megbízhatóbb készletszámítás végezhető.

III. TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Jelen dolgozatomban a PhD fokozatom megszerzése (2005) óta elért tudományos eredményeimet foglaltam össze. A doktori értekezés keretében elvégzett elméleti és gyakorlati vizsgálatok alapján az alábbi téziseket fogalmaztam meg az általam elért fúróluk-geofizikai módszerfejlesztési eredményeimmel kapcsolatban:

1. Új, sorfejtésen alapuló kombinált intervalluminverziós eljárást dolgoztam ki a kőzetfizikai paraméterek mélységfüggésének meghatározására. A sorfejtés során Legendre-polinomokat alkalmaztam bázisfüggvénynek a modellparaméterek diszkretizálása céljából

$$m_i(z) = \sum_{q=1}^{Q_i} B_q^{(i)} P_{q-1}(z),$$

ahol m_i az i -edik petrofizikai paraméter, B_q a q -edik sorfejtési együttható, P_q a q -edik Legendre-polinom, Q_i az i -edik kőzetfizikai paramétert leíró sorfejtési együtthatók száma. A diszkretizációs eljárással növeltem az inverz feladat túlhatározottságát a mélységpontonkénti inverziós eljáráshoz képest. A fúróluk-geofizikai szelvényezés tetszőleges hosszúságú szakaszán érvényes sorfejtési együtthatók meghatározására kombinált intervalluminverziós módszert vezettem be. Ennek első lépésében, az inhomogén közeg kőzetfizikai paramétereit leíró sorfejtési együtthatókat valós kódolású

genetikus algoritmussal határoztam meg. Ezután az érvényes sorfejtési együtthatókat inverziós startmodellnek tekintettem, majd linearizált intervallum inverziós eljárással képeztem le a petrofizikai paraméterek finom változását. A linearizált inverziós lépésben mélységfüggő kovarianciamátrixot vezettem be a becsült közetfizikai mennyiségek bizonytalanságának jellemzésére

$$[\underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{m}(z))]_{ij} = \sum_{n=1}^{Q_i} \sum_{m=1}^{Q_j} P_{n-1}(z) \left[\underline{\underline{G}}^{-g} \underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{d}^{(m)}) (\underline{\underline{G}}^{-g})^T \right]_{lh} P_{m-1}(z),$$

ahol $\underline{\underline{G}}^{-g}$ a linearizált inverziós módszer általánosított inverz mátrixa, $\vec{d}^{(m)}$ a mérési adatok vektora, ill. $l=n+Q_1+Q_2+\dots+Q_{i-1}$ és $h=m+Q_1+Q_2+\dots+Q_{j-1}$ (i, j a petrofizikai paraméterek száma szerint futó indexek, T a transzponált jelölése). A modell-kovarianciamátrixból mélységfüggő korrelációs mátrixot származtattam, mellyel az inverziós ismeretlenek megbízhatóságát minősítettem. Terepi adatok felhasználásával igazoltam, hogy a valós kódolású genetikus algoritmus és a Marquardt-féle eljárás felhasználásán alapuló kombinált intervalluminverziós módszerrel a közetfizikai paraméterek pontossága és megbízhatósága a mélységpontonkénti inverzióhoz képest jelentősen javítható, valamint a javasolt inverziós eljárás stabil és gyakorlatilag startmodell-független.

2. Az intervalluminverziós eljárás becslési pontosságának javítása céljából a mélyfúrási geofizikai szondaválaszfüggvényekben szereplő zónaparamétereket az inverziós eljárásán belül határoztam meg. Az inverziós eljárásba bevezetendő új ismeretlenek kiválasztását a fúrólyuk-geofizikai adatok zónaparaméterekre vonatkozó érzékenységi függvényeire, valamint az inverziós ismeretlenek közötti korrelációs számításra alapoztam. A homogén rétegekből felépített közetfizikai modell paramétereit és a fajlagos ellenállás válaszegyenletekben szereplő zónaparamétereket leíró sorfejtési együtthatókat Simulated Annealing algoritmuson alapuló (globális) intervalluminverziós eljárással határoztam meg. Az intervalluminverziós eljárással javítottam a mért és a számított adatok illeszkedését, valamint a zónaparaméterek inverziós eljárásán belül történő iteratív meghatározásával a direkt feladat megoldását is pontosítottam.

3. Az intervalluminverziós eljárás kínálta nagymértékű túlhatározottság révén lehetőség nyílik a komplex szénhidrogén-tárolók közetfizikai paramétereinek egyidejű meghatározására. Intervallumonként konstans függvények szerinti sorfejtést alkalmazva, Simulated Annealing algoritmuson alapuló (globális) intervalluminverziós eljárást fejlesztettem összetett közetmátrix alkotta tárolóképződmények petrofizikai paramétereinek meghatározására. Szintetikus és terepi fúróluk-geofizikai adatok intervalluminverziójával becsültem az üledékes (kvarc- és karbonáttartalmú) tárolók térfogatjellemző közetfizikai paramétereit, ill. metamorf szénhidrogén-tárolók közetösszetételét, elsődleges és másodlagos porozitását és víztelítettségét. Az intervalluminverziós eredményekből származtattam a maradék és mozgásképes szénhidrogén-telítettséget.
4. Új, faktoranalízisen alapuló statisztikai eljárást fejlesztettem a közetfizikai jellemzők független fúróluk-geofizikai szelvényértelmezési módszerrel történő meghatározására. A faktoranalízis zajérzékenységi problémájának megoldására, valamint a faktor-szelvények globális optimumkeresésén alapuló előállítására - a geofizikai inverzió eszköztára bevonásával - az alábbi két megközelítést javasoltam:
- a) Bevezettem az iteratívan újrasúlyozott faktoranalízis módszerét, melynek keretében a faktorsúlyok és a faktorok közös eljárásban meghatározhatók. Az iterációs eljárás tipikus (q -adik) lépésében a következő műveleteket kell elvégezni

$$\underline{\underline{L}}_q^T = \left(\underline{\underline{F}}_{q-1}^T \underline{\underline{F}}_{q-1} + \alpha^2 \underline{\underline{I}} \right)^{-1} \underline{\underline{F}}_{q-1}^T \underline{\underline{D}}^{(m)}$$

$$\tilde{f}_q = \left(\tilde{\underline{\underline{L}}}_{q-1}^T \underline{\underline{W}}_{q-1} \tilde{\underline{\underline{L}}}_{q-1} \right)^{-1} \tilde{\underline{\underline{L}}}_{q-1}^T \underline{\underline{W}}_{q-1} \tilde{d}^{(m)},$$

ahol $\underline{\underline{F}}$ a faktorok $N \times M$ méretű mátrixa, $\tilde{f}$ a faktorok $N \times M$ hosszúságú oszlopvektora, $\underline{\underline{L}}$ a faktorsúlyok $K \times M$ méretű mátrixa, $\tilde{\underline{\underline{L}}}$ a faktorsúlyok $N \times K \times N \times M$ méretű mátrixa, $\underline{\underline{W}}$ az $N \times K \times N \times K$ méretű Cauchy-féle adattérbeli (diagonális) súlymátrix (melyet - mint az eljárás neve is mutatja - minden iterációban újra számítunk), $\underline{\underline{D}}^{(m)}$ a standardizált szelvényadatok $N \times K$ méretű mátrixa, $\tilde{d}^{(m)}$ a standardizált szelvényadatok $N \times K$ hosszúságú oszlopvektora, α a csillapítási tényező (N a vizsgált mélységpontok száma, K az alkalmazott szondák száma, M a faktorok

száma, T a transzponált jelölése). Szintetikus és terepi fúróluk-geofizikai adatok feldolgozásával igazoltam, hogy a Cauchy-súlyokat felhasználó iteratív újrásúlyozott faktoranalízis eljárás a mérési zajjal és a kiugró értékekkel szemben rezisztens becslést ad.

- b) A faktorokat valós kódolású genetikus algoritmussal határoztam meg az alábbi alkalmassági függvény maximalizálásával

$$F(\vec{f}) = -\|\vec{d}^{(m)} - \underline{\tilde{L}} \vec{f}\|_2^2 = \max,$$

ahol $\vec{f}$ a faktorok $N \times M$ hosszúságú oszlopvektora, $\underline{\tilde{L}}$ a faktorsúlyok $N \times K \times N \times M$ méretű mátrixa, $\vec{d}^{(m)}$ a standardizált szelvényadatok $N \times K$ hosszúságú oszlopvektora. A becsült faktorsúlyok és faktorok szorzataként előállítottam a teljes számított fúróluk-geofizikai adatrendszert ($\vec{d}^{(sz)} = \underline{\tilde{L}} \vec{f}$), ezzel a közetfizikai paraméterek bevonása nélkül adtam megoldást a geofizikai direkt feladatra.

5. A faktoranalízis algoritmusát kiterjesztettem üledékes képződmények közetfizikai paramétereinek meghatározására. A faktorok és közetfizikai mennyiségek regresszióelemzésével megállapítottam, hogy

- a) A fúróluk-geofizikai adatokból számított első faktor erősen korrelál az agyagtartalommal, melynek alapján az alábbi regressziós függvénykapcsolatot vezettem be

$$V_{sh} = ae^{bF_1'} + c,$$

ahol V_{sh} (v/v) az agyagtartalom, F_1' az első (skálázott) faktor és a , b , c helyi regressziós együtthatók. A Larionov-féle módszerrel és laboratóriumi magvizsgálati adatokkal való összevetéssel igazoltam, hogy a fenti nemlineáris tapasztalati összefüggés hazai és amerikai egyesült államokbeli szénhidrogén-tároló képződményekben jó közelítéssel alkalmazható.

- b) A fúrólyuk-geofizikai adatokból számított első faktor erősen korrelál a hidraulikus vezetőképességgel. Szintetikus úton előállított fúrólyukszelvények felhasználásával kimutattam, hogy a tapasztalati összefüggés az adatrendszerterhelő különböző mértékű véletlen zaj és kiugró értékek mellett is érvényes. Terepi és szintetikus adatok feldolgozása alapján az alábbi regressziós modellt vezettem be

$$-lg(K) = \alpha F_1' + \beta,$$

ahol K a szivárgási tényező, F_1' az első (skálázott) faktor, α és β helyi regressziós együtthatók. Laboratóriumi magvizsgálati adatokkal és próbaszivattyúzási adatokkal való összehasonlítással igazoltam, hogy a regressziós modell elsődleges és másodlagos porozitású víztároló képződményekben jó közelítéssel alkalmazható.

- c) A faktoranalízis alkalmas a szomszédos fúrások szelvényadatainak közös eljárásban való gyors és hatékony feldolgozására. Kifejlesztettem a kétdimenziós faktoranalízis algoritmusát, melyet felhasználtam az agyagtartalom területi eloszlásának meghatározására.
6. A faktoranalízis algoritmusát kiterjesztettem a felszínközeli telítetlen közeg víztelítettségének mérnökgeofizikai szondázási adatokból való meghatározására. Terepi adatok felhasználásával kimutattam, hogy
- a) Az első faktor és a felszínközeli üledékes képződmények víztelítettsége egymással erősen korrelál. Definiáltam a faktorindex fogalmát

$$i_{F_1} = \frac{F_1 - F_{1,min}}{F_{1,max} - F_{1,min}},$$

ahol F_1 az első faktor, $F_{1,min}$ és $F_{1,max}$ az első faktorszelvény szélsőértékeit jelölik. Javaslatot tettem a felszínközeli üledékek víztelítettsége és a faktorindex közötti $S_w = i_{F_1}$ közelítő összefüggésre, ahol az $F_{1,min}$ és $F_{1,max}$ területi állandók a statisztikai eljárással automatikusan meghatározhatók. A kétdimenziós faktoranalízist (5c. tézis) kiterjesztettem a víztelítettség területi eloszlásának meghatározására. Kimutattam,

hogy a faktoranalízis eredménye megfelelően egyezik a geofizikai inverzióval kapott eredményekkel. Faktoranalízis és determinisztikus módszerek kombinációján alapuló kétdimenziós értelmezési eljárást fejlesztettem a száraz sűrűség fűrőlyukszelvényekből való meghatározására.

- b) Az első faktor és a neutronporozitás szelvény egymással jól korrelál, abban az esetben is, amikor a neutronporozitás adatokat nem vonjuk be bemenő mennyiségként a faktoranalízis eljárásába. Ennek alapján a faktoranalízis algoritmusát kiterjesztettem a neutronporozitás szelvény le nem mért mélységintervallumokon történő előállítására. In situ példán keresztül szemléltettem, hogy a mért és a faktoranalízissel számított neutronporozitás szelvények megfelelő egyezést mutatnak, és az utóbbi hatékonyan felhasználható a víztelítettség faktoranalízissel (vagy más szelvényértelmezési eljárással) történő meghatározására.
7. Új, meta-algoritmikus megközelítésen alapuló inverziós eljárást fejlesztettem a felszínközeli telítetlen üledékek közetfizikai paramétereinek mérnökgeofizikai szondázási adatokból való meghatározására. Az inverziós módszer felhasználásával a térfogatjellemző paramétereket (víztartalom, agyagtartalom, kvarctartalom), valamint a mátrix- és fluidumjellemző (zóna-) paramétereket együttes inverziós eljárás keretében határoztam meg. Az inverziós módszer egy- és kétdimenziós változatát az alábbiak szerint dolgoztam ki:
- a) Az egydimenziós genetikusan meta-algoritmikus inverziós eljárás két ciklusból áll. Az eljárás külső ciklusában valós kódolású genetikusan algoritmust alkalmaztam a zónaparaméterek értékeinek meghatározására. Ezeket a genetikusan meta-algoritmikus inverziós eljárás belső ciklusában állandóként kezelve, a térfogatjellemző közetfizikai mennyiségek vertikális eloszlását és bizonytalanságát linearizált mélységpontonkénti inverzióval határoztam meg. A külső ciklushoz az

$$F(\vec{c}_j) = - \left[(NS)^{-1} \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \left(\frac{D_{ns}^{(m)} - g_s(\vec{m}_n, \vec{c}_j)}{D_{ns}^{(m)}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

alkalmassági függvényt vezettem be, ahol $\vec{m}_n$ a térfogatjellemzők n -edik mélységben becsült vektora, $\vec{c}_j$ a j -edik zónaparaméter-vektor, $D_{ns}^{(m)}$ az n -edik mélységben az s -edik szondával mért adat, g_s az s -edik szonda válaszfüggvénye (N a feldolgozott szelvényszakasz összes mélységpontjának száma, S az alkalmazott szondák száma). Kimutattam, hogy a zónaparaméterek alkalmassági függvénye számos lokális maximumhellyel rendelkezik. Az inverz feladatot az alkalmassági függvény abszolút maximumának való meghatározásával oldottam meg. A zónaparaméterek pontosságát az utolsó generációban becsült egyedek adott paraméterei szórásai átlagértékeként számítottam.

- b) A kétdimenziós genetikus meta-algoritmikus inverziós eljárás keretében több szomszédos fűrés valamennyi szelvényadatát együttesen dolgoztam fel. Az egydimenziós genetikus meta-algoritmikus inverziós eljárás alkalmassági függvényét kiterjesztettem kétdimenziós esetre

$$F^*(\vec{c}_j) = - \left[(N^* S)^{-1} \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^{N_h} \sum_{s=1}^S \left(\frac{D_{hns}^{(m)} - g_s(\vec{m}_{hn}, \vec{c}_j)}{D_{hns}^{(m)}} \right)^2 \right]^{1/2},$$

ahol $\vec{m}_{hn}$ jelöli a h -edik fűrés n -edik mélységpontjában becsült térfogatjellemző mennyiségek vektorát, míg $D_{hns}^{(m)}$ képviseli a h -edik fűrés n -edik mélységpontjában az s -edik szelvényezési eszközzel mért adatot (H a vizsgált fűrésok száma, N_h a h -edik fűrésben feldolgozott mélységpontok száma, $N^* = N_1 + N_2 + \dots + N_H$ valamennyi fűrés összes mélységpontjának száma, S az alkalmazott szondák száma). Az inverziós eljárás külső ciklusában meghatároztam a zónaparamétereknek a mérnökgeofizikai szondázás teljes tartományára vonatkozó állandó értékét, míg a belső ciklusban a térfogatjellemzőket fűrésről-fűrésre linearizált mélységpontonkénti inverziós eljárások sorozatával határoztam meg. A becsült térfogatjellemző mennyiségek bizonytalanságát a szórások négyzetes átlagának szelvényével, valamint a mért és a számított adatok eltérését a relatív adattávolság szelvénnel jellemeztem.

IV. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉN KÍVÜL MEGJELENT KÖZLEMÉNYEK

- [1] Mayer C., Sibbit A., 1980: GLOBAL: A new approach to computer processed log interpretation. SPE 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, paper 9341, 14 p.
- [2] Menke W., 1984: Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic Press Inc., 289 p.
- [3] Szabó N. P., 2004: Mélyfúrási geofizikai adatok értelmezésének modern inverziós módszerei. Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 118 p.
- [4] Sen M. K., Stoffa P. L., 1995: Global optimization methods in geophysical inversion, Volume 4, First Edition, Elsevier Science, 280 p.
- [5] Lawley D. N., Maxwell A. E., 1962: Factor analysis as a statistical method. *The Statistician* 12, 209–229.
- [6] Balogh G. P., 2018: Mérnökgeofizikai szondázási adatok kiértékelése új statisztikai eljárásokkal. Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 67 p.

V. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [7] Szabó N. P., 2018: A genetic meta-algorithm-assisted inversion approach: hydrogeological study for the determination of volumetric rock properties and matrix and fluid parameters in unsaturated formations. *Hydrogeology Journal*, online first, pp. 1–12. IF: 2.109 (D1).
- [8] Szabó N. P., Balogh G. P., Stickel J., 2018: Most frequent value-based factor analysis of direct-push logging data. *Geophysical Prospecting*, Vol. 66, No. 3, pp. 530–548. IF: 1.846 (Q1).
- [9] Szabó N. P., Dobróka M., 2017: Exploratory factor analysis of wireline logs using a float-encoded genetic algorithm. *Mathematical Geosciences*, Vol. 50, No. 3, pp. 317–335. IF: 2.022 (Q1).
- [10] Szabó N. P., Dobróka M., 2017: Robust estimation of reservoir shaliness by iteratively reweighted factor analysis. *Geophysics*, Vol. 82, No. 2, pp. D69–D83. IF: 2.017 (Q1).
- [11] Szabó N. P., 2016: Hydrocarbon formation evaluation using an efficient genetic algorithm-based factor analysis method. ECMOR XV - 15th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Amsterdam, Mo P071, pp. 1–12.

- [12] Dobróka M., Szabó N. P., Tóth J., Vass P., 2016: Interval inversion approach for an improved interpretation of well logs. *Geophysics*, Vol. 81, No. 2, pp. D163–D175. IF: 2.017 (Q1).
- [13] Szabó N. P., 2015: Hydraulic conductivity explored by factor analysis of borehole geophysical data. *Hydrogeology Journal*, Vol. 23, No. 5, pp. 869–882. IF: 2.028 (Q1).
- [14] Szabó N. P., Kormos K., Dobróka M., 2015: Evaluation of hydraulic conductivity in shallow groundwater formations: a comparative study of the Csókás' and Kozeny-Carman model. *Acta Geodaetica et Geophysica*, Vol. 50, No. 4, pp. 461–477. IF: 0.394.
- [15] Dobróka M., Szabó N. P., 2015: Well log analysis by global optimization-based interval inversion method. In: Cranganu C. (ed.), *Artificial Intelligent Approaches in Petroleum Geosciences*, Springer, ISBN: 978-3-319-16530-1, pp. 245–268.
- [16] Szabó N. P., Dobróka M., Hursán L., 2015: Édesvíztárolók szivárgási paramétereinek meghatározása a Csókás-eljárás alkalmazásával. *Magyar Geofizika*, 56. évf., 2. szám, pp. 70–82.
- [17] Szabó N. P., 2015: Faktoranalízisen alapuló új statisztikus eljárás a szivárgási tényező meghatározására. *Magyar Geofizika*, 56. évf., 2. szám, pp. 83–96.
- [18] Szabó N. P., Kiss A., Halmágyi A., 2015: Hydrogeophysical characterization of groundwater formations based on well logs: Case study on Cenozoic clastic aquifers in East Hungary. *Geosciences and Engineering: A publication of the University of Miskolc*, Vol. 4, No. 6, pp. 45–71.
- [19] 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*, Vol. 22, Issue 3, pp. 511–526. IF: 1.966 (Q1).
- [20] Dobróka M., Szabó N. P., Szegedi H., 2014: Geofizikai információfeldolgozás - módszerek és alkalmazások. CriticEl monográfia sorozat 4., Miskolci Egyetem, ISBN: 978-963-08-9325-1, pp. 151–188.
- [21] Szabó N. P., Dobróka M., 2013: Float-encoded genetic algorithm used for the inversion processing of well-logging data. In: Michalski A. (ed.), *Global Optimization: Theory, Developments and Applications*. Mathematics Research Developments, Computational Mathematics and Analysis Series, Nova Science Publishers Inc., New York, ISBN: 978-1-62417-796-5, pp. 79–103.

- [22] Szabó N. P., Dobróka M., 2013: Extending the application of a shale volume estimation formula derived from factor analysis of wireline logging data. *Mathematical Geosciences*, Vol. 45, Issue 7, pp. 837–850. IF: 1.753 (Q1).
- [23] Szabó N. P., Dobróka M., Kavanda R., 2013: Cluster analysis assisted float-encoded genetic algorithm for a more automated characterization of hydrocarbon reservoirs. *Intelligent Control and Automation*, Vol. 4, No. 4, pp. 362–370.
- [24] Szabó N. P., Dobróka M., Somogyi Molnár J., Kavanda R., 2013: Shale indicator derived from multivariate statistical analysis of well logs. 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013, London, We 09 05, pp. 1–5.
- [25] Szabó N. P., Kavanda R., 2013: Száraz sűrűség meghatározása mérnökgeofizikai szondázási adatok statisztikus feldolgozásával. *Bányászati és Kohászati Lapok – Bányászat*, 146. évf., 1. szám, pp. 2–6.
- [26] Szabó N. P., Dobróka M., Drahos D., 2012: Factor analysis of engineering geophysical sounding data for water saturation estimation in shallow formations. *Geophysics*, Vol. 77, No. 3, pp. WA35–WA44. IF: 1.723 (D1).
- [27] Szabó N. P., Szabó N. P., 2012: Interval inversion of well-logging data for automatic determination of formation boundaries by using a float-encoded genetic algorithm. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 86–87, pp. 144–152. IF: 0.997 (Q1).
- [28] Szabó N. P., 2012: Dry density derived by factor analysis of engineering geophysical sounding measurements. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, Vol. 47, No. 2, pp. 161–171. IF: 0.347.
- [29] Dobróka M., Szabó N. P., Turai E., 2012: Interval inversion of borehole data for petrophysical characterization of complex reservoirs. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, Vol. 47, No. 2, 172–184. IF: 0.347.
- [30] Szabó N. P., Kormos K., 2012: Édesvíztároló rétegek agyagtartalmának meghatározása fúrólýukszelvények faktoranalízise alapján. *Magyar Geofizika*, 53. évf., 2. szám, pp. 80–90.
- [31] Szabó N. P., 2011: Shale volume estimation based on the factor analysis of well-logging data: *Acta Geophysica*, Vol. 59, No. 5, pp. 935–953. IF: 0.617.
- [32] Dobróka M., Szabó N. P., 2011: Interval inversion of well-logging data for objective determination of textural parameters. *Acta Geophysica*, Vol. 59, No. 5, pp. 907–934. IF: 0.617.

- [33] Szabó N. P., Dobróka M., 2011: Geostatistical approach for shale volume estimation in water-bearing formations. Near surface 2011, Leicester, P15, pp. 1–5.
- [34] Szabó N. P., Tolnai É. E., 2011: Interval inversion of wellbore data for characterizing metamorphic hydrocarbon reservoirs. 6th Congress of Balkan Geophysical Society - Budapest, Hungary, paper 20, pp. 1–5.
- [35] Dobróka M., Szabó N. P., 2010: Mélyfúrási geofizikai inverziós módszerfejlesztés eredményei: Az intervallum inverziós eljárás. *A Miskolci Egyetem Közleményei, A sorozat, Bányászat*, 79. kötet, pp.127–140.
- [36] Dobróka M., Szabó N. P., 2010: Sorfejtéses inverzió II. Mélyfúrási geofizikai adatok feldolgozása intervallum inverziós eljárással. *Magyar Geofizika*, 51. évf., 1. szám, pp. 25–42.
- [37] Szabó N. P., Dobróka M., Vass P., 2009: The Determination of Textural Parameters Using Interval Inversion of Borehole Geophysical Data. 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Dublin, P60, pp. 1–5.
- [38] Dobróka M., Szabó N. P., Ormos T., Kiss B., Tóth J., Szabó I., 2008: Interval inversion of borehole geophysical data for surveying multimineral rocks. 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Krakow, P11, pp. 1–5.
- [39] Dobróka M., Kiss B., Szabó N. P., Tóth J., Ormos T., 2007: Determination of cementation exponent using an interval inversion method. 69th EAGE Conference & Exhibition, London, paper 092, pp. 1–5.
- [40] Dobróka M., Szabó P. N., 2006: On the use of global optimization methods in the interval inversion of borehole geophysical data. 68th EAGE Conference & Exhibition, Vienna, paper 208, pp. 1–5.
- [41] Dobróka M., Szabó N. P., Kiss B., Krasznavölgyi T., 2005: A new global well-logging inversion method for characterization of hydrocarbon formations. The 13th European Symposium on Improved Oil Recovery, Budapest, paper 34, pp. 1–4.
- [42] Dobróka M., Szabó N. P., Kiss B., Krasznavölgyi T., 2005: Petrophysical interpretation of well log data using VFSA-I² algorithm. 67th EAGE Conference & Exhibition, Madrid, paper 215, pp. 1–4.
- [43] Dobróka M., Szabó N. P., 2005: Combined global/linear inversion of well-logging data in layer-wise homogeneous and inhomogeneous media. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, Vol. 40, No. 2, pp. 203–214.