

Sorfejtéses inverzió II. Mélyfúrási geofizikai adatok feldolgozása intervalluminverziós eljárással

DOBRÓKA MIHÁLY^{1,2}, SZABÓ NORBERT¹

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

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

A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kifejlesztett sorfejtéses inverziós módszeren alapuló adatfeldolgozási eljárások közül legutóbb a Fourier-transzformációt mint inverz feladatot mutattuk be. Folytatva az alkalmazási lehetőségeket, ebben a cikkben az intervalluminverziós eljárást tárgyaljuk, mely mélyfúrási geofizikai adatok kiértékelését teszi lehetővé a hagyományos mélységpontenkénti inverziós módszerekhez képest eltérő szemléletben. Az intervalluminverziós feladat nagymértékben túlhatározott, ezért stabil inverziós eljárás keretében igen pontos és megbízható eredmények kaphatók. E kedvező tulajdonság abból fakad, hogy az eljárás során egy nagyobb mélységintervallum adatrendszerét együttesen invertáljuk, a rendelkezésre álló adatok számánál lényegesen kevesebb számú petrofizikai paraméter meghatározása céljából. A módszer ugyanakkor lehetővé teszi újabb ismeretlenek meghatározását, melyek korábban nem szerepeltek a mélyfúrási geofizika inverz feladatában. Ezen ismeretlenek a réteghatárok koordinátái, valamint a direkt feladat válszfüggvényeiben megjelenő zónaparaméterek. A cikk szintetikus és mezőbeli példákon mutatja be az intervalluminverziós eljárás széles körű felhasználási lehetőségeit.

Dobróka, M., Szabó, N.: Series-expansion-based inversion II. The interpretation of borehole geophysical data by means of the interval inversion method

Last time, a research on “Fourier transform as an inverse problem” was published in this journal which is based on a series expansion inversion technique developed by the Department of Geophysics, University of Miskolc. Now as a continuation, the interval inversion method is presented that evaluates borehole geophysical data by taking an approach differing from the one used by conventional (point-by-point) inversion methods. Because of the highly over-determined inverse problem, very accurate and reliable solution can be realized by a stable inversion procedure. This advantage comes from the fact that data set of a longer depth interval is jointly inverted for the determination of much less petrophysical parameters than data. The inversion method also supports the treatment of new inversion unknowns that have not been involved in the well-logging inverse problem so far. These unknowns are the layer-boundary coordinates and some zone parameters appearing in the probe response functions. In the paper synthetic and field examples are shown to demonstrate the advantageous features of the interval inversion method and its wide-ranging field of applications.

Beérkezett: 2010. március 25.; *elfogadva:* 2010. április 13.

Bevezetés

A fúrásos kutatómélyfúrás geofizikai mérési adatai gazdag információt hordoznak a fúrások által harántolt kőzetek fizikai tulajdonságairól. A nyitott fúrólyukbeli mérések feldolgozásával kvantitatív módon határozhatók meg bizonyos geometriai (rétegvastagság, rétegdőlés) és petrofizikai (porozitás, víztelítettség, agyagtartalom, kőzetösszetétel stb.) jellemzők, melyek szerves részét képezik a geológiai interpretációnak. Napjainkban a szelvényadatok kiértékelése so-

rán nyert eredmények minőségével szemben mind a nemzetközi, mind pedig a hazai gyakorlat egyre nagyobb követelményeket támaszt. Ez különösen igaz az olajipar területén, ahol egyre bonyolultabb földtani környezetben kell az értelmezési paraméterekből megbecsülni a kitermelhető szénhidrogén mennyiségét.

Az inverziós elven történő adatfeldolgozás megjelenését a mélyfúrási geofizikai értelmező rendszerek fejlődése nagymértékben elősegítette. Az 1980-as évek elején az iparban még determinisztikus elvű szoftvereket alkalmaztak,

pl. a Western Atlas WDS (Well Data System), Schlumberger CYBERLOOK és a magyar KISS (Karotage Interpreter Subsystem) rendszereket. Ezek a közetfizikai mennyiségeket egymásból, több lépésben, determinisztikus egyenletek alkalmazásával határozták meg. Nem sokkal később megjelent egy új irányvonal a mélyfúrási geofizikai értelmezés területén, a statisztikus elven alapuló adatfeldolgozás. A statisztikus elvű értelmezési rendszerek már nagyrészt inverziós program modulokból álltak. Alkalmazásukra elsőként a világ vezető olajtársaságainál került sor. Itt elsősorban a Schlumberger GLOBAL (Mayer, Sibbit 1980), a Gearhart ULTRA – Mayer és Kerbart (CETIS) fejlesztésében – (Alberty, Hashmy 1984) és a Western Atlas OPTIMA (Fertl et al. 1987) értelmező rendszereket kell kiemelni, melyek a hagyományos közetösszetételen és porozitástípusokon túl még hibamennyiségeket is számítottak a becsült petrofizikai jellemzőkre vonatkozóan. Ezzel az eredmények pontosságát és megbízhatóságát lehetett vizsgálni.

Mára a geofizikai inverziós módszerek az ipari gyakorlatban széles körben elterjedtek. A fúrásos nyersanyagkutatás számos területén alkalmazzák ezeket mint korszerű, nagymértékben automatizált adatfeldolgozási eljárásokat. E módszerek továbbfejlesztése nemzetközi szinten is a tudományos kutatások középpontjában áll (megemlítve, hogy a mélyfúrási geofizikában valamilyen oknál fogva csekély az ilyen irányú új fejlesztések száma). Az inverziós módszerek elvi alapjait a diszkrét inverzió elméletében találjuk meg, melyet Menke (1984) és Tarantola (1987) foglalt össze elsőként. A mélyfúrási geofizikai inverzió korábbi alkalmazásai közül kiemelnénk Etnyre (1984), Mayer, Sibbit (1980), Kormos (1987), valamint Ferenczy és Steiner (1987) munkáit.

A mélyfúrási geofizikai adatok kiértékelésének elterjedten használt módszere a mélységpontokénti inverzió. Ennek az ipari gyakorlatban számos megvalósítása ismeretes. Közös vonás, hogy egy adott mélységpontban rendelkezésre álló, különböző lyukeszközökkel felvett szelvényekből származó néhány adat alapján határozzák meg a petrofizikai paraméterek lokális értékeit. A geofizikai inverzió fogalomrendszerében az így felállított inverz feladat ún. túlhatározott probléma, amelyben az adatok száma csak kismértékben haladja meg a meghatározandó ismeretlenek számát. Ismeretes tény, hogy kisszámú mérési adat inverziója esetén az eredményt a mérési hiba, azaz a zaj igen erősen befolyásolja, így a lokális paraméterbecslés pontosságát és megbízhatóságát illetően ez a módszer viszonylag korlátozott hatékonyságú.

Minden mérnöki mérésből származó adathoz hozzátartozik meghatározásának hibája is, ez pedig terheli a mérési adatokból levont következtetések, az adatrendszer értelmezése során előállított mennyiségek megbízhatóságát. Így van ez a mélyfúrási geofizikai adatokból leszármaztatott petrofizikai paraméterekkel is. Ezek meghatározásának hibáját befolyásolja a szelvényadatok mérési hibája, amely megjelenik az inverz feladat végrehajtása során keletkező becslési hibában. A lyukeszközök mérési pontossága technikailag adott, ezen a kiértékelés során általában már nem segíthetünk. Alapvető feladat azonban a petrofizikai paramé-

terek becslési hibájának csökkentése. A paraméterbecslés minőségi javításának egyik útja a direkt feladat megoldásának javítása, azaz a válaszfüggvények pontosítása. Ez egyúttal azt a törekvést jelenti, hogy az inverz feladat megoldásában a valóságot minél jobban közelítő modelleket állítsunk fel, válaszfüggvényeink a fizikai és földtani valóságot minél pontosabban írják le. A modellhiba csökkentésének módja lényegében a közetfizikai kutatás feladata. A fenti gondolatmenet alapján egyértelmű, hogy a paraméterbecslés minőségének további javítására csak az inverziós eljárások továbbfejlesztése révén van lehetőség.

Az új kiértékelési módszerek fejlesztésében a legfontosabb követelmény, hogy növeljük a petrofizikai paraméterek meghatározásának pontosságát és megbízhatóságát. Ennek érdekében alapvető teendő az egy interpretációs/inverziós lépésben használható adatok számának növelése. Ha a hagyományos, pontonkénti kiértékelési szemléletmódban gondolkozunk, ez a mélyfúrási geofizikai szelvények számának növelését jelentené, aminek ismert korlátai vannak, és többletköltségekkel jár. Van azonban az adatszám növelésének sokkal hatékonyabb módja is, amely nem jár költség-növekedéssel, ez az ún. intervalluminverzió. A módszer keretében a földtanilag azonos egységbe (pl. réteg vagy zóna) tartozó nagyszámú mérési pont adatait egyetlen inverziós eljárásban dolgozzuk fel, azaz ugyanannyi ismeretlen rétegjellemző meghatározásához akár két nagyságrenddel is több szelvényadat áll rendelkezésünkre, mint a pontonkénti inverziónál. Ennek pozitív hatása a leszármaztatott paraméterek meghatározásának pontosságára és megbízhatóságára vitathatatlan és egyértelmű. A kidolgozandó új kiértékelési algoritmus tehát a hagyományos, pontonkénti inverziós eljárástól eltérően egy nagyobb mélységintervallumból származó összes adatot egyszerre kezeli. Az intervalluminverziós módszert Dobróka (1995) vezette be, mely mélységkoordinátától függő paramétereket tartalmazó, intervallumon értelmezett (mélységpontként is változó) válaszfüggvényeket használ fel a direkt feladat megoldására, és kimenetként a vizsgált intervallumban a petrofizikai paraméterek (sorfejtéssel diszkrétizált) mélységfüggvényeit adja meg. A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén működő inverziós kutatócsoport jelenleg is végez mélyfúrási geofizikai inverziós módszerfejlesztést, amihez a T49852 sz. 2009-ben zárt OTKA projekt jelentős támogatást nyújtott. A témához kapcsolódóan egy PhD-értekezés is született (Szabó 2004), valamint a módszer gyakorlati kipróbálása a MOL Nyrt.-gal rendszeres együttműködés keretében folyik. A jelen dolgozatban a sorfejtési inverziós algoritmusokhoz illeszkedően mutatjuk be a mélyfúrási geofizikai adatok intervalluminverziója területén elért eredményeinket.

A mélyfúrási geofizikai inverz feladat

A fúrással harántolt rétegek petrofizikai paramétereinek meghatározása a mélyfúrási geofizikai szelvényadatok együttes inverziójával valósítható meg. Ez azt jelenti, hogy a különböző fizikai elven vagy ugyanazon elven, de eltérő mérési paraméterek mellett mért szelvényadatokat egyetlen

inverziós eljárásba integráljuk. Ezután a direkt feladat keretében számított adatrendszer a mért adatokkal összehasonlítva valamely inverziós módszer segítségével megbecsüljük az ismeretlen modellparaméterek értékét. Az így nyert közetjellemző mennyiségek meghatározása alapján megadható a tárolóközet összetétele, adott esetben pedig megbecsülhető a kitermelhető szénhidrogén mennyisége is.

Sokásványos közetmodell esetén az alábbi módon adjuk meg az inverz feladat tetszőleges mélységpontbeli modellvektorát

$$\mathbf{m} = [\text{POR}, \text{SX0}, \text{SW}, \text{VSH}, \text{VMA}_i]^T, \quad (1)$$

ahol a porozitás (POR), a kisépért (SX0) és az érintetlen zóna (SW) víztelítettség, az agyagtartalom (VSH) és a közetmátrix részarányok (VMA_i , ahol $i = 1, 2, \dots, n$ számú ásvány, pl. VSD: kvarc, VLM: kalcit, VDO: dolomit stb.) fajlagos térfogatjellemző mennyiségek (T a transzponált jelölése).

A fenti közetfizikai paraméterek közvetlenül nem mérhetők, meghatározásuk a mért szondaadatok felhasználásával történik. A mélyfúrási geofizikai mérések során a fúrólyukban és annak közvetlen környezetében fellépő természetes vagy a szonda által mesterséges módon létrehozott fizikai tér jellemző paramétereit mérjük meg a különböző mélységpontokban. Nyitott lyukban a mérést különböző behatolású és vertikális felbontóképességű lyukeszközzel hajtjuk végre. Az így nyert szelvényeket alapvetően három csoportba soroljuk: litológiai (GR [API] természetes gamma, SP [mV] természetes potenciál), porozitáskövető (CN [p.u.] kompenzált neutron, CD [g/cm³] kompenzált sűrűség, AT [μs/m] akusztikus intervallumidő) és szaturációs (RMLL [ohmm] sekély behatolású (micro)laterologgal mért, RS [ohmm] közepes behatolású laterologgal mért és RD [ohmm] mély behatolású laterologgal mért fajlagos ellenállás) szelvények. A három szaturációs szelvényből a korrekciók után nyert RX0 kisépért zóna fajlagos ellenállása és RT az érintetlen zóna fajlagos ellenállása számítható. Gyakran használják azonban az $\text{RT} \cong \text{RD}$ és $\text{RX0} \cong \text{RMLL}$ közelítéseket. Természetesen a fentiek mellett még egyéb szelvények is felhasználhatók, pl. a technikai (lyukátmérő), spektrális gamma (K [%] kálium, U [ppm] urán és TH [ppm] tórium), fotoelektromos abszorpciós index (PE [barn/e]) és az indukciós (vezetőképesség) mérések. A pontbeli mérési adatok felsorolásával képezzük az inverzió mért adatvektorát, mely egy átlagos szénhidrogén-kutató fúráshoz alkalmazott szelvénykombináció esetén a következő

$$\mathbf{d}^{(m)} = [\text{GR}, \text{SP}, \text{CN}, \text{CD}, \text{AT}, \text{RMLL}, \text{RD}]^T. \quad (2)$$

Az inverziós kiértékelés kezdetén a mérési adatrendszer és előzetes ismereteink alapján megbecsüljük az (1) modellparaméterek értékét, azaz kezdeti (start-)modellt alkotunk. A modellalkotás annál sikeresebb, minél több a priori információ van a birtokunkban az adott mezőre vonatkozólag. A fúrómagok laboratóriumi vizsgálati eredményei (porozitás, permeabilitás, víztelítettség, redukálhatatlan víztelítettség stb.), az adatfeldolgozás során nyert crossplotok információja (mátrix-, agyag- és fluidumjellemzők stb.), a közeli fúrá-

sok mélyfúrási geofizikai szelvényei, a felszíni geofizikai mérések és egyéb geológiai ismeretek mind-mind felhasználhatók a modellalkotás során. A kiértékelési modell birtokában elvi adatokat számítunk az általunk feltételezett földtani szerkezetre. A direkt feladat megoldásához ismernünk kell azokat a közetfizikai relációkat, melyek kapcsolatot teremtenek (1) modell és (2) szelvényadatok elméleti (számított) értékei között. Az adatvektor és a modellparaméterek vektora közötti függvénykapcsolat általában nemlineáris, továbbá a válaszfüggvények empirikusak, így a szakirodalomban megtalálható nagyszámú egyenlet közül a megfelelő egyenlet kiválasztása függ az aktuális földtani szituációtól (a telep mélysége, kora, litológiája, rétegtartalma, kompaktciója stb.). Inverziós kutatásaink során az ipar által is gyakran alkalmazott ULTRA válaszegyenleteket alkalmaztuk (Alberty, Hashmy 1984). Az elméleti szonda-válaszfüggvények bal oldalán a mélyfúrási geofizikai szelvényadatok számított értékei szerepelnek, jobb oldalán az $\mathbf{m}$ modellparaméterek mellett általában nagyszámú függvénykonstans áll. A k -edik elvi adat (a k -edik szonda által mért pontbeli szelvényadat) általános válaszfüggvénye (g_k) a következő

$$d_k^{(sz)} = g_k(\mathbf{m}, \text{BA}, \text{BM}, \text{BN}, \dots, \text{CSH}_k, \text{CH}_k, \text{CW}_k, \text{CMF}_k, \text{CMA}_{ki}), \quad (3)$$

ahol BA: tortuozitási (tekervényességi) tényező, BM: cementációs kitevő és BN: szaturációs kitevő a közet texturális sajátosságait tükröző paraméterek. A 'C...' konstansok a szonda által mért mennyiség eltérő értékeit jelölik az agyagban (CSH), szénhidrogénben (CH), rétegvízben (CW), iszap-filtrátumban (CMF) és a közetmátrixot alkotó ásványokban (CMA). E konstansként kezelt zónaparaméterek részben egy nagyobb mélységintervallumon belül állandó (mátrix-, agyag- és fluidumjellemzők), részben pedig a mélységkoordináta szerint lassan változó mennyiségek (pl. hőmérséklet, iszapellenállás stb.). Fontos kiemelni, hogy a texturális jellemzőket is egy-egy szénhidrogén-tároló zónában konstansnak tételezzük fel, azonban ismert, hogy értékük nem állandó gyakran még egy rétegösszetben sem. A pontatlanul megválasztott texturális jellemzők hatása igen kedvezőtlen lehet az inverz feladat megoldására.

Az értelmezés során előfordulnak olyan mennyiségek, amelyek a válaszegyenletekben közvetlenül nem jelennek meg, azonban meghatározásuk alapvetően szükséges pl. a szénhidrogénkészlet becslése szempontjából. Ezeket az inverziós eredményekből determinisztikus módon, a közetfizikában ismert formulák segítségével határozzuk meg

$$\text{SCHM} = \text{SX0} - \text{SW}, \quad (4a)$$

$$\text{SCHR} = 1 - \text{SX0}, \quad (4b)$$

$$\text{PERM} = A \frac{\text{POR}^B}{\text{SWIR}^C}, \quad (4c)$$

ahol SCHM: mozgásképes szénhidrogén-telítettség, SCHR: maradék szénhidrogén-telítettség, PERM [mD]: abszolút permeabilitás (A, B, C : tapasztalati úton választott mezőbeli konstansok).

A direkt feladatban szereplő válaszegyenleteket további kiegészítő egyenletekkel bővíthetjük, melyek a petrofizikai paraméterek értékeire és kapcsolatára írnak elő megszorítást. E szabályozó egyenleteket Mayer, Sibbit (1980) három típusba sorolták. Elsőként tekintsük az elméleti megszorításokat, melyek a petrofizikai paramétereket matematikai szabályok alapján korlátozzák, pl. $0 \leq \text{POR} \leq 1,0$, $0 \leq \text{VSH} \leq 1,0$, $0 \leq \text{SW} \leq 1,0$, $0 \leq \text{SX0} \leq 1,0$, $0 \leq \text{VMA}_i \leq 1,0$. A közetfizikai paraméterek tapasztalati értékeire további kikötések tehetők, így a második csoportot pl. törmelékeny-üledékes kőzetek esetén a következő szabályozások alkotják: $0 \leq \text{POR} \leq 0,47$, $0,15 \leq \text{SW} \leq 1,0$, $0,50 \leq \text{SX0} \leq 1,0$. Az itt szereplő lokális szabályozó egyenletek a területre vonatkozó a priori információk (pl. a minimális áteresztőképesség porozitás, vagy a minimális és maximális víztelítettség stb.) és egyéb regionális összefüggések (pl. a PORMX maximális porozitás – mélység kapcsolat) alapján adódnak. A harmadik csoportban szereplő geológiai szabályozó egyenletek az ismeretlenek közötti kapcsolatokat írják elő. Ilyen összefüggés pl. a víztelítettségekre vonatkozó

$$\text{SX0} \leq \text{SW}^{\text{SWEXP}}$$

egyenlőtlenség, ahol $\text{SWEXP} \sim 0,2-0,5$ (Baker Atlas 1996). A korlátozó egyenletek mellett az egyes kőzetkomponensek fajlagos térfogatösszegére vonatkozó alapvető törvénynek is kell teljesülnie. Ha pl. a kőzetet három fő alkotórészre bontjuk (póruster, kőzetmátrix és agyag), akkor az egységnyi térfogatú kőzetre vonatkozó anyagmérleg-egyenlet a következő:

$$\text{POR} + \text{VSH} + \sum_{i=1}^n \text{VMA}_i = 1.$$

A fenti korlátozó egyenletekkel kiegészített direkt feladatot megoldva elvi adatrendszer tudunk számítani, melyet az inverziós eljárás során a mérési adatokkal összehasonlítunk. A két adatrendszer illesztésével azután meghatározzuk a petrofizikai paraméterek azon értékeit, melyek leginkább megfelelnek a földtani valóságnak.

A hagyományos, pontonkénti inverzió

A mélyfúrás geofizikai inverz feladatot hagyományosan mélységpontonkénti inverzióval oldjuk meg. Ennek keretében a mért mélységintervallum egyes pontjaiban külön-külön határozzuk meg az inverziós ismeretleneket a pontbeli szelvényadatok felhasználásával. A pontbeli adatok, azaz a szondák aránylag kis száma miatt a válaszfüggvényekben szereplő paraméterek nagy részét ismert konstansnak feltételezzük, mivel ellenkező esetben alulhatározott inverz feladatot kellene kezelnünk. Azonban ha csak néhány térfogatjellemző petrofizikai paramétert tekintünk ismeretlennek, akkor kismértékben túlhatározott inverz feladatot kaphatunk. Ekkor csak néhány mérési adattal van több, mint ami minimálisan szükséges a feladat megoldásához. Megjegyezzük, hogy a szelvényen egymás „mellett” elhelyezkedő mélységpontok adatait a pontonkénti inverzió során függet-

lennek tekintjük egymástól, ezért a rétegvastagságok inverziós meghatározása e keretek között nem lehetséges.

Határozzuk meg mélységpontonkénti inverziós módszerrel a (2) adatvektorból az (1) modellvektort! Tételizzük fel, hogy mélységpontonként azonos számú ($k = 1, 2, \dots, N$) szelvényadat áll rendelkezésünkre. Ekkor a k -adik lokális adat számított értéke

$$d_k^{(sz)} = g_k(m_1, m_2, \dots, m_M), \quad (5)$$

mely az (1) modell M számú petrofizikai paraméterének függvénye. A fenti egyenlet a (3) válaszfüggvénynek a lokális (mélységpontban értelmezett) megfelelője. A geofizikai inverziós gyakorlatban a mért és számított adatok $\mathbf{e} = \mathbf{d}^{(m)} - \mathbf{d}^{(sz)}$ eltérésvektorának valamilyen (pl. L_2) normáját minimalizálva adunk becslést a paraméter vektor elemeire. A linearizált optimalizáció során a minimalizálandó célfüggvények általában tartalmazzák a mérési adatok hibáját (Tarantola, 1987), mely a súlyozott inverziós módszerek logikáját követi. A geofizikai inverziós algoritmusok felépítésénél azonban létezik egy másféle megközelítés is. Képezzük következőképpen az inverz feladat célfüggvényét

$$E = \sum_{k=1}^N e \frac{d_k^{(mg)} - d_k^{(szg)}}{d_k^{(mg)}}^2 \text{ " min.}, \quad (6)$$

ahol $d_k^{(m)}$, $d_k^{(sz)}$ a pontbeli k -adik mért és számított adat! E módszerrel a különböző elven mért, eltérő nagyságrendű mélyfúrás geofizikai adatok célfüggvényre gyakorolt eltérő hatását korrigáljuk, ugyanakkor az eltérésvektor-komponenseket ugyanabba az értéktartományba korlátozzuk, valamint dimenzió nélkülivé tesszük. A nemlineáris inverz feladat megoldását ismert módon végrehajthatjuk linearizálással. Ekkor a csillapított legkisebb négyzetek elvén alapuló módszert használjuk fel a modellparaméterek meghatározására (Marquardt 1959). Ezt az eljárást pontról pontra elvégezzük. Megjegyezzük, hogy a Marquardt-algoritmus a (6) célfüggvényben történő adattérbeli normálás miatt kis módosításra szorul, azaz a Jacobi-mátrixot és a modellvektort is normálni kell. A mélységpontonkénti inverz feladat megoldása gyors, mivel a válaszegyenletek egyszerű szerkezetűek, és a direkt feladat megoldása sem túl időigényes. Ez inverziós szempontból rendkívül előnyös tulajdonság lehet, különösen a nagyobb számítás időt igénybe vevő globális optimalizációs módszerek alkalmazásánál. Emiatt a globális inverziós módszerek felhasználása a geofizikán belül talán a mélyfúrás geofizikai inverzióban a legindokoltabb, mivel pl. más felszíni geofizikai modellezésekhez (végeselemes, véges különbséges többdimenziós stb.) képest nagyságrendileg kisebb futási idő elegendő a direkt feladat megoldásához.

Az intervalluminverziós módszer

A mélységpontonkénti inverziós eljárással a kőzetek petrofizikai tulajdonságait lokális szelvényadatok felhasználásával határozzuk meg. Mivel a mélységpontban a mért adatok száma alig több az ismeretlenek számánál, a csekély túlhatározottság miatt a paraméterbecslés pontossága és

megbízhatósága relatíve korlátozott. Másrészt, mivel pontonkénti inverzió esetén a mélységpontokat általában függetlennek tekintjük a szomszédos vagy a távolabbi mélységpontoktól, így az inverzió nem veszi figyelembe azokat a földtani struktúrára vonatkozó információkat, amelyeket az adatrendszer tartalmaz. A mélyfúrási geofizikai értelmezés feladata az egyes földtani egységek (rétegek, zónák) kvantitatív közetfizikai jellemzése, továbbá mint alapvető földtani információ, a réteghatárok elhelyezkedésének a meghatározása. E feladat megoldása a mélységpontonkénti inverzió gyakorlatában inverziós eljárás mellett történik, a litológiai és a nagy felbontóképességű fajlagosellenállás-szelvények segítségével. Ha a réteghatárokat inverziós eljárás mellett szeretnénk meghatározni, célszerű egy olyan módszer kifejlesztése, mely meghatározott (akár a teljes mért) intervallumba eső mélységpontok adatrendszerét egyazon inverziós eljárás keretében invertálja. E módszert nevezzük intervalluminverziós eljárásnak.

Az intervalluminverziós eljárásához intervallumon értelmezett válaszfüggvényeket szükséges definiálnunk, mellyel az (5) válaszfüggvényt kiterjeszthetjük a teljes invertálandó mélységintervallumra. Ennek keretében először a petrofizikai paramétereket mint a mélység függvényeit írjuk fel. Az intervallumon értelmezett (mélységkoordinátától függő) válaszfüggvényekből származtatott elvi szelvényadatok Dobróka (1995) alapján

$$d_k^{(sz)}(z) = g_k(m_1(z), m_2(z), \dots, m_M(z)), \quad (7)$$

ahol $d_k^{(sz)}(z)$ a k -adik számított szelvényadat, $m_i(z)$ az i -edik közetfizikai paraméter z mélységkoordinátához tartozó értéke. A fenti válaszfüggvényben szereplő modellparaméterek a mélység folytonos függvényeiként jelennek meg, melyek pontbeli értékeit diszkretizálással határozzuk meg. A mélységpontonként változó modellparaméterek diszkretizálására sorfejtési eljárást alkalmazhatunk. A sorfejtéses intervalluminverziós eljárás keretében ismert bázisfüggvény-rendszerek segítségével diszkretizáljuk a petrofizikai paramétereket. Tekintsük a (7) válaszfüggvényben szereplő i -edik rétegjellemző paraméter általános sorfejtett alakját

$$m_i(z) = \sum_{q=1}^{Q_i} B_q^{(i)} \psi_q(z), \quad (8)$$

ahol $B_q^{(i)}$ jelenti az i -edik petrofizikai paraméter q -adik sorfejtési együtthatóját (Q_i a sorfejtéshez szükséges tagok száma), ψ_q pedig a q -adik ismert mélységkoordinátától függő bázisfüggvényt jelöli. A legegyszerűbb esetben, a rétegenként homogén modell leírásában (a legkevesebb ismeretlen) a bázisfüggvényeket egységugrás-függvények kombinációjával állíthatjuk elő

$$\psi_q(z) = u(z - Z_{q-1}) - u(z - Z_q), \quad (9)$$

ahol Z_q, Z_{q-1} a q -adik és $(q-1)$ -edik réteghatár mélységkoordinátája. Mivel $\psi_q(z) = 1$, ha $Z_{q-1} < z < Z_q$ (egyébként zérus), ezért a (8) sorfejtésben szereplő $B_q^{(i)}$ sorfejtési együttható megegyezik az i -edik modellparaméter q -adik rétegbeli értékével. Ezzel a sorfejtés teljes mélységintervallumán egyszerre előállítható $i = 1, \dots, M$ számú modellparaméter

rétegenként konstans értéke. Megjegyezzük, hogy a petrofizikai paraméterek a mélység függvényében gyakran a rétegen belül is változnak. E tulajdonságot a lineáris változástól egészen a bonyolultabb függvénykapcsolatokig (hatványfüggvények, Csebisev-, Legendre-polinomok stb.) szükséges pontossággal meg tudjuk közelíteni. Végül, ha a rétegsor homogén és inhomogén rétegekből épül fel, akkor a fenti függvények szuperpozíciójával is élhetünk. Ebből látható, hogy a bázisfüggvények típusa szabadon megválasztható és az adott földtani situációhoz illeszthető.

Az intervalluminverziós eljárás lényeges eleme, hogy a (8) sorfejtéssel a (7) válaszfüggvény felírható a közetfizikai ismeretlenek helyett a B sorfejtési együtthatók függvényeként. Ez azt jelenti, hogy az inverz feladat ismeretlenjeit ugyanezen B sorfejtési együtthatók képezik. Mivel a mérési adatrendszerbe az intervallumon gyűjtött összes szelvényadat beletartozik, így az intervalluminverziós feladat célfüggvényét úgy definiáljuk, hogy abban a teljes adatrendszer szerepel. Ha P az intervallum mélységpontjainak a száma, és N a pontbeli adatszám, akkor a (6) célfüggvény az alábbi módon módosítható az intervalluminverziós feladat számára

$$\Phi = \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^N f \frac{d_{pk}^{(mg)} - d_{pk}^{(sz)}{}^2}{d_{pk}^{(mg)}} p \text{ " min.}, \quad (10)$$

ahol $d_{pk}^{(m)}, d_{pk}^{(sz)}$ a p -edik pontbeli k -adik mért és számított szondaadat. Az inverz feladat megoldását jelentő B sorfejtési együtthatókat lineáris vagy globális optimalizációval határozhatjuk meg, majd ezután a kapott sorfejtési együtthatók értékét a (8) kifejezésbe helyettesítve előállíthatjuk a petrofizikai paraméterek (mélység-)szelvényeit.

Alkalmazott optimalizációs módszerek és minőségellenőrzés

Az ipari gyakorlatban a nemlineáris mélyfúrási geofizikai inverz feladatot linearizált optimalizációs módszerekkel oldják meg, melyek megfelelő a priori információ ismeretében kielégítő és gyors megoldást szolgáltatnak. E technika az inverz feladatot iteratív úton lineáris problémák sorozatára vezeti vissza. Ennek keretében a paraméterter egy megoldáshoz közeli pontjából indítjuk az eljárást, majd a modellt lépésenként korrigálva jutunk el az optimális megoldáshoz. A modell javítása a következő formula szerint történik:

$$\mathbf{m}^{(q)} = \mathbf{m}^{(q-1)} + \delta \mathbf{m}^{(q)},$$

ahol $q = 1, 2, \dots, q_{\max}$ az iterációs lépések száma, $\mathbf{m}^{(q)}$ a q -adik lépésben javított modellvektor, és $\delta \mathbf{m}^{(q)}$ a q -adik lépésben számított paraméterkorrekció vektor. Az iteratív inverziós eljárást a megadott stopkritérium teljesüléséig folytatjuk. A korrekciós vektorra felírt lineáris inverziós eljárás megoldása többféleképpen történhet. Leggyakrabban a Marquardt-algoritmust (1959), azaz a csillapított legkisebb négyzetek módszerét használjuk:

$$\delta \mathbf{m} = (\mathcal{G}^T \mathcal{G} + f^2 \mathcal{I})^{-1} \mathcal{G}^T \delta \mathbf{d},$$

mely numerikusan is stabil megoldást tesz lehetővé. A képletben $\mathcal{G}$ a Jacobi- vagy érzékenységi mátrix, mely $N \times M$ számú $\partial \mathbf{d} / \partial \mathbf{m}$ derivát tartalmaz, valamint $\delta \mathbf{d}$ a mérési és az aktuális lépésben számított adatvektorok különbsége ($\mathcal{I}$ az egységmátrix). Az f^2 konstans regularizációs tényezőnek nevezzük, melyet fokozatosan zérusra csökkentünk az eljárás során. Természetesen a (6) és (10) mennyiségek minimalizálásakor a mérési adatokkal történő normálás miatt a modellvektor, az adatvektor és a Jacobi-mátrix megfelelően normált mennyiségek.

A lineáris módszerek jelentős előnye, hogy lehetőséget adnak az inverziós eredmények minőségi ellenőrzésére, azaz az inverzióval becsült paraméterek hibájának és megbízhatóságának kvantitatív jellemzésére. Tételezzük fel, hogy az inverz feladatban a paramétertér és az adattér lineáris kapcsolatát az

$$\mathbf{m} = \mathcal{A} \mathbf{d}$$

egyenlet írja le, melyben $\mathcal{A}$ a lineáris inverziós módszer általánosított ($M \times N$ dimenziós) inverze. Mivel $\mathcal{A}$ az adatok ismételt mérése során nem változik, így levezethető

$$\text{cov}(\mathbf{m}) = \mathcal{A} \text{cov}(\mathbf{d}) \mathcal{A}^T$$

összefüggés, mely az inverziós eljárás során összekapcsolja az adattérbeli és a paramétertérbeli kovarianciamátrixot (Menke 1984). Az általunk alkalmazott lineáris módszer esetén a paramétertérbeli kovariancia mátrix egyszerűbb alakot ölt, mivel az adatok korrelálatlanok és varianciájuk megegyezik. Legkisebb négyzetek módszerénél az adattérbeli kovariancia mátrix felírható

$$\text{cov}(\mathbf{d}) = \mathbf{v}_d^2 \mathcal{I}$$

alakban, ahol $\mathbf{v}_d^2$ az adatok varianciája. Ezzel az i -edik becsült modellparaméter hibája megegyezik a paramétertérbeli kovarianciamátrix főátlójának i -edik elemével

$$\text{cov}(\mathbf{m}) = \mathbf{v}_d^2 (\mathcal{G}^T \mathcal{G})^{-1}. \quad (11)$$

A (11) kovarianciamátrix elemeinek normálásával származtathatók a korrelációs együtthatók, melyek a becsült paraméterek megbízhatóságát jellemzik. A korrelációs mátrix i -edik sorának j -edik eleme

$$\text{corr}(\mathbf{m})_{ij} = \frac{\text{cov}(\mathbf{m})_{ij}}{\sqrt{\text{cov}(\mathbf{m})_{ii} \text{cov}(\mathbf{m})_{jj}}}, \quad (12)$$

mely az i -edik és a j -edik modellparaméter korreláltságát jellemzi egy $[-1, 1]$ intervallumbeli számmal. Ha ez a szám abszolút értékben 1-hez közel áll, akkor ez a becsült paraméterek szoros kapcsolatára utal. Ebben az esetben az inverzióval becsült modell is megbízhatatlan.

A fenti hibajellemzőkön kívül különböző illeszkedési mérőszámokat is „mérhetünk” az iterációs folyamat során, melyek az inverziós eljárás konvergenciájáról tájékoztatnak. A pontonkénti inverzióval becsült paraméterek által számított adatok mérési adatoktól való eltérését a relatív adattávolsággal jellemezhetjük

$$D_a^{(\text{mp})} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{\frac{d_k^{(\text{m})} - d_k^{(\text{sz})}}{d_k^{(\text{m})}} - 0}^2}, \quad (13)$$

ahol $d_k^{(\text{m})}$, $d_k^{(\text{sz})}$ a pontbeli k -adik mért és számított szondaadat. A gyakorlatban az adattávolságot egyetlen skalárral, a vizsgált mélységintervallum pontjaira vonatkozó átlagértékkel adjuk meg. Szintetikus inverziós kísérletek esetén vizsgálhatjuk a modelltávolságot, mely magáról az inverziós eljárás pontosságáról, stabilitásáról, zajérzékenységről stb. szolgáltat hasznos információt

$$D_m^{(\text{mp})} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \wedge m_i^{(\text{b})} - m_i^{(\text{e})} \wedge^2}, \quad (14)$$

ahol $m_i^{(\text{b})}$, $m_i^{(\text{e})}$ az i -edik becsült, ill. egzakt módon ismert modellparaméter. Megjegyezzük, hogy ebben az esetben nem szükséges a képletben a modellparaméterek eltéréseit normálnunk, mivel a petrofizikai paraméterek azonos nagyságrendűek és dimenziótlan (fajlagos térfogatjellemző) mennyiségek. A (13)–(14) formulákat megfelelően módosítva előállíthatjuk az intervalluminverziós eljárásra vonatkozó illeszkedést jellemző mennyiségeket is. A relatív adattávolság és modelltávolság intervalluminverziós esetben

$$D_a^{(\text{int})} = \sqrt{\frac{1}{PN} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^N e^{\frac{d_{pk}^{(\text{m})} - d_{pk}^{(\text{sz})}}{d_{pk}^{(\text{m})}} - 0}^2}, \quad (15a)$$

$$D_m^{(\text{int})} = \sqrt{\frac{1}{PN} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^M \wedge m_{li}^{(\text{b})} - m_{li}^{(\text{e})} \wedge^2}, \quad (15b)$$

ahol $d_{pk}^{(\text{m})}$, $d_{pk}^{(\text{sz})}$ a p -edik pontbeli k -adik mért és számított szondaadat, és $m_{li}^{(\text{b})}$, $m_{li}^{(\text{e})}$ az l -edik mélységintervallum i -edik becsült és egzakt modellparamétere. Az utóbbi formula L számú homogén réteg jellemzésére is alkalmazható.

A fenti lineáris inverziós megközelítés a legtöbb esetben célravezető, azonban már nem túl távoli startmodelleknél is megfigyelhető, hogy az eljárás a célfüggvény egy lokális minimumában stabilizálódik. E probléma kezelésére alkalmasak az ún. globális szélsőérték-kereső eljárások, melyek bizonyos feltételek mellett képesek a célfüggvény abszolút szélsőérték helyét meghatározni. Az intervalluminverziós módszerek kutatása során, globális optimalizációs módszerek közül a Simulated Annealing módszert (Metropolis et al. 1953) valamint a Genetikus Algoritmus (Holland, 1975) valós számbábrázoláson alapuló változatát alkalmaztuk (Szabó, Hursán 2003, Dobróka et al. 2005). A globális módszerek alkalmazása nem csupán a pontossági igények növelése miatt merült fel. Látni fogjuk, hogy bizonyos új inverziós ismeretlenek, mint pl. a rétegvastagságok numerikus problémák miatt nem határozhatók meg lineáris inverziós módszerekkel.

A Simulated Annealing (SA) fémek speciális hűtésének analógiája alapján tervezett globális optimalizációs módszer, melynek folyamatirányító paramétere az alkalmasan megválasztott hőmérséklet és az ahhoz kapcsolódó hűtési ütem. Geman, Geman (1984) kimutatták, hogy a Metropolis által bevezetett SA eljárás globális minimumhoz történő konvergenciájának szükséges és elégséges feltétele a következő hűtési mechanizmus alkalmazása

$$T(q) = T_0 / \ln q,$$

ahol $T(q)$ a q -adik iterációs lépésbeli hőmérséklet és T_0 a kezdeti (kritikus) hőmérséklet. A fenti logaritmusos hűtési ütem esetén garantált a konvergencia az abszolút minimum-hely felé. A módszer igen hatékony, azonban komoly hátrányaként említhető, hogy akár több nagyságrenddel nagyobb futási idő szükséges az optimum meghatározásához, mint lineáris módszerek esetén. A klasszikus SA-t ezért többen továbbfejlesztették elsősorban a futási idő csökkentése céljából. Így született meg a VFSA (Very Fast Simulated Annealing) módszer (Ingber 1989), mely igen jól implementálható a mélyfúrás geofizikai inverz feladat esetén.

A VFSA módszer véletlen keresést hajt végre a modell-terben és a modellvektor komponenseit iterációról iterációra megfelelően változtatja. Az i -edik modellparaméter megváltozása a $(q + 1)$ -ik iterációs lépésben

$$m_i^{(q+1)} = m_i^{(q)} + y_i(m_i^{(\max)} - m_i^{(\min)}),$$

ahol $(m_i^{(\max)} - m_i^{(\min)})$ az i -edik modellparaméter terjedelme, és $y_i \in [-1, 1]$ perturbációs tag, mely a következő eloszlásból generált véletlen szám

$$y_i = \text{sgn}(u_i - 0,5) T_i \{(1 + 1/T_i)^{2u_i - 1} - 1\}.$$

A fenti kifejezésben T_i az i -edik modellparaméter egyedi hőmérsékletét jelöli (ahol $u_i \in [0, 1]$ egyenletes valószínűséggel generált szám). Ingber kimutatta, hogy a globális minimum a következő (a Geman által megadott jóval gyorsabb) hűtési ütem esetén is előáll

$$T_i^{(k)} = T_i^{(0)} e^{-c_i^{M/k}},$$

ahol $T_i^{(0)}$ az i -edik kezdeti modell hőmérséklet és c_i az ehhez tartozó folyamatszabályozó konstans. A véletlen keresés során minden lépésben kiszámítjuk a mérési és a számított adatok távolságát. Ezt az ún. energiafüggvényként (E) definiált mennyiséget pontonkénti inverzió (6), intervalluminverzió esetén (10) szerint is számítjuk. Az új modellparaméter elfogadását a $(q + 1)$ -edik és q -adik lépésben számított energiafüggvény értékek különbsége (ΔE) határozza meg. Az elfogadási kritérium (Metropolis-kritérium) a következő valószínűségi szabályon alapul:

$$P^{(e)} = \begin{cases} 1, & \text{ha } \Delta E \leq 0, \\ e^{-\Delta E/T}, & \text{ha } \Delta E > 0, \end{cases}$$

ahol $P^{(e)}$ az elfogadás valószínűségét és T az eljárás (egyedi v. modellhőmérséklettől különböző) globális hőmérsékletét jelöli. A fenti szabály alapján, ha az aktuális modellel számítva csökken az energiafüggvény értéke (javul az illeszkedés a mérési és a számított adatok között), akkor elfogadjuk az új modellt. Ha viszont nő az energia (nő az adattárbeli távolság), ekkor is van lehetőség az új modell elfogadására annak érdekében, hogy az aktuális modell a lokális minimumból kiszabaduljon. Ha ugyanis teljesül a $P \geq \alpha$ egyenlőtlenség (ahol $\alpha \in [0, 1]$ egyenletes valószínűséggel generált szám), akkor az új modellt elfogadjuk, ellenkező esetben elvetjük. Ezután tovább folytatódik a keresés.

A fenti globális módszer robusztus és hatékony, azonban tudnunk kell, hogy a becslés pontosságáról és megbízható-

ságáról egyetlen futtatásból nem szolgáltat információt. Lehetőség van sok futtatásból a modellparaméterekre bizonyos hibajellemzőket számítani, azonban ez irreálisan nagy futási időt eredményezne. Ehelyett mi az ún. kombinált inverziós eljárást alkalmaztuk, mely a globális algoritmust ötvözi néhány lineáris inverziós lépéssel az eljárás végén. Ugyanis a globális minimum környezetében a lokális módszerek is jól működnek, és sokkal (legalább egy nagyságrenddel) gyorsabban megtalálják az optimumot. A gyorsaság mellett további előny, hogy az utolsó lépésben számított Jacobi-mátrix segítségével képzett (11) és (13) mennyiségeken keresztül a becsült paraméterek hibája és megbízhatósága is meghatározható (Dobróka, Szabó 2005).

Hagyományos petrofizikai paraméterek meghatározása

Nevezzük hagyományos petrofizikai paramétereknek az (1) modellvektorban foglalt térfogatjellemző mennyiségeket! Ezek képezik az ipari gyakorlat számára legfontosabb tárolóparaméterek körét. Végezzünk összehasonlító vizsgálatot a pontonkénti és az intervalluminverziós módszerek között a paraméterek meghatározása tekintetében!

Az 1. táblázatban található inverziós célmodell paraméterei egy négyréteges üledékes összletet írnak le, melyben a porózus homokrétegeket különböző mértékben agyag szennyezi. A rétegtartalom víz, illetve az első és harmadik

1. táblázat Rétegenként homogén petrofizikai modell. Szintetikus pontonkénti és intervalluminverziós kísérletek modellparaméterei

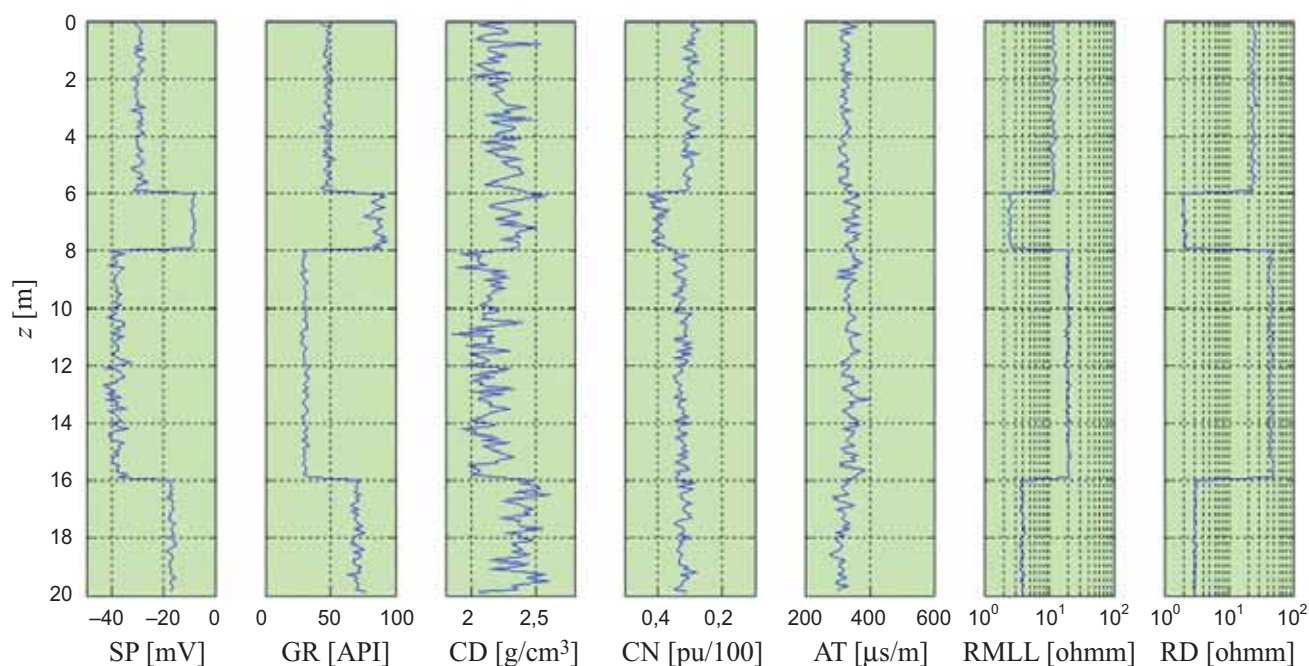
Table 1 Parameters of the synthetic model used for the investigations, it is built up from homogeneous layers

H [m]	POR	SX0	SW	VSH	VSD
6,0	0,2	0,8	0,4	0,3	0,5
2,0	0,1	1,0	1,0	0,8	0,1
8,0	0,3	0,8	0,3	0,1	0,6
4,0	0,1	1,0	1,0	0,6	0,3

2. táblázat 5% Gauss-zajjal terhelt szintetikus szelvényadatok pontonkénti és intervalluminverziós eredményei. Illeszkedési mérőszámok: $D_{d,0}$: startmodell relatív adattávolsága, $D_{m,0}$: startmodell modelltávolsága, D_d : inverziós eredmény relatív adattávolsága, D_m : inverziós eredmény modelltávolsága

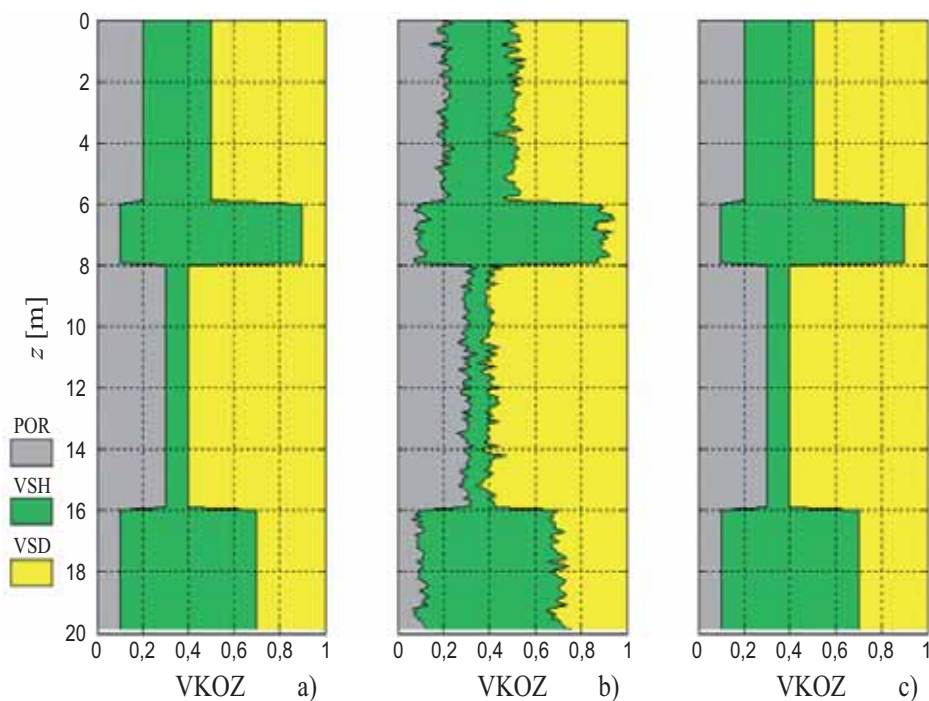
Table 2 Results of "pint-by-point" and interval inversions of synthetic well log data charged with 5% Gaussian noise. Notations: $D_{d,0}$: relative data distance of the starting model, $D_{m,0}$: model distance of the starting model, D_m : model distance after inversion

Inverziós eljárás	$D_{d,0}$ [%]	$D_{m,0}$ [%]	D_d [%]	D_m [%]
Lineáris pontonkénti	120,20	21,10	5,79	2,28
Globális pontonkénti	120,20	21,10	5,62	2,25
Lineáris intervallum	120,20	21,10	5,16	0,54
Globális intervallum	120,20	21,10	5,16	0,38



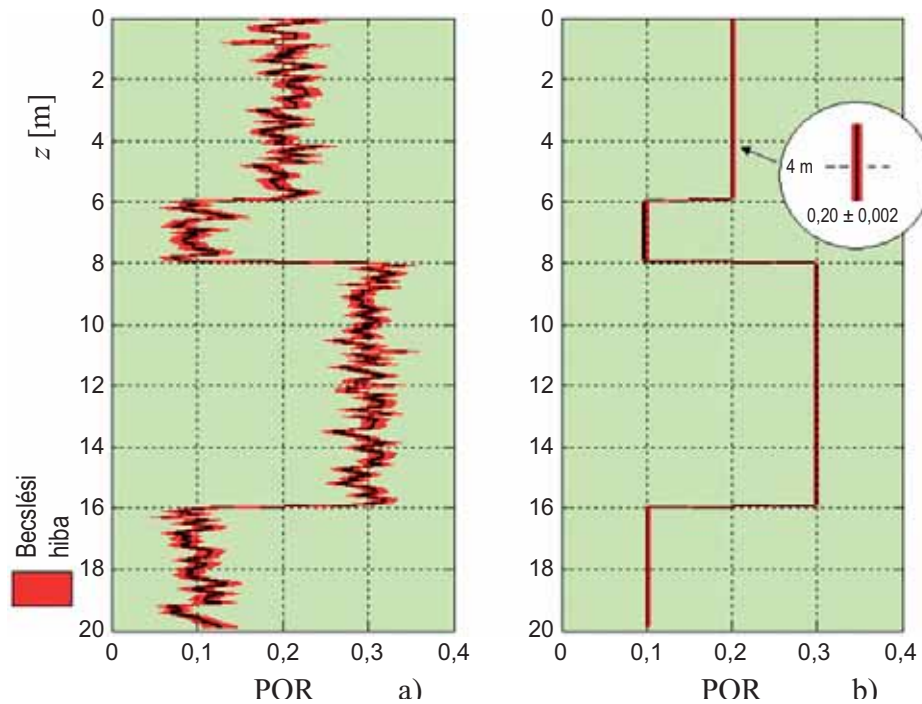
1. ábra | 5% Gauss-zajjal terhelt szintetikus mélyfúrési geofizikai szelvények mint a pontonkénti és az intervalluminverziós eljárás input adatrendszere. Jelölések: természetes potenciál (SP), természetes gamma (GR), kompenzált sűrűség (CD), kompenzált neutron (CN), akusztikus intervallumidő (AT), fajlagos ellenállás – microlaterolog (RMLL), fajlagos ellenállás – mélybehatólósú laterolog (RD)

Figure 1 | Synthetic well logs charged with 5% Gaussian noise as input data set of the interval inversion procedure. Notations are spontaneous potential (SP), natural gamma-ray (GR), compensated density (CD), compensated neutron (CN), acoustic traveltime (AT), microlaterolog (RMLL) and deep laterolog (RD)



2. ábra | Inverziós eredmények a porozitás (POR), agyagtartalom (VSH) és a kvarctartalom (VSD) tekintetében. A szelvények: a) petrofizikai célmodell; b) pontonkénti inverziós eredmény; c) intervalluminverziós eredmény (VKOZ: közettartalom)

Figure 2 | Inversion results by porosity (POR), shale content (VSH) and quartz content (VSD). Illustrations are target (petrophysical) model a), local ("point-by-point") inversion result b) and interval inversion result c). VKOZ marks the specific volume of rock



3. ábra | Becsült hiba a) pontonkénti inverzió és b) intervalluminverzió esetén, a porozitásnak az inverzió révén becsült hibahatárértékeit is feltüntettük

Figure 3 | Estimation errors in case of local (“point-by-point”) inversion a) and interval inversion b), the uncertainty of porosity values estimated by inversion is shown

rétegben szénhidrogén is telíti a pórusteret. A táblázatban H [m] a rétegvastagság, a többi petrofizikai paramétert az (1) modellvektor elemei képezik, ahol $VMA = VSD$ jelöli a homok fajlagos térfogatát. A direkt feladat megoldásával (3) alapján 0,1 m mintavételi közzel szintetikus szelvényadatokat generáltunk. Az adatokhoz további 5%-os Gauss-eloszlásból származó zajt adtunk a valódi mérések szimulálása céljából. Az így létrehozott adatrendszer szelvényeit az 1. ábrán láthatjuk.

A pontonkénti és a rétegenként homogén modell szerinti sorfejtésen alapuló intervalluminverziót több módszerrel elvégeztük. Mindkét esetben lineáris (Marquardt-algoritmus alapú), ill. VFSA optimalizációt is végrehajtottunk.

A 2. táblázatban a startmodellre és az eredményül kapott modellekre vonatkozó, (13) és (15a) alapján számított adat, ill. a (14) és (15b) által definiált modelltvávolságok szerepelnek. Az értékekből kiderül, hogy az intervalluminverzió által becsült modell (homogén rétegek esetén) nagyságrenddel jobban illeszkedik a célmodellhez. További javulás is megfigyelhető, hogy ha a lineáris optimalizáció helyett globális technikát alkalmazunk. Ez várható, hiszen a jelen példában a túlhatározottság aránya pontonkénti inverziónál 1,4, míg intervalluminverziónál 70.

A 2. ábrán vizuálisan is megfigyelhetjük, hogy a célmodell rekonstrukciója az intervalluminverziós módszer alkalmazásával mennyivel eredményesebb. A paraméterbecslés pontosságát a (11) alapján számított hibaintervallumokkal jellemeztük.

A 3. ábrán a becsült porozitás hibaintervallumait figyelhetjük meg pontonkénti és intervalluminverziós módszerek

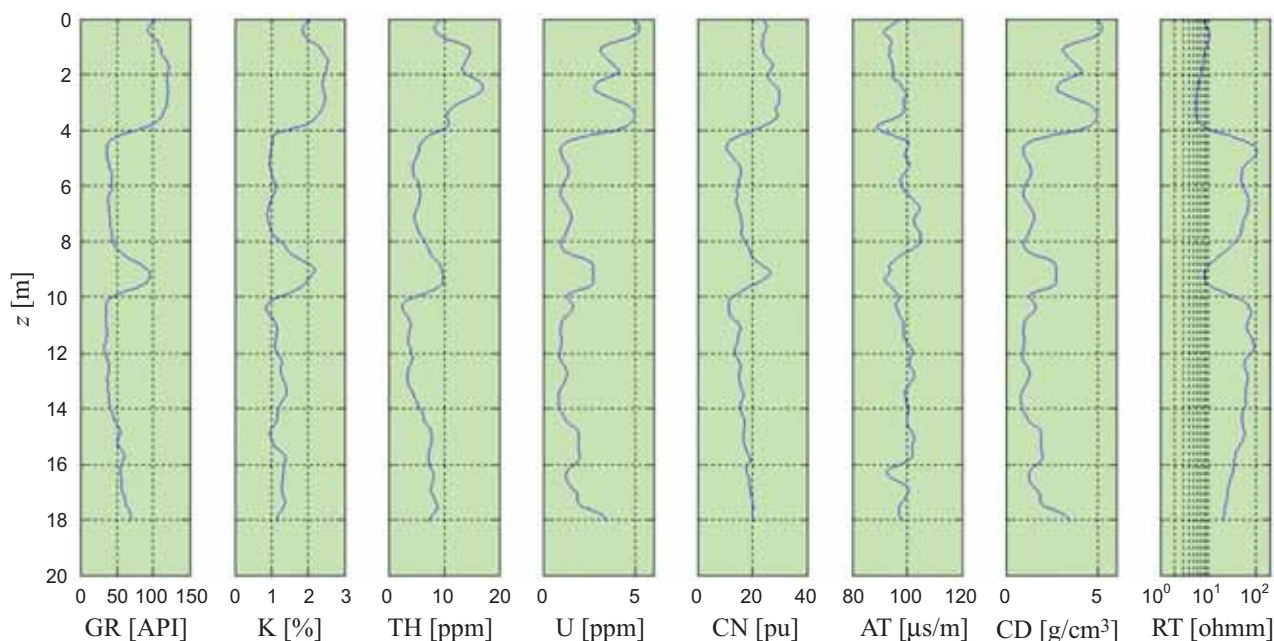
esetén. Látható, hogy a lineáris intervalluminverzióval kapott eredményt egy nagyságrenddel kisebb szórás jellemzi.

A 3. táblázatban az intervalluminverzióval eredményül kapott paraméterek és azok becslési hibája található. Emellett kiszámítottuk a korrelációs együtthatók átlagos értékét, mely 0,17-nek adódott, és az eredmények nagyfokú megbízhatóságát mutatja. Meg kell említenünk, hogy a rétegen belüli vertikális változás esetén a petrofizikai paramétereket alkalmas (pl. polinomok szerinti) sorfejtéssel kezelhetjük, és a sorfejtési együtthatókat ugyanúgy intervalluminverzióval meghatározhatjuk, erre korábban már közöltünk példát (Dobróka, Szabó 2005).

3. táblázat | 5% Gauss-zajjal terhelt szintetikus szelvényadatok intervalluminverziójának eredménye. Becsült petrofizikai paraméterek és azok hibái

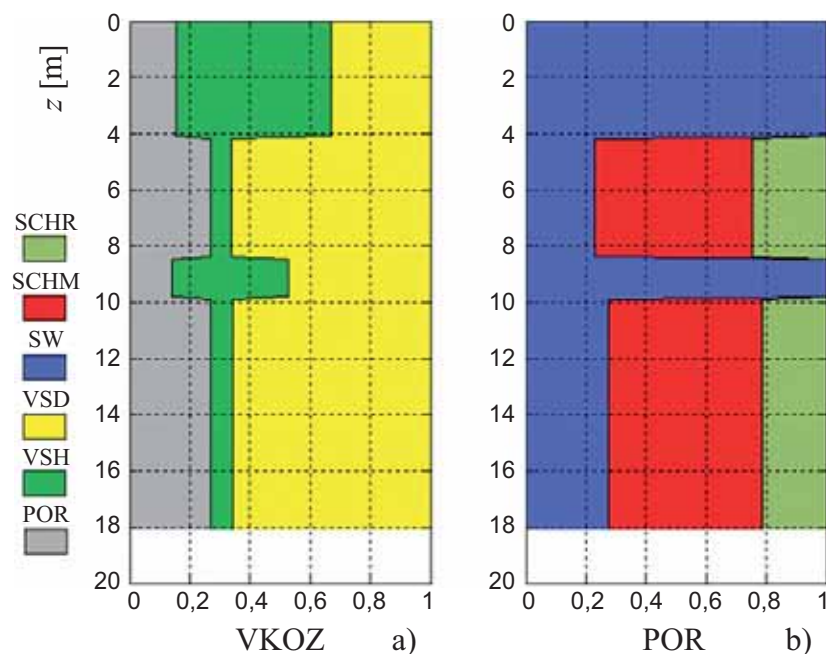
Table 3 | Results of interval inversions of synthetic well log data charged with 5% Gaussian noise. Estimated petrophysical parameters and their errors

Réteg	POR	SX0	SW	VSH	VSD
1	0,2003 (±0,0020)	0,7989 (±0,0046)	0,3999 (±0,0022)	0,3000 (±0,0029)	0,4907 (±0,0047)
2	0,0977 (±0,0038)	1,0000 (±0,0069)	1,0000 (±0,0095)	0,7996 (±0,0022)	0,1077 (±0,008)
3	0,2985 (±0,0015)	0,8034 (±0,0040)	0,3025 (±0,0014)	0,1010 (±0,0017)	0,5964 (±0,0042)
4	0,1010 (±0,0024)	0,9995 (±0,0052)	0,9990 (±0,0064)	0,6015 (±0,0029)	0,3005 (±0,0057)



4. ábra Fúrás-1 mélyfúrési geofizikai szelvényei, mint az intervalluminverziós eljárás input adatrendszere. Jelölések: természetes gamma (GR), kálium spektrális gamma (K), tórium spektrális gamma (TH), urán spektrális gamma (U), kompenzált neutron (CN), akusztikus intervallumidő (AT), kompenzált sűrűség (CD), az érintetlen zóna valódi fajlagos ellenállása (RT)

Figure 4 Well logs of borehole “Well-1” as input data set of the interval inversion procedure. Notations are natural gamma ray (GR), spectral gamma ray, potassium (K), spectral gamma ray, thorium (TH), spectral gamma ray, uranium (U), compensated neutron (CN), acoustic traveltime (AT), compensated density (CD) and true resistivity (RT)



5. ábra Fúrás-1-ben intervalluminverzióval becsült porozitás (POR), agyagtartalom (VSH), kvarc-tartalom (VSD), érintetlen zóna víztelítettsége (SW). Származtatott paraméterek: mozgásképes gáztelítettség (SCHM), maradék gáztelítettség (SCHHR). Az ábrán VKOZ a kőzet fajlagos térfogatát jelöli

Figure 5 Porosity (POR), shale content (VSH), quartz content (VSD) and water saturation of the undisturbed zone (SW) estimated by interval inversion in borehole “Well-1”. Derived parameters are movable hydrocarbon saturation (SCHM) and irreducible hydrocarbon saturation (SCHHR). VKOZ marks the specific volume of rock

Az intervalluminverziós módszert egy mezőbeli példán is szemléltetjük. Vegyük alapul a 4. ábrán látható valódi fúrás (Fúrás-1) szelvényeit (az invertálandó adatokat reprezentáló szelvényeket 0–20 m mélységbe transzformáltan ábrázoltuk)! A kiválasztott négyréteges szénhidrogén-tároló összlet a felső-pannonban helyezkedik el. A porózus, permeábilis rétegek jó tárolóképességgel rendelkező mederhomokkővek, melyekben helyenként aleuritcsíkok és -padok vannak. A rétegtartalom gáz, melynek hatása a neutronsűrűség crossploton is megjelenik. A vizsgált szakaszon mélységre illesztett és lyukhatásra korrigált adatrendszer állt rendelkezésünkre. Az intervalluminverziós kiértékelés során az (1) modellparamétereket tekintettük inverziós ismeretlennek. A (3) formulában jelen lévő nagyszámú függvénykonstanst labormérések és a helyi geológia alapján adtuk meg. Az intervalluminverziót elvégezve az 5. ábrán látható eredményt kaptuk. Az inverziós eredmények alapján készletbecslést is végeztünk. A (4a) szerint számított SCHM mozgásképes gáztelítettség a felső tárolókőzetben 52%, az alsóban 50%, míg az SCHR maradék gáztelítettség (4b) alapján az első esetben 25%, a másodikban pedig 22%. A szénhidrogén-tárolókban kapott értékek jó egyezést mutattak az ipar által párhuzamosan elvégzett számításokkal.

Új ismeretlenek bevonása az inverziós eljárásba

Az intervalluminverziós módszer pontossága és stabilitása mellett rendelkezik egy további előnyös tulajdonsággal, mely szintén az inverz feladat jelentős túlhatározottságából adódik. Hogy ha további inverziós ismeretleneket (pl. rétegjellemzőket vagy zónaparamétereket) vonunk be az intervalluminverziós eljárásba, akkor a nagyszámú adat mellett az ismeretlen modellvektor elemeinek a száma csak kismértékben növekszik, így az inverz feladat túlhatározottsága nem csökken számottevően. Ezzel a kiválasztott új inverziós paraméterek hasonló pontosság és megbízhatóság mellett automatikusan meghatározhatók. E tulajdonság mindenképpen előnyös a pontonkénti inverzióval szemben, ahol az új paraméterek értékét konstansnak kell rögzítenünk az inverzió során. Az új ismeretlenek kiválasztását előzetes paraméterérzékenységi vizsgálatokra alapoztuk. Az érzékenységi függvények bányageofizikai alkalmazására Dobróka (1988) tett javaslatot telephullámok abszorpciós-diszperziós tulajdonságainak vizsgálatánál. Gyulai (1995) a geoelektromos gyakorlatban széles körben mutatta be az érzékenységi függvények alkalmazhatóságát. A mélyfúrás geofizikában Horváth (1973) vizsgálta meg a becsült petrofizikai paraméterek pontosságát a szondaadatok hibájának ismeretében. Munkájában számszerűen közöl hibaadatokat, melyekből a paraméterérzékenységekre lehet következtetni. Később Ferenczy (1995), valamint Szabó (2005) részletesen megvizsgálta a mélyfúrás geofizikai válaszfüggvények érzékenységi függvényeit. Az utóbbi két munkából világosan kiderül, hogy nagyszámú nagy érzékenyséű paraméter található a válaszgyenletekben, melyek inverziós meghatározása kedvező, azonban a kis érzékenyséű mennyiségek származtatása óvatosságot indokol.

A réteghatár-meghatározás algoritmus

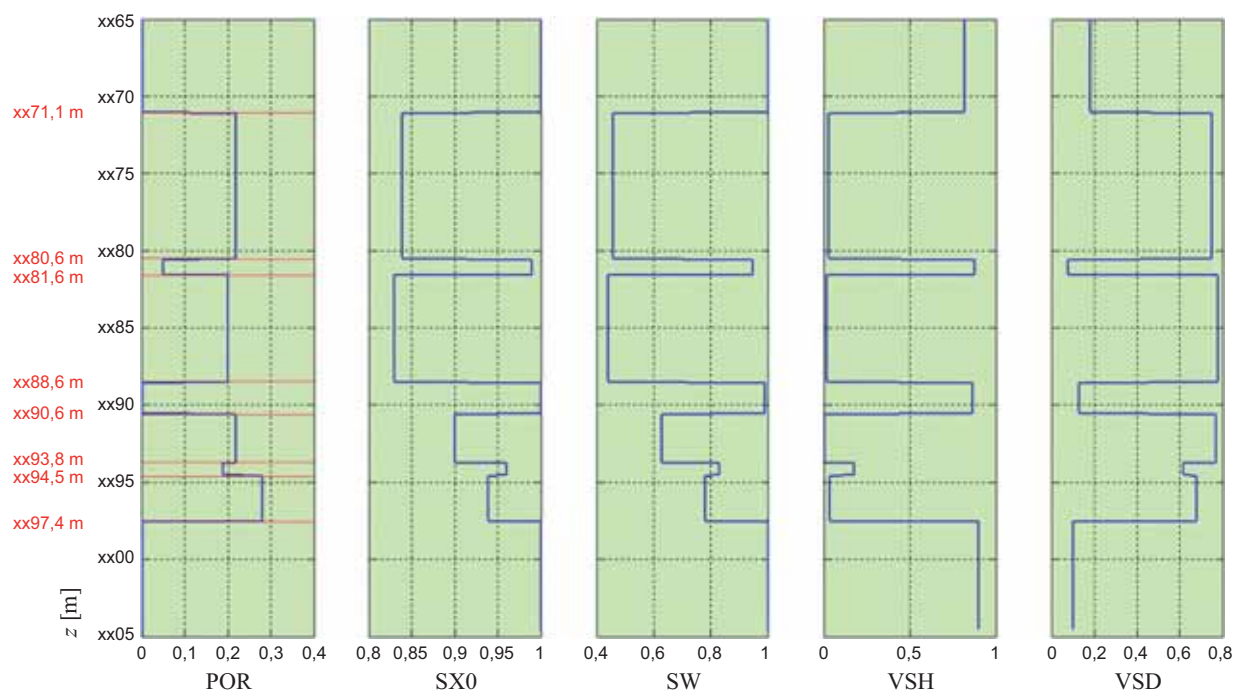
A kőzetek litológiai tagolása és a szénhidrogén-készletszámítás szempontjából a réteghatárok meghatározása a mélyfúrás geofizikai értelmezés alapproblémája. A réteghatárok helyzetét megadó réteghatár-koordináták a lokális válaszfüggvényekben nem jelennek meg, így a pontonkénti inverziós módszer velejárójaként kell számon tartanunk azt, hogy egy adott mélységpontban rendelkezésre álló néhány adat nem hordoz információt a réteghatárokról. Ebből adódóan a hagyományos, pontonkénti inverzióval csak az adott pontban érvényes petrofizikai paramétereket határozhatjuk meg. A réteghatárok kijelölése egy másik (inverzió kívüli) művelet. A gyakorlatban manuálisan, a közettípusra érzékeny (SP, GR vagy RS) szelvények alakja és viselkedése alapján jelölik ki a rétegek határát. Azonban tény, hogy a teljes mérési adatrendszerben benne van a réteghatárookra vonatkozó információ is. Mivel az intervalluminverziós eljárás egyetlen interpretációs/inverziós lépésben a teljes (és nem csupán egy ponton mért) adatrendszert dolgozza fel, megfelelő algoritmus kifejlesztésével lehetővé válik a réteghatárok meghatározása az inverzió keretében (vagyis ugyanazon lépésben, mint a petrofizikai modell paraméterek mélységfüggvénye). Mivel a rétegvastagságokkal az ismeretlen modellvektor elemeinek a száma csak kismértékben növekszik, így az inverz feladat jelentősen túlhatározott marad. Az automatikus, inverziós eljárás belüli réteghatár-meghatározás tehát a hagyományos, pontonkénti inverzióval nem hajtható végre, ezzel szemben az intervalluminverzió keretein belül megvalósítható.

A réteghatár-koordináták bevezetése az intervalluminverziós eljárásba a (8) sorfejtésben szereplő bázisfüggvényrendszer alkalmas megválasztásával történik. Ha a bázisfüggvényeket pl. (9) szerint vesszük fel akkor írható, hogy ahol $Z_1, \dots, Z_L$ mélységkoordináták L számú réteg alsó hatá-

$$m_i(z) = \int_{q=1}^Q B_q^{(i)} \psi_q(z, Z_1, Z_2, \dots, Z_L),$$

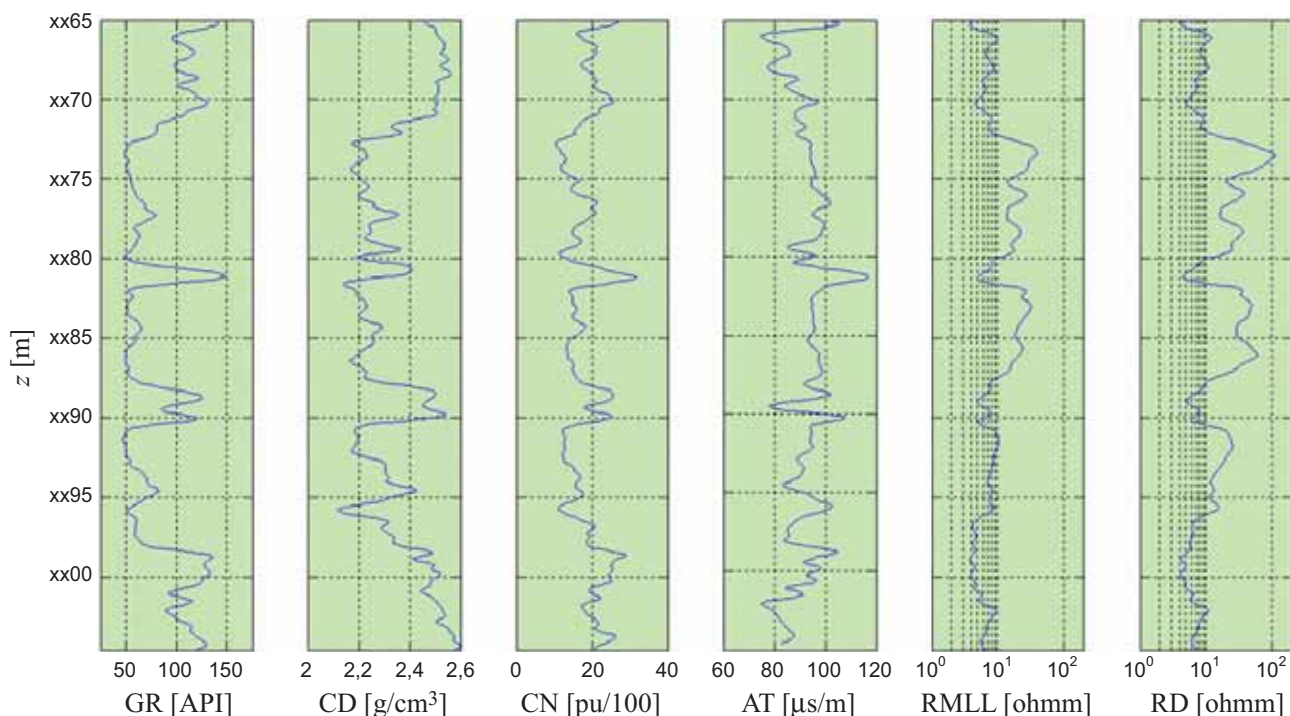
rát jelölik ki. Ezzel a (7) mélységkoordinátától függő válaszfüggvényekben megjelennek a réteghatár-koordináták és a direkt feladat alapján elvi adatrendszer számítható. Az inverz feladatot ezután a (10) célfüggvény optimalizációjával oldjuk meg. A feladat megoldása elvileg lineáris optimalizációval végrehajtható lenne, azonban az ismeretlen réteghatárokkal kitűzött inverz probléma (a Jacobi-mátrixban szereplő réteghatár-koordináták szerinti deriváltak, relatíve nagy szomszédos mélységponttávolság melletti közelítő számítása miatt) numerikusan instabil eljárásra vezet. A fenti okok miatt a lineáris inverziós módszerek helyett globális optimalizációs eljárásra szükséges áttérnünk, melyek nem igénylik a fenti deriváltak kiszámítását. Numerikus tesztek bebizonyították, hogy a rétegvastagságok véletlen keresése globális optimalizáció esetén olyannyira stabillá válik, hogy megbízható, startmodell-független, konvergens (nem túl lassú) megoldás határozható meg.

Bemutatunk egy mezőbeli példát az intervalluminverziós módszerrel történő réteghatár meghatározásra. Az invertált



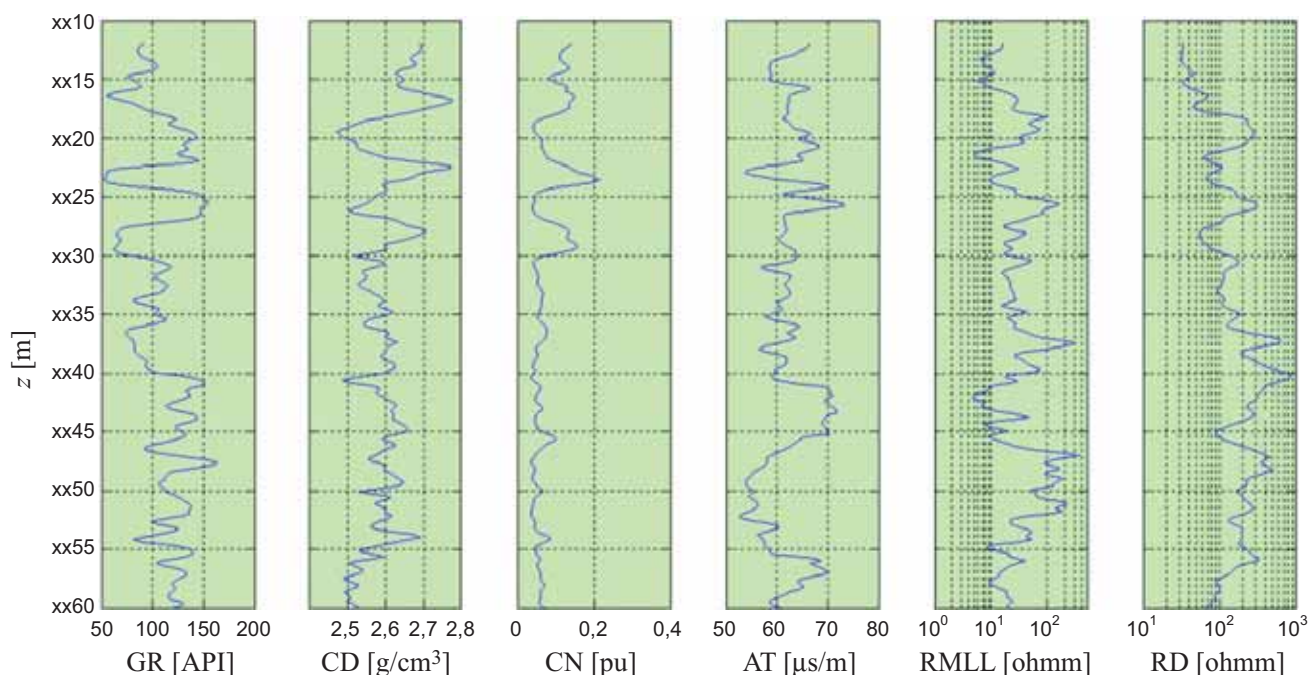
6. ábra | Automatikus réteghatár-meghatározás intervalluminverziós eljárással. Az inverzióval meghatározott paraméterek: porozitás (POR), kisépért zóna víztelítettsége (SX0), érintetlen zóna víztelítettsége (SW), agyagtartalom (VSH), kvarctartalom (VSD), réteghatár-koordináták (piros színnel kiemelve a mélységskála mellett)

Figure 6 | Automatic layer-boundary determination by the interval inversion procedure. Parameters estimated by inversion are porosity (POR), water saturation of the flushed zone (SX0), water saturation of the undisturbed zone (SW), shale content (VSH), quartz content (VSD) and layer-boundary coordinates (marked with red numbers by the depth scale)



7. ábra | Fúrás-2 mélyfúrési geofizikai szelvényei, mint az intervalluminverziós eljárás input adatrendszere. Jelölések: természetes gamma (GR), kompenzált sűrűség (CD), kompenzált neutron (CN), akusztikus intervallumidő (AT), fajlagos ellenállás – microlaterolog (RMLL), fajlagos ellenállás – mélybehatólós laterolog (RD)

Figure 7 | Well logs of borehole "Well-2" as input data set of the interval inversion procedure. Notations are natural gamma ray (GR), compensated density (CD), compensated neutron (CN), acoustic traveltime (AT), microlaterolog (RMLL) and deep laterolog (RD)



8. ábra Fúrás-3 mélyfúrás geofizikai szelvényei mint az intervalluminverziós eljárás input adatrendszere. Jelölések: természetes gamma (GR), kompenzált sűrűség (CD), kompenzált neutron (CN), akusztikus intervallumidő (AT), fajlagos ellenállás – microlaterolog (RMLL), fajlagos ellenállás – mélybehatalású laterolog (RD)

Figure 8 Well logs of borehole “Well-3” as input data set of the interval inversion procedure. Notations are natural gamma ray (GR), compensated density (CD), compensated neutron (CN), acoustic traveltime (AT), microlaterolog (RMLL) and deep laterolog (RD)

szelvényadatok egy valódi szénhidrogén-kutatófúrásból (Fúrás-2) származnak. Az intervalluminverziós feldolgozás céljából az üledékes összlet előzetesen 9 rétegre bontottuk, melyek rétegvastagságait mint inverziós ismeretleneket az eljárás során automatikusan „változtattuk”. A rétegsorban agyagos gáztároló homokkő és agyagrétegek váltakoznak, ahol (1) petrofizikai paraméterek ugyancsak ismeretlenek. A 6. ábrán látható, hogy a VFSA algoritmussal számított réteghatár-koordináták pozíciói jó egyezésben vannak a 7. ábra litológiai szelvényein kijelölendő réteghatárokkal. A petrofizikai paraméterek is reális tárolóparaméter értékeket mutatnak. A globális optimalizáció alkalmazása futási idő tekintetében sem volt hátrányos (5 perc CPU idő).

Több ásványi komponens együttes meghatározása

A szénhidrogén-kutatás gyakorlatában gyakran találkozunk egyszerű litológiájú szénhidrogén-tárolókkal. Ezek jellemzése a szelvényértelmezés gyakorlatában elméletileg egyszerű feladat, mivel az agyagos homokkőképződményekben elegendő egy ásványi komponenssel, a kvarccal számolni. A feladat nehézségét az adja, hogy az agyagtartalom, agyagtípus és agyageloszlás meghatározása korántsem egyszerű. A probléma tovább bonyolódik, amikor olyan tárolókkal kell dolgozni, melyeket ennél is bonyolultabb kőzetösszetétel, többásványos kőzetmátrix jellemez. Ebbe a körbe tartoznak az ún. komplex tárolók, pl. a repedezett karbonátok, metamorf és vulkáni kőzetek, melyek petrofizikai modellezése hagy még kívánnivalót maga után. A probléma sokoldalú. A

fenti tárolók relatíve nagy mélységben helyezkednek el, a szondáink által rögzített szelvényadatok általában zajosabbak, mint az üledékes kőzetek környezetében. Az ott bevált válaszegyenletek sem mindig alkalmazhatók, gyakran módosításra szorulnak. A válaszegyenletekben szereplő VMA_i kőzetmátrix fajlagos térfogatok ismeretlenek, melyek száma adott esetben 6–8, esetleg 8–10 is lehet. A válaszfüggvényekben szereplő mátrixkomponensekre vonatkozó függvénykonstansok értékeit pedig gyakran csak irodalomból tudjuk megadni. További különbség, hogy az üledékes kőzetek válaszegyenletei csak a kőzetek elsődleges (szemcseközi) porozitását tartalmazzák. Matematikailag ezt komplex tárolóknál is elfogadjuk, azonban ebben az esetben a porozitásnak tartalmaznia kell a gyakran jelen lévő repedések, üregek stb. által megjelenő másodlagos porozitást is. Ez az érték nagyságrenddel kisebb, mint a primer porozitás, így inverziónál nagyobb hangsúly inkább az ásványi komponensek fajlagos térfogatainak meghatározásán van. A válaszfüggvény-konstansok helyes megválasztásán is sok múlik, ugyanis ez a modellhibák elsődleges forrása. Nyilvánvalóan a felvázolt probléma nehezen kezelhető pontonkénti inverzióval, mivel a függvénykonstansok rögzített értékei mellett is alulhatározott inverz feladatottal állunk szemben.

A fenti probléma hatékonyan kezelhető az intervalluminverziós módszerrel, mivel a mátrixkomponensek fajlagos térfogatait mint új inverziós ismeretleneket bevonhatjuk az intervalluminverzióba, anélkül hogy a túlhatározottság számottevően csökkenne.

A 8. ábrán egy valódi fúrás (Fúrás-3) karotázsszelvényeit láthatjuk, melyet egy repedezett metamorf gáztároló összetételben mértek. Az intervalluminverziós eljárással 6 rétegben, rétegenként homogén modell szerinti közelítésben 48 ismeretlen határoztuk meg 3000 adat felhasználásával. Az inverziót VFSA algoritmussal végeztük, melynek eredményét a 9. ábrán láthatjuk (az ábrán tartalom alatt az egyes ásványi komponensek fajlagos térfogatát értjük). Az eredményül adódó modellen a számított adatok távolsága a mérési adatoktól ~12%. Ez az érték általában kb. kétszerese egy üledékes összetételben végzett átlagos inverzió eredményének, azonban a zajos szelvények és a direkt feladatban rejlő modellhibák mellett ez az eredmény elfogadható (különösen, ha az egyébként alulhatározott pontonkénti inverz feladat lehetőségeire gondolunk). Kedvező, hogy a nagyszámú ásványi komponens ellenére sem jelentkezett az ekvivalencia jelensége. Előfordulhat ugyanis, hogy bizonyos függvénykonstansok hasonló értéket vesznek fel különböző ásványok esetén és ez többértelműségi problémához vezet. A jelen példában ez nem fordult elő, mely ugyancsak az intervalluminverziós eljárás stabilitását támasztja alá.

Texturális paraméterek meghatározása

A (3) válaszfüggvényben szereplő BA, BM, BN paraméterek elsősorban a kőzetek texturális tulajdonságaitól függő mennyiségek. Meghatározásuk a szelvényértelmezés egyik komoly problémáját jelentik, ugyanis értékük területről területre, gyakran rétegről rétegre változik, és ehhez általában tapasztalati vagy csak szakirodalomból vett a priori információra támaszkodhatunk. Pontatlan megadásuk a válaszfüggvényeken keresztül nagy modellhibával terhelheti az inverziós eredményeket, így a megfelelő szelvényértelmezés szempontjából lényeges, hogy valósan becsüljük meg értéküket. Kiss (2003) szerint is a texturális jellemzők meg-

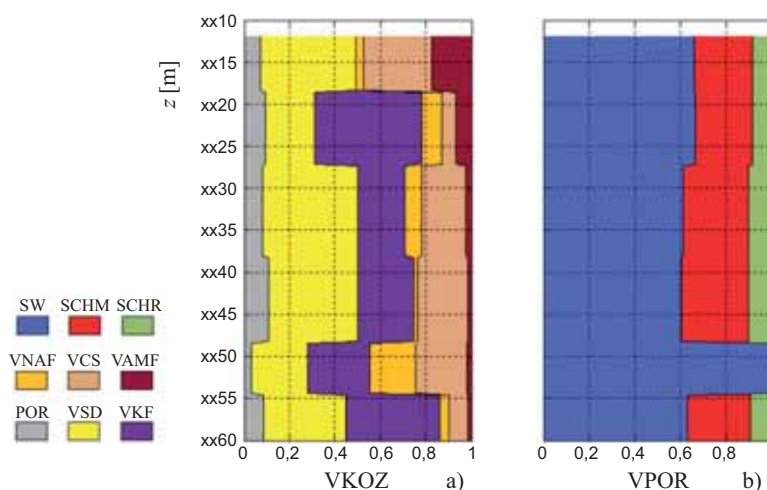
határozó paraméterek a szelvényértelmezés szempontjából. A pontonkénti inverzió gyakorlatában a texturális jellemzőket szénhidrogén-tároló zónánként konstansnak kezelik, azonban tapasztalati tény, hogy értékük a zónán belül is változhat. Az intervalluminverzió során e mennyiségeket is inverziós ismeretlennek tekinthetjük, és meghatározhatjuk mélységfüggésüket.

A tortuozitási (tekervényességi) tényezőt (BA), a cementációs kitevőt (BM) és a szaturációs kitevőt (BN) Archie (1942) vezette be, amikor nagyszámú labormérés alapján, ma már klasszikusnak számító formulát alkotott a víztelítettség és a mért fajlagos ellenállás kapcsolatának leírására. Azóta többen módosították és tovább fejlesztették az Archie-formulát létrehozva a direkt feladat megoldása szempontjából alapvető válaszegyenleteket a fajlagos ellenállásra. A gyakorlatban legelterjedtebben az ún. indonéziai formulákat használják, melyek nemlineáris kapcsolatot tételeznek fel a víztelítettség és a fajlagos ellenállás között (Poupon, Leveaux 1971)

$$\frac{1}{\sqrt{RT}} = \frac{VSH^{n1 - VSH/2h}}{\sqrt{RSH}} + \frac{(\sqrt{POR})^{BM}}{\sqrt{BA \cdot RW}} g(\sqrt{SW})^{BN},$$

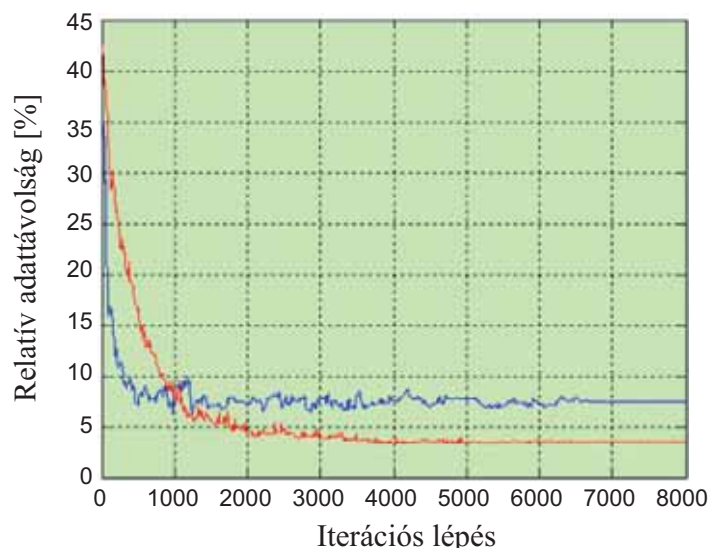
$$\frac{1}{\sqrt{RX0}} = \frac{VSH^{n1 - VSH/2h}}{\sqrt{RSH}} + \frac{(\sqrt{POR})^{BM}}{\sqrt{BA \cdot RMF}} g(\sqrt{SX0})^{BN},$$

ahol RSH, RW, RMF az agyag, a rétegvíz és az iszapfiltrátum fajlagos ellenállása. Paraméterérzékenységi vizsgálatok megmutatták, hogy a texturális paraméterek nagymértékben befolyásolják a fajlagos ellenállás adatokból számított víztelítettség-értékeket, ezen keresztül az inverziós paraméterbecslést (Ferenczy 1995). Ez azt jelenti, hogy inverziós meghatározhatóságuk kedvező. Szintetikus intervalluminverziós tesztelesek ezt ugyancsak megerősítették, ahol a valódi méréseket szimuláló zajos szintetikus szelvényadatokat invertáltunk.



9. ábra Fúrás-3-ban intervalluminverzióval becsült szelvények: porozitás (POR), kvarctartalom (VSD), káliumfeldspát-tartalom (VKF), nátriumfeldspát-tartalom (VNAF), csillámtartalom (VCS), amfibolit-tartalom (VAMF), az érintetlen zóna víztelítettsége (SW). Származtatott mennyiségek: mozgásképes szénhidrogén-telítettség (SCHM) és maradék szénhidrogén-telítettség (SCHR). Az ábrán a kőzet fajlagos térfogata (VKOZ)

Figure 9 Porosity (POR), quartz content (VSD), potassium feldspar content (VKF), sodium feldspar content (VNAF), mica content (VCS), amphibolite content (VAMF) and water saturation of the undisturbed zone (SW) estimated by interval inversion in borehole "Well-3". Derived parameters are movable hydrocarbon saturation (SCHM) and irreducible hydrocarbon saturation (SCHR). VKOZ marks the specific volume of rock

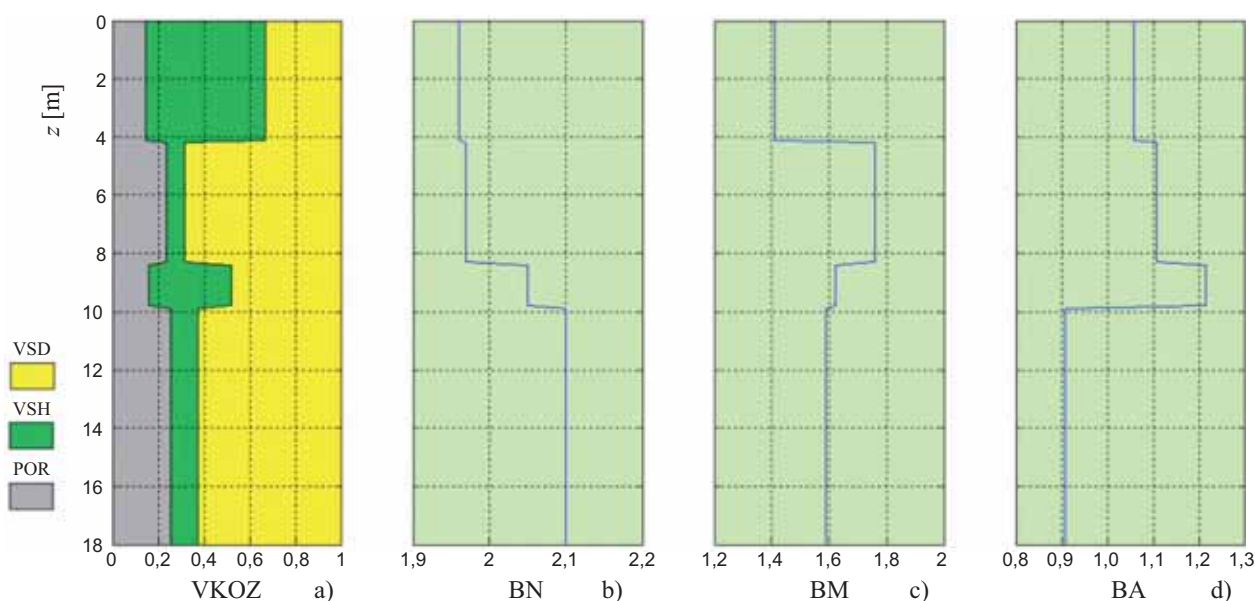


10. ábra | Texturális paraméterek meghatározására irányuló intervalluminverziós eljárás konvergenciája (kék görbe: BA, BM, BN paraméterek fixek, piros görbe: BA, BM, BN paraméterek inverziós ismeretlenek)

Figure 10 | The convergence of the interval inversion procedure performing the determination of textural parameters (blue curve represents the case of inversion when BA, BM, BN are fixed and the red one shows an inversion run beside unknown BA, BM, BN)

Mezőbeli példánkban a BA, BM, BN texturális paraméterek (1) petrofizikai paraméterekkel történő szimultán meghatározását mutatjuk be a VFSA algoritmus alkalmazásával. Az intervalluminverzióba bevont adatrendszert Fúrás-1 szelvényadatai alkották (4. ábra). Az összehasonlítás kedvéért először a texturális paramétereket rögzítettük és az (1) paramétereket határoztuk meg inverzióval, majd ezután minden paramétert ismeretlenként kezelve végeztünk inverziós futtatást. A 10. ábra a konvergencia alakulását mutatja a két különböző inverziós eljárás során. Mindkét ábrán az optimum felé történő határozott konvergencia látható, mi-

közben több lokális minimumból kiszabadul az adott eljárás. Első esetben, amikor a texturális paramétereket tapasztalati értékeken rögzítettük az adattérbeli illeszkedés $D_d = 7,41\%$ volt. Ezzel szemben a második inverzió igen jelentős, több mint kétszeres javulást hozott a mért és számított adatok illeszkedésében. Ekkor a relatív adattérbeli távolság $D_d = 3,49\%$ -nak adódott. Az eredményszelvényeket a 11. ábrán láthatjuk, melyek a konszolidálatlan üledékes rétegsorra reális texturális paraméter értékeket mutatnak. Látható, hogy a texturális paraméterek, a korábbi feltételezésekkel megegyező módon igen változékonyak.



11. ábra | Fúrás-1-ben intervalluminverzióval becsült szelvények hagyományos a) és texturális paraméterek b)–d). A jelölések: porozitás (POR), agyagtartalom (VSH), kvarctartalom (VSD), tortuozitási tényező (BA), cementációs kitevő (BM), szaturációs kitevő (BN)

Figure 11 | Conventional a) and textural b)–d) parameters estimated by interval inversion procedure. Notations: porosity (POR), shale content (VHS), quartz content (VSD), tortuosity factor (BA), cementation factor (BM), saturation exponent (BN)

Morfológia meghatározásának lehetőségei

E zárófejezetben egy, az intervalluminverziós eljárásra vonatkozó ígéretes fejlesztési irányt szeretnénk bemutatni. Eddig azt láttuk, hogy a réteghatárok mélységei az intervalluminverziós eljárás keretében meghatározhatók. Az automatizált réteghatár-meghatározás azonban kiterjeszthető 2D és 3D esetre is, mivel a sorfejtésen alapuló intervalluminverziós eljárás bázisfüggvényét felvehetjük úgy is, hogy az nemcsak a mélység, hanem a horizontális koordináták függvénye is legyen. Ennek következtében a réteghatárok elhelyezkedése már a térben is meghatározható. Ez gyakorlatilag a szelvények geológiai korrelációjának az automatizált megvalósítása, hiszen több fúrás adatrendszerét egyesítve számíthatjuk ki a réteghatárok térbeli elhelyezkedését. A módszer egyaránt alkalmas a petrofizikai paraméterek szimultán meghatározására is. Numerikus oldalról ennek előnye az, hogy a fúrások adatainak integrálásával a túlhatározottság mértéke tovább növelhető, és ez további minőségi javulást eredményez a becsült paraméterek pontossága és megbízhatósága tekintetében.

Legyen x a horizontális koordináta, amely mentén a fúrások egymás mellett elhelyezkednek! Az intervalluminverziós eljárás számára intervallumon értelmezett válaszfüggvényeket szükséges definiálnunk, mellyel az 1D válaszfüggvények rendszerét kiterjeszthetjük pl. 2D-s esetre. Ekkor a petrofizikai paramétereket, mint a z mélység- és az x horizontális koordináta függvényeit írjuk fel. Így kapjuk a k -adik válaszfüggvényt

$$d_k(x, z) = g_k(m_1(x, z), m_2(x, z), \dots, m_M(x, z)),$$

ahol $d_k(x, z)$ az x koordinátájú fúrás z mélységben számított k -adik adata és $m_i(x, z)$ pedig ugyanitt az i -edik közetfizikai paraméter értéke. A fenti válaszfüggvényben szereplő modellparaméterek folytonos függvények, melyeket diszk-

retizálunk szükséges. Sorfejtési eljárást alkalmazva az i -edik réteglejelmző paraméter általános sorfejtett alakja

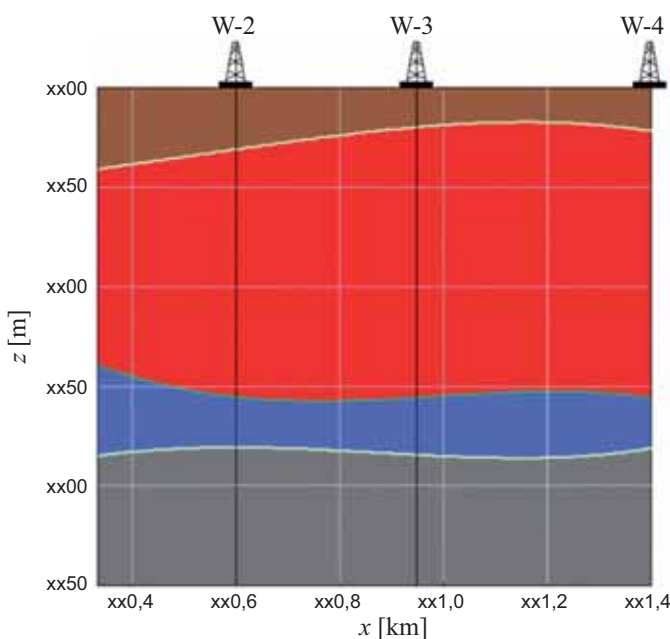
$$m_i(x, z) = \bigvee_{q=1}^{Q_i} B_q^{(i)} \psi_q(x, z),$$

ahol $B_q^{(i)}$ az i -edik petrofizikai paraméter q -adik sorfejtési együtthatója (Q_i a sorfejtéshez szükséges tagok száma), ψ_q pedig a q -adik ismert (kétfváltozós) bázisfüggvényt jelöli. Az inverz feladat a korábbiakhoz hasonló módon oldható meg a B sorfejtési együtthatókra mint ismeretlenekre nézve. A mért és számított adatok eltérését jellemző célfüggvény minimalizálását VFSA eljárással végeztük, a numerikus stabilitás fenntartása érdekében. Az alkalmazott célfüggvény a következő

$$\Gamma = \frac{1}{FPN} \bigvee_{f=1}^F \bigvee_{p=1}^P \bigvee_{k=1}^N \frac{d_{fpk}^{(m)} - d_{fpk}^{(e)}{}^2}{d_{fpk}^{(m)}} \text{ " min. ,}$$

ahol F a fúrások, P a mélységpontok és N az alkalmazott szondák száma. Az inverziós eljárással végeredményben a rétegvastagság-függvények, valamint a petrofizikai paraméterek mélység- és horizontális koordináta szerinti változásai szimultán meghatározhatók.

Szintetikus teszteléseket előzetesen agyagos homokkő, ill. karbonátos szénhidrogén-tároló modelleken végeztünk. A nagymértékű túlhatározottság következtében a rétegvastagság-függvényeket a petrofizikai paraméterekkel együtt nagy pontossággal rekonstruáltuk (Dobróka et al. 2009). A 12. ábrán három valódi szénhidrogén-kutatófúrásban gyűjtött mélyfúrési geofizikai adatrendszer alapján végzett intervalluminverzió eredményét látjuk. A W-2, W-3, W-4 jelű fúrások egy profilon helyezkednek el, ahol a teljes szelvényhossz 1 km. Az adatrendszer a (2) szelvénytípusokat tartalmazta. Az inverziót VFSA módszerrel végeztük el, melynek keretében a rétegvastagság-függvényeket negyedfokú hatványfüggvényekkel közelítettük (a közetfizikai paramétere-



12. ábra W-2, W-3 és W-4 fúrások adatainak szimultán intervalluminverziójával becsült rétegvastagság-függvények (negyedfokú hatványfüggvények). A közettani egységek felülről lefelé: agyagos rétegösszlet, szénhidrogén-tároló zóna, víztároló zóna, homokos-agyagos rétegösszlet

Figure 12 Layer-thickness functions of the fourth-degree estimated by the simultaneous interval inversion of data acquired from borehole "W-2", "W-3" and "W-4". Lithological units shown lower down are shaly sequence of strata, hydrocarbon reservoir zone, water-bearing zone and sandy/shaly series of strata

ket zónánként konstansnak tételeztük fel). A fenti módszer természetesen tovább finomítható újabb rétegek bevezetésével, valamint a bázisfüggvények fokszámának növelésével. Az ismeretlenek száma természetesen addig növelhető, ameddig az inverziós eljárás stabil marad. Ez a kompromisszum jelenti az intervalluminverziós módszer egyik korlátját.

Összefoglalás

A cikkben bemutatott sorfejtéses inverzió alapuló intervalluminverziós eljárást. A módszer sok előnyös tulajdonságot mutat a konvencionális, pontonként végzett inverzióval szemben. Az előnyök fő oka a mélységkoordináta-függő petrofizikai mennyiségek sorfejtésre alapozott diszkretizációja, mivel ennek köszönhető az intervalluminverzió erősen túlhatározott jellege. Az inverziós eljárásokat és a direkt modellezés kérdéseit megvizsgálva a tesztelesek során arra a következtetésre jutottunk, hogy a globális optimalizáció alapuló intervalluminverziós módszer igen hatékony eszköz lehet a korszerű szelvényértelmezésben. E módszer nagymértékben startmodellfüggetlen, pontos, stabil és megbízható, emellett információt tud szolgáltatni a réteghatárok helyzetéről, valamint egyéb zónaparaméterekről, amire a hagyományos, pontonkénti inverzió korlátozottan vagy egyáltalán nem képes. Az alkalmazott globális optimalizációs módszerek létjogosultságát a mélyfúrási geofizikai direkt feladat „egyszerűsége” és gyorsasága is alátámasztja. E módszerek konvergenciájának sebessége tovább növelhető a fentiekben megemlített kombinált inverziós módszer alkalmazásával, mely egyben megoldja a becsült paraméterek hibája és megbízhatósága jellemzésének problémáját is. Az intervalluminverzióba könnyen beépíthetők további szelvénytípusok válaszfüggvényei (direkt feladat fejlesztése), továbbá a módszer közvetlenül alkalmazható szénhidrogéntárolók minőségének jellemzésére. Ugyanis az iparban a tárolójellemzőket intervallumonként (rétegenként, zónánként) a pontonkénti eredmények átlagából számítják ki. Ezzel szemben az intervalluminverziós módszer rétegjellemzőket szolgáltat, melyek pontossága és megbízhatósága nagy. A módszer könnyen továbbfejleszthető, mivel tetszőleges bázisfüggvény szerinti sorfejtéssel diszkretizálja a petrofizikai paraméterek mélységi eloszlását. Mezőbeli adatok inverziója is megmutatta, hogy pl. a zónaparaméterek tekintetében is egyértelműen előnyös a módszer használata, mivel a zónabeli konstansok helyett folytonos (rétegről rétegre vonatkozó), szelvényyszerű információt nyerhetünk. Ugyanakkor a zónaparamétereken keresztül a válaszfüggvények automatikus pontosítása is megtörténik. A módszert a jövőben az ipari gyakorlat igényeinek megfelelően igyekszünk továbbfejleszteni.

Köszönetnyilvánítás

A dolgozatban bemutatott eredmények csaknem két évtizedet felölelő kutatási szakaszban születtek, amelyben a munkát a MOL Nyrt., az OTKA és az MTA részbeni támogatásával végeztük.

A szerzők köszönetet mondanak az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok támogatásáért (projektsz.: T049852). A szerzők köszönetüket fejezik ki a MOL Nyrt. KTD Tárolóértékelés szakembereinek az együttműködésért. Ezúton is kifejezzük köszönetünket a Magyar Tudományos Akadémiának az MTA Miskolci Egyetem Kutatócsoportjának létrehozásáért és támogatásáért.

Hivatkozások

- Alberty M., Hashmy K. H., 1984: Application of ULTRA to log analysis. SPWLA 25th Annual Logging Symposium, paper 1984-Z.
- Archie G. E., 1942: The electrical resistivity as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the Mining and Metallurgical Engineers, 146, 54–62
- Baker Atlas, 1996: OPTIMA. Express Reference Manual.
- Dobróka M., 1988: On the absorption-dispersion characteristics of channel waves propagating in coal seams of varying thickness. Geophysical Prospecting, 36/3, 326–328
- Dobróka M. (témavezető), 1995: Együttes inverziós algoritmusok bevezetése a mélyfúrási geofizikai értelmezésbe. Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék
- Dobróka M., Szabó P. N., 2005: Combined global/linear inversion of well-logging data in layer-wise homogeneous and inhomogeneous media. Acta Geodetica et Geophysica Hung. 40/2, 203–214
- Dobróka M., Szabó P. N., Kiss B., Krasznavölgyi T., 2005: Petrophysical interpretation of well log data using VFSA-I² algorithm. 67th EAGE Conference & Exhibition, Madrid. Paper 215, ISBN 9073781981
- Dobróka M., Szabó P. N., Cardarelli E., Vass P., 2009: 2D inversion of borehole logging data for simultaneous determination of rock interfaces and petrophysical parameters. Acta Geodetica et Geophysica Hungarica, 44/4, 459–479
- Etnyre L. M., 1984: Practical Application of Weighted Least Squares Methods to formation evaluation. Part I. The Log Analyst January–February, Part II. The Log Analyst, May–June
- Ferenczy L., Steiner F., 1987: Method of the most frequent value in the well-log interpretation. 32nd International Geophysical Symposium. Proceedings, Dresden
- Ferenczy L., 1995: Kiegészítés a statisztikus értelmezési rendszerek anyagához. Tanszéki segédlet, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék
- Fertl W. H., Ball M. S., Chace D. M., 1987: The Well Data System (WDS): “An Advanced Formation Evaluation Concept in a Microcomputer Environment” SPE 17034
- Geman S., Geman D., 1984: Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. IEEE Trans., Pattern analysis and Machine Intelligence, 6, 6
- Gyulai Á., 1995: Dölt réteges szerkezetek geoelektromos kutatási lehetőségének vizsgálata analitikus előremodellezéssel. Magyar Geofizika 36, 1.
- Holland J. H., 1975: Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Horváth Sz. B., 1973: The accuracy of petrophysical parameters as derived by computer processing. The Log Analyst, XIV/6, 16–25
- Ingber L., 1989: Very fast simulated reannealing. Math. Comput. Modeling 12, 963–993
- Kiss B., 2003: Egy kulcsparaméter a sikeres szelvényértelmezésben. Nemzetközi Geofizikai-Földtani-Fluidumbányászati-Környezetvédelmi Konferencia. Szolnok, Paper A10

- Kormos L., 1987: Statisztikus értelmezési eljárások alkalmazása szénhidrogén-tárolók kvantitatív karotázs interpretációjában. Doktori értekezés
- Marquardt D. W., 1959: Solution of nonlinear chemical engineering models. Chem. Eng. Prog. 55, 6
- Mayer C., Sibbit A., 1980: GLOBAL, a new approach to computer-processed log interpretation. SPE 9341, 14
- Menke W., 1984: Geophysical data analysis – Discrete inverse theory. Academic Press, Inc. London Ltd.
- Metropolis N. et al., 1953: Equation of state calculations by fast computing machines. J. Chem. Phys. 21, 1087–1092
- Poupon A., Leveaux J., 1971: Evaluation of water saturation in shaly formation. Trans., Eleventh Annual SPWLA Logging Symposium
- Szabó N. P., Hursán L., 2003: The interpretation of well log data by means of Float Encoded Genetic Algorithm. 65th EAGE Conference & Exhibition, Stavanger. Paper 261, ISBN 90-73781-25-6.
- Szabó N., 2004: Mélyfúrési geofizikai adatok értelmezésének modern inverziós módszerei. PhD értekezés, Miskolci Egyetem.
- Tarantola A., 1987: Inverse problem theory – Methods for data fitting and model parameter estimation. Elsevier.