

MÓDSZERFEJLESZTÉS MÉLYFŰRÁSI GEOFIZIKAI ADATOK INTEGRÁLT INTERVALLUM-INVERZIÓJÁRA FÖLDTANI SZERKEZETEK MORFOLÓGIÁJÁNAK MEGHATÁROZÁSA CÉLJÁBÓL

OTKA Kutatási zárójelentés

Miskolc
2010. február

Az

Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA) Bizottsága

2004. december 14-i döntésével támogatásra elfogadta a ME Geofizikai Tanszékének

MÓDSZERFEJLESZTÉS MÉLYFŰRÁSI GEOFIZIKAI ADATOK INTEGRÁLT INTERVALLUM-INVERZIÓJÁRA FÖLDTANI SZERKEZETEK MORFOLÓGIÁJÁNAK MEGHATÁROZÁSA CÉLJÁBÓL

címmel benyújtott **T049852** jelű Tematikus pályázatát.

A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének munkacsoportja az elfogadott Munkatervben foglaltaknak megfelelően végezte el a kutatást és az ahhoz kapcsolódó fejlesztést, beleértve a szükséges számítógépi szoftverfejlesztést is. Az egy évvel meghosszabbított ötéves kutatási szakaszban az alábbi kutatók közreműködésével folyt a munka

Dr. Dobróka Mihály egyetemi tanár, témavezető (2005-2010)

Dr. Gyulai Ákos egyetemi tanár, (2005-2010)

Dr. Steiner Ferenc professzor emeritus, (2005-2010)

Dr. Szabó Norbert Péter egyetemi tanársegéd, (2005-2009)

Vass Péter tudományos segédmunkatárs, (2009-2010).

Az elért eredményekről a jelen összefoglaló zárójelentésben számolunk be.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	4
I. A MÉLYFŰRÁSI GEOFIZIKAI ADATOK INTERVALLUM INVERZIÓJÁNAK FEJLESZTÉSE (1.-2. kutatási év).....	5
1. A RÉTEGEN BELÜLI INHOMOGENITÁS INTERVALLUM INVERZIÓS MEGHATÁROZÁSA.....	6
1.1 A rétegen belüli inhomogenitás intervallum inverziós leírása	7
1.2 Kombinált intervallum inverziós algoritmus.....	9
1.3 A direkt feladat során alkalmazott válaszgyenletek.....	10
1.4 Szintetikus tesztelési eredmények.....	12
1.5 Inverziós vizsgálatok terepi adatokon.....	18
2. A MODELL- ÉS ZÓNAPARAMÉTEREK ÉRZÉKENYSÉGI FÜGGVÉNYEINEK VIZSGÁLATA	27
2.1 A modellparaméterek érzékenységi függvényeinek vizsgálata.....	27
2.2 A zónaparaméterek érzékenységi függvényeinek vizsgálata	33
3. A ZÓNAPARAMÉTEREK INVERZIÓN BELÜL TÖRTÉNŐ MEGHATÁROZÁSA	35
3.1 A cementációs kitevő inverziós meghatározása	36
3.2 A tortuozitási tényező inverziós meghatározása.....	42
3.3 A szaturációs tényező inverziós meghatározása.....	46
4. AZ EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA „TEREPI MÉLYFŰRÁSI GEOFIZIKAI SZELVÉNYADATOKON”	50
4.1 Globális intervallum inverziós algoritmus bemutatása	50
4.2 Az általánosított válaszgyenlet-rendszer	52
4.3 Karbonátos-kvarc (komplex) tárolók intervallum inverziós kiértékelése	54
4.4 Metamorf (komplex) tárolók intervallum inverziós kiértékelése	64
II. AZ INTERVALLUM INVERZIÓS MÓDSZER ALKALMAZÁSA CH-TÁROLÓ SZERKEZETEK MORFOLÓGIÁJÁNAK VIZSGÁLATÁRA (3.-5. kutatási év)	72
1. A RÉTEGHATÁR MÉLYSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA INTERVALLUM INVERZIÓVAL	72
1.1. A réteghatár meghatározás algoritmus és intervallum inverziós leírása.....	72
1.2. A direkt feladat során alkalmazott válaszgyenletek	76
1.3. Érzékenység, stabilitás és pontossági vizsgálatok szintetikus adatrendszeren.....	80
1.4. Terepi adatok inverziója	85
2. TÖBB MÉLYFŰRÁS ADATAINAK EGYÜTTES INVERZIÓJA.....	89
2.1. A 2-D intervallum inverziós eljárás	89
2.2. Petrofizikai paraméterek meghatározása 2-D szerkezeten	93
3. A RÉTEGHATÁR-KOORDINÁTÁK MEGHATÁROZÁSA TÖBB MÉLYFŰRÁS ADATAINAK EGYÜTTES INVERZIÓJÁVAL – a morfológia meghatározhatósága 2D szerkezeteken.....	102
3.1. Petrofizikai paraméterek és a réteghatárok együttes meghatározása 2-D-s homokkő tároló szerkezeten.....	102
3.2. Petrofizikai paraméterek és a réteghatárok együttes meghatározása 2-D-s komplex tároló szerkezeten.....	105
3.3. In situ 2-D rétegvastagság-meghatározás intervallum inverzióval	116
4. A CH-TÁROLÓ MORFOLÓGIÁJA MEGHATÁROZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA 3D SZERKEZETEKEN.....	117
III. AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA (1.-5. kutatási év)	118

BEVEZETÉS

A mélységpontenkénti inverzió a mélyfúrési geofizikai adatok értelmezésének elterjedten használt módszere. Ennek az ipari gyakorlatban számos megvalósítása ismeretes, közös vonás, hogy egy adott mélységpontban rendelkezésre álló néhány adat (a különböző lyukeszközökkel felvett szelvényekből az adott mélységpontban rendelkezésre álló adatok) alapján határozzák meg a petrofizikai paraméterek lokális értékeit. A geofizikai inverzió fogalomrendszerében az így felállított inverz feladat ún. túlhatározott probléma, amelyben az adatok száma (kis mértékben) meghaladja a meghatározandó ismeretlenek számát. Ismeretes tény, hogy kisszámú mérési adat inverziója esetén az eredményt a mérési hiba (zaj) igen erősen befolyásolja, így a lokális paraméterbecslés pontosságát és megbízhatóságát illetően nem juthatunk kielégítő eredményre.

Minden mérnöki mérésből származó adathoz hozzátartozik meghatározásának hibája. Így van ez a mélyfúrési geofizikai adatokból leszarmaztatott petrofizikai paraméterekkel is. Ezek meghatározásának hibáját befolyásolja a mérési (szelvény) adatok mérési hibája és az inverz feladat végrehajtásából származó (becslési) hiba. A lyukeszközök mérési pontossága technikailag adott, ezen az értelmezés során általában már nem segíthetünk. Alapvető feladat azonban a petrofizikai paraméterek becslési hibájának csökkentése.

A paraméterbecslés minőségének javításának egyik útja a direkt feladat megoldásának javítása, azaz a válaszgyenletek pontosítása. Ez egyúttal azt a törekvést jelenti, hogy az inverz feladat megoldásában a valóságot minél jobban leíró (közelítő) modelleket állítsunk fel, válaszgyenleteink a fizikai (földtani) valóságot minél pontosabban írják le. Ezzel a modellezés hibáját (modellhiba) csökkenthetjük. Ez a lényegében közetfizikai kutatás szakterülete, amit jelen vizsgálatainkban nem érintünk. A fenti gondolatmenet alapján egyértelmű, hogy a paraméterbecslés minőségének további javítására csak az inverziós eljárás (tovább) fejlesztése révén van lehetőség.

A kutatási feladat szerinti új kiértékelési módszerek fejlesztésében a legfontosabb követelmény, hogy növeljük a petrofizikai modell paraméterek meghatározásának pontosságát és megbízhatóságát. Ennek érdekében alapvető teendő az egy (interpretációs/inverziós) lépésben használható adatok számának növelése. Ha a hagyományos (pontenkénti) kiértékelési szemléletmódban gondolkozunk, ez a mélyfúrési geofizikai szelvények számának növelését jelentené, aminek ismert korlátai vannak, és többlet költségekkel jár. Van azonban az adatszám növelésének sokkal hatékonyabb módja is, ami nem jár költségnövekedéssel – ez az intervallum inverzió. A módszer keretében a földtanilag azonos egységbe (pl. réteg) tartozó nagyszámú mérési pont adatait egyetlen (interpretációs/inverziós) lépésben dolgozzuk fel, azaz ugyanannyi ismeretlen meghatározásához akár két nagyságrenddel is több adat áll rendelkezésünkre, mint a pontenkénti (hagyományos) inverziónál. Ennek pozitív hatása a leszarmaztatott paraméterek meghatározásának pontosságára és megbízhatóságára vitathatatlan és egyértelmű. A jelen kutatásban vállalt új kiértékelési algoritmus tehát a hagyományos (pontenkénti) inverziós eljárástól eltérően egy nagyobb mélységintervallumból származó összes adatot egyszerre kezeli, kimenetként pedig a vizsgált intervallumban a petrofizikai paraméterek (megfelelően diszkretizált) mélységfüggvényeit adja meg.

Egy másik vonatkozás, amit a pontonkénti inverziós módszer velejárójaként kell számon tartanunk az, 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. Ugyanakkor a teljes mérési adatrendszerben benne van a réteghatárokra vonatkozó információ is. Mivel az intervallum inverziós 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). Ez újszerű előny, amit csupán az intervallum inverziós kiértékelési mód alkalmazásával érhetünk el.

A mélyfúrás geofizika (pontonkénti) inverziós gyakorlatában az ún. zónaparamétereket külső állandóknak tekintik, vagy a geofizikai inverzió terminológiáját alkalmazva ezek a priori ismeretként adóttak. Ez az egyszerűsítés a mélységpontonkénti inverzió szemléletmódjából szinte kötelezően adódik, hiszen egy-egy mélységpontból mindössze a szelvények számának megfelelő számú adat áll rendelkezésre, ami behatárolja az adott pontban meghatározható független ismeretlenek számát. Az intervallum inverziós eljárás keretében azonban jelentősen megnövekszik a feladat túlhatározottsága. A túlhatározottságból eredően néhány további paraméter még biztonsággal bevonható az inverzió ismeretlenjei közé. E tekintetben elsősorban a zónaparaméterek jöhetnek szóba. Inverzió belüli meghatározásuk azt jelentené, hogy ezek a mennyiségek előállítására nem az értelmezést (inverziót) megelőzően -egy külön eljárásban- történne, hanem a mérési adatrendszerhez leginkább illeszkedő módon, az ismert válaszgyenleteket felhasználva állíthatnánk elő értékeiket.

A réteghatár koordináták inverziós előállítására új lehetőséget rejt a CH tárolók morfológiájának meghatározása terén is. A fenti gondolatmenetet folytatva adódik a lehetőség, hogy ha több mélyfúrás adatai állnak rendelkezésre, akkor a fúrások által körülhatárolt tartományban a földtani szerkezet (adott esetben a szénhidrogén tároló) réteghatárainak geometriáját ill. a tároló szerkezet morfológiáját is meghatározhatjuk megfelelően kidolgozott intervallum inverziós eljárással.

A jelen kutatás során kitűzött algoritmus- és módszerfejlesztés a fentiek szerinti újszerűségeket kínálja. Az alábbiakban részletesen beszámolunk a kutatás/fejlesztés eredményeiről.

I. A MÉLYFÚRÁSI GEOFIZIKAI ADATOK INTERVALLUM INVERZIÓS ALGORITMUSÁNAK TOVÁBBFEJLESZTÉSE

A petrofizikai gyakorlatban leggyakrabban egyszerű litológiájú (egy ásványi komponensből - pl. kvarc- álló) szénhidrogén-tárolókkal találkozunk. Azonban a hazai kutatásban fontos szerepet kapnak az olyan rezervoárok is, melyeket bonyolultabb kőzetösszetétel (többkomponensű kőzetmátrix) jellemez. Ezek az ún. *komplex tárolókon* végzett inverzió természetesen több ismeretlen meghatározását igényli, ami a pontonkénti inverzióval -a túlhatározottság relatíve alacsony mértéke miatt- nagy figyelmet és hozzáértést kíván. Az interval-

lum inverziós eljárás keretében az inverzióba vont adatok száma –és ezzel a túlhatározottság-jelentősen megnövekszik, így a megkívánt inverziós becslési pontosság nagyobb ismeretlen-szám esetén is biztosítható. Hasonló okokból a petrofizikai paraméterek rétegen belüli változása (inhomogenitása) is kezelhetőbbé válik.

1. A RÉTEGEN BELÜLI INHOMOGENITÁS INTERVALLUM INVERZIÓS MEGHATÁROZÁSA

A mélyfúrás geofizikai inverz feladatban ismeretlennek tekintjük a szonda válaszegyenletekben jelenlévő térfogatjellemező petrofizikai-, texturális és zónaparamétereket, ill. az azokban meg nem jelenő, geometriai struktúrát jellemező rétegvastagságokat. Az ismeretlen paraméterek száma pontonként egyszerű tárolók esetében négy (porozitás, víztelítettség, agyagtartalom, egy ásványi komponensből álló kőzetmátrix), azonban komplex tárolók esetén a kőzetek összetételétől és a rétegtartalomtól függően akár nyolc-tíz is lehet. A zónaparaméterek száma e szám sokszorososa, míg a mért adatok száma pontonként általában nyolctizenkettő. Hagyományosan, a mélységpontonként végzett inverzió esetén e nagymértékű alulhatározottság kezelése csak úgy lehetséges, ha a zónaparamétereket a priori adottnak tekintjük. Erre általában megvan a lehetőség az előzetes geológiai, geofizikai vizsgálatok és labormérések ismeretében.

A nemlineáris mélyfúrás geofizikai inverz feladat hagyományos megoldása mélységpontonkénti inverzióval történik. Ennek keretében a mért mélységintervallum egyes pontjaiban külön-külön határozzuk meg az inverziós ismeretleneket, a pontbeli szelvény-adatok felhasználásával. A pontbeli adatok aránylag kis száma miatt, a válaszegyenletekben szereplő zónaparamétereket konstansnak feltételezzük, így az ismeretlen petrofizikai paraméterekre nézve kismértékben túlhatározott inverz feladatot kapunk. Mivel a szelvényen egymás „mellett” elhelyezkedő mélységpontok adatait a szeparált (pontonkénti) inverzió során függetlennek tekintjük egymástól, ezért a rétegvastagságok inverziós meghatározása e keretek között nem lehetséges. A mélységpontonkénti inverziós eljárással a kőzetek pontbeli 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 mélyfúrás geofizikai értelmezés feladata az egyes földtani egységek (rétegek, zónák) kvantitatív kőzetfizikai jellemzése, továbbá mint alapvető földtani információ, a réteghatárok elhelyezkedésének a meghatározása. Ez a gyakorlatban inverziós eljáráson kívül történik, a litológiai és a nagy felbontású szelvények jellegzetes pontjainak vizsgálata alapján. A fenti problémák kezelésére célszerű egy olyan módszer kifejlesztése, mely meghatározott (akár a teljes mért) intervallumba eső mélységpontok adatrendszerét egyazon inverziós eljárás keretében invertálja. E módszert nevezzük intervallum inverziós eljárásnak.

Az intervallum inverzió számára a lokális válaszegyenleteket ki kell terjesztenünk a vizsgált mélységintervallumra. DOBRÓKA (1995) a petrofizikai paramétereket, mint a mélység függvényeit vezette be, ezzel intervallumon értelmezett válaszegyenleteket definiált a direkt feladat számára. A mélységfüggő válaszegyenletek paramétereinek diszkretizálására sorfejtési eljárást alkalmaztunk, melynek keretében ismert bázisfüggvény-rendszer segítségével írhatjuk le a petrofizikai paramétereket. Legegyszerűbb esetben egységugrás függvényekből felépített, rétegenként homogén földtani modellt vizsgálhatunk, azonban a sorfejtésben szereplő bázisfüggvények szabadon megválaszthatók és az adott földtani szituációhoz illeszthetők. Érdemes megjegyezni, hogy az inverzió stabilitása szempontjából előnyt jelent olyan bázisfüggvények alkalmazása, ahol a lehető legkevesebb ismeretlennel tudjuk megfelelően leírni az adott földtani szerkezetet, ugyanis az ismeretlenek számának növelése a túlhatározottságot csökkenti. Az alábbiakban az egységugrás függvények alkalmazása után bemutatjuk a hatványfüggvényekkel történő intervallum inverzió algoritmusát.

1.1. A rétegen belüli inhomogenitás meghatározásának intervallum inverziós módszere

Az intervallum inverziós eljáráshoz intervallumon értelmezett válaszegyenleteket szükséges definiálnunk. Ennek keretében először a petrofizikai paramétereket, mint a mélység függvényeit írjuk fel. Az intervallumon értelmezett (mélységfüggő) válaszegyenletből származtatott elvi szelvényadatok DOBRÓKA (1995) alapján

$$d_k(z) = g_k(m_1(z), m_2(z), \dots, m_M(z)), \quad (1)$$

ahol $d_k(z)$ a k-adik szonda-adat, $m_i(z)$ az i-edik közetfizikai paraméter z mélységkoordinátához tartozó értéke. A fenti válaszegyenletben a modellparaméterek a mélység folytonos függvényeiként jelennek meg, melyek pontbeli értékét diszkretizálással határozzuk meg.

A sorfejtéses intervallum inverziós eljárás keretében ismert bázisfüggvény-rendszerek segítségével diszkretizáljuk a modellparamétereket. Tekintsük az (1) mélységfüggő válaszegyenletben szereplő i-edik rétegjellemző paraméter általános sorfejtett alakját

$$m_i(z) = \sum_{q=1}^{Q_i} B_q^{(i)} \psi_q(z), \quad (2)$$

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 mélységfüggő bázisfüggvényt jelöli. A legegyszerűbb esetben, a rétegenként homogén modell leírásában (a legkevesebb ismeretlennel) a bázisfüggvényeket egységugrás függvények kombinációjával állíthatjuk elő (ld. 1. ábra bal oldalán)

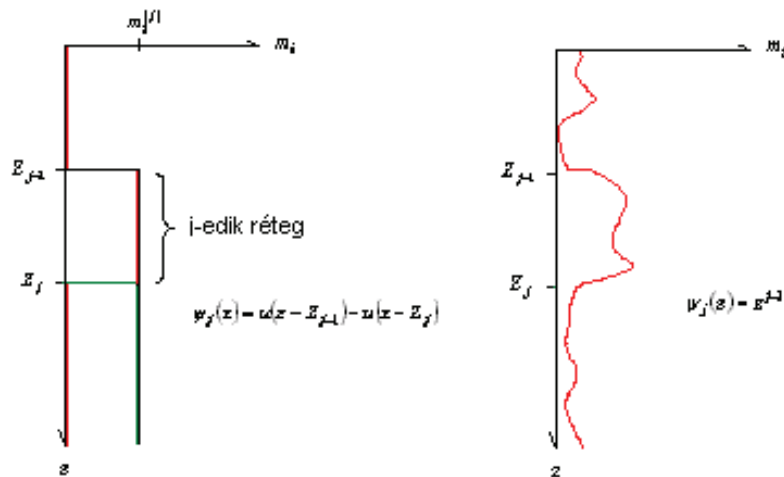
$$\psi_q(z) = u(z - Z_{q-1}) - u(z - Z_q),$$

ahol Z_q, Z_{q-1} a q -adik és $(q-1)$ -edik réteghatár mélységkoordinátája, Ψ_q a q -adik mélységfüggő bázisfüggvény. Mivel $\psi_q(z) = 1$, ha $Z_{q-1} < z < Z_q$, egyébként zérus, ezért a fenti 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.

A petrofizikai paraméterek gyakran a rétegen vagy nagyobb mélységintervallumon belül is változnak a mélység függvényében. Gyakran e vertikális változás igen gyors. E tulajdonságot ismert bázisfüggvények segítségével (pl. hatványfüggvények, Chebishev-, Legendre- polinomok stb.) szükséges pontossággal meg tudjuk közelíteni. A (2) sorfejtésben a q -adik bázisfüggvény hatványfüggvény szerinti közelítéssel

$$\psi_q(z) = z^{q-1}$$

szerint vehető fel, mely az 1. ábra jobb oldalán látható. Végül, ha a rétegsor homogén és inhomogén rétegekből épül fel, akkor a fenti függvények szuperpozíciójával is élhetünk.



1. ábra: Egységugrás (bal oldalon)- és hatványfüggvények (jobb oldalon) alkalmazása intervallum inverzió esetén

Az intervallum inverziós eljárás lényeges eleme, hogy a mélységfüggő válaszgegyenlet felírható

$$d^{(k)}(z) = g^{(k)}(B_1^{(1)}, B_2^{(1)}, \dots, B_{Q_1}^{(1)}, B_1^{(2)}, B_2^{(2)}, \dots, B_{Q_2}^{(2)}, \dots, B_1^{(M)}, B_2^{(M)}, \dots, B_{Q_M}^{(M)}, z),$$

alakban, ahol a független változók a közetfizikai ismeretlenek helyett a B sorfejtési együtthatók. Ez azt jelenti, hogy az inverz feladat ismeretlenjeit a $B_q^{(i)}$ sorfejtési együtthatók képezik,

melyek száma a teljes intervallumon $M = \sum_{i=1}^M Q_i$, ezzel az inverziós ismeretleneket tartalmazó modellvektor elemei, $i=1, \dots, M$ számú petrofizikai paraméter esetén

$$\vec{m} = [B_1^{(1)}, B_2^{(1)}, \dots, B_{Q_1}^{(1)}, B_1^{(2)}, B_2^{(2)}, \dots, B_{Q_2}^{(2)}, \dots, B_1^{(M)}, B_2^{(M)}, \dots, B_{Q_M}^{(M)}]^T.$$

A mérési adatrendszerbe az intervallumon gyűjtött összes szelvényadat beletartozik. Ha $k=1, 2, \dots, K$ számú szelvényt mértünk, és n_k jelöli a k-ik szelvény mélységpontjainak számát, akkor a rendelkezésre álló összes adatszám $N = \sum_{k=1}^K n_k$. A mintavételi köz általában 0.1m, a szelvényhossz ~100-5000m, ezért az intervallum inverziós probléma $N \gg M$ esetén nagyértékben túlhatározott. Az inverz feladatban a mérési adatokat egyetlen vektorba integráljuk

$$\vec{d}^{(m)} = [d_1^{(1)}, d_2^{(1)}, \dots, d_{n_1}^{(1)}, d_1^{(2)}, d_2^{(2)}, \dots, d_{n_2}^{(2)}, \dots, d_1^{(K)}, d_2^{(K)}, \dots, d_{n_K}^{(K)}]^T.$$

Az inverz feladat megoldása a mért és a számított adatok eltérésének a minimalizálásán alapul, mely sokféle optimalizációs módszer alkalmazását jelentheti. A következőkben egy hatékony kombinált inverziós módszert javasolunk, mely alkalmas a vertikális inhomogenitás, valamint a becsült paraméterek hibájának a meghatározására is.

1.2. Kombinált intervallum inverziós algoritmus

Az intervallum inverziós módszer lehetőséget nyújt a rétegenként homogén modellnél sokkal összetettebb modellek, pl. nagyobb mélységintervallumon, vagy akár a rétegben belül vertikális változást mutató közetfizikai paraméterek leírására is. A javasolt algoritmus globális (valós kódolású genetikus algoritmus) és lineáris inverziós (Marquardt algoritmus) módszerkombináció alapul (SZABÓ, 2004). A globális optimalizáció nagy hatékonysággal keresi meg a célfüggvény abszolút szélsőérték-helyét, amely igen jelentős startmodell-függetlenségi tulajdonságokkal is bír. A lineáris lépések pedig a globális optimalizációt követik, mely alkalmas a konvergencia felgyorsítására és a kovariancia-mátrix számítására, így a becsült paraméterek hibája is előállítható.

Az új intervallum inverziós algoritmussal rétegben vertikálisan változó petrofizikai paraméterek meghatározását végeztük el. Ennek keretében a (2) sorfejtés számára hatványfüggvényeket választottunk bázisfüggvényként. Azt az esetet vizsgáltuk, amikor az r-edik réteg inhomogén, mely homogén rétegek közé ágyazva jelenik meg. Ekkor az i-edik petrofizikai paraméter sorfejtett alakja

$$m_i(z) = \sum_{q=1}^{Q^{(i)}} m_q^{(i)} [u(z - Z_{q-1}) - u(z - Z_q)] + \sum_{l=1}^{L^{(i)}} B_l^{(i)} (z - Z_{l-1})^{l-1}, \quad (3)$$

ahol $m_i(z)$ i-edik petrofizikai jellemző z- mélységpontbeli értéke, Z_q a q-adik réteghatár mélység-koordinátája, és $B_q^{(i)}$ az i-edik modellparaméter q-adik sorfejtési együtthatója (Q ill.

a sorfejtési együtthatók szükséges száma). A (3) sorfejtésben szereplő együtthatókat az intervallum inverzió modellvektorába vettük fel.

A gyakorlatban a mélységadatokról csak nagyságrendileg lehetséges a sorfejtésben szereplő $B_q^{(i)}$ együtthatókat megbecsülni. A rosszul megválasztott együtthatók a start-modellnek a megoldástól igen nagy adattérbeli és modelltérbeli távolságát is eredményezheti. Ekkor a megfelelő startmodell hiányában a lineáris (linearizált inverzió) módszerek nagy valószínűséggel a célfüggvény lokális minimumában stabilizálódnak. E probléma kezelését a globális és a lineáris optimalizációs módszerek együttes hatékony alkalmazásával oldottuk meg. Az inverziós eredmények minőségének ellenőrzése céljából a becült modell relatív adattérbeli és modelltérbeli távolságát

$$D_d = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{d_{pk}^{(m)} - d_{pk}^{(sz)}}{d_{pk}^{(m)}} \right)^2} \right), \quad D_m = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \left(\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{m_{pi}^{(b)} - m_{pi}^{(e)}}{m_{pi}^{(e)}} \right)^2} \right)$$

számítottuk. Az előbbi mennyiség a mért és az inverziós eredményekből számított adatok, az utóbbi pedig az ismert és az inverzióval becült modellek eltérésének a jellemzésére szolgál ($d_{pk}^{(m)}$, $d_{pk}^{(sz)}$ - p-edik mélységpontbeli k-adik mért és számított adat, $m_{pi}^{(b)}$, $m_{pi}^{(e)}$ a p-edik mélységpontbeli i-edik becült- ill. ismert modellparaméter, P - mélységpontok száma, M - pontbeli modellparaméterek száma).

1.3. A direkt feladat során alkalmazott válaszgyenletek

A mélyfúrési geofizikai mérésekből a fúrással harántolt rétegek fontos petrofizikai jellemzőit tudjuk meghatározni (porozitás, víz- és szénhidrogén-telítettség, agyagtartalom, kőzetösszetétel, permeabilitás stb.). Mivel a petrofizikai modell paraméterei közvetlenül nem mérhető mennyiségek, ezért karotázs szondákkal mért adatokból geofizikai inverzióval származtatjuk őket. A geofizikai inverz feladat megoldása során a petrofizikai modellen ún. elméleti szondaválaszgyenletek segítségével elvi adatokat számítunk, melyeket az inverziós eljárásban a mért adatokkal összehasonlítva becslést végzünk a petrofizikai paraméterek értékére vonatkozóan. A későbbi intervallum inverziós vizsgálatokhoz felhasznált részletes szondaválaszgyenletek a következők:

Természetes gamma válaszfüggvény:

$$GRTH = \frac{1}{DETH} \left\{ \begin{aligned} &POR(GRMF \cdot DEMF \cdot SX0 + GRCH \cdot DECH(1 - SX0)) + \\ &+ VSH \cdot GRSH \cdot DESH + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot GRMA_i \cdot DEMA_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Természetes potenciál válaszfüggvény:

$$SPTH = SPSD + POR \cdot SPCHC(1 - SX0) - VSH(SPSD - SPSH) \quad (5)$$

Neutron-porozitás válaszfüggvény:

$$\begin{aligned}
 PORNTH &= POR(PORNMF - BCOR(1 - SX0) - BC) + VSH \cdot PORNSH + \\
 &+ \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot PORNMA_i + PORNEX \\
 PORNEX &= \left(\frac{DEMA}{2.65} \right)^2 (2 \cdot POR^2 \cdot JCH + 0.04 \cdot POR)(1 - JCH) \\
 JCH &= PORNMF \cdot SX0 + PORNSH(1 - SX0) \\
 BCOR &= SCHB \left\{ 1 - \frac{B}{DEMF(1 - PMF)} \right\} \\
 BC &= 2 \cdot POR(1 - SX0)SCHB(1 - B) \{ 1 - (1 - SX0)(1 - B) \} \\
 B &= \begin{cases} 2.2 \cdot DECH & , DECH < 0.25 \\ DECH + 0.3 & , DECH \geq 0.25 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (6)$$

Sűrűség válaszfüggvény:

$$\begin{aligned}
 DETH &= POR(DEMF - 1.07 \cdot SCHRB(1 - SX0)(ALFA \cdot DEMF - BETA)) + \\
 &+ VSH \cdot DESH + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot DEMA_i \\
 ALFA &= 1.11 - 0.15 \cdot PMF \\
 BETA &= \begin{cases} 1.24 \cdot DECH & , DECH \leq 0.333 \\ 1.11 \cdot DECH + 0.03 & , DECH > 0.333 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (7)$$

Akusztikus terjedési idő válaszfüggvény (Wyllie-féle átlagidő egyenlet):

$$\begin{aligned}
 ATTH &= POR(ATMF \cdot SX0 + ATCH(1 - SX0)) + VSH \cdot ATSH + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot ATMA_i \\
 ATCH &= 1.11 \{ ATO(DECH - 0.05) + ATG(0.95 - DECH) \}
 \end{aligned} \quad (8)$$

Mikrolaterolog válaszfüggvény (Indonéziai egyenlet):

$$\frac{1}{RSTH^{1/2}} = \left\{ \frac{VSH^{(1-VSH/2)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{BM/2}}{(BA \cdot RMF)^{1/2}} \right\} SX0^{BN/2} \quad (9)$$

Mélybehatolású laterolog válaszfüggvény (Indonéziai egyenlet):

$$\frac{1}{RDTH^{1/2}} = \left\{ \frac{VSH^{(1-VSH/2)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{BM/2}}{(BA \cdot RW)^{1/2}} \right\} SW^{BN/2} \quad (10)$$

A fenti hét válaszegyenletben szereplő modellparaméter: POR a porozitás, SX0 és SW a kiserp- és az érintetlen zóna víztelítettsége, VSH az agyagtartalom, VMA a kőzetmátrix részarány (komplex tárolóknál az egyes ásványi komponensek részarányai), BM a cementációs kitevő, BN a szaturációs exponens és BA a tortuozitási tényező. Az adatok elvi értékei: SPTH a természetes potenciál, GRTH a természetes gamma, PORNTN a neutron porozitás, DENTH a sűrűség, ATTH az akusztikus, RSTH és RDTH valamely kisbehatolású- és mélybehatolású fajlagos ellenállás szelvényadat. A többi szelvény-konstans jelentése az 1. táblázatban található.

1. táblázat: Válaszegyenletek konstansainak jelentése

Paraméter	Petrofizikai jelentés
ATCH	Szénhidrogén akusztikus terjedési ideje
ATSH	Shale-agyag akusztikus terjedési ideje
ATG	Gáz akusztikus terjedési ideje
ATMA	Kőzetmátrix akusztikus terjedési ideje
ATMF	Izapfiltrátum akusztikus terjedési ideje
ATO	Olaj akusztikus terjedési ideje
JCH	Segédváltó PORNEX számításában
DECH	Szénhidrogén sűrűsége
DESH	Shale-agyag sűrűsége
DEMA	Kőzetmátrix sűrűsége
DEMF	Izapfiltrátum sűrűsége
GRCH	Szénhidrogén természetes gamma intenzitása
GRSH	Shale-agyag természetes gamma intenzitása
GRMA	Kőzetmátrix természetes gamma intenzitása
GRMF	Izapfiltrátum természetes gamma intenzitása
n	Kőzetmátrix komponenseinek száma
PMF	Izapfiltrátum sókoncentrációja
PORNEX	Exkavációs hatás korrekció
PORNSH	Shale-agyag neutron porozitása
PORNMA	Kőzetmátrix neutron porozitása
PORNMF	Izapfiltrátum neutron porozitása
RSH	Shale-agyag fajlagos ellenállása
RMF	Izapfiltrátum fajlagos ellenállása
RW	Rétegvíz fajlagos ellenállása réteghőmérsékleten
SCHB	Szénhidrogén koefficiens
SCHRB	Maradékolaj tényező
SPCHC	Szénhidrogén korrekció
SPSD	Természetes potenciál homokvonal
SPSH	Természetes potenciál shale-alapvonal

1.4. Szintetikus tesztelési eredmények

Vizsgáljuk meg elsőként szintetikus adatok segítségével azt az esetet, amikor a rétegben a modellparaméterek hatványfüggvény szerinti vertikális változást mutatnak. Ekkor a sorfejtésben szereplő együtthatók képezik az intervallum inverziós algoritmus modellvektorát. Természetesen a bázisfüggvények fokszámának növelésével gyorsan nő az ismeretlenek száma, ezért az inverzió stabilitása és a paraméterbecslés pontossága érdekében törekedni kell azok

redukálására. Jelen vizsgálat keretében a globális optimalizáció startmodell-függetlenségét és stabilitását kihasználva, homogén modell ismerete nélkül (a nulladfokú valamint az összes magasabb fokszámhoz tartozó tag sorfejtési együtthatója ismeretlen) kerestük az intervallum inverziós probléma megoldását.

A szintetikus adatrendszer generálását a következőképpen végeztük. Tekintsük a 2. táblázatban szereplő inverziós célmodellt, ahol az első, második és negyedik réteg homogén, viszont a harmadik, szénhidrogén-tároló réteg modellparaméterei (porozitás, érintetlen zóna víztelítettsége, és az agyagtartalom) a $8m \leq z \leq 16m$ intervallumon

$$f_1(z) = -0.3994z^4 + 1.6782z^3 - 2.3931z^2 + 1.2711z + 0.1014$$

$$f_2(z) = 0.4902z^4 - 2.2032z^3 + 3.6155z^2 - 2.3423z + 0.7735$$

$$f_3(z) = 1.3195z^4 - 5.7097z^3 + 8.1082z^2 - 3.9980z + 0.7379$$

$$f_4(z) = 1 - f_1(z) - f_3(z)$$

negyedfokú hatványfüggvények szerint változnak. E mellett a harmadik réteg kisépért zónájának víztelítettsége egy újabb ismeretlent jelent. A VSD paramétert az inverziós ismeretlenek köréből „felszabadítva” a

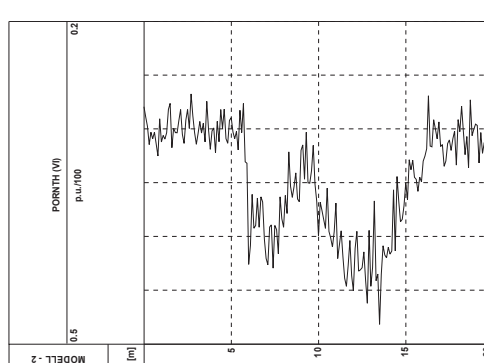
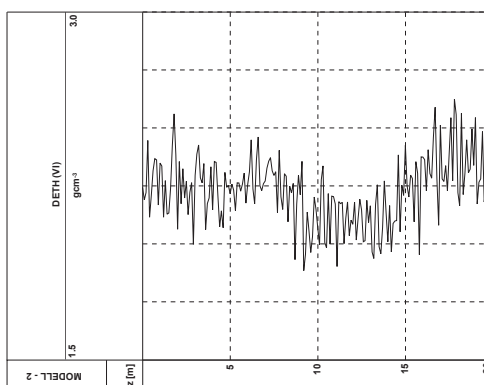
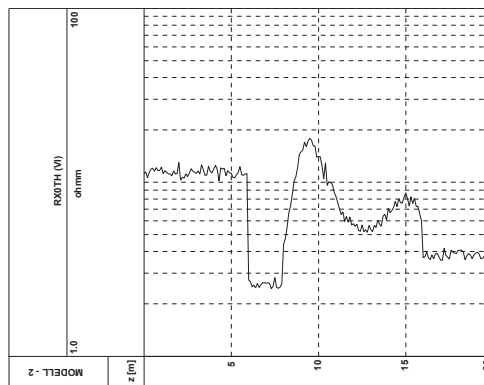
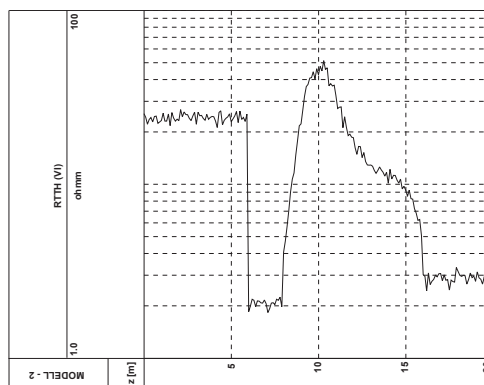
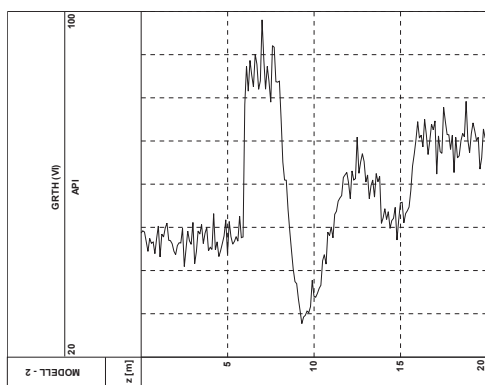
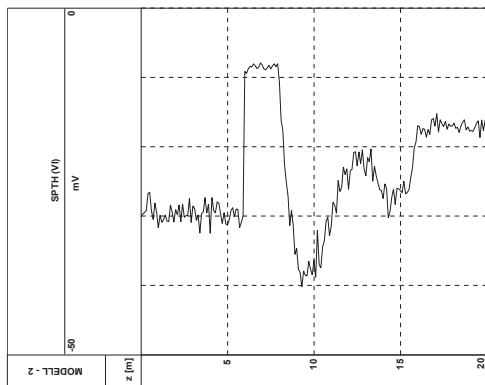
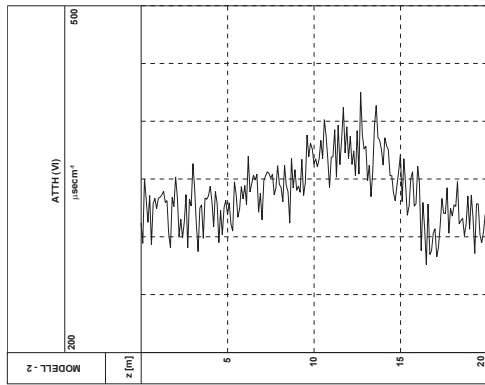
$$VSD = 1 - POR - VSH$$

anyagmérleg-egyenlet felhasználásával determinisztikusan számítottuk. A sorfejtés során az $f(z)$ hatványfüggvények mélység-koordinátáit a $8.0m \leq z < 16.0m$ intervallumból a $0 \leq z < 5.0$ intervallumba ($dz=0.0625$ mintavételi távolság mellett) transzformáltuk. Ezzel lehetőség nyílt a sorfejtési együtthatók értékeinek több nagyságrenddel való csökkentésére, mely az inverzió stabilitását jelentősen növelte. Az inverzió során a direkt feladat ismételt alkalmazásakor a $0 \leq z < 5.0$ intervallumban történő sorfejtés végrehajtásával kapott petrofizikai paramétereket a harmadik réteg mélységtartományához rendeltük.

2. táblázat: Az inverziós célmodell

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	$f_1(z)$	0.8	$f_2(z)$	$f_3(z)$	$f_4(z)$
4.0	0.1	1.0	1.0	0.6	0.3

A zajjal terhelt szintetikus szelvényadatokat a fenti modell alapján (4)-(10) elméleti szonda-válaszegyenletek felhasználásával $dz=0.1m$ mintavételi közzel számítottuk. A szelvénykonstansok értékeit a 3. táblázat tartalmazza. Az így kapott szintetikus szelvényeket 5 %-os, Gauss-eloszlásból származó hibával terheltük a valódi mérések szimulációja céljából. Az inverzió bemenő szelvényeit a 2. ábrán láthatjuk.



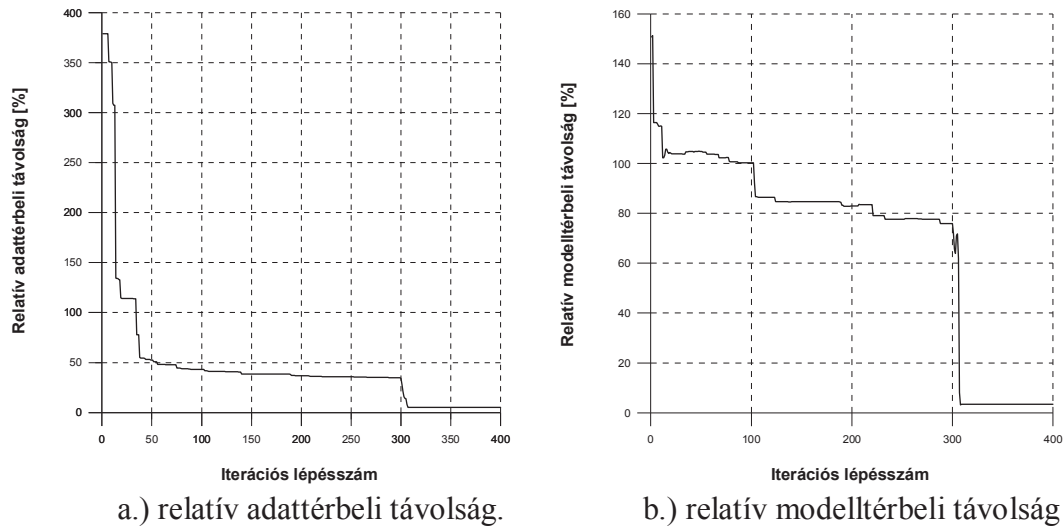
2. ábra: Az intervallum inverziós eljárás bemenő szelvényei

3. táblázat: Az alkalmazott függvénykonstansok

Szelvénykonstans	Érték	Mértékegység
ATSH	330	$\mu\text{s/m}$
ATG	1260	$\mu\text{s/m}$
ATSD	182	$\mu\text{s/m}$
ATMF	620	$\mu\text{s/m}$
ATO	840	$\mu\text{s/m}$
BA	1.0	-
BM	2.0	-
BN	2.0	-
DECH	0.8	g/cm^3
DESH	2.46	g/cm^3
DESD	2.65	g/cm^3
DEMF	1.00	g/cm^3
GRCH	0	API
GRSH	100	API
GRSD	25	API
GRMF	0	API
PMF	0.0016	10^6 ppm
PORNSH	0.38	p.u./100
PORNSD	-0.04	p.u./100
PORNMF	1.00	p.u./100
RSH	2.5	Ohmm
RMF	2.0	Ohmm
RW	0.5	Ohmm
SCHB	1.0	-
SPCHC	0	-
SPSD	-42	mV
SPSH	0	mV

A (3) sorfejtésre felépített intervallum inverziós eljárást kombinált optimalizációs algoritmussal valósítottuk meg. Az eljárást genetikus algoritmussal (SZABÓ, 2004) indítottuk harminc véletlen modellből álló kezdeti populációval. A sorfejtési együtthatók keresési intervallumát $-1 \leq B \leq 1$ szerint adtuk meg. A genetikus operátor-kombináció versenyszelekcióból (500 ismétlésszám mellett), heurisztikus keresztezésből és egyenletes eloszlást követő mutációból állt. A globális optimalizációt $q=300$. iterációs lépés után átkapcsoltuk lineáris (Marquardt-algoritmus) módszerre. A 3. ábrán látható, hogy a relatív modellterbeli távolság e lépés után ugrásszerűen lecsökkent. Ennek legfőbb oka a harmadik rétegbeli sorfejtési együtthatók helyes kombinációjának megtalálása. A linearizált optimalizáció során ugyanis a sorfejtési együtthatók keresési intervallumát (az optimum környékén) már nem korlátoztuk, azonban a globális inverzióban erre azért volt szükség, nehogy nagyon eltávolodjunk a modellterben a megoldástól és elveszzen a véletlen keresés hatékonysága. A kombinált inverziós módszerrel becsült modellparaméterek pontosságát a 4. táblázaton keresztül vizsgálhatjuk. A startmodell $D_{d,0}=375$ %-ot meghaladó relatív adattérbeli távolsága ellenére az inverziós eljárás konvergensenk bizonyult. E távoli kiindulási modell mellett (mely a sorfejtési együtthatók értékeinek véletlen generálásából adódik) optimális megoldást kaptunk, valamint a harmadik

rétegben jó közelítéssel ugyanazt a sorfejtési együttható kombinációt kaptuk eredményül, melyek a célmodellben szerepeltek. A becsült petrofizikai paraméterek és sorfejtési együtthatók, valamint azok hibáit az 5. táblázat tartalmazza (ahol VSD paraméter a harmadik rétegben nem inverziós ismeretlen). Megállapítható, hogy a hiba mértéke a homogén rétegekben igen kicsi, illetve a fizikai jelentéssel nem rendelkező sorfejtési együtthatók hibája is kismértékű. A harmadik rétegben a vertikális változást igen pontosan sikerült rekonstruálni. Ugyanakkor a futási idő tekintetében is kedvező eredményt kaptunk, ugyanis a hét perces CPU idő igen gyors konvergenciát jelent a globális optimalizációs módszerek körében.



3. ábra: A relatív adattávolság ill. a relatív modelltávolság az iterációs lépésszám függvényében a kombinált intervallum inverzió során

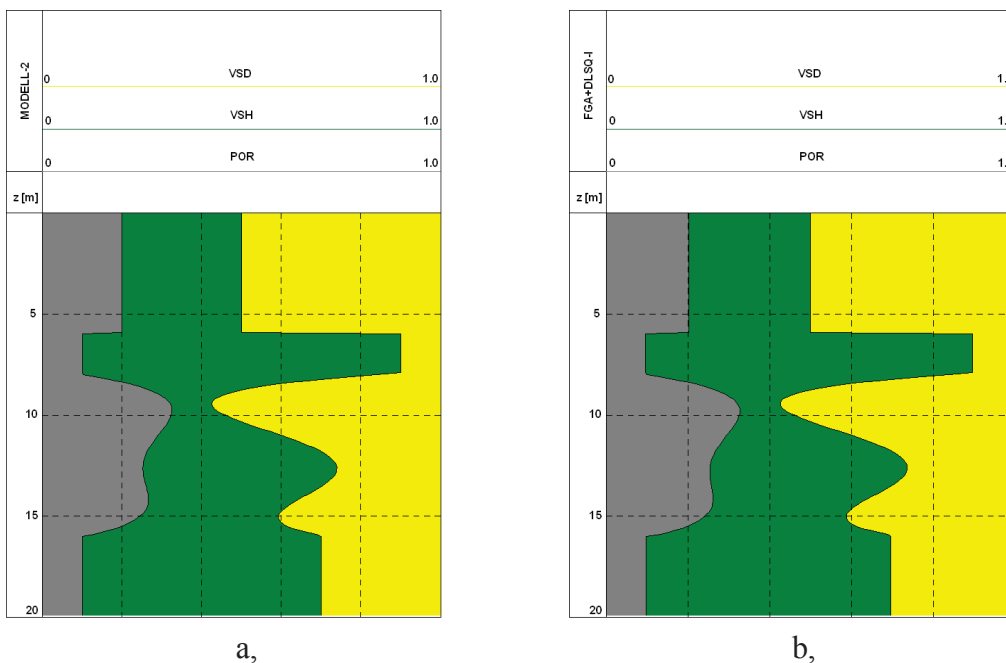
4. táblázat: Intervallum inverziós eredmények

$D_{d,0}$	$D_{m,0}$	D_d	D_m	t
378.9 %	150.7 %	5.21 %	3.47 %	00:06:57

A 4. és 5. ábrák az ismert és a becsült modell összehasonlítását teszik lehetővé. Látható hogy az eredményszelvények igen jól illeszkednek a célmodellhez. A modellparaméterek rétegbeli változását a harmadik rétegben pontosabban írhatjuk le, mint rétegben homogén petrofizikai paramétereket feltételezve. Látható pl., hogy a szénhidrogén-tároló rétegben a $z=12-14\text{m}$ közötti agyagtartalom-növekedést, és a $z=14\text{ m-től}$ a nagyobb mélységek felé történő víztartalom-növekedést egységugrás-függvényekkel nem, vagy csak további alrétegek (további ismeretlenek) bevezetésével tudnánk csak meghatározni

5. táblázat: Inverzióval becsült modellparaméterek és hibáik

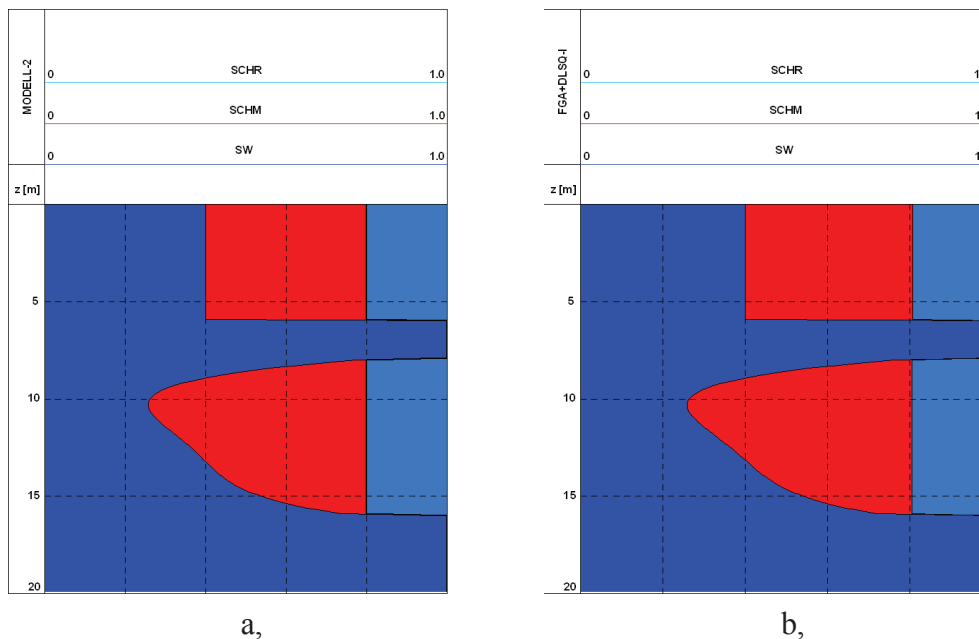
Réteg	B	POR	SX0	SW	VSH	VSD
1	-	0.2003 (±0.0020)	0.8063 (±0.0046)	0.4002 (±0.0022)	0.2980 (±0.0029)	0.4978 (±0.0047)
2	-	0.0954 (±0.0037)	1.0000 (±0.0069)	1.0000 (±0.0095)	0.7998 (±0.0022)	0.1032 (±0.0080)
3	B ₁	0.0991 (±0.0075)	0.8042 (±0.0034)	0.7608 (±0.0109)	0.7377 (±0.0079)	-
	B ₂	1.2582 (±0.0530)		-2.2391 (±0.0629)	-3.9884 (±0.0552)	
	B ₃	-2.3170 (±0.1142)		3.3857 (±0.1222)	8.0646 (±0.1195)	
	B ₄	1.5956 (±0.0895)		-2.0142 (±0.0924)	-5.6695 (±0.0945)	
	B ₅	-0.375 (±0.0229)		0.4397 (±0.0236)	1.3088 (±0.0244)	
4	-	0.0964 (±0.0024)	1.0000 (±0.0052)	1.0000 (±0.0066)	0.5981 (±0.003)	0.2987 (±0.0057)



4. ábra:

Az **a**, célmodell porozitás, agyag- és homoktartalom és **b**, a kombinált inverzióval nyert porozitás, agyag- és homoktartalom szelvények

Az inverzióval becsült paraméterek megbízhatósága a 6. táblázat korrelációs mátrixán keresztül vizsgálható. Az alacsony $S=0.29$ korrelációs átlag a kapott paraméterek elfogadhatóságát tükrözi. A harmadik rétegben azonban észrevehető néhány egyhez közeli korrelációs együttható is. Ez a mélységkoordináta magasabb hatványait befolyásoló sorfejtési együtthatók között fordul elő, pl. a harmadik réteg porozitása esetén $\text{corr}(B_4, B_5)=0.99$. E szoros kapcsolat a kisebb kitevők esetén lazul, pl. $\text{corr}(B_1, B_5)=-0.52$. Mivel a hatványfüggvények nem ortogonális függvényrendszerként képeznek, ezért sokféle sorfejtési együttható kombináció képes leírni ugyanazt a petrofizikai paramétert.



5. ábra:

Az **a**, célmodell szaturációs és **b**, a kombinált inverzióval nyert szaturációs szelvények (SCHR=1-SX0, SCHM=SX0-SW)

Látható, hogy ez a jelenség a petrofizikai paraméterek harmadik rétegbeli finom változásait leíró, a mélységkoordináta magasabb hatványai esetén fordulnak elő. Ezzel együtt az inverzió megbízhatónak bizonyult, és e probléma szükség esetén javítható, pl. ortogonális függvényrendszer szerinti sorfejtéssel. Látható még, hogy az első, második és negyedik homogén rétegben, továbbá a harmadik rétegben a sorfejtési együtthatók és a konstans SX0 kapcsolatát leíró korrelációs együtthatók igen kicsik, még a teljes korrelálatlanság is előfordul a harmadik rétegbeli víztelítettségek (SX03 és SW3_B5) között.

1.5. Inverziós vizsgálatok terepi adatokon

Az intervallum inverziós módszert mélyfúrásban mért (in-situ) adatokon is kipróbáltuk. Az inverziós kiértékelés bemenő adatrendszerét egy magyarországi szénhidrogén-kutató fúrásban (Fúrás-1) mért karotázs szelvények adatai képezték, melyet a MOL Rt. bocsátott

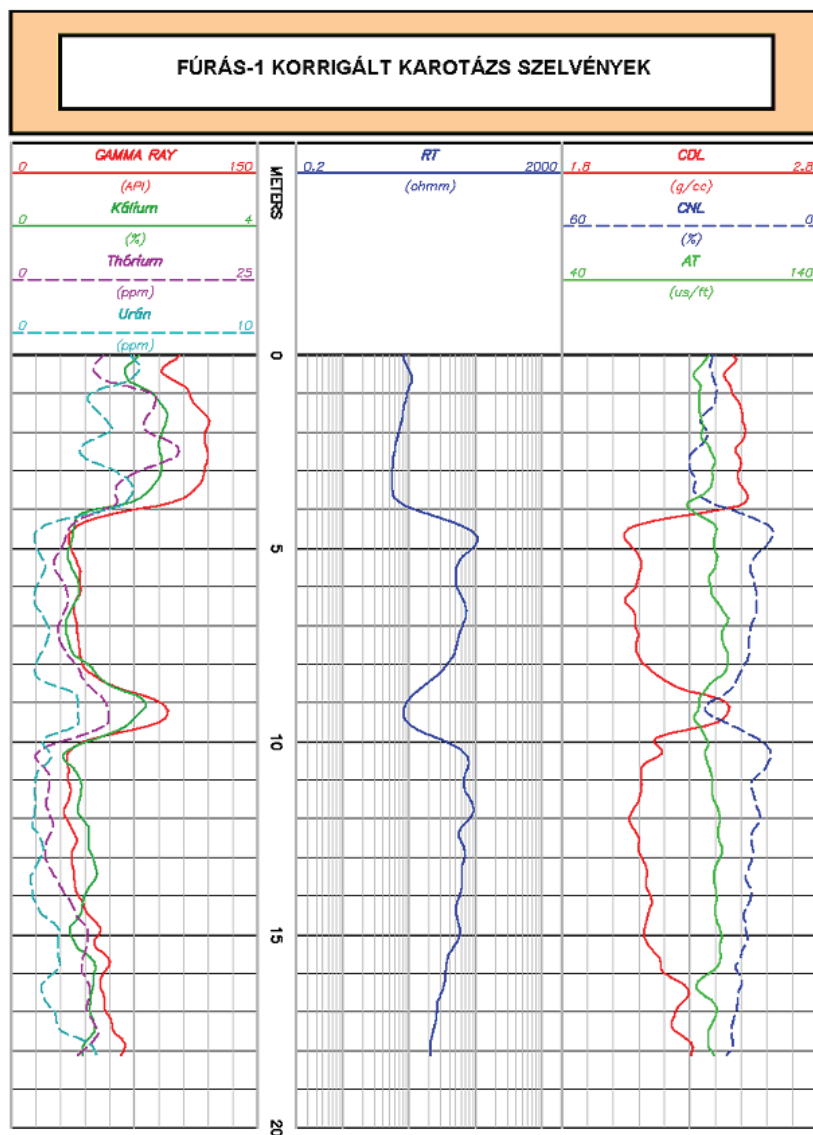
rendelkezésünkre. A fúrásban az egyik tároló kőzetben hatványfüggvény szerinti sorfejtést alkalmazva vertikálisan változó petrofizikai paramétereket számítottunk, míg a környező rétegeket homogénnek feltételeztük.

A Fúrás-1-ben kiválasztott négy réteges összlet (melyben a szelvények szénhidrogéntárolást indikáltak) a földtani jelentés alapján a felső-pannonban (pliocén) helyezkedik el. Oldalfalmintavétel és furadékvizsgálatok szerint a porózus, permeábilis rétegek jó tárolóképességgel rendelkező mederhomokkővek, melyekben helyenként aleurit csíkok, és padok vannak. A homokkő világosszürke, apró illetve finomszemű, laza, közepesen osztályozott és lekerekített szemcsézetű. Az aleurit világos-, középszürke, szürkés-zöld színű, puha, finomhomokos, aprócsillámos összetételű. A vékonycsiszolatban dominánsan homokkő (durva aleurit) látható. A rétegtartalom gáz (metán, etán, propán, valamint kis mennyiségű CO₂), olajfázis nincs. A homokkővek később a termelés során éghető gázt és párlatot adtak. A fúrólyukat hagyományosan mélyítették (vertikális fúrás), kálium-klorid tartalmú iszappal öblítették, melynek sűrűsége DEM=1.12 gcm⁻³ volt.

A vizsgált szakaszon a mérés maximális szelvényezési program szerint történt. A mérési anyagból a következő korrigált szelvényeket használtuk fel az inverziós kiértékelés számára: GAMMA RAY [API] természetes gamma, KÁLIUM [%] kálium spektrális gamma, URÁN [ppm] urán spektrális gamma, THÓRIUM [ppm] tórium spektrális gamma, RT [ohmm] valódi fajlagos ellenállás, CDL [gcm⁻³] kompenzált sűrűség (Lithodensity), CNL [%] kompenzált neutron, AT [μs/l] akusztikus terjedési idő. A vizsgált szakasz mélységre illesztett és lyukhatásra korrigált (0-18.1m közé transzformált) szelvényei képezik az inverziós vizsgálatok bemenő adatrendszerét. A karotázs adatrendszer szelvényei a 6. ábrán láthatók. A szelvényeken elkülöníthető rétegeket kőzetfizikai jellegüknél fogva egy zónába soroltuk, melyek litológiai leírása a kisebb mélységtől a nagyobb felé haladva a következő: agyag, gáztároló homokkő, agyag, majd ismét gáztároló homokkő.

6. táblázat: Inverzióval becsült modellparaméterek korrelációs mátrixa

		Korrelációs átlag = 0.29																												
		FOR1	SX01	SW1	VSH1	VSD1	FOR2	SX02	SW2	VSH2	VSD2	FOR3	SX03			SW3			VSH3			FOR4	SX04	SW4	VSH4	VSD4				
		B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i	B _i			
FOR1	1.00	0.04	-0.48	-0.62	-0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
SX01	0.04	1.00	0.51	-0.67	0.22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SW1	-0.48	0.51	1.00	-0.20	0.22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
VSH1	-0.62	-0.67	-0.20	1.00	-0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
VSD1	-0.10	0.22	0.22	-0.14	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
FOR2	0	0	0	0	0	1.00	-0.53	-0.78	-0.23	-0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SX02	0	0	0	0	0	-0.53	1.00	0.45	-0.09	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SW2	0	0	0	0	0	-0.78	0.45	1.00	0.03	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
VSH2	0	0	0	0	0	-0.23	-0.09	0.03	1.00	-0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
VSD2	0	0	0	0	0	-0.28	0.20	0.25	-0.10	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
B ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
B ₂	0	0	0	0	0	1.00	0.99	0.95	0.84	-0.52	0.04	0.44	0.46	0.45	0.39	0.25	0.70	0.70	0.67	0.58	0.31	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₃	0	0	0	0	0	0.99	1.00	0.98	0.89	-0.58	0.04	0.44	0.47	0.47	0.42	0.28	0.69	0.70	0.69	0.61	0.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₄	0	0	0	0	0	0.95	0.98	1.00	0.95	-0.67	0.04	0.44	0.47	0.49	0.47	0.34	0.66	0.68	0.69	0.65	0.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₅	0	0	0	0	0	0.84	0.89	0.95	1.00	-0.82	0.04	0.43	0.48	0.52	0.53	0.43	0.57	0.61	0.65	0.67	0.51	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₆	0	0	0	0	0	-0.52	-0.58	-0.67	-0.82	1.00	-0.09	-0.36	-0.42	-0.48	-0.55	-0.59	-0.32	-0.37	-0.43	-0.53	-0.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SX03	0	0	0	0	0	0.04	0.04	0.04	0.04	-0.09	1.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.14	0.06	0.05	0.05	0.05	-0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₇	0	0	0	0	0	0.44	0.44	0.44	0.43	-0.36	0.00	1.00	0.99	0.95	0.86	0.65	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₈	0	0	0	0	0	0.46	0.47	0.47	0.48	-0.42	0.01	0.99	1.00	0.98	0.91	0.72	0.07	0.07	0.08	0.08	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₉	0	0	0	0	0	0.45	0.47	0.49	0.52	-0.48	0.02	0.95	0.98	1.00	0.97	0.80	0.07	0.08	0.09	0.09	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₁₀	0	0	0	0	0	0.39	0.42	0.47	0.53	-0.55	0.05	0.86	0.91	0.97	1.00	0.91	0.06	0.07	0.08	0.10	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₁₁	0	0	0	0	0	0.25	0.28	0.34	0.43	-0.59	0.14	0.65	0.72	0.80	0.91	1.00	0.03	0.04	0.05	0.07	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₁₂	0	0	0	0	0	0.70	0.69	0.66	0.57	-0.32	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.03	1.00	0.99	0.95	0.84	0.51	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₁₃	0	0	0	0	0	0.70	0.70	0.68	0.61	-0.37	0.05	0.05	0.07	0.08	0.07	0.04	0.99	1.00	0.98	0.89	0.57	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₁₄	0	0	0	0	0	0.67	0.69	0.69	0.65	-0.43	0.05	0.06	0.08	0.09	0.08	0.05	0.95	0.98	1.00	0.95	0.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₁₅	0	0	0	0	0	0.58	0.61	0.65	0.67	-0.53	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.07	0.84	0.89	0.95	1.00	0.82	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B ₁₆	0	0	0	0	0	0.31	0.35	0.41	0.51	-0.62	-0.08	0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	0.51	0.57	0.67	0.82	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOR4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	-0.27	-0.66	-0.5	-0.14	0	0	0	
SX04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.27	1.00	0.43	-0.37	0.21	0	0	0	
SW4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.66	0.43	1.00	-0.04	0.22	0	0	0	
VSH4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	-0.37	-0.04	1.00	-0.17	0	0	0	
VSD4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.14	0.21	0.22	-0.17	1.00	0	0	0	



6. ábra:

Fúrás-1-ben mért karotázs szelvények

A direkt feladat megoldása során (4)-(10) elméleti szonda-válaszfüggvényeket alkalmaztuk. Az egyenletek közül módosításra csak az AT és CNL szelvények szorultak, az előbbi kompaksióra, az utóbbit exkavációs hatásra korrigáltuk. A mért adatok és a tárolójellemzők kapcsolatát leíró lokális válaszfüggvényekben lévő szelvény konstansokat crossplot technikával, ill. irodalomból ismert és a kútkönyvi-magadatokkal összevetve határoztuk meg. A terepi konstansok értékei a 7. táblázatban találhatóak. A fenti egyenleteket kiegészítettük a spektrális természetes gamma szondák (K: kálium, U: urán, TH: tórium) válaszfüggvényeivel, melyek a következők (hasonlóan az 1. táblázat jelölés-rendszerével):

$$KTH = \frac{1}{DETH} \left(POR \cdot SX0 \cdot KMF \cdot DEMF + VSH \cdot KSH \cdot DESH + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot KMA_i \cdot DEMA_i \right)$$

$$UTH = \frac{1}{DETH} \left(POR \cdot SX0 \cdot UMF \cdot DEMF + VSH \cdot USH \cdot DESH + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot UMA_i \cdot DEMA_i \right)$$

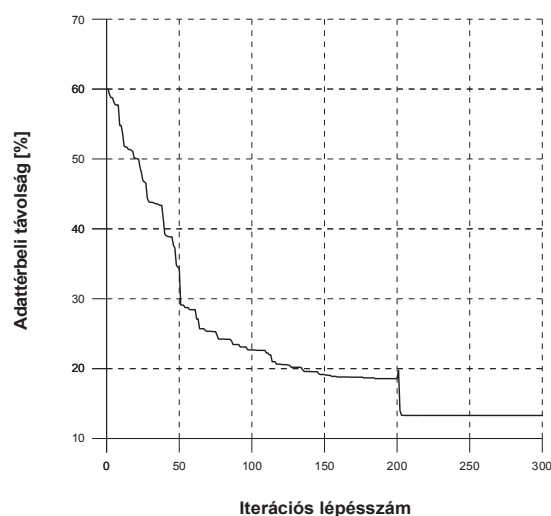
$$THTH = \frac{1}{DETH} \left(POR \cdot SX0 \cdot THMF \cdot DEMF + VSH \cdot THSH \cdot DESH + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot THMA_i \cdot DEMA_i \right)$$

7. táblázat: Az alkalmazott függvénykonstansok

Szelvénykonstans	Érték	Mértékegység
ATSH	100	μs/l
ATG	305	μs/l
ATSD	55	μs/l
ATMF	189	μs/l
BA	1	-
KMF	1.5	%
KSD	0.85	%
KSH	3.45	%
BM	1.5	-
BN	1.8	-
DECH	0.11	g/cm ³
DESH	2.54	g/cm ³
DESD	2.65	g/cm ³
DEMF	1.02	g/cm ³
GRCH	0	API
GRSH	160	API
GRSD	14	API
GRMF	0	API
PMF	0.0073	10 ⁶ ppm
PORNSH	0.27	p.u./100
PORNSD	-0.04	p.u./100
PORNMF	1.01	p.u./100
RSH	1.0	ohmm
RMF	0.29	ohmm
RW	0.5	ohmm
SCHB	1.4	-
SPCHC	0	-
SPSD	-42	mV
SPSH	0	mV
TMF	0	ppm
TSD	4.0	ppm
TSH	18.0	ppm
UMF	0	ppm
USD	1.0	ppm
USH	5.0	ppm

Az inverziós kiértékelés során az összletben a következő jellemzőket tekintettük inverziós ismeretlenek: POR (effektív porozitás), SX0 (kisepert zóna víztelítettsége), SW (érintetlen zóna víztelítettsége), VSH (agyagtartalom), VSD (homok fajlagos térfogata). A valós földtani szituációk esetén a petrofizikai paraméterek rétegen belüli gyors vertikális változása az érdekes. Ez az intervallum inverzió során elsősorban a tároló rétegekben lényeges, ugyanis itt szükség lehet a rétegenként homogén modell szerinti sorfejtést alkalmazó intervallum inverziós eredmények javítására. Ebből a célból a bemenő adatrendszer 9.9-18.1m-es szakaszán található gáztároló rétegben a POR, SX0, SW és VSH petrofizikai paramétereket negyedfokú hatványfüggvényekkel közelítettük (a VSD paramétert determinisztikus elven, az anyagmérleg egyenlet felhasználásával mélységpontonként számítottuk). Ezzel az eljárással a homogén modell szerinti sorfejtést alkalmazó intervallum inverzióhoz képest, a mért és számított adatok eltérésében javulást kaptunk.

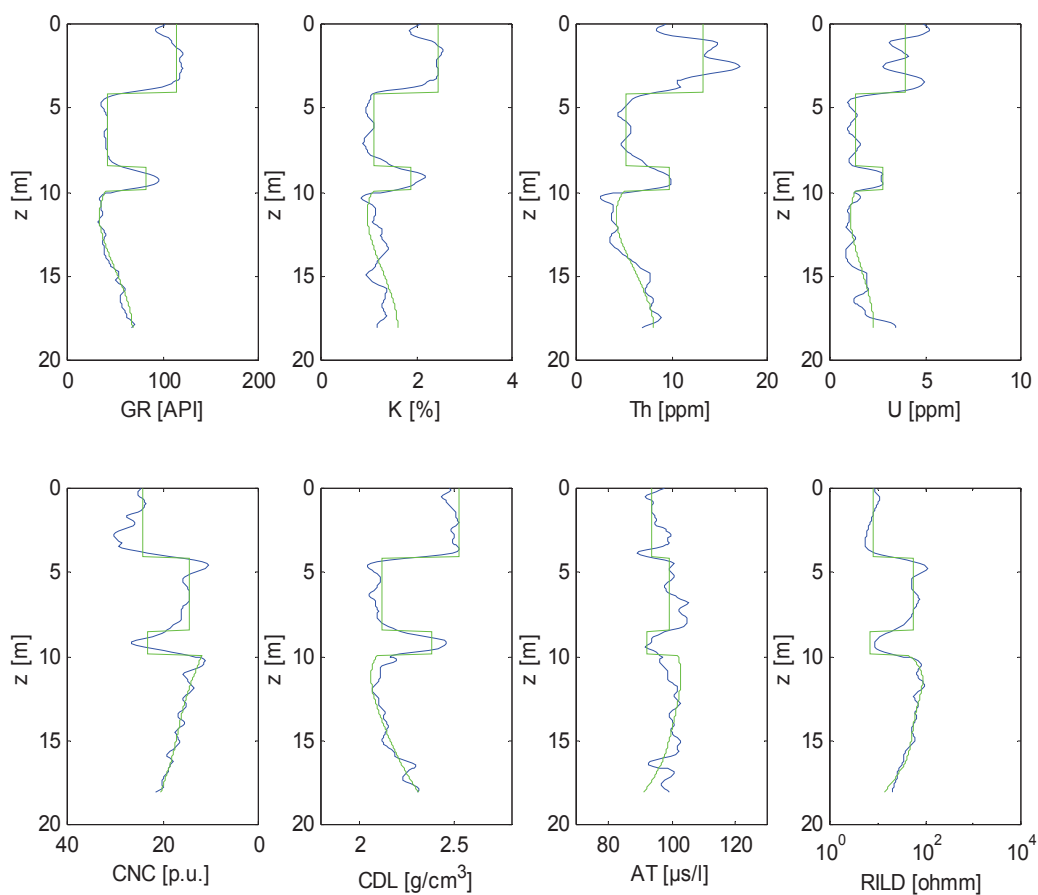
A fenti tárolóparaméterek meghatározására FGA+DLSQ-I (Genetikus Algoritmus + Csillapított Legkisebb Négyzetek elve) kombinált intervallum inverziós módszert alkalmaztunk (ld. 1.2. fejezetben), ahol $N=1456$ adatszám mellett $M=35$ ismeretlen (első három homogén rétegben $3*5$ petrofizikai paraméter, a negyedik rétegben $4*5$ sorfejtési együttható) állt. A futtatást FGA-I genetikus algoritmussal indítottuk 100 véletlen modell mellett. A modellparaméterek keresési terét homogén rétegek esetén a matematikai szabályozó egyenletekkel szűkítettük, a negyedik rétegben pedig a sorfejtési együtthatókat az $-0.5 \leq B \leq 0.5$ intervallumra korlátoztuk. Az FGA-I algoritmus $q=200$ iterációs lépésszámgig működött. Ez alatt a modellparamétereket versenyszelekcióval (generációnként 2000 ismétléssel), egyszerű keresztezéssel és egyenletes eloszlású mutációval számítottuk. Majd a $q=200$. generáció után linearizált optimalizációra (Marquardt-algoritmusra) kapcsoltuk át az eljárást a $q_{max}=300$ iterációs lépéssel bezárólag. Az inverziós eljárás konvergensenek és stabilnak bizonyult. Az 7. ábra mutatja a relatív adattérbeli távolság csökkenését a gyorsított konvergencia során.



7. ábra:

Az adattérbeli távolság - iterációs lépésszám függvény
intervallum inverzió folyamán

Az inverziós eredmények illeszkedése az iterációs eljárás végén $D_d=13.37\%$ (CPU idő: 14 perc mellett), ahol a $D_{d,0}=59.07\%$ a kezdeti modellpopuláció maximális fitness-ű egyedének relatív adattérbeli távolsága. A mért és elvi szelvények illeszkedése a 8. ábrán látható, ahol a kék görbe a mérési szelvényeket, a zöld pedig az inverzióval meghatározott modellparaméterekből számított elméleti szelvényeket reprezentálja. Az ábrán látható relatíve nagy adattérbeli eltérést az első három rétegben a homogén közelítés okozza. A negyedik rétegben a negyedfokú polinom jobban közelíti a mérések mélységváltozásait. A legjobb illeszkedés a természetes gamma, kompenzált neutron, és az indukciós szelvényeknél van, a legrosszabb az akusztikus szelvénynél, itt javasolható lenne a Wyllie-féle átlagidő egyenlet felcserélése a nemlineáris Raymer-Hunt egyenletre.



8. ábra:

Fúrólyukban mért- és az elvi adatok illeszkedése

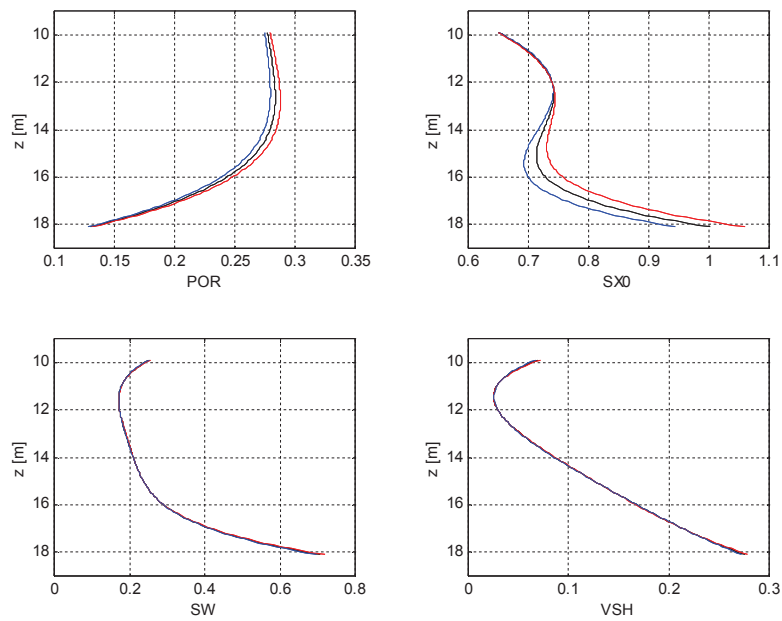
Az inverzióval meghatározott modellparamétereket és azok becslési hibáit a 8. táblázat tartalmazza, melyeket a lineáris inverzió által szolgáltatott kovariancia-mátrix főátlóbeli elemeiből határoztunk meg. Ehhez természetesen ismerni kell a bemenő szelvényadatok hibáját, melyet az irodalomból adtunk meg. A bemenő szelvényadatok hibáinak megadásánál figyelembe vettük a BAKER ATLAS és a SCHLUMBERGER vállalat mérőeszközeinek pontosságára vonatkozó tájékoztató adatokat is, ezzel a hibákat 7 % (CNC), 2 % (AT), 5 % (GR), 1 % (K),

2 % (RT), 3 % (TH), 3 % (U), 1 % (CDL) szerint adtuk meg. A 8. táblázatban látható, hogy az első három homogén réteg paramétereinek és a negyedik inhomogén réteg B_1 sorfejtési együtthatóinak becslési hibája kicsi. A mélység magasabb hatványaihoz tartozó együtthatók esetén azonban a belső csatolások miatt megnő a hiba mértéke is (a hatványfüggvényrendszer nem ortogonális). Ezzel együtt az $S=0.31$ korrelációs átlag megbízható eredményre utal. Mivel a negyedik rétegben a sorfejtési együtthatók nem bírnak fizikai jelentéssel, nézzük meg, hogy az azok segítségével visszaállított vertikális változást mutató petrofizikai paraméterek milyen hibával jelentkeznek. A kérdéses negyedik réteg paraméter- és hibaszelvényeit a 9. ábrán láthatjuk (fekete görbe: becült paraméter, kék görbe: konfidencia-intervallum alsó határa, piros görbe: konfidencia-intervallum felső határa). Látható, hogy a POR, SW, VSH paraméterek hibája igen kicsit, azonban az SX0 paraméter meghatározása az inverzió legjelentősebb problémája. Megbízhatósága a gáztárolóban az agyag- és a réteg-víz-tartalom növekedésével csökken. E probléma megoldására javasolható az SX0 paraméter (12) szerint történő származtatása SW paraméterből.

8. táblázat: Inverzióval becült modellparaméterek és hibáik

Réteg	B	POR	SX0	SW	VSH	VSD
1	-	0.1016 (±0.0017)	0.9981 (±0.0156)	0.9976 (±0.0138)	0.5774 (±0.0024)	0.3210 (±0.0022)
2	-	0.2652 (±0.0014)	0.7521 (±0.0038)	0.2282 (±0.0011)	0.0750 (±0.0008)	0.6598 (±0.0014)
3	-	0.1662 (±0.0027)	0.9964 (±0.0150)	0.9893 (±0.0136)	0.3426 (±0.0029)	0.4912 (±0.0031)
4	B_1	0.2772 (±0.0022)	0.6792 (±0.0097)	0.2535 (±0.0022)	0.0695 (±0.0024)	-
	B_2	0.0259 (±0.0062)	0.5920 (±0.1081)	-0.9936 (±0.0248)	-0.5239 (±0.0346)	
	B_3	-0.0010 (±0.0001)	-0.7756 (±0.4059)	4.0267 (±0.1111)	1.8603 (±0.1493)	
	B_4	-0.007 (±0.0002)	-0.7400 (±0.6329)	-6.2749 (±0.2013)	-1.8523 (±0.2366)	
	B_5	-0.1734 (±0.0067)	1.3497 (±0.3458)	3.6961 (±0.1235)	0.7219 (±0.1228)	

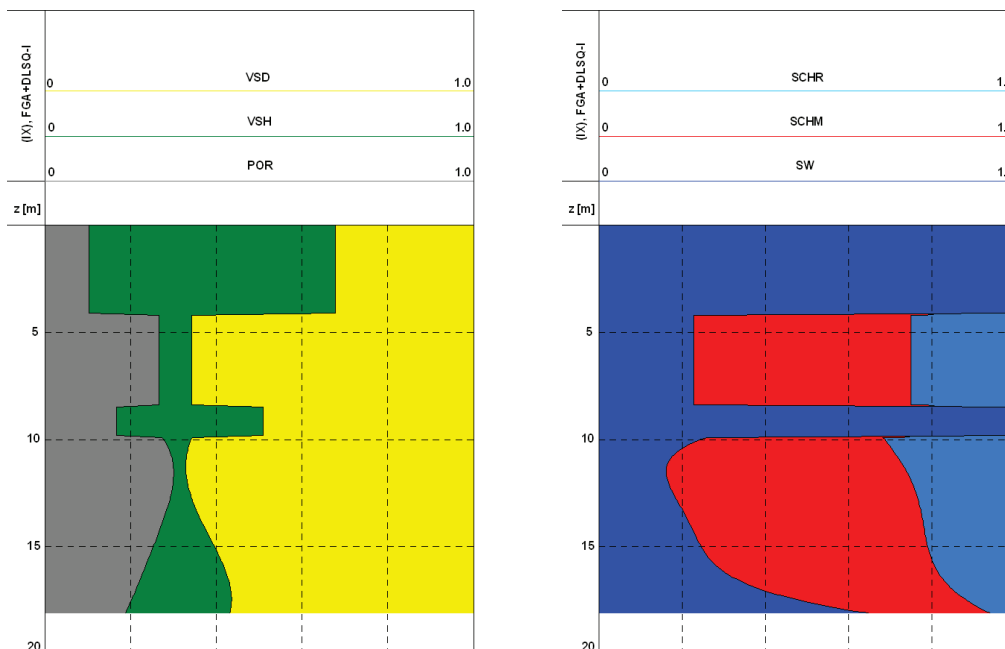
A 10. ábrán látható, hogy a negyedik rétegbeli agyagtartalom és víztelítettség változást az FGA+DLSQ-I (intervallum inverziós) módszer reálisan képezte le. Megállapítható, hogy $z=17$ m környékén a szénhidrogén-tárolóban átmeneti zóna alakul ki, melyet a homogén réteg szerinti sorfejtéses eljárás nem képes kimutatni. E zóna alatt a mélységgel nemlineárisan nő a víztelítettség és az agyagtartalom, továbbá csökken a gáztelítettség. Természetesen a tároló-jellemzők e vertikális felbontása még tovább finomítható, magasabb kitevőjű hatványfüggvények vagy egyéb alkalmasan megválasztott függvényrendszerek szerinti sorfejtéssel. A számítások nemcsak egy rétegben, hanem minden gazdaságilag fontosabb rétegben is elvégezhetők,



9. ábra:

Terepi adatok intervallum inverziójával nyert paraméter- és hibaszelvények a negyedik (inhomogén) rétegben

azonban ez az ismeretlenek számának növekedésével (azaz a túlhatározottság csökkenésével) jár, mely a paraméterbecslés pontosságának a rovására mehet. Az ismeretlen sorfejtési együtthatók számát ezért csak szükséges mértékben célszerű növelni.



10. ábra:

Az intervallum inverzióval nyert petrofizikai paraméterek szelvényei

2. A MODELL- ÉS ZÓNAPARAMÉTEREK ÉRZÉKENYSÉGI FÜGGVÉNYEINEK VIZSGÁLATA

Az inverz probléma felállításához előzetesen célszerű ún. érzékenységi vizsgálatokat végezni, mely arról tájékoztat, hogy méréseinket egy-egy petrofizikai paraméter mennyire befolyásolja egy adott paraméter-tartományban. A paraméter-érzékenységi függvény az adatok petrofizikai paraméterek szerinti első deriváltja

$$\Psi_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial m_j} \cdot \frac{m_j}{d_i} \quad (11)$$

ahol d_i az i -edik szelvényadat, m_j a petrofizikai modell j -edik paramétere. A fenti mennyiséget numerikus deriváltakkal, az adatokat pedig (4)-(10) elméleti válaszfüggvényekkel közelítjük. Az érzékenységi függvények arról tájékoztatnak, hogy a közetfizikai paraméterek egyedi megváltozása milyen mértékben befolyásolja a számított szelvényadatok értékét. Az érzékenységi függvények felszíni geofizikai alkalmazását DOBRÓKA (1988) vezette be telephullámok abszorpciós-diszperziós tulajdonságainak vizsgálatánál, majd GYULAI (1995) a geoelektromos, FERENCZY (1995) pedig a mélyfűrészi geofizikai gyakorlatban alkalmazta. Jelen kutatásban a válaszfüggvények modell- és texturális paraméterekre vonatkozó érzékenységeit vizsgáljuk, mely fontos információt hordoz a modellparaméterek inverzióval történő meghatározhatóságával kapcsolatban. Ugyanis az inverziós eljárásban az eltérő paraméter-érzékenységek következménye az, hogy az iterációs lépések során az érzékeny paramétereket nem tudják követni a kevésbé érzékeny paraméterek. Általában az érzékenyebbek gyorsabban konvergálnak (jobban befolyásolják az adatokból számított célfüggvény értékeit), míg a kevésbé változékonyak lemaradnak (vagy ellentétesen változnak), mely linearizált inverziónál lokális minimumban való stabilizálódást okozhat. A tapasztalat azt mutatja, hogy a válaszequationekből számított adatok azokra a paraméterekre reagálnak a legérzékenyebben melyek a legtöbb válaszfüggvényben jelen vannak, és melyekre a paraméter-érzékenységi függvény értéke nagy. Ugyanezen paraméterek meghatározása inverziós szempontból is kedvezőbb. Azokat a paramétereket, melyek alig befolyásolják a szelvényértékeket, érdemes más módszerrel vagy determinisztikus úton meghatározni. Az inverzió során ezek értékét végig ismertnek feltételezve, javíthatjuk a többi paraméterre vonatkozó inverzió pontosságát.

2.1. A modellparaméterek érzékenységi függvényeinek vizsgálata

A paraméterérzékenységi vizsgálatokat (4)-(10) válaszequationeken, a 9. táblázatban szereplő modellparaméterekre vonatkozóan végeztük. A paraméterérzékenység (11) formuláját numerikus differenciálással számítottuk

$$\Psi_{ij} = \frac{d_i(m_j + h) - d_i(m_j)}{h} \cdot \frac{m_j}{d_i(m_j)},$$

ahol Ψ_{ij} a d_i -edik (válaszegyenletből) számított szelvényadat m_j -edik petrofizikai paraméterre vonatkozó érzékenysége, és a $h=0.01$ növekmény a modellparaméterek $\Delta m=1$ %-os megváltozását írta elő.

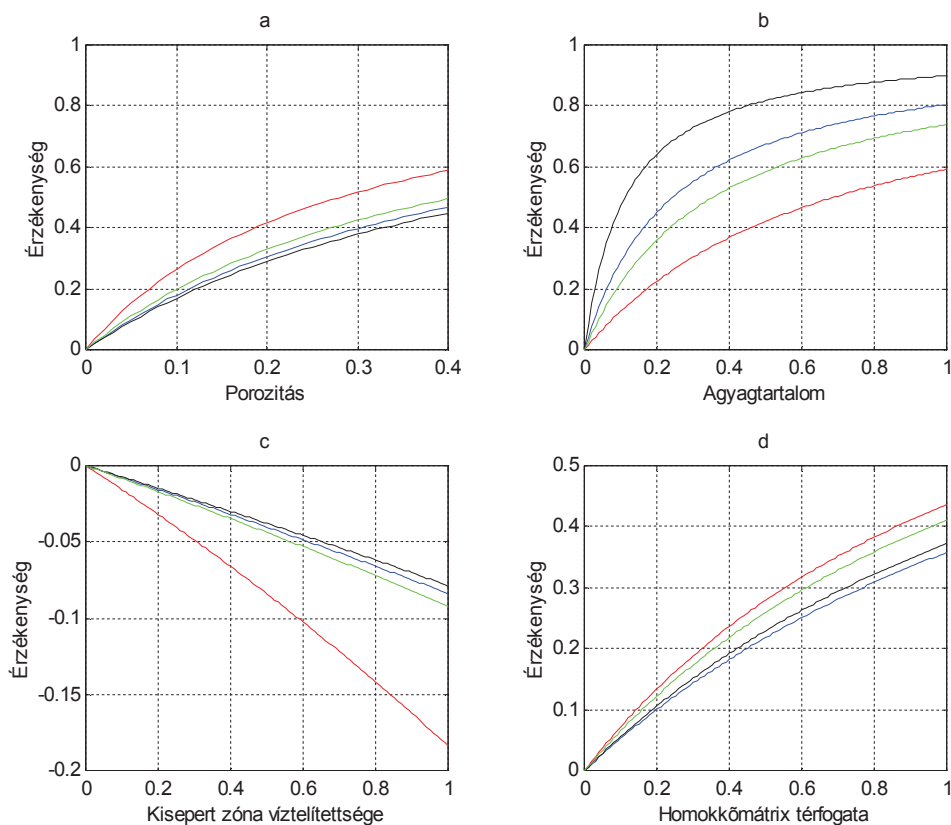
Az inverziós ismeretlenekre nézve lineáris válaszegyenletekre (SPTH, DETH, ATTH) vonatkozó paraméter-érzékenységek a paraméterek értékének növekedésével, a függvénykonstansok értékeitől és a kőzetek összetételétől függően, különböző mértékben növekednek. (Az érzékenységi függvény monoton csökkenése a negatív ordináta-tengely irányában ugyanúgy az érzékenység növekedését jelenti, azonban az adatok és a térfogatjellemző paraméterek ellentétes irányú változására enged következtetni.) Az (5) természetes potenciál-szelvény agyagtartalom érzékenysége az agyagtartalom monoton növekvő (nemlineáris) függvénye, ahol az érzékenység az agyagtartalom növekedésével negatív irányban ugrásszerűen nő. A (4) természetes gamma szelvény paraméter-érzékenységei monoton növekvő (nemlineáris) függvények. A GR szelvény elsősorban a kőzetmátrix és az agyag mennyiségére érzékeny, mivel a gamma sugarak elnyelése a kőzetvázban a legintenzívebb. E két szelvényt litológiai tagolásra alkalmazzuk, mivel nagy agyagtartalom érzékenységük miatt kiváló agyagindikátorok. A (7) sűrűség-szelvény porozitás érzékenysége nemlineáris növekvő függvénye a porozitásnak, mely a közepes porozitásoknál már a maximális érzékenységhez tart, ennek megfelelően közepes, de inkább nagy porozitású képződmények esetén a legalkalmasabb a módszer a hézagterfogat meghatározására. E monoton növekvési trendet követi a (6) neutron-porozitás szelvény porozitás-érzékenysége is a $POR > 2$ % tartományban, azonban $POR < 2$ % esetén a porozitás-érzékenység a porozitás csökkenésével nullára csökken. Ennek az az oka, hogy a beérkező neutronok számát ebben a tartományban egyre inkább a kőzetmátrix befolyásolja, és még a porozitás hatása nem számottevő (a neutronszelvényénél általában 1-2 % a mérési hiba nagyságrendje is).

9. táblázat: MODELL-1 paraméterei

H	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

A térfogatjellemző petrofizikai paraméterekre nézve lineáris válaszfüggvények közül bemutatjuk a (8) akusztikus válaszfüggvény paraméter-érzékenységi függvényeit. A 11. ábrán eltérő színű görbék az akusztikus szelvény MODELL-1 paramétereire vonatkozó paraméter-érzékenységeit külön mutatják a modell egyes rétegeiben. Látható, hogy a porozitás és agyagtartalom érzékenység monoton növekvő függvénye a porozitásnak ill. az agyagtartalomnak. Az agyagtartalomra vonatkozó érzékenység a szénhidrogén-tárolóban a legnagyobb, mely abból a szempontból kedvező, hogy a szennyező agyag mennyiségét pontosan meg tudjuk határozni a produktív zónában. Viszont a víztelítettséggel szemben mutatott relatíve kisebb

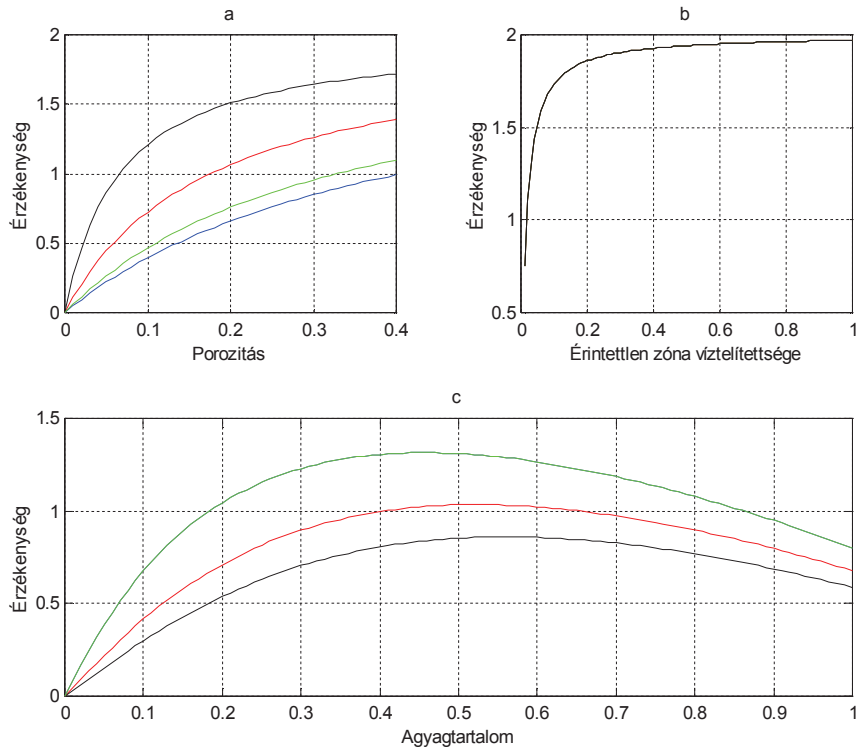
érzékenység arra utal, hogy az agyagtartalom a pórusterben található fluidumok mennyiségi meghatározását nehezíti. Az akusztikus szelvény porozitás-érzékenysége nagy (porozitás-követő szelvény), viszont ebben a szintetikus példában a szénhidrogén-tároló rétegben legkisebb a porozitás-érzékenység.



11. ábra:

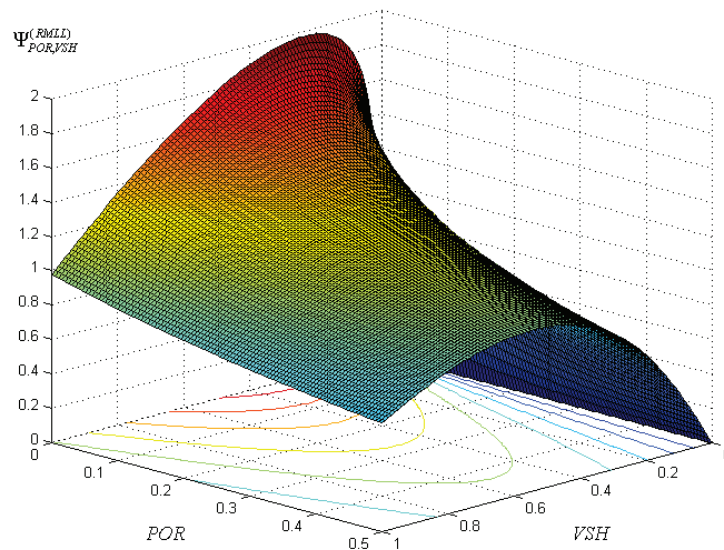
Az akusztikus terjedési idő szelvény porozitás-, agyagtartalom-, víztelítettség-, homoktartalom érzékenységi függvényei. Jelölések: MODELL-1 1. réteg (piros vonal), 2. réteg (kék vonal), 3. réteg (fekete vonal), 4. réteg (zöld vonal)

A nemlineáris válaszfüggvények (GRTH, KTH, UTH, THTH, PORNTN, RMLLTH, RLLDTH) közül tekintsük a (9)-(10) fajlagos ellenállás válaszegyenleteket, melyek egymással hasonló viselkedést mutatnak. Az agyagtartalom érzékenyséjük VSH~45 % körül maximumot mutatnak, melyet a 12. ábrán a mélybehatolású laterolog szondára vonatkozó nemlineáris agyagtartalom érzékenységi függvényről olvashatunk le. Természetesen a válaszfüggvényekre vonatkozó paraméter-érzékenységek több dimenzióban is vizsgálhatók. A 13. ábrán a mikrolaterolog szelvény két tárolójellemzőre (porozitás, agyagtartalom) vonatkozó érzékenységi függvényét ábrázoltuk.



12. ábra:

A mélybehatolású laterolog szelvény porozitás-, víztelítettség-, agyagtartalom-érzékenységi függvényei. Jelölések: 1. réteg (piros vonal), 2. réteg (kék vonal), 3. réteg (fekete vonal), 4. réteg (zöld vonal)



13. ábra:

A mikrolaterolog szelvény agyagtartalom érzékenységi függvénye a gyakorlati porozitás és agyagtartalom tartományban

A fenti érzékenységi vizsgálatok rámutatnak arra, hogy a mélyfúrési geofizikai válaszfüggvények petrofizikai paraméterekkel szemben mutatott érzékenysége eltérő (az egyes paraméter tartományokban). Ez a jelenség természetesen hatással van az inverzió kimenetelére. A következő példában lineáris mélységpontonkénti inverziós eljárást alkalmazva szeretnénk igazolni azt az állítást, miszerint az inverziós célmodellt relatíve nagy érzékenységű paraméterekkel megadva, jobb az inverzióval becsült modell alapján számított és mért szelvényadatok illeszkedése, mint a kisebb érzékenységű paraméterekkel felépített modell esetén. Ebből a célból két négyréteges modellt állítottunk fel, melyek csak a harmadik réteg összetételében különböznek. A 10. táblázatban definiált MODELL-2 harmadik réteget nagy agyagtartalom jellemzi. Láttuk, hogy a mélyfúrési geofizikai válaszfüggvények alapján számított szelvényadatokat az agyagtartalom általában nagymértékben befolyásolja, nagy az agyagtartalom érzékenységük. Ha a válaszfüggvények alkalmazásával $\Delta m=1\%$ -kal megváltoztatjuk MODELL-2 minden paraméterét, külön-külön egymás után kiszámítva az érzékenységi függvényeket, az azokból kapott összes szelvényre vonatkozó átlagos paraméter-érzékenység abszolút értéke $\Psi=0.81$. A 11. táblázatban megadott MODELL-3 harmadik rétegehez kisebb agyagtartalmat rendeltünk, ennek megfelelően az átlagos abszolút érzékenység kisebbnek adódott, $\Psi=0.59$.

10. táblázat: MODELL-2 paraméterei

H(m)	POR	SX0	SW	VSH	VSD
6.0	0.15	1.0	1.0	0.40	0.45
2.0	0.10	1.0	1.0	0.50	0.40
8.0	0.03	1.0	1.0	0.87	0.10
4.0	0.15	1.0	1.0	0.40	0.45

11. táblázat: MODELL-3 paraméterei

H(m)	POR	SX0	SW	VSH	VSD
6.0	0.15	1.0	1.0	0.40	0.45
2.0	0.10	1.0	1.0	0.50	0.40
8.0	0.09	1.0	1.0	0.11	0.80
4.0	0.15	1.0	1.0	0.40	0.45

Az inverziós vizsgálatához szintetikus szelvényadatokat számítottunk MODELL-2 paraméterei (I. számú adatrendszer), majd MODELL-3 alapján (II. számú adatrendszer). Ezeket külön-külön 6 %-os, Gauss-eloszlásból származó véletlen zajjal terheltük. Az inverziós kísérletet mélységpontonkénti, csillapított legkisebb négyzetek módszerén (Marquardt-algoritmus) alapuló eljárással végeztük el, melynek eredményeként kapott átlagos relatív adattérbeli (D_d) és modelltérbeli (D_d) távolságokat

$$D_d^{(mp)} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{d_{pk}^{(m)} - d_{pk}^{(sz)}}{d_{pk}^{(m)}} \right)^2} \right) \cdot 100 [\%]$$

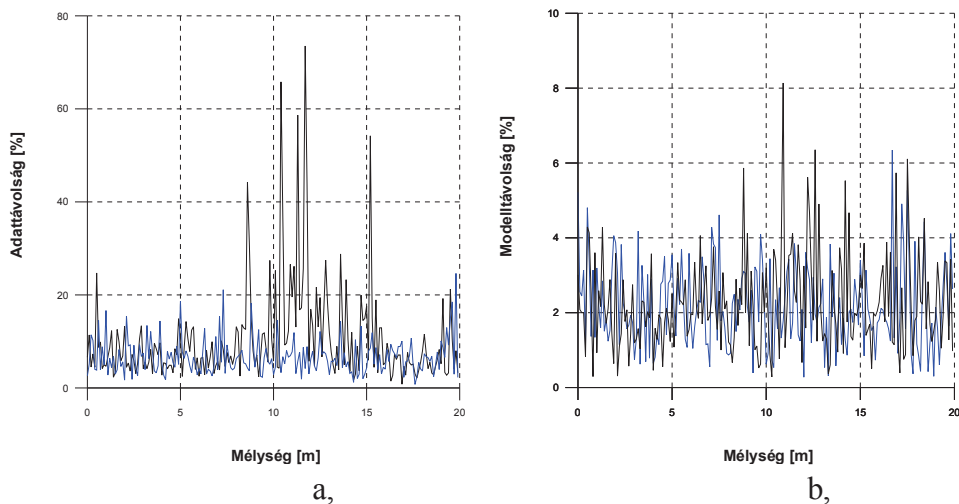
$$D_m^{(mp)} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \left(\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(m_{pi}^{(b)} - m_{pi}^{(e)} \right)^2} \right) \cdot 100 [\%]$$

szerint számítottuk ($d_{pk}^{(m)}$, $d_{pk}^{(sz)}$ - p-edik mélységponti k-adik mért és számított adat, $m_{pi}^{(b)}$, $m_{pi}^{(e)}$ a p-edik mélységponti i-edik becsült- ill. ismert modellparaméter, P - mélységpontok száma, M - pontbeli modellparaméterek száma). Az inverziós kísérletek eredményeit a 12. táblázatban foglaltuk össze. A kezdeti modell-távolság ($D_{m,0}$) és adattávolság ($D_{d,0}$) a megoldástól nem túl távoli startmodell-t feltételez. Látható, hogy a $D_{d,3}$ harmadik rétegben számított relatív adattérbeli és $D_{m,3}$ modellterbeli távolság tekintetében a két eredménymodell nagymértékben különbözik egymástól. MODELL-2 esetén a relatív adattérbeli és modellterbeli távolságok értéke a négy rétegre vonatkozó átlagértéknél (D_m , D_d) kisebb a harmadik rétegben, míg MODELL-3 esetén nagymértékben meghaladják azokat.

12. táblázat: Az (I.) és (II.) adatrendszereken végzett inverzió eredményei

Modell	$D_{d,0}$	$D_{m,0}$	D_d	D_m	$D_{d,3}$	$D_{m,3}$
MODELL-2	75.0 %	15.0 %	6.71 %	2.18 %	6.39 %	2.05 %
MODELL-3	75.0 %	15.0 %	10.43 %	2.26 %	15.93 %	2.39 %

Az inverzióval meghatározott modellek relatív adattérbeli és modellterbeli távolságainak mélységi eloszlását a 14. ábra mutatja. Az 14/a. ábrán szembevetve, hogy MODELL-3 közelítése esetén a harmadik rétegben a pontbeli megoldásokhoz relatíve nagy adattérbeli távolság tartozik. Itt az inverzió pontatlanabb paramétereket adott. Nyilvánvaló, hogy a kisebb érzékenységű paraméterek a harmadik rétegben lokális minimumba tereltek a lineáris algoritmust, míg MODELL-2 harmadik rétegében a nagyobb érzékenységű paraméterek gyorsabban és valószínűleg egyszerre felvehették optimális értéküket. Megállapítható, hogy a becsült paraméterek pontossági mérőszámai tükrözik az eltérő paraméter-érzékenység okozta hibát. A fenti vizsgálatok rámutatnak a válaszgyejenletekben rejlő inverziótól független belső problémákra. A terepi inverz feladatot ezek figyelembevételével érdemes megfogalmazni a kiértékelés hatékonyságának és pontosságának növelése érdekében.



14. ábra:

Az **a**, adattérbeli távolság-mélység **b**, modelltérbeli távolság-mélység függvény pontonkénti inverzió esetén. Kék vonal: MODEL-2, fekete vonal: MODEL-3.

2.2. A zónaparaméterek érzékenységi függvényeinek vizsgálata

Az előző fejezet eredményei felvetik a kérdést, hogy milyen mértékben befolyásolják a válaszegyenletekben szereplő zónaparaméterek a szelvényadatokat és ezen keresztül az inverzió hatékonyságát. Vizsgáljuk meg a mélyfúrési geofizikai szelvényadatok cementációs tényezőre (BM, tortuozitási tényezőre (BA) és a szaturációs kitevőre (BN) vonatkozó érzékenységét egy szénhidrogén-tároló rétegsor esetén. Ehhez elsőként definiáltunk egy agyagos-homokkő modellt, melynek paramétereit az 13. táblázat tartalmazza (H: réteg-vastagság m-ben).

A három texturális paraméter a (4)-(10) válaszegyenletek közül csak két egyenletben szerepel, a (9) sekély- és (10) mélybehatolású fajlagos ellenállást modellező Indonéziai-formulákban. Így értelemszerűen a két litológiai (GR, SP) és három porozitás-követő (PORN, DEN, AT) szelvény esetén mindhárom érzékenységi függvény értéke a teljes paraméter-tartományban zérus. Az 13. táblázatban szereplő modell felhasználásával a következő érzékenységi függvényeket számítottuk:

- Fajlagos ellenállás cementációs tényezőre vonatkozó érzékenysége:

$$\Psi(\text{BM}) = \frac{\partial \text{RD}}{\partial \text{BM}} \frac{\text{BM}}{\text{RD}},$$

- Fajlagos ellenállás tortuozitási tényezőre vonatkozó érzékenysége:

$$\Psi(\text{BA}) = \frac{\partial \text{RD}}{\partial \text{BA}} \frac{\text{BA}}{\text{RD}},$$

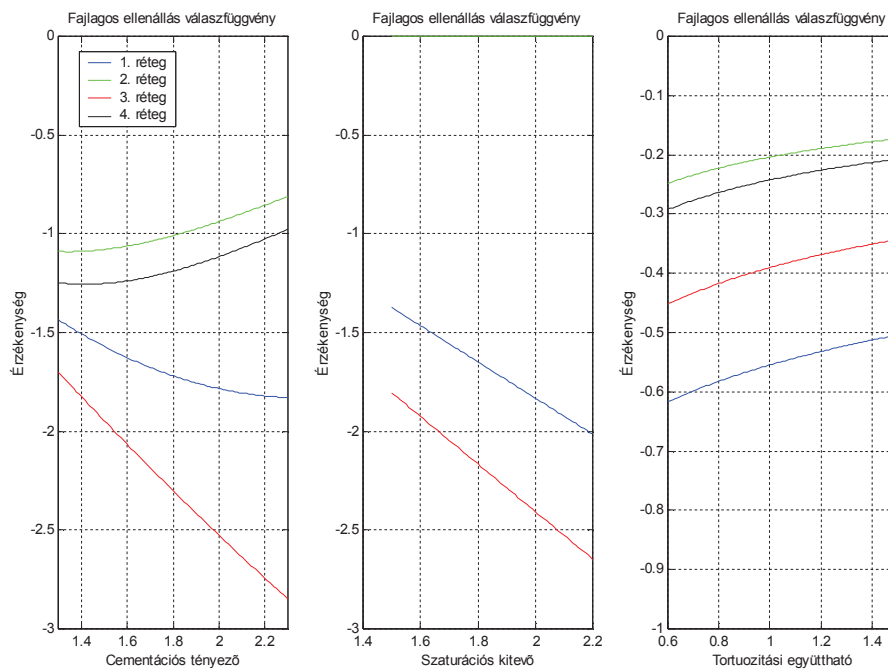
- Fajlagos ellenállás szaturációs kitevőre vonatkozó érzékenysége:

$$\Psi(\text{BN}) = \frac{\partial \text{RD}}{\partial \text{BN}} \frac{\text{BN}}{\text{RD}}$$

13. táblázat: Szénhidrogén-tároló modell

H(m)	POR	SX0	SW	VSH	VSD
6.0	0.20	0.80	0.40	0.30	0.50
2.0	0.10	1.00	1.00	0.80	0.10
8.0	0.25	0.80	0.30	0.05	0.70
4.0	0.10	1.00	1.00	0.60	0.30

A fenti érzékenységi-függvényeket a gyakorlati petrofizikai paraméter-tartományban az 15. ábrán láthatjuk. Megállapítható, hogy a három paraméter közül a cementációs kitevővel (BM) szemben mutatott érzékenység a legnagyobb. A tortuozitási faktor (BA) azonban relatíve kisebb mértékben befolyásolja a szelvényadatokat, mely kedvezőtlenebb az inverziós meghatározás szempontjából. A leghátrányosabb helyzet a szaturációs kitevő (BN) esetén van, itt két rétegben (2. és 4. rétegben) is zérus az érzékenység a teljes paraméter-tartományban. (Ennek az az oka, hogy a (9)-(10) Indonéziai egyenletekben a víztelítettség értéke 1, melynek bármelyik hatványa 1-et ad.). Kedvező, hogy szénhidrogén-tárolóban valamivel nagyobb az érzékenység. Megjegyezzük, hogy az érzékenység negatív értékei csak az ellentétes változásra utalnak, az érzékenység nagy negatív értékei is kedvező inverziós meghatározhatóságra utalnak. A fenti vizsgálatok az RS és RD szelvényekre vonatkozóan jellegükben és az érzékenységi függvény értékek nagyságának tekintetében mind az Indonéziai-, mind pedig a Simandoux-egyenlet esetén jó közelítéssel megegyeznek.



15. ábra: Texturális paraméter-érzékenységi függvények

3. A ZÓNAPARAMÉTEREK INVERZIÓN BELÜL TÖRTÉNŐ MEGHATÁROZÁSA

Az elméleti szonda válaszegyenletekben szereplő egyes függvénykonstansok inverzió belüli (automatikus) meghatározását intervallum inverziós tesztelésekkel vizsgáltuk meg. Ennek keretében a hagyományos petrofizikai inverziós ismeretlenek (porozitás, víztelítettség, agyagtartalom, kőzetmátrix komponensek fajlagos térfogata) mellé felvettük ismeretlenként a cementációs kitevőt, a szaturációs exponenst és a tortuozitási együtthatót. Az intervallum inverzió legegyszerűbb esetét vizsgáltuk, ahol rétegenként homogén földtani modellt feltételezve az ismeretlenek rétegbeli konstans értékét határozzuk meg az inverziós eljárással. Természetesen e modell az intervallum inverzió segítségével később kellő mértékben bonyolítható és az adott földtani szituációhoz illeszthető. A texturális konstansok meghatározása a szelvényértelmezés egyik legjelentősebb problémáját jelenti, mivel értékük területről-területre (gyakran fűrésről-fűrésre is) változik és ehhez általában csak tapasztalati, ill. szakirodalomból vett a priori információra támaszkodhatunk. Pontatlan megadásuk a nemlineáris válaszegyenleteken keresztül nagy modellhibával terhelheti az inverziós eredményeket. Felhasználva azonban az intervallum inverzió nagymértékű túlhatározottságát, a pontosabb és megbízhatóbb kiértékelés érdekében tehát érdemes intervallum inverzióval meghatározni őket. A fenti paramétereket általában nagyobb zónánként konstansként kezelik, az intervallum inverzióval akár rétegről-rétegre szelvényyszerű információt nyerhetünk róluk. A pontos paraméterbecslés mellett ebben rejlik az intervallum inverziós eljárás hatékonysága.

Az intervallum inverziós eljárás keretében a kőzetek texturális tulajdonságaitól függő zónaparaméterek és azok hibája meghatározhatók, ha lineáris eljárással dolgozunk. Legyen az inverz feladat modell- és adatvektora

$$\vec{m} = [m_1, m_2, \dots, m_M, c_1, c_2, \dots, c_S]^T,$$

$$\vec{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T,$$

ahol M számú „m” petrofizikai paraméter mellett célul tűzzük ki S számú „c” texturális konstans meghatározását (N db szelvényadatból). A modell-paraméterek és a számított adatok kapcsolata legyen lineáris, azaz

$$\vec{d} = \underline{\underline{G}} \vec{m}, \quad \underline{\underline{G}} = \left. \frac{\partial d_k}{\partial m_i} \right|_{\vec{m}^{(0)}}, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, M + S.$$

Az inverz feladat túlhatározott kell, hogy legyen (N>M+S), így a megoldást a mért és a számított adatok eltéréseinek minimalizálásával kereshetjük:

$$E(\vec{m}) = \sum_{k=1}^N \left(d_k^{(m)} - \sum_{i=1}^{M+S} G_{ki} m_i \right)^2 + \varepsilon^2 \sum_{j=1}^{M+S} m_j^2 \rightarrow \min.$$

Ekkor a Marquardt-féle csillapított legkisebb négyzetek módszert alkalmazva a megoldás a q-adik iterációban az r-edik réteg konstans paraméterre vonatkozóan

$$\vec{m}^{(r,q)} = \vec{m}^{(r,q-1)} + \left(\underline{\underline{G}}^T \underline{\underline{G}} + \varepsilon^2 \underline{\underline{I}} \right)^{-1} \underline{\underline{G}}^T \left(\vec{d}^{(r)} - \underline{\underline{G}} \vec{m}^{(r,q-1)} \right),$$

ahol $\underline{\underline{G}}$ a Jacobi-mátrix, $\underline{\underline{I}}$ az egységmátrix, és ε a csillapítási tényező.

A fenti célfüggvény minimumához kapcsolódó megoldásvektor Gauss-féle legkisebb négyzetek módszerével, valamint a módszer általánosított inverz mátrixa a következő

$$\vec{m}^{(b)} = \left(\underline{\underline{G}}^T \underline{\underline{G}} \right)^{-1} \underline{\underline{G}}^T \vec{d}$$

$$\underline{\underline{A}} = \left(\underline{\underline{G}}^T \underline{\underline{G}} \right)^{-1} \underline{\underline{G}}^T.$$

MENKE (1984) szerint lineáris inverziónál az adatok varianciáit (σ_d) tartalmazó adattérbeli kovariancia-mátrix és az inverzióval becsült (a σ_m paraméter hibákat tartalmazó) kovariancia-mátrix kapcsolata:

$$\underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{m}) = \underline{\underline{A}} \underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{d}) \underline{\underline{A}}^T,$$

$$\underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{d}) = \begin{pmatrix} \sigma_{d_1}^2 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \sigma_{d_2}^2 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \sigma_{d_N}^2 \end{pmatrix}, \quad \underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{m}^{(b)}) = \begin{pmatrix} \sigma_{m_1}^2 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \ddots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \sigma_{m_M}^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \sigma_{c_1}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \sigma_{c_S}^2 \end{pmatrix}.$$

A fenti összefüggésből a texturális paraméterek becslési hibája

$$\sigma_{c_j} = \sqrt{\underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{m}^{(b)})_{j+M, j+M}}, \quad j = 1, 2, \dots, S$$

szerint számítható.

3.1. A cementációs kitevő inverziós meghatározása

A cementációs kitevő (BM), mely üledékes tárolóknál a kőzet kompaktációs tulajdonságait tükrözi, ARCHIE (1942) óta ismeretes a következő formulából

$$F = \frac{BA}{POR^{BM}},$$

ahol F az ellenállás formáció-tényező, POR a porozitás, BA a tortuozitási tényező. A BM gyakorlati értéke általában az $1.3 \leq BM \leq 2.3$ tartományba esik. E paraméter a (9)-(10) nemlineáris fajlagos ellenállás válaszegyenletekben szerepel. Legyen az intervallum inverzióban $\vec{m}^{(r)}$ az r-edik réteg modellvektora

$$\vec{m}^{(r)} = [POR, SX0, SW, VSH, VSD, BM]^T,$$

ahol POR a porozitás, SX0 a kispert zóna-, SW az érintetlen zóna víztelítettsége, VSH az agyagtartalom, VSD a homoktartalom és BM a cementációs faktor r-edik rétegbeli értéke. A VSD paraméter az anyagmérleg egyenletből megadható, így n réteg esetén az inverziós ismeretlenek száma 5n. Számítsunk elvi adatokat a (4)-(10) elméleti szonda-válaszegyenletek alapján, továbbá legyen a mért adatvektor az r-edik rétegben

$$\vec{d}^{(r)} = [SP, GR, PORN, DEN, AT, RS, RD]^T,$$

ahol SP a természetes potenciál, GR a természetes gamma, PORN a neutron porozitás, DEN a sűrűség, AT az akusztikus, RS valamely kisbehatolású-, RD a mélybehatolású fajlagos ellenállás szelvényadat. Ekkor a Marquardt-féle csillapított legkisebb négyzetek módszert alkalmazva a megoldás a q-adik iterációban az r-edik réteg konstans paraméterre vonatkozóan

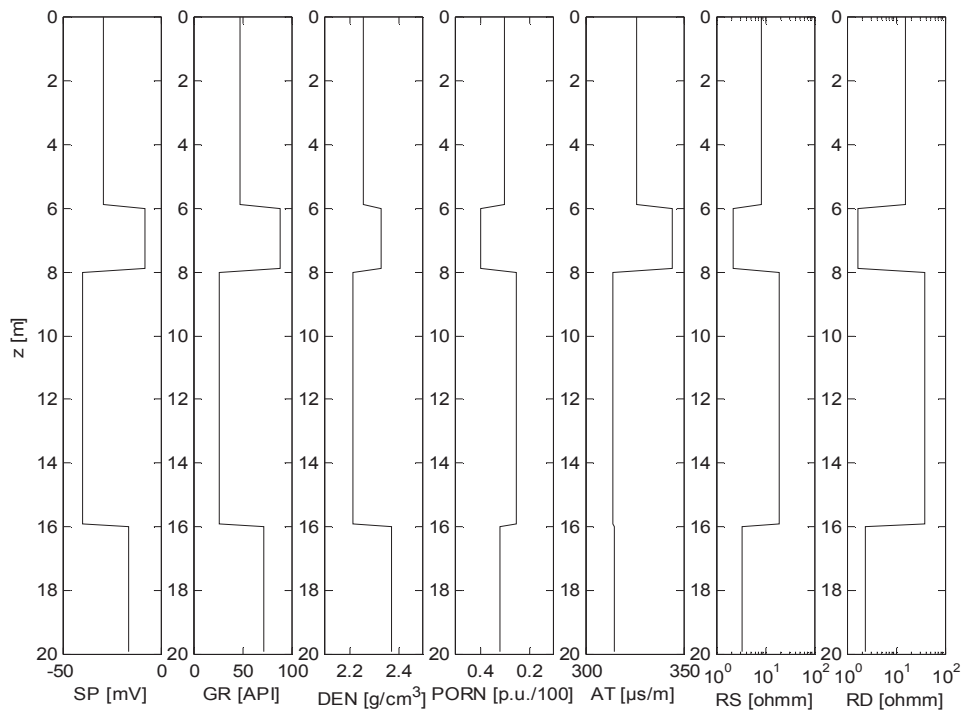
$$\vec{m}^{(r,q)} = \vec{m}^{(r,q-1)} + (\underline{\underline{G}}^T \underline{\underline{G}} + \varepsilon^2 \underline{\underline{I}})^{-1} \underline{\underline{G}}^T (\vec{d}^{(r)} - \underline{\underline{G}} \vec{m}^{(r,q-1)}).$$

Teszteljük a fenti intervallum inverziós algoritmust először zajmentes (0% hiba) szintetikus adatokon (a, inverzió). A vizsgálatot négy réteges (szénhidrogén-tároló) célmodellen végeztük el, melynek paramétereit a 14. táblázat tartalmazza. A táblázatban szereplő paraméte-rekből számított szintetikus szelvényeket az 16. ábra mutatja be.

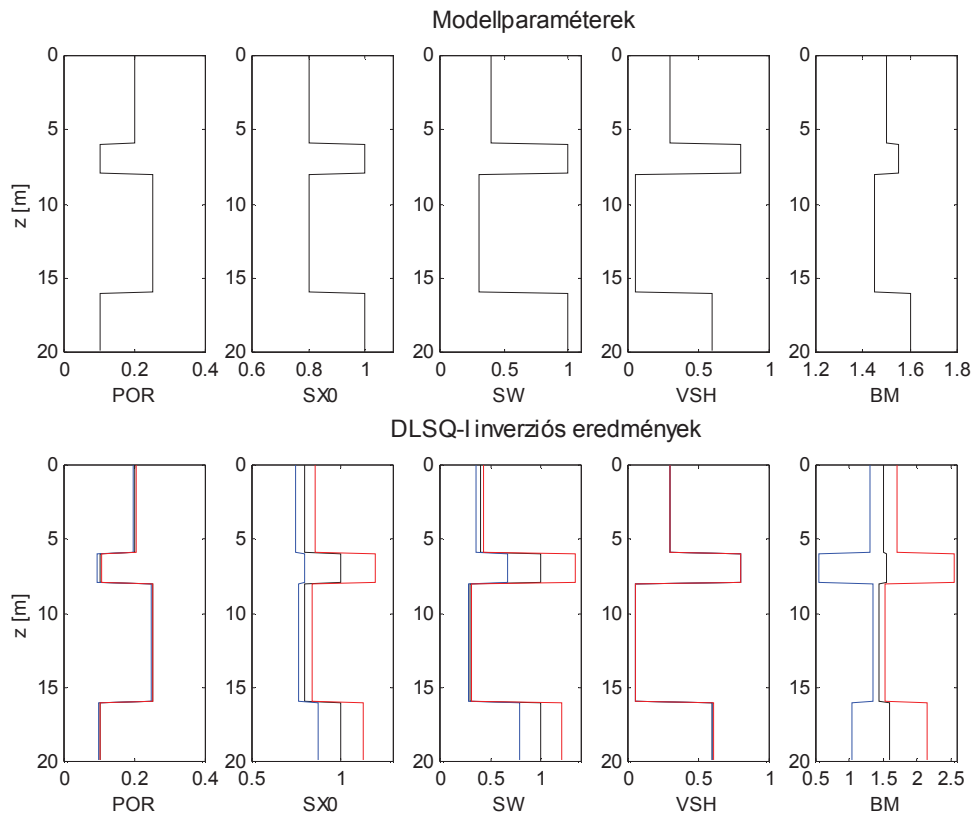
14. táblázat: Inverziós célmodell paraméterei

H(m)	POR	SX0	SW	VSH	BM
6	0.20	0.80	0.40	0.30	1.50
2	0.10	1.00	1.00	0.80	1.55
8	0.25	0.80	0.30	0.05	1.45
4	0.10	1.00	1.00	0.60	1.60

Az a, intervallum inverziós futtatás eredményei az 17. ábrán láthatók, ahol felül a modell szelvények, az alatt pedig a becsült paraméterek szelvényei (fekete vonal) és hibái (kék görbe: konfidencia-intervallum alsó határa, piros görbe: konfidencia-intervallum felső határa) szerepelnek.



16. ábra: Számított szelvények (0% zaj)

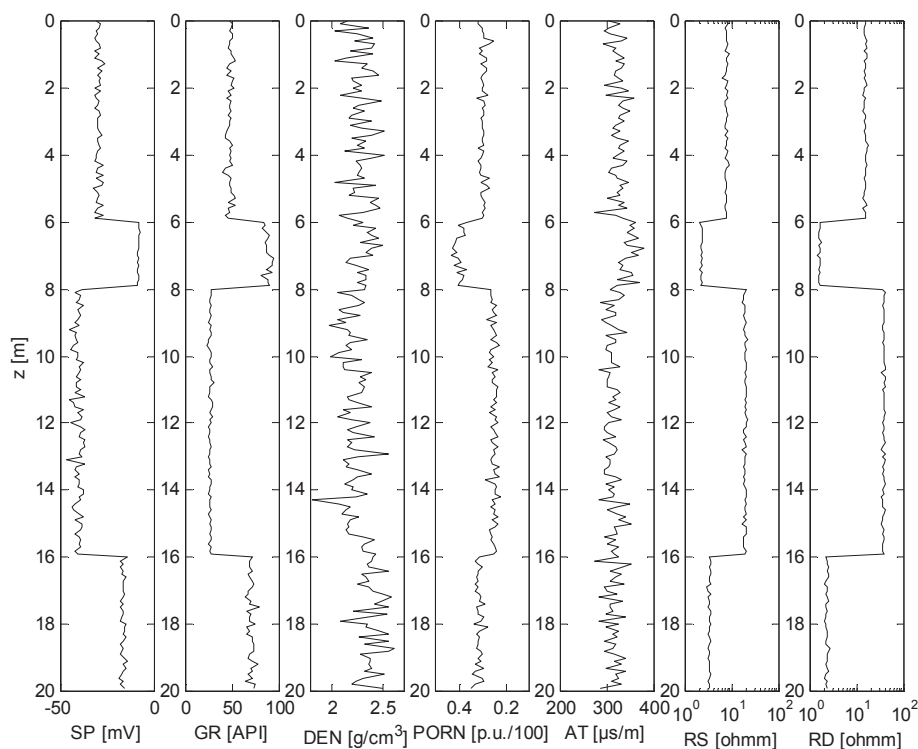


17. ábra: Az a, intervallum inverzió paraméter- és hibaszelvényei

A becslés relatív adattérbeli ($D_a=0.0002\%$) és modelltérbeli távolsága ($D_m=0.0257\%$) elfogadható, azonban a becslési hibák POR és VSH paraméterek kivételével az agyagrétegekben igen nagyok. Az 15. táblázatbeli korrelációs mátrixból látható, hogy a problémát a víztelítettségek és a cementációs faktor teljes korrelációja okozza. (A két paraméter nemlineáris kapcsolatban van az alkalmazott Indonéziai-formulában). Az eredmény elfogadhatósága nemcsak a nagy korrelációs együtthatók miatt kicsi, hanem azért, mert a hibatartomány SX0, SW, és BM esetén meghaladja a paraméter elvi értékhatárait. E problémát úgy oldottuk fel, hogy az SX0 paramétert determinisztikusan számítottuk egy új inverziós algoritmusban a BAKER ATLAS (1996) összefüggését alkalmazva

$$SX0(z) = SW(z)^{SWEXP}, \quad (12)$$

ahol SWEXP=0.2-0.5 között változhat (z: mélység). Ez az a priori ismeret (mely a hazai gyakorlatban is gyakran alkalmazott) hatékonynak bizonyult zajos adatok esetén is. Az inverziós ismeretlenek ekkor: POR, SW, VSH, BM. (A VSD paramétert továbbra is az anyagmérleg egyenletből számíthatjuk). Az 14. táblázat modelljén elvi adatokat számítottunk, majd azokat 5%-os Gauss-eloszlásból származó zajjal terheltük (b, inverzió). A inverzió bemenő szelvényeit a 18. ábrán, a futtatás eredmény- és hibaszelvényeit a 19. ábrán láthatjuk. Látható, hogy a bementi zaj ellenére igen pontos a paraméterbecslés. A becslés relatív adattérbeli- és modelltérbeli távolsága: $D_a=5.17\%$, $D_m=0.14\%$. A 17. és a 19. ábra össze-hasonlítása után látható, hogy a paraméter-becslés hibája nagymértékben lecsökkent, különösen az SW és a BM paraméter tekintetében. Az eredmények megbízhatóságát a 16. táblázatbeli korrelációs együtthatók támasztják alá. Mindez bizonyítja, hogy pontos és stabil inverzió keretében meghatározhatók a kiválasztott texturális paraméterek.



18. ábra: Számított szelvények (5% Gauss-zaj)

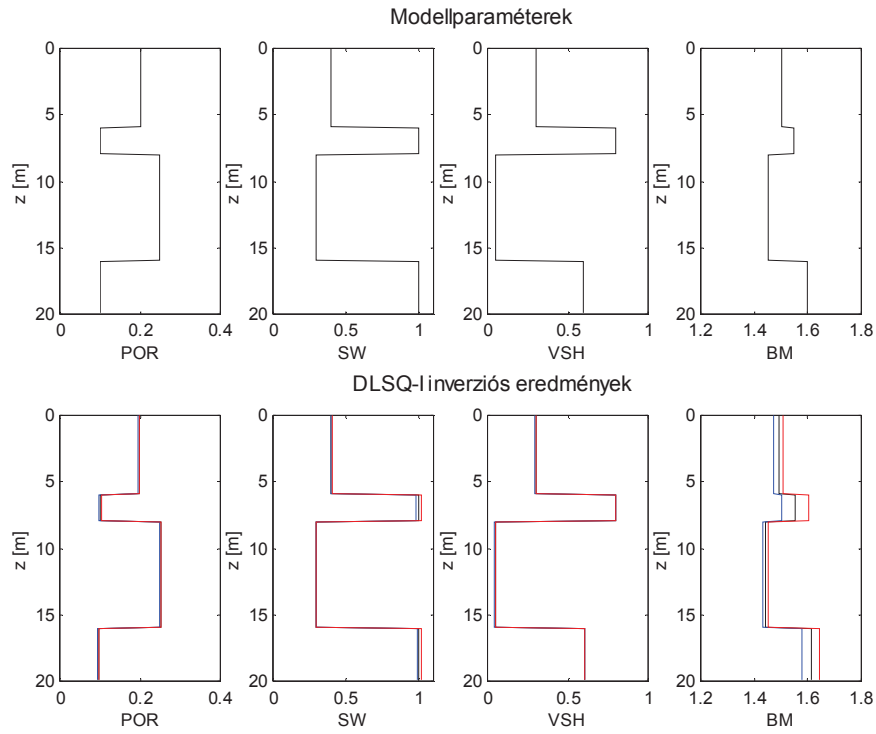
15. táblázat: Becsült paraméterek korrelációs mátrixa (a, inverzió)

Korrelációs mátrix																				
	POR1	SX01	SW1	VSH1	BMI	POR2	SX02	SW2	VSH2	BM2	POR3	SX03	SW3	VSH3	BM3	POR4	SX04	SW4	VSH4	BM4
POR1	1.00	0.74	0.72	-0.24	0.74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SX01	0.74	1.00	0.99	0.15	0.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SW1	0.72	0.99	1.00	0.19	0.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VSH1	-0.24	0.15	0.19	1.00	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BMI	0.74	0.99	0.99	0.20	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
POR2	0	0	0	0	0	1.00	0.76	0.76	-0.13	0.77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SX02	0	0	0	0	0	0.76	1.00	0.99	0.01	0.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SW2	0	0	0	0	0	0.76	0.99	1.00	0.02	0.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VSH2	0	0	0	0	0	-0.13	0.01	0.02	1.00	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BM2	0	0	0	0	0	0.77	0.99	0.99	0.02	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
POR3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.81	0.79	-0.03	0.82	0	0	0	0	0
SX03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.81	1.00	0.99	0.23	0.99	0	0	0	0	0
SW3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.79	0.99	1.00	0.27	0.99	0	0	0	0	0
VSH3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.03	0.23	0.27	1.00	0.28	0	0	0	0	0
BM3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.82	0.99	0.99	0.28	1.00	0	0	0	0	0
POR4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.71	0.71	-0.28	0.72
SX04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.71	1.00	0.99	0.05	0.99
SW4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.71	0.99	1.00	0.07	0.99
VSH4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.28	0.05	0.07	1.00	0.07
BM4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.72	0.99	0.99	0.07	1.00

16. táblázat: Becsült paraméterek korrelációs mátrixa (b, inverzió)

Korrelációs mátrix

	POR1	SW1	VSH1	BMI	POR2	SW2	VSH2	BM2	POR3	SW3	VSH3	BM3	POR4	SW4	VSH4	BM4
POR1	1.00	0.27	0.54	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SW1	0.27	1.00	0.55	0.84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VSH1	0.54	0.55	1.00	0.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BMI	0.02	0.84	0.62	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
POR2	0	0	0	0	1.00	0.01	0.22	0.49	0	0	0	0	0	0	0	0
SW2	0	0	0	0	0.01	1.00	0.11	0.81	0	0	0	0	0	0	0	0
VSH2	0	0	0	0	0.22	0.11	1.00	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0
BM2	0	0	0	0	0.49	0.81	0.07	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0
POR3	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.14	0.37	0.30	0	0	0	0
SW3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.14	1.00	0.45	0.74	0	0	0	0
VSH3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.37	0.45	1.00	0.55	0	0	0	0
BM3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.30	0.74	0.55	1.00	0	0	0	0
POR4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.13	0.463	0.29
SW4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13	1.00	0.33	0.83
VSH4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46	0.33	1.00	0.30
BM4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.29	0.83	0.30	1.00



19. ábra: A b, intervallum inverzió paraméter- és hibaszelvényei

3.2. A tortuozitási tényező inverziós meghatározása

A tortuozitási tényező (BA) az üledékes tárolókban a pórustér tekervényességét jellemzi, mely ARCHIE (1942) óta ismeretes a következő formulából

$$F = \frac{BA}{POR^{BM}},$$

ahol F az ellenállás formáció-tényező, POR a porozitás, BM a cementációs tényező. A BA gyakorlati értéke általában az $0.6 \leq BA \leq 1.5$ tartományba esik. E paraméter a (9)-(10) nemlineáris fajlagos ellenállás válaszgyenletekben szerepel. Legyen az intervallum inverzióban $\vec{m}^{(r)}$ az r-edik réteg modellvektora

$$\vec{m}^{(r)} = [POR, SX0, SW, VSH, VSD, BA]^T,$$

ahol POR a porozitás, SX0 a kispert zóna-, SW az érintetlen zóna víztelítettség, VSH az agyagtartalom, VSD a homoktartalom és BA a tortuozitási tényező r-edik rétegbeli értéke. A VSD paraméter az anyagmérleg egyenletből megadható, továbbá felhasználva az előző fejezet inverziós tapasztalatait, az $SX0(z) = SW(z)^{SWEXP}$ összefüggésben szereplő SWEXP=konst feltétel mellett SX0 determinisztikusan számítható. Így az inverziós ismeretlenek száma n

számú réteg esetén $4n$. Számítsunk elvi adatokat a (4)-(10) elméleti szonda-válaszegyenletek alapján, továbbá legyen a mért adatvektor az r -edik rétegben

$$\vec{d}^{(r)} = [SP, GR, PORN, DEN, AT, RS, RD]^T,$$

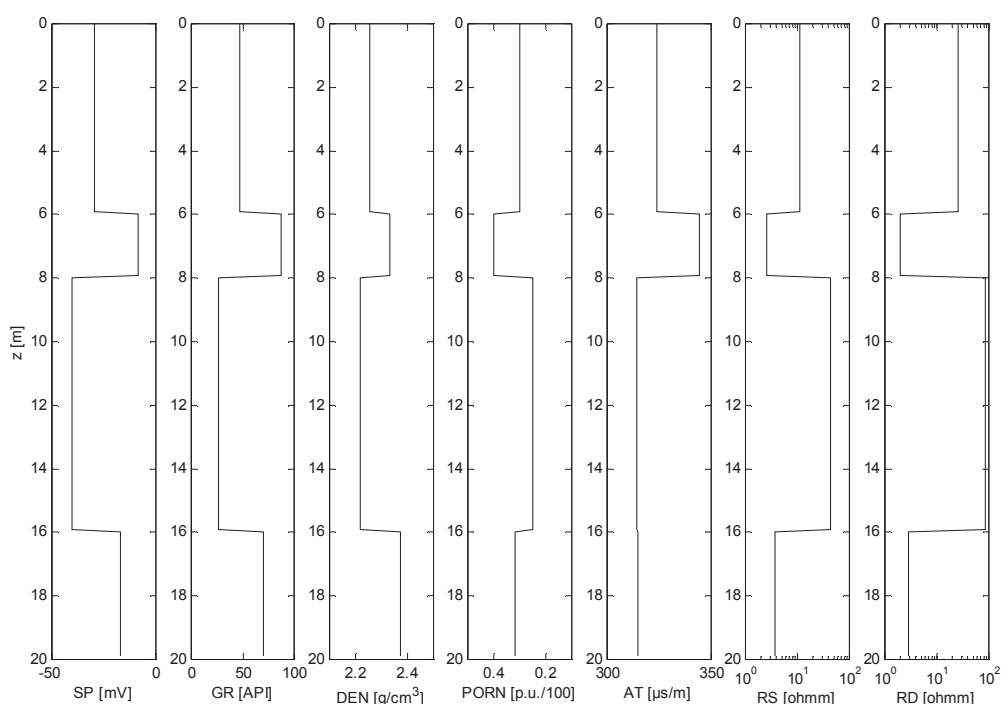
ahol SP a természetes potenciál, GR a természetes gamma, PORN a neutron porozitás, DEN a sűrűség, AT az akusztikus, RS valamely kisbehatolású-, RD a mélybehatolású fajlagos ellenállás szelvényadat. Ekkor a Marquardt-féle csillapított legkisebb négyzetek módszer alkalmazva a megoldás a q -adik iterációban az r -edik réteg konstans paraméterre vonatkozóan

$$\vec{m}^{(r,q)} = \vec{m}^{(r,q-1)} + (\underline{\underline{G}}^T \underline{\underline{G}} + \varepsilon^2 \underline{\underline{I}})^{-1} \underline{\underline{G}}^T (\vec{d}^{(r)} - \underline{\underline{G}} \vec{m}^{(r,q-1)}).$$

Teszteljük a fenti intervallum inverziós algoritmust először zajmentes (0% hiba) szintetikus adatokon (a, inverzió). A vizsgálatot a 17. táblázatban szereplő négy réteges célmodellen végeztük el, melynek paraméterei kiegészülnek a BA paraméterrel. A modellparaméterekből számított szintetikus szelvényeket a 20. ábra mutatja be.

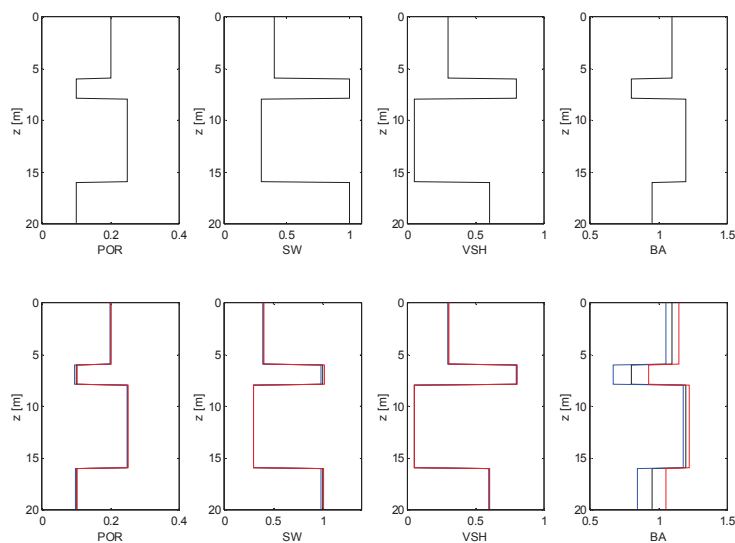
17. táblázat: Inverziós célmodell paraméterei

H(m)	POR	SX0	SW	VSH	BA
6	0.20	0.80	0.40	0.30	1.10
2	0.10	1.00	1.00	0.80	0.80
8	0.25	0.80	0.30	0.05	1.20
4	0.10	1.00	1.00	0.60	0.95

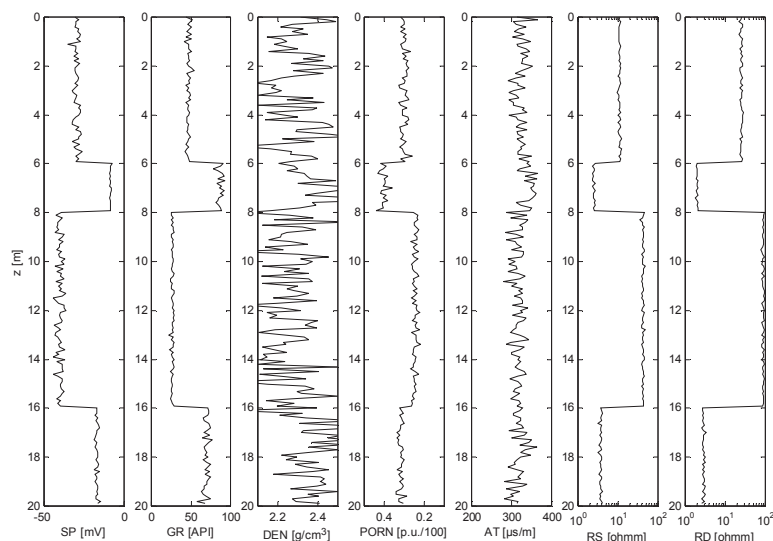


20. ábra: Számított szelvények (0% zaj)

Az a, intervallum inverziós futtatás eredményei a 21. ábrán láthatók, ahol felül a modell szelvények, alul a becsült paraméterek szelvényei (fekete vonal) és hibái (kék görbe: konfidencia-intervallum alsó határa, piros görbe: konfidencia-intervallum felső határa) szerepelnek. A becslés relatív adattérbeli ($D_a = 0.0011\%$) és modelltérbeli távolságai ($D_m = 0.0091\%$) elfogadhatók. A POR, SW, VSH paraméterek meghatározása nagy pontossággal történt, a BA paraméter esetén a 2. és a 4. rétegben legnagyobb a hiba, ahol a 15. ábrát figyelembe véve relatíve legkisebb a paraméter-érzékenység. A tortuozitási tényező meghatározása a két szénhidrogéntárolóban (1. és 3. réteg) igen pontos. A korrelációs koefficiensek $\text{corr}(\text{BA2}, \text{SW2})$ kivételével kicsik, az átlagkorreláció $S = 0.19$ (ld. 18. táblázat). Ezután nézzük meg zajos adatok esetén teljesülnek-e ezek az eredmények. Az 17. táblázat modelljén elvi adatokat számítottunk, majd azokat 5%-os Gauss-eloszlásból származó zajjal terheltük (b, inverzió). A inverzió bemenő szelvényeit a 22. ábrán, a futtatás eredmény- és hiba-szelvényeit a 23. ábrán láthatjuk.



21. ábra: Az a, intervallum inverzió paraméter- és hibaszelvényei

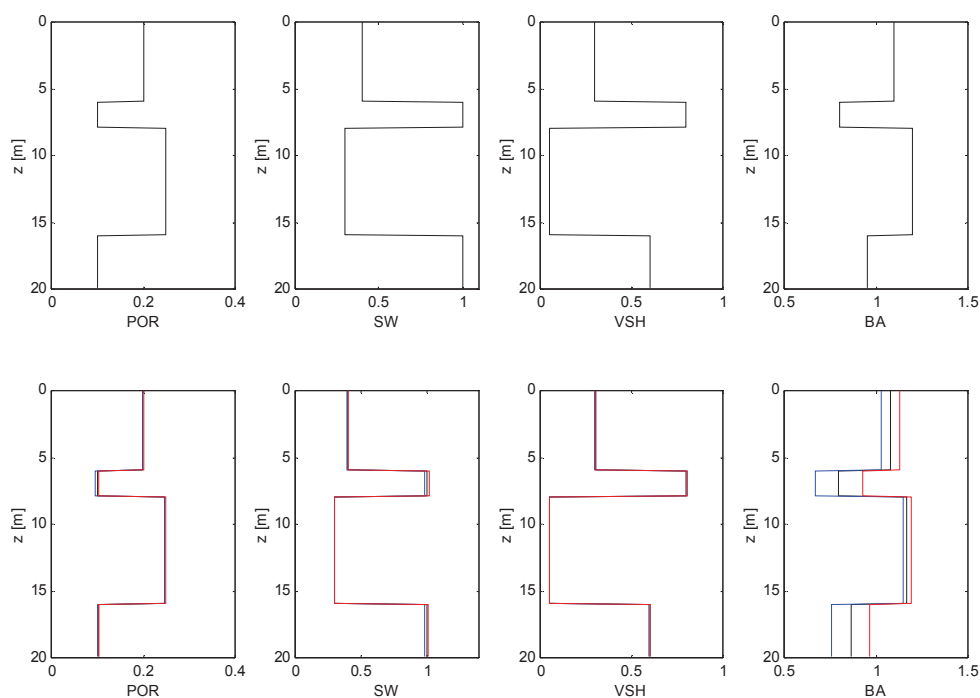


22. ábra: Számított szelvények (5% Gauss-zaj)

18. táblázat: Becsült paraméterek korrelációs mátrixa (a, inverzió)

Korrelációs mátrix																
	POR1	SW1	VSH1	BA1	POR2	SW2	VSH2	BA2	POR3	SW3	VSH3	BA3	POR4	SW4	VSH4	BA4
POR1	1.00	-0.32	-0.53	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SW1	-0.32	1.00	0.63	0.87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VSH1	-0.53	0.63	1.00	0.71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BA1	-0.05	0.87	0.71	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
POR2	0	0	0	0	1.00	-0.01	-0.22	0.44	0	0	0	0	0	0	0	0
SW2	0	0	0	0	-0.01	1.00	0.12	0.84	0	0	0	0	0	0	0	0
VSH2	0	0	0	0	-0.22	0.12	1.00	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0
BA2	0	0	0	0	0.44	0.84	0.10	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0
POR3	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	-0.20	-0.37	0.24	0	0	0	0
SW3	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.20	1.00	0.62	0.76	0	0	0	0
VSH3	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.37	0.62	1.00	0.69	0	0	0	0
BA3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.24	0.76	0.69	1.00	0	0	0	0
POR4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	-0.15	-0.46	0.19
SW4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.15	1.00	0.36	0.87
VSH4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.46	0.36	1.00	0.39
BA4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.19	0.87	0.39	1.00

A 23. ábrán látható, hogy a bementi zaj ellenére igen pontos a paraméterbecslés. A hibák és a korrelációs mátrix elemei számottevően nem változtak meg, mely azt mutatja, hogy az intervallum inverziós módszer kevésbé zajérzékeny. A becslés relatív adattérbeli- és modelltérbeli távolsága: $D_a=5.20\%$, $D_m=2.17\%$. Továbbra is, a POR, SW, VSH paraméterek meghatározása a legnagyobb pontosságú, a BA paraméter a 2. és a 4. rétegben a legbizonytalanabb a többi réteghez (és paraméterhez) hasonlítható relatíve kisebb paraméter-érzékenység miatt. A tortuozitási tényező meghatározása leginkább a szénhidrogén-tárolókban ideális.



23. ábra: A b, intervallum inverzió paraméter- és hibaszelvényei

3.3. A szaturációs tényező inverziós meghatározása

A szaturációs kitevőt (BN) labormérésekből tudjuk megadni, mely az Archie-formula segítségével a víztelítettség becslésére ad információt

$$SW = \sqrt[BN]{\frac{F \cdot RW}{RT}},$$

ahol F az ellenállás formáció-tényező, RW a rétegvíz fajlagos ellenállása, és RT az érintetlen zóna valódi fajlagos ellenállása. A BN gyakorlati értéke általában az $1.5 \leq BN \leq 2.2$ tartományba esik. E paraméter a (9)-(10) nemlineáris fajlagos ellenállás válaszgyenletekben szerepel. Legyen az intervallum inverzióban $\vec{m}^{(r)}$ az r-edik réteg modellvektora:

$$\vec{m}^{(r)} = [POR, SX0, SW, VSH, VSD, BN]^T,$$

ahol POR a porozitás, SX0 a kisépért zóna-, SW az érintetlen zóna víztelítettsége, VSH az agyagtartalom, VSD a homoktartalom és BN a cementációs faktor r-edik rétegbeli értéke. A VSD paraméter az anyagmérleg egyenletből megadható, továbbá felhasználva az eddigi inverziós tapasztalatainkat az $SX0(z) = SW(z)^{SWEXP}$ összefüggésben szereplő SWEXP=konst feltétel mellett SX0 determinisztikusan számítható. Így az inverziós ismeretlenek száma n számú réteg esetén 4n. Számítsunk elvi adatokat a (4)-(10) elméleti szonda-válaszegyenletek alapján, továbbá legyen a mért adatvektor az r-edik rétegben

$$\vec{d}^{(r)} = [SP, GR, PORN, DEN, AT, RS, RD]^T,$$

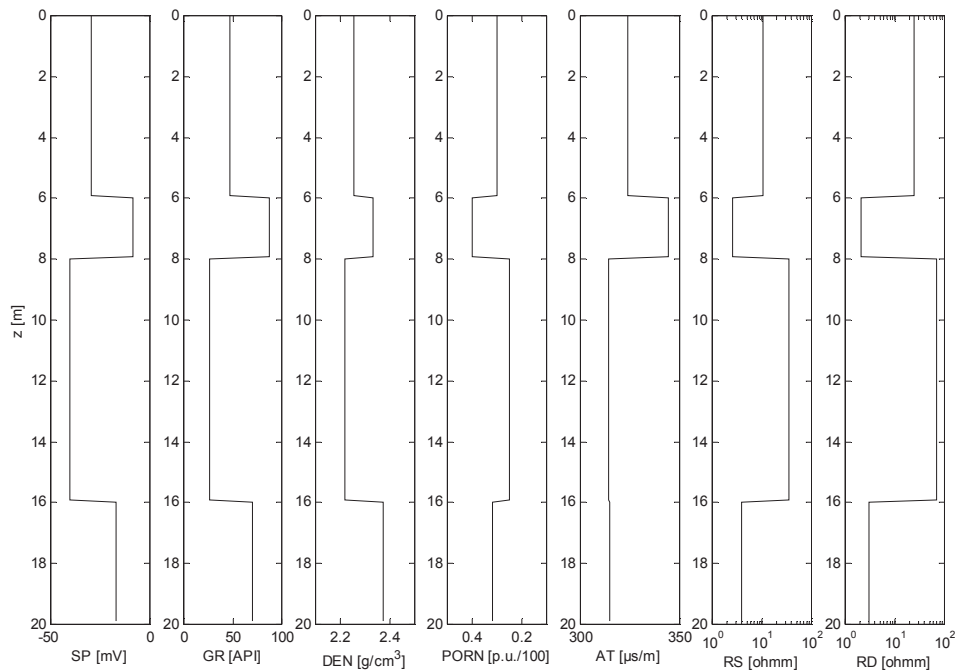
ahol SP a természetes potenciál, GR a természetes gamma, PORN a neutron porozitás, DEN a sűrűség, AT az akusztikus, RS valamely kisbehatolású-, RD a mélybehatolású fajlagos ellenállás szelvényadat. Ekkor a Marquardt-féle csillapított legkisebb négyzetek módszert alkalmazva a megoldás a q-adik iterációban az r-edik réteg konstans paraméterre vonatkozóan

$$\vec{m}^{(r,q)} = \vec{m}^{(r,q-1)} + (\underline{\underline{G}}^T \underline{\underline{G}} + \varepsilon^2 \underline{\underline{I}})^{-1} \underline{\underline{G}}^T (\vec{d}^{(r)} - \underline{\underline{G}} \vec{m}^{(r,q-1)}).$$

Teszteljük a fenti intervallum inverziós algoritmust zajmentes (0% hiba) szintetikus adatokon. A vizsgálatot négy réteges (szénhidrogén-tároló) célmodellen végeztük el, melynek paramétereit a 19. táblázat tartalmazza. A táblázat paramétereiből számított szintetikus szelvényeket a 24. ábra mutatja be.

19. táblázat: Inverziós célmodell paramétereit

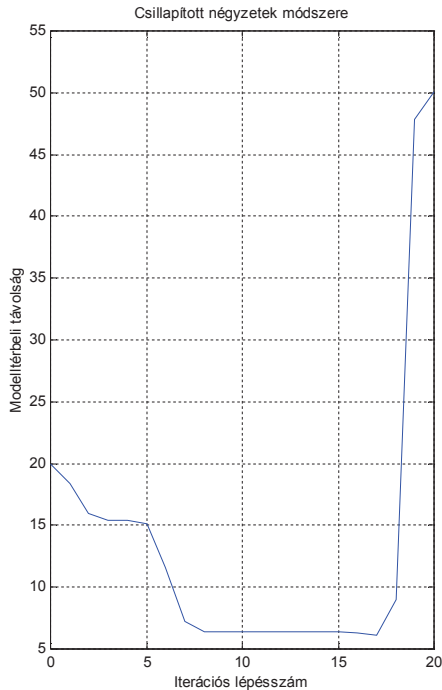
H(m)	POR	SX0	SW	VSH	BN
6	0.20	0.80	0.40	0.30	2.00
2	0.10	1.00	1.00	0.80	1.80
8	0.25	0.80	0.30	0.05	1.95
4	0.10	1.00	1.00	0.60	2.10



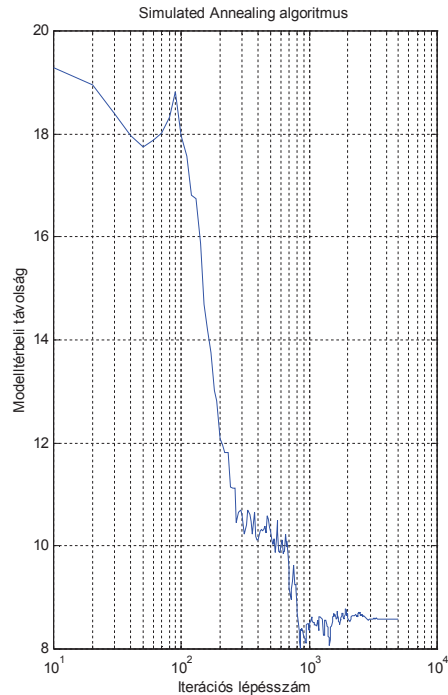
24. ábra: Számított szelvények (0% zaj)

Az inverziós tesztelések a 2.2. fejezet paraméter-érzékenységi vizsgálatainak megfelelő várakozást hozták. A 15. ábra fajlagos ellenállás szaturációs tényezőre vonatkozó érzékenységi-függvényét tekintve, egy matematikai probléma vetődik fel. Abban az esetben, amikor a víztelítettség 100% ($SW=1$), akkor az Indonéziai-egyenlet paraméter-érzékenysége a teljes paraméter-tartományban zérus. Azonban azt is látni fogjuk, hogy a jelenlegi modell-egyenletek (Indonéziai, Simandoux és Archie) alkalmazásával $SW \neq 1$ esetén is problémába ütközik a szaturációs tényező inverziós meghatározása.

Az a, inverzió során hibátlan (0%) zajjal terhelt adatokból próbáltuk meghatározni a 19. táblázat modellparamétereit. Itt két rétegben $SW_2=SW_4=1$, ahol az Indonéziai-egyenlet e két paraméterre vonatkozó érzékenysége is zérus volt. Az inverziót lineáris (csillapított legkisebb négyzetek) módszerrel elvégezve divergens megoldást kaptunk (ld. 25/a. ábra). A korrelációs együttható vonatkozásában mind a négy rétegben a szaturációs tényező (BN) és az érintetlen zóna víztelítettsége (SW) teljes korrelációt mutatott. Így a lineáris inverziós módszer nem vezetett eredményre.



a,



b,

25. ábra: Modelltérbeli távolság vs. iterációs lépésszám
lineáris és globális optimalizáció esetén

Ezután globális optimalizációval (SA-I: Simulated Annealing Interval Inversion) próbálkoztunk. Az SA-I algoritmus minimalizálandó energiafüggvénye analóg módon megfelel az előbbi lineáris módszer célfüggvényének. Ez konvergens megoldást szolgáltatott (ld. 25/b. ábra), azonban a kedvezőtlen érzékenységu paraméterek problémáját nem oldotta fel. Míg a POR, SW, VSH esetén pontos addig a BN paraméter esetén meglehetősen pontatlan becslést eredményezett (ld. 20. táblázat). Ezt mutatja a rossz paramétertérbeli illeszkedés is: a becslés relatív adattérbeli- és modelltérbeli távolsága: $D_a=0.12\%$, $D_m=8.58\%$.

20. táblázat: SA-I inverziós eredmények

H(m)	POR	SX0	SW	VSH	BN
6 (fix)	0.20	0.80	0.40	0.30	2.04
2 (fix)	0.10	0.99	0.99	0.70	1.51
8 (fix)	0.25	0.59	0.34	0.09	2.19
4 (fix)	0.10	0.99	0.99	0.70	2.09

A módszer zajos adatok esetén várhatóan még pontatlanabb, ezért ez az eredmény csak tájékoztató információ szolgáltatására alkalmas. Megjegyezzük, hogy a linearizált módszer $SW \neq 1$ értékű víztelítettségeket tartalmazó modell esetén konvergensevé tehető, azonban a paraméter-érzékenység nem növekszik meg és az eredményeket továbbra is nagy hiba és korrelációs együtthatók jellemzik. Úgy véljük, hogy a szaturációs tényező pontosabb intervallum inverziós meghatározásának nincs akadálya, de ehhez feltétel egy új modell-egyenlet vagy a texturális paraméterek pontosabb megadása a direkt feladat vonatkozásában, mely kedvezőbb paraméter-érzékenységi viszonyokat eredményez.

4. AZ EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA TEREPI MÉLYFŰRÁSI GEOFIZIKAI SZELVÉNYADATOKON

Komplex szénhidrogén-tárolók vizsgálata intervallum inverziós módszerrel

A petrofizikai gyakorlatban leggyakrabban egyszerű litológiájú (egy ásványi komponensből -pl. kvarc-álló) szénhidrogén-tárolókkal találkozunk. A mélyfúrás geofizika gyakorlatában fontos szerepet játszanak és komoly szakmai kihívást jelentenek a komplex tárolók, amelyeket bonyolultabb kőzetösszetétel (többkomponensű kőzetmátrix) jellemez. A komplex tárolók körében mind a hazai, mind pedig a nemzetközi gyakorlatban egyaránt előfordulnak repedezett (kis porozitású) karbonát, metamorf és kis számban vulkáni kőzetből álló tárolók is. E fejezetben az intervallum inverziós módszer terepi alkalmazhatóságára példaként két adatrendszer kiértékelését mutatjuk be. Elsőként egy karbonátos, majd ezután egy metamorf tárolókból álló kőzetösszetétel intervallum inverziós vizsgálatára kerül sor.

4.1. Globális inverziós algoritmus

Az inverziós vizsgálatok számára globális optimalizációs módszert választottunk, mely a célfüggvény abszolút minimumának megkeresésével bizonyíthatóan pontosabb paraméter-bebecslést tesz lehetővé, mint a 3. fejezetben bemutatott lineáris Marquardt-algoritmus, ugyanakkor startmodell-független és robusztusabb módszer is egyben. Az alkalmazott Simulated Annealing eljárás alapjait METROPOLIS és társai (1953) dolgozták ki fémek termikus egyensúlyi állapotának modellezése céljából. E módszert továbbfejlesztve texturális paraméter meghatározásra alkalmas intervallum inverziós eljárást fejlesztettünk.

A Simulated Annealing eljárás fémek hőkezelésének egy speciális technikáját algoritmi-zálja, mely felhasználható a geofizikai inverz feladat megoldására. Az analógia alapja a hűtés időtartamától és ütemétől függően kialakuló fémrács atomi összenergiája és az inverz feladat minimalizálandó célfüggvényének kapcsolata. A kohászatban a fémek lágyítását az olvadt állapothoz közeli hőmérsékletről történő lassú hűtéssel valósítják meg. Ennek hatására a nagy számú atom fokozatosan veszít mozgási energiájából, a fém kristályosodni kezd. A kialakuló fémrács atomi összenergiája a hűtés időtartamának a függvénye. Elvileg végtelen lassú hűtés eredményezi a minimális energiájú tökéletes rácsszerkezetet, mely analóg a geofizikai inverz probléma célfüggvényének globális minimumban való stabilizálódásával. A gyakorlatban ilyen lassú hűtés nem valósítható meg, ezért gyorsabb eljárás szükséges. Gyors hűtési ütem következtében viszont a kristályos szerkezetben rácshibák alakulnak ki, így a fém egy magasabb energiaszinten fagy „tökéletlen” rácshiba. Ez megfelel az inverziós eljárás lokális minimumban való stabilizálódásának. Az atomok csak speciális hőkezelés hatására tudnak kiszabadulni e magasabb energiaszintű kristályszerkezetből, majd ezután megfelelően lassú hűtés mellett érik el az abszolút minimális energiájú rácsszerkezetet. A Simulated Annealing eljárás e folyamatot másolja a célfüggvény globális minimumának megtalálása érdekében. Az eljárás keresési mechanizmusa a véges Markov-láncok elméletével matematikailag egzaktul leírható. TREITEL és HELBIG (1997) bebizonyították, hogy az optimális modell konvergens eljárásban az ún. Gibbs-Boltzmann-féle eloszláshoz tart, a termikus egyensúly megvalósulása érdekében. Ehhez megfelelő hűtés szükséges. GEMAN (1984) kimutatta, hogy a Metropolis Simulated Annealing eljárás globális minimumhoz történő konvergenciájának szükséges és elégséges feltétele a következő hűtési mechanizmus alkalmazása

$$T(q) = \frac{T_0}{\ln q}, \quad q > 1, \quad (12)$$

ahol $T(q)$ az q -adik iterációs lépésbeli hőmérséklet (mely az optimalizációban egy lényeges dimenziótlan kontrollparaméter szerepét tölti be), és T_0 a kezdeti (kritikus) hőmérséklet. Ha tehát a fenti eljárás szerint hűtünk, akkor garantált az abszolút minimum meghatározása.

A Simulated Annealing módszer terminológiájában a mért és a számított geofizikai adatok eltérését jellemző függvényt energiafüggvénynek nevezzük, melyet az inverz feladat megoldása érdekében minimalizálnunk kell. Az intervallum inverziós feladat számára egy speciális célfüggvényt definiáltunk, mely rétegenként homogén földtani modellre alkalmazható. Ha a rétegben a mért adatok számtani átlagát vesszük, és azok ill. az inverzió során számított adatok (mely szelvényenként azonos értéket szolgáltat ugyanazon rétegben) négyzetes eltéréseit összegezzük, akkor a célfüggvény a következő

$$E = \sqrt{\frac{1}{R \cdot K} \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \left(\frac{\hat{d}_{rk}^{(mért)} - d_{rk}^{(számított)}}{\hat{d}_{rk}^{(mért)}} \right)^2} \rightarrow \min \quad (13)$$

ahol r - a homogén rétegek száma az intervallumon, k - az alkalmazott szondák (szelvények) száma, d - a karotázs adatokat jelöli. Ez egyben a mért és számított adatok illeszkedését mérő szám (relatív adattérbeli távolság - D_d) is a numerikus vizsgálatok számára. A Simulated Annealing eljárás az optimalizálás során véletlen keresést hajt végre a paramétertérben, miközben a modell paramétereit

$$m_i^{(q)} = m_i^{(q-1)} + b$$

formula szerint iterációról-iterációra változtatja. A képlet szerint az i -edik modellparamétert a q -adik iterációs lépésben, az előző iterációs lépésbeli paraméterérték és a „ b ” paraméter-korrekciónak összegeként számítjuk. A „ b ” értékét minden iterációs lépésben $0 \leq b \leq b_{\max}$ között véletlenszerűen generáljuk, annak maximális értékét előírt iterációs lépésszám után csökkentjük a

$$b_{\max}^{(q)} = b_{\max}^{(q-1)} \cdot \varepsilon, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1$$

összefüggés szerint. Ezzel az eljárással adott hőmérsékleten különböző véletlen energiaállapotokat (modelleket) vizsgálunk meg, és az aktuális paramétertérbeli pontból számított energiafüggvény értéket összehasonlítjuk az előző lépésben elfogadott energiafüggvény értékkel. Az új modellparaméter elfogadását valószínűségi szabályhoz kötjük. A Metropolis algoritmus a Metropolis-kritériumról kapta a nevét, mely az aktuális modell elfogadására a következő valószínűségi szabályt írja elő

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

A képlet szerint, ha az új állapotban az energia értéke (a mért és számított geofizikai adatok távolsága) csökken, akkor mindig elfogadjuk az új modellparamétereket. A szabály a lokális minimumból való kiszabadulás lehetőségét is megengedi, hiszen az energia növekedése (adattérbeli távolság növekedése) esetén is definiál (egy az energianövekménytől függő) „ P ” elfogadási valószínűséget. Ha erre teljesül a $P(\Delta E) \geq \alpha$ feltétel (ahol α egy egyenletes valószínűséggel generált $[0,1]$ intervallumba eső szám), akkor az új paramétert elfogadjuk, ellenkező esetben elvetjük. A képletben található T általánosított hőmérsékletet (próba-futtatások során nyert tapasztalatok alapján) az eljárás alatt alkalmasan megválasz-

tott ütemben csökkenteni kell. Az inverzió konvergenciája e hűtési ütemtől nagymértékben függ, így kerülni kell a túl gyors hűtést, mert ez az eljárást könnyen lokális minimumba tereli, viszont túl lassú hűtés sem célszerű, mert csak jóval hosszabb idő múlva kapjuk meg a megoldást. A logaritmikus hűtési formula nem túl lassú, azonban garantálja a globális optimum megtalálását. A kilépési feltételt a stopkritériumban határozzuk meg, mellyel a legutolsó iterációs lépésben elfogadott modellt tekintjük az inverz feladat megoldásának.

4.2. Az általánosított válaszegyenlet-rendszer

Komplex tárolók modellparamétereinek meghatározása során is elméleti szonda-válasz-egyenleteket használunk fel az elvi adatok számítására. Ezek az egyenletek hasonlóak az üledékes modellekéhez, azonban itt figyelembe kell venni az összes lehetséges kőzetalkotó ásványi komponenst (ezeket a terepi példáknál részletezzük). További különbség, hogy az üledékes egyenletek a kőzetek primer (szemcseközi) porozitását tartalmazzák. Matematikailag ezt komplex tárolóknál is elfogadjuk, azonban ebben az esetben a porozitás tartalmazza a repedések, üregek stb. által megjelenő szekunder porozitást is. Ez az érték nagyságrenddel kisebb mint a primer porozitás, így az elvi adatok számításánál legnagyobb hangsúly az ásványi komponensek fajlagos térfogatain ill. válaszfüggvény konstansain van. A modellhibák tehát elsősorban ezek nem megfelelő megválasztásán alapulnak. A fentiek figyelembevételével a terepi intervallum inverziós vizsgálatokhoz használt részletes szonda-válasz-egyenletek a következők:

- Természetes gamma válaszfüggvény:

$$GRTH = \frac{1}{DETH} \left\{ \begin{array}{l} POR(GRMF \cdot DEMF \cdot SX0 + GRCH \cdot DECH(1 - SX0)) + \\ + VCL \cdot GRCL \cdot DECL + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot GRMA_i \cdot DEMA_i \end{array} \right\} \quad (14)$$

- Neutron-porozitás válaszfüggvény:

$$PORNTH = POR(PORNMF - BCOR(1 - SX0) - BC) + VCL \cdot PORNCL + \\ + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot PORNMA_i + PORNEX$$

$$PORNEX = \left(\frac{DEMA}{2.65} \right)^2 (2 \cdot POR^2 \cdot JCH + 0.04 \cdot POR)(1 - JCH)$$

$$JCH = PORNMF \cdot SX0 + PORNCL(1 - SX0) \quad (15)$$

$$BCOR = SCHB \left\{ 1 - \frac{B}{DEMF(1 - PMF)} \right\}$$

$$BC = 2 \cdot POR(1 - SX0)SCHB(1 - B) \{ 1 - (1 - SX0)(1 - B) \}$$

$$B = \begin{cases} 2.2 \cdot DECH & , DECH < 0.25 \\ DECH + 0.3 & , DECH \geq 0.25 \end{cases}$$

- Sűrűség válaszfüggvény:

$$\begin{aligned}
 DETH &= POR(DEMF - 1.07 \cdot SCHRB(1 - SX0)(ALFA \cdot DEMF - BETA)) + \\
 &+ VCL \cdot DECL + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot DEMA_i \\
 ALFA &= 1.11 - 0.15 \cdot PMF \\
 PMF &= \frac{0.004898}{\left(\frac{RMF}{75 + 6.77} (TMF + 6.77)\right)^{1.18}} \\
 BETA &= \begin{cases} 1.24 \cdot DECH & , DECH \leq 0.333 \\ 1.11 \cdot DECH + 0.03 & , DECH > 0.333 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{16}$$

- Fotoelektromos abszorpciós index válasz egyenlet:

$$\begin{aligned}
 PE &= \frac{1.0704 \cdot UPE}{DEN + 0.1883} \\
 UPE &= POR \cdot SX0 \cdot UPEMF + POR(1 - SX0)UPECH + VCL \cdot UPECL \\
 &+ \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot UPEMA_i
 \end{aligned} \tag{17}$$

- Akusztikus terjedési idő válaszfüggvény (Wyllie-féle átlagidő egyenlet):

$$\begin{aligned}
 ATTH &= POR(ATMF \cdot SX0 + ATCH(1 - SX0)) + VCL \cdot ATCL + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot ATMA_i \\
 ATCH &= 1.11 \{ ATO(DECH - 0.05) + ATG(0.95 - DECH) \}
 \end{aligned} \tag{18}$$

- Kisepert zóna fajlagos ellenállás válaszfüggvény (Indonéziai egyenlet):

$$\frac{1}{RSTH^{1/2}} = \left\{ \frac{VCL^{(1-VCL/2)}}{RCL^{1/2}} + \frac{POR^{BM/2}}{(BA \cdot RMF)^{1/2}} \right\} SX0^{BN/2} \tag{19}$$

- Érintetlen zóna fajlagos ellenállás válaszfüggvény (Indonéziai egyenlet):

$$\frac{1}{RDTH^{1/2}} = \left\{ \frac{VCL^{(1-VCL/2)}}{RCL^{1/2}} + \frac{POR^{BM/2}}{(BA \cdot RW)^{1/2}} \right\} SW^{BN/2} \tag{20}$$

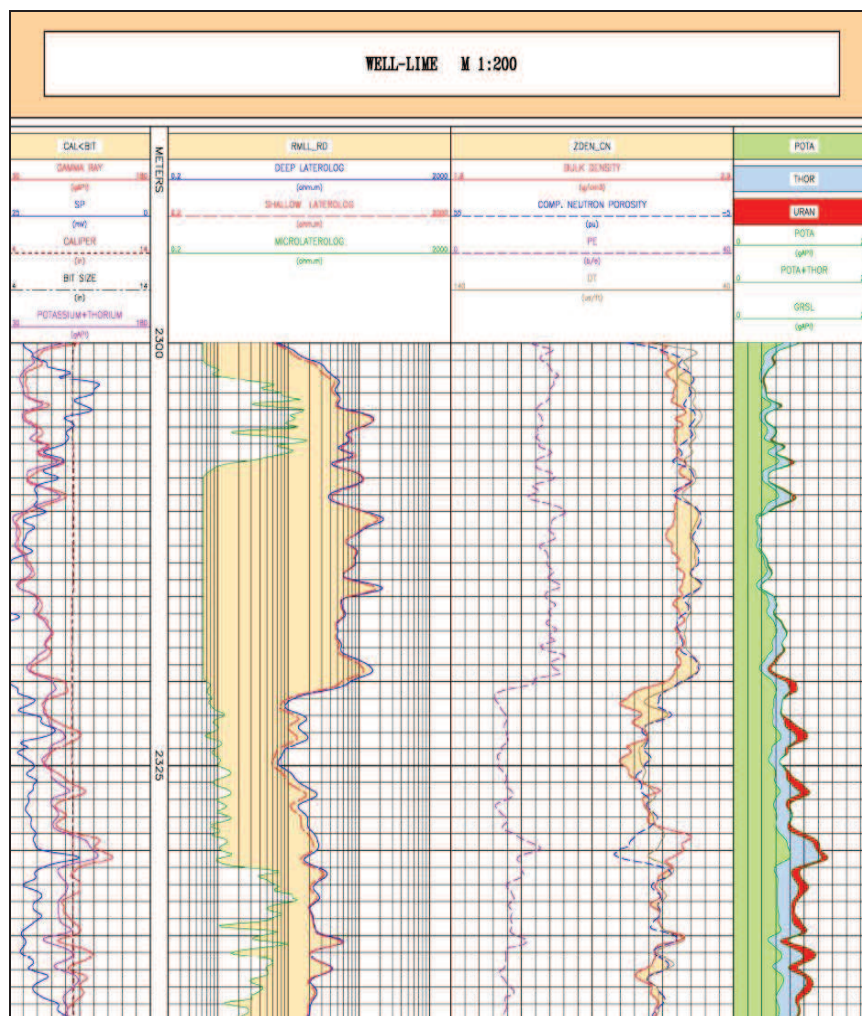
A fenti válasz egyenlet-rendszerben szereplő modellparaméterek: POR a teljes porozitás, SX0 és SW a kisepert- és az érintetlen zóna víztelítettsége, VCL az agyagtartalom, VMA_i komplex tároló i-edik ásványi komponensének részaránya (fajlagos térfogata). A fajlagos ellenállás egyenletekben szereplő texturális konstansok: BM a cementációs kitevő, BN a szaturációs exponens és BA a tortuozitási tényező. A számított (teoretikus=TH) adatok a következők: GRTH[API] - természetes gamma, PORNTH[p.u.] - neutron porozitás, DENTH[g/cm³] - sűrűség, PETH[barn/e] - fotoelektromos abszorpciós index, ATTH[μs/f] - akusztikus, RSTH[ohmm] és RDTH[ohmm] valamely kisbehatolású- és mélybehatolású fajlagos ellenállás szelvényadat. Az (1)-(7) egyenletekben szereplő többi szelvénykonstans jelentése a 21. táblázatban található.

21. táblázat: Válaszegyenletek konstansainak jelentése

Paraméter	Petrofizikai jelentés
ATCH	Szénhidrogén akusztikus terjedési ideje
ATCL	Agyag akusztikus terjedési ideje
ATG	Gáz akusztikus terjedési ideje
ATMA	Mátrix komponens akusztikus terjedési ideje
ATMF	Izapfiltrátum akusztikus terjedési ideje
ATO	Olaj akusztikus terjedési ideje
DECH	Szénhidrogén sűrűsége
DECL	Agyag sűrűsége
DEMA	Mátrix komponens sűrűsége
DEMF	Izapfiltrátum sűrűsége
GRCH	Szénhidrogén természetes gamma intenzitása
GRCL	Agyag természetes gamma intenzitása
GRMA	Mátrix komponens természetes gamma intenzitása
GRMF	Izapfiltrátum természetes gamma intenzitása
PMF	Izapfiltrátum sókoncentrációja
PETH	Fotoelektromos abszorpciós index
PORNEX	Exkavációs hatás korrekció
PORNCL	Agyag neutron porozitása
PORNMA	Mátrix komponens neutron porozitása
PORNMF	Izapfiltrátum neutron porozitása
RCL	Agyag fajlagos ellenállása
RMF	Izapfiltrátum fajlagos ellenállása
RW	Rétegvíz fajlagos ellenállása réteghőmérsékleten
SCHB	Szénhidrogén koefficiens
TMF	Referencia hőmérséklet RMF számára
UPEMF	Izapfiltrátum térfogati fotoelektr. abszorpciós index
UPECH	Szénhidrogén térfogati fotoelektr. abszorpciós index
UPECL	Agyag térfogati fotoelektr. abszorpciós index
UPEMA	Mátrix térfogati fotoelektr. abszorpciós index

4.3. Karbonát-kvarc (komplex) tárolók intervallum inverziós kiértékelése

Az alábbi terepi példa egy magyarországi szénhidrogén-kutató fúrás (WELL-LIME) adatainak intervallum inverziós kiértékelését mutatja be. A vizsgált olajtároló kőzetösszletet az alábbi kőzetmátrix komponensek alkotják: $VMA_1=VSD$ (homok), $VMA_2=VLM$ (mészkö), $VMA_3=VALE$ (aleurit). Emellett ismeretlenek a POR (teljes porozitás), SX0 és SW a kisépért- és az érintetlen zóna víztelítettsége, VCL az agyagtartalom. Rétegenként homogén földtani modellt feltételezve egységugrás-függvényekből felépített sorfejtésen alapuló intervallum inverziós algoritmust terveztünk ezen ismeretlenek meghatározása céljából. A vizsgált szelvényszakasz mélységtartománya: 2300-2340m. A mért szelvényanyag az 26. ábrán látható, melyre 0.1m mintavételi távolság vonatkozik.

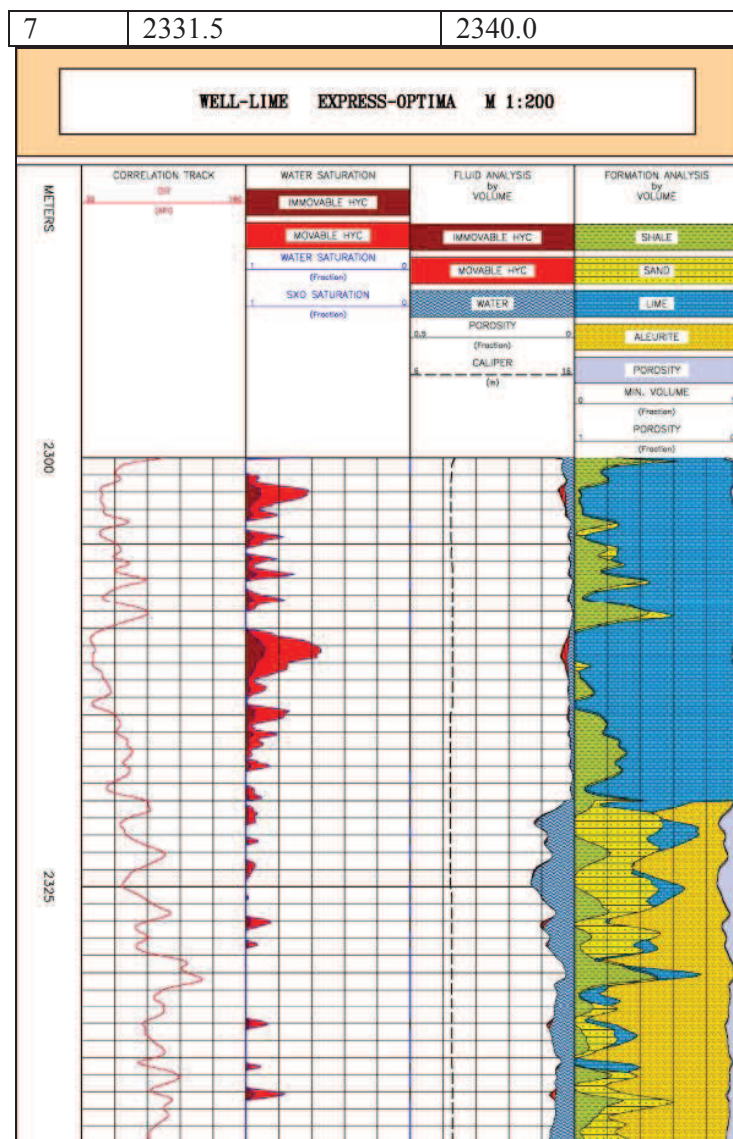


26. ábra: WELL-LIME fúrás karotázs szelvényei

A fenti szelvényanyagból képzett input inverziós adatrendszer a következő szelvényadatokat tartalmazta: GR (természetes gamma), RD (érintetlen zóna fajlagos ellenállás), CN (kompenzált neutron), AC (akusztikus terjedési idő), ZDEN (sűrűség) és PE (fotoelektromos abszorpciós index). Ezen adatok elvi értékét az (1),(2),(3),(4),(5),(7) válasz egyenletek segítségével számítottuk. A kiértékelést két lépésben kellett végrehajtani, ugyanis a vizsgált mélységintervallum két tárolózóna határán helyezkedik el. A zónahatár felett 4 rétegesnek feltételeztük az összletet (2300-2320m), ahol agyag, homok és mészkő komponenseket tekintettük ismeretlennek. A zónahatár alatt a fenti komponensek mellett megjelent az aleurit is (2320.1-2340m). Az intervallum inverziós kiértékelést korábban megelőzte a MOL által OPTIMA pontonkénti inverziós módszerrel végzett értelmezés (ld. 27. ábra). Ez alapján a rétegösszletet 7 rétegre bontottuk, amit a litológiai szelvények alapján is reálisnak vehetünk. A réteghatár-koordinátákat a 22. táblázat tartalmazza.

22. táblázat: Az alkalmazott réteghatár-koordináták

Réteg	Felső koordináta [m]	Alsó koordináta [m]
1	2300.0	2303.5
2	2303.6	2310.0
3	2310.1	2314.5
4	2314.6	2320.0
5	2320.1	2329.0
6	2329.1	2331.4



27. ábra: OPTIMA pontonkénti inverziós eredmények

A zónahatár a 4. és az 5. réteg között húzódik (ld. 2. táblázat piros vonal). A felső 4 réteget I-es zónának, az alsó 3 réteget pedig II-es zónának neveztük el. Az (1)-(7) válasz-egyenletekben szereplő konstans értékű zónaparamétereket a két zónára külön-külön a 23. táblázatban adtuk meg. A 21. táblázatban szereplő konstansokon kívül ugyanitt részletezzük a mátrixjellemzőket, ahol az *SD (homok), *LM (mészkő), és *ALE (aleurit) jelöli.

23. táblázat: WELL-LIME fúrás válaszegyenlet konstansai

Zónaparaméter	I. zóna	II. zóna	Mértékegység
GRMF	0	0	API
GRCH	0	0	
GRSD	24.0	31.0	
GRCL	80.0	110.0	
GRLM	28.0	28.0	
GRALE	-	60.0	p.u./100
PORNMF	1.0	1.0	
PORNSD	-0.04	-0.04	
PORNLM	0	0	
PORNCL	0.15	0.21	

PORNALE	-	0.05	
ATMF	189.0	189.0	μs/f
ATSD	55.5	55.5	
ATLM	47.5	47.5	
ATCL	70.0	90.0	
ATALE	-	55.0	
ATO	238.0	238.0	
ATG	305.0	305.0	
PMF	0.0001	0.0001	10 ⁶ ppm
DEMF	1.0	1.0	g/cm ³
DESD	2.65	2.65	
DELM	2.71	2.71	
DECL	2.75	2.70	
DEALE	-	2.76	
DECH	0.70	0.84	
UPEMF	0.46	0.46	barn/cm ³
UPECH	1.0	1.0	
UPECL	11.20	11.20	
UPELM	13.69	13.69	
UPEALE	-	9.60	
RCL	8.0	10.0	ohmm
RMF	0.189	0.189	
RW	0.040	0.18	
BN	2.0	2.0	-
BM	2.1	2.1	
BA	1.0	1.0	

Az inverzió ismeretlenjeinek a számát praktikusán csökkentettük. A nemzetközi gyakorlatban jól bevált segédegyenletet alkalmaztunk az SX0 (kisekert zóna víztelítettségének) meghatározásához

$$SX0(z) = SW(z)^{SWEXP},$$

ahol SWEXP=0.2 értékkel számoltunk (z[m]: mélység). E mellett az anyagmérleg-egyenletet felhasználva az agyagtartalmat a többi fajlagos térfogatjellemző mennyiség segítségével determinisztikusan számítottuk

$$VCL(z) = 1 - POR(z) - VSD(z) - VLM(z) - VALE(z).$$

Ezzel rétegenként 2 modellparaméterrel (SX0, VCL) csökkentettük az ismeretlenek számát, mely tovább stabilizálta az algoritmust. A túlhatározottság nagymértékű volt, a teljes mélységintervallumon N=2406 adattal szemben M=31 réteggeljellemző petrofizikai ismeretlen állt. Az alkalmazott startmodellt a 24. táblázatban tüntettük fel.

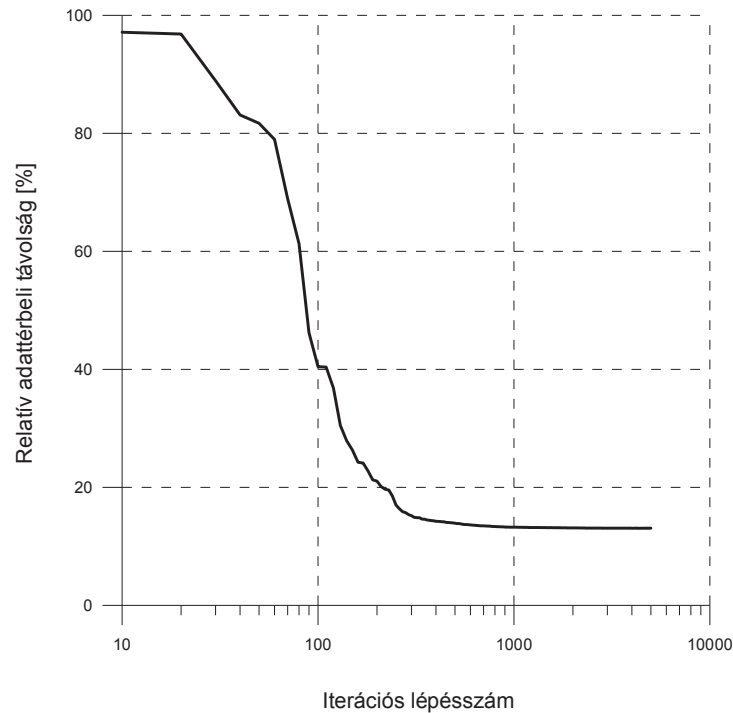
24. táblázat: Inverziós startmodell

RÉTEG	POR	VSD	VLM	VALE	SW
1	0.05	0.02	0.78	0	0.80
2	0.05	0.02	0.78	0	1.00
3	0.03	0.02	0.85	0	0.70
4	0.03	0.02	0.85	0	1.00
5	0.05	0.30	0.05	0.40	0.90
6					
7					

Az intervallum inverziós algoritmus meglehetősen jó startmodell-függetlenséggel bíró Simulated Annealing eljárás (MSA-I) volt. Az alkalmazott folyamatjellemző paraméterek: $T_0=0.01$ (kezdeti hőmérséklet), $b_{max}=0.01$ (maximális paraméterváltoztatás), $eps=0.85$ (b_{max} csökkentési tényező 200 iterációs lépésenként), $q=5000$ (iterációs lépésszám). Korlátozásként megtiltottuk, hogy a modellparaméterek kiessenek a $[0,1]$ intervallumból. Az MSA-I eljárás egyenletes konvergenciáját a 28. ábra jól mutatja. Az adattérbeli távolságot itt az alábbi módon definiáltuk

$$D_d^{(int)} = \sqrt{\frac{1}{P \cdot K} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \left(\frac{d_{pk}^{(m)} - d_{pk}^{(sz)}}{d_{pk}^{(m)}} \right)^2} \cdot 100 [\%]$$

ahol $d_{pk}^{(m)}, d_{pk}^{(sz)}$ a p-edik mélységpontbeli k-adik mért és számított szelvényadat.



28. ábra: Az MSA-I eljárás konvergenciája

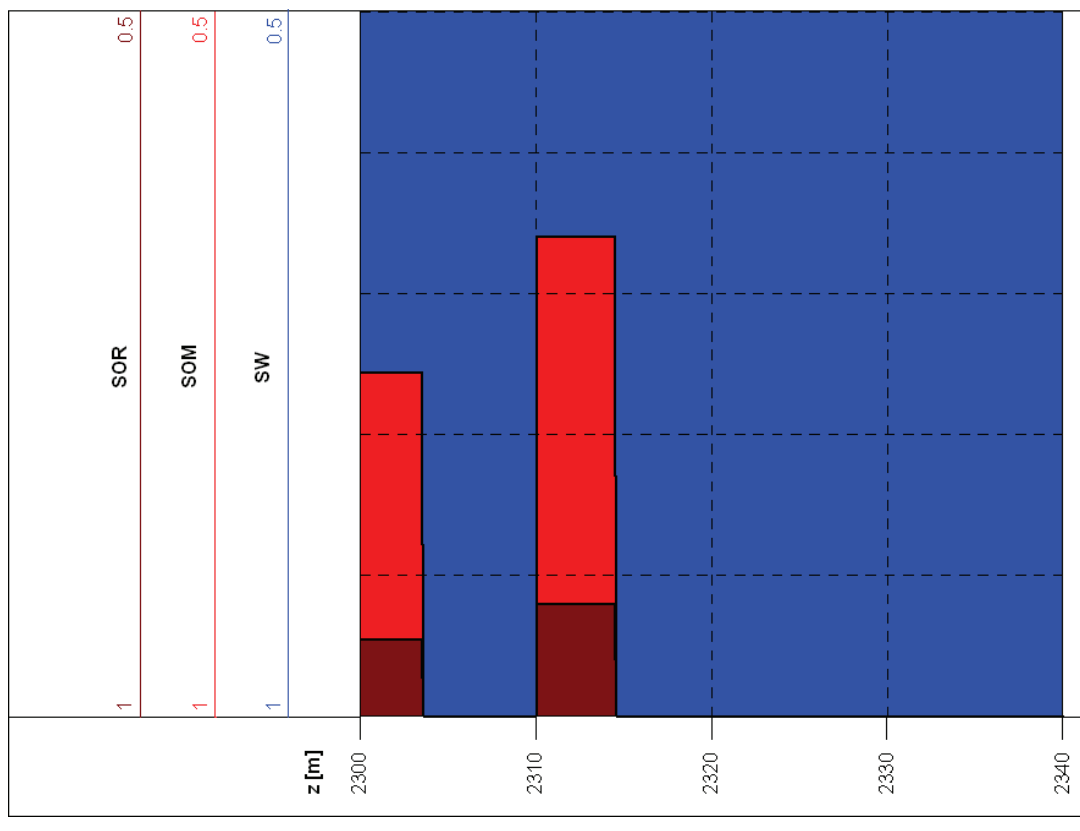
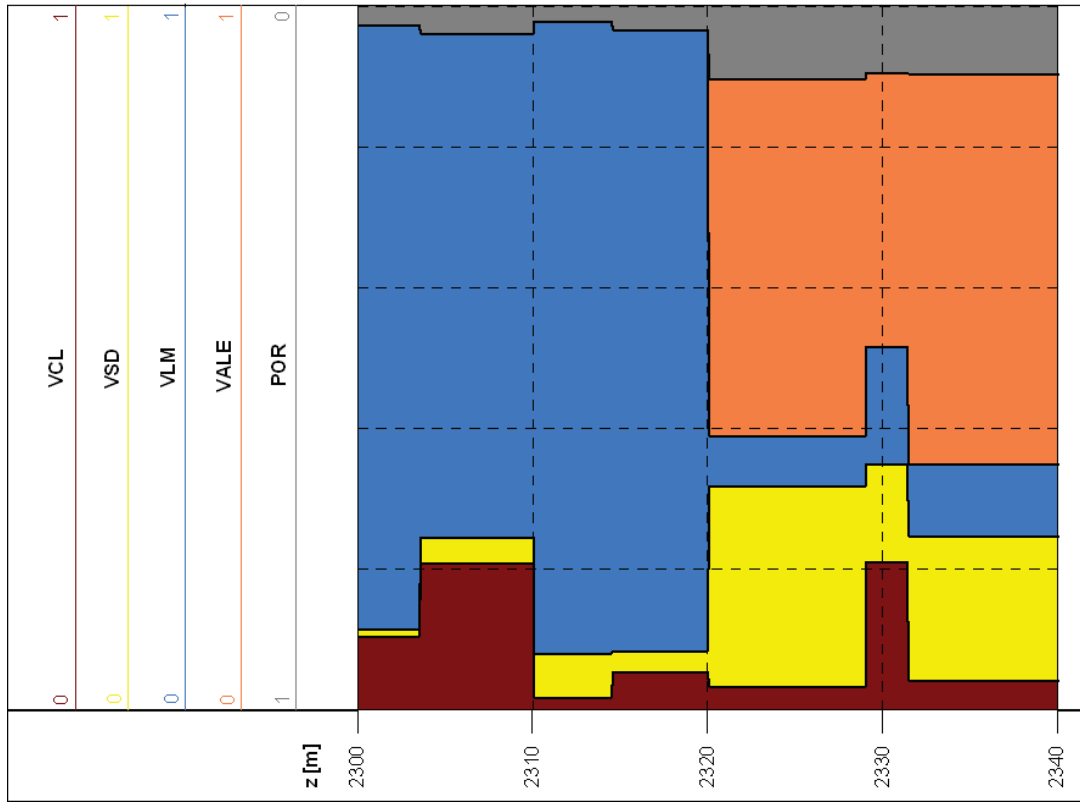
Az eljárás $t=9$ min futási idő alatt találta meg az optimumot, amely $D_d=13.08\%$ adattávolságnál stabilizálódott. Tekintsük az MSA-I módszerrel kapott eredmény-szelvényeket. A29. ábrán az eredménymodell szelvényei szerepelnek, valamint két további, a szénhidrogén-készlet meghatározás szempontjából alapvető jelentőségű származtatott paraméter-szelvény

$$SOM(z) = SX0(z) - SW(z)$$

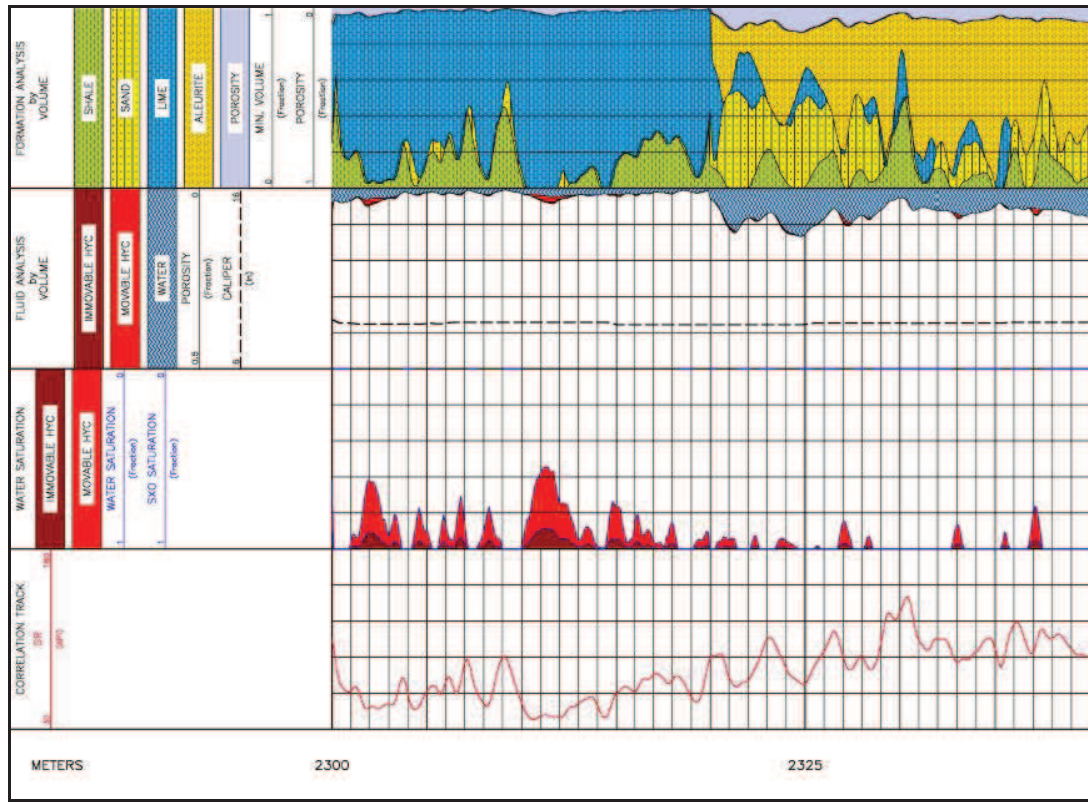
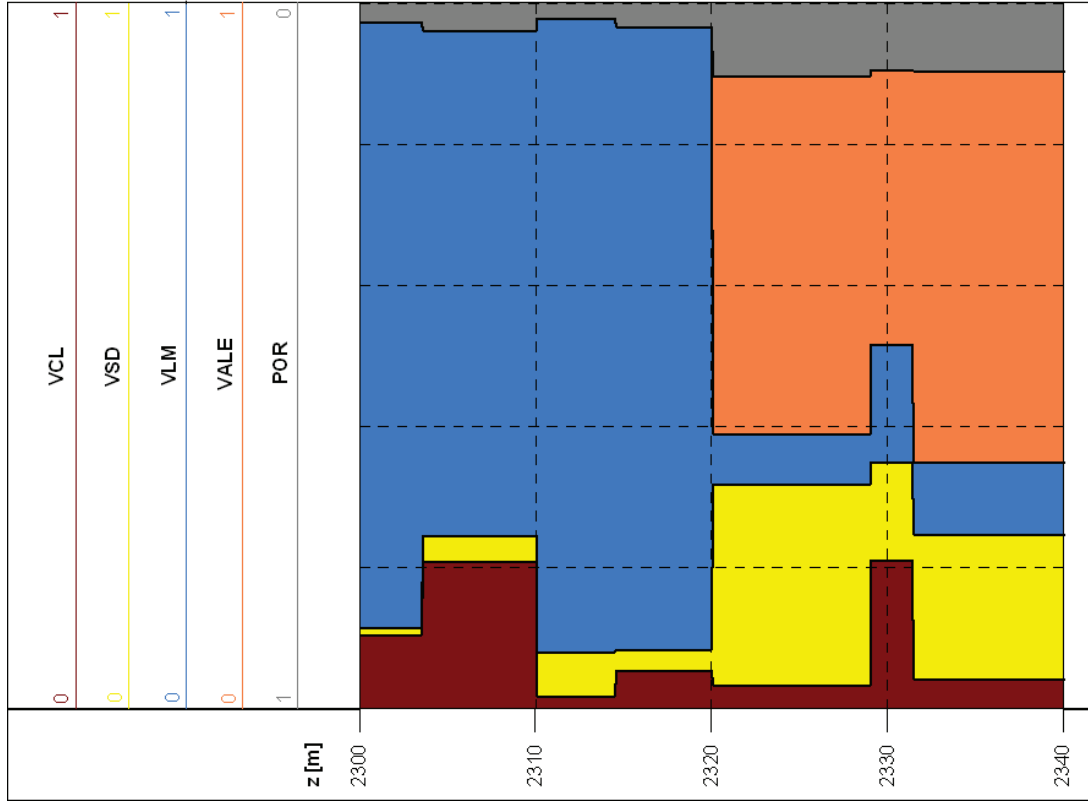
$$SOR(z) = 1 - SX0(z)$$

ahol SOM: a mozgásképes-, SOR: a redukálhatatlan olajteltetés. Hasonlítsuk össze az MSA-I és az OPTIMA eredményeit (ld. 30. és 31. ábra). Látható, hogy a rétegek szépen elkülönülnek egymástól és a közetmátrix részarányok jó korrelációt mutatnak. Az I-es zónában dominál a mészkő, a II-esben megjelenik az aleurit. A porozitás értékek is jó egyezést mutatnak. Az I-es zóna első és harmadik rétege olajtároló. Itt a kitermelhető és a redukálhatatlan szénhidrogén mennyisége jó egyezést mutat. Egyetlen különbség, hogy az

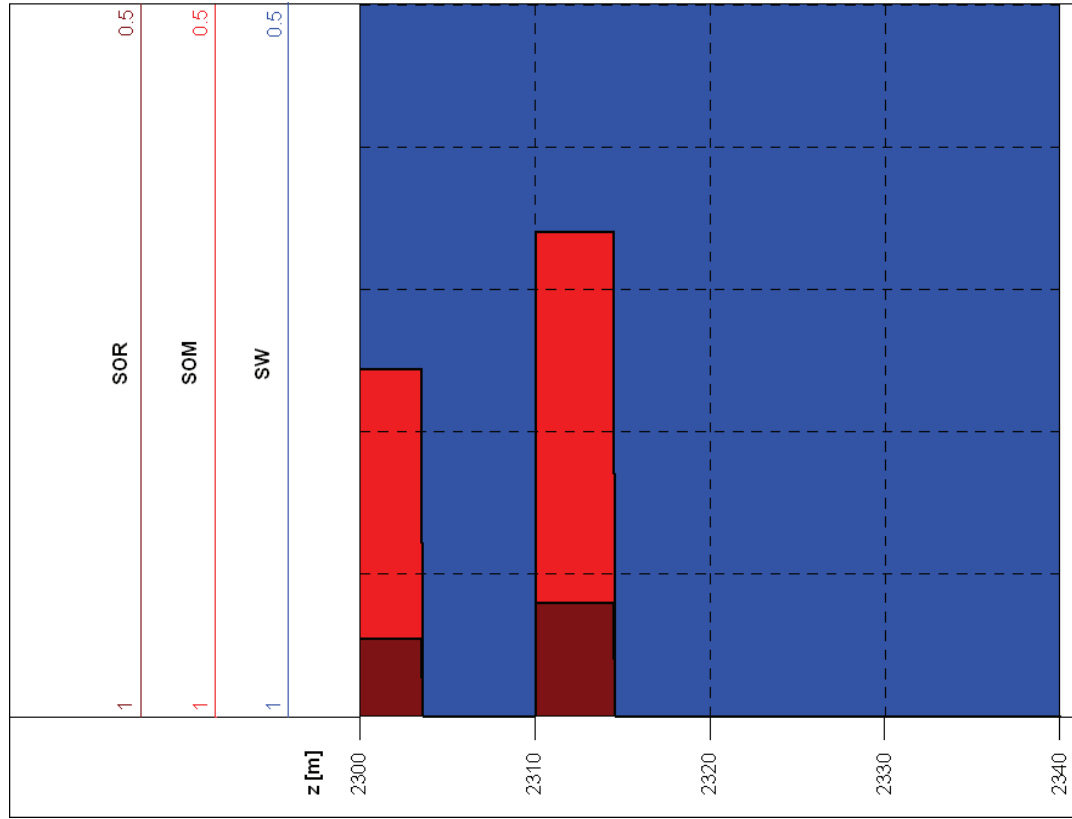
MSA-I módszer a II. zónában az adatokból nem tudott szénhidrogén-tárolásra alkalmas réteget találni. Ennek oka lehet a választott rétegenként homogén földtani modell. Rétegen belül az eljárás átlagol. Javulást esetleg a rétegen belüli inhomogenitást kihasználó fejlettebb intervallum inverziós algoritmusok alkalmazásával érhetünk el. Azonban ennek használata a gyors mélységváltozást mutató petrofizikai paraméterek (=sok ismeretlen=esetleg instabil inverzió) nem volt indokolt. A rétegvastagságok ismeretlenként kezelése pedig a két zónát külön-külön jellemző két válaszegyenlet-rendszeren alapuló direkt feladat miatt nem volt kivitelezhető. Végül az akusztikus szelvényből számított porozitást (PORAT) felhasználtuk a másodlagos porozitás (POR2) számítására: $POR2=PORT-PORAT$ formula alapján, ahol PORT az inverzióval számított teljes porozitás (ld. 32. ábra.).



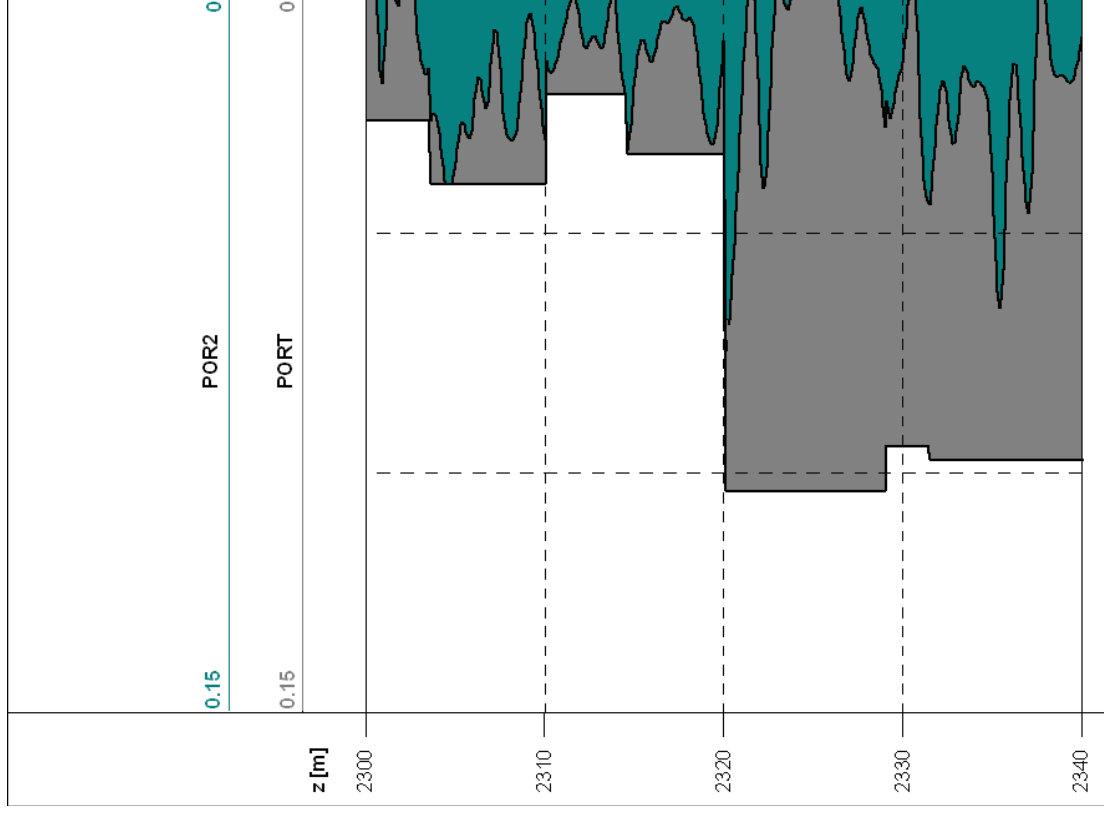
29. ábra: WELL-LIME fűrés MSA-I inverziós eredménye



30. ábra: WELL-LIME fúrás OPTIMA és MSA-I (közösszvetélel) kiértékelése



31. ábra: WELL-LIME fűrés OPTIMA és MSA-I (szaturáció) kiértékelése



32. ábra: A másodlagos és teljes porozitás szelvény

4.4. Metamorf (komplex) tárolók intervallum inverziós kiértékelése

A WELL-META szénhidrogén-kutató fúrásban mért szelvényadatok kiértékelését is az MSA-I inverziós eljárással végeztük. A vizsgált komplex gáztároló kőzetösszetben az alábbi ismeretlenek meghatározását tűztük ki célul: POR (teljes porozitás), SX0 és SW a kispert- és az érintetlen zóna víztelítettsége, $VMA_1=VSD$ (homok fajlagos térfogata), $VMA_2=VKF$ (káliumföldpát fajlagos térfogata), $VMA_3=VNAF$ (nátriumföldpát fajlagos térfogata), $VMA_4=VCS$ (csillám fajlagos térfogata), $VMA_5=VAMF$ (amfibolit fajlagos térfogata). Ugyancsak rétegenként homogén földtani modellt feltételezve egységugrás-függvényekből felépített sorfejtésen alapuló intervallum inverziós algoritmust terveztünk ezen ismeretlenek meghatározása céljából. A rétegbeli 8 ismeretlenből kettőt (SX0, VAMF) determinisztikusan is meghatározhatunk az alábbi formulák alapján:

$$SX0(z) = SW(z)^{SWEXP},$$

$$VAMF(z) = 1 - POR(z) - VSD(z) - VKF(z) - VNAF(z) - VCS(z),$$

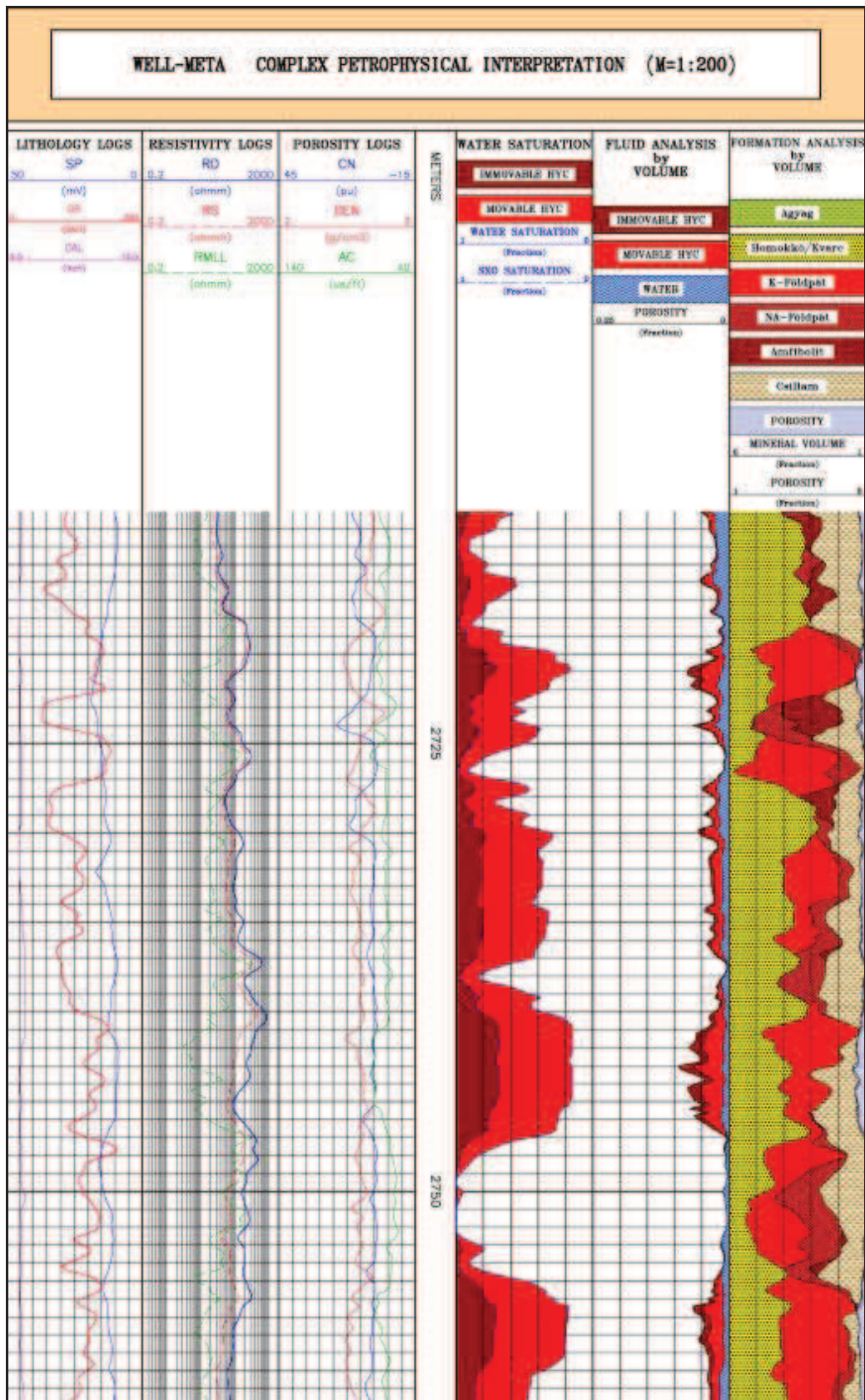
ahol SWEXP=0.22 értékkel számoltunk (z[m]: mélység). A vizsgált mélységintervallum: 2712-2762m, ahol a szondák mintavételi távolsága 0.2m volt. A mérési szelvények a 33. ábra első 3 track-jén láthatók. Az inverzió során a következő bemenő szelvényeket vettük figyelembe: GR (természetes gamma), RD (mélybehatolású fajlagos ellenállás), RMLL (mikrolaterolog), CN (kompenzált neutron), AC (akusztikus terjedési idő), DEN (sűrűség). Ezen adatok elvi értékét az (1),(2),(3),(5),(6),(7) válaszgyenletek felhasználásával határoztuk meg. A szelvények pontonkénti inverziós kiértékelését a MOL-nál korábban elvégezték. Az OPTIMA módszerrel kapott eredményszelvényeket a 33. ábra 4-6 track-jén figyelhetjük meg. A mérési szelvényeket felhasználva a kőzet összletet 6 rétegre bontottuk (ld. 25.táblázat). A 6 rétegben összesen M=36 modellparaméter (ismeretlen) szerepel, szemben a teljes intervallumon mért N=1506 számú szelvényadattal. Az inverz feladat nagymértékben túlhatározott volt, azonban a szelvények gyors vertikális váltakozása és a relatíve sok kőzetjellemző miatt a rétegvastagságok meghatározása bizonytalan. Ezért a réteghatár-koordinátákat fixáltuk.

25. táblázat: Az alkalmazott réteghatár-koordináták

Réteg	Felső koordináta [m]	Alsó koordináta [m]
1	2712.0	2718.4
2	2718.6	2727.2
3	2727.4	2738.0
4	2738.2	2748.2
5	2748.4	2754.4
6	2754.6	2762.0

Az (14)-(20) válaszgyenletekben szereplő konstansokat a 23. táblázatban láthatjuk. A 21. táblázatban szereplő konstansokon kívül itt részletezzük a kőzetmátrix jellemzőket, ahol az *SD (homok), *KF (káliumföldpát), *NAF (nátriumföldpát), *CS (csillám) és *AMF (amfibolit) jelölések érvényesek.

Az inverziót MSA-I eljárással végeztük el, melynek startmodelljét a 27. táblázatban láthatjuk. Az alkalmazott folyamatjellemző paraméterek: $T_0=0.01$ (kezdeti hőmérséklet), $b_{max}=0.005$ (maximális paraméterváltoztatás), $\epsilon=0.85$ (b_{max} csökkentési tényező 300 iterációs lépésenként), $q=5000$ (iterációs lépésszám). A konvergencia alakulását a 34. ábrán láthatjuk. Az optimumot $t=12$ min után $D_d=16.99\%$ adattávolság mellett kaptuk meg.



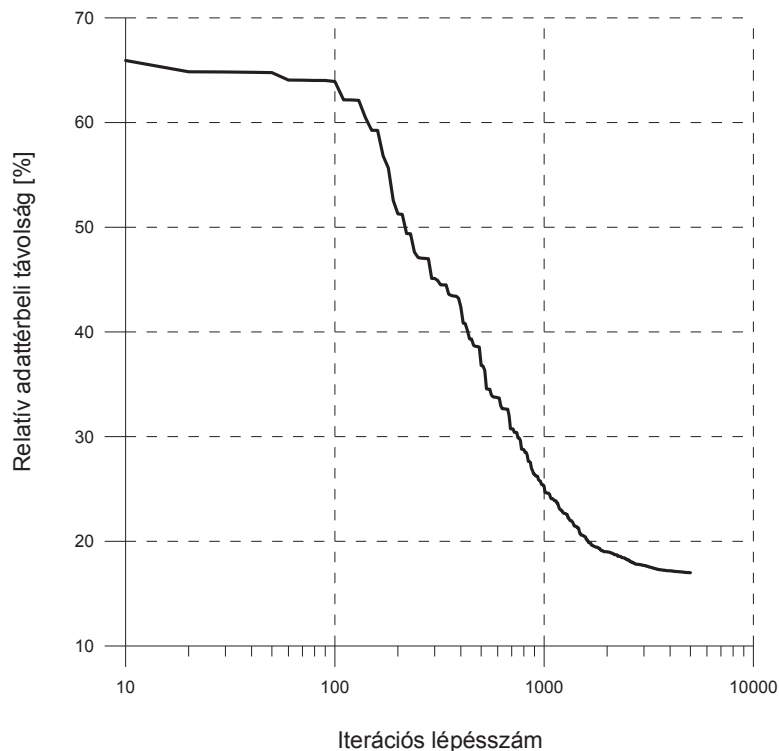
33. ábra: WELL-META fúrás karotázs szelvényei és OPTIMA értelmezése

26. táblázat: WELL-META fúrás válaszegyenlet konstansai

Zónaparaméter	Konstans	Mértékegység
GRMF	0	API
GRCH	0	
GRSD	20.0	
GRKF	180.0	
GRNAF	5.0	
GRCS	220.0	
GRAMF	35.0	
PORNMF	1.0	p.u./100
PORNSD	-0.04	
PORNKF	0	
PORNNAF	-0.02	
PORNCS	0.17	
PORNAMF	0.07	
ATMF	189.0	μs/f
ATSD	54.0	
ATKF	51.0	
ATNAF	50.0	
ATCS	52.0	
ATAMF	48.0	
ATO	238.0	
ATG	305.0	
PMF	0.0001	10 ⁶ ppm
DEMF	1.00	g/cm ³
DESD	2.65	
DEKF	2.62	
DENAF	2.45	
DECS	2.85	
DEAMF	2.95	
DECH	0.20	
RSH (deep)	6.0	ohmm
RSH (shallow)	3.0	
RMF	0.189	
RW	0.120	
BN	2.0	-
BM	2.2	
BA	1.0	

27. táblázat: Inverziós startmodell

RÉTEG	POR	VSD	VKF	VNAF	VCS	SW
1	0.05	0.40	0.20	0.05	0.25	0.60
2	0.05	0.20	0.60	0.05	0.05	0.60
3	0.05	0.40	0.20	0.05	0.25	0.60
4						
5						
6						



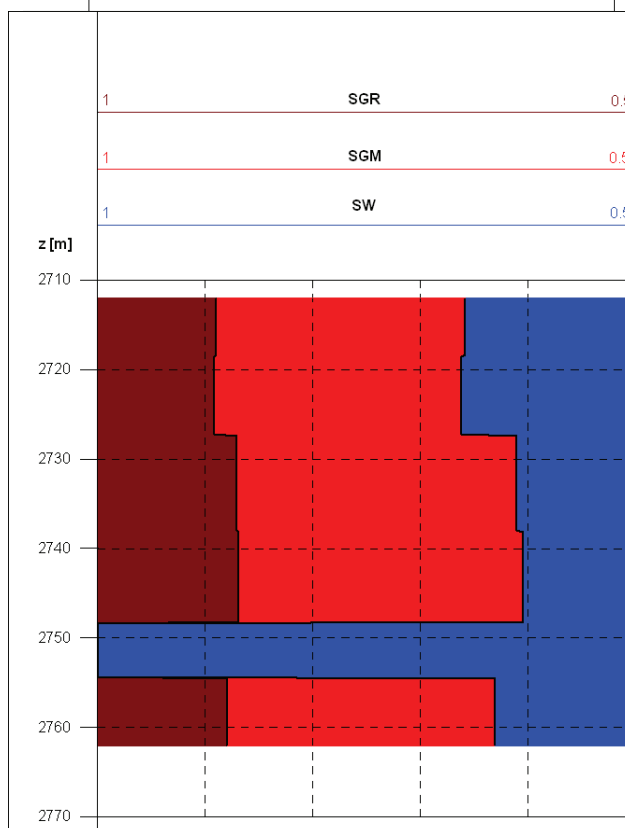
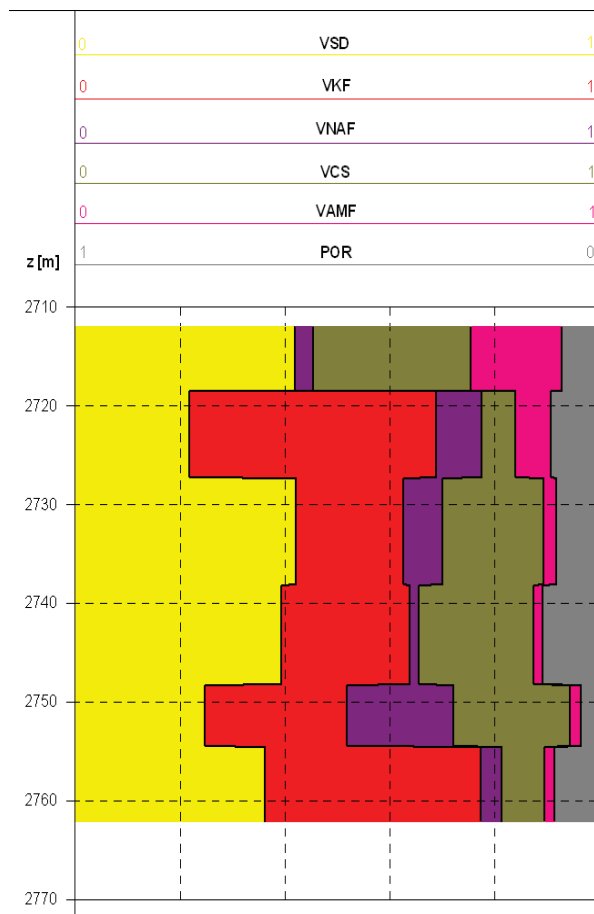
34. ábra: Az MSA-I eljárás konvergenciája

Az MSA-I módszerrel meghatározott petrofizikai rétegjellemzők szelvényeit a 35. ábra mutatja. Az inverzióval valamint a determinisztikusan meghatározott modellparaméterek mellett további két származtatott paraméter-szelvényt is ábrázoltunk

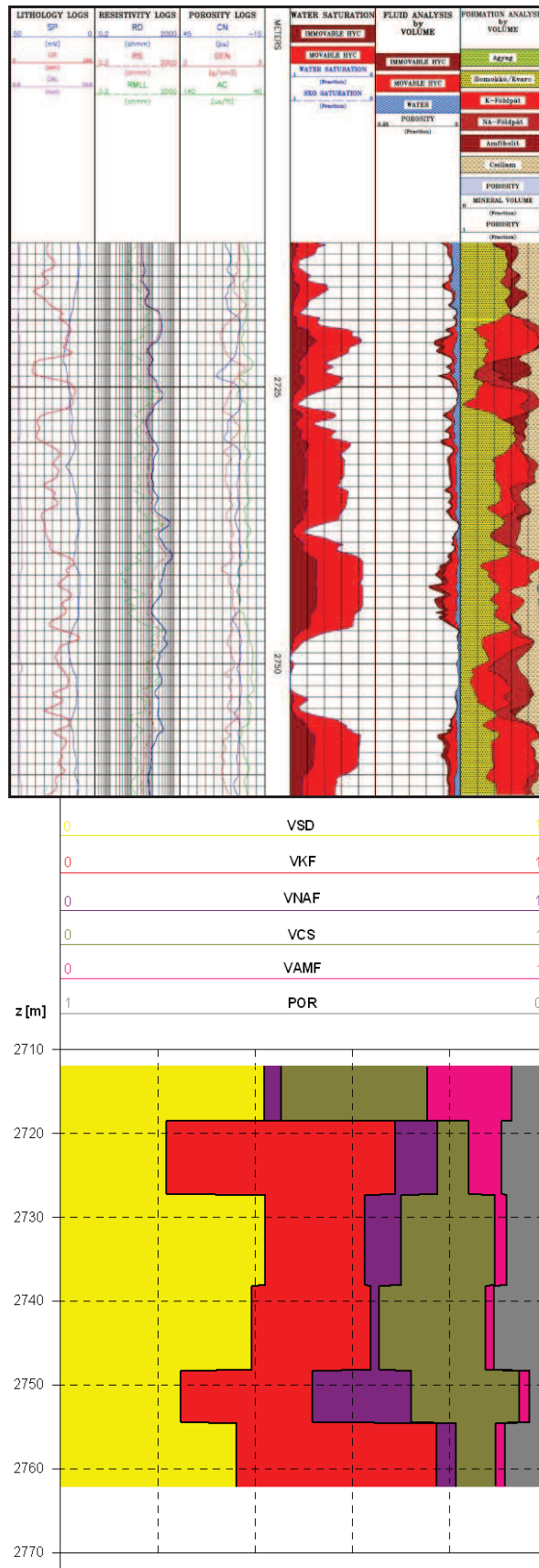
$$SGM(z) = SX0(z) - SW(z)$$

$$SGR(z) = 1 - SX0(z),$$

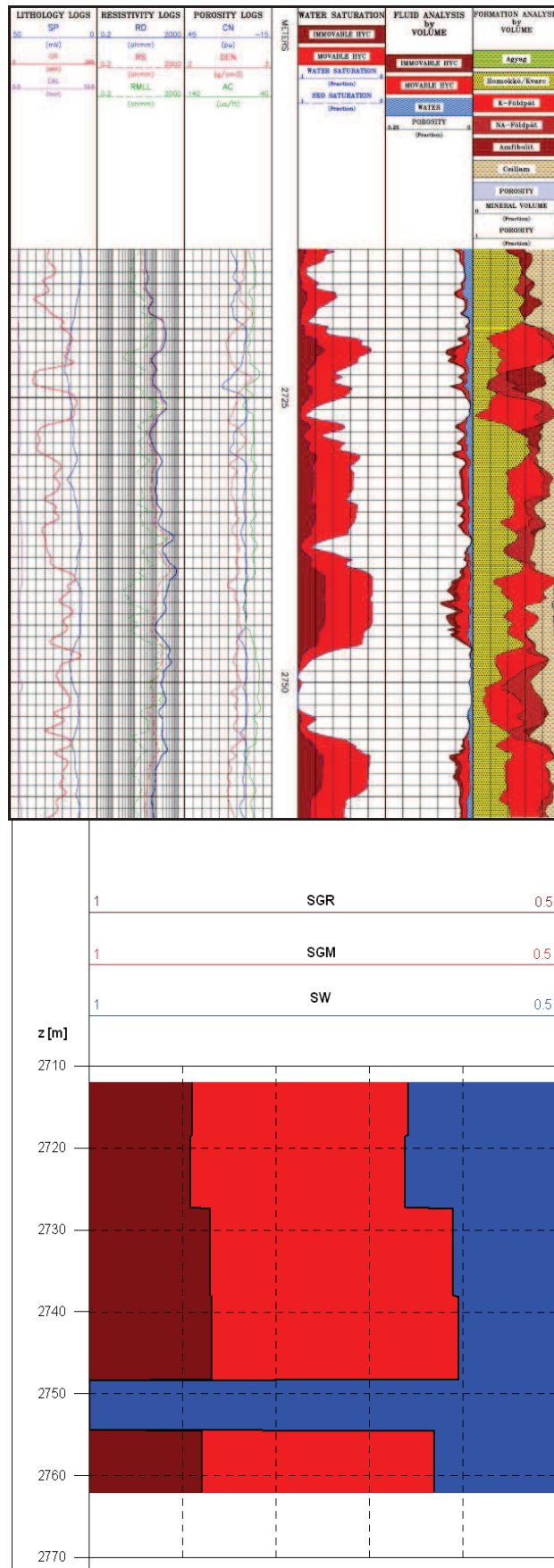
ahol SGM: a mozgásképes-, SGR: a redukálhatatlan gáztelítettség. Összehasonlítva az intervallum inverziós eredményeket az OPTIMA-val kapottakkal, megállapíthatjuk, hogy igen jó az egyezés. A gáztároló zónák mélységei azonosak, melyekben szénhidrogén jelenléte kimutatható és a telítettségértékek is jó közelítéssel megegyeznek (ld. 36. és 37. ábra). A 38. ábrán a számított teljes porozitást bontottuk fel másodlagos és szemcseközi porozitásra az akusztikus szelvény alapján. Mindegyik szelvényen látható, hogy a rétegek szépen elkülönülnek, a kőzetmátrix részarányok és a porozitás is azonos mértékű. Megállapítható, hogy a karotázs szelvényadatok gyors vertikális változása ellenére a rétegenként homogén földtani modell a valóságnak megfelelő megoldást szolgáltatott. A kapott adattávolság érték elfogadható, hiszen figyelembe kell venni, hogy a bemenő szelvények zajosak, valamint a direkt feladatban rejlő modellhibák jelentős hatást gyakorolnak az inverziós eredmények minőségére. Kedvező, hogy a „sok” kőzetmátrix (ásványi) komponens ellenére sem jelentkezik az ekvivalencia problémája. Ezt nyilván az intervallum inverzió jelentős túlhatározottsága (sok információ együttes feldolgozása ugyanarra a rétegre nézve) magyarázza. Ennek veszélye a pontonkénti inverzióval azonban jelentkezhet, ahol a túlhatározottság csak kis mértékű és előfordulhatnak közel hasonló zónaparaméter értékek egy-egy ásványi komponensnél. Ebből a szempontból, valamint pontossági és stabilitási okokból indokoltabb az intervallum inverzió használata mind egyszerű, mind pedig komplex összetételű szénhidrogén-tárolók kiértékelése során.



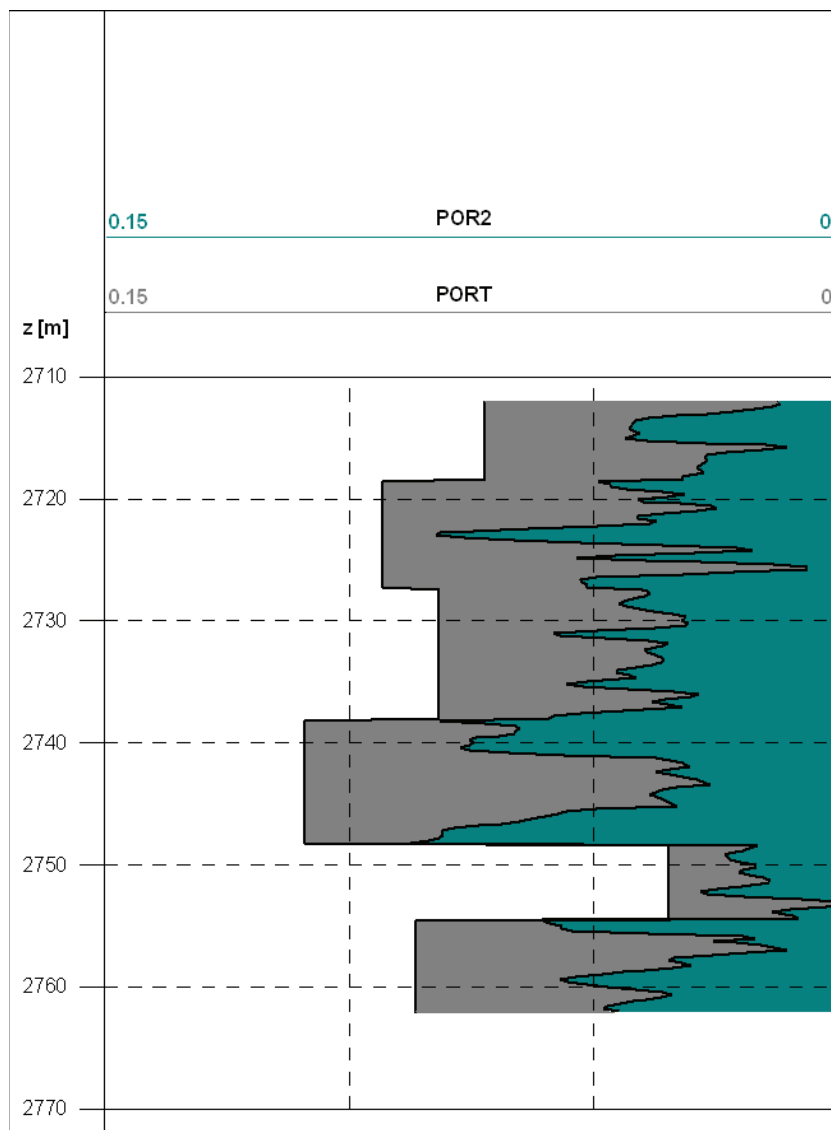
35. ábra: WELL-META fúrás MSA-I inverziós eredménye



36. ábra: WELL-META fúrás OPTIMA és MSA-I (kőzetösszetétel) kiértékelése



37. ábra: WELL-META fúrás OPTIMA és MSA-I (szaturáció) kiértékelése



38. ábra: A másodlagos és teljes porozitás szelvény

II. AZ INTERVALLUM INVERZIÓS MÓDSZER ALKALMAZÁSA CH-TÁROLÓ SZERKEZETEK MORFOLÓGIÁJÁNAK VIZSGÁLATÁRA (2.- 5. kutatási év)

Az előzőekben bevezetett intervallum inverziós módszer új lehetőségeket teremt a réteghatár koordináták meghatározásában. Mivel az intervallum inverziós eljárás egyetlen (interpretációs/inverziós) lépésben a teljes (és nem csupán egy ponton mért) adatrendszerrel dolgozza fel, megfelelő algoritmus kifejlesztésével lehetővé válik a réteghatárok meghatározása az inverzió keretében (vagyis ugyanazon lépésben, mint a petrofizikai modell paraméterek mélységfüggvénye). Ez újszerű előny, amit csupán az intervallum inverziós kiértékelési mód alkalmazásával érhetünk el. A réteghatár koordináták inverziós előállítására új lehetőséget rejt a CH tárolók morfológiájának meghatározása terén is. Ha ui. több mélyfúrás adatainak feldolgozását egyetlen inverziós eljárásban dolgozzuk fel, a réteghatár koordináták a fúrások által kijelölt területen a réteghatárok laterális változása követhetővé válik megfelelő algoritmusmal. A következőkben az ide vonatkozó módszerfejlesztési eredményeket foglaljuk össze.

1. A RÉTEGHATÁR MÉLYSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA INTERVALLUM INVERZIÓVAL

A mélyfúrési geofizikai adatok inverziója során a lokális válaszgyenleteket korábban kiterjesztettük a szelvényezés egy tetszőleges mélységintervallumára. Ekkor a petrofizikai paramétereket, mint a mélység függvényeit számítottuk a direkt feladat során. A mélységfüggő válaszgyenletek paramétereinek diszkrétizálását egységugrás függvényekből felépített, rétegenként homogén földtani modell, majd rétegenként polinomokkal közelített inhomogén modell esetén vizsgáltuk. Ezt a módszert intervallum inverziós eljárásnak neveztük el. A módszer jelentős túlhatározottsága révén (nagyságrenddel több a szelvényadat, mint a meghatározni kívánt közetfizikai ismeretlenek száma) lehetővé teszi újabb ismeretlenek inverziós meghatározását is. E keretek között a pontonkénti inverzió problémakörében ismertnek tekintett rétegvastagságok ismeretlen paraméterként kezelhetők, és a réteghatárok mélységkoordinátái meghatározhatók. Mivel a rétegvastagságokkal az ismeretlen modellvektor elemeinek a száma csak kismértékben növekszik, az inverz feladat jelentősen túlhatározott marad.

1.1. A réteghatár-meghatározás algoritmusának és intervallum inverziós leírása

Az intervallum inverziós eljárásban intervallumon értelmezett válaszgyenleteket szükséges definiálnunk, mellyel a lokális válaszfüggvények rendszerét kiterjeszthetjük a teljes invertálandó mélységintervallumra. Ennek keretében először a petrofizikai paramétereket, mint a mélység függvényeit írjuk fel. Az intervallumon értelmezett (mélységfüggő) válaszgyenletből származtatott elvi szelvényadatok DOBRÓKA (1995) alapján

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

ahol $\varphi_k(z)$ az k -edik számított szelvényadat, $m_i(z)$ az i -edik közetfizikai paraméter z mélység-koordinátához tartozó értéke. A fenti válaszgyenletben a modellparaméterek a mélység folytonos függvényeiként jelennek meg, melyek pontbeli értékét diszkrétizálással határozzuk meg. A mélységfüggő válaszgyenletek paramétereinek diszkrétizálására sorfejtési eljárást alkalmaztunk.

A sorfejtéses intervallum inverziós eljárás keretében ismert bázisfüggvény-rendszerek segítségével diszkrétizáljuk a petrofizikai paramétereket. A bázisfüggvények típusa szabadon megválasztható, és az adott földtani szituációhoz illeszthető. Tekintsük a fenti mélységfüggő válaszegyenletben szereplő i -edik rétegjellemző paraméter általános sorfejtett alakját

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

ahol $B_q^{(i)}$ az i -edik petrofizikai paraméter q -adik sorfejtési együtthatója (Q_i a sorfejtésben szereplő tagok száma), ψ_q pedig a q -adik ismert mélységfüggő bázisfüggvényt jelöli.

A réteghatár mélysége (réteghatár-koordináta) bevezetése az intervallum inverziós eljárásba a következőképpen történik. Vegyük fel a fenti sorfejtésben szereplő bázisfüggvények paraméterei közé R számú réteg Z_1, \dots, Z_R réteghatár-koordinátáit

$$m_i(z) = \sum_{q=1}^{K_i} B_q^{(i)} \psi_q(z, Z_1, Z_2, \dots, Z_R),$$

mellyel

$$\varphi^{(s)}(z) = g^{(s)}(z, B_1^{(1)}, \dots, B_{K_1}^{(1)}, B_1^{(2)}, \dots, B_{K_2}^{(2)}, \dots, B_1^{(M)}, \dots, B_{K_M}^{(M)}, Z_1, Z_2, \dots, Z_R)$$

mélységfüggő válaszegyenletet kapjuk, továbbá

$$\vec{m} = [B_1^{(1)}, \dots, B_{K_1}^{(1)}, B_1^{(2)}, \dots, B_{K_2}^{(2)}, \dots, B_1^{(M)}, \dots, B_{K_M}^{(M)}, H_1, H_2, \dots, H_R]^T$$

M dimenziós modellvektort, melynek ismeretlenjei között megjelennek a H_1, H_2, \dots, H_R rétegvastagságok. E mennyiségek az alsó és a felső réteghatár mélységkoordinátái ismeretében könnyen meghatározhatóak. A mérési adatrendszerbe az intervallumon gyűjtött összes szelvényadat beletartozik. Ha $k=1, 2, \dots, K$ számú szelvényt mértünk, és n_k jelöli a k -ik szelvény

mélységpontjainak számát, akkor a rendelkezésre álló összes adatszám $N = \sum_{k=1}^K n_k$. A minta-

vételi köz általában 0.1m, a szelvényhossz ~500-5000m, ezért az intervallum inverziós probléma $N > M$ esetén nagymértékben túlhatározott. Az inverz feladat megoldásához foglaljuk a mért adatokat egyetlen vektorba és a számított adatvektort hasonlóan strukturáljuk

$$\vec{d}^{(m)} = [d_1^{(1)}, d_2^{(1)}, \dots, d_{n_1}^{(1)}, d_1^{(2)}, d_2^{(2)}, \dots, d_{n_2}^{(2)}, \dots, d_1^{(K)}, d_2^{(K)}, \dots, d_{n_K}^{(K)}]^T,$$

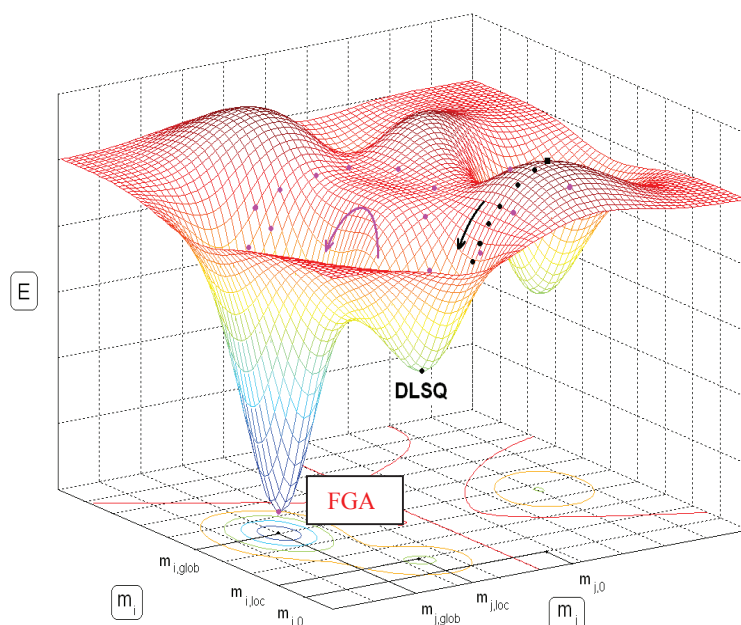
$$\vec{\varphi} = [\varphi_1^{(1)}, \varphi_2^{(1)}, \dots, \varphi_{n_1}^{(1)}, \varphi_1^{(2)}, \varphi_2^{(2)}, \dots, \varphi_{n_2}^{(2)}, \dots, \varphi_1^{(K)}, \varphi_2^{(K)}, \dots, \varphi_{n_K}^{(K)}]^T,$$

ahol $\vec{d}^{(m)}$ az egyesített mért adatvektor, és $\vec{\varphi}$ az elméleti adatok vektora az intervallum inverziós eljárásban.

Az automatikus rétegvastagság meghatározást globális optimalizációs eljárás alkalmazásával valósítottuk meg, mivel linearizált optimalizáció során a rétegvastagságok-szerinti deriváltak (relatív nagy szomszédos mélységpont távolság melletti) közelítő számítása miatt az inverziós eljárás numerikus stabilitási problémákkal küzd. Az új globális intervallum inverziós módszer a Genetikus Algoritmuson (FGA) alapul, mely az optimalizációs probléma adat-

térbeli távolságon alapuló célfüggvényének (E) az abszolút minimumát képes meghatározni (ld. 1. ábra). A réteghatár meghatározásán kívül azért is előnyös e technika alkalmazása, mert a módszerrel pontosabb paraméterbecslés valósítható meg, mint a hagyományosan alkalmazott lineáris optimalizációs módszerekkel (pl. Marquardt- algoritmus - DLSQ). (Vizsgálataink szerint jól használható a Metropolis algoritmus (Simulated Annealing) is.)

A Valós Kódolású Genetikus Algoritmussal FGA-H néven új intervallum inverziós algoritmust fejlesztettünk. Ennek elvi alapjai a következők. A Genetikus Algoritmus elnevezés a globális szélsőérték kereső eljárások egy külön családjára utal, mely az optimalizációs eljárások körében a véletlen keresést használó módszerek csoportján belül az evolúciós algoritmusok között kap helyet. Az eljárás működése biológiai analógián alapul, mely egyrészt az evolúciós fejlődést meghatározó természetes szelekciót, másrészt napjaink egyik legnagyobb ütemben fejlődő tudományágát, a genetikát használja fel. Köztudott, hogy a darwinisták szerint a természetben elsősorban azok az élőlények maradnak fenn és szaporodnak, melyek az adott körülmények között erre a legalkalmasabbnak bizonyulnak. Ezt az alap gondolatot felhasználva elsőként HOLLAND (1975) tett kísérletet az öröklődési mechanizmus leírására, először csak biológiai folyamatok kutatása céljából. Nemsokára ezt egyéb (nemcsak biológiai) mesterséges rendszerek vizsgálatára és optimalizációjára alkalmas matematikai algoritmusok követték. A mesterséges populációk egyedeinek genetikai információit – a DNS-lánc analógiája alapján – kódolt számsorozatok hordozzák, melyek egyértelműen definiálják az optimalizációs probléma paramétereit. Mesterséges öröklődéskor a genetikus algoritmus véletlen populációból választja ki a legalkalmasabb egyedeket, azok között részleges információcserét és mutációt hajt végre egy alkalmasabb generáció létrehozása érdekében. A genetikus algoritmus a populációt a kiválasztási, keresztezési és mutációs operátorok ismételt alkalmazásával iteratív úton, determinisztikus és sztochasztikus lépések sorozatán keresztül fokozatosan javítja. A geofizikai inverz probléma esetén egyed alatt a petrofizikai modellvektort, azaz a geofizikai modellt értjük. A populáció minden egyes egyedéhez rendelünk hozzá egy alkalmassági, ún. fitness értéket, mely az egyed túlélési képességeit kvantitatív módon jellemzi. Minél nagyobb ez az érték, az egyed annál nagyobb valószínűséggel és nagyobb számban szaporodik. Lényegében a fitness függvény határozza meg, hogy az egyed bekerül-e a következő generációba, vagy elpusztul. Az új generáció összetételét a reprodukció művelete alakítja ki. Általában az átmeneti (genetikus műveleteken átesett) populáció egyedeiből építjük fel az új generációt, azonban léteznek olyan algoritmusok is, melyek megtartják a régi populáció legjobb (legnagyobb fitness értékű) egyedét és kicserélik azt az átmeneti populáció legrosszabb (legkisebb fitness értékű) egyedére (elitizmus). Lényegében, a genetikus algoritmus olyan optimalizációs eljárás, mely a fitness függvény maximalizálására törekszik a legalkalmasabb modell(ek) megtartása érdekében. A geofizikai inverz feladat megoldása során tehát az alkalmassági függvényt úgy kell megválasztanunk, hogy azzal a mért és a számított geofizikai adatok eltérése mérhető legyen, és annak globális maximumához tartozzon az optimális megoldás.



1. ábra: Globális optimumkeresés genetikus algoritlussal

A geofizikai inverzióban általánosan a következő skalár jellemzi a mérési és a geofizikai modell alapján számított adatok illeszkedését

$$E^{(i)} = E(\vec{d}^{(m)} - \vec{g}(\vec{m}^{(i)})).$$

Mivel E vektornorma minimumát keressük, ezért pl. ennek reciproka képezheti a geofizikai inverz feladatban maximalizálendő fitness függvényt

$$F(\vec{m}^{(i)}) = \frac{1}{E^{(i)} + \varepsilon^2},$$

ahol ε^2 pozitív skalár. A keresési folyamat során a módszer kezdetben nagyszámú véletlen modellt generál. Az optimális modellszám optimalizálási problémák esetén általában 20-100. Mivel a véletlen keresés nem pontról-pontra történik a paramétertérben, hanem több pontot szimultán megvizsgálunk, ezzel hatékonyan el tudjuk kerülni a lokális szélsőérték helyeket. Ennek hátránya csak a futási idők tekintetében jelenik meg, ugyanis a linearizált (gradiens-alapú) módszerekkel összehasonlítva a genetikus algoritmusok lassúak. Ez a technika ugyanakkor előnyös tulajdonságokat is mutat a linearizált módszerekkel szemben, mivel nem alkalmaz linearizálást, így a deriváltak számítása szükségtelen, csak a kódokkal és a célfüggvény értékkészletével dolgozik. A genetikus algoritmus tehát nem igényel segédinformációkat –derivált- és startmodell-független–, sőt a legmodernebb algoritmusok már a modellparaméterek lebegőpontos ábrázolásával a kódolást is elkerülik. A Valós Kódolású Genetikus Algoritmus (Float-Encoded Genetic Algorithm) a gének lebegőpontos számábrázolásán alapul. Ez azt jelenti, hogy az FGA-H eljárás valós modell paraméterekkel számol közvetlenül, nem pedig kódokat választ ki, keresztesz vagy mutál. Minden modellparaméter egy-egy kijelölt (csak alulról és felülről korlátozott) valós intervallumból kerül ki, így a modelltér igen finoman felbontható. Az FGA-H eljárás hatékonysága legfőképpen a futási idők tekintetében mutatkozik meg.

Összegezve az FGA-H eljárást, tekintsük annak petrofizikai inverziós alkalmazását. Első lépésben beolvassuk a mérési adatokat, és a problémához illeszkedő fitness függvényt

definiálunk. Ezután meghatározzuk a keresési teret, majd ennek megfelelő nagyszámú véletlen modellt generálunk. A geofizikai válaszfüggvények megadásával, a direkt feladatot megoldva elvi adatrendszert számítunk. Ezek után kiválasztjuk az alkalmazni kívánt genetikus operátorokat. Inputként még a maximális generációk (iterációs lépések) számát, majd a stopkritériumot adjuk meg. Ezután a populáció egyedeinek fitness értékeit kiszámítjuk, és ez alapján a jobb egyedekből egy átmeneti populációt hozunk létre. E populációból véletlen-szerűen kiválasztunk két egyedet, melyeken genetikus információcserét hajtunk végre (keresztezés). Ezután egy újabb véletlen egyed egy génjét megváltoztatjuk. A mutáció végrehajtása után a reprodukció művelete során megalkotjuk az új generációt az előző és az átmeneti populáció egyedeiből, majd növeljük az iterációs lépésszámot. Az eddigi folyamatot addig ismétljük, míg a megadott stopkritérium nem teljesül. Az utolsó generáció maximális fitness értékkel rendelkező egyedét fogadjuk el az inverz feladat megoldásának.

1.2. A direkt feladat során alkalmazott válaszegyenletek

A továbbiakban mind az 1-D és 2-D szerkezeteken, valamint a komplex szénhidrogéntárolók vizsgálatánál az alábbi petrofizikai válaszegyenleteket használtuk fel az intervallum inverzió végrehajtása során.

A mélyfűrési geofizikai mérésekből a fűrással harántolt rétegek fontos petrofizikai jellemzőit tudjuk meghatározni (porozitás, víz- és szénhidrogén-telítettség, agyagtartalom, kőzetösszetétel, permeabilitás stb.). Mivel a petrofizikai modell paraméterei közvetlenül nem mérhető mennyiségek, ezért karotázs szondákkal mért adatokból geofizikai inverzióval származtatjuk őket. A geofizikai inverz feladat megoldása során a petrofizikai modellen ún. elméleti szonda-válaszegyenletek segítségével elvi adatokat számítunk, melyeket az inverziós eljárásban a mért adatokkal összehasonlítva becslést végzünk a petrofizikai paraméterek értékére vonatkozóan. A későbbi intervallum inverziós vizsgálatokhoz felhasznált részletes szonda-válaszegyenletek a következők:

Természetes gamma válaszfüggvény:

$$GRTH = \frac{1}{DETH} \left\{ \begin{aligned} &POR(GRMF \cdot DEMF \cdot SX0 + GRCH \cdot DECH(1 - SX0)) + \\ &+ VSH \cdot GRSH \cdot DESH + \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot GRMA_i \cdot DEMA_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Spektrális természetes gamma válaszfüggvények:

$$\begin{aligned} KTH &= \frac{1}{DETH} \left(\begin{aligned} &POR \cdot SX0 \cdot KMF \cdot DEMF + VSH \cdot KSH \cdot DESH + \\ &+ \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot KMA_i \cdot DEMA_i \end{aligned} \right) \\ UTH &= \frac{1}{DETH} \left(\begin{aligned} &POR \cdot SX0 \cdot UMF \cdot DEMF + VSH \cdot USH \cdot DESH + \\ &+ \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot UMA_i \cdot DEMA_i \end{aligned} \right) \\ THTH &= \frac{1}{DETH} \left(\begin{aligned} &POR \cdot SX0 \cdot THMF \cdot DEMF + VSH \cdot THSH \cdot DESH + \\ &+ \sum_{i=1}^n VMA_i \cdot THMA_i \cdot DEMA_i \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (2-4)$$

Neutron-porozitás válaszfüggvény:

$$\begin{aligned} \text{PORNTH} &= \text{POR}(\text{PORNMF} - \text{BCOR}(1 - \text{SX0}) - \text{BC}) + \text{VSH} \cdot \text{PORNESH} + \\ &+ \sum_{i=1}^n \text{VMA}_i \cdot \text{PORNMA}_i + \text{PORNEX} \\ \text{PORNEX} &= \left(\frac{\text{DEMA}}{2.65} \right)^2 (2 \cdot \text{POR}^2 \cdot \text{JCH} + 0.04 \cdot \text{POR})(1 - \text{JCH}) \\ \text{JCH} &= \text{PORNMF} \cdot \text{SX0} + \text{PORNESH}(1 - \text{SX0}) \\ \text{BCOR} &= \text{SCHB} \left\{ 1 - \frac{\text{B}}{\text{DEMF}(1 - \text{PMF})} \right\} \\ \text{BC} &= 2 \cdot \text{POR}(1 - \text{SX0})\text{SCHB}(1 - \text{B})\{1 - (1 - \text{SX0})(1 - \text{B})\} \\ \text{B} &= \begin{cases} 2.2 \cdot \text{DECH} & , \text{DECH} < 0.25 \\ \text{DECH} + 0.3 & , \text{DECH} \geq 0.25 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

Természetes potenciál válaszfüggvény (Saraband):

$$\text{SPTH} = \text{SPSD} + \frac{\text{POR} \cdot \text{SX0}(\text{SPSD} - \text{SPSH})}{\text{POR} \cdot \text{SX0}} + \text{PORCL} \cdot \text{VSH} \quad (6)$$

Sűrűség válaszfüggvény:

$$\begin{aligned} \text{DETH} &= \text{POR}(\text{DEMF} - 1.07 \cdot \text{SCHRB}(1 - \text{SX0})(\text{ALFA} \cdot \text{DEMF} - \text{BETA})) + \\ &+ \text{VSH} \cdot \text{DESH} + \sum_{i=1}^n \text{VMA}_i \cdot \text{DEMA}_i \\ \text{ALFA} &= 1.11 - 0.15 \cdot \text{PMF} \\ \text{BETA} &= \begin{cases} 1.24 \cdot \text{DECH} & , \text{DECH} \leq 0.333 \\ 1.11 \cdot \text{DECH} + 0.03 & , \text{DECH} > 0.333 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

Fotoelektromos abszorpciós index válaszegyenlet:

$$\begin{aligned} \text{PE} &= \frac{1.0704 \cdot \text{UPE}}{\text{DEN} + 0.1883} \\ \text{UPE} &= \text{POR} \cdot \text{SX0} \cdot \text{UPEMF} + \text{POR}(1 - \text{SX0})\text{UPECH} + \text{VSH} \cdot \text{UPESH} \\ &+ \sum_{i=1}^n \text{VMA}_i \cdot \text{UPEMA}_i \end{aligned} \quad (8)$$

Akusztikus terjedési idő válaszfüggvény (Wyllie-féle átlagidő egyenlet):

$$\begin{aligned} \text{ATTH} &= \text{POR}(\text{ATMF} \cdot \text{SX0} + \text{ATCH}(1 - \text{SX0})) + \text{VSH} \cdot \text{ATSH} + \sum_{i=1}^n \text{VMA}_i \cdot \text{ATMA}_i \\ \text{ATCH} &= 1.11\{\text{ATO}(\text{DECH} - 0.05) + \text{ATG}(0.95 - \text{DECH})\} \end{aligned} \quad (9)$$

Mikrolaterolog válaszfüggvény (Indonéziai egyenlet):

$$\frac{1}{RX0TH^{1/2}} = \left\{ \frac{VSH^{(1-VSH/2)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{BM/2}}{(BA \cdot RMF)^{1/2}} \right\} SX0^{BN/2} \quad (10)$$

Mélybehatolású laterolog válaszfüggvény (Indonéziai egyenlet):

$$\frac{1}{RTTH^{1/2}} = \left\{ \frac{VSH^{(1-VSH/2)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{BM/2}}{(BA \cdot RW)^{1/2}} \right\} SW^{BN/2} \quad (11)$$

A fenti válaszegyenletekben szereplő modellparaméterek: POR a porozitás, SX0 és SW a ki-sepert- és az érintetlen zóna víztelítettsége, VSH az agyagtartalom, VMA a közetmátrix részarány (komplex tárolóknál az egyes ásványi komponensek részarányai). Rendszerünkben a fenti mátrix fajlagos térfogatok a következők: VMA₁=VSD (homokkő), VMA₂=VLM (mész-kő), VMA₃=VDO (dolomit). A BM a cementációs kitevő, BN a szaturációs exponens és BA a tortuozitási tényező. Az adatok elvi értékei: SPTH[mV] - természetes potenciál, GRTH[API] - természetes gamma, KTH [%] - kálium spektrális gamma, UTH[ppm] - urán spektrális gamma, THTH[ppm] - tórium spektrális gamma, PORNTH[p.u.] – neutron porozitás, DENTH[g/cm³] - sűrűség, PETH[barn/e] - fotoelektromos abszorpciós index, ATTH[μs/lb] - akusztikus, RX0TH[ohmm] és RTTH[ohmm] valamely kisbehatolású- és mélybehatolású fajlagos ellenállás szelvényadat. A többi szelvény-konstans jelentése az 1. táblázatban található.

1. táblázat: Válaszegyenletek konstansainak jelentése

Paraméter	Petrofizikai jelentés
ATCH	Szénhidrogén akusztikus terjedési ideje
ATSH	Shale-agyag akusztikus terjedési ideje
ATG	Gáz akusztikus terjedési ideje
ATMA	Mátrix akusztikus terjedési ideje
ATMF	Iszapfiltrátum akusztikus terjedési ideje
ATO	Olaj akusztikus terjedési ideje
ATTH	Akusztikus terjedési idő elméleti értéke
JCH	Segédváltozó PORNEX számításában
KMA	Közetmátrix kálium tartalma
KMF	Iszapfiltrátum kálium tartalma
KSH	Shale-agyag kálium tartalma
KTH	Kálium természetes gamma intenzitás elméleti értéke
BA	Tortuozitási együttható
BM	Cementációs kitevő
BN	Szaturációs exponens
DECH	Szénhidrogén sűrűsége
DESH	Shale-agyag sűrűsége
DEMA	Mátrix sűrűsége
DEMF	Iszapfiltrátum sűrűsége
DETH	Sűrűség elméleti értéke
GRCH	Szénhidrogén természetes gamma intenzitása
GRSH	Shale-agyag természetes gamma intenzitása
GRMA	Mátrix természetes gamma intenzitása
GRMF	Iszapfiltrátum természetes gamma intenzitása
GRTH	Természetes gamma elméleti értéke
n	Közetmátrix komponenseinek száma
PMF	Iszapfiltrátum sókoncentrációja
PETH	Fotoelektromos abszorpciós index

POR	Effektív primer porozitás
PORNEX	Exkavációs hatás korrekció
PORNSH	Shale-agyag neutron porozitása
PORNMA	Mátrix neutron porozitása
PORNMF	Iszapfiltrátum neutron porozitása
PORNTH	Neutron porozitás elméleti értéke
RSH	Shale-agyag fajlagos ellenállása
RTTH	Érintetlen zóna fajlagos ellenállás elméleti értéke
RMF	Iszapfiltrátum fajlagos ellenállása
RX0TH	Kiöblített zóna fajlagos ellenállás elméleti értéke
RW	Rétegvíz fajlagos ellenállása réteghőmérsékleten
SCHB	Szénhidrogén koeficiens
SCHRB	Maradékolaj tényező
SPCHC	Szénhidrogén korrekció
SPSD	Természetes potenciál homokvonal
SPSH	Természetes potenciál shale-alapvonal
SPTH	Természetes potenciál elméleti értéke
SX0	Kisepert zóna víztelítettsége
SW	Érintetlen zóna víztelítettsége
THMF	Iszapfiltrátum tórium tartalma
THMA	Kőzetmátrix tórium tartalma
THSH	Shale-agyag tórium tartalma
THTH	Tórium természetes gamma intenzitás elméleti értéke
UMF	Iszapfiltrátum urán tartalma
UMA	Kőzetmátrix urán tartalma
USH	Shale-agyag urán tartalma
UTH	Urán természetes gamma intenzitás elméleti értéke
UPEMF	Iszapfiltrátum térfogati fotoelektr. abszorpciós index
UPECH	Szénhidrogén térfogati fotoelektr. abszorpciós index
UPESH	Shale agyag térfogati fotoelektr. abszorpciós index
UPEMA	Mátrix térfogati fotoelektr. abszorpciós index
VSH	Shale-agyag fajlagos térfogata
VMA	Mátrix fajlagos térfogata

A direkt feladatban szereplő válaszegyenleteket további kiegészítő, ún. korlátozó egyenletekkel bővíthetjük, melyek a petrofizikai paraméterek értékeire és kapcsolatára írnak elő megszorítást. Ezen szabályozó egyenleteket három típusba sorolhatjuk. Elsőként tekintünk az elméleti megszorításokat, melyek a petrofizikai paramétereket matematikai szabályok alapján korlátozzák, pl.

$$0 \leq \text{POR} \leq 1.0,$$

$$0 \leq \text{VSH} \leq 1.0,$$

$$0 \leq \text{SX0} \leq 1.0,$$

$$0 \leq \text{VMA}_i \leq 1.0.$$

A fenti paraméterek tapasztalati értékeire további kikötések tehetők, pl. törmelékes-üledékes kőzetek esetén néhány petrofizikai paraméter a terepi gyakorlatban a következőképpen szabályozható

$$0 \leq \text{POR} \leq 0.47,$$

$$0.15 \leq \text{SW} \leq 1.0,$$

$$0.50 \leq \text{SX0} \leq 1.0.$$

A lokális korlátozások a területre vonatkozó a priori információk alapján adódnak (pl. a maximális, és az áteresztőképes minimális porozitás-, vagy a minimális és maximális gyakorlati víztelítettségek). Végül a geológiai szabályozó egyenletek alkotják a korlátozó egyenletek harmadik csoportját, melyek az ismeretlenek közötti kapcsolatokat írják elő fizikai, földtani törvények alapján. Ilyen egyenlet, pl. a víztelítettségekre vonatkozó $\text{SX0} \leq \text{SW}^{1/5}$ összefüggés.

1.3. Érzékenység, stabilitás és pontossági vizsgálatok szintetikus adatrendszeren

A globális inverziós réteghatár-meghatározást a FGA-H módszer alkalmazásával teszteltük. Az eljárással 1.2 fejezetben bevezetett fitness függvényt, azaz a mérési és számított adatok legkisebb négyzetes normájának a reciprokát maximalizáltuk. Az inverziós célmodell üledékes szénhidrogén-tárolónak felel meg, melynek paraméterei a 2. táblázatban találhatóak.

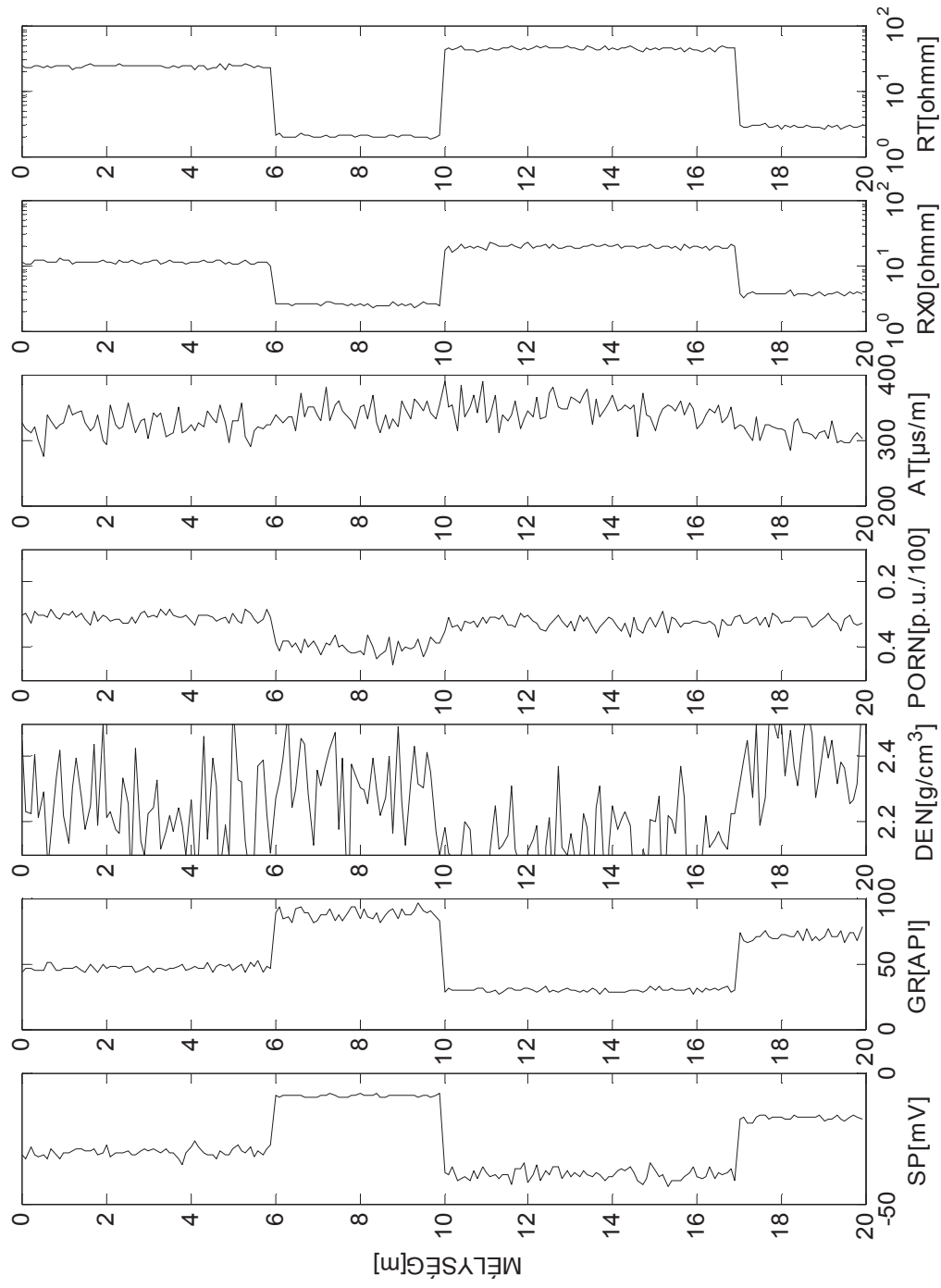
2. táblázat: Inverziós célmodell paraméterei

Réteg	H [m]	POR	SX0	SW	VSH	VSD
1	6.0	0.20	0.80	0.40	0.30	0.50
2	4.0	0.10	1.00	1.00	0.80	0.10
3	7.0	0.30	0.80	0.30	0.10	0.60
4	3.0	0.10	1.00	1.00	0.60	0.30

A szintetikus adatrendszert (1)-(11) válaszfüggvények segítségével generáltuk. A válasz-egyenletek felhasználásával, $dz=0.1m$ mintavételi közzel, szintetikus szelvényadatokat generáltunk (a szelvény konstansok aktuális értékei a 3. táblázatban találhatóak). A valódi mérések szimulációja céljából az SP, GR, DEN, PORN, AT, RX0, RT szintetikus karotázs szelvényekhez 5%-os Gauss eloszlásból származó hibát adtunk. A mélységpontok száma $P=200$, így pontonként $N=7$ szelvényadat lévén a teljes intervallumon $N=1400$ adat áll rendelkezésre. Mivel az ismeretlen rétegvastagságok mellett az ismeretlenek száma $M=24$, ezért nagymértékű túlhatározottság ($M \ll N$) teljesül. A karotázs szelvények a 2. ábrán láthatók.

3. táblázat: Válaszfüggvény konstansok értékei

Szelvénykonstans	Érték	Mértékegység
ATSH	330	$\mu s/m$
ATG	1260	$\mu s/m$
ATSD	182	$\mu s/m$
ATMF	620	$\mu s/m$
ATO	840	$\mu s/m$
BA	1.0	-
BM	2.0	-
BN	2.0	-
DECH	0.8	g/cm^3
DESH	2.46	g/cm^3
DESD	2.65	g/cm^3
DEMF	1.00	g/cm^3
GRCH	0	API
GRSH	100	API
GRSD	25	API
GRMF	0	API
PMF	0.0016	$10^6 ppm$
PORNSH	0.38	p.u./100
PORNSD	-0.04	p.u./100
PORNMF	1.00	p.u./100
RSH	2.5	ohmm
RMF	2.0	ohmm
RW	0.5	ohmm
SCHB	1.0	-
SPCHC	0	-
SPSD	-42	mV
SPSH	0	mV



2. ábra: 5%-os Gauss zajjal terhelt szintetikus mélyfúrési geofizikai szelvények

Az FGA-H algoritmus maximális iterációs lépésszámát $q_{\max}=30000$ -nek választottuk, ahol a kezdeti populációt $S=20$ véletlen modellel generáltuk. A petrofizikai paraméterek mellett meghatározni kívánt rétegvastagságokat valós számként értelmeztük, melyek zérustól különböző, valamint a szelvényezés mintavételi távolságától ($dz=0.1m$) nagyobb értéket vehettek fel. Ez alapján a modellparaméterek (rétegvastagságok és kőzetjellemzők) keresési intervallumát a 4. táblázat szerint adtuk meg. Az inverziós algoritmusba beépítettük az anyagmérleg egyenletet, mely tovább stabilizálta az eljárást.

4. táblázat: Keresési intervallumok

Paraméter	Minimum	Maximum
H_1	0.1m	10m
H_2		
H_3		
H_4		
POR	0	0.5
SX0	0	1.0
SW	0	1.0
VSH	0	1.0
VSD	0	1.0

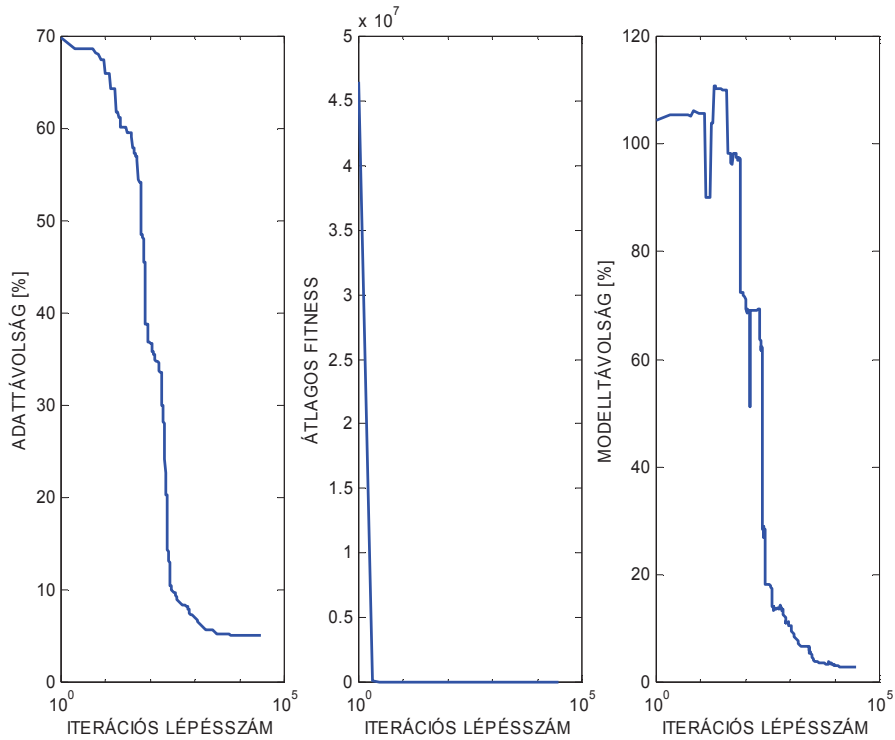
Az FGA-H eljárás modellgenerációinak javulását a 3. ábrán kísérhetjük figyelemmel, ahol az aktuális iterációs lépésbeli maximális alkalmasságú (fitness értékű) egyedhez tartozó relatív adat-, és modelltérbeli távolság értékek olvashatók le. E két illeszkedést mérő mennyiséget az alábbi módon definiáltuk, az adattávolság

$$D_d^{(int)} = \sqrt{\frac{1}{P \cdot K} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \left(\frac{d_{pk}^{(m)} - d_{pk}^{(sz)}}{d_{pk}^{(m)}} \right)^2} \cdot 100 [\%]$$

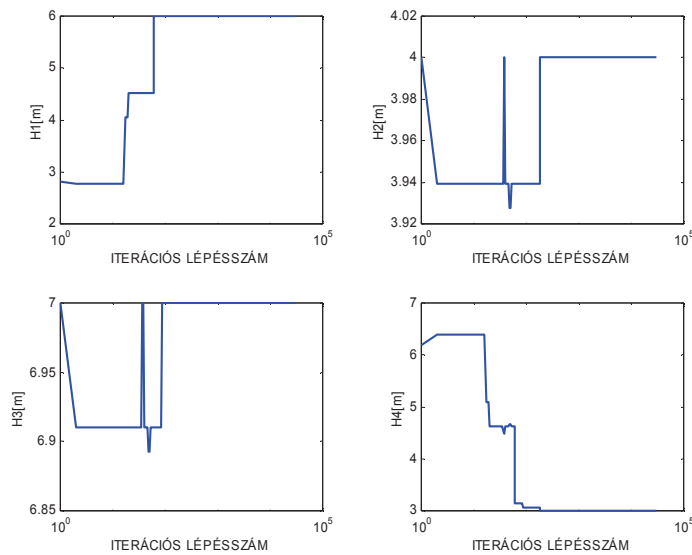
ahol $d_{pk}^{(m)}, d_{pk}^{(sz)}$ a p-edik mélységpontbeli k-adik mért és számított szelvényadat. Az inverziós eredmények modelltávolságát R számú homogén rétegből álló modell esetén

$$D_m^{(int)} = \sqrt{\frac{1}{R \cdot M} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^M \left(\frac{m_{ri}^{(b)} - m_{ri}^{(e)}}{m_{ri}^{(m)}} \right)^2} \cdot 100 [\%],$$

ahol $m_{ri}^{(b)}, m_{ri}^{(e)}$ az r-edik rétegbeli i-edik becsült és egzakt modellparaméter, M a petrofizikai paraméterek száma a rétegben. Ez utóbbi mennyiség is relatív, mivel a rétegvastagságok a térfogatjellemző petrofizikai paraméterek értékeihez képest eltérő nagyságrendbe esnek. A 2. ábrán a konvergencia alakulását elemezhetjük az iterációs lépésszám függvényében. A modelltávolság ábráján látható, hogy az eljárás több lokális minimumból (fitness tekintetében maximumból) kiszabadul, mely elsősorban a rétegvastagságok megtalálásához kapcsolódik. A módszer igen stabilnak bizonyult, mivel a rétegvastagságok kb. a $q=200$ iterációs lépéssel bezárólag mind egzaktul felvették a célmodellben szereplő értékeiket (ld. 4. ábra). Az ezt követő iterációs lépésekben a petrofizikai paraméterek finomítása történt. Az adattávolság ábráján látható az egyenletes konvergencia a fitness függvény „globális” maximuma (adattávolság abszolút minimuma) felé. A zajnak megfelelően 5% körüli a relatív adat-távolság és az átlagos fitness értéke is az eljárás végén.



3. ábra: A relatív adat- és modelltérbeli távolság, valamint a generációk átlagos fitness értéke az iterációs lépésszám függvényében



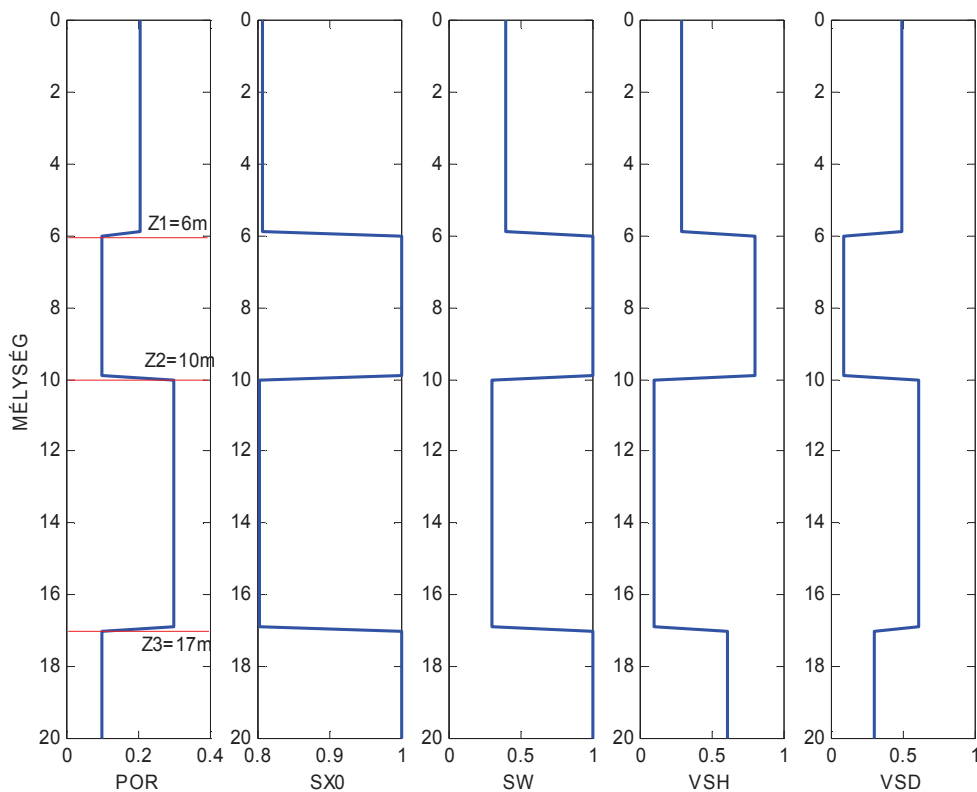
4. ábra: A rétegvastagság-iterációs lépésszám függvények

Az FGA-H algoritmussal becsült eredménymodellre számított relatív adat-, és modell-térbeli távolság $D_d = 5.0741\%$, $D_m = 2.774\%$. Az inverziós eredményeket az 5. táblázatban és az 5. ábrán láthatjuk. Megállapítható, hogy az FGA-H stabil és pontos becslést ad, a réteghatár-koordinátákat 4 tizedes pontossággal számította $H_1 = 6.0000\text{m}$, $H_2 = 4.0000\text{m}$, $H_3 = 7.0000\text{m}$, $H_4 = 3.0000\text{m}$, ami igen pontos eredmény. (Az ábrán Z_1 , Z_2 , Z_3 az inverzióval becsült réteghatár-koordinátákat jelöli). Emellett látható, hogy a petrofizikai paraméterek értékei is jól illeszkednek a célmodellben szereplő értékekhez. A réteghatárok szimultán meghatározása tehát

nem eredményezett romlást más paraméterek tekintetében sem. A módszer hátránya egyedül a futási idő tekintetében nyilvánul meg ($t=23\text{min}$). Ennek oka a nagy iterációs lépésszám, illetve az, hogy az eljárás egyszerre több modellt javít az optimumkeresés során. Ez az idő azonban megfelelő számítógépekkel tovább redukálható.

5. táblázat: Intervallum inverziós eredmények

Réteg	H [m]	POR	SX0	SW	VSH	VSD
1	6.0000	0.2061	0.8054	0.3971	0.2918	0.4907
2	4.0000	0.0971	1.0023	0.9999	0.8024	0.0878
3	7.0000	0.2987	0.8024	0.3022	0.0993	0.6022
4	3.0000	0.0984	1.0034	0.9998	0.6052	0.2954



5. ábra: Intervallum inverzióval becsült modellparaméterek (pirossal a meghatározott réteghatár-koordináták)

1.4. Terepi adatok inverziója

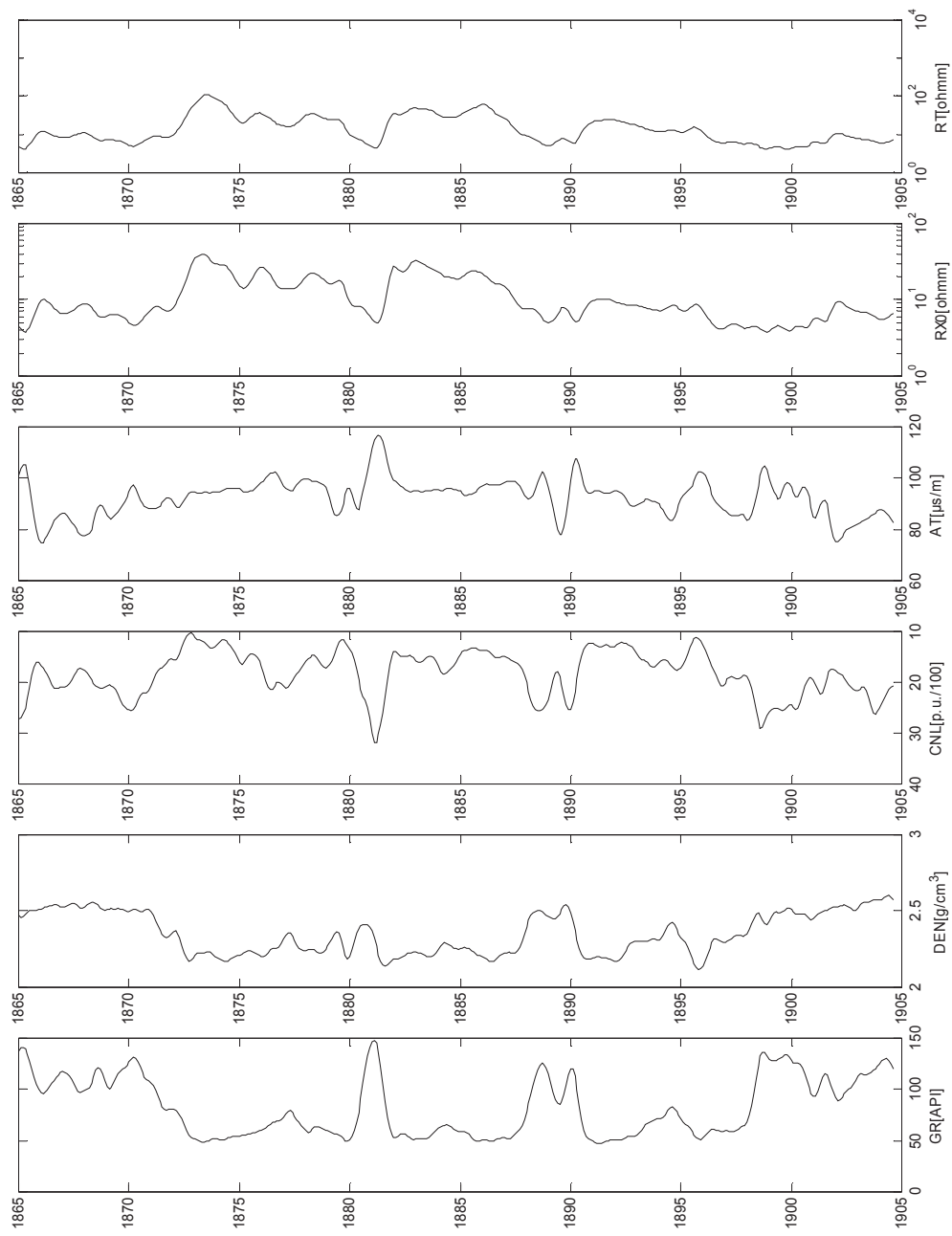
Terepi adatok intervallum inverziós feldolgozása céljából egy általunk 9 rétegre bontott üledékes kőzet összletet vizsgáltunk. A szelvényadatok egy magyarországi szénhidrogén-kutatófúrásból származnak. A rétegsorban agyagos gáztároló homokkövek és agyag rétegek váltakoznak. Intervallum inverziós vizsgálatunk automatikus rétegvastagság-meghatározást is magában foglalt.

Az inverziós vizsgálatokba bevont adatrendszer a vizsgált fúrás 1865-1904.6m szakaszán regisztrált CN (kompenzált neutron), DEN (sűrűség), ATL (akusztikus), GR (természetes gamma), RT (korrigált mélybehatolású - valódi - fajlagos ellenállás), RX0 (korrigált sekély behatolású fajlagos ellenállás) szelvények adatai képezték. A mintavételi köz $dz=0.1\text{m}$ volt. A szelvényeket a 6. ábrán láthatjuk. A modellalkotás során a Baker Atlas CLASS előzetes értelmezés eredményei által szolgáltatott a priori információkat felhasználva egymátrixú (homokkő) agyaggal szennyezett gáztárolóra vonatkozó válaszegyenleteket alkalmaztunk (ld. 1.2 fejezet), ahol a függvény konstansokat a 7. táblázat szerint adtuk meg.

Ezek után tekintsük az intervallum inverziós eredményeket. Az intervallum inverziót automatikus réteghatár-meghatározással végeztük el, ahol a POR, SW, VSH, VSD réteglelmező paraméterek mellett inverziós ismeretlenként jelent meg a vizsgált 9 réteg H vastagsága. Az intervallum inverziós eljárás során globális optimalizációt alkalmaztunk. A startmodellt a 6. táblázat alapján adtuk meg. A futási idő tekintetében $t=5$ percet vett igénybe a teljes számítás. Az eredmény szelvények a 7. ábrán láthatók.

6. táblázat: Inverziós startmodell

H[m]	POR	SX0	SW	VSH	VSD
6.0	0.05	1.0	1.0	0.55	0.40
9.5	0.10	0.8	0.4	0.20	0.70
1.0	0.10	1.0	1.0	0.70	0.20
7.0	0.20	0.7	0.3	0.10	0.70
2.0	0.05	1.0	1.0	0.60	0.35
3.2	0.20	0.7	0.3	0.10	0.70
0.8	0.10	0.75	0.55	0.40	0.50
3.0	0.19	0.8	0.5	0.10	0.70
7.1	0.05	1.0	1.0	0.60	0.35



6. ábra: A vizsgált szakasz mélyfúrési geofizikai szelvényei

7. táblázat: Válaszegyenletek konstansai

Természetes gamma szelvény konstansok	

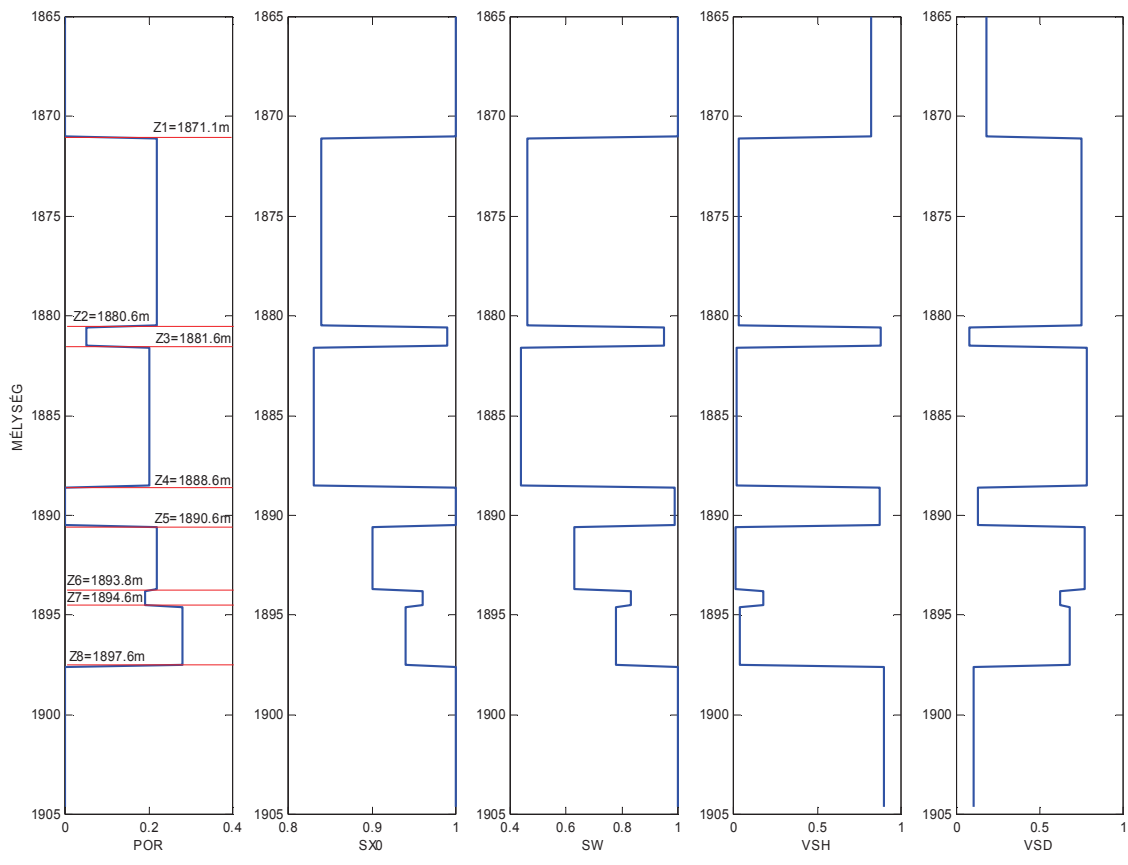
grmf = 0	(API)
grch = 0	(API)
grsd = 25	(API)
grsh = 165	(API)
Neutron-porozitás szelvény konstansok	

pornmf = 100	(p.u.)
pornsd = -4	(p.u.)
pornsh = 30	(p.u.)
schrn = 1	
Akusztikus terjedési idő szelvény konstansok	

atmf = 189	(mikrosec/l)
atsd = 56	(mikrosec/l)
atsh = 100	(mikrosec/l)
ato = 238	(mikrosec/l)
atg = 305	(mikrosec/l)
cp = 1.05	
alfa2 = 2	
Sűrűség szelvénykonstansok	

pmf = 1e-4	(1e+6 ppm)
demf = 1.05	(g/ccm)
desd = 2.65	(g/ccm)
desh = 2.6	(g/ccm)
dech = 0.2	(g/ccm)
Mikro-,és mélybehatolású fajlagos ellenállás szelvény konstansok	

rsh = 5	(ohmm)
rmf = 2	(ohmm)
rw = 0.45	(ohmm)
bn = 1.4	
bm = 1.7	
ba = 0.7	



7. ábra: Intervallum inverzió eredmények 9 réteges terepi esetben

2. TÖBB MÉLYFŰRÁS ADATAINAK EGYÜTTES INVERZIÓJA

Az intervallum inverziós eljárást eddig 1-D-s esetekben alkalmaztuk, ahol egy megadott fúrás réteghatár-koordinátáit ill. az általa harántolt kőzetek petrofizikai paramétereit határoztuk meg. A módszer azonban kiterjeszhető 2-D és 3-D esetre is, mivel a sorfejtésen alapuló intervallum inverziós eljárás bázisfüggvényét felvehetjük úgy is, hogy az ne csak 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 számítjuk ki a réteghatárok elhelyezkedését. A módszer egyaránt alkalmas a petrofizikai paraméterek térbeli meghatározására is. Numerikus oldalról ennek előnye az, hogy a fúrások adatainak integrálásával a túlhatározottság tovább növelhető és ez minőségi javulást eredményez a becslt paraméterek pontossága és megbízhatósága tekintetében. Ebben a fejezetben először azt vizsgáljuk, hogy 2-D-s esetben, rögzített réteghatárok esetén az adategyesítés milyen eredményt hoz az intervallum inverzióval meghatározott petrofizikai paraméterek tekintetében

2.1. A 2-D intervallum inverziós eljárás

A módszer bemutatásához tekintsük a 8. szemléletes ábrát. A hagyományos mélységpontkénti inverzió egy megadott fúrás egyetlen mélységpontjában határozza meg a petrofizikai paraméterek értékét. Ez kismértékben túlhatározott inverz feladatot jelent, mivel a pontbeli adatszám alig nagyobb, mint az ismeretlenek száma. E módszer keretei között nyilvánvalóan a réteghatárok helyzete nem határozható meg. Az intervallum inverziós módszer ezzel szemben egy nagyobb mélységintervallum adatrendszerét magába integrálva egy nagymértékben túlhatározott inverz feladatot jelent. Ekkor több mélységpont adatrendszerét együttesen invertáljuk, így a túlhatározottságot és ezzel együtt a becslési pontosságot és megbízhatóságot jelentősen megnövelhetjük. 1-D-s esetben tehát több mélységpont (réteg, zóna) petrofizikai paramétereire pontosabb becslést tudunk végrehajtani, ill. a réteghatár-koordinátákat is ki tudjuk számítani. E módszer előnyös tulajdonságait szeretnénk felhasználni, és kiterjesztve a probléma geometriáját 2-D-s esetre, a petrofizikai paraméterek és réteghatárok laterális változását is képes az intervallum inverzió kezelni ill. meghatározni.

Legyen x a horizontális koordináta, amely mentén a mélyfúrások egymás mellett elhelyezkednek. Az intervallum inverziós eljárásban intervallumon értelmezett válaszgyenleteket szükséges definiálnunk, mellyel az 1-D válaszfüggvények rendszerét kiterjeszhetjük 2-D-s esetre. Ekkor a petrofizikai paramétereket, mint a z mélység és az x laterális koordináta függvényeit írjuk fel. Az így értelmezett elvi szelvényadatokat tehát

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

ahol $\varphi_k(x, z)$ az k -edik számított szelvényadat az x koordinátájú fúrás z mélységpontjában, $m_i(x, z)$ pedig ugyanott az i -edik kőzetfizikai paraméter értéke. A fenti válaszgyenletben a modellparaméterek folytonos függvények, melyek egy adott pontbeli értékét diszkrétizálással határozzuk meg. A mélységfüggő válaszgyenletek paramétereinek diszkrétizálására sorfejtési eljárást alkalmazhatunk.

A sorfejtéses intervallum inverziós eljárás keretében ismert bázisfüggvény-rendszerek segítségével diszkrétizáljuk a petrofizikai paramétereket. A bázisfüggvények típusa szabadon

megválasztható, és az adott földtani szituációhoz illeszthető. Tekintsük a fenti mélységfüggő válaszgyenletben szereplő i -edik rétegjellemző paraméter általános sorfejtett alakját

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

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 bázisfüggvényt jelöli. Korábbi tapasztalataink alapján a bázisfüggvények megválasztásánál előnyös szempont lehet, hogyha

$$\int_{-1}^1 \Psi_n(x) \Psi_m(x) dx = 0, \quad (n \neq m)$$

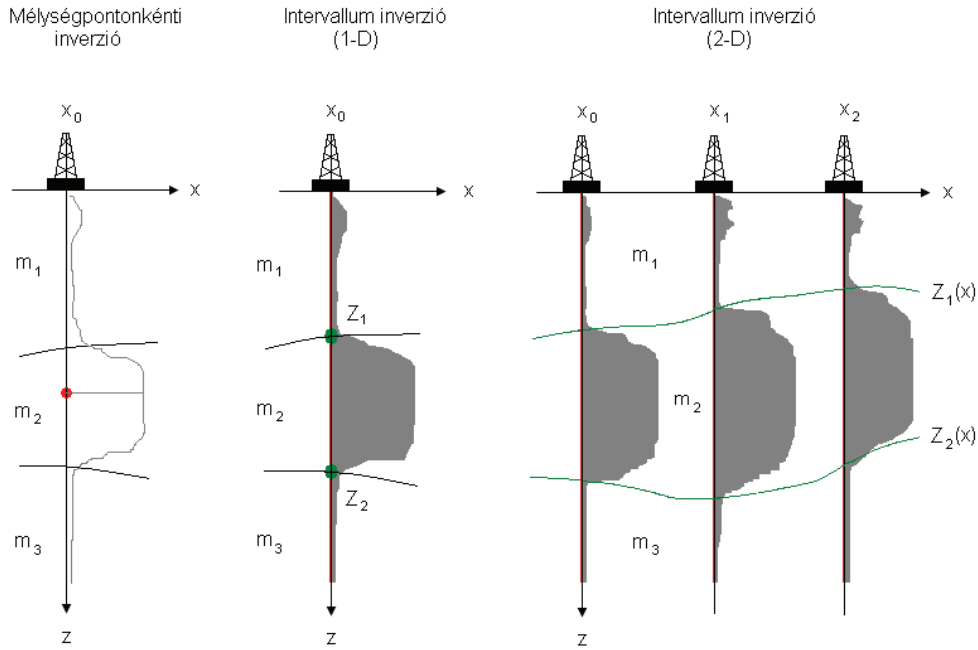
ortogonális függvényrendszert alkalmazunk. Ekkor kisebb mértékű csatolás jön létre a réteghatárokat leíró sorfejtési együtthatók között az inverzió során, mely megbízhatóbb paraméterbecslést jelent. Ez alapján a Legendre polinom-rendszert választottuk (ld. 9. ábra), melynek formulája

$$\begin{aligned} \Psi_0(x) &= 1 \\ \Psi_1(x) &= x \\ \Psi_2(x) &= \frac{1}{2}(3x^2 - 1) \\ \Psi_3(x) &= \frac{1}{2}(5x^3 - 3x) \\ \Psi_4(x) &= \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3) \\ &\vdots \\ \Psi_n(x) &= \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n \end{aligned}$$

Ezt követően az algoritmus hasonló az 1-D esettel. Az elvi adatokat a kétváltozós válaszfüggvények alapján kell számítanunk

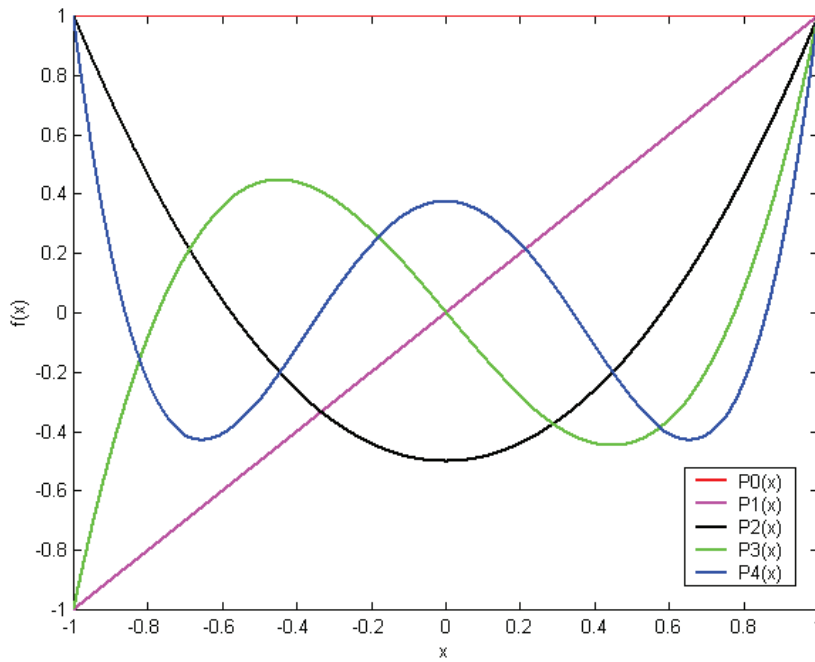
$$d_j^{(e)}(x, z) = g_j(x, z, \dots, B_q^{(i)} \dots)$$

ahol „B” a sorfejtési együtthatókat szimbolizálja. E sorfejtési együtthatók képezik az inverz feladat ismeretlenjeinek körét. Az inverz feladatot ezután a mért és számított adatok eltérését jellemző valamely vektornorma minimalizálásával hajtjuk végre.



8. ábra

A mélységpontenkénti és intervallum inverziós módszer elve



9. ábra

Legendre polinomok 4-ed fokú taggal bezárólag

Az optimalizációhoz Simulated Annealing eljárást alkalmaztunk. Ennek az az oka, hogy egy előző tanulmányban már korábban említett réteghatárookra vonatkozó diskretizációs numerikus probléma merülhet fel lineáris módszerek alkalmazásakor. A globális módszerek véletlen keresése révén ez elkerülhető. Az alkalmazott célfüggvényünk a következő

$$E = \frac{1}{FPN} \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^N \left(\frac{d_{fpk}^{(m\acute{e}rt)} - d_{fpk}^{(elvi)}}{d_{fpk}^{(m\acute{e}rt)}} \right)^2 + \varepsilon^2 \sum_{i=1}^M \left(\frac{m_i^{(a\ priori)} - m_i^{(becs)}}{m_i^{(a\ priori)}} \right)^2 \rightarrow \min$$

ahol F a fúrások, P a mélységpontok, N az alkalmazott szondák száma. A második tag numerikusan stabilizálja az algoritmust és az a priori információk is segíthetik a jobb megoldást.

A Simulated Annealing (MSA) eljárást METROPOLIS et al. (1953) dolgozták ki fémek termikus egyensúlyi állapotának modellezése céljából. A klasszikus Metropolis-algoritmust alkalmazó Simulated Annealing eljárás (MSA) egy, a fémek speciális hűtésének analógiája alapján tervezett hatékony globális optimalizációs módszer. TREITEL ÉS HELBIG (1997) bizonyították, hogy az optimális modell konvergens eljárásban az ún. Gibbs-Boltzmann-féle eloszláshoz tart, a termikus egyensúly megvalósulása érdekében. Ehhez megfelelő hűtés szükséges. GEMAN (1984) kimutatta, hogy a Metropolis eljárás globális minimumhoz történő konvergenciájának szükséges és elégséges feltétele a következő hűtési mechanizmus alkalmazása

$$T(q) = \frac{T_0}{\ln q}, \quad q > 1,$$

ahol $T(q)$ az q -edik iterációs lépésbeli hőmérséklet (mely az optimalizációban egy lényeges dimenziótlan kontrollparaméter szerepét tölti be), és T_0 a kezdeti (kritikus) hőmérséklet. Ha tehát logaritmikusan hűtünk, akkor garantált az abszolút minimum meghatározása.

Az MSA eljárás fémek hőkezelésének egy speciális technikáját algoritmizálja, mely felhasználható a geofizikai inverz feladat megoldására. Az analógia alapja a hűtés időtartamától és ütemétől függően kialakuló fémrács atomi összenergiája és az inverz feladat minimalizálendő célfüggvényének kapcsolata. A kohászatban a fémek lágyítását az olvadt állapothoz közeli hőmérsékletről történő lassú hűtéssel valósítják meg. Ennek hatására a nagy számú atom fokozatosan veszít mozgási energiájából, a fém kristályosodni kezd. A kialakuló fémrács atomi összenergiája a hűtés időtartamának a függvénye. Elvileg végtelen lassú hűtés eredményezi a minimális energiájú tökéletes rácsszerkezetet, mely analóg a geofizikai inverz probléma célfüggvényének globális minimumban való stabilizálódásával. A gyakorlatban ilyen lassú hűtés nem valósítható meg, ezért gyorsabb eljárás szükséges. Gyors hűtési ütem következtében viszont a kristályos szerkezetben rácshibák alakulnak ki, így a fém egy magasabb energiaszinten fagy „tökéletlen” rácsgba. Ez megfelel az inverziós eljárás lokális minimumban való stabilizálódásának. Az atomok csak speciális hőkezelés hatására tudnak kiszabadulni e magasabb energiaszintű kristályszerkezetből, majd ezután megfelelően lassú hűtés mellett érik el az abszolút minimális energiájú rácsszerkezetet. Az MSA eljárás e folyamatot másolja a célfüggvény globális minimumának megtalálása érdekében.

Az MSA eljárás az optimalizálás során véletlen keresést hajt végre a paraméterterben, miközben a modellvektor elemeit

$$m_i^{(q)} = m_i^{(q-1)} + b$$

formula szerint iterációról iterációra változtatja. A képlet szerint az i -edik modellparamétert a q -edik iterációs lépésben, az előző iterációs lépésbeli paraméterérték és a „ b ” paraméterkorrekció összegeként számítjuk. A b értékét minden iterációs lépésben $0 \leq b \leq b_{\max}$ között

véletlenszerűen generáljuk, annak maximális értékét előírt iterációs lépésszám után csökkentjük a $b_{\max}^{(q)} = b_{\max}^{(q-1)} \cdot \varepsilon$, $0 \leq \varepsilon \leq 1$ összefüggés szerint. Ezzel az MSA eljárás adott hőmérsékleten különböző véletlen energiaállapotokat (modelleket) próbál ki, és az aktuális paraméterterbeli pontból számított energiafüggvény értéket összehasonlítja az előző lépésben elfogadott energiafüggvény értékkel. Az új modellparaméter elfogadását valószínűségi szabályhoz kötjük. A Metropolis algoritmus a Metropolis kritériumról kapta a nevét, mely az aktuális modell elfogadására a következő valószínűségi szabályt írja elő

$$P(\Delta E = E^{(q)} - E^{(q-1)}) = \begin{cases} 1, & \Delta E \leq 0 \\ \exp(-\Delta E / T), & \Delta E > 0 \end{cases}.$$

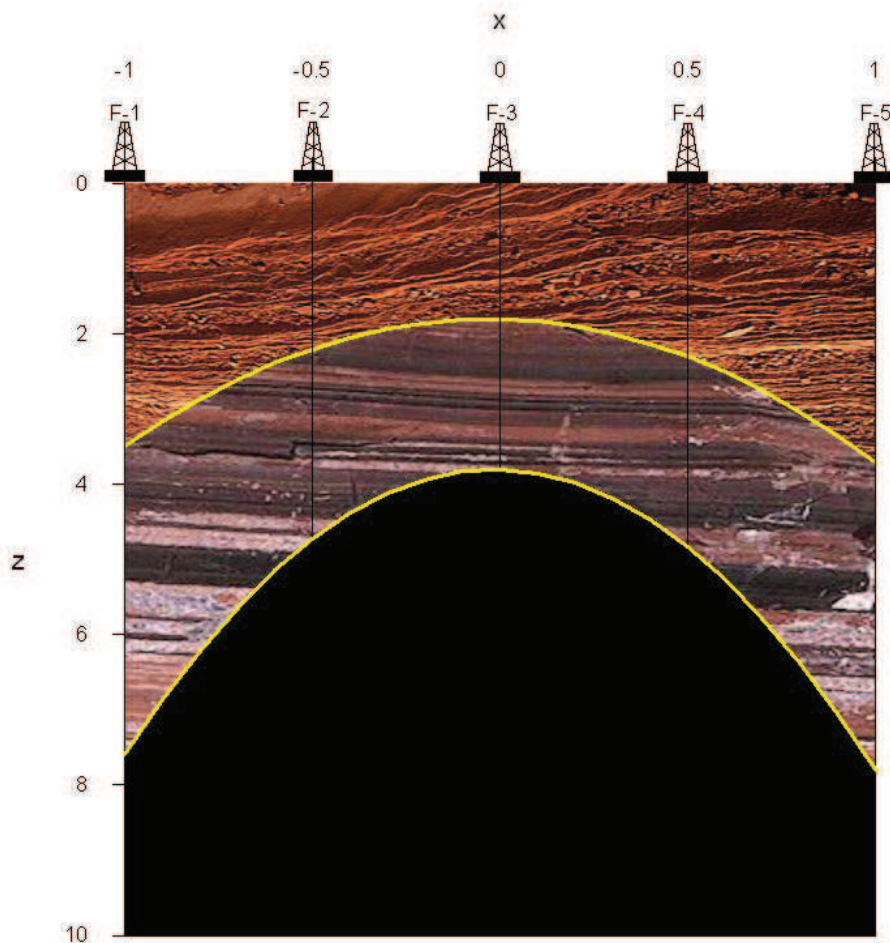
A fenti képlet szerint, ha az új állapotban az energia értéke (a mért és számított geofizikai adatok távolsága) csökken, akkor mindig elfogadjuk az új modellparamétereket. A képlet a lokális minimumból való kiszabadulás lehetőségét is megengedi, hiszen az energia növekedése (adattérbeli távolság növekedése) esetén is definiál (egy az energianövekménytől függő) elfogadási valószínűséget. Ha erre teljesül a $P(\Delta E) \geq \alpha$ feltétel (ahol α egy egyenletes valószínűséggel generált $[0,1]$ intervallumba eső szám), akkor az új paramétereket elfogadjuk, ellenkező esetben elvetjük azokat.

Végül röviden összefoglalva, az MSA algoritmus működéséről a következőket mondhatjuk. Kezdetben az input adatok (mért adatok, startmodell) és a folyamatjellemző paraméterek (kezdeti hőmérséklet, hűtés, paraméterváltoztatás mértéke) beállítása után véletlen számokkal perturbáljuk a modellvektor elemeit. Ha ezzel csökkent az adattávolság (az energiafüggvény értéke), akkor az új modellt elfogadjuk. Ellenkező esetben (az energia növekedése esetén) az új modell elfogadását $P(\Delta E) \geq \alpha$ feltételhez kötjük. Ha ez nem teljesül újra indítjuk a keresést. Ekkor még állandó hőmérsékleten folyik a keresés a paramétertér részletes vizsgálata céljából. Ezután a (2.18) hűtés szabálya szerint a folyamatot megadott lépésszám után kisebb hőmérsékleten és kisebb paraméterváltoztatást engedve folytatjuk. A kilépési feltételeket a stopkritériumban határozzuk meg, mellyel a legutolsó lépésben elfogadott modellt tekintjük az inverz feladat megoldásának.

2.2. Petrofizikai paraméterek meghatározása 2-D szerkezeten

A 2-D intervallum inverziós eljárást elsőként háromréteges antiklinális modellen teszteltük fix réteghatár pozíciók mellett. Litológiáját tekintve a modell agyagos-homokkő összlet, mely víz-, és szénhidrogén tárolásra alkalmas. A számításhoz 5 fúrás (F-1–F-5) adatrendszerét integráltuk, melyek az x koordináta menti profilon helyezkednek el. Az x menti távolságot a Legendre- polinomok értelmezési tartományán vettük fel.

A modell képe a 10. ábrán látható, a rétegek paramétereit a 8. táblázat tartalmazza. Itt feltételeztük, hogy a petrofizikai paraméterek csak mélységfüggést mutatnak. A rétegenként homogén földtani modell ismeretlen paramétereit a POR - effektív porozitás, SX0 - kispert zóna víztelítettsége, SW - érintetlen zóna víztelítettsége, VSH - az agyagtartalom és a VSD - kvarc-mátrix részarány. Az SX0 és VSD paramétereket az inverziós ismeretlenek köréből felszabadítva a korábbi Baker Atlas és anyagmérleg egyenletek alapján determinisztikusan számítottuk.



10. ábra 2-D szénhidrogén-tároló modell

8. táblázat: Inverziós célmodell

Réteg	POR	SX0	SW	VSH	VSD
1	0.25	1.00	1.00	0.15	0.60
2	0.10	1.00	1.00	0.80	0.10
3	0.30	0.80	0.3277	0.10	0.60

Az F-1–F-5 jelű fúrások szintetikus adatait (1)-(11) válaszegyenletek alapján generáltuk, majd 5%-os Gauss eloszlásból származó zajjal terheltük. A számított szelvények: SP - természetes potenciál, GR - természetes gamma, K - kálium spektrális gamma, U - urán spektrális gamma, TH - tórium spektrális gamma, CD - kompenzált sűrűség, PE - fotoelektromos abszorpciós index, CN - kompenzált neutron, AT - akusztikus terjedési idő, RS - sekély behatolású fajlagos ellenállás, RD - mélybehatolású fajlagos ellenállás. A vizsgált mélységpontok száma fúrásonként P=101, így összesen M=9 inverziós ismeretlennel szemben N=505 adat állt rendelkezésre. Ez nagymértékben (kedvező) túlhatározott inverz feladatot jelent. A fúrások szelvényanyagát a 11-15. ábrák mutatják.

A 16. ábrán az intervallum inverziós eljárás konvergenciájának alakulását láthatjuk. Látható, hogy számos lokális minimumból szabadul ki az aktuális modellvektor. Kb. a q=7000 lépéstől már nincs változás, ekkor találta meg az optimumot a rendszer. Ekkor a relatív adattérbeli távolság

$$D_d = \frac{1}{FPN} \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^N \left(\frac{d_{fpk}^{(mért)} - d_{fpk}^{(elvi)}}{d_{fpk}^{(mért)}} \right)^2 = 5.0007\%$$

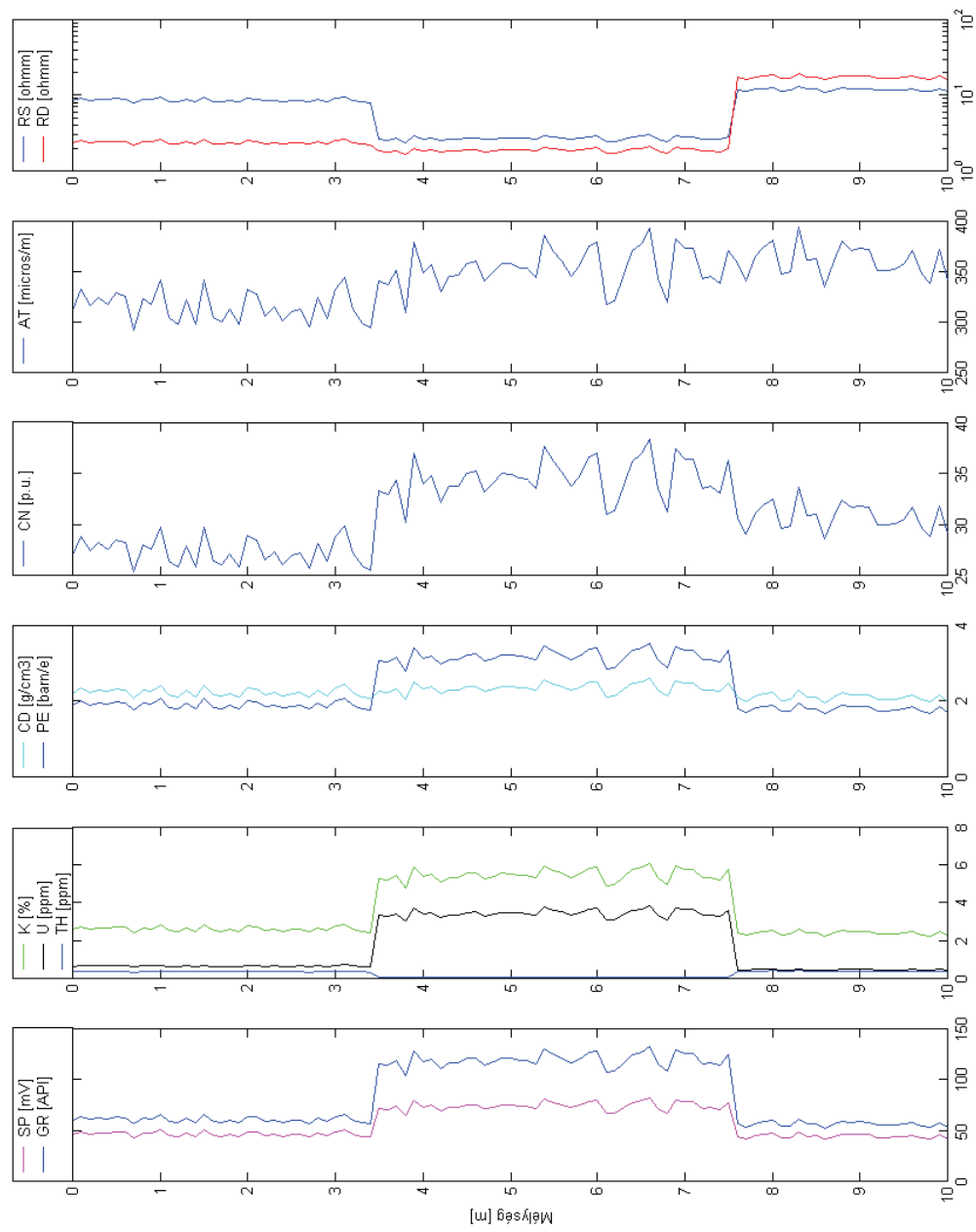
nagy pontossággal a zaj mértékének szintjén stabilizálódott. A modellparamétereket a zaj ellenére is nagy pontossággal visszakaptuk, a relatív modell-távolság

$$D_m = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{m_i^{(egz)} - m_i^{(becs)}}{m_i^{(egz)}} \right)^2 = 0.1348\%.$$

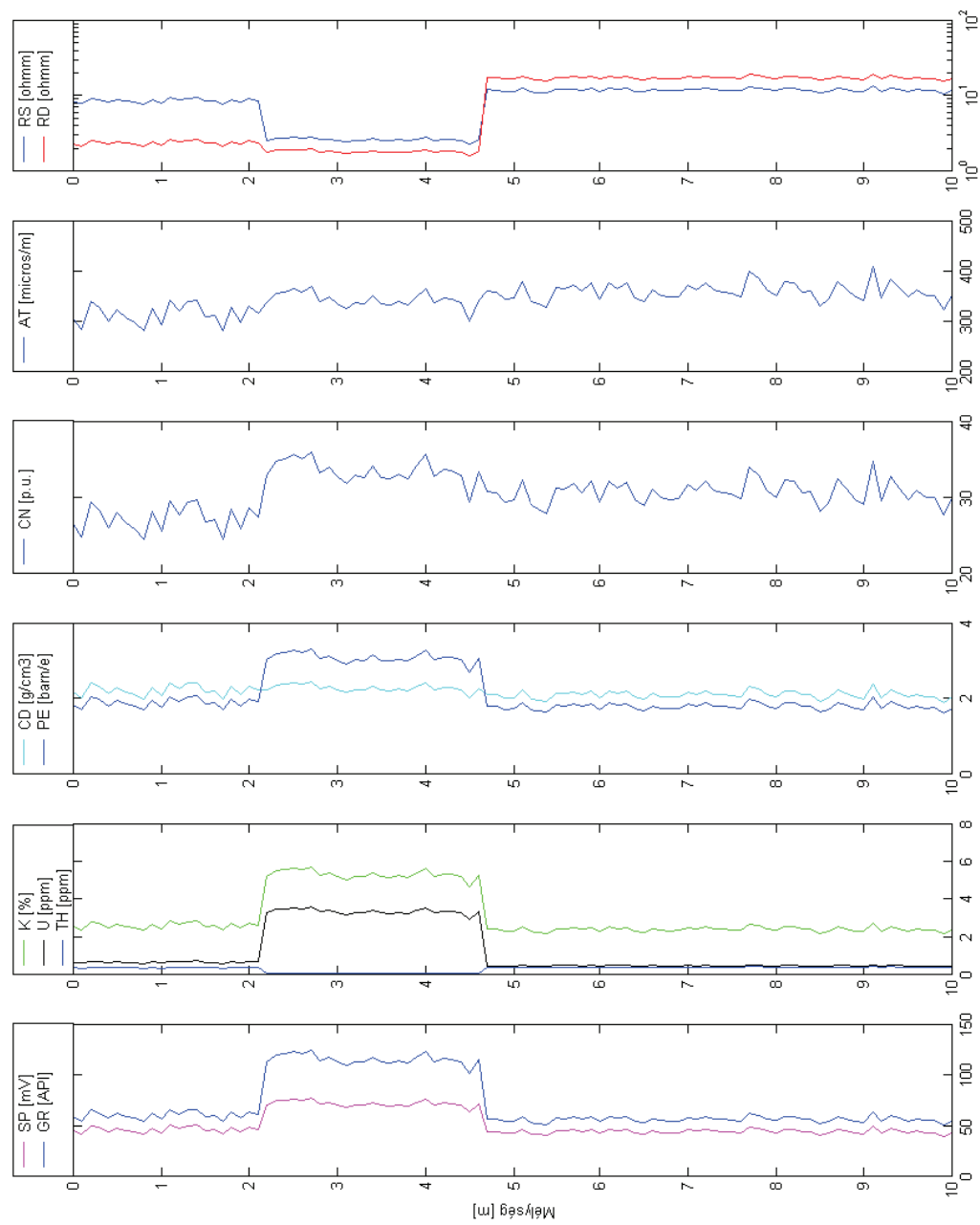
Ez a legjelentősebb előnye a több fűrason alapuló adategyesítésnek az inverzió minőségi jellemzői tekintetében. A becsült paramétereket a 9. táblázat tartalmazza.

9. táblázat: Inverziós eredmények

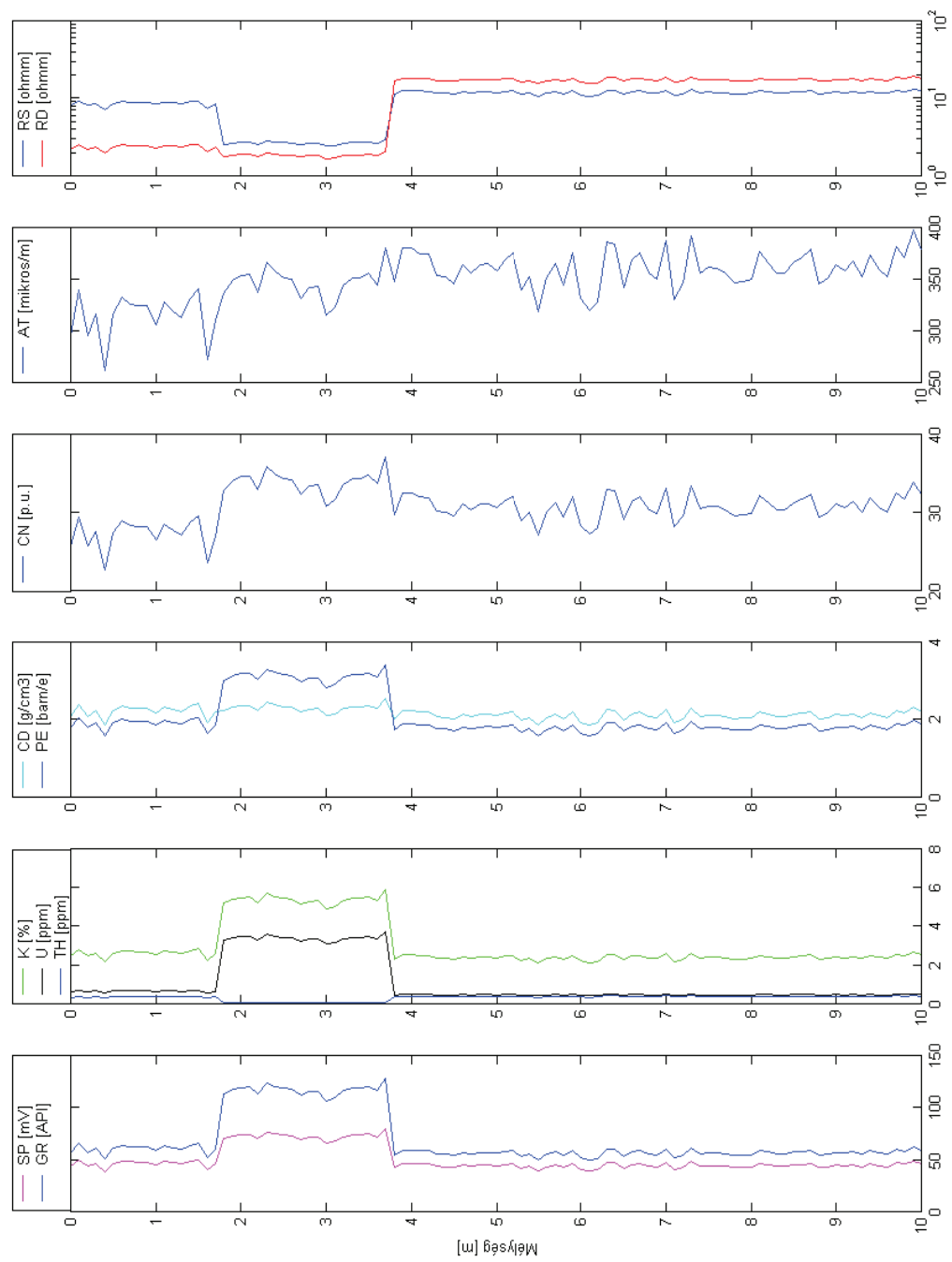
Réteg	POR	SX0	SW	VSH	VSD
1	0.2511	0.9999	0.9999	0.1490	0,5999
2	0.1031	0.9982	0,9982	0.7966	0,1003
3	0.3006	0.7999	0,3255	0.0998	0,5996



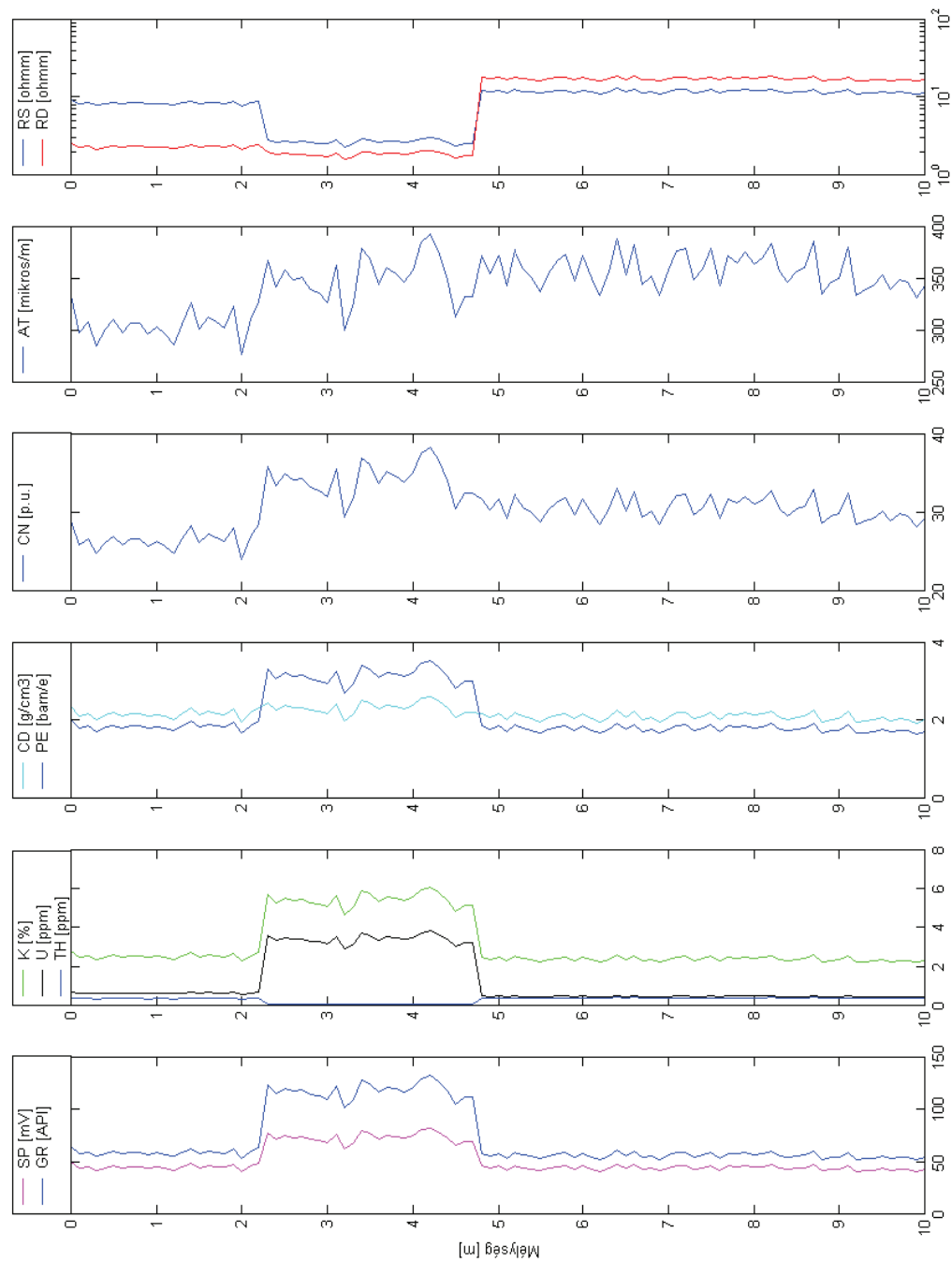
11. ábra: F-1 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrési geofizikai szelvényei



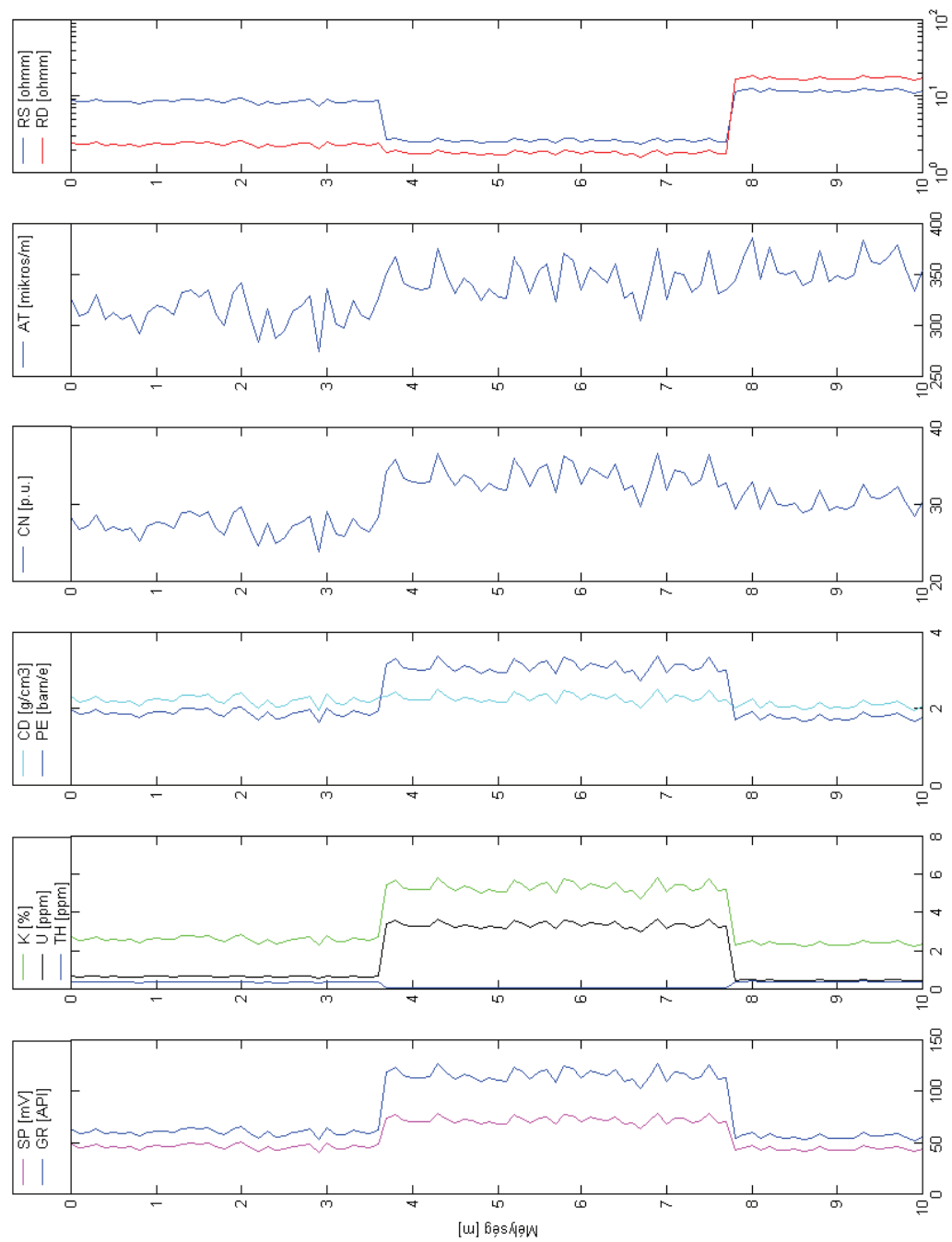
12. ábra: F-2 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrési geofizikai szelvényei



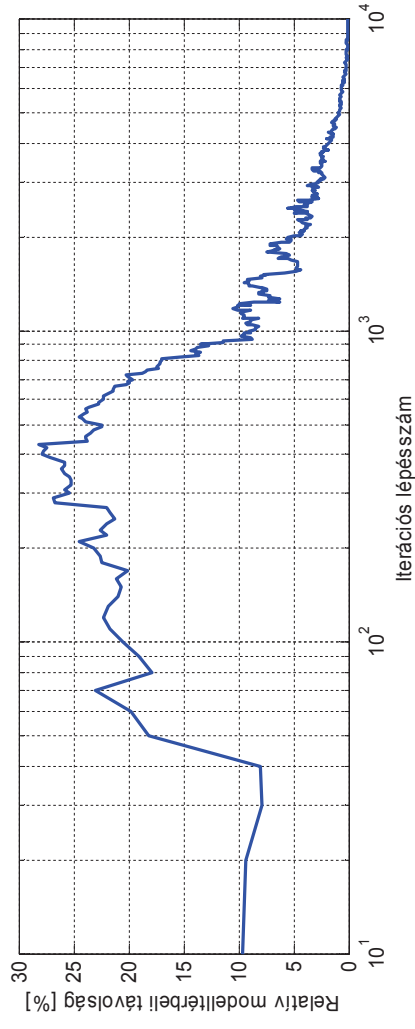
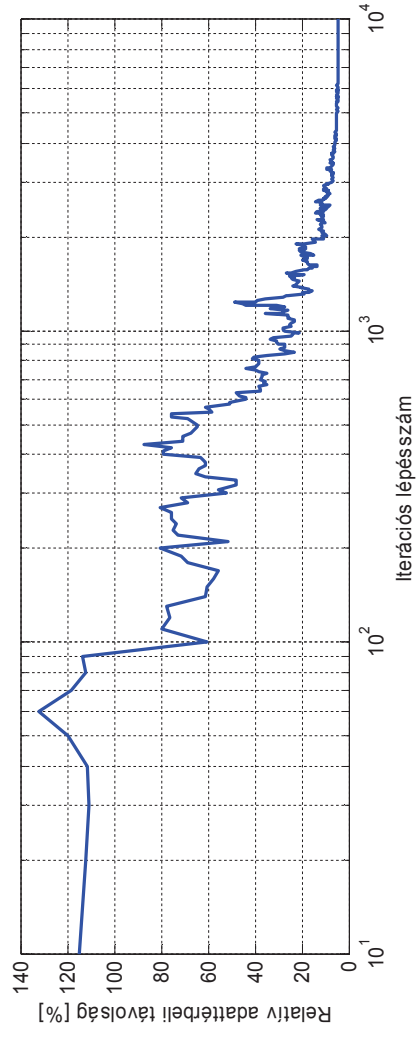
13. ábra: F-3 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrési geofizikai szelvényei



14. ábra: F-4 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrás geofizikai szelvényei



15. ábra: F-5 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrás geofizikai szelvényei



16. ábra

Relatív adat- és modelltávolság változása az iterációs lépésszám függvényében

3. A RÉTEGHATÁR-KOORDINÁTÁK MEGHATÁROZÁSA TÖBB MÉLYFÚRÁS ADATAINAK EGYÜTTES INVERZIÓJÁVAL- a morfológia meghatározhatósága 2D szerkezeteken

Az előző fejezetben láttuk, hogy az adategyesítés igen előnyös hatással van az inverziós eredmények minőségi javulására. Az intervallum inverziós eljárás legnagyobb előnye azonban az, hogy lehetőséget ad a réteghatárok helyzetének automatikus meghatározására. Mindezt szimultán módon a petrofizikai paraméterek számítása mellett is lehetővé teszi. 1-D-s esetben a réteghatár-koordináták inverziós ismeretlenként való kezelése nem okozott romlást a becslési hibák területén (ld. 1. fejezet). Látni fogjuk, hogy az intervallum inverziós módszer e kedvező tulajdonsága öröklődik 2-D-s esetben is.

3.1. Petrofizikai paraméterek és a réteghatárok együttes meghatározása 2-D-s homokkő-tároló szerkezeten

Tekintsük alapul a 2.2-ben felvett 2D antiklinális szénhidrogén-tároló modellt. A petrofizikai paraméterek legyenek változatlanok, azonban a réteghatárokat közelítsük másodfokú Legendre polinomokkal. Így az ismeretlenek száma 9-ről $M=15$ -re nő. Az adatok száma változatlan, az F-1–F-5 fúrásokban összesen $N=5555$ adat van (ld. 14-18. ábra).

A modellvektor így a rétegenként homogén földtani modell petrofizikai paraméterein kívül a Legendre polinomok B_k sorfejtési együtthatóit tartalmazza (ahol k : az x -koordináta megfelelő hatványához tartozó együttható indexe). Az inverzió célja 10. táblázat elemeinek a meghatározása, ahol a réteghatárok laterális változását a következő két függvény írja le:

$$\psi_1(x) = 1.2 \cdot \frac{3x^2 - 1}{2} + 0.1 \cdot x + 2.4m$$

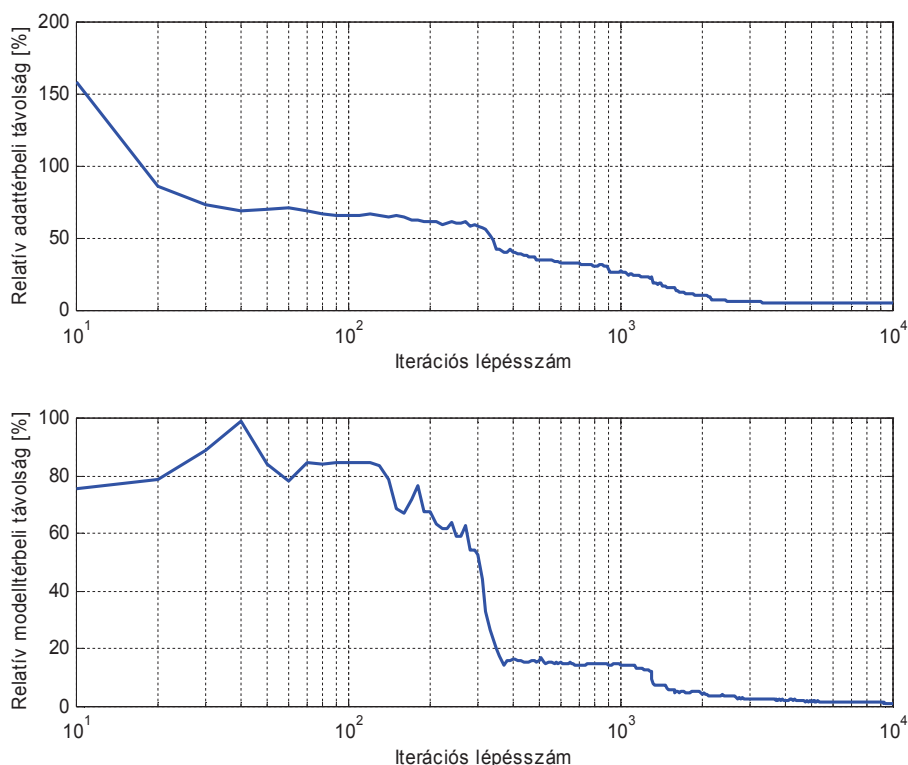
$$\psi_2(x) = 2.6 \cdot \frac{3x^2 - 1}{2} + 0.1 \cdot x + 5.1m.$$

10. táblázat: Inverziós célmodell

Réteg	POR	SX0	VSH	Réteghatár	B0	B1	B2
1	0.25	1.00	0.15	1	2.4	0.1	1.2
2	0.10	1.00	0.80	2	5.1	0.1	2.6
3	0.30	0.80	0.10				

A 17. ábrán hasonlóan konvergens eljárást láthattunk, mint 16. ábra esetében. Az 1-300 iterációs lépések környékén történik a réteghatárokat leíró sorfejtési együtthatók keresése. Ez a folyamat a $q=350$. iteráció környékén befejeződik. Ezután 20% alatti modell-távolságoknál a petrofizikai paraméterek finomítása történik lassú és egyenletes konvergencia mellett.

Az inverzióval meghatározott paraméterek közül tekintsük először a rétegvastagságokat (ld. 18. ábra). Startmodellnek a $z_1=2$ és $z_2=5$ egyenessel jellemezhető réteghatárokat választottuk. Az inverziós becslésként kapott vastagságfüggvények igen pontosan illeszkednek a célmodellben meghatározott függvényekhez. Az illeszkedés mérése céljából bevezethetjük az ún. relatív függvény-távolságot, mely



17. ábra: Relatív adat- és modelltávolság változása az iterációs lépésszám függvényében

$$D_{\text{ígv}} = \sqrt{\frac{1}{(R-1)X} \sum_{r=1}^{R-1} \sum_{j=1}^X \left(\frac{Z_r^{(\text{egz})}(x_j) - Z_r^{(\text{becs})}(x_j)}{Z_r^{(\text{egz})}(x_j)} \right)^2} = 0.67\%$$

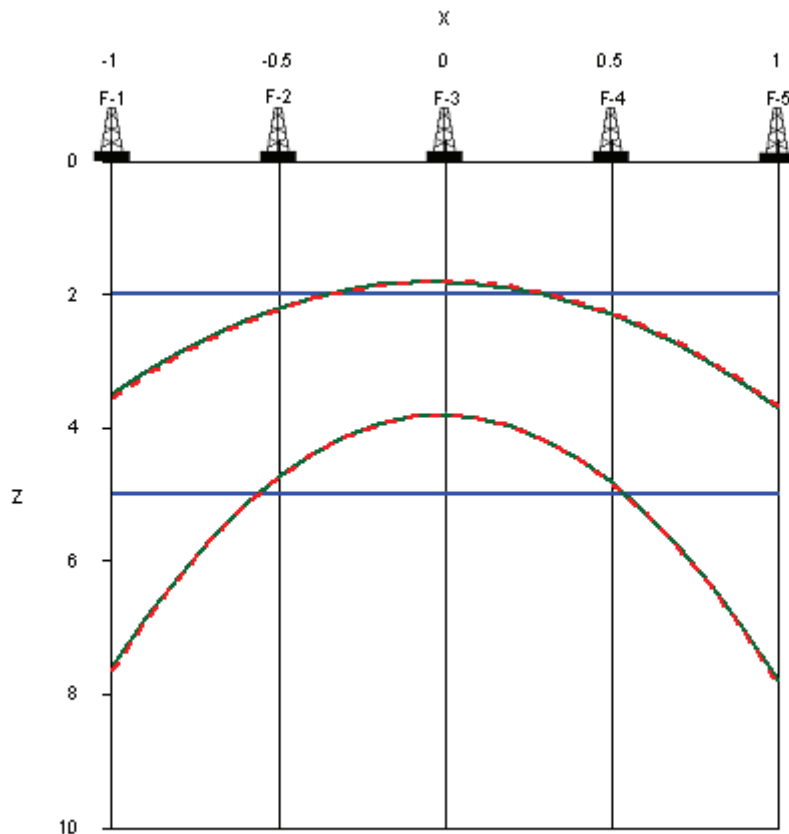
ahol $Z_r(x)$ az r -edik réteghatárt leíró függvény. Látható, hogy ez 1% alatt van, ami igen jó eredményre utal. A meghatározott petrofizikai paraméterek is igen pontosak. A 11. táblázatban összehasonlíthatjuk az inverzióval becsült és a célmodell paramétereit. Az optimum adattérbeli távolsága $D_d=5.00\%$, a modelltávolság pedig $D_m=1.32\%$. E mellett hibaszámítást is végeztünk, mely azon alapult, hogy a globális optimalizáció utolsó lépésében kiszámítottuk a Jacobi-mátrixot. Az ebből számított kovariancia mátrix főátlóbeli elemeiből vont négyzetgyök pedig a becslési hibákat szolgáltatta. Látható, hogy a hiba mértéke század térfogatszázalék nagyságrendbe esik. Az átlagkorrelációs szám azt mutatja, hogy a megoldás megbízható. Az inverziós eredményekből a szénhidrogén kutatás számára további fontos paramétereket is leszámaztattunk: SCHM=SX0-SW kitermelhető szénhidrogén-telítettség, SCHR=1-SX0 maradék szénhidrogén-telítettség. A kötött víz telítettség (SWR) felhasználásával kiszámítottuk a rétegek abszolút permeabilitását

$$\text{PERM} = 0.136 \cdot \frac{(100 \cdot \text{POR})^{4.4}}{(100 \cdot \text{SWR})^2}$$

melyet a Baker Atlas Express CRA (Complex Reservoir Analysis) modulja alapján vettünk figyelembe. A 12. táblázat azt mutatja, hogy ezen derivált paraméterek is elég pontosak, ill. olyan problémás paraméterek is, mint pl. a hidraulikus vezetőképesség, az intervallum inverziós módszerrel keresztül pontosan meghatározhatók.

11. táblázat: Intervallum inverziós eredmények

Réteg	Paraméter	Célmodell	Becsült modell	Hiba	Átlagkorreláció
1	POR	0.2500	0.2509	± 0.0008	0.1921
	SX0	1.0000	1.0000	± 0.0007	
	VSH	0.1500	0.1490	± 0.0006	
2	POR	0.1000	0.1029	± 0.0015	
	SX0	1.0000	0.9983	± 0.0007	
	VSH	0.8000	0.7968	± 0.0016	
3	POR	0.3000	0.3002	± 0.0006	
	SX0	0.8000	0.8001	± 0.0004	
	VSH	0.1000	0.0998	± 0.0003	



18. ábra: Intervallum inverzióval meghatározott rétegvastagság függvények (kék: startmodell, zöld: célmodell, piros: becsült modell)

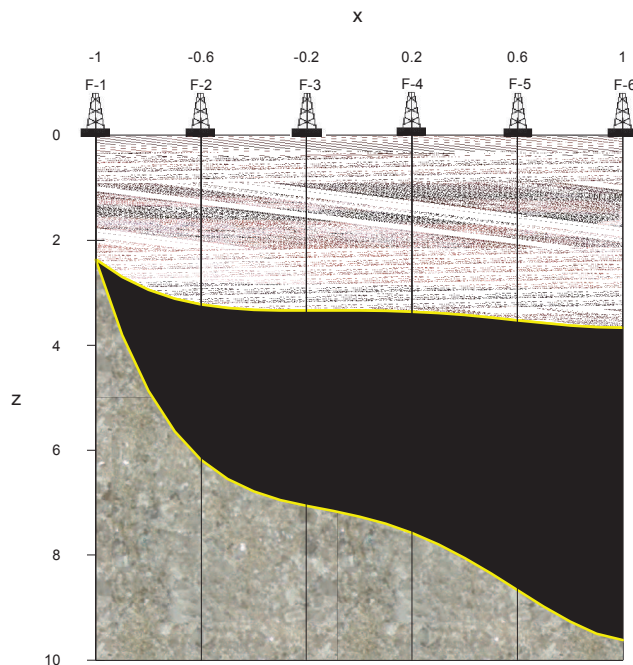
12. táblázat: Származtatott paraméterek

Réteg	Paraméter	Céltérték	Számított
	SW	1.0000	1.0000

1	VSD	0.6000	0.6001
	SCHM	0	0
	SCHR	0	0
	PERM	481 mD	489 mD
2	SW	1.0000	0.9915
	VSD	0.1000	0.1003
	SCHM	0	0.0068
	SCHR	0	0.0017
3	PERM	8.54 mD	9.68 mD
	SW	0.3277	0.3279
	VSD	0.6000	0.6000
	SCHM	0.4723	0.4722
	SCHR	0.2000	0.1999
	PERM	1073 mD	1076 mD

3.2. Petrofizikai paraméterek és a réteghatárok együttes meghatározása 2-D-s komplex tároló szerkezeten

A 2.1 fejezetbeli antiklinális modell inverziós meghatározása után azt vizsgáltuk milyen mértékben bonyolíthatjuk a réteghatárok profil menti változását. Elméletileg az x-koordináta mentén gyorsan változó réteghatárok is kezelhetők, azonban itt fontos szem előtt tartani, hogy a réteghatárokat leíró ismeretlenek száma egyre bonyolultabb esetekben szintén gyorsan növekszik. Ez csökkenti a túlhatározottságot, ezzel együtt a minőségét és megbízhatóságát az inverziós eredményeknek. Ugyanakkor a nagy ismeretlenség numerikusan is instabillá teheti az eljárást. Tapasztalataink szerint kb. tizedfokig lehetséges elmenni a sorfejtésnél, azonban ez függ a rétegek és az erózió ismeretlenek számától is



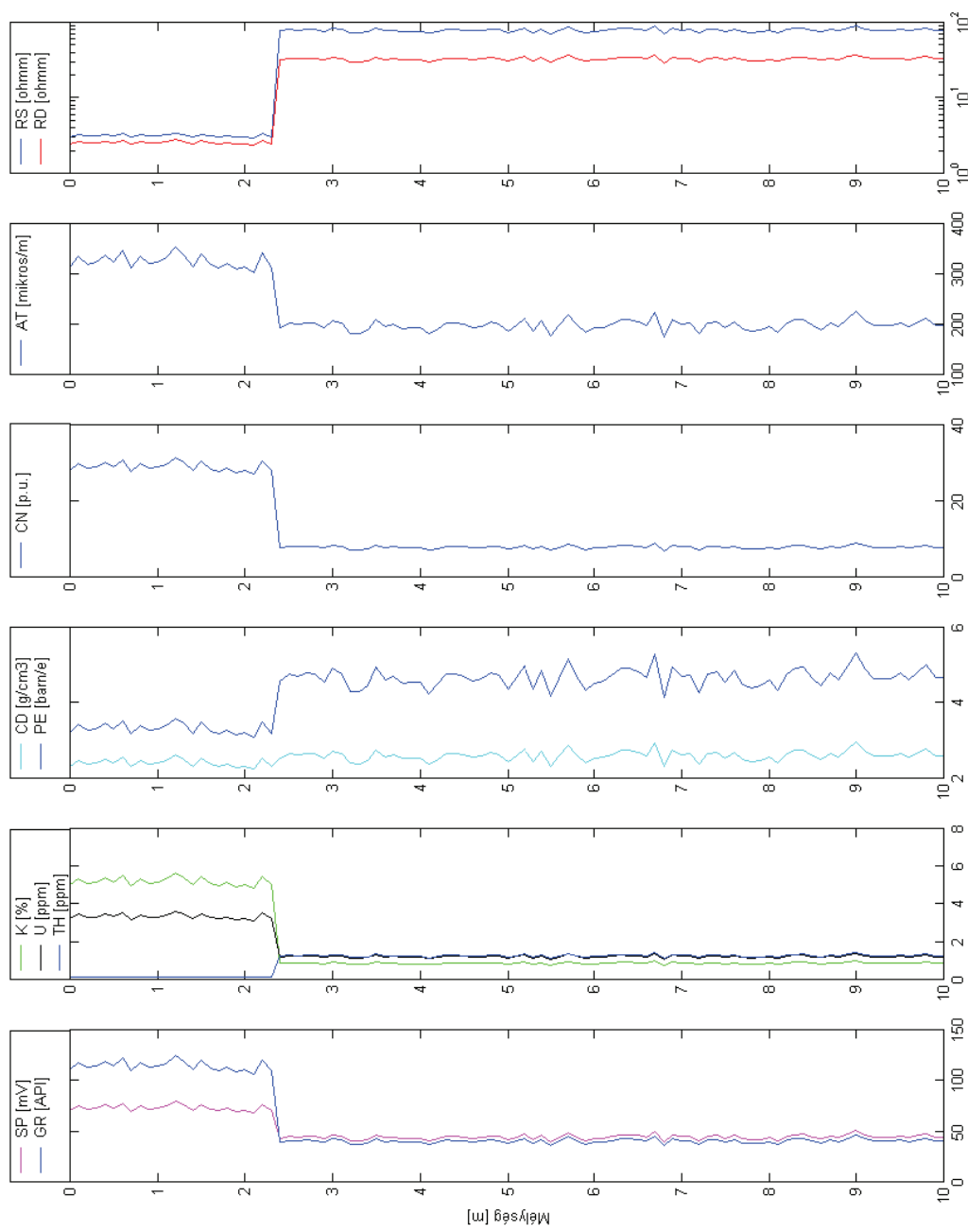
19. ábra: 2-D komplex szénhidrogén-tároló modell

A következő példa 4-edfokú Legendre polinomos modellt mutat be (ld. 19.ábra). A modell érdekessége, hogy az eddigi agyag-homok litológia mellett mészkő komponenst is tartalmaz (komplex tároló). A fenti modell 6 fúrást tartalmaz (W-1–W-6), az adatok száma így $N=6666$. Ezzel szemben az ismeretlenek száma $M=22$. A mélyfúrások szintetikus adatait (1)-(11) válaszegyenletek alapján generáltuk, majd 5%-os Gauss eloszlásból származó hibával terheltük. A fúrások szelvényanyagát a 20-25. ábrák tartalmazzák.

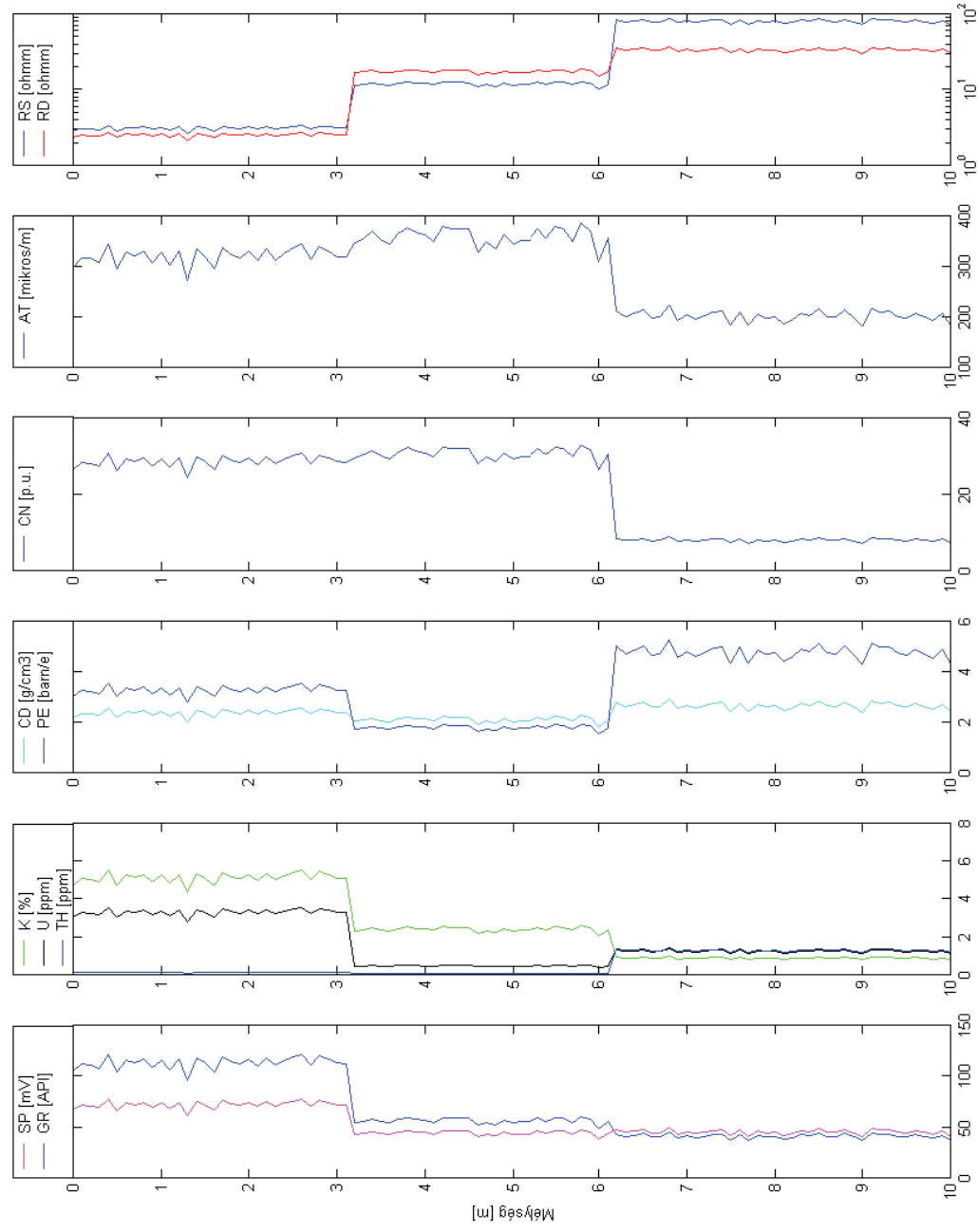
A célmodell paramétereinek az értékét a 16. táblázatban láthatjuk. A táblázat a rétegenként homogén földtani modell petrofizikai paraméterein kívül a Legendre polinomok B_k sorfejtési együtthatóit tartalmazza (ahol k : az x -koordináta megfelelő hatványához tartozó együttható indexe). Az inverzió célja 13. táblázat elemeinek a meghatározása, ahol a réteghatárok laterális változását a következő két függvény írja le:

$$\psi_1(x) = -0.15 \cdot \frac{35x^4 - 30x^2 + 3}{8} + 0.25 \cdot \frac{5x^3 - 3x}{2} - 0.15 \cdot \frac{3x^2 - 1}{2} + 0.4 \cdot x + 3.32 \text{ m}$$

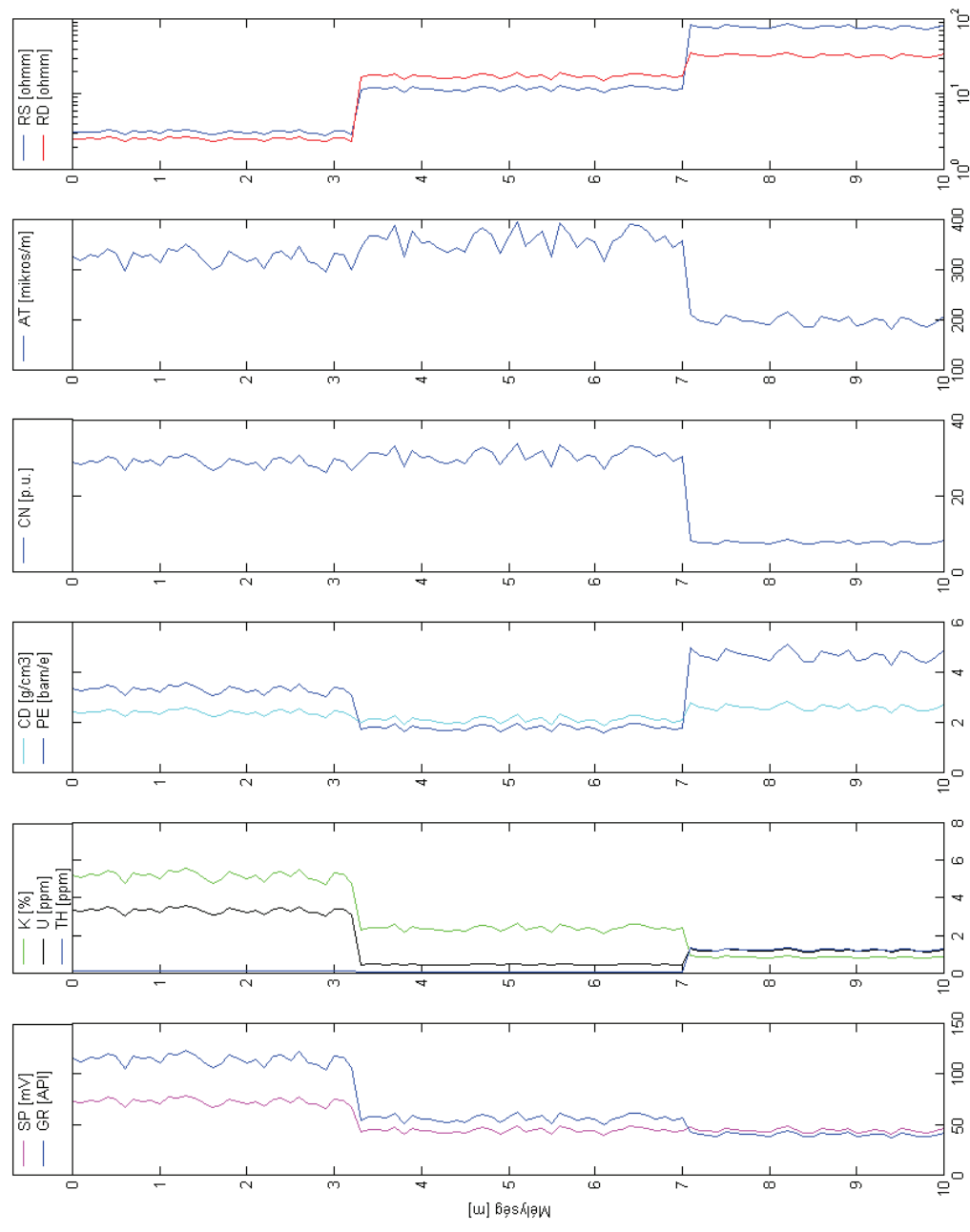
$$\psi_2(x) = -0.61 \cdot \frac{35x^4 - 30x^2 + 3}{8} + 0.97 \cdot \frac{5x^3 - 3x}{2} - 0.59 \cdot \frac{3x^2 - 1}{2} + 2.65 \cdot x + 7.20 \text{ m.}$$



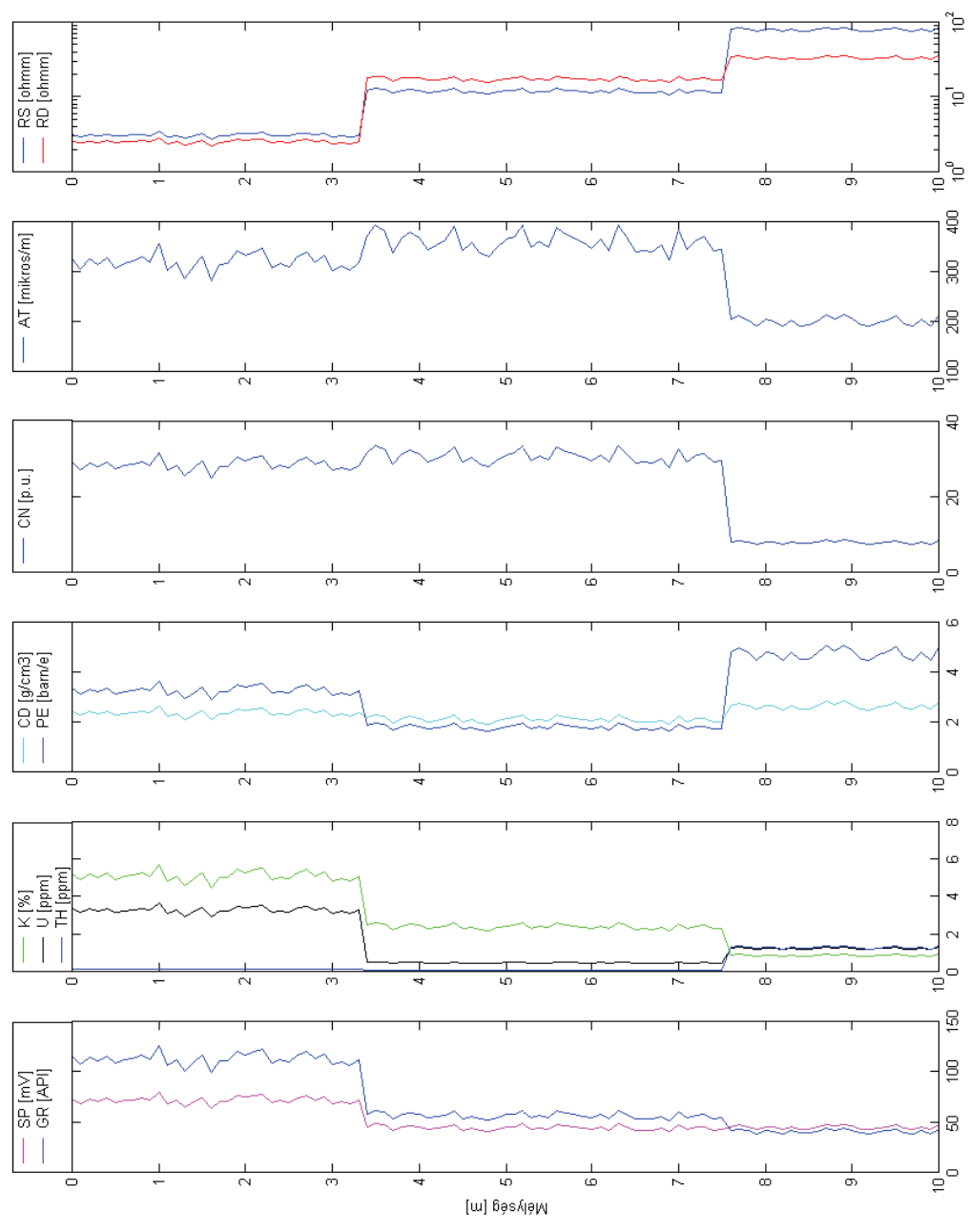
20. ábra: W-1 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrás geofizikai szelvényei



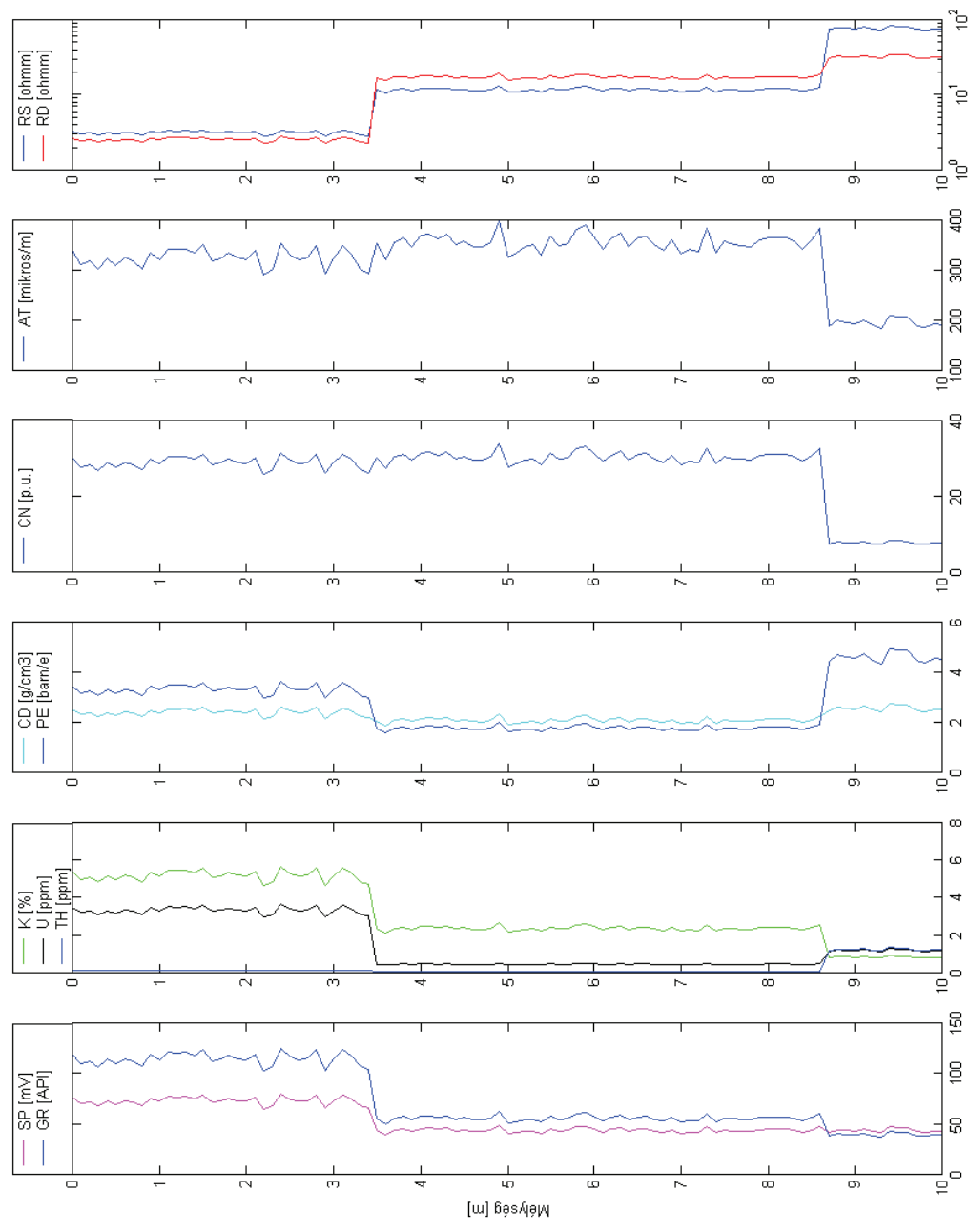
21. ábra: W-2 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrás geofizikai szelvényei



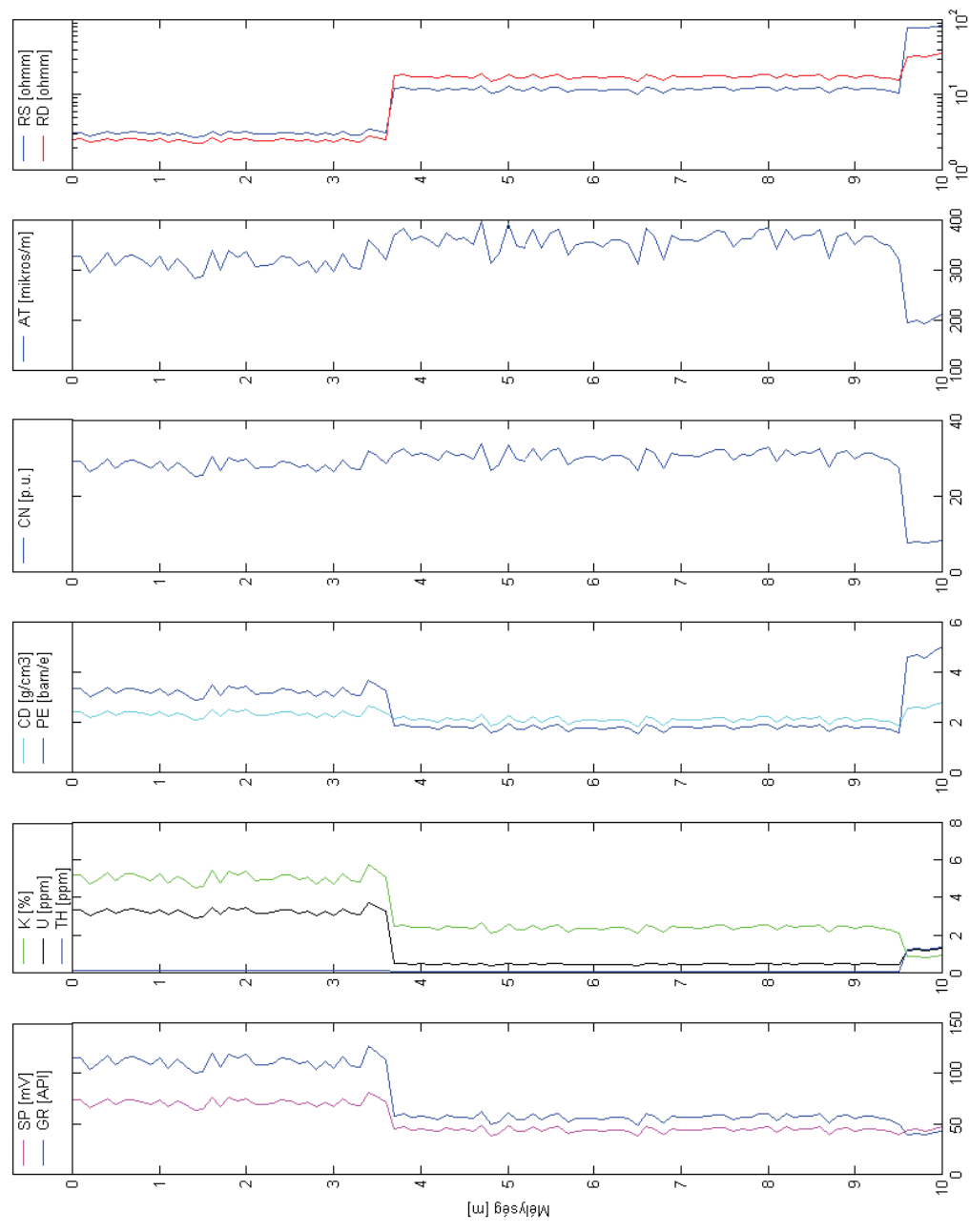
22. ábra: W-3 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrás geofizikai szelvényei



23. ábra: W-4 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrési geofizikai szelvényei



24. ábra: W-5 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrás geofizikai szelvényei

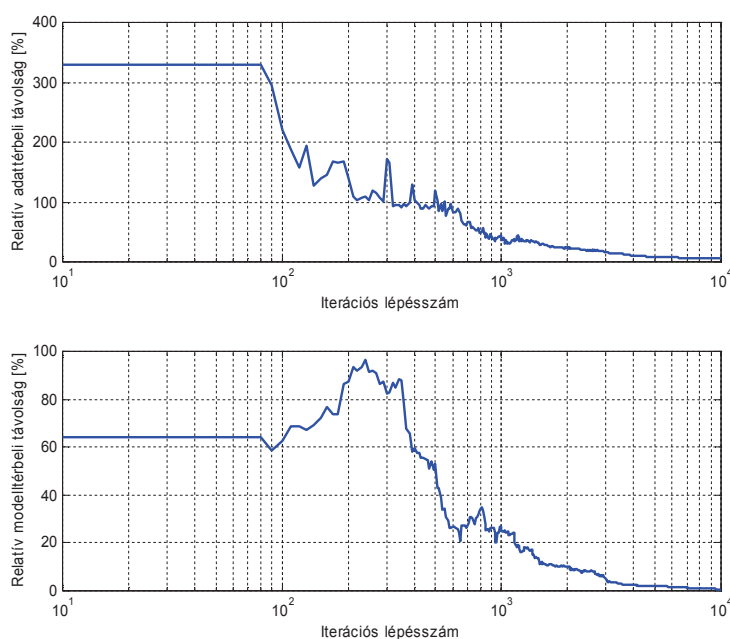


25. ábra: W-6 jelű fúrás szintetikus (5% zajjal terhelt) mélyfúrás geofizikai szelvényei

13. táblázat: Inverziós célmodell

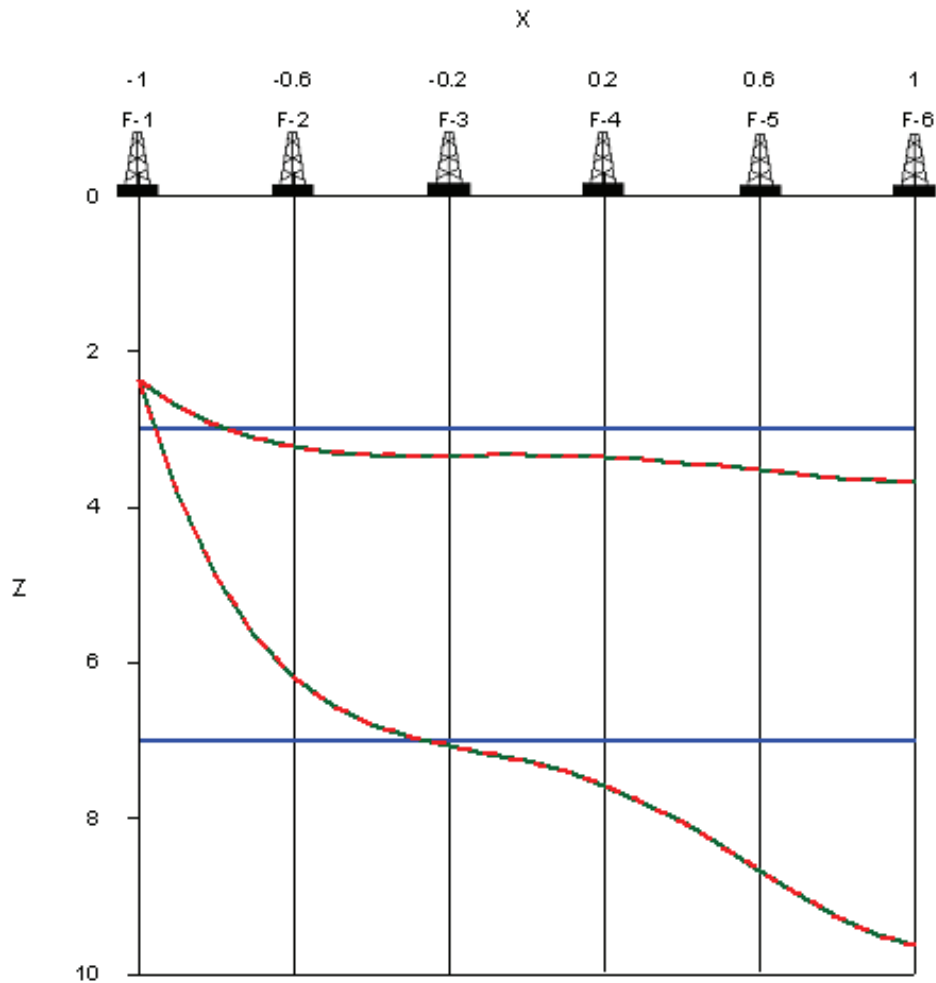
Réteg	POR	SX0	VSH	VSD	R. határ	B0	B1	B2	B4	B5
1	0.05	1.00	0.80	0.10	1	3.32	0.40	- 0.15	0.25	- 0.15
2	0.30	0.80	0.10	0.60	2	7.20	2.65	-	0.97	-
3	0.05	1.00	0.10	0.05				0.59	0.61	

Az intervallum inverziós eljárás stabilnak és konvergensenk bizonyult. A 26. ábrán látható az adat- és modell-távolság csökkenése az iterációs lépések számának növekedésével. A réteghatárok helyzetét a $q=400$. iteráció végére rögzítette a módszer. Ezután a petrofizikai paraméterek finomítása történt egészen a stopkritérium teljesüléséig.



26. ábra: Relatív adat- és modell-távolság változása az iterációs lépésszám függvényében

Az optimum adattérbeli távolsága $D_d=5.42\%$, a modell-távolság pedig $D_m=0.70\%$. Ez utóbbi mennyiség javulást mutatott a 2-odfokú közelítéssel szemben. A meghatározott rétegvastagság függvényeket a 27. ábrán láthatjuk. Az erre vonatkozó relatív függvénytávolság is kisebb lett, mint az előző modell esetében: $D_{fgv}=0.01\%$. Mindez azt mutatja, hogy az intervallum inverziós eljárás stabil és pontos, ill. várhatóan bonyolultabb laterális változások is biztonságosan leírhatók vele. Ebben a példában pl. látható, hogy a W-1 jelű fúrásban a 2-odik réteg teljesen el is tűnik. Majd a mészkő W-2-ben megjelenik és folyamatosan elmélyül. A módszer ezt a geometriai struktúrát is felismerte.



27. ábra: Intervallum inverzióval meghatározott rétegvastagság függvények (kék: startmodell, zöld: célmodell, piros: becsült modell)

A 14. táblázat alapján látható, hogy az inverzióval becsült- és a célmodell paramétereit jól illeszkednek egymáshoz. A legnagyobb hiba mértéke tized térfogatszázalék nagyságrendű. Az átlagkorrelációs szám is azt mutatja, hogy a megoldás megbízható. Az inverziós eredményekből lezármaztatott eredményeket a 15. táblázat tartalmazza. Ezek is elég pontosak. Egyedül a második réteg abszolút permeabilitása tér el számottevően a célértéktől. Azonban a gyakorlatban e paramétert csak nagyságrendileg tudjuk meghatározni. Így ez az eredmény elfogadható, és ugyanúgy szignifikánsan jelzi a jó áteresztőképességű szénhidrogén-tároló jelenlétét a két impermeábilis réteg között.

14. táblázat: Intervallum inverziós eredmények

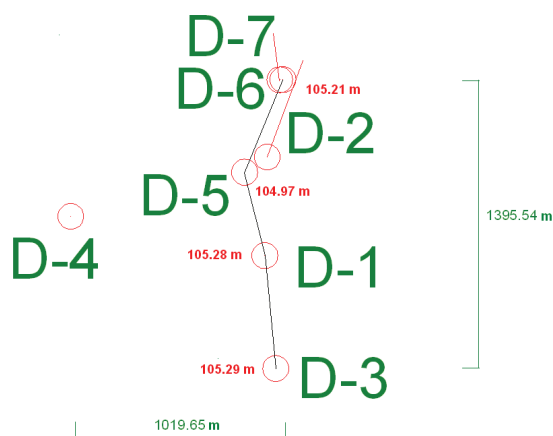
Réteg	Paraméter	Célmodell	Becsült modell	Hiba	Átlagkorreláció
1	POR	0.0500	0.0487	± 0.0012	0.1658
	SX0	1.0000	1.0000	± 0.0007	
	VSH	0.8000	0.8177	± 0.0016	
	VSD	0.1000	0.0903	± 0.0011	
2	POR	0.3000	0.2817	± 0.0006	
	SX0	0.8000	0.8097	± 0.0004	
	VSH	0.1000	0.1074	± 0.0003	
	VSD	0.6000	0.6113	± 0.0006	
3	POR	0.0500	0.0503	± 0.0004	
	SX0	1.0000	0.9990	± 0.0008	
	VSH	0.1000	0.0997	± 0.0006	
	VSD	0.0500	0.0503	± 0.0017	

15. táblázat: Származtatott paraméterek

Réteg	Paraméter	Célérték	Számított
1	SW	1.0000	1.0000
	VLM	0.0500	0.0503
	SCHM	0	0
	SCHR	0	0
	PERM	0.40 mD	0.36 mD
2	SW	0.3277	0.3480
	VSD	0	0.0001
	SCHM	0.4723	0.4617
	SCHR	0.2000	0.1903
	PERM	1073 mD	814 mD
3	SW	1.0000	0.9950
	VSD	0.8000	0.7997
	SCHM	0	0.0040
	SCHR	0	0.0010
	PERM	0.40 mD	0.41 mD

3.3. In situ 2-D rétegvastagság-meghatározás intervallum inverzióval

Egy magyarországi területen négy szénhidrogén-kutató fúrás karotázs adatait használtuk fel az intervallum inverzió számára. A 14. ábrán szereplő D3, D1, D5 és D6 jelű fúrás nagyjából egy vonalon helyezkedik el (ld. fekete vonal). A teljes szelvényhossz 1.4 km, a tengerszint feletti magasságok (eleváció) pirossal a fúrások mellett láthatók. Az adatrendszert a négy fúrásban felvett GR (természetes gamma), K (kálium spektrális természetes gamma), TH (tórium spektrális természetes gamma), U (urán spektrális természetes gamma), ZDEN (sűrűség), AT (akusztikus terjedési idő), RS (sekély behatolású fajlagos ellenállás), RT (valódi fajlagos ellenállás) szelvények képezték (dz=0.1m). A természetes gamma szelvény pirossal a 15-18. ábrák 1. track-jén látható.

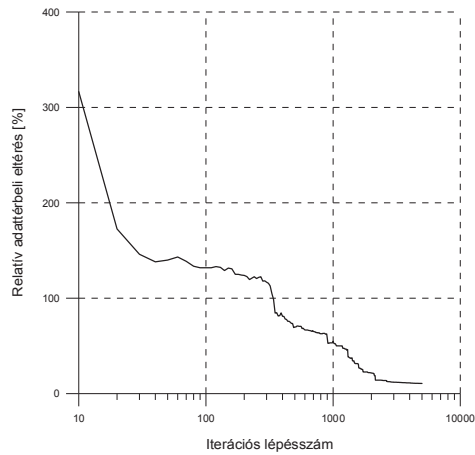


14. ábra: A vizsgált területen elhelyezkedő mélyfúrások

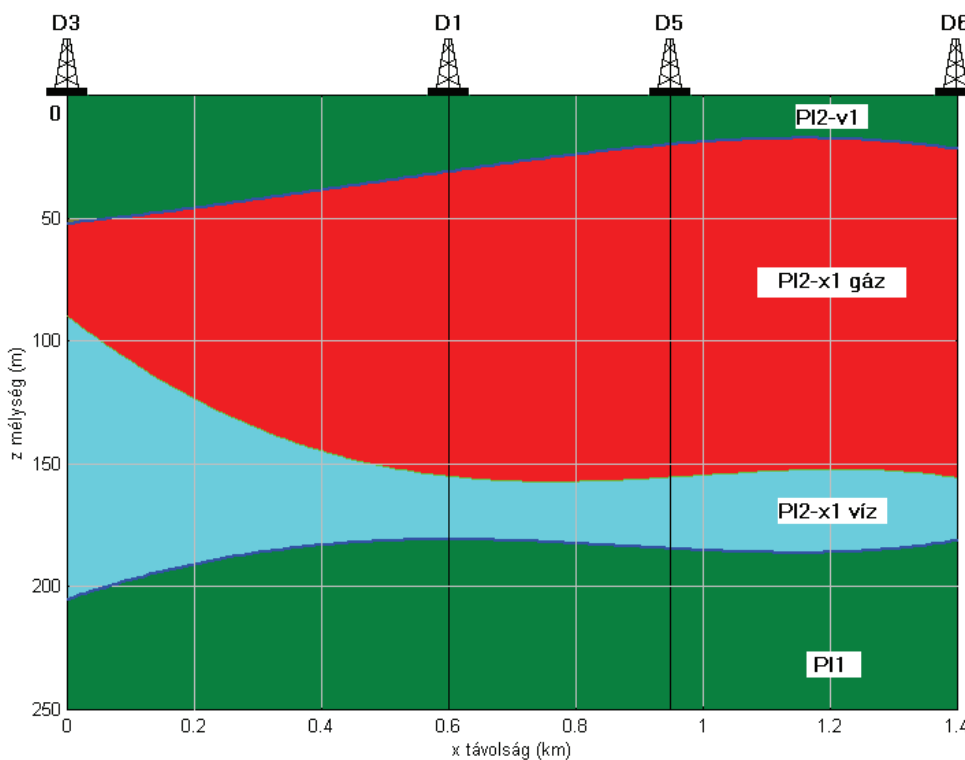
Az inverziót MSA-I algoritmussal végeztük 5000 iterációs lépéssel. Startmodellünk a rétegvastagságok tekintetében $z1(x)=50m$, $z2(x)=200m$, $z12(x)=85m$, ahol $z1$ a szénhidrogéntároló felső réteghatára, $z2$ annak alsó réteghatára és $z12$ a gáz- és víz fázishatár. Így vertikálisan a modell 4 réteges (fedő, gáztároló, víztároló, fekü). Az inverzió során a rétegvastagság függvényeket 4-edfokú hatványközelítéssel határoztuk meg, míg a petrofizikai paraméterek értékét a CLASS értelmezési rendszerből vettük át. Az eredmény 10.61% adattávolság mellett adódott (ld. 19. ábra), melynek 2-D ábrázolását a 20. ábrán (ahol $z=1800m$ mélység transzformációt alkalmaztunk a stabilabb inverzió érdekében), eredmény-paramétereit pedig a 13. táblázatban láthatjuk.

13. táblázat: Intervallum inverziós végeredmény

Réteghatár	POR	VSH	SW	B1	B2	B3	B4	B5
-	0.08	0.65	1.00	-	-	-	-	-
$z1$	0.25	0.10	0.26	9.8622	0.0001	-13.962	-29.086	52.200
$z12$	0.25	0.10	1.00	27.4875	0.0001	-163.854	201.042	89.900
$z2$	0.12	0.45	1.00	-18.570	0.0002	87.7897	-89.162	205.100



19. ábra: Konvergencia alakulása az intervallum inverzió során



20. ábra: 2-D intervallum inverzió eredménye (0m≈1800m)

Az ábra egy valós CH-tároló in-situ mélyfúrési geofizikai mérési adatok intervallum inverziójával kapott morfológiáját mutatja, megvalósítva a kutatás során kitűzött egyik legfontosabb tudományos célkitűzést.

4. A CH-TÁROLÓ MORFOLÓGIÁJA MEGHATÁROZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA 3D SZERKEZETEKEN

Az előzőekben ismertettük 2D CH-tároló szerkezetek morfológiájának meghatározására szolgáló eljárást és teszteltük 2D modellen számított szintetikus adatokkal és egy valós CH-tárolón mért in-situ mélyfúrési geofizikai adatokkal. A módszer 3D földtani szerkezetekre való kiterjesztése kézenfekvő módon történik.

Legyen x, y a két laterális koordináta és tegyük fel, hogy a mélyfúrások a felszínen egy adott területre esnek, amelyen belül vagyunk kíváncsiak az egyes réteghatár felületek geometriájára. Az intervallum inverziós eljárásban intervallumon értelmezett válaszgyenleteket szükséges definiálnunk, mellyel az 1-D válaszfüggvények rendszerét kiterjeszthetjük 3D-s esetre. Ekkor a petrofizikai paramétereket, mint a z mélység és az x, y laterális koordináta függvényeit írjuk fel. Az így értelmezett elvi szelvényadatok tehát

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

ahol $\varphi_k(x, y, z)$ az k -edik számított szelvényadat az x, y laterális koordinátákkal jellemzett fúrás z mélységpontjában, $m_i(x, y, z)$ pedig ugyanott az i -edik közetfizikai paraméter értéke. A fenti válaszgyenletben a modellparaméterek folytonos függvények, melyek egy adott pontbeli értékét diszkrétizálással határozzuk meg. A mélységfüggő válaszgyenletek paramétereinek diszkrétizálására sorfejtési eljárást alkalmazhatunk.

A sorfejtéses intervallum inverziós eljárás keretében ismert bázisfüggvény-rendszerek segítségével diszkrétizáljuk a petrofizikai paramétereket. A bázisfüggvények típusa szabadon megválasztható, és az adott földtani szituációhoz illeszthető. Tekintsük a fenti mélységfüggő válaszgyenletben szereplő i -edik rétegjellemző paraméter általános sorfejtett alakját

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

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 bázisfüggvényt jelöli.

Ezután az algoritmus hasonló az 2D esettel. Az elvi adatokat a kétváltozós válaszfüggvények alapján kell számítanunk

$$d_j^{(e)}(x, y, z) = g_j(x, y, z, \dots, B_q^{(i)} \dots)$$

ahol „ B ” a sorfejtési együtthatókat szimbolizálja. E sorfejtési együtthatók képezik az inverz feladat ismeretlenjeinek körét. Az inverz feladatot ezután a mért és számított adatok eltérését jellemző valamely vektornorma minimalizálásával hajtjuk végre. Az algoritmus további részletei a 2D szerkezetek vizsgálatára kidolgozott eljárással megegyeznek.

III. AZ ÖTÉVES KUTATÓMUNKA EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A kutatás során számos új eredmény született. Ezeket részben a módszerfejlesztés, részben pedig szoftverfejlesztés terén értük el.

1. Módszerfejlesztési eredmények:

A kutatómunka fő iránya az intervallum inverziós eljárás fejlesztése volt. A kutatás előzményeként említett 1-D szerkezetekre vonatkozóan kidolgozott eljárást tovább fejlesztettük 2-D és 3-D szerkezetekre. Ennek során elért eredményeink:

Az intervallum inverzió lényegi sajátossága az inverz feladat túlhatározottsági fokának nagyságrendi növekedése. Ez teszi lehetővé az inverziós változók számának növelését és a petrofizikai paraméterek pontosabb meghatározását, ezzel pedig a bonyolultabb földtani szerkezetek vizsgálatát. Ugyancsak az intervallum inverziós eljárás

rás nagyfokú túlhatározottságának köszönhetően további (a mélyfűrési geofizikai adatok pontonkénti kiértékelése esetén nem meghatározható) ismeretleneket vonhatunk be az inverzióba. Ez teszi lehetővé a zónaparaméterek mélyfűrési geofizikai adatokból – a többi petrofizikai jellemzővel együtt történő – meghatározását. Ennek algoritmusát kidolgoztuk és az eljárás jóságát szintetikus és terepi adatokon egyaránt igazoltuk.

Az intervallum inverzió új lehetőségeként a réteghatárok mélységkoordinátáinak meghatározását is lehetővé teszi. Kidolgoztuk a réteghatár meghatározás algoritmusát és a kifejlesztett programok segítségével szintetikus, majd terepi adatokon igazoltuk az eljárás jóságát.

A réteghatár koordináták intervallum inverzióon belül történő meghatározásának lehetősége a CH tároló morfológiája vizsgálatának új eszközét nyújtja. Ennek módszerét kidolgoztuk 2-D és 3-D szerkezetekre vonatkozóan is. A laterálisan változó rétegvastagságokat több mélyfűrési adatainak együttes intervallum inverziójával, a petrofizikai paraméterek és a térbeli réteghatár felület sorfejtéses diszkretizációjára alapozva határoztuk meg. A módszert szintetikus és terepi adatok felhasználásával teszteltük.

2. Szoftverfejlesztési eredmények:

A kidolgozott új eljárások működését az adott célra kidolgozott kutatói szoftvereken igazoltuk.

A mélyfűrési geofizikai adatok intervallum inverziójára programrendszerrel dolgoztunk ki MATLAB környezetben. A szoftver grafikus felhasználói felületet kínál az adatok (szelvények) beolvasására, a megfelelő modell és válaszfüggvény rendszer kiválasztására, a meghatározandó ismeretlenek specifikálására, az inverziós módszer jellemzőinek meghatározására és az eredmények megjelenítésére. A kifejlesztett szoftvert kiterjedt tesztelésnek vetettük alá.

A fentiekben összefoglalt módszerfejlesztési eredményeket hazai és nemzetközi szakmai szempontok szerint egyaránt új tudományos eredménynek tekintjük. A további kutatásokat az intervallum inverziós eljárásban rejlő pontossági és megbízhatósági tartalék kiaknázása ill. a kidolgozott szoftverek esetleges felhasználói igények alapján történő továbbfejlesztése területén látjuk fontosnak.

A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének munkatársai ezúton is köszönetet mondanak a OTKA-nak az igen érdekes és aktuális tématerületen lehetővé tett kutatásért, amely a Tanszék szakmai fejlődése szempontjából is jelentősnek bizonyult.

Miskolc, 2010. február 3.

Dr. Dobróka Mihály
egyetemi tanár, témavezető