

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

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Írta:

**SZABÓ NORBERT PÉTER**

Miskolc

2018

## Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS .....	2
1. MÉLYFÚRÁSI GEOFIZIKAI ADATOK INTERVALLUMINVERZIÓJA .....	6
1.1. KÖZETFIZIKAI PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA LEGENDRE-POLINOMOKON ALAPULÓ SORFEJTÉSES INVERZIÓS ELJÁRÁSSAL .....	6
1.1.1. A sorfejtési együtthatók meghatározása linearizált intervalluminverziós módszerrel .....	9
1.1.2. A sorfejtési együtthatók meghatározása kombinált intervalluminverziós eljárással .....	11
1.2. A LEGENDRE-POLINOMOKON ALAPULÓ SORFEJTÉSES (KOMBINÁLT) INTERVALLUMINVERZIÓS ELJÁRÁS GYAKORLATI ALKALMAZÁSA .....	15
2. A ZÓNAPARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA AZ INTERVALLUMINVERZIÓS ELJÁRÁS KERETÉBEN .....	21
2.1. A ZÓNAPARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA GLOBÁLIS INTERVALLUMINVERZIÓS ELJÁRÁSSAL .....	22
2.2. A TEXTURÁLIS ÉS FAJLAGOS ELLENÁLLÁS PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA INTERVALLUMINVERZIÓS MÓDSZERREL .....	25
3. KOMPLEX SZÉNHIIDROGÉN-TÁROLÓK KÖZETFIZIKAI PARAMÉTEREINEK MEGHATÁROZÁSA INTERVALLUMINVERZIÓS ELJÁRÁSSAL .....	27
4. FÚRÓLYUK-GEOFIZIKAI ADATOK FELTÁRÓ FAKTORANALÍZISE .....	32
4.1. A JÖRESKOG-FÉLE KÖZELÍTŐ ELJÁRÁS .....	33
4.2. AZ ITERATÍVAN ÚJRASÚLYOZOTT FAKTORANALÍZIS MÓDSZERE .....	35
4.3. A GENETIKUS ALGORITMUSON ALAPULÓ FAKTORANALÍZIS MÓDSZERE .....	37
5. AZ AGYAGTARTALOM MEGHATÁROZÁSA A FÚRÓLYUKSZELVÉNYEK FAKTORANALÍZISÉVEL .....	40
5.1. SZÉNHIIDROGÉN-TÁROLÓ KÉPZŐDMÉNYEK AGYAGTARTALMÁNAK MEGHATÁROZÁSA .....	42
5.2. KIUGRÓ ADATOKAT TARTALMAZÓ ADATRENDSZEREK REZISZTENS FAKTORANALÍZISE .....	46
5.3. AZ AGYAGTARTALOM MEGHATÁROZÁSA KÉTDIMENZIÓS FAKTORANALÍZISSSEL .....	51
6. A HIDRAULIKUS VEZETŐKÉPESSÉG MEGHATÁROZÁSA VÍZKUTATÓFÚRÁSOK SZELVÉNYEINEK FAKTORANALÍZISÉVEL .....	54
7. KÖZETFIZIKAI MENNYISÉGEK MEGHATÁROZÁSA MÉRNÖKGEOFIZIKAI SZONDÁZÁSI ADATOK FAKTORANALÍZISÉVEL .....	61
7.1. A VÍZTELÍTTETTSÉG MEGHATÁROZÁSA .....	61
7.2. A SZÁRAZ SŰRŰSÉG MEGHATÁROZÁSA .....	66
7.3. A SZELVÉNYPÓTLÁS MEGVALÓSÍTÁSA FÚRÓLYUK-GEOFIZIKAI ADATOK FAKTORANALÍZISÉVEL ....	67
8. A ZÓNAPARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA META-ALGORITMIKUS INVERZIÓS ELJÁRÁSSAL .....	69
8.1. MÉRNÖKGEOFIZIKAI SZONDÁZÁSI ADATOK EGYDIMENZIÓS GENETIKUS META-ALGORITMIKUS INVERZIÓJA .....	72
8.2. MÉRNÖKGEOFIZIKAI SZONDÁZÁSI ADATOK KÉTDIMENZIÓS GENETIKUS META-ALGORITMIKUS INVERZIÓJA .....	76
9. AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA .....	79
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....	83
FELHASZNÁLT IRODALOM .....	83
MELLÉKLETEK .....	89

## Bevezetés

A fúróllyuk-geofizikai szelvények együttes kiértékelésére kifejlesztett inverziós és statisztikai eljárásokkal hatékonyan és a minőségellenőrzés lehetőségével nyerhető ki az ásványi nyersanyagok azonosításához és mennyiségi becsléséhez szükséges közetfizikai információ. Napjaink gyors technológiai fejlődésére jellemző, hogy nemcsak a mérési eszközöket és módszereket, hanem az adatfeldolgozási eljárásokat is folyamatosan korszerűsítik, mivel a szakmai elvárásoknak megfelelően egyre bonyolultabb földtani környezetben kell nagy pontossággal és megbízhatósággal meghatározni a vizsgált modell paramétereit. Ennek megfelelően a több mérésfajtát magában foglaló nagyméretű adatrendszerek gyors és megbízható inverziós feldolgozására, valamint azok robusztus statisztikai elemzésére kifejlesztett módszerek mind az olajipari, mind pedig a felszínközeli alkalmazások szempontjából nagy jelentőséggel bírnak.

A geofizikai inverziós módszerek felhasználásával lehetővé válik a kőzetek (közvetlenül) nem mérhető fizikai tulajdonságainak in situ adatokból történő meghatározása. A kérdéses közetfizikai jellemzők, mint például a porozitás, az agyagtartalom és a víztelítettség, a szondaválaszfüggvények ismeretében kapcsolatba hozhatók a mérési adatokkal és inverziós eljárással becsülhetők (*Alberty és Hashmy, 1984*). A számítógép vezérelt szelvényértelmezés néhány évtizede alkalmazza az inverziós módszereket elsősorban a szénhidrogén-tároló agyagos homokkövek, illetve korlátozott számú ásványtípus alkotta kőzetek vizsgálatára (*Mayer és Sibbit, 1980*). A meghatározható ismeretlenek számának egyrészt a véges számú mérésfajta, másrészt a hagyományosan alkalmazott mélységpontenkénti inverziós kiértékelési technika szab határt. Ez utóbbi keretében kismértékben túlhatározott inverz feladatok sorozatát oldjuk meg, mely meglehetősen zajérzékeny számítási művelet és a becslési pontossága is korlátozott. Mivel a pontenkénti inverzió egyszerre csak egyetlen mélységhez tartozó adatrendszert dolgoz fel, ezért nem alkalmas a ponttól távolabb eső kőzettestek fizikai tulajdonságainak meghatározására. A nagyszámú válaszfüggvény-állandót (más néven zónaparamétert) az ipari értelmezőrendszerek bemenő (ismert) mennyiségként kezelik, melyet az inverziós eljárást megelőzően külső forrásból - általában laboratóriumi mérésekből vagy irodalmi adatok alapján - adnak meg (*Ball és szerzőtársai, 1987*). A mérési adatokat terhelő zaj mellett a zónaparaméterek közelítő megválasztása további bizonytalansággal terheli az inverziós kiértékelés eredményét.

A hagyományos inverziós eljárások a mérési változók és a vizsgált modell paramétereinek között fennálló, általában nemlineáris függvénykapcsolatot linearizálják (*Menke, 1984*). Azok az inverziós módszerek, melyek jellemzően e megközelítésen alapulnak, csak abban az esetben szolgáltatnak kielégítő megoldást, amikor megfelelő mennyiségű és minőségű előzetes ismeret áll rendelkezésre. A lineáris inverziós módszerek legjelentősebb korlátja, hogy gradiens alapú optimumkeresés révén az inverz feladat célfüggvényének a kiindulási modell környezetébe eső helyi minimumában határozzák meg a megoldást. Emellett a linearizálás gyakran rosszul kondicionált egyenletrendszer megoldására vezet, mely jelentősen befolyásolhatja az inverziós eljárás stabilitását. A különféle regularizációs technikák alkalmazása ellenére (*Marquardt, 1959*) - különösen nagy változószám és erős modellparaméter-korreláció esetén - az inverziós eljárás keresőmechanizmusa nem képes kiszabadulni a helyi szélsőértékből, ezért az eredmény továbbra sem lesz független a startmodell megválasztásától.

Az inverziós módszerek mérési zajokkal szemben mutatott érzékenysége és a becsült modellparaméterek bizonytalansága a túlhatározottság mértékének (adatok és ismeretlenek számának aránya) növelésével hatékonyan csökkenthető. Ezt tényszerűen bizonyítják a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének kutatói által az együttes inverzió (*Dobróka és szerzőtársai, 1991; Dobróka, 1994; Kis, 2002*), a geofizikai kutatómódszerek (*Gyulai és Ormos, 1999; Dobróka és Völgyesi, 2008; Gyulai és szerzőtársai, 2010; Turai, 2011; Gyulai és szerzőtársai, 2017*) és a geofizikai adatfeldolgozás (*Vass, 2012; Dobróka és szerzőtársai, 2015*) területén elért eredményei. Az általuk kifejlesztett inverziós módszerek közös jellemzője, hogy a modellparaméterek sorfejtéses eljárással való diszkrétizálása révén a sorfejtési együtthatókat túlhatározott inverziós eljárás keretében határozhatjuk meg. A sorfejtéses inverziós módszerek alkalmazásának gyakorlati haszna jelentkezik a földtani szerkezetek részletesebb megismerése, az ásványi nyersanyagok mennyiségének és minőségének megbízhatóbb becslése, valamint az inverziós eljárás numerikus stabilitásának biztosítása és a többértelműség kiküszöbölése terén.

A mélyfúrési geofizikai inverz feladat megoldására *Dobróka (1995)* sorfejtésen alapuló inverziós eljárást vezetett be. Az intervalluminverziós módszer egyetlen mélységpont adatai helyett egy tetszőlegesen választott szakasz teljes adatrendszerét együttesen dolgozza fel a kőzetfizikai ismeretlenek mélységeloszlását leíró sorfejtési együtthatók meghatározása céljából. Az inverziós kísérletek eredményei azt mutatják, hogy az adatokhoz képest egy-két nagyságrenddel kevesebb számú sorfejtési együttható is elegendő a kőzetfizikai mennyiségek térbeli változásának leírására, melyek intervalluminverzióval történő meghatározásával a becsült paraméterek pontossága jelentős mértékben javítható a pontonkénti inverzióhoz képest. PhD értekezésemben összehasonlítást végeztem a mélységpontonkénti és az intervalluminverziós eljárás között, melyhez szénhidrogéntároló agyagos homokkövekben mért mélyfúrési geofizikai adatokat használtam fel. Homogén rétegekből felépített kőzetfizikai modell alkalmazásával kimutattam, hogy az intervalluminverziós eljárás kevésbé érzékeny a mérési zajokra, a kiugró adatok hatását hatékonyan elnyomja, az adat- és modelltérben számított illeszkedési jellemzőket javítja, valamint a paraméterbecslés hibáját számottevően csökkenti. Az intervalluminverziós módszer alkalmazásának további előnye, hogy a nagymértékben túlhatározott inverz feladat keretében további (a direkt feladatban szereplő) kőzetfizikai ismeretlenek az inverziós eljárásba bevezethetők, melyek a kismértékben túlhatározott jellegű pontonkénti inverz feladat megoldásával nem határozhatók meg. Ennek alapján új intervalluminverziós eljárást fejlesztettem a réteghatár-koordináták és a térfogatjellemző kőzetfizikai mennyiségek együttes (automatikus) meghatározására (*Szabó, 2004a*).

A linearizált inverzió hátrányai kiküszöbölésére *Sen és Stoffa (1995)* globális szélsőértékkereső módszerek alkalmazását javasolták. Mivel a véletlenkeresésen alapuló globális optimalizációs eljárás nem igényli a Jakobi-mátrix számítását, ezért a keresési tér részletes átvizsgálása után, a modellparaméterek kezdeti értékétől függetlenül képes a legmegfelelőbb megoldás meghatározására. A nemlineáris inverz feladatot nagy hatékonysággal kezelő globális inverziós eljárások azonban elég számításgényesek, ezért elsősorban gyors direkt feladatmegoldás esetén és viszonylag kevés számú ismeretlen mellett alkalmazhatók. E kedvező körülmény lehetőséget ad a globális optimalizációs módszerek mélyfúrési geofizikai inverzióban történő hatékony felhasználására. PhD értekezésemben Simulated Annealing eljárásról és genetikusan alapuló mélységpontonkénti és intervalluminverziós módszereket fejlesztettem intervallumon konstans függvények felhasználásával (*Szabó, 2004a*). Numerikus vizsgálataim során kimutattam, hogy a globális optimalizációs módszerekkel hatékonyan javítható a linearizált

inverziós eljárásokhoz képest a mért és számított adatok illeszkedése. Bemutattam, hogy a megoldáshoz képest (szélsőségesen) nagy adattérbeli távolsággal felvett kiindulási modell (és erősen korrelált modellparaméterek) mellett a globális inverzió konvergens megoldást szolgáltat. A közetfizikai paraméterek és a réteghatár-koordináták egyidejű meghatározására globális intervalluminverziós eljárást fejlesztettem, melynek szoftveres megvalósítását és hazai olajipari kipróbálását Dobróka Mihály professzor témavezetése mellett a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszéke a MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt. megbízásából végezte (Dobróka és Szabó, 2004).

A többváltozós statisztikai eljárásokat rutinszerűen alkalmazzák a mélyfúrási geofizika gyakorlatában, elsősorban a szénhidrogén-tárolók azonosítására, fácieselemzésre, közetfizikai összefüggések és mélységtrendek meghatározására, valamint hiányzó fúróllyukszelvények pótlására (Hempkins, 1978). A faktoranalízist a mérési változók által meghatározott adattér dimenziójának csökkentésére fejlesztették ki (Lawley és Maxwell, 1962), melynek földtudományi felhasználása lehetővé teszi a mért adatokban lévő közös földtani-geofizikai információ kiemelését, továbbá olyan litológiai és közetfizikai sajátosságoktól függő (rejtett) változók feltárását, melyek a geofizikai műszerekkel közvetlenül nem mérhetők. A szakirodalomban megjelent tanulmányok általában a származtatott statisztikai változók (faktorok) és a mérésfajták kapcsolatának elemzésével foglalkoznak. A becsült faktorsúlyok alapján megállapítható, hogy a faktorokra mely mérési változók gyakorolják a legnagyobb hatást, továbbá az adatokból kinyert faktorok értelmezésével lehetővé válik az egyes közettípusok elkülönítése. E felhasználási lehetőségek kiszélesítésén túl, a kutatásaim során alapvető törekvésem az volt, hogy a faktorok és a közetfizikai paraméterek között megfelelő mennyiségi összefüggést találjak és ez alapján az utóbbiakat független szelvényértelmezési módszerrel meghatározom. E kutatási cél gyakorlati megvalósítása érdekében az általam javasolt faktoranalízisen alapuló eljárást a MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt. számára a Schlumberger Techlog petrofizikai értelmezőrendszerbe integráltuk (Dobróka és szerzőtársai, 2016a).

Doktori értekezésemben új fúróllyuk-geofizikai adatfeldolgozási és kiértékelési eljárásokat mutatok be, melyek lehetővé teszik a hagyományos inverziós és statisztikai módszerekhez képest a közetfizikai mennyiségek hatékonyabb és megbízhatóbb meghatározását. Elsőként a korábban kifejlesztett intervalluminverziós eljárást és annak diszkretizációs algoritmusát Legendre-polinomok bázisfüggvényként való bevezetésével javítom. A továbbfejlesztett intervalluminverziós módszert inhomogén rétegekből álló modell közetfizikai paramétereinek meghatározására alkalmazom, mellyel jobb felbontás biztosítható a homogén rétegekből felépített modellel szemben és jelentősen csökkenthető a mért és számított adatok távolsága. A globális és linearizált optimalizáció együttes (kombinált) alkalmazásával az intervalluminverziós eljárás a korábbiaknál még stabilabb, valamint a kezdeti modell megválasztásától független megoldást szolgáltat. Az intervalluminverziós módszerfejlesztések célja a közetfizikai modell megbízhatóságának javítása, melynek érdekében a következő lépésben kibővítem az inverzióval meghatározott ismeretlenek körét. Ennek keretében a szondaválaszfüggvényekben szereplő zónaparamétereket, majd bonyolult (komplex) szénhidrogén-tárolók közetfizikai paramétereit az intervalluminverziós eljárással határozom meg. A zónaparaméterek becslésére egy másik inverziós megközelítést is javaslok. Az evolúciós számítási eljárás alapuló meta-algoritmikus inverziós eljárással a felszínközeli laza rétegek térfogatjellemzőit és mátrix-, ill. fluidumjellemző fizikai paramétereit közös inverziós eljárásban határozhatjuk meg. A zónaparaméterek inverziós eljárással történő előállításának további előnye, hogy javítja az előremodellezés hatékonyságát (direkt feladat megoldását) és ez által az inverziós eljárással

becsült modellparaméterek pontosságát. A genetikus meta-algoritmikus inverziós módszer többdimenziós kiterjesztésével megvalósítható a szomszédos fúrások adatrendszerének közös inverziós eljárásban történő feldolgozása, mellyel a közetfizikai jellemzők vízszintes és függőleges irányú változása a fúrások közötti térrészben is vizsgálható.

Az újonnan kifejlesztett inverziós módszerek mellett, a faktoranalízis újszerű mélyfúrás geofizikai alkalmazását ismertetem. Bemutatom, hogy a szénhidrogén- és vízkutatás számára kiemelt fontossággal bíró közetfizikai jellemzők (agyagtartalom és szivárgási tényező) és az azokból származtatható paraméterek független szelvényértelmezési eljárással számíthatók. Javaslatot teszek a faktoranalízis algoritmusának robusztifikálására, mellyel a többváltozós statisztikai elemzés zajérzékenysége és a kiugró adatok becslésre gyakorolt kedvezőtlen hatása eredményesen csökkenthető. A faktorok mélységeloszlását globális optimalizációs módszerrel is előállítom, mely a hagyományos statisztikai módszernél jobb adattérbeli illeszkedést biztosít, továbbá a faktorokból közvetlenül előállítja a szelvényadatok számított értékét. A faktoranalízist alkalmassá teszem szomszédos fúrások adatainak együttes feldolgozására, mellyel a közetfizikai jellemzők a fúrások közötti tartományban becsülhetők. A faktoranalízisnek így módon kiemelt szerep jut a laboratóriumi mérések és a kútteszteredmények térbeli kiterjesztésében. Az általam kifejlesztett többváltozós statisztikai módszerekkel a közetfizikai jellemzők a fúrás teljes hossza mentén, vagy akár egy nagyobb mérési területen (például a szénhidrogén-mezőn) is becsülhetők. A faktoranalízissel előállított közetfizikai mennyiségek állandónak való rögzítésével az inverz feladat túlhatározottsága tovább növelhető, mely kedvezően befolyásolja a becslés pontosságát és megbízhatóságát.

A doktori értekezésben szereplő új szelvényértelmezési eljárások alkalmazhatóságát a fúrásos kutatás különböző mélységtartományjaiban vizsgálom. A környezet- és mérnökgeofizika gyakorlatában alkalmazott mérnökgeofizikai szondázási mérések statisztikai és inverziós feldolgozásával a felszínközeli konszolidálatlan (telítetlen) üledékek közetfizikai és geotechnikai paraméterei térbeli eloszlásáról nyerhetünk információt, valamint a hiányzó mérési szelvényeket a többiek ismeretében szintetikus úton előállíthatjuk. Az új, globális optimumkeresésen alapuló inverziós és feltáró statisztikai módszerek hidrogeofizikai alkalmazásai lehetővé teszik a víztároló képződmények közetfizikai és szivárgási jellemzőinek még hatékonyabb meghatározását, valamint a próbaszivattyúzási és magvizsgálati adatok területi kiterjesztését. Végül az olajipari mélyfúrás geofizikai adatok intervalluminverziójával és faktoranalízisével a tárolókőzetek térfogatmodellje tovább finomítható, valamint a szénhidrogénkészlet pontosabb és megbízhatóbb meghatározása valósítható meg.

## 1. Mélyfúrési geofizikai adatok intervalluminverziója

A fúrással harántolt kőzetek fizikai jellemzőinek meghatározása a fúróllyuk-szelvényadatok együttes inverziójával valósítható meg. A hagyományosan alkalmazott mélységpontkénti (lokális) inverziós eljárással a kőzetfizikai paramétereket a pontbeli szelvényadatok felhasználásával határozzuk meg. A pontkénti inverziós módszer előnye a gyorsasága, azonban mivel a mélységpontban a mért adatok száma általában alig több az ismeretlenek számánál, az inverz feladat kismértékű túlhatározottsága miatt a paraméterbecslés pontossága és megbízhatósága viszonylag korlátozott. Másrészt, mivel a pontbeli adatokat a szomszédos vagy távolabbi mélységpontok adataitól függetlenül dolgozzuk fel, a lokális inverziós eljárás nem képes egy nagyobb mélységintervallum fizikai jellemzőire (a zónaparaméterekre vagy a határfelületek helyzetére) vonatkozó információt szolgáltatni. Mivel az adatok és a kőzetfizikai modell kapcsolatát leíró szondaválaszfüggvények egyáltalán nem tartalmazzák a réteghatár-koordinátákat, ezért azok meghatározása a pontonkénti inverzió keretei között nem valósítható meg.

Az intervalluminverziós módszer egy tetszőlegesen választott (akár a teljes mért) intervallumba eső mélységpontok adatrendszerét ugyanazon inverziós eljárás keretében dolgozza fel, a kőzetfizikai mennyiségek meghatározásához szükséges jelentősen kevesebb számú ismeretlen mellett. A túlhatározottság mértékének növelésével nemcsak a paraméterbecslés pontossága javítható, hanem újabb ismeretleneket is bevezethetünk az inverziós eljárásba. Ennek alapján a réteghatár-koordinátákat globális optimalizációs módszerrel alapuló intervalluminverziós eljárás keretében becsülhetjük (Szabó, 2004b; Dobróka és Szabó, 2012), valamint az inverziós módszert kiterjeszthetjük a réteghatárok vízszintes irányú változásának meghatározására (Dobróka és szerzőtársai, 2009). Az intervalluminverziós módszer korábbi olajipari és vízföldtani alkalmazásakor homogén rétegek sorozatát leíró kőzetfizikai modell paramétereit határoztuk meg (Szabó és Dobróka, 2013a; Dobróka és Szabó, 2015). Ekkor viszonylag kevés számú ismeretlen (rétegben állandó értékű kőzetfizikai paraméter) alkalmazásával a becslési hibák a pontonkénti inverzióhoz képest jelentősen csökkennek. Azonban a fenti modell a rétegen belüli függőleges irányú változás leírására nem alkalmazható. Jelen értekezésemben az intervalluminverziós eljárást továbbfejleszttem inhomogén közeg kőzetfizikai jellemzőinek meghatározására, mely a megfelelő túlhatározottsági arány biztosítása mellett jelentősen javítja az inverziós eredmények pontosságát.

### 1.1. Kőzetfizikai paraméterek meghatározása Legendre-polinomokon alapuló sorfejtéses inverziós eljárással

A mélyfúrési geofizikai inverzióval meghatározhatók a kőzetfizikai modell paraméterei, melynek keretében nukleáris, akusztikus és fajlagos ellenállás szondával mért adatokat együttesen dolgozunk fel. A pontonkénti inverziós eljárás során az  $s$ -edik fúróllyukszelvény pontbeli adatát az alábbi függvény ismeretében számítjuk

$$d_s^{(sz)} = g_s(m_1, \dots, m_i, \dots, m_P), \quad (1)$$

ahol  $m_i$  jelöli az  $i$ -edik kőzetfizikai jellemzőt ( $i=1, 2, \dots, P$ ),  $g_s$  az  $s$ -edik szelvényezési eszköz pontbeli válaszfüggvényét ( $s=1, 2, \dots, S$ ), továbbá  $S$  az alkalmazott szondák számát és  $P$  a kőzetfizikai paraméterek számát. A szondaválaszfüggvények nagyszámú állandót is tartalmaznak, melyeket zónaparamétereknek nevezünk, és ebben az esetben ismertnek

feltételezünk. Mivel a mérésfajták korlátozott száma miatt  $S$  általában alig nagyobb, mint  $P$ , az inverz feladat kismértékben túlhatározott. Az (1) válaszfüggvény általános esetben nemlineáris függvénykapcsolatot jelöl, melynek lineáris közelítése Taylor-sorfejtéssel a következőképpen írható fel

$$d_s^{(sz)} = \sum_{i=1}^P G_{si} m_i, \quad (2)$$

ahol  $G_{si} = (\partial g_s / \partial m_i)_{\vec{m}^{(0)}}$  az  $S \times P$  méretű Jakobi-mátrixnak a modellter  $\vec{m}^{(0)}$  pontjában számított eleme. A kezdeti modellvektort az inverziós eljárás keretében iteratív úton finomítjuk, melyet az alábbi célfüggvény szélsőértéke keresésével valósítjuk meg

$$E = \|\vec{e}\|_2^2 + \varepsilon^2 \|\vec{m}\|_2^2 = \min, \quad (3)$$

ahol  $\vec{e}$  jelöli a mért és számított szelvényadatok különbségeként előállított  $S$  hosszúságú eltérésvektort és  $\varepsilon$  az inverziós eljárás stabilitását biztosító regularizációs paramétert. Az invertált adatok eltérő nagyságrendje és megbízhatósága miatt az eltérésvektor elemeit a mérési adatok szórásával normáljuk. A (3) egyenlet megoldása hagyományosan linearizált optimalizációs eljárás alkalmazásával történik (Menke, 1984).

A mélységpontenkénti inverzióval szemben az intervalluminverziós módszer nem egyetlen mélységben, hanem egy alkalmasan választott mélységszakaszon mért összes adatot közös inverziós eljárásban dolgozza fel. A direkt feladat megoldásához az (1) válaszfüggvényt kiterjesztjük a teljes intervallumra, majd az elvi adatokat a mélység függvényében számítjuk

$$d_s^{(sz)}(z) = g_s(m_1(z), \dots, m_i(z), \dots, m_p(z)). \quad (4)$$

Jelöljük az  $s$ -edik szelvény  $z_r$ -edik mélység-koordinátához tartozó számított értékét a következő (tömörített) formában

$$d_r^{(s)} = g_s(m_1(z_r), \dots, m_i(z_r), \dots, m_p(z_r)), \quad (5)$$

ahol az  $s$ -edik szelvény mélységpontjainak teljes száma  $N_s$  ( $r=1,2,\dots,N_s$ ). A pontenkénti inverziós eljárás alapvető tulajdonsága, hogy csak azokat az adatokat dolgozza fel, melyek a vizsgált pontban rendelkezésre állnak. Ennek alapján a mélyfúrési geofizika gyakorlatában a különböző szondával mért szelvényeket általában azonos mintavételi távolság mellett rögzítik. Abban az esetben, amikor minden pontban valamennyi szelvénytípus rendelkezésre áll, az intervalluminverziós eljárásba bevont mérési adatok száma  $N=S \cdot N_s$ . Az intervalluminverziós eljárás azonban lehetőséget teremt különböző hosszúságú és mintavételi távolsággal mért szelvények feldolgozására is. Ekkor a vizsgált intervallumon belül gyűjtött különböző méretű adatrendszereket egyesítve a számított adatvektor az alábbi módon írható fel

$$\vec{d}^{(sz)} = [d_1^{(1)}, \dots, d_{N_1}^{(1)}, \dots, d_1^{(s)}, \dots, d_{N_s}^{(s)}, \dots, d_1^{(s)}, \dots, d_{N_s}^{(s)}]^T, \quad (6)$$

ahol az adatok teljes száma  $N=N_1+N_2+\dots+N_s$  ( $T$  a transzponált jelölése). A (6) számított adatvektor  $k$ -edik eleme  $k=r+N_1+N_2+\dots+N_{s-1}$  szerint adható meg, ahol  $r$  az  $s$ -edik



szelvényhez tartozó futóindex. A fentiek alapján a  $k$ -adik számított adat lineáris közelítése felírható az alábbi szerint

$$d_k^{(sz)} = \sum_{i=1}^P G_{ki} m_i, \quad (7)$$

mellyel a direkt feladat keretében a teljes elméleti adatrendszer előállítható. A (4) válaszfüggvényben szereplő modellparaméterek diszkretizálására Dobróka (1995) sorfejtésen alapuló közelítő eljárást javasolt. Ennek alapján az  $i$ -edik mélységfüggő közetfizikai paraméter általános sorfejtett alakja

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

ahol  $B_q^{(i)}$  jelöli a  $q$ -adik sorfejtési együtthatót,  $Q_i$  a sorfejtéshez szükséges tagok számát és  $\Psi_q$  a mélységkoordinátától függő  $q$ -adik bázisfüggvényt. A bázisfüggvényeket ismert mennyiségnek feltételezzük, melyek megválasztására számos lehetőség adott. Például homogén rétegekből felépített modell esetén legegyszerűbben egységugrás-függvények kombinációját alkalmazhatjuk, mely egyetlen sorfejtési együtthatóval írja le az adott közetfizikai paraméter rétegbeli állandó értékét. A kisszámú sorfejtési együttható - mint inverziós ismeretlen - kezelése mellett e modell további előnye, hogy a bázisfüggvények közvetlenül tartalmazzák a réteghatár-koordinátákat és azok a sorfejtési együtthatókkal együtt az intervalluminverziós eljárás keretében meghatározhatók (Szabó, 2004a). A közetfizikai mennyiségek gyorsabb térbeli változásának leírására hatványfüggvényeket vagy speciális polinomokat alkalmazhatunk. Azonban érdemes ekkor elkerülnünk a nem-ortogonális függvényrendszerek szerinti sorfejtést, mivel az ismeretlenek csatolása kedvezőtlen hatást gyakorolhat az inverziós eljárás stabilitására és az eredmény megbízhatóságára.

A sorfejtési együtthatók korrelációja csökkentése céljából Legendre-polinomok felhasználásán alapuló sorfejtéses inverziós eljárást dolgoztam ki, melyel a (8) formula az alábbi alakot ölti

$$m_i(z) = \sum_{q=1}^{Q_i} B_q^{(i)} P_{q-1}(z), \quad (9)$$

ahol  $P_q$  a  $q$ -adik Legendre-polinom. A Legendre-polinomok a  $[-1,1]$  tartományon ortogonális bázisfüggvényrendszert alkotnak

$$\int_{-1}^1 P_n(z) P_m(z) dz = \frac{2}{2n+1} \delta_{nm}, \quad (10)$$

ahol  $\delta_{nm}$  a Kronecker delta függvény. A (10) egyenletben megfogalmazott páronkénti ortogonalitásra vonatkozó tulajdonság kedvezően befolyásolja az inverziós eljárással becsült sorfejtési együtthatók meghatározását (azok megbízhatóságát). Az inverz feladatot a sorfejtési együtthatókra megoldva a (9) összefüggés alapján előállíthatjuk a közetfizikai paraméterek mélység szerinti változását.

### 1.1.1. A sorfejtési együtthatók meghatározása linearizált intervalluminverziós módszerrel

A szelvényezés vizsgált szakaszán leggyorsabban linearizált intervalluminverziós eljárással határozhatók meg a sorfejtési együtthatók. A (7) és (8) egyenletek kombinálásával felírható az alábbi összefüggés

$$d_k^{(sz)}(z_k) = \sum_{i=1}^P \sum_{q=1}^{Q_i} G_{ki} B_q^{(i)} \Psi_q(z_k). \quad (11)$$

Vezessük be a  $B_l$  jelölést az inverz feladat modellvektora  $l$ -edik sorfejtési együtthatója azonosítására, ahol az ismeretlenek teljes száma  $M=Q_1+Q_2+\dots+Q_P$  és az új index  $l=q+Q_1+Q_2+\dots+Q_{i-1}$ . A (11) egyenletben szereplő  $G_{ki} \Psi_q(z_k)$  kifejezést a  $\tilde{G}_{kl}$  jelöléssel helyettesítve kapjuk a  $k$ -adik számított adatot

$$d_k^{(sz)} = \sum_{l=1}^M \tilde{G}_{kl} B_l. \quad (12)$$

A mérési adatokat hasonlóan a (6) számított adatvektorhoz az alábbi  $N$  dimenziós oszlopvektorba rendezzük

$$\vec{d}^{(m)} = [d_1^{(1)*}, \dots, d_{N_1}^{(1)*}, \dots, d_1^{(s)*}, \dots, d_{N_s}^{(s)*}, \dots, d_1^{(S)*}, \dots, d_{N_S}^{(S)*}]^T, \quad (13)$$

majd (6) és (13) vektorok különbségeként képezzük az  $N$  hosszúságú eltérésvektort. A linearizált inverz probléma a (3) célfüggvény minimalizálásával oldható meg. A sorfejtési együtthatók  $M$  hosszúságú  $\vec{B}$  oszlopvektorát a csillapított legkisebb négyzetek módszere alkalmazásával kapjuk (Marquardt, 1959)

$$\vec{B} = \left( \underline{\tilde{G}}^T \underline{\tilde{G}} + \varepsilon^2 \underline{I} \right)^{-1} \underline{\tilde{G}}^T \vec{d}^{(m)}, \quad (14)$$

ahol  $\varepsilon^2$  jelöli a pozitív értékű csillapítási (regularizációs) tényezőt és  $\underline{I}$  az egységmátrixot. Az intervalluminverziós eljárás alkalmazásának előnyei akkor mutatkoznak meg a leginkább, amikor a mérési adatok száma jelentősen meghaladja az ismeretlen sorfejtési együtthatók számát. Ekkor az inverz feladat nagymértékben túlhatározott, mely kedvezően hat a sorfejtéssel előállított közetfizikai paraméterek becslési pontosságára és megbízhatóságára.

Az intervalluminverziós eljárással szemben támasztott alapvető elvárás, hogy a mért és a direkt feladat keretében számított adatok eltérése az inverziós eljárás befejeztével minimális legyen. Mivel az invertált szelvények általában különböző nagyságrendű (és mértékegységű) adatokat tartalmaznak, ezért az illeszkedés mértékét a relatív adattérbeli távolsággal jellemezhetjük

$$D_d = \left[ N^{-1} \sum_{k=1}^N \left( \frac{d_k^{(m)} - d_k^{(sz)}}{d_k^{(m)}} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100(\%). \quad (15)$$

Az inverziós eredmények minőségellenőrzése a becslési hibák meghatározásán keresztül történik, melyhez szükség van a bemenő adatok bizonytalansága (szórása) ismeretére. A terepi tapasztalatok azt mutatják, hogy a fúróluk-geofizikai szondák pontossága méréstípusonként eltérő, melyet ismételt terepi mérésekkel vagy kalibrációs eljárásokkal, a szondázási eszközök leírása alapján vagy szakirodalmi forrásból adhatjuk meg (Horváth, 1973). A modellparaméterek kovarianciamátrixa Menke (1984) alapján az alábbi kapcsolatban áll a mért adatok kovarianciamátrixával

$$\underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{m}) = \underline{\underline{G}}^{-g} \underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{d}^{(m)}) (\underline{\underline{G}}^{-g})^T, \quad (16)$$

ahol  $\underline{\underline{G}}^{-g}$  a linearizált inverziós módszer általánosított inverze. A (16) összefüggés mélységpontonkénti inverzió alkalmazása esetén közvetlenül felhasználható a becsült kőzetfizikai mennyiségek bizonytalanságának számítására. Az intervalluminverziós eljárással meghatározott sorfejtési együtthatók becslési hibája is a fenti formulával számítható, azonban a származtatott kőzetfizikai paraméterekre vonatkozóan figyelembe kell venni a hibaterjedés törvényét. Fejtsük sorba az  $i$ -edik és  $j$ -edik kőzetfizikai paramétert a (8) egyenlet felhasználásával. A sorfejtés a fenti mennyiségek várható értékeiktől való eltérésére is érvényes, mely indexhelyes alakban az alábbi módon írható fel

$$\delta m_i(z) = \sum_{n=1}^{Q_i} \Psi_n(z) \delta B_n^{(i)}, \quad \delta m_j(z) = \sum_{m=1}^{Q_j} \Psi_m(z) \delta B_m^{(j)}, \quad (17)$$

ahol  $i=1,2,\dots,P$  és  $j=1,2,\dots,P$ . Az eltérések szorzata átlagértéke a következő alakot ölti

$$\overline{\delta m_i(z) \delta m_j(z)} = \sum_{n=1}^{Q_i} \sum_{m=1}^{Q_j} \Psi_n(z) \overline{\delta B_l^{(i)} \delta B_h^{(j)}} \Psi_m(z), \quad (18)$$

ahol az új indexek  $l=n+Q_1+Q_2+\dots+Q_{i-1}$  és  $h=m+Q_1+Q_2+\dots+Q_{j-1}$ . A fentiek alapján az intervalluminverziós eljárással becsült  $i$ -edik és  $j$ -edik kőzetfizikai jellemző mélységfüggő kovarianciája Legendre-polinomok alkalmazása esetén

$$\text{cov}_{ij}(z) = [\underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{m}(z))]_{ij} = \sum_{n=1}^{Q_i} \sum_{m=1}^{Q_j} P_{n-1}(z) [\underline{\underline{\text{cov}}}(\vec{B})]_{lh} P_{m-1}(z). \quad (19)$$

A modell-kovarianciamátrix felhasználásával az  $i$ -edik becsült kőzetfizikai paraméter szórása a mélység függvényében  $\sigma_i(z) = \sigma[m_i(z)] = [\text{cov}_{ii}(z)]^{1/2}$ . A mélységpontonkénti inverzió (ipari) gyakorlatában a mért szelvényeket függetlennek tekintik egymástól, és a kovarianciamátrix főátlón kívüli elemeit elhanyagolják. Azonban a mért mennyiségek között gyakran közepes/erős korrelációs kapcsolat mutatkozik, melynek hatását a (19) összefüggéssel figyelembe vehetjük az inverziós eredmények minősítése során.

A becslési hibával szorosan összefüggő mennyiség a korrelációs együttható. Az inverzióval becsült kőzetfizikai modell megbízhatóságát a Pearson-féle korrelációs mátrix segítségével jellemezhetjük. Az  $i$ -edik és  $j$ -edik kőzetfizikai paraméter korrelációs együtthatója  $\text{corr}_{ij}(z) = \text{cov}_{ij}(z) \sigma_i^{-1}(z) \sigma_j^{-1}(z)$ , melynek felhasználásával a korreláció átlagos értéke (a mélység függvényében) a következő formula alapján számítható

$$\rho(z) = \left\{ [P(P-1)]^{-1} \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P [\text{corr}_{ij}(z) - \delta_{ij}]^2 \right\}^{1/2}. \quad (20)$$

Abban az esetben, ha a korrelációs együttható abszolút értéke 1-hez közel áll, az erős csatolás miatt a vizsgált modellparaméterek az inverziós eljárás keretében egymástól függetlenül nem határozhatók meg. Ezért a becsült közetfizikai jellemzőket akkor fogadhatjuk el egyértelmű (megbízható) megoldásnak, ha azok kapcsolatát kis értékű korrelációs együtthatók is igazolják.

### 1.1.2. A sorfejtési együtthatók meghatározása kombinált intervalluminverziós eljárással

A globális optimalizációs módszereket széles körben alkalmazzák a földtudományok területén (Michalski, 2013; Cranganu és szerzőtársai, 2015). E heurisztikus elvű abszolútoptimum-kereső eljárások olyan nagyméretű, kevés előismeretet felhasználó és rosszul kondicionált (általában nemlineáris) inverz feladatok esetén is megfelelő megoldást adnak, melyek a linearizált inverziós módszerekkel kezelhetetlenek. Az 1.1.1. fejezetben bemutatott linearizált intervalluminverziós eljárás hátrányaként említhető, hogy eléggé érzékeny a kezdeti modell, azaz a sorfejtési együtthatók kiindulási értékeinek megválasztására. Az alapkérdés hátterében az áll, hogy a linearizált (gradiens alapú) módszerek az optimalizációs eljárás célfüggvényének a startmodellhez legközelebb eső helyi minimumánál határozzák meg az inverz feladat megoldását. Másrészt a modellparaméterek erős korrelációja esetén, a többértelmű megoldás lehetőségével is számolnunk kell, mely gyakran oka lehet az inverziós eljárás instabilitásának. Ezen gyakran az sem változtat, hogy megpróbáljuk az inverziós eljárást valamely regularizációs technikával stabilizálni és szigorú megszorító feltételek előírásával a keresést az optimum felé terelni. A globális optimalizáció ezzel szemben valószínűségi szabályokon alapuló (véletlen) keresést hajt végre a modellterben, mely hatékonyan elkerüli a lokális minimumhelyeket. A numerikus stabilitás azzal is biztosítható, hogy az optimalizációs eljárás nem használja fel a Jakobi-deriváltakra vonatkozó információt és mátrixinvertálást sem alkalmaz. A globális optimalizáció ugyan több számítási időt igényel, azonban az abszolút minimumhelyet a kiindulási értékek megválasztásától függetlenül megtalálja.

Az evolúciós számítási módszerek családjába tartozó genetikus algoritmust (GA) Holland (1975) vezette be. A kiváló adaptációs képességgel rendelkező optimalizációs eljárás az élő szervezetek természetes kiválasztódásának mechanizmusa hasonlóságán alapul. Az egyedekből (esetünkben a közetfizikai modellekből) felépített populációt a véletlenkereső eljárás generációról-generációra tökéletesíti. A modellparaméterek értékeit a kromoszómalánc tartalmazza, melyek alapelemeit, a géneket véletlenszerűen módosítjuk, illetve kicseréljük az egyedek között. A genetikus információcsere közben felhasználjuk az egyedek alkalmasságára vonatkozó információt. A darwini elmélet szerint a legalkalmasabb egyedek képesek hosszútávon túlélni és szaporodni, míg az alkalmatlanok elpusztulnak. A modellek - mint az optimalizációs feladat lehetséges megoldásai - túlélési képességét az alkalmassági (fitness) függvény számszerűsíti, melyet a természetes szelekció elvének megfelelően maximalizálunk. A GA célja a populáció átlagos alkalmasságának folyamatos növelése és a jó gének átadása az egymást követő generációk számára. A „klasszikus” genetikus algoritmus a modellparamétereket bináris séma szerint kódolja, mely jelentősen korlátozza a modellter felbontását és a becslési eredmények pontosságát. Mivel valós értékű modellparaméterek esetén nem szükséges kódolást és dekódolást végrehajtani, a

Michalewicz (1992) által javasolt valós kódolású genetikus algoritmus (Float-Encoded Genetic Algorithm, FGA) a bináris algoritmusnál lényegesen gyorsabb optimumkeresést tesz lehetővé és megfelelő felbontást biztosít az értekezésben tárgyalt mélyfúrési geofizikai inverziós alkalmazások számára.

Az intervalluminverziós eljárás stabilitásának növelése céljából kombinált sorfejtéses inverziós módszert fejlesztettem, melynek első lépésében linearizált inverzió helyett globális optimalizációs eljárást alkalmazunk. Az FGA alkalmazásával a célfüggvény abszolút szélsőértékhelye környezetébe eljutva meghatározzuk az inhomogén rétegekből felépített modell kőzetfizikai paramétereit leíró sorfejtési együtthatók közelítő értékét. Az FGA egyedi alkalmazásával sokszázezer lépés is szükséges lehet a globális optimum megtalálásához, másrészt a véletlenkereső eljárás egyetlen futtatásból nem képes a paraméterbecslési hibák megadására. Több száz, ill. több ezer (független) futtatási eredmény kellene ahhoz, hogy az inverziós eredményekre hibastatisztikát kapjunk. A gyors számítás érdekében, néhány ezer generáció után az FGA-t leállítjuk, majd az inverziós eredményt startmodellként kezelve áttérünk linearizált optimumkeresésre. Ily módon az utolsó néhány iterációban lineáris intervalluminverziós eljárással meghatározhatjuk a kőzetfizikai paraméterek finomabb változását. A gyors megoldás mellett, a Marquardt-féle (linearizált) algoritmus bevonásának további előnye, hogy a Jakobi-mátrix felhasználásával a sorfejtési együtthatók és a származtatott kőzetfizikai mennyiségek becslési hibája is megadható.

A globális intervalluminverziós feladatot a következőképpen oldhatjuk meg. Az első lépésben létrehozunk a sorfejtési együtthatók  $\vec{B}^{(v)}$  vektoraiból képzett kezdeti populációt ( $v=1,2,\dots,V$ , ahol  $V$  a populáció egyedszáma). A keresési teret az FGA inicializálásakor szabadon megválaszthatjuk, minek alapján a sorfejtési együtthatók értékét véletlenszerűen generáljuk az előre meghatározott értéktartományból. Az (5) egyenletnek megfelelően jelöljük a  $v$ -edik egyed felhasználásával számított  $s$ -edik szelvényadat  $z_r$ -edik mélységkoordinátához tartozó értékét

$$d_r^{(s,v)} = g_s \left( B_1^{(1,v)}, \dots, B_{Q^{(1)}}^{(1,v)}, \dots, B_1^{(P,v)}, \dots, B_{Q^{(P)}}^{(P,v)}, z_r \right), \quad (21)$$

majd rendezzük az inverziós eljárásba bevont  $S$  számú szelvény valamennyi számított adatát a következő oszlopvektorba

$$\vec{d}^{(sz,v)} = \left[ d_1^{(1,v)}, \dots, d_{N_1}^{(1,v)}, \dots, d_1^{(s,v)}, \dots, d_{N_s}^{(s,v)}, \dots, d_1^{(S,v)}, \dots, d_{N_S}^{(S,v)} \right]^T, \quad (22)$$

ahol az adatok teljes száma  $N=N_1+N_2+\dots+N_S$ . A mérési adatok (13) vektora és a (22) számított adatvektor különbségeként előállíthatjuk a  $v$ -edik egyedre vonatkozó  $\vec{e}^{(v)}$  eltérésvektort, majd normáljuk a mérési adatok szórásával. A mért és a számított adatok eltérésének euklideszi-normánégyzetét kapcsolatba hozzuk az optimalizálandó alkalmassági függvénnyel

$$F(\vec{B}) = -\|\vec{e}\|_2^2 = \max. \quad (23)$$

Az FGA lebegőpontos számokkal ábrázolt kromoszómákat és valós véletlen műveleteket (kiválasztást, keresztezést és mutációt) alkalmaz a populáció átlagos alkalmasságának maximalizálása érdekében. A szakirodalomban található genetikus operátorok gazdag eszköztárából az értekezésben csak azokat a műveleteket mutatom be,

melyeket az inverziós vizsgálataim során közvetlenül felhasználtam (Houck és szerzőtársai, 1995). A kiválasztás, mint az első genetikus művelet modellegyedeket párosít a legjobb gének megtartása és átörökítése céljából. Mivel a nagyobb alkalmassági értékű (jobb adattérbeli illeszkedés) egyedek nagyobb eséllyel szelektálódnak, mint a kevésbé alkalmazkodó (nagyobb adattérbeli távolság) társaik, ezért a kiválasztás valószínűsége az egyedek fitnessz értékével növekszik

$$P(\bar{B}^{(v)}) = \frac{F(\bar{B}^{(v)})}{\sum_{v=1}^V F(\bar{B}^{(v)})}. \quad (24)$$

A rulett-szelekciós művelet felhasználása esetén a  $v$ -edik egyedeket akkor választjuk ki, amikor a  $[0,1]$  tartományon egyenletes valószínűséggel generált  $\zeta$  számra teljesül a  $C_{v-1} < \zeta < C_v$  feltétel, ahol  $C_v = \sum_{j=1}^v P_j$  a  $v$ -edik kumulatív valószínűség. A kiválasztás ismételt végrehajtása után az egyedek egy része elpusztul (pl. az **1a. ábrán** az 1-es és  $V$ -edik sorszámú modell), míg a többi akár többször is kiválasztásra kerül (2-es és 4-es sorszámú modell). A fent előírt feltétel alkalmazásán alapul a rangszelekció művelete is, ahol az egyedeket az alkalmassági értékeik szerint rendezzük sorba. Ennek alapján a legalkalmasabb egyed rangja 1, a legkisebb fitnessszel rendelkező pedig  $V$  (populáció mérete) értéket kap. A normált geometriai rangszelekciós művelet esetén az  $v$ -edik egyed kiválasztási valószínűsége

$$P(\bar{B}^{(v)}) = \frac{P_b}{1 - (1 - P_b)^V} (1 - P_b)^{r_v - 1}, \quad (25)$$

ahol  $r_v$  a  $v$ -edik sorfejtési együtthatóvektor rangja,  $P_b$  a legalkalmasabb egyed kiválasztási valószínűsége. Ez utóbbi egy előre megadott folyamatjellemző mennyiség, mely nagymértékben befolyásolja az iterációs eljárás konvergenciáját.

A következő lépésben a kiválasztott egyedek kromoszómái között részleges információcserét hajtunk végre. A keresztezés műveletével egy, vagy akár több ponton elmessük a véletlenszerűen kisorsolt kromoszómákat, majd a metszéspontok között elhelyezkedő gének cseréjével új egyedeket hozunk létre. Ennek legegyszerűbb módja az egy pontos (egyszerű) keresztezés

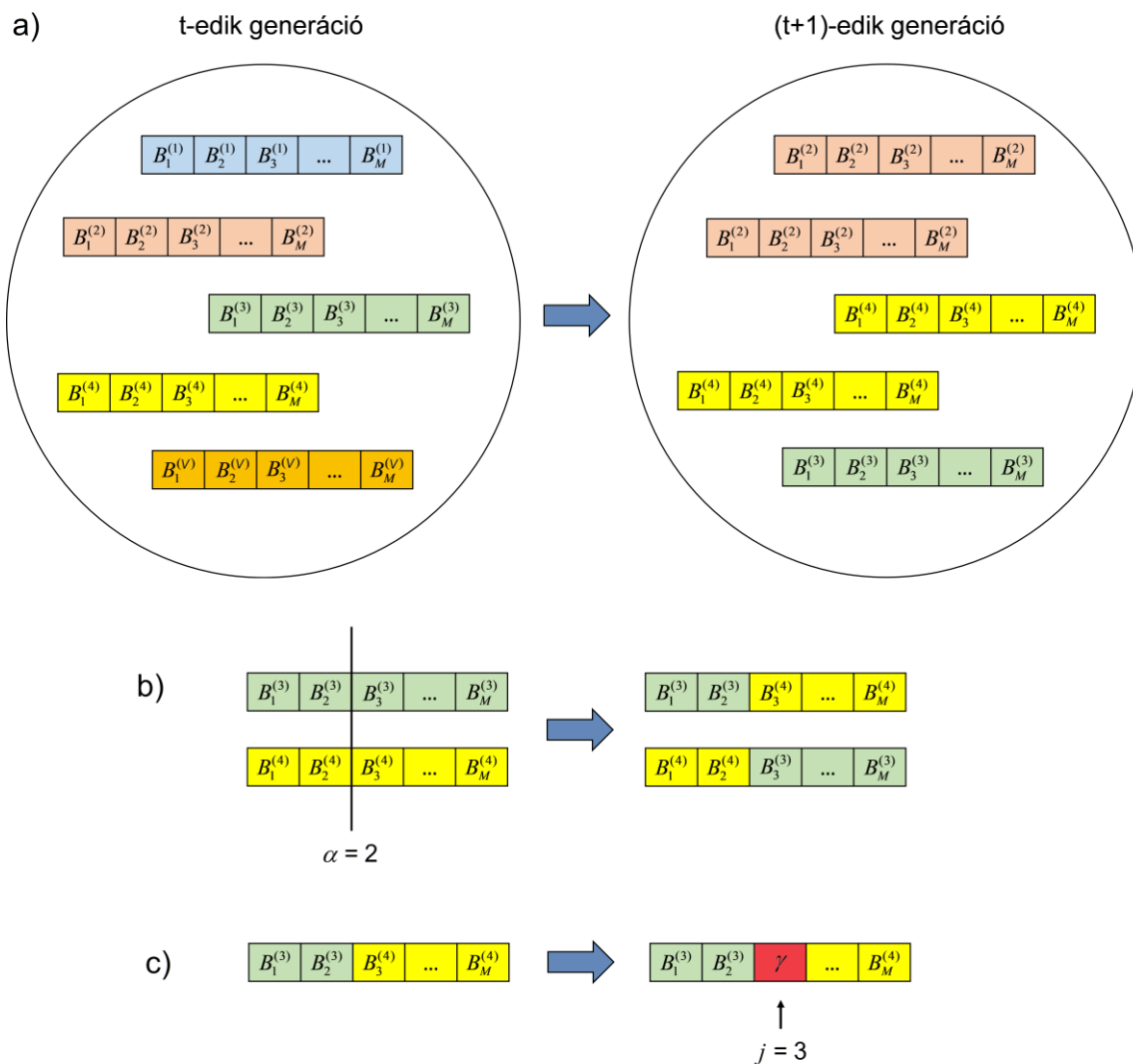
$$B_l^{*(1)} = \begin{cases} B_l^{(1)}, & \text{ha } l < \alpha \\ B_l^{(2)}, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (26)$$

$$B_l^{*(2)} = \begin{cases} B_l^{(2)}, & \text{ha } l < \alpha \\ B_l^{(1)}, & \text{egyébként} \end{cases}$$

ahol  $B_l^{(1)}$  és  $B_l^{(2)}$  a kiinduló, ill.  $B_l^{*(1)}$  és  $B_l^{*(2)}$  a keresztezésen átesett egyedek  $l$ -edik sorfejtési együtthatója ( $l=1,2,\dots,M$ , ahol  $M$  a sorfejtési együtthatók száma). Az  $\alpha$  véletlen egész számot a kromoszómákat felépítő gének teljes számának tartományából sorsoljuk ( $\alpha_{max}=M$ ), mely a metszéspont helyzetét határozza meg (**1b. ábra**). A heurisztikus keresztezés a két utódot az alábbi módon állítja elő

$$\left. \begin{aligned} B_i^{*(1)} &= B_i^{(1)} + \beta(B_i^{(1)} - B_i^{(2)}) \\ B_i^{*(2)} &= B_i^{(1)} \end{aligned} \right\}, \quad (27)$$

ahol  $\beta$  a  $[0,1]$  tartományban egyenletes valószínűséggel generált szám. A fenti művelet alkalmazásának feltétele:  $F(\vec{B}^{(2)}) < F(\vec{B}^{(1)})$ . Ha a  $\vec{B}^{*(1)}$  vektor bármely eleme az előírt értéktartományon kívül esik, akkor egy új  $\beta$  érték felhasználásával a (27) egyenletet újra számítjuk. Általában néhány száz eredménytelen kísérlet után a géneket (sorfejtési együtthatókat) régi értékeikkel azonosítjuk.



1. ábra: A valós kódolású genetikus algoritmus véletlen műveletei: kiválasztás (a), egyszerű keresztezés (b) és egyenletes mutáció (c)

Az utolsó lépésben néhány egyed egy-egy génjét a mutáció műveletével véletlenszerűen megváltoztatjuk, melynél lényeges a mutációhányados (mutált egyedek és az összes egyed számának aránya) mint folyamatjellemző paraméter előzetes megadása. Ugyanis túl alacsony mutációs arány beállításakor a populáció könnyen homogenizálódhat,

míg annak túl nagy aránya esetén a globális optimumkeresés sokkal tovább tart és bizonyos esetekben a konvergencia sem garantált. Az egyenletes (uniform) mutáció a kiválasztott egyed  $j$ -edik génjét annak a lehetséges értéktartományában egyenletesen valószínűséggel generált valós számra ( $\gamma$ ) cseréli fel (**1c. ábra**)

$$B_l^{**} = \begin{cases} \gamma, & \text{ha } l = j \\ B_l^*, & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (28)$$

ahol  $B_l^{**}$  a mutált egyed  $l$ -edik sorfejtési együtthatója ( $l=1,2,\dots,M$ ). A három genetikus alapművelet ismételt alkalmazásával a populáció átlagos alkalmasságát iteratív eljárásban javítjuk. A genetikus operátorok kombinációja és a folyamatjellemző paraméterek megválasztása is befolyásolja az optimalizációs eljárás konvergenciáját. A következő generáció összetételét a sokszorosítás (reprodukción) művelete alakítja ki. Általában az átmeneti (a genetikus műveleteken átesett) populáció egyedeiből építjük fel az új generációt, azonban létezik olyan megoldás is, ahol az átmeneti populáció legrosszabb egyedét kicseréljük a régi populáció legjobb egyedére. Ezt a műveletet elitizmusnak nevezzük (*Bijani és szerzőtársai, 2012*). A fenti műveletek ismétlését egy meghatározott megállási kritérium teljesüléséig folytatjuk, miután az utolsó generáció legalkalmasabb egyedét (sorfejtési együtthatóvektort) tekintjük az inverz feladat megoldásának.

A kombinált intervalluminverziós eljárás első (evolúciós) fázisában a kőzetfizikai paramétereket leíró sorfejtési együtthatókat valós kódolású genetikus algoritmussal becsüljük. Ennek a linearizált inverziós eljárással (melynek eredménye nagymértékben függ a kezdeti modell kiválasztásától) szemben mutatott előnye, hogy a heurisztikus keresés a kiindulási modellre nem érzékeny és (rendkívül) nagy kezdeti adattávolság mellett is képes a mért és a számított adatok eltérésének hatékony minimalizálására. Gyakorlati megfontolások miatt azonban a sok-tízezer (vagy százezer) generáció számítását elkerülendő, az intervalluminverziós eljárás második (lineáris) fázisában gyors linearizált optimalizációs technikát alkalmazunk. Ennek alapján az *1.1.1. fejezetben* részletezett módon folytatjuk az intervalluminverziós eljárást. A Marquardt-féle algoritmus bevonásával az utolsó iterációs lépésben jellemezhetjük az inverziós eredmények pontosságát és megbízhatóságát. Az inverziós eljárással becsült sorfejtési együtthatók ismeretében a kőzetfizikai mennyiségek a (9) összefüggéssel előállíthatók, melyek becslési pontossága a (19) kovarianciamátrix alapján a mélység függvényében meghatározható.

## **1.2. A Legendre-polinomokon alapuló sorfejtéses (kombinált) intervalluminverziós eljárás gyakorlati alkalmazása**

Az intervalluminverziós eljárást egy kelet-magyarországi szénhidrogén-kutatófúrás (in situ) adatrendszerén teszteljük. A vizsgált mélységtartományban négy pliocén korú (konszolidálatlan) réteg különíthető el. A fúrásból származó kőzetminták alapján a nagy porozitású és áteresztőképességű homokokat vékony kőzetliszt- és agyagrétegek különítik el egymástól. A fluidum-mintavétel eredménye alapján megállapították, hogy a pórusteret metán, etán, propán és kis mennyiségű széndioxid tölti ki. Az inverz feladat megoldásához a természetes-gamma intenzitás ( $GR$ ), kőzetsűrűség ( $\rho_b$ ), neutronporozitás ( $\Phi_N$ ), akusztikus intervallumidő ( $\Delta t$ ) és a mélybehatolású laterolog szondával mért fajlagos ellenállás ( $R_d$ ) szelvényeket használjuk fel. A vertikális fúrás mentén 194 mélységpontban ötféle mért

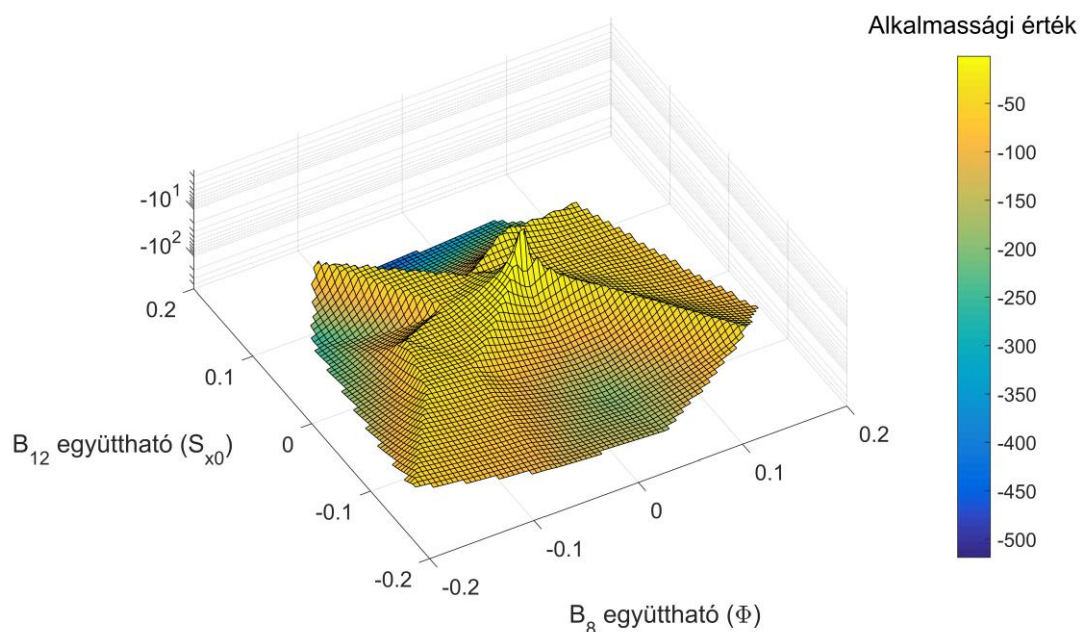


mennyiséget dolgozunk fel, ahol a szomszédos mérési pontok távolsága 0.1 m. A mélység-egyeztetett és környezeti hatásra korrigált fúrólukszelvényeket a Legendre-polinomokon alapuló sorfejtéses inverziós eljárás alkalmazásához megfelelően skálázzuk. Az intervalluminverziós módszerrel az agyagmentes porozitást ( $\Phi$ ), az agyagtartalmat ( $V_{sh}$ ), a homokrészarányt ( $V_{sd}$ ), a kisépért zóna víztelítettségét ( $S_{x0}$ ) és az érintetlen zóna víztelítettségét ( $S_w$ ) határozzuk meg. E paraméterek aktuális értékeivel a direkt feladat keretében elvi adatokat számítunk. A (4) egyenlet alapján az  $s$ -edik szelvény ( $s=1,2,\dots,5$ ) válaszfüggvényének általános alakja a következő

$$d_s^{(sz)}(z) = g_s(\Phi(z), S_{x0}(z), S_w(z), V_{sh}(z), V_{sd}(z), \bar{c}), \quad (29)$$

ahol  $\bar{c}$  vektor a kőzetmátrix, agyag és a pórufolyadék fizikai jellemzőit, valamint a sorfejtés intervallumán egyéb állandónak feltételezett mennyiségeket (zónaparamétereket) tartalmazza. A nukleáris szelvények számításához a *Baker Atlas (1996)* vállalat agyagos-homokos képződmények kiértékelésére ajánlott lineáris válaszfüggvényeit alkalmazzuk, mely az agyag, iszapfiltrátum és szénhidrogén-korrekciókat foglalja magában. Az akusztikus szelvény előállítására a kompakciós hatásra korrigált átlagidő egyenletet használjuk fel (*Wyllie és szerzőtársai, 1956*). A fajlagos ellenállás adatok számítására a szakirodalomban számos nemlineáris víztelítettség modell áll rendelkezésre (*Archie, 1942; Simandoux, 1963; Schlumberger, 1989; Poupon és Leveaux, 1971*). Az előzetes inverziós kísérletek és összehasonlító vizsgálatok alapján a fentiek közül a Schlumberger vállalat „Total shale” modelljét választottam. Az inverziós kiértékelésre felhasznált válaszegyenlet-rendszert és zónaparamétereket az **1. melléklet** tartalmazza. A kőzetfizikai paraméterek meghatározása során a  $\Phi + V_{sh} + V_{sd} = 1$  anyagmérleg egyenletet, mint korlátozó feltételt alkalmazzuk. Mivel az anyagmérleg egyenletből a homoktartalom kifejezhető a többi paraméter segítségével, ezért összesen négy térfogatjellemző mennyiséget ( $\Phi, V_{sh}, S_{x0}, S_w$ ) szükséges meghatározni az intervalluminverziós eljárással.

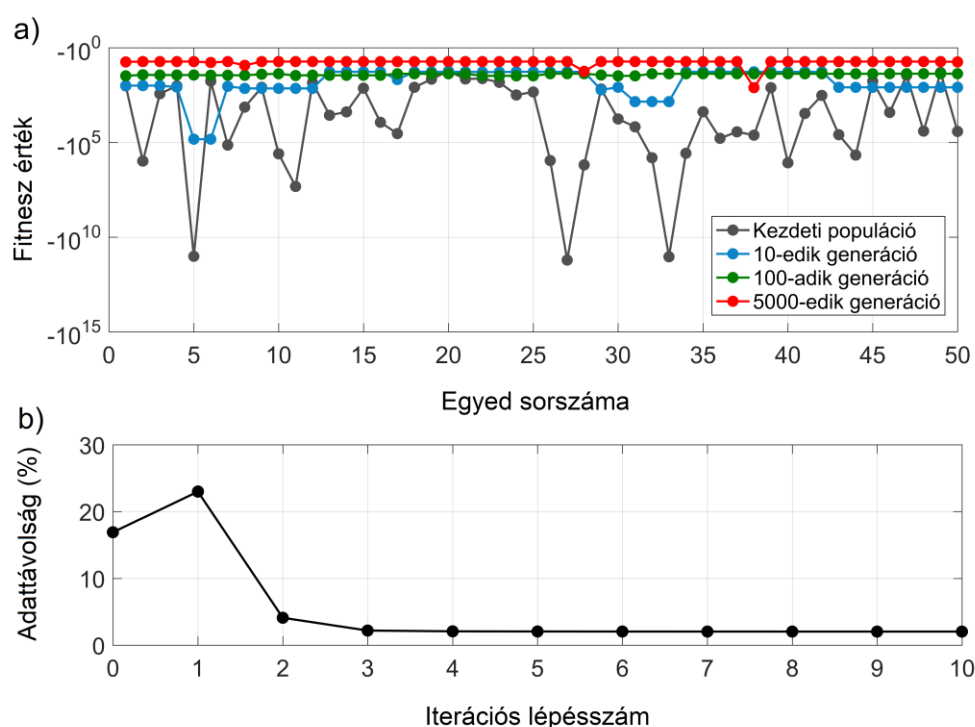
Az intervalluminverziós vizsgálat számára kijelölt mélységintervallumon  $N=970$  szelvényadatot dolgozunk fel, melyeket a (13) vektorban egyesítjük. Közelítsük a négy ismeretlen kőzetfizikai mennyiség mélységfüggvényét egyenként 14-edfokú Legendre-polinommal. A (9) sorfejtést felhasználva az ismeretlenek teljes száma  $M=60$ , így a túlhatározottság aránya  $(N/M) \sim 16.2$ , mely pontonkénti inverzió alkalmazása esetén csak 1.25. Ugyanezen adatrendszer mélységpontonkénti inverzióval történő feldolgozását a *Dobróka és szerzőtársai (2016b)* cikkben tárgyaljuk. A kombinált intervalluminverziós eljárás keretében először kijelöljük a sorfejtési együtthatók határértékeit, melyek az FGA algoritmus alkalmazása esetén széles tartományon belül választhatók. A nulladik Legendre-polinomhoz tartozó sorfejtési együtthatókat (a kőzetfizikai mennyiségek homogén szakaszra vonatkozó állandóit) a kőzetfizikai jellemzők gyakorlati tartományának megfelelően választjuk:  $0 \leq B_1^{(\Phi)} \leq 0.4$ ,  $0 \leq B_1^{(S_w)} \leq 1.0$ ,  $0 \leq B_1^{(S_{x0})} \leq 1.0$ ,  $0 \leq B_1^{(V_{sh})} \leq 1.0$ . A mélység magasabb kitevőjű hatványaihoz tartozó sorfejtési együtthatók kezdeti értékét az előzetesen, (tisztán) linearizált intervalluminverziós módszerrel végzett próbafuttatások eredményei alapján adjuk meg:  $-0.2 \leq B_l^{(i)} \leq 0.2$  (ahol  $i=1,2,3,4$  és  $l=1,2,\dots,15$ ). Az FGA eljárás keretében maximalizált többdimenziós célfüggvény egy „szeletét” mutatja a **2. ábra**, melynek több helyi (és egyetlen globális) maximuma indokolja a globális optimalizációs módszer alkalmazását. A (23) egyenlet alapján számított fitness abszolút értéke nagyságrendileg megegyezik a (15) egyenletnek megfelelő adattávolság százalékos értékével. A mért és a sorfejtési együtthatók alapján számított adatok ilyen nagymértékű ( $D_d \sim 100-500\%$ ) eltérését a linearizált inverzió már nem képes kezelni.



2. ábra: A populáció egyedeinek alkalmassága a sorfejtési együtthatók függvényében

Az FGA eljárással egy 50 egyedből álló populációt dolgozunk fel. A 60 sorfejtési együttható meghatározása érdekében 3000 gént cserélünk ki az egyedek között, ill. módosítunk a genetikus műveletek alkalmazásával. A globális optimum megtalálása általában  $10^4$ – $10^5$  generációt is igényelhet. A kombinált inverziós eljárás esetén viszont csak 5000 iterációs lépésig folytatjuk a keresést, mellyel megfelelő közelítést érünk el kevesebb, mint 2 perc alatt. Az evolúciós számítás vezérlőparaméterei: a legjobb egyed kiválasztásának valószínűsége ( $P_b=0.03$ ), a keresztezési kísérletek száma (100) és a mutáció valószínűsége (0.05). A legjobb egyedek megtartása érdekében az elitizmus szabályát alkalmazzuk, mellyel az aktuális generáció legrosszabb egyedét automatikusan az előző generáció legerősebb egyedével kicseréljük. A generációk (átlagos) alkalmasságának javulása **3a. ábrán** figyelhető meg. A kezdeti populációban a fitness átlagos értéke  $F=-7,4 \cdot 10^9$  ( $\sim D_d=10^9$ – $10^{10}$  %), amely az 5000-edik iterációs lépés befejezésével  $F=-53$ -ra nő. A legjobb egyed alkalmassági értéke  $F=-5.27$ , ami  $D_d=16.9$  % relatív adattávolságnak felel meg.

A kombinált intervalluminverziós eljárás keretében a globális optimalizáció (közelítő) eredményét tovább javíthatjuk az *1.1.1. fejezetben* bemutatott linearizált inverziós módszerre való áttéréssel. Abban az esetben, amikor a Legendre-polinomok fokszámát nem változtatjuk, a lineáris módszerrel nem csökkenthető jelentősen az adattávolság. A közetfizikai modell jobb felbontását (és az adattérbeli eltérés csökkentését) a sorfejtési együtthatók számának növelésével érhetjük el. A sorfejtési együtthatók optimális számát előzetes inverziós kísérletek alapján a becsült modellparaméterek átlagos korrelációja legkisebb értékénél határozhatjuk meg (*Dobróka és szerzőtársai, 2016b*). Ennek alapján a közetfizikai paramétereket 44-edfokú Legendre-polinomok felhasználásával diszkretizáljuk, mellyel az ismeretlenek száma 60-ról 180-ra emelkedik (a túlhatározottság aránya 5.4). A sorfejtési együtthatókat a (14) normálegyenlet megoldásával 10 iterációs lépésben határozzuk meg (**3b. ábra**). A csillapítási tényező értékét  $\varepsilon=1$ -nek választjuk és az érvényes értékét lépésenként 60 %-kal csökkentjük. Látható, hogy a lassú globális módszerrel történő keresés helyett a kombinált inverziós eljárás néhány iterációs lépés után az optimumban stabilizálódik. A megoldáshoz tartozó relatív adattérbeli távolság  $D_d=2.03$  %.

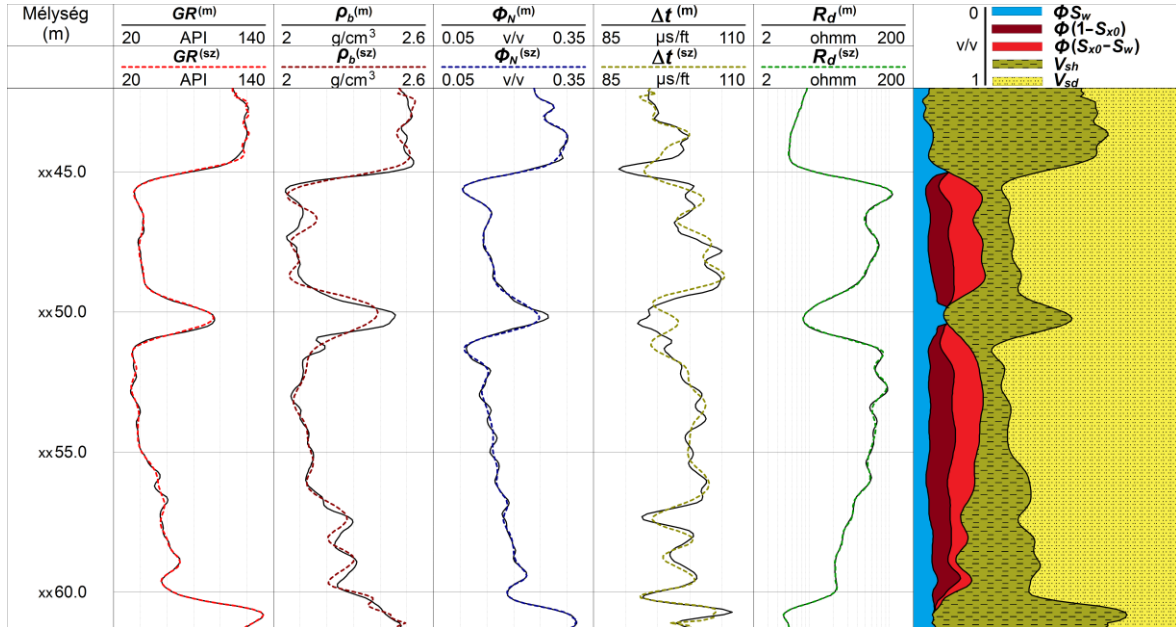


3. ábra: A kombinált intervalluminverziós eljárás konvergenciája a globális (evolúciós) (a) és a linearizált optimalizációs fázisban (b)

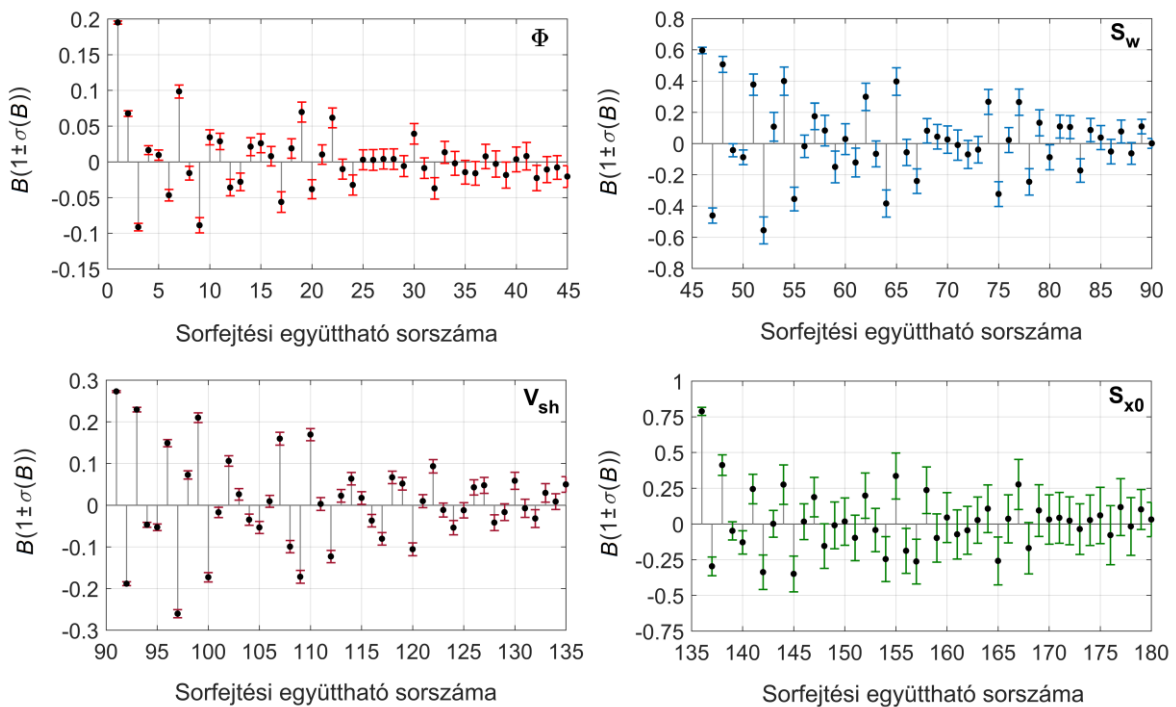
A sorfejtési együtthatók ismeretében a (9) formula alapján előállíthatjuk a közetfizikai paraméterek szelvényeit (4. ábra). A mért és a becsült modell alapján számított fűrőlyukszelvények illeszkedése megfelelő (az előbbit „m”, az utóbbit „sz” felsőindex jelöli). Az adattérbeli távolság javulását a direkt feladat továbbfejlesztésével érhetjük el. Az intervalluminverziós eljárás lehetővé teszi új vagy az alkalmazottaknál korszerűbb válaszgyenletek (vagy modellező algoritmusok) beépítését az inverziós eljárásba, mellyel az akusztikus terjedési idő még pontosabban számítható, vagy a (különböző behatolású szondával mért) fajlagos ellenállás szelvények előállítása esetén az iszappal való elárasztás hatása még részletesebben vehető figyelembe. A jobbszélső szelvényen a kőzetösszetétel látható, mely a becsült térfogatjellemző mennyiségeket a kőzet egységnyi térfogatához viszonyítva ábrázolja. A pórusteret kitöltő víz és szénhidrogén térfogatát az inverziós eredményekből közvetlenül származtathatjuk. A víztartalmat a  $V_w = \Phi S_w$  alapján, míg a mozgásképes és a maradék (redukálhatatlan) szénhidrogén mennyiségét a gyakorlatban széles körben alkalmazott  $V_{ch,m} = \Phi(S_{x0} - S_w)$  és  $V_{ch,r} = \Phi(1 - S_{x0})$  összefüggéssel számítjuk. A kombinált inverziós eljárás egy négymagos processzorral felszerelt munkaállomás használatával 2 percen belül adja az eredményt. Az inverziós kísérletek alapján arra a következtetésre juthatunk, hogy a kombinált intervalluminverziós eljárás gyors, stabil és a kiindulási modelltől független megoldást szolgáltat.

Az inverziós eredmények minőségellenőrzése a linearizált inverziós eljárás keretében végezhető el. A szelvényadatok bizonytalanságát, a terepi tapasztalatokat figyelembe véve a következőknek választjuk:  $\sigma_{GR} = 0.08$ ,  $\sigma_{\rho_b} = 0.05$ ,  $\sigma_{\Phi_N} = 0.09$ ,  $\sigma_{\Delta t} = 0.06$ ,  $\sigma_{R_d} = 0.06$ . A sorfejtési együtthatók pontosságát a (16) kovarianciamátrix jellemzi, mellyel

a  $B_1$  együtthatók relatív hibája 3–6 %. Megállapítható, hogy a porozitás és az agyagtartalom sorfejtési együtthatóinak hibája arányában kisebb, mint a víztelítettségeké, mely utóbbiak erősebb korrelációban is állnak egymással (5. ábra).

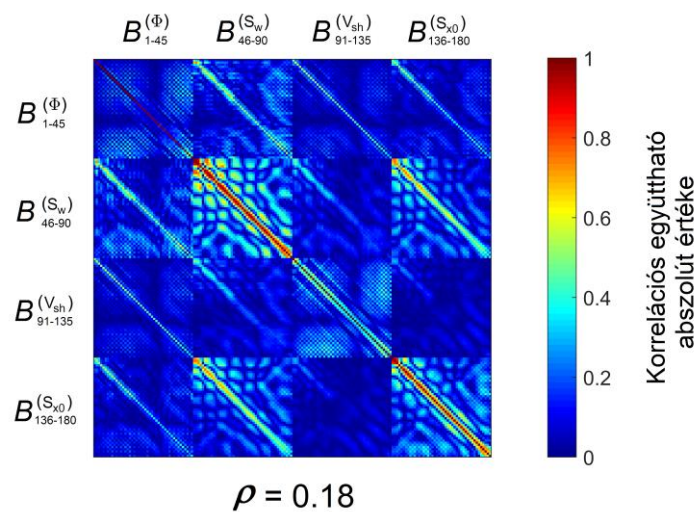


4. ábra: Mért és számított fúrólukszelvények, ill. a kombinált intervalluminverziós eljárással becsült kőzetfizikai mennyiségek egy hazai szénhidrogén-kutatófúrásban

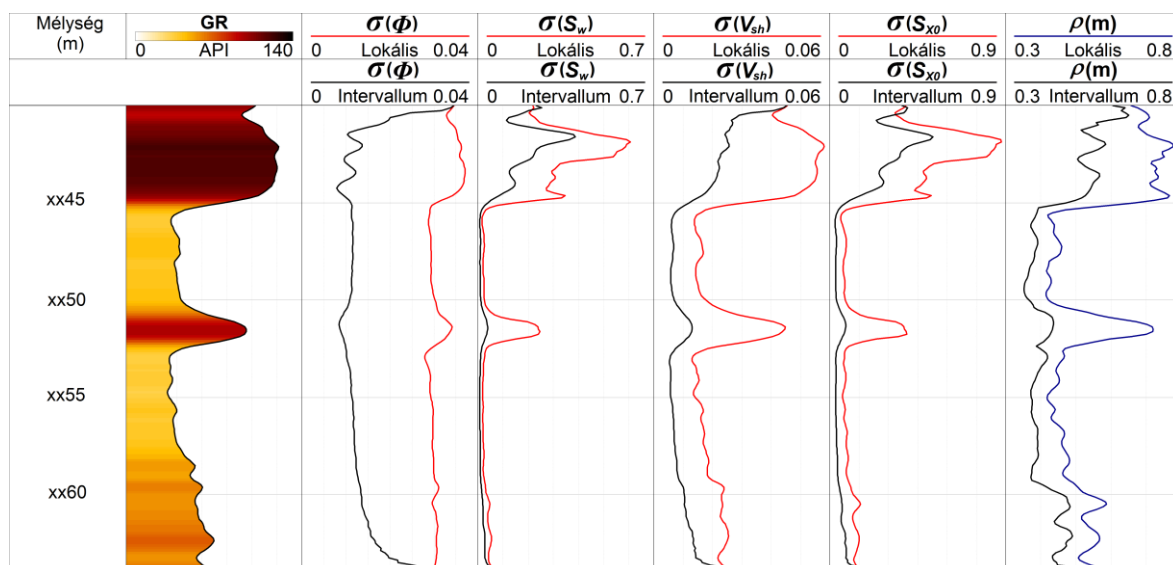


5. ábra: A kombinált intervalluminverziós eljárással becsült sorfejtési együtthatók megbízhatósági tartományaik

A közetfizikai jellemzőket leíró sorfejtési együtthatók ( $180 \times 180$  méretű) korrelációs mátrixa a **6. ábrán** látható. A korrelációs együtthatókból (20) alapján számított átlagérték  $\rho=0.18$ , mely az intervalluminverziós eljárással becsült paraméterek nagyfokú megbízhatóságát mutatja. A pontonkénti (lokális) és az intervalluminverziós eredmények hibajellemzőit a **7. ábrán** hasonlíthatjuk össze. A közetfizikai paraméterek bizonytalanságát az előbbi módszernél a (16) formula alkalmazásával mélységről-mélységre, az utóbbinál a (19) egyenlettel a teljes intervallumra számítjuk. Megállapítható, hogy a víztelítettség becslési hibája egy nagyságrenddel nagyobb, mint a porozitás és agyagtartalom bizonytalansága. A gáztárolókban a becslési hibák viszonylag kicsik, míg az impermeábilis rétegekben nagymértékben megnőnek, elsősorban a víztelítettségek közötti erős korreláció miatt. A becslési hibák az intervalluminverziós eljárás javára  $\sim 60\%$  ( $\Phi$ ),  $52\%$  ( $S_w$ ),  $55\%$  ( $V_{sh}$ ) és  $50\%$  ( $S_{x0}$ ) mértékű relatív javulást mutatnak. A közetfizikai paraméterek átlagos korrelációja  $\rho=0.44$ , ami  $\sim 15\%$  csökkenést jelent a pontonkénti inverzióval szemben.



6. ábra: Az intervalluminverzióval becsült sorfejtési együtthatók korrelációs mátrixa



7. ábra: A mélységpontonkénti és a kombinált intervalluminverziós eljárással meghatározott közetfizikai paraméterek becslési hibája (szórása) és átlagos korrelációja

## 2. A zónaparaméterek meghatározása az intervalluminverziós eljárás keretében

Az elméleti szondaválaszfüggvényekben szereplő mátrix-, agyag-, fluidum- és texturális jellemzők a megfigyelések szerint egy nagyobb mélységintervallumon (pl. szénhidrogén-tároló zónán) belül állandó vagy lassan változó mennyiségek. A mélyfúrési geofizikai inverz feladat túlhatározottságának megőrzése érdekében a nagyszámú zónaparamétert a mélységpontonkénti inverzió gyakorlatában a priori adott állandónak kezeljük, melyet rendszerint laboratóriumi mérések vagy szakirodalmi adatok alapján határozunk meg. A zonális jellemzők megválasztása alapvető feladat a megfelelő minőségű szelvényértelmezés szempontjából, mivel azok pontatlan megadása jelentős modellhibával terhelheti az inverzió eredményét. Mivel az intervalluminverziós eljárást nagymértékű túlhatározottság és stabilitás jellemzi, ezért a pontonkénti inverzióval ellentétben lehetőségünk nyílik arra, hogy bizonyos zónaparamétereket (mint ismeretlent) az inverziós eljárás keretében meghatározzunk (Szabó és szerzőtársai, 2009).

A zónaparaméterek intervalluminverziós módszerrel történő becsléséhez elegendő a homogén rétegeket leíró kőzetfizikai modell alkalmazása. Ennek alapján a térfogatjellemzők (porozitás, víztelítettség, agyagtartalom és mátrixrészarányok) és a zónaparaméterek állandó értékei rétegről-rétegre meghatározhatók, mely a korábbi módszereknél jóval részletesebb (szelvényyszerű) tájékoztatást ad a zónaparaméterekről. A (8) sorfejtés alkalmazásával a zónaparamétereket is mélységfüggő mennyiségként kezelhetjük, melyek rétegenként állandó értékét a Heaviside-féle egységugrás-függvényekkel állíthatjuk elő

$$\Psi_q(z) = u(z - Z_{q-1}) - u(z - Z_q), \quad (30)$$

ahol  $Z_q$  és  $Z_{q-1}$  a  $q$ -edik homogén szakasz felső és alsó határának a mélységkoordinátáit jelölik. Mivel a (30) bázisfüggvény alkalmazásával a (8) sorfejtésben szereplő  $B_q^{(i)}$  sorfejtési együttható megegyezik az  $i$ -edik kőzetfizikai paraméter  $q$ -edik rétegbeli értékével, így a sorfejtés teljes intervallumán egyszerre előállítható valamennyi kőzetfizikai paraméter rétegenként állandó értéke. A fenti diszkretizációs eljárás előnye, hogy a rétegzett közeg viszonylag kevés számú ismeretlennel leírható, azaz nagymértékben túlhatározott inverz feladatot oldunk meg. Az intervalluminverziós eljárással így pontos és megbízható paraméterbecslést valósíthatunk meg, továbbá a bázisfüggvényekben megjelenő réteghatárkoordináták az inverziós eljárással közvetlenül meghatározhatók (Szabó, 2004a; Dobróka és Szabó, 2012). Az  $s$ -edik szelvény számítására alkalmas (4) válaszfüggvény nemcsak a térfogatjellemző mennyiségeket, hanem a zónaparamétereket is tartalmazhatja

$$d_s^{(sz)}(z) = g_s(m_1(z), \dots, m_i(z), \dots, m_p(z), c_1(z), \dots, c_r(z), \dots, c_R(z)), \quad (31)$$

ahol  $c_r$  az  $r$ -edik zónaparaméter és  $R$  az inverzióba foglalt zónaparaméterek száma. A vizsgált mélységintervallumon mért,  $S$  számú szelvény valamennyi adatát egyesítve kapjuk a számított adatvektort, melynek a mért adatok vektorától való eltérését (normáját) az intervalluminverziós eljárással minimalizáljuk. Az inverz feladat linearizált optimalizációs eljárással az 1.1.1. fejezetben leírtak alapján oldható meg. Azonban a linearizált inverziós módszerek hátrányainak kiküszöbölésére és a többértelmű megoldás elkerülése végett a zónaparamétereket leíró sorfejtési együtthatókat globális optimalizációs módszerrel határozzuk meg.

## 2.1. A zónaparaméterek meghatározása globális intervalluminverziós eljárással

A geofizikai inverzió gyakorlatában ismert, hogy a modellegyenletekben szereplő közetfizikai változók különböző mértékben befolyásolják a számított adatokat, és ez jelentős hatást gyakorol az inverz feladat megoldására (Dobróka, 1988; Gyulai, 1989; Ferenczy, 1995). Az inverziós eljárásba bevont ismeretlenek körét gondosan kell kiválasztani, melyet paraméterérzékenységi vizsgálatokra és korrelációs számításra alapozhatunk. Az inverziós eljárás szempontjából az eltérő paraméterérzékenységek következménye, hogy az iterációs lépések során az érzékenyebb paraméterek gyorsabban konvergálnak (egységnyi megváltozásuk jobban befolyásolja az adattérbeli eltéréseket jellemző célfüggvényt), míg a kevésbé változékonyak általában „lemaradnak” (vagy erős korreláció fennállása esetén együtt változnak a többi modellparaméterrel). Mind a mélységpontokénti, mind pedig az intervalluminverzió mint együttes inverziós eljárások szempontjából az is kedvező, ha a nagyobb érzékenyséű paraméterek a lehető legtöbb válaszfüggvényben jelen vannak. A mélyfúrési geofizikai inverz feladatra vonatkozóan igazolható, hogy a relatíve nagy érzékenységgel jellemezhető és egymással gyenge korrelációs viszonyban álló modellparamétereket nagyobb pontossággal tudjuk meghatározni, míg ezzel ellentétben a kis paraméterérzékenység és az erős korrelációs kapcsolatok a linearizált inverziós eljárás lokális minimumban való stabilizálódását okozhatja (Szabó, 2004a).

A paraméterérzékenységi függvények arról tájékoztatnak, hogy a közetfizikai paraméterek egyedi megváltozása milyen mértékben befolyásolja a számított szelvényadatok értékét. Az  $s$ -edik mérésfajta  $r$ -edik zónaparaméterre vonatkozó érzékenységét a  $\Theta$  dimenziótlan mennyiséggel jellemezhetjük

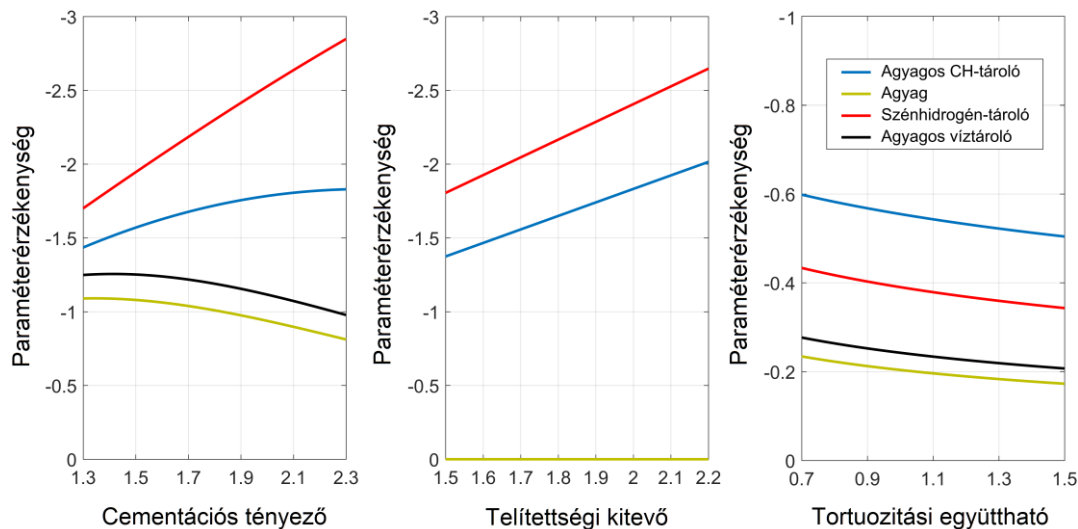
$$\Theta_{sr}(c_r) = \frac{\partial d_s^{(sz)}}{\partial c_r} \cdot \frac{c_r}{d_s^{(sz)}}. \quad (32)$$

A paraméterérzékenység jellemzésének kérdése a mélyfúrési geofizikában leginkább a víztelítettség meghatározására alkalmas nemlineáris fajlagos ellenállás válaszegyenleteknél lényeges, melyek nagyszámú függvényállandót tartalmaznak. Az elsőként Archie (1942) által bevezetett texturális paraméterek (mint területi állandók) megjelennek az olajipari gyakorlatban széles körben alkalmazott egyéb tapasztalati egyenletekben is, pl. az Indonéziai-formulákban (Poupon és Leveaux, 1971)

$$\frac{1}{\sqrt{R_t}} = \left[ \frac{V_{sh}^{\left(1 - \frac{V_{sh}}{2}\right)}}{\sqrt{R_{sh}}} + \frac{(\sqrt{\Phi})^m}{\sqrt{aR_w}} \right] (\sqrt{S_w})^n, \quad (33)$$

ahol  $R_t$  (ohmm) jelöli a valódi fajlagos ellenállást,  $R_{sh}$  (ohmm) az agyag fajlagos ellenállását,  $R_w$  (ohmm) a rétegvíz fajlagos ellenállását,  $\Phi$  (v/v: térfogatrész) a porozitást,  $V_{sh}$  (v/v) az agyagtartalmat,  $S_w$  (v/v) az érintetlen zóna víztelítettségét. A közet texturális sajátosságait az  $m$  cementációs tényező, az  $n$  telítettségű kitevő és az  $a$  tekervényességi (tortuozitási) együttható írja le, melyek érzékenységi függvényeit egy szénhidrogén-tároló agyagos-homokképződményben (ahol a porozitás 0.10–0.25 v/v és a gáztelítettség 0.30–0.40 v/v között változik) a **8. ábrán** figyelhetjük meg. A paraméterérzékenységet a teljes gyakorlati

tartományban vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a három zónaparaméter közül a cementációs kitevőre vonatkozó érzékenység (abszolút értékben) a legnagyobb. A tekervényességi együttható ennél kisebb mértékben befolyásolja a szelvényadatokat, melynek inverziós módszerrel való becslése bizonytalanabb. A legkedvezőtlenebb a szaturációs kitevő meghatározása, melynél az érzékenységi függvény értékei viszonylag kicsik, ill. gyakorlatilag zérus az agyagos, ill. teljesen vízzel telített képződményekben. Ez abból adódik, hogy a (33) egyenletben szereplő  $S_w^{n/2}$  kifejezés bármely becsült  $n$  értékre 1-et ad, melynek alapján a telítettségi kitevő linearizált inverzióval való (egyértelmű) meghatározása kétséges. Megjegyezzük, hogy az olajipari alkalmazás számára kedvező, hogy a szénhidrogén-tároló képződményekben adódik a legnagyobb paraméterérzékenység.



8. ábra: A fajlagos ellenállás válaszfüggvényben szereplő texturális paraméterek érzékenységi függvényei

A fajlagos ellenállás válasz egyenletekben szereplő zónaparaméterek meghatározására globális optimalizációs technikán alapuló intervalluminverziós eljárást fejlesztettem. Az inverz feladat megoldására a Simulated Annealing (SA) módszert választottam, melynek alapjait *Metropolis és szerzőtársai (1953)* dolgozták ki, fémek termikus egyensúlyi állapotának modellezése céljából. A hasonlóság alapját a hűtés időtartamától és ütemétől függően kialakuló fémrács összenergiája és az inverz feladat minimalizálandó célfüggvényének kapcsolata adja. A kohászatban a fémek lágyítását az olvadt állapothoz közeli hőmérsékletre indított lassú hűtéssel valósítják meg, melynek hatására a nagyszámú atom fokozatosan veszít mozgási energiájából és a fém kristályosodni kezd. A kialakuló fémrács atomi összenergiája a hűtés időtartamának a függvénye. Elméletileg végtelen lassú hűtés lenne szükséges a legkisebb energiájú (tökéletes) rácsszerkezet kialakításához, mely párhuzamba hozható a geofizikai inverz feladat célfüggvénye abszolút minimumának megtalálásával. A gyakorlatban ilyen lassú folyamat nem valósítható meg, ezért ennél gyorsabb hűtési eljárás szükséges. Azonban, túl gyors hűtés esetén a kristályos szerkezetben rácshibák alakulnak ki, így a fém egy magasabb energiaszinten fagy „tökéletes” rácshiba. Ez megfelel az inverziós eljárás helyi minimumban való stabilizálódásának. Az atomok speciális hőkezelés (annealing) hatására képesek kiszabadulni a magasabb energiaszintű kristályszerkezetből, majd ezután újra lassú hűtés



mellett érik el a minimális energiájú rácsszerkezetet. Az SA eljárás a fenti hőkezelési folyamatot használja fel a célfüggvény globális minimumának megtalálására. *Geman és Geman (1984)* kimutatták, hogy a Metropolis-féle (klasszikus) SA eljárás esetén a globális minimum a következő hűtési mechanizmus alkalmazása esetén garantálható

$$T(t) = \frac{T_0}{\ln t} \quad (t > 1), \quad (34)$$

ahol  $T(t)$  a  $t$ -edik iterációs lépésben alkalmazott általánosított hőmérséklet, és  $T_0$  a kezdeti (kritikus) hőmérséklet. Mivel a logaritmikus hűtés meglehetősen lassú folyamat, ezért többen kísérletet tettek az SA módszer továbbfejlesztésére. A futási időt leghatékonyabban az exponenciális időfüggvénnyel leírható hűtési szabályon alapuló VFSA (Very Fast Simulated Re-Annealing) módszerrel csökkenthetjük (*Ingber, 1989*).

Az SA módszer terminológiájában az optimalizációs feladat célfüggvényét energiafüggvénynek nevezzük, mely kapcsolatba hozható a mért és a számított szelvényadatok eltéréseivel. A mérési adatok (13) vektora és a (6) számított adatvektor különbségét képezve előállítjuk az  $\vec{e}$  eltérésvektort, majd megfelelően normáljuk a mérési adatok szórásával. Az intervalluminverziós eljárás keretében (hasonlóan az 1.1.2. fejezethez) az eltérésvektor euklideszi-normánégyzetét minimalizáljuk

$$E(\vec{B}) = \|\vec{e}\|_2^2 = \min, \quad (35)$$

ahol  $\vec{B}$  tartalmazza a rétegenként állandó értékű közetfizikai mennyiségeket és a zónaparamétereket leíró sorfejtési együtthatókat. Az SA eljárás véletlenkeresést hajt végre a paramétertérben a sorfejtési együtthatók alábbi változtatásával

$$B_l^{(t)} = B_l^{(t-1)} + \tau, \quad (36)$$

ahol  $B_l^{(t)}$  jelöli az  $l$ -edik sorfejtési együttható  $t$ -edik iterációs lépésben becsült értékét és  $\tau$  a paraméterváltoztatás mértékét ( $l=1,2,\dots,M$ ). Ez utóbbi mennyiséget minden iterációs lépésben a  $[0, \tau_{max}]$  tartományból véletlenszerűen generáljuk. Az SA eljárás elején a  $\tau_{max}$  paraméternek viszonylag nagy értéket adunk, mely lehetővé teszi számos különböző energiaállapot (lehetséges megoldás) átvizsgálását a keresési térben. A  $\tau_{max}$  értékét az alábbi szabály szerint csökkentjük, annak érdekében, hogy a véletlen keresés az iterációs eljárás során ne távolodjon el számottevően a megoldástól

$$\tau_{max}^{(t)} = b \tau_{max}^{(t-1)} \quad (0 < b < 1). \quad (37)$$

A SA eljárással adott  $T$  hőmérsékleten különböző véletlen energiaállapotokat (sorfejtési együtthatóvektorokat) megvizsgálunk, és az aktuális együtthatókkal számított (35) energiafüggvény értéket összehasonlítjuk az előző lépésben elfogadott energiafüggvény értékkel. A Metropolis-féle kritérium az aktuális együtthatóvektor elfogadására a következő valószínűségi szabályt írja elő

$$P(\vec{B}) = \begin{cases} 1, & \text{ha } \Delta E \leq 0 \\ e^{-\frac{\Delta E}{T}}, & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (38)$$

ahol  $\Delta E$  az aktuális és az előző lépésben számított energiafüggvény értékek különbségét jelöli. A (38) kritérium alapján az energia csökkenése minden esetben az új modellparaméterek elfogadását írja elő. Az SA módszer a helyi minimumból való kiszabadulás lehetőségét is megengedi, mivel növekvő energia (a mért és számított adatok rosszabb illeszkedése) esetén is esélyt ad az új modell elfogadására. Ha teljesül a  $P(\vec{B}) \geq \alpha$  egyenlőtlenség (ahol  $\alpha$  a  $[0,1]$  tartományból egyenletes valószínűséggel generált szám), akkor az új modellt elfogadjuk, ill. ellenkező esetben elvetjük. A (38) formulában szereplő  $T$  általánosított hőmérsékletet (mint vezérlő paramétert) a (34) hűtési ütemnek megfelelően kell csökkenteni, mellyel az iterációs eljárás vége felé befolyásolhatjuk az új modellek elfogadási valószínűségét. Az SA eljárás általában több ezer iterációs lépést igényel, annak befejezését általában a maximális iterációs lépésszámhoz, vagy az energiafüggvény egymást követő lépésekben kapott értékkülönbségének minimumához kötjük. Az utolsó iterációs lépésben elfogadott sorfejtési együtthatóvektort tekintjük az inverz feladat megoldásának, mely a (8) és (30) összefüggések alapján megadja a térfogatjellemező mennyiségek és a zónaparaméterek mélység szerinti változását.

## 2.2. A texturális és fajlagos ellenállás paraméterek meghatározása intervalluminverziós módszerrel

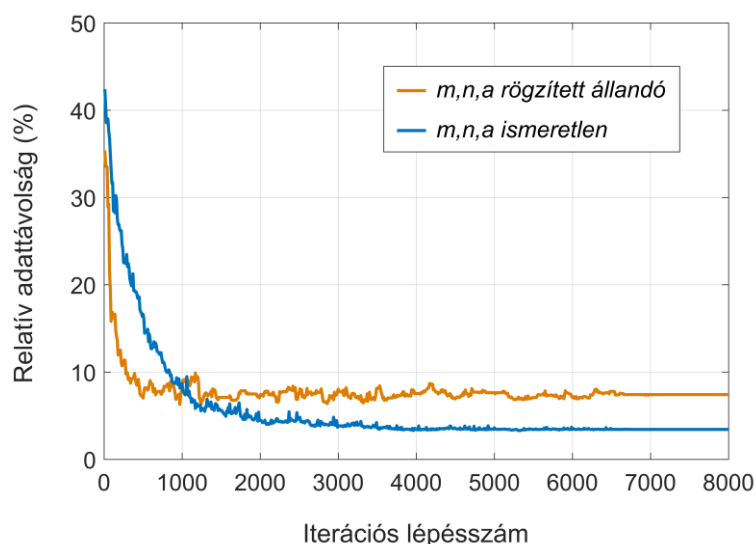
A fajlagos ellenállás válaszfüggvényekben szereplő texturális paraméterek linearizált intervalluminverziós módszerrel való meghatározási lehetőségét először szintetikus szelvényadatok felhasználásával célszerű vizsgálni. Az inverziós kísérletek szerint az intervalluminverziós módszer felhasználása az  $m$  és  $a$  mennyiségek egyedi meghatározása esetén előnyös. Mivel a két paraméter csak kismértékben korrelál az agyagtartalommal, így az inverziós módszert agyagos szénhidrogén-tárolók kiértékelésére is alkalmazhatjuk. A szaturációs kitevő inverziós előállítására viszont akadályba ütközik, mivel a kis paraméterérzékenység következtében a linearizált inverziós eljárás gyakran instabillá (divergenssé) válik. A becslési hibák és a korrelációs együtthatók nagy értéke miatt a megoldás csak tájékoztató jellegű ismeretnek minősül. Kimutatható azonban, hogy a globális optimalizációs módszerek alkalmazásával erősen zajos adatok inverziója esetén is konvergens megoldás adható (Szabó és szerzőtársai, 2009; Dobróka és Szabó, 2011). A térfogatjellemező közetfizikai mennyiségek Legendre-bázisfüggvényeken alapuló sorfejtése alapján a zónaparamétereket is bevonhatjuk a linearizált intervalluminverziós eljárásba. Ennek alapján, terepi adatok felhasználásával egyenként meghatároztuk a (egy futtatás alkalmával a teljes intervallumon egyetlen állandó értékű) zónaparamétereket és becslési hibájukat (Dobróka és szerzőtársai, 2016b).

Az SA módszeren alapuló intervalluminverziós eljárás lehetővé teszi a texturális jellemzők együttes, stabil inverziós eljárásban történő meghatározását. Az inverziós módszer teszteléséhez az 1.2. fejezetben szereplő hazai kutatófúrás alábbi bővített adatrendszerét használjuk fel: természetes-gamma (totális) intenzitás ( $GR$ ), a spektrális természetes-gamma szondával mért kálium- ( $K$ ), urán- ( $U$ ) és tórium- ( $Th$ ) tartalom, közet-sűrűség ( $\rho_b$ ), neutronporozitás ( $\Phi_N$ ), akusztikus intervallumidő ( $\Delta t$ ) és mélybehatalású laterolog szondával mért fajlagos ellenállás ( $R_d$ ). A (30) sorfejtéssel diszkretizált közetfizikai mennyiségek képezik az inverz feladat ismeretlenjeit: porozitás ( $\Phi$ ), agyagtartalom ( $V_{sh}$ ), homoktérfogat ( $V_{sd}$ ), kisépért zóna víztelítettsége ( $S_{x0}$ ), érintetlen zóna víztelítettsége ( $S_w$ ), cementációs kitevő ( $m$ ), tekervényességi együttható ( $a$ ), telítettségi kitevő ( $n$ ). (A zónaparaméterek szempontjából nem indokolt ennél finomabb felbontást alkalmazni, ez a

túlhatározottság jelentős romlásával járna.) A direkt feladat megoldására alkalmazott válaszgyenlet-rendszert a **2a. melléklet** tartalmazza, míg a rögzített értékű (egyéb) zónaparaméterek a **2b. mellékletben** találhatóak. A természetes-gamma szelvény alapján négy homogén szakaszt különíthetünk el, melynek alapján az **1. táblázatban** található kezdeti modellt javasoljuk ( $H$  jelöli a GR szelvény alapján meghatározott rétegvastagságot, melyet állandónak rögzítünk). A maximális iterációs lépésszámot 8000-nek, a (34) egyenletben szereplő kezdeti hőmérsékletet  $T_0=0.2$ -nek, ill. a (37) egyenletben található maximális paraméterváltoztatás mértékét 0.1-nek választjuk. A  $\tau$  paramétert minden 500. iterációs lépésben az érvényes értéke 85 %-ára csökkentjük. Az inverz feladat megoldásához tartozó relatív adattávolság  $D_d=3.42$  %. Az adattávolság–iterációs lépésszám függvényt a **9. ábra** tartalmazza, melyen megfigyelhető, hogy az optimumkeresés a helyi minimumokat hatékonyan elkerüli. Amikor a texturális jellemzőket az **1. táblázatban** található értékeknek megfelelően rögzítjük, akkor az optimum  $D_d=7.41$  % adattávolságnál adódik. Az abszolútminimum-kereső módszer nagymértékben javítja a mért és számított adatok illeszkedését és egyben stabilizálja az inverziós eljárást. Az intervalluminverziós eredményeket (A-jelű inverzió) a **10. ábrán** láthatjuk. Megállapítható, hogy a térfogatjellemező mennyiségek értékei jól közelítik a Legendre-polinomok alkalmazásával kapott eredményt (**4. ábra**). A texturális paraméterek rétegről-rétegre változnak, melyek konszolidálatlan üledékes rétegsorra jellemző értékeket mutatnak.

1. táblázat

$H$ (m)	$\Phi^{(0)}$	$S_{x0}^{(0)}$	$S_w^{(0)}$	$V_{sh}^{(0)}$	$m^{(0)}$	$n^{(0)}$	$a^{(0)}$
4.20	0.30	1.0	1.0	0.30	1.50	2.0	1.0
4.30	0.10	0.80	0.40	0.20			
1.40	0.20	1.0	1.0	0.60			
8.30	0.10	0.70	0.40	0.40			



9. ábra: Az SA technikát felhasználó intervalluminverziós eljárás konvergenciája rögzített, ill. ismeretlen texturális paraméterek mellett

A szénhidrogén-telítettség meghatározásának eredményét jelentősen befolyásolja az agyag ( $R_{sh}$ ) és a rétegvíz fajlagos ellenállásának ( $R_w$ ) meghatározása. Mivel e két mennyiség a texturális paraméterekkel is erősen korrelál (ugyanabban a válaszgyenletben



tároló képződményeket bonyolult kőzetösszetétel és vegyes porozitás jellemzi, melyek általában nagy mélységben helyezkednek el, ahol a szelvényválaszték is korlátozott és a szelvényadatokat jelentős környezeti hatás befolyásolja.

Az inverz feladat megoldására hagyományosan alkalmazott (agyagos homokkővek esetére kifejlesztett) válaszegyenletek is módosításra szorulnak. A kőzetmátrixot felépítő ásványfajták száma adott esetben 6–8 is lehet, melyek relatív térfogatai az inverz feladat legfontosabb ismeretlenjei. A válaszfüggvényekben szereplő nagyszámú függvényállandót gyakran csak irodalomból tudjuk megadni. A zónaparaméterek meghatározásánál leginkább a laboratóriumi mérésekre támaszkodhatunk, melyek az eltérő mérési körülmények, valamint az alkalmazott módszereket terhelő hibák miatt gyakran jelentősen eltérhetnek a szelvényértelmezés (független) eredményétől. A különbségek további oka, hogy az üledékes kőzetek válaszegyenletei csak a kőzetek elsődleges (szemcseközi) porozitását tartalmazzák. Matematikai szempontból ezt komplex tárolóknál is elfogadjuk, azonban ebben az esetben a porozitásnak tartalmaznia kell a repedések és üregek által képviselt másodlagos porozitást is. Mivel ez utóbbi egy nagyságrenddel kisebb, mint a konvencionális tárolók elsődleges porozitása, így az inverz modellezés szempontjából a hangsúly inkább a kőzetmátrix-részarányok meghatározásán van. A térfogatjellemző mennyiségek meghatározása nehezen kezelhető a pontonkénti inverziós módszerrel, mely a zónaparaméterek rögzített értékei mellett is gyakran többértelmű (alulhatározott) inverz feladatra vezet. A kismértékben túlhatározott inverz feladat keretében nem tudjuk egyszerre valamennyi térfogatjellemzőt meghatározni; az ismeretlenek megnövekedett száma pedig az inverziós eljárás zajérzékenységét erősíti. Az inverz feladat megoldása szempontjából előnyös, ha egy nagyobb mélységintervallum adatait együttes inverziós eljárás keretében dolgozzuk fel. Az intervalluminverziós módszer kínálta nagymértékű túlhatározottság révén lehetőség nyílik a komplex szénhidrogén-tárolók kőzetfizikai paramétereinek egyidejű meghatározására, mivel a mátrixrészarányokat, mint új inverziós ismeretleneket az inverziós eljárásba bevonhatjuk, anélkül hogy a túlhatározottság számottevően csökkenne. Az intervalluminverziós módszer olajipari alkalmazásai azt mutatják, hogy az inverziós eredmények megbízhatósága is hatékonyan növelhető (Szabó és Tolnai, 2011; Dobróka és szerzőtársai, 2012).

Komplex tárolók kőzetfizikai paramétereit a (30) sorfejtésen alapuló intervalluminverziós eljárás felhasználásával határozzuk meg. A Legendre-polinomok alkalmazása túl sok ismeretlen sorfejtési együttható bevezetését igényelné, mely jelentősen csökkentené a túlhatározottság mértékét és az inverziós eljárás stabilitását. A direkt feladat megoldásához szükséges általánosított válaszfüggvényeket a **3a. melléklet** tartalmazza. Először szintetikus adatok feldolgozásával megvizsgáljuk, hogy egy ismert kőzetfizikai modell paramétereit milyen pontosan tudjuk meghatározni. Az inverziós vizsgálathoz az *1.1.1. fejezetben* bemutatott linearizált intervalluminverziós eljárást alkalmazzuk. A négy rétegből felépített karbonátos szénhidrogén-tároló képződmény (elméleti) kőzetfizikai modelljének paramétereit a **2. táblázatban** találhatók, ahol  $H$  az (állandónak tekintett) rétegvastagságot,  $\Phi_t$  a teljes porozitást,  $V_{sh}$  az agyagtartalmat,  $V_{sd}$  a kvarcreszarányt,  $V_{lm}$  a mészkő térfogatát,  $V_{do}$  a dolomit térfogatát,  $S_{x0}$  és  $S_w$  a kisépért és az érintetlen zóna víztelítettségét jelöli. Az inverz feladat túlhatározottságát növelhetjük, ha a kisépért zóna víztelítettségét az  $S_{x0} = S_w^\eta$  (ahol  $\eta$  egy 0.2 és 0.5 közötti érték) tapasztalati formulával számítjuk (Baker Atlas, 1996), valamint a dolomit térfogatát (az inverziós eljárásán kívül) a  $V_{do} = 1 - \Phi_t - V_{sh} - V_{sd} - V_{lm}$  agyagmérleg egyenlet alapján becsüljük. Az ismert modellparaméterek és a **3b. mellékletben** található szelvénykonstansok felhasználásával (0.1 m mérési ponttávolsággal) szintetikus szelvényadatokat generálunk, melyhez 5 % nagyságú,

Gauss-eloszlásból származó véletlen zajt keverünk (ld. 5.2. fejezet). Az intervalluminverziós eljárás keretében a természetes-gamma intenzitás ( $GR$ ), közetsűrűség ( $\rho_b$ ), neutronporozitás ( $\Phi_N$ ), akusztikus intervallumidő ( $\Delta t$ ), és a sekély ( $R_s$ ), ill. mélybehatolású ( $R_d$ ) laterolog szondával „mért” fajlagos ellenállás szelvényeket dolgozzuk fel. Az invertált adatok száma a 30 m hosszúságú szakaszon (300 mélységpontban)  $N=1800$ . Mivel a négy homogén rétegben  $M=20$  sorfejtési együttható segítségével valamennyi térfogatjellemző leírható, így a túlhatározottság mértéke 90.

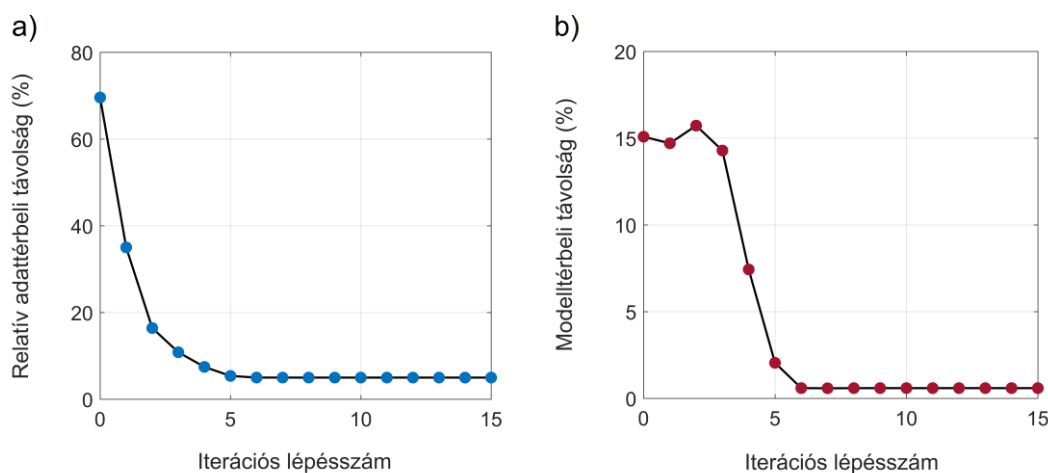
2. táblázat

$H$ (m)	$\Phi_t$	$S_w$	$S_{x0}$	$V_{sh}$	$V_{sd}$	$V_{lm}$	$V_{do}$
8.0	0.05	1.0	1.0	0.10	0.20	0.40	0.25
10.0	0.15	0.30	0.80	0.05	0.55	0.15	0.10
4.0	0.05	1.0	1.0	0.45	0.05	0.20	0.25
8.0	0.10	1.0	1.0	0.15	0.25	0.40	0.10

Az intervalluminverziós eljárást stabil és gyors konvergencia jellemzi. A (14) egyenlet alkalmazásánál a csillapítási tényező értékét kezdetben  $\varepsilon^2=100$ -nak választjuk, majd minden azt követő iterációs lépésben az érvényes értékét 15 %-ára csökkentjük. A linearizált inverziós eljárást 10 iteráción át folytatjuk, amely már a 6. lépés után az optimumban stabilizálódik (**11a. ábra**). A (15) formula alapján a megoldáshoz tartozó adattérbeli távolság  $D_d=4.98$  %. A szintetikus inverziós kísérlet lehetővé teszi a megoldás elméleti modelltől való eltéréseinek a vizsgálatát. A modelltérbeli távolság  $R$  számú homogén rétegből felépített modellre az alábbi módon számítható

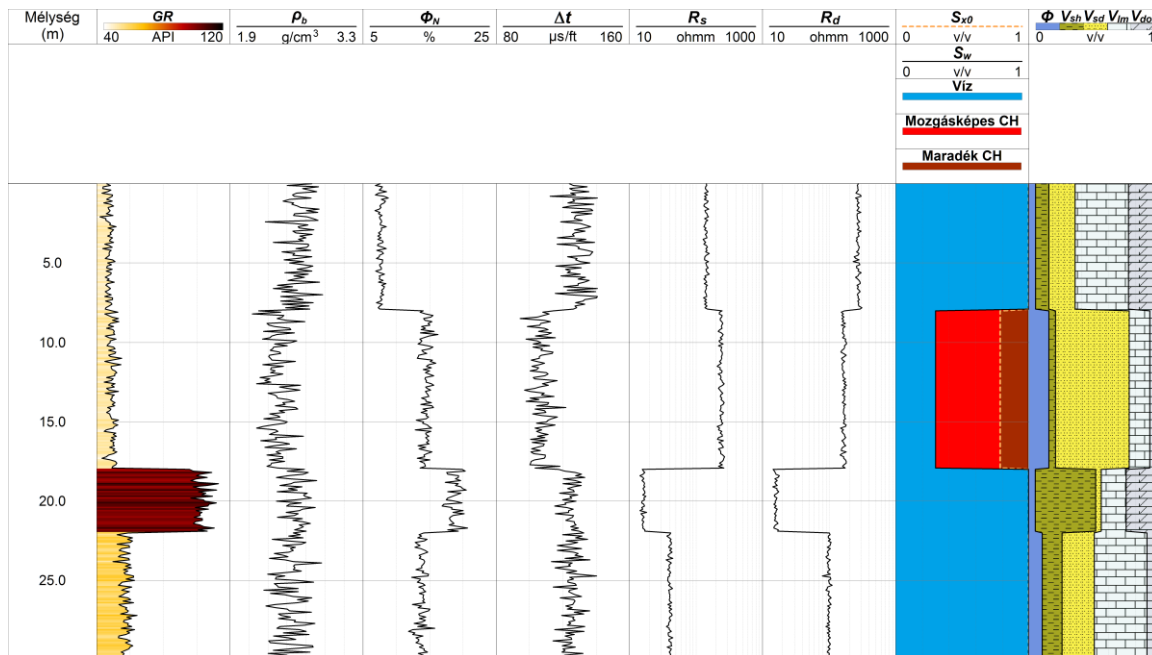
$$D_m = \left[ (RP)^{-1} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^P (m_{ri}^{(b)} - m_{ri}^{(e)})^2 \right]^{1/2} \cdot 100(\%), \quad (39)$$

ahol  $m_{ri}^{(b)}$  és  $m_{ri}^{(e)}$  képviseli az  $r$ -edik rétegben az  $i$ -edik becsült és (pontosan) ismert modellparamétert és  $P$  a közetfizikai (modell-) paraméterek számát jelöli. Az inverziós eredményhez tartozó modelltávolság  $D_m=0.59$  % (**11b. ábra**).



11. ábra: Az adattérbeli távolság (a) és a modelltávolság (b) javulása az intervalluminverziós eljárás végrehajtása során

A becsült kőzetfizikai paraméterek és a mért változók szelvényei a **12. ábrán** tekinthetők meg. Az eredményszelvényeket a célmodell paramétereivel (**2. táblázat**) összevetve megállapíthatjuk, hogy az intervalluminverziós eljárás nagy pontossággal képes előállítani a térfogatjellemző mennyiségeket. Ha a bemenő adatokat korrelálatlannak tekintjük, és azt feltételezzük, hogy a bizonytalanságuk megegyezik ( $\sigma_d=0.05$ ), akkor az inverziós ismeretlenek átlagos becslési hibája  $\bar{\sigma}_m = 0.06$  v/v. A legnagyobb hiba az agyagos rétegek víztelítettségét terheli, míg az agyagtartalom meghatározása a legpontosabb a szénhidrogén-tároló képződményekben. A kőzetfizikai jellemzők átlagos korrelációja  $\rho=0.26$ , mely stabil és megbízható inverziós eljárást mutat.

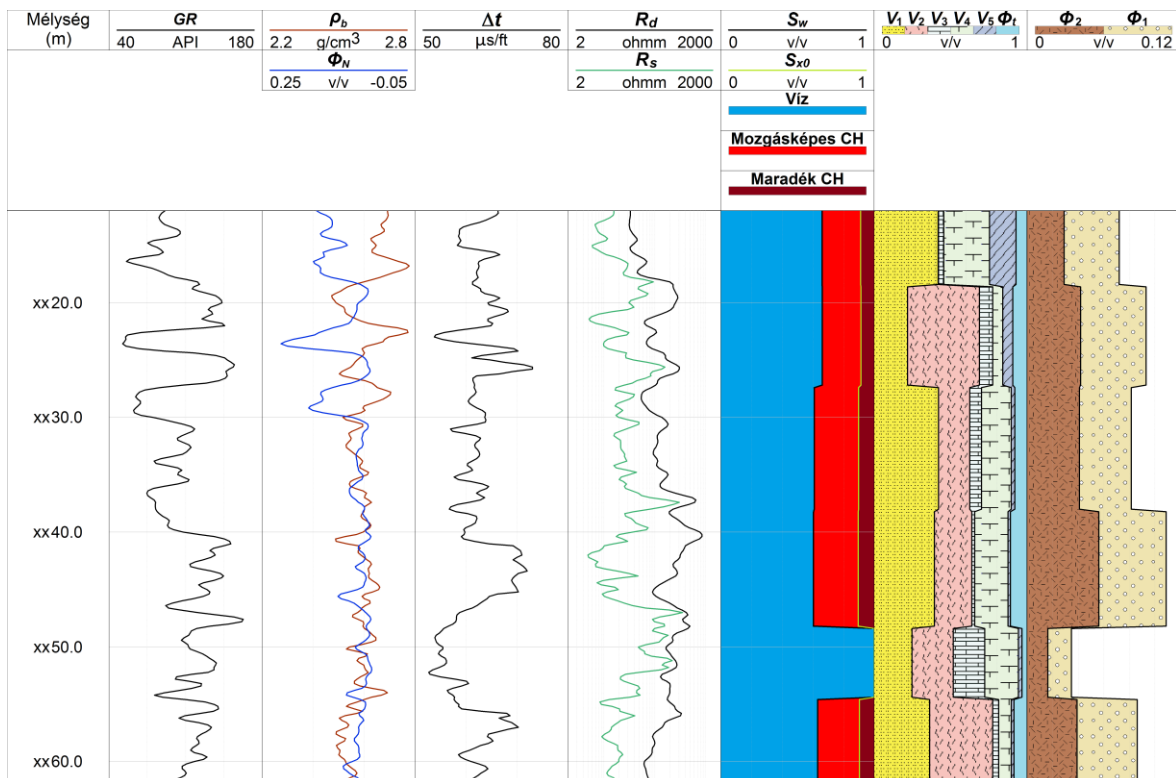


12. ábra: Az intervalluminverziós eljárás eredménye 5 % mértékű Gauss-zajjal terhelt szintetikus adatok feldolgozása esetén

Az intervalluminverziós módszert terepi körülmények között egy hazai repedezett metamorf szénhidrogén-tároló képződményben vizsgáljuk. A térfogatjellemző paraméterek meghatározásához a **2.1. fejezetben** bemutatott SA eljárást alkalmazzuk, mellyel hatékonyan elkerülhetjük a (35) célfüggvény helyi minimumait. Az inverz feladat keretében a természetes-gamma intenzitás ( $GR$ ), kőzetsűrűség ( $\rho_b$ ), neutronporozitás ( $\Phi_N$ ), akusztikus intervallumidő ( $\Delta t$ ), sekély- ( $R_s$ ) és mélybehatolású ( $R_d$ ) laterolog szondával mért fajlagos ellenállás szelvényeket dolgozzuk fel. Az előremodellezés a **4a. mellékletben** felsorolt válaszgyenletek és a **4b. mellékletben** szereplő zónaparaméterek alkalmazását foglalja magában. A kőzetelemzés során ötféle ásványtípust azonosítottak, minek alapján az alábbi térfogatjellemzőket tekintjük ismeretlennek: elsődleges porozitás ( $\Phi_1$ ), másodlagos porozitás ( $\Phi_2$ ), kispert zóna víztelítettsége ( $S_{x0}$ ), érintetlen zóna víztelítettsége ( $S_w$ ), kvarctérfogat ( $V_1$ ), káliumföldpát térfogat ( $V_2$ ), nátriumföldpát térfogat ( $V_3$ ), csillám térfogat ( $V_4$ ) és amfibolit térfogat ( $V_5$ ). Az akusztikus szonda (4.4) tapasztalati válaszgyenletében szereplő másodlagos porozitás az inverziós eljárás keretén belül meghatározható. Az inverz feladat túlhatározottsága növelése céljából a kispert zóna víztelítettségét az  $S_{x0} = S_w^{0.22}$  helyi

tapasztalati összefüggéssel becsülhetjük. Az amfibolit térfogatát a  $V_5=1-\Phi_r-V_1-V_2-V_3-V_4$  agyagmérleg egyenletből számíthatjuk, melyben a teljes porozitásra vonatkozó  $\Phi_r=\Phi_1+\Phi_2$  korlátozó egyenlettel stabilizálhatjuk az inverziós eljárást.

Az inverz feladat megoldásával  $R=6$  rétegben  $P=7$  térfogatjellemzőt ( $\Phi_1, \Phi_2, S_w, V_1, V_2, V_3, V_4$ ) határozunk meg, melyhez összesen  $N=1506$  szelvényadat (0.2 m mintavételi távolság mellett) áll rendelkezésre. Ebben az esetben a túlhatározottság mértéke 35.9. Az ismeretlenek viszonylag nagy száma miatt a réteghatár-koordinátákat állandónak rögzítjük, melyek meghatározására statisztikai eljárást (klaszteranalízist) vagy akár előzetes intervalluminverziós kiértékelést is alkalmazhatunk (Szabó, 2004b). Az SA módszer megkívánja a folyamatjellemző (vezérlő-) paraméterek előzetes beállítását. A maximális iterációs lépésszámot 5000-nek, a (34) egyenletben szereplő kezdeti hőmérsékletet  $T_0=0.01$ -nek, ill. a (37) egyenlet alkalmazásához szükséges maximális paraméterváltoztatás mértékét 0.005-nek választjuk. A  $\tau$  paramétert lassan változtatjuk, minden 300. iterációs lépés után az érvényes értéket 85 %-kal csökkentjük. Az intervalluminverziós eljárással becsült kőzetfizikai jellemzők szelvényeit a **13. ábrán** láthatjuk. A kőzetösszetételt feltüntető oszlopban a mátrixtérfogatok mellett a teljes porozitás mélységfüggvénye is szerepel, mellette pedig az elsődleges és másodlagos porozitás külön-külön is leolvasható. A kitermelhető és a maradék szénhidrogén-telítettséget az  $S_{ch,m}=S_{x0}-S_w$  és  $S_{ch,r}=1-S_{x0}$  összefüggéssel számítjuk. Az inverz feladat megoldásához tartozó  $D_d\sim 8\%$  adattávolság elfogadható mértékű, mely elsősorban a homogén rétegekből felépített modellközelítésből adódik. A SA eljárás alkalmazása kedvező abban a vonatkozásban is, hogy a nagyszámú ásványi komponens (és a hasonló értékű zónaparaméterek) miatt esetlegesen fellépő többértelműség problémája hatékonyan elkerülhető.



13. ábra: Hazai metamorf szénhidrogén-tároló képződmény kőzetfizikai paramétereinek meghatározása az intervalluminverziós eljárással



#### 4. Fúrólýuk-geofizikai adatok feltáró faktoranalízise

A fúrólýuk-geofizikai mérések során többféle fizikai mennyiségről nyerünk nagy mennyiségű információt. A nagyméretű adatrendszerek sokszor nehezen kezelhetők, ezért a többváltozós adatelemzésnél gyakran alkalmazunk statisztikai módszereket a probléma méretének (dimenziójának) a csökkentésére, melynek keretében a statisztikai mintában felhalmozott információ nagy részének megtartásával ugyanazt a jelenséget kevesebb változóval írjuk le. A származtatott változók magukban foglalják a mért változók lényeges tulajdonságait, valamint gyakran új (az adatokkal rejtett kapcsolatban lévő) fizikai jellemzőket is szolgáltatnak. A faktoranalízis földtudományi alkalmazásai azt mutatják, hogy a mérési adatokból kinyert új statisztikai változók (faktorok) a földtani szerkezetek számos litológiai vagy kőzetfizikai jellemzőivel jól korrelálnak. Az értekezésben a faktoranalízis matematikai algoritmusát továbbfejleszttem, majd a mért adatrendszerből becsült faktorok és a kőzetfizikai mennyiségek kapcsolatát regresszióelemzéssel határozom meg. A kidolgozott többváltozós statisztikai módszer lehetővé teszi a kőzetfizikai paraméterek független forrásból (külön szelvényértelmezési eljárással) történő meghatározását. A mélyfúrási geofizikai adatok együttes feldolgozása előnyös olyan kiértékelési eljárásokkal szemben, melyek csupán egyetlen szelvény felhasználásával vannak le következtetést a vizsgált kőzetfizikai mennyiségről. A paraméterbecslés ily módon történő javításával a szénhidrogén- és víztároló szerkezetek hatékonyabb azonosítása és lehatárolása, ill. a fluidumkészletek megbízhatóbb becslése valósítható meg.

A faktorok számítása érdekében a fúrólýukszelvényeket először standardizáljuk, majd a skálázott adatokat egy közös mátrixba foglaljuk

$$\underline{\underline{D}} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1k} & \cdots & d_{1K} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2k} & \cdots & d_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nk} & \cdots & d_{nK} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \cdots & d_{Nk} & \cdots & d_{NK} \end{pmatrix}, \quad (40)$$

ahol  $d_{nk}$  jelöli az  $n$ -edik mélységben a  $k$ -edik szelvényezési eszközzel mért adatot ( $N$  a vizsgált mélységpontok száma,  $K$  az alkalmazott szondák száma). Bontsuk fel a (40) adatmátrixot a következőképpen

$$\underline{\underline{D}} = \underline{\underline{F}}\underline{\underline{L}}^T + \underline{\underline{E}}, \quad (41)$$

ahol  $\underline{\underline{F}}$  a faktorok  $N \times M$  méretű mátrixa,  $\underline{\underline{L}}$  a faktorsúlyok  $K \times M$  méretű mátrixa,  $\underline{\underline{E}}$  az  $N \times K$  méretű hibakomponens mátrix,  $M < K$  a faktorok száma (T a transzponált jelölése). Az  $\underline{\underline{F}}$  mátrixot a faktorok különböző mélységpontokban becsült értékei, míg az  $\underline{\underline{L}}$  mátrixot a mért változók egyes faktorokhoz tartozó súlyai alkotják. A (41) modell felhasználásával a faktorokat a megfigyelt mennyiségek lineáris kombinációjával állítjuk elő, ahol a faktorsúlyok a mért jellemzők és a faktorok korrelációs kapcsolatát fejezik ki. Tételezzük fel, hogy a faktorok lineárisan függetlenek ( $N^{-1}\underline{\underline{F}}^T\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{I}}$ , ahol  $\underline{\underline{I}}$  az egységmátrix),

valamint az  $\underline{\underline{FL}}^T$  és  $\underline{\underline{E}}$  mátrixok korrelálatlanok. Ennek alapján a standardizált mérési változók korrelációs mátrixa közvetlenül felírható a faktorsúlyokkal

$$\underline{\underline{R}} = N^{-1} \underline{\underline{D}}^T \underline{\underline{D}} = \underline{\underline{LL}}^T + \underline{\underline{\Psi}}, \quad (42)$$

ahol a  $K \times K$  méretű  $\underline{\underline{\Psi}} = N^{-1} \underline{\underline{E}}^T \underline{\underline{E}}$  hibavariancia mátrix a mért változók szórásnégyzeteinek a közös faktorokkal nem értelmezhető részét képviseli. Ha a  $\underline{\underline{\Psi}}$  zérusmátrix, akkor a faktorok meghatározása főkomponens elemzésre vezet. A hibavarianciákat gyakran a redukált korrelációs mátrix elemei alapján becsülik, így azok közelítő értékének ismeretében a faktorsúlyok sajátértékfeladat megoldásával határozhatók meg. Általános esetben az ismeretlen faktorsúlyokat és faktorokat a maximális valószínűség módszerével közös eljárásban számítjuk (Basilevsky, 1994). Feltéve, hogy a mérési változók normális eloszlásúak, az alábbi likelihood függvény maximalizálása szolgáltatja a megoldást

$$\lg(P) = -\frac{1}{2} (\underline{\underline{D}} - \underline{\underline{FL}}^T) \underline{\underline{\Psi}}^{-1} (\underline{\underline{D}} - \underline{\underline{FL}}^T)^T + C = \max, \quad (43)$$

ahol  $C$  a hibavarianciákkal összefüggő állandót jelöli. Az optimalizációs feladatnak megfelelően a Bartlett-féle becslés a faktorokat torzítatlanul állítja elő (Bartlett, 1937)

$$\underline{\underline{F}}^T = (\underline{\underline{L}}^T \underline{\underline{\Psi}}^{-1} \underline{\underline{L}})^{-1} \underline{\underline{L}}^T \underline{\underline{\Psi}}^{-1} \underline{\underline{D}}^T. \quad (44)$$

A faktorok optimális száma általában statisztikai próbával, például Bartlett linearitásra vonatkozó hipotézise alapján határozható meg (Bartlett, 1950). A (44) egyenletben szereplő  $\underline{\underline{F}}$  mátrix oszlopai a faktorok különböző mélységpontoknál becsült értékeit tartalmazzák. Az első oszlop az első faktorszelvénnyel azonosítható, mely a mérési adatok varianciáját legnagyobb részben magyarázza. A korrelálatlan faktorok különböző arányban osztják meg a bemenő adatok által hordozott információt. A faktorsúlyokkal kifejezett (redukált) korrelációs mátrix szinguláris értékek szerinti felbontásával kapott pozitív (csökkenő sorrendbe állított) szinguláris értékek egymáshoz viszonyított arányából megbecsülhetők az egyes faktorokra eső varianciarányok. A faktorokat gyakran ortogonális transzformációnak (forgatás) vetjük alá, mely elősegíti az új statisztikai változók könnyebb fizikai értelmezését. Az „egyszerű” struktúra (1-hez és 0-hoz közeli faktorsúlyok) kialakítása esetén azoknak a mérési változóknak (fúrólýukszelvényeknek) száma kevés lesz, melyhez számos faktor nagy súllyal kapcsolódik. A számításaim során alkalmazott Kaiser-féle *varimax* eljárás a faktorok olyan lineáris kombinációját állítja elő, melyre a faktorsúlynégyzetek varianciája maximális (Kaiser, 1958).

#### 4.1. A Jöreskog-féle közelítő eljárás

A faktoranalízis modellje alapján a (42) korrelációs mátrix közvetlenül felírható a faktorsúlyokkal és a hibavarianciákkal. Az  $\underline{\underline{R}}$  mátrix főátlóbeli elemeit a mért változók standardizált szórásnégyzetei adják ki. A faktorsúlyokkal képzett  $\underline{\underline{R}} - \underline{\underline{\Psi}}$  redukált korrelációs mátrix főátlójában szereplő (1-nél kisebb értékű) elemeket kommunalitásoknak nevezzük, melyek a mért változók standardizált szórásnégyzeteinek csak a közös

faktorokkal leírható részét képviselik. A maradék (vagy hiba-) faktorok által képviselt részt a kommunalítások ismeretében a  $\underline{\Psi} = \underline{I} - \underline{H}^2$  összefüggés alapján számíthatjuk ki. Ha a kommunalítások  $K \times K$  méretű ( $\underline{H}^2$ ) mátrixának elemei sokkal kisebbek 1-nél, akkor a mérési változók kevésbé magyarázhatók a közös faktorokkal. Ellenkező esetben az eredeti változók által tartalmazott információ néhány faktorról jól leírható. Jöreskog (2007) a  $k$ -adik kommunalítás ellenpárja  $u_k^2 = 1 - h_k^2 \leq 1 - R_{kk}^2$  becslésére az alábbi formulát javasolja

$$u_k^2 = \theta r_{kk}, \quad (45)$$

ahol  $r_{kk}$  az  $\underline{R}$  korrelációs mátrix inverzének  $k$ -adik főátlóbeli eleme és  $\theta < 1$  alkalmasan választott állandó. Ebben az esetben a mért adatok kovarianciamátrixára implicit összefüggés adódik

$$\underline{\underline{\Sigma}} = \underline{\underline{L}}\underline{\underline{L}}^T + \theta(\text{diag } \underline{\underline{\Sigma}}^{-1})^{-1}. \quad (46)$$

Képezzük a csillaggal jelölt  $\underline{\underline{\Sigma}}^* = (\text{diag } \underline{\underline{\Sigma}}^{-1})^{1/2} \underline{\underline{\Sigma}} (\text{diag } \underline{\underline{\Sigma}}^{-1})^{1/2}$  és  $\underline{\underline{L}}^* = (\text{diag } \underline{\underline{\Sigma}}^{-1})^{1/2} \underline{\underline{L}}$  mennyiségeket, melyekkel az alábbi összefüggés áll fenn

$$\underline{\underline{\Sigma}}^* = \underline{\underline{L}}^* \underline{\underline{L}}^{*T} + \theta \underline{\underline{I}}. \quad (47)$$

A (47) egyenlet szerint a  $\underline{\underline{\Sigma}}^*$  mátrix  $K-M$  számú sajátértéke  $\theta$  értékével egyezik meg. A Jöreskog-féle eljárás a minta-kovarianciamátrix ( $\underline{S}$ ) alapján határozza meg a faktorsúlyokat és a  $\theta$  paramétert. Ha az  $\underline{S}$  a  $\underline{\Sigma}$  mátrix konzisztens becslése, akkor ugyanez a kapcsolat az  $\underline{\underline{S}}^* = (\text{diag } \underline{\underline{S}}^{-1})^{1/2} \underline{\underline{S}} (\text{diag } \underline{\underline{S}}^{-1})^{1/2}$  és a  $\underline{\underline{\Sigma}}^*$  mátrixok között is fennáll. A faktorsúlyok mátrixára a következő közelítő összefüggés adódik (Jöreskog, 2007)

$$\underline{\underline{L}} = (\text{diag } \underline{\underline{S}}^{-1})^{-1/2} \underline{\underline{Q}} (\underline{\underline{\Gamma}} - \theta \underline{\underline{I}})^{1/2} \underline{\underline{V}}, \quad (48)$$

ahol  $\underline{\underline{L}}$  az  $\underline{\underline{S}}^*$  mátrix első  $M$  számú sajátértékét ( $\lambda$ ) csökkenő sorrendben tartalmazó diagonális mátrix,  $\underline{\underline{Q}}$  az első  $M$  darab sajátvektort oszlopaiban tartalmazó mátrix,  $\underline{\underline{V}}$  egy  $M \times M$  méretű tetszőleges ortogonális mátrix. A Jöreskog-féle módszer lehetőséget kínál a faktorok optimális számának meghatározására, mely az a minimális  $M$  érték, melyre az alábbi egyenlőtlenség teljesül

$$\theta = \frac{1}{K-M} (\lambda_{M+1} + \lambda_{M+2} + \dots + \lambda_K) < 1. \quad (49)$$

A (48) egyenlettel becsült faktorsúlyok ismeretében a faktorszelvényeket a (44) egyenlet alapján számíthatjuk. A Jöreskog-féle eljárás a nagyméretű adatrendszereket gyorsan (nem-iteratív úton) dolgozza fel, és nem igényli a kommunalítások értékének az ismeretét sem. Az általam kidolgozott, iteratív megközelítésen alapuló faktoranalízis számára a faktorsúlyok kezdeti értékét a fenti közelítő módszer megfelelően szolgáltatja.

#### 4.2. Az iteratíván újrásúlyozott faktoranalízis módszere

A fúróllyuk szelvényezési módszereket különböző mérési pontosság jellemzi, melynek elhanyagolása a szelvényadatok együttes feldolgozásakor jelentősen torzíthatja a kiértékelés eredményét. A faktoranalízis hagyományos módszerei, mint például az (44) egyenlet megoldásán alapuló Bartlett-féle eljárás, általában csak a hibavarianciák szerint súlyoznak, és nem veszik figyelembe az egyedi adatok bizonytalanságát. A faktoranalízis hatékonyságának növelése és az eltérő minőségű adatok megfelelő figyelembevételének érdekében új megközelítésem alapuló algoritmust javaslok, melyben a (48) egyenlettel becsült (kezdeti) faktorsúlyok és a faktorok iteratív eljárásban javíthatók. Az optimalizációs feladat keretében a mért és a faktorok felhasználásával elméleti úton előállított adatok súlyozott eltérését minimalizáljuk, melynek első olajipari kipróbálása során a mért és a számított adatok eltérése  $L_1$ -normájával reciprok függvénykapcsolatban álló súlyokat választottunk (*Dobróka és szerzőtársai, 2016a*). A Cauchy-féle súlyok alkalmazásán alapuló továbbfejlesztett eljárást iteratíván újrásúlyozott faktoranalízisnek (angol rövidítése IRFA) nevezzük, mellyel nagymértékben csökkenthető a statisztikai eljárás zajérzékenysége és a durva hibák (kiugró adatok) hatása, mely a Gausstól eltérő eloszlású adatrendszerek esetén is pontos és megbízható becslést szolgáltat a faktorokra, valamint az azokból származtatott közetfizikai mennyiségekre (*Szabó és Dobróka, 2017a*).

Az IRFA eljárás alkalmazásakor azt feltételezzük, hogy a mérési adatok standardizáltak és a faktorsúlyok (kiindulási értékei) ismertek, melyeket a 4.1. fejezetben bemutatott Jöreskog-féle közelítő eljárással előzetesen meghatározhatunk. Alakítsuk át a (41) egyenletet a következőképpen

$$\vec{d} = \underline{\underline{\tilde{L}}} \vec{f} + \vec{e}, \quad (50)$$

ahol  $\vec{d}$  jelöli a  $K*N$  elemű mért adatvektort,  $\underline{\underline{\tilde{L}}}$  a  $(K*N) \times (M*N)$  méretű faktorsúlymátrixot,  $\vec{f}$  az  $M*N$  számú faktorértéket tartalmazó vektort és  $\vec{e}$  a hibát képviselő  $K*N$  elemű oszlopvektort ( $N$  a mélységpontok száma,  $K$  az alkalmazott szondák száma,  $M$  a faktorok száma). A  $\vec{d}$  oszlopvektor egymást követő soraiban helyezkednek el a szomszédos mélységpontokban (különböző szondával) mért adatok, míg az  $\vec{f}$  oszlopvektorban az ugyanezen pontokhoz tartozó valamennyi faktorérték szerepel. A geofizikai inverz feladattal való párhuzam alapján az  $\underline{\underline{\tilde{L}}} \vec{f}$  mennyiséget a direkt feladat keretében számított (elvi) adatvektornak is tekinthetjük, melyet közvetlenül a faktorok felhasználásával határozunk meg. Megjegyezzük, hogy a fúróllyukszelvények ily módon történő előállítása nem igényel előzetes közetfizikai ismeretet és a szondaválaszfüggvények bevonása nélkül képes valamennyi mérési változó mélységfüggését jósolni.

Vezessük be a Cauchy-súlyokat tartalmazó  $(K*N) \times (K*N)$  méretű súlymátrixot, melyet gyakran részesítenek előnyben rezisztenciája miatt a földtudományi alkalmazások során (*Tarantola, 1987*). Ennek alapján az  $s$ -edik adathoz tartozó súlytényező a következő alakot ölti ( $s=1,2,\dots,K*N$ )

$$W_{ss} = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon^2 + e_s^2}, \quad (51)$$

ahol  $e_s$  az  $s$ -edik (standardizált) mért és számított adat eltérése,  $\varepsilon$  állandó a Cauchy-féle súlyfüggvény skálaparamétere. Ez utóbbit tapasztalati úton, vagy a leggyakoribb értékek módszere alapján automatikusan is előállíthatjuk (Steiner, 1991). A súlytényezők a mérési adatoknak a megoldáshoz való viszonylagos hozzájárulását szabályozzák, mivel az adat annál kisebb súlyt kap minél nagyobb volt a számított értéktől való eltérése az előző iterációs lépésben. Az IRFA eljárásban az alábbi célfüggvény minimalizálásához kötjük a faktorok meghatározását

$$\vec{e}^T \underline{\underline{W}} \vec{e} = (\vec{d} - \underline{\underline{L}} \vec{f})^T \underline{\underline{W}} (\vec{d} - \underline{\underline{L}} \vec{f}) = \min, \quad (52)$$

ahol  $\underline{\underline{W}}$  az (51) súlyelemekből képzett adattérbeli súlymátrix. A nemlineáris inverz feladatot az iteratív újrásúlyozott legkisebb négyzetek módszerével oldjuk meg (Scales és Gersztenkorn, 1988). Az iteratív eljárás elején a Jöreskog-féle módszerrel becsült  $\underline{\underline{L}}_0$  faktorsúlyokkal írhatjuk fel az alábbi normálegyenletet

$$\underline{\underline{L}}_0^T \underline{\underline{W}} \underline{\underline{L}}_0 \vec{f}_1 = \underline{\underline{L}}_0^T \underline{\underline{W}} \vec{d}, \quad (53)$$

mely alapján előáll a faktorok vektorának első közelítése ( $\vec{f}_1$ ). A javított faktorértékekkel képezzük a  $\underline{\underline{W}}_1$  súlymátrixot, melyet minden következő iterációs lépésben újra számítjuk. Ezután az  $\vec{f}_1$  vektor elemeit állandó értéken tartva (és az  $\underline{\underline{F}}$  mátrixba rendezve) korrigáljuk az  $\underline{\underline{L}}_1$  mátrix faktorsúlyait. Mivel ebben a fázisban nem alkalmazunk súlyozást, ezért visszatérhetünk a (41) egyenlethez és a feladatot a csillapított legkisebb négyzetek elve alapján oldjuk meg (Marquardt, 1959)

$$\left( \underline{\underline{D}} - \underline{\underline{F}} \underline{\underline{L}}_1^T \right)^T \left( \underline{\underline{D}} - \underline{\underline{F}} \underline{\underline{L}}_1^T \right) + \alpha^2 \underline{\underline{L}}_1^T \underline{\underline{L}}_1 = \min, \quad (54)$$

ahol  $\alpha$  jelöli a csillapítási tényezőt. Az (54) szélsőértékfeladat megoldásával becsülhetjük a faktorsúlyok új értékeit

$$\underline{\underline{L}}_1^T = \left( \underline{\underline{F}}^T \underline{\underline{F}} + \alpha^2 \underline{\underline{I}} \right)^{-1} \underline{\underline{F}}^T \underline{\underline{D}}. \quad (55)$$

Az iterációs eljárás következő lépésében az  $\underline{\underline{L}}_1^T$  mátrixot az (53) normálegyenletbe helyettesítjük és előállítjuk a faktorok újabb közelítését ( $\vec{f}_2$ ). Az IRFA eljárás  $q$ -edik iterációs lépésében a fent leírtak alapján a következő egyenleteket oldjuk meg az  $\underline{\underline{L}}_q^T$  faktorsúlymátrix és az  $\vec{f}_q$  faktorvektor előállítására céljából

$$\left. \begin{aligned} \underline{\underline{L}}_q^T &= \left( \underline{\underline{F}}_{q-1}^T \underline{\underline{F}}_{q-1} + \alpha^2 \underline{\underline{I}} \right)^{-1} \underline{\underline{F}}_{q-1}^T \underline{\underline{D}} \\ \vec{f}_q &= \left( \underline{\underline{L}}_{q-1}^T \underline{\underline{W}}_{q-1} \underline{\underline{L}}_{q-1} \right)^{-1} \underline{\underline{L}}_{q-1}^T \underline{\underline{W}}_{q-1} \vec{d} \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

Az (56) egyenleteken alapuló iterációs eljárást a megállási kritérium teljesüléséig folytatjuk. Az 5.2. fejezetben az IRFA módszer rezisztenciáját és hatékony zajelnyomó

tulajdonságát bizonyítjuk és bemutatjuk a statisztikai eljárás olajipari mélyfúrési geofizikai adatokon történő alkalmazását. Az IRFA módszer Steiner-súlyokkal történő általánosításának lehetőségét mérnökgeofizikai szondázási adatok felhasználásával társszerzőimmel mutattam be (Szabó és Balogh, 2016; Szabó és szerzőtársai, 2017), melynek részletes kidolgozását Balogh (2018) doktori (PhD) értekezésében tárgyalja.

### 4.3. A genetikus algoritmuson alapuló faktoranalízis módszere

A faktorok számának megválasztása jelentősen befolyásolja a származtatott közetfizikai mennyiségek meghatározását. A mért adatrendszerből kinyerhető faktorok számának növelése javítja a mért és a számított adatok illeszkedését, viszont egyidejűleg csökkenti a faktorsúlyok (a mért szelvényekkel való korreláció) és a magyarázó varianciák értékét (Szabó és Dobróka, 2017a). Ennek oka, hogy az eredeti adatrendszerben foglalt információ vesztesége nagyszámú származtatott statisztikai változó esetén kicsi, azonban a megtartott információ nagyobb mértékben oszlik meg az egyes faktorok között. Ennek következtében a vizsgált faktor és a feltárt közetfizikai mennyiség kapcsolatának az erőssége is csökken. Mind a kutatási tapasztalatok, mind pedig a (49) egyenlet figyelembevétele azt mutatja, hogy a fúrólukszelvények kiértékelése során a lehető legkevesebb számú faktort célszerű alkalmazni, azzal a feltétellel, hogy a mérési adatok és azok számított értékei között az eltérés elfogadhatóan kicsi legyen. Az érvényes faktorszám mellett, a mért és számított szelvények legjobb illeszkedése a globális optimalizáció módszereinek alkalmazásával biztosítható. A faktorok korszerű és hatékony meghatározására valós kódolású genetikus algoritmuson (FGA) alapuló faktoranalízist (FGA-FA) fejlesztettem, mely a globális szélsőérték meghatározásán túl a faktorok kiindulási értékétől független megoldást szolgáltat (Szabó, 2016; Szabó és Dobróka, 2017b). A faktorok evolúciós számítással történő előállítása egy újszerű megközelítést képvisel, mely hasznosítja a genetikus algoritmus kiemelkedő adaptációs képességét (Álmos és szerzőtársai, 2012).

Az FGA elvi alapjait és működését az 1.1.2. fejezet tartalmazza. Ebben a fejezetben a globális optimalizációs módszer faktoranalízisben történő alkalmazását tárgyaljuk részletesen. Tekintsük alapul a faktoranalízis (50) egyenlettel megfogalmazott modelljét. Építsük fel a kezdeti populációt a faktorok alábbi véletlen vektoraiból  $\vec{f}^{(v)}$ , ahol  $v=1,2,\dots,V$  ( $V$  a populáció egyedszáma). A kromoszómákat felépítő géneket (melyek az intervalluminverzió során a sorfejtési együtthatók voltak) a faktorértékkel azonosítjuk, melyek teljes száma egyetlen egyed esetén  $M*N$  ( $N$  a mélységpontok száma,  $M$  a faktorok száma). A (23) formulához hasonlóan az alkalmassági függvényt a mért (standardizált) és számított szelvényadatok eltéréseivel hozzuk kapcsolatba

$$F(\vec{f}) = -\left\| \vec{d} - \underline{\underline{L}} \vec{f} \right\|_2^2 = \max. \quad (57)$$

Az alkalmassági függvényt az alábbi formában is definiálhatjuk, ahol a  $\lambda$  állandó megválasztásával felülről korlátozhatjuk az alkalmassági értékeket

$$F(\vec{f}) = \left( \left\| \vec{d} - \underline{\underline{L}} \vec{f} \right\|_2^2 + \lambda^2 \right)^{-1} = \max. \quad (58)$$

Az FGA-FA eljárás folyamán a lebegőpontos számokkal ábrázolt faktorértékeket véletlenszerűen módosítjuk vagy cseréljük ki az egyedek között. A szakirodalomban

található genetikus műveletek közül itt csak azokat mutatjuk be, melyeket a statisztikai vizsgálat során közvetlenül hasznosítunk (Houck és szerzőtársai, 1995). Az eljárás elején általában 10–100 egyed ( $\vec{f}$  vektort) generálunk. A kezdeti faktorértékek megadására nincs szigorú előírás, csak az értéktartomány alsó és felső határát kell rögzítenünk. Ebben például a Jöreskog-féle eljárás (4.1. fejezet) előzetes eredményeire támaszkodhatunk. A véletlenkeresés során számos egyedet megvizsgálunk, melyek közül a kis alkalmassági értékűeket vagy a keresési tartományon kívül esőket gyorsan (automatikusan) eltávolítja az eljárás. Az FGA-FA módszer folyamatát a 14. ábra foglalja össze, melyen a kék színnel jelölt műveletek képviselik a globális optimalizációs számítási fázist. A faktorértékek finomítsa céljából először a kiválasztás műveletét alkalmazzuk, mely az aktuális populációban jelenlevő egyedeket véletlenszerűen párosítja. Normált geometriai rangszelekció alkalmazáskor a  $v$ -edik faktorvektor kiválasztási valószínűsége a következőképpen adható meg

$$P(\vec{f}^{(v)}) = \frac{P_b}{1 - (1 - P_b)^v} (1 - P_b)^{v-1}, \quad (59)$$

ahol  $r_v$  a  $v$ -edik egyed rangja,  $P_b$  a maximális alkalmassági értékű egyed kiválasztásának valószínűsége. A kiválasztott egyedeket akkor másolhatjuk a következő populációba, ha a  $[0,1]$  tartományban egyenletes valószínűséggel generált  $\zeta$  számra teljesül a  $C_{v-1} < \zeta < C_v$  feltétel, ahol  $C_v$  a  $v$ -edik kumulatív valószínűség.

A következő lépésben a kromoszómákat felépítő gének (faktorértékek) egy részét az egyedek között kicseréljük. A heurisztikus keresztezés az  $\vec{f}_1$  és  $\vec{f}_2$  kiinduló vektorokat a következőképpen módosítja

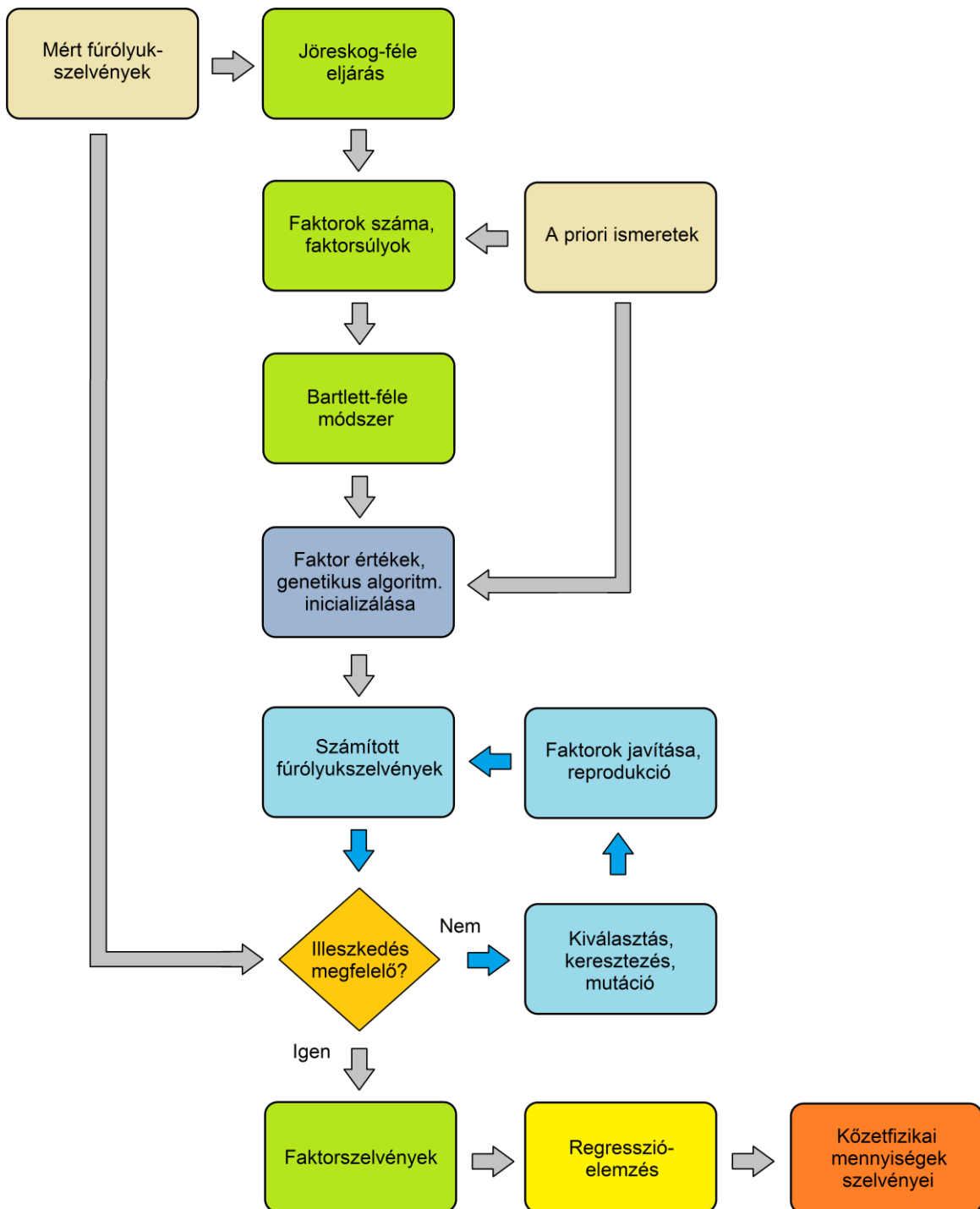
$$\left. \begin{aligned} \vec{f}^{*(1)} &= \vec{f}^{(1)} + \gamma(\vec{f}^{(1)} - \vec{f}^{(2)}) \\ \vec{f}^{*(2)} &= \vec{f}^{(1)} \end{aligned} \right\}, \quad (60)$$

ahol  $\vec{f}^{*(1)}$  és  $\vec{f}^{*(2)}$  a keresztezésen átesett (új) egyedeket, míg  $\gamma$  a  $[0,1]$  tartományból egyenletes valószínűséggel generált számot jelöli. A (60) művelet alkalmazása akkor sikeres, ha a keresztezés előtt fennáll az  $F(\vec{f}^{(2)}) < F(\vec{f}^{(1)})$  egyenlőtlenség. Ha az  $\vec{f}^{*(1)}$  vektor valamely eleme az előírt értéktartományon kívül esik, akkor a keresztezés műveletét újra elvégezzük. A harmadik genetikus operátor felhasználásával az egyed valamely génjét véletlenszerűen megváltoztatjuk. Az egyenletes mutáció a kiválasztott faktorvektor  $j$ -edik komponensét kicseréli egy valós véletlen számra ( $\eta$ )

$$f_l^{**} = \begin{cases} \eta, & \text{ha } l = j \\ f_l^*, & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (61)$$

ahol  $f_l^{**}$  a mutált egyed  $l$ -edik faktorértéke ( $l=1,2,\dots,N*M$ ). A három genetikus alapművelet ismételt alkalmazásával a populáció átlagos alkalmasságát iteratív úton javíthatjuk. A fenti lépéseket és a reprodukciót a megállási kritérium teljesüléséig ismétljük. Az utolsó generáció legalkalmasabb egyedét ( $\vec{f}^{(opt.)}$ ) tekintjük az optimalizációs feladat megoldásának. A fúrólyuk-geofizikai szelvények faktoranalízisének célja a közetfizikai

információ feltárása, mely az új változók (faktorok) és a közetfizikai paraméterek közötti regressziós kapcsolat keresésén alapul. A statisztikai eljárás utolsó fázisában regresszióelemzéssel meghatározhatjuk a faktorok és a földtani képződmények közetfizikai jellemzői közötti függvénykapcsolatot. Az 5–7. fejezetekben a faktoranalízis felhasználásával kulcsfontosságú közetfizikai mennyiségek térbeli eloszlását határozzuk meg, valamint a numerikus eredmények vizsgálatával megmutatjuk az újonnan fejlesztett módszerek előnyeit és korlátait.



14. ábra: A valós kódolású genetikus algoritmus vezérelt faktoranalízis folyamatábrája



## 5. Az agyagtartalom meghatározása a fúrólukszelvények faktoranalízisével

A fúróluk-geofizikai mérések meglehetősen érzékenyen reagálnak az agyagok jelenlétére a kőzetben, melyek mennyiségi meghatározása kulcsfontosságú a szénhidrogén-tárolók megbízható kiértékelése szempontjából. Az agyagtérfogot számításának hagyományos módszerei a litológiai szelvények egyedi feldolgozásán alapulnak. A porozitáskövető-szelvények együttes kiértékelésekor figyelembe kell venni az agyagok összetételét és térbeli eloszlását (Serra, 1984). A kőzet egységnyi térfogatára vonatkozó agyagtartalmat ( $V_{sh}$ ) a természetes gamma-intenzitás szelvényből számíthatjuk

$$V_{sh} \cong i_\gamma = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}, \quad (62)$$

ahol  $i_\gamma$  a természetes gamma-index,  $GR$  az adott mélységben mért természetes-gamma intenzitás,  $GR_{min}$  és  $GR_{max}$  a természetes gammaszelvény minimális és maximális értéke a vizsgált szelvényezési szakaszon (Poupon és Gaymard, 1970). A (62) lineáris összefüggés alkalmazásakor azt feltételezzük, hogy a kőzetben az agyagokon kívül nincs jelen más radioaktív ásvány, valamint a  $GR_{min}$  és  $GR_{max}$  (idealizált) állandók az agyagmentes kőzethez és a 100 %-os agyagtartalomhoz tartozó  $GR$  értékeket képviselik. A terepi tapasztalatok azt mutatják, hogy a (62) egyenlet az agyagtartalom értékét legtöbbször túlbecsüli, mely leginkább a fiatal üledékes kőzetek esetén okozza a legnagyobb eltérést. Larionov (1969) a természetes gamma-index és az agyagtartalom kapcsolatát harmadidőszaki vagy annál fiatalabb kőzetek esetén az alábbi tapasztalati egyenlettel írja le

$$V_{sh} = 0.083 (2^{3.7i_\gamma} - 1), \quad (63)$$

mely terciernél idősebb képződményekben az alábbiak szerint módosul

$$V_{sh} = 0.33 (2^{2i_\gamma} - 1). \quad (64)$$

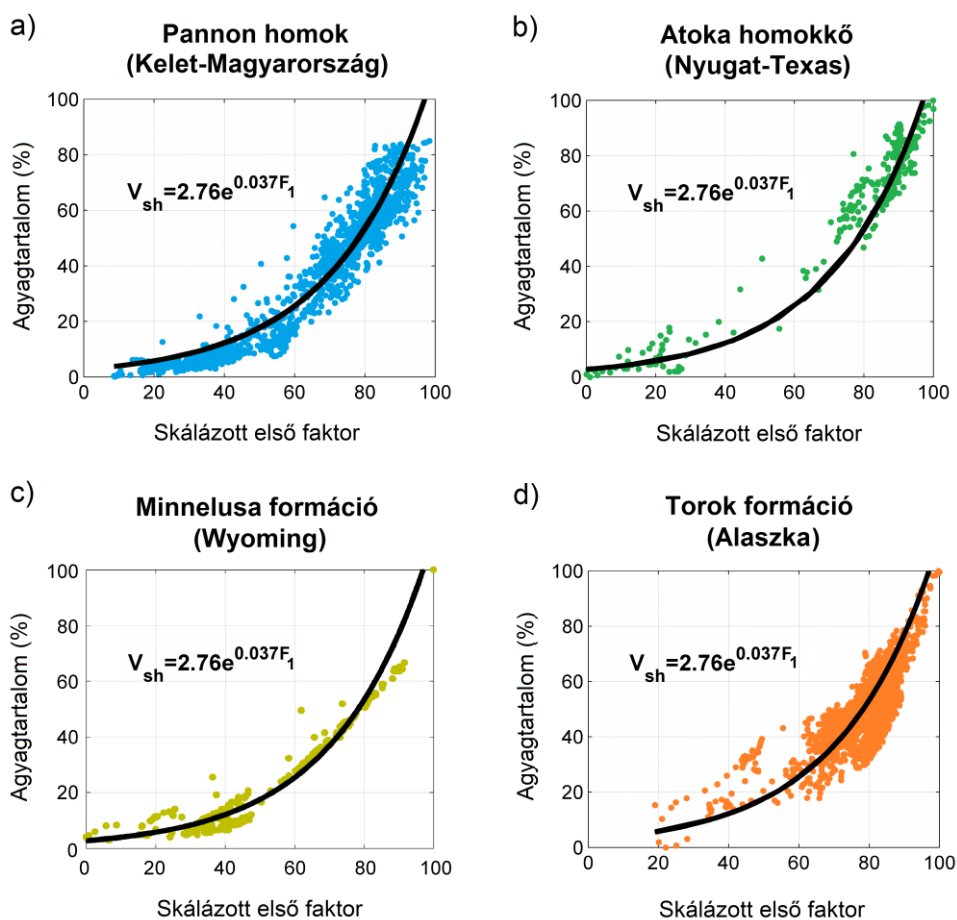
A Larionov-féle módszerhez hasonlóan, Stieber (1970), Clavier és szerzőtársai (1971) és Bhuyan és Passey (1994) is nemlineáris modellt javasolnak. A keresztidiagram-technikákon vagy különféle tapasztalati összefüggéseken alapuló értelmezési eljárások sokszor eltérő eredményeket szolgáltatnak, ami jelentősen befolyásolja a származtatott kőzetfizikai paraméterek (effektív porozitás és áteresztőképesség) meghatározását. Az egyetlen szelvényt felhasználó kiértékelési módszerek alkalmazáshoz képest előnyösebb a fúróluk-geofizikai adatok közös (inverziós vagy statisztikai) eljárásban való feldolgozása, mellyel nagymértékben növelhető az agyagtartalom-meghatározás megbízhatósága.

A fúrólukszelvényekből becsült első faktor erős korrelációs kapcsolatban áll a szénhidrogén-tároló kőzetek agyagtartalmával (Szabó, 2011). A két mennyiség között regresszióelemzéssel az alábbi nemlineáris (exponenciális) kapcsolatot találjuk

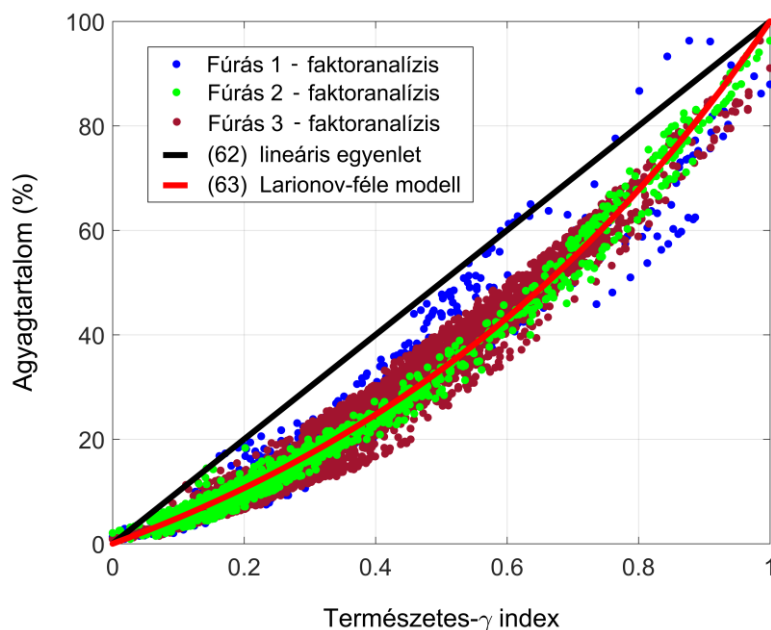
$$V_{sh} = ae^{bF_1} + c, \quad (65)$$

ahol  $F_1$  az első faktor,  $V_{sh}$  az agyagtartalom és  $a$ ,  $b$ ,  $c$  helyi regressziós együtthatók. A tapasztalati modell érvényessége számos hazai és amerikai egyesült államokbeli

szénhidrogén-kutatófúrásban igazolható (Szabó és Dobróka, 2013b). A **15. ábrán** látható, hogy a (65) regressziós egyenlet eltérő földtani környezetben képződött (különböző korú) üledékekben megfelelően alkalmazható, ill. az első faktor skálázásával a regressziós koefficiensek értékei is (közelítőleg) érvényesek. Abban az esetben, amikor az agyagtartalom más forrásból (pl. magvizsgálatokból) ismert, akkor a regressziós együtthatókat a helyi sajátságok figyelembevételével célszerű meghatározni. A terepi vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a mért változók variációjának legnagyobb részéért felelős első faktor kiváló agyagindikátor, melynek alapján a litológiai egységek jól elkülöníthetők. Az értekezésben bemutatott módszert *Asfahani (2014)* Szíria nagy kiterjedésű bazaltos képződményeinek litológiai jellemzésére, valamint *Seth és szerzőtársai (2015)* a Bering-tenger törmelékes és diatómás üledékei agyagtartalmának meghatározására alkalmazta. Az első faktor és az agyagtartalom szoros kapcsolata szénhidrogén-kutatófúrások víztároló szakaszain is kimutatható (Szabó és Dobróka, 2011). Hazai sekély mélységű vízkutatófúrások (Fúrás 1: Tokaji Vízmű, Fúrás 2: Tiszalök, Fúrás 3: Baktalórántháza) karotázs adatainak faktoranalízisével általános (közelítő) regressziós összefüggést írhatunk fel a vizsgált kelet-magyarországi területre (Szabó és szerzőtársai, 2014). A faktoranalízis eredménye jó egyezést mutat a Larionov-féle modellel is, ahol mindkét módszer átlagosan 20 %-kal alacsonyabb értékeket szolgáltat az agyagtartalomra a (62) lineáris egyenlettel kapott eredményekhez képest (**16. ábra**).



15. ábra: Az első faktor és az agyagtartalom kapcsolata hazai és amerikai egyesült államokbeli szénhidrogén-kutatófúrásokban



16. ábra: A természetes gamma-index és a faktoranalízissel becsült agyagtartalom kapcsolata kelet-magyarországi vízkutatófúrásokban

### 5.1. Szénhidrogén-tároló képződmények agyagtartalmának meghatározása

Az FGA-FA módszert (4.3. fejezet) egy amerikai egyesült államokbeli fúrásban teszteljük, ahol késő-perm korú, kis porozitású és áteresztőképességű olajtároló homokkőben végeztek fúróluk-geofizikai méréseket (Gryc, 1988; USGS, 1999). A természetes-gamma intenzitás ( $GR$ ), természetes potenciál ( $SP$ ), lyukátmérő ( $CAL$ ), neutronporozitás ( $\Phi_N$ ), akusztikus intervallumidő ( $\Delta t$ ) és a nyolcelektrodás laterolog szondával mért fajlagos ellenállás ( $R_{LLS}$ ) szelvényeket faktoranalízissel dolgozzuk fel. A vertikális fúrás vizsgált mélységtartományában (211 mérési pontban 0.5 láb mélységközzel mérve) összesen  $N=1266$  adatot gyűjtöttek. A közepes korrelációban álló 6-féle mért mennyiséget három faktorra redukáljuk. Az FGA-FA eljárás keretében a faktorok 30 egyedből álló populációját tökéletesítjük. A Jöreskog-féle közelítő módszer eredményei alapján a faktorok keresési tartományát  $-5$  és  $5$  között rögzítjük. Az (59)–(61) műveletek alkalmazásával a véletlen keresést 30000 iterációs lépésben folytatjuk. Az evolúciós számítás vezérlőparaméterei: a legjobb egyed kiválasztásának valószínűsége ( $P_b=0.03$ ), a keresztezési kísérletek száma (100) és a mutáció valószínűsége (0.05). A legjobb egyedek megtartása érdekében az elitizmus szabályát alkalmazzuk, mely az aktuális generáció legalkalmatlanabb egyedét az előző generáció legerősebb egyedével kicseréli. A fitness értékét az (57) egyenlet alapján számítjuk, mely az FGA-FA eljárás alatt fokozatos növekedést mutat (17a. ábra) ( $\sigma_F$  az aktuális populáció alkalmazási értékeinek szórását jelöli). A legalkalmasabb egyedét az  $F=-7.2$  érték mellett kapjuk. Az FGA-FA eljárás végrehajtása egy hagyományos négyprocesszoros munkaállomáson néhány percet igényel.

A Kaiser-féle (1958) módszerrel elforgatott factorsúlyokat a 3. táblázatban találhatjuk. Látható, hogy az első faktor erős kapcsolatban áll a természetes-gamma intenzitás és természetes potenciál szelvényekkel, minek alapján jó litológiai indikátornak bizonyul. A második faktort a fajlagos ellenállás és a lyukátmérő, míg a harmadikat legjobban az akusztikus terjedési idő befolyásolja. Az  $\underline{\underline{R}} - \underline{\underline{\Psi}}$  redukált korrelációs mátrix

szinguláris értékek szerinti felbontása alapján az első faktor a bemenő adatok varianciájának 57 %-át, a második annak 20 %-át, a harmadik a 16 %-át magyarázza (a maradék 7 %-nyi varianciányadot elhanyagoljuk).

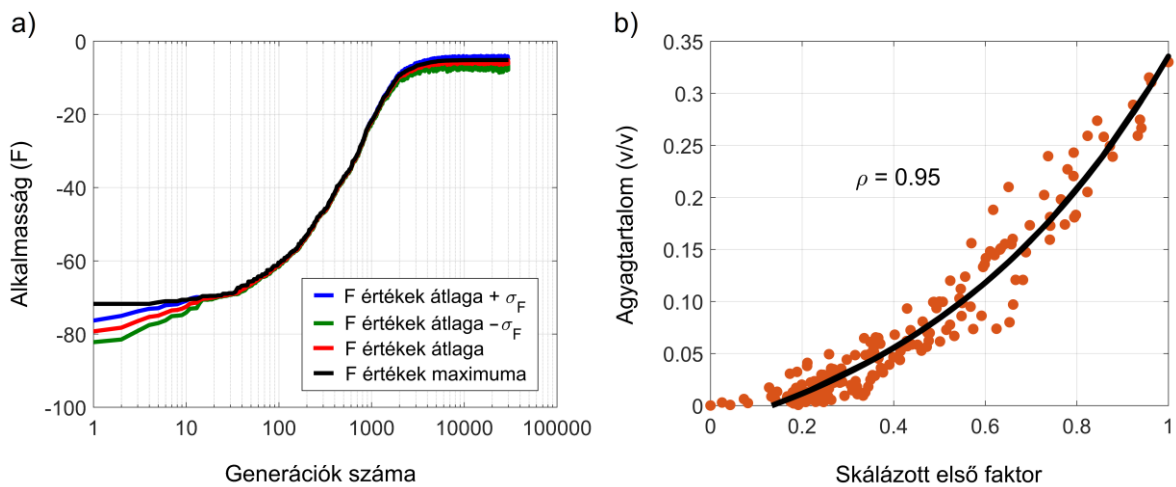
3. táblázat

Faktorsúly	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
$L^{(SP)}$	0.84	-0.41	0.20
$L^{(R_{LS})}$	0.13	0.64	0.59
$L^{(CAL)}$	0.31	-0.82	0.05
$L^{(GR)}$	0.92	-0.07	0.06
$L^{(\Phi_N)}$	0.06	-0.02	0.21
$L^{(\Delta t)}$	-0.19	0.09	-0.78

Az elforgatott faktorok szelvényeit közvetlenül felhasználhatjuk a közetfizikai jellemzőkkel való összehasonlításra. A faktorokat a regressziós vizsgálatokat megelőzően alkalmas módon skálázzuk. Az  $l$ -edik faktort az alábbi formula alapján transzformálhatjuk az új (tetszőlegesen választott) tartományba

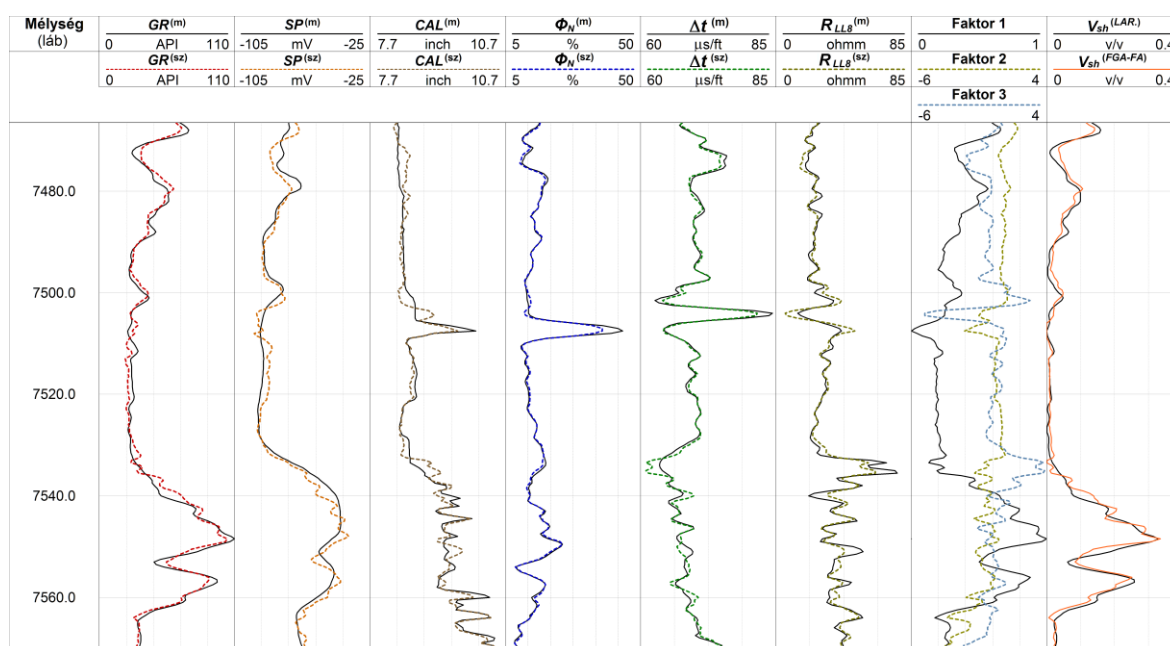
$$F'_l = F'_{l,min} + \frac{F'_{l,max} - F'_{l,min}}{F_{l,max} - F_{l,min}} (F_l - F_{l,min}), \quad (66)$$

ahol  $F_l$  és  $F'_l$  az  $l$ -edik faktor becsült és skálázott értéke az adott mélységpontban,  $F_{l,min}$  és  $F_{l,max}$  az  $l$ -edik faktor szelvény szélsőértékei,  $F'_{l,min}$  és  $F'_{l,max}$  az  $l$ -edik faktor előírt új alsó és felső határa. Az agyagtartalom mértékegysége a (64) egyenletben térfogatrész, ezért az első faktort az  $F'_{l,min} = 0$  és  $F'_{l,max} = 1$  értékek közötti tartományba skálázzuk. A **17b. ábra** az első faktor és az agyagtartalom regressziós kapcsolatát mutatja, ahol a (nemlineáris függvénykapcsolat erősségét mutató) Spearman-féle rangkorrelációs együttható értéke  $\rho=0.95$ . A (65) egyenletben szereplő regressziós együtthatók értéke, ill. alsó és felső korlátja (95 %-os megbízhatósági szint mellett):  $a=0.07\pm 0.02$ ,  $b=-1.8\pm 0.2$ ,  $c=-0.09\pm 0.02$ .



17. ábra: A valós kódolású genetikus algoritmus vezérelt faktoranalízis konvergenciája (a), ill. az első faktor és az agyagtartalom kapcsolata (b)

A faktoranalízis eredményét a **18. ábra** mutatja, melynek első hat oszlopában a mért szelvények mellett az  $\tilde{L}\tilde{f}$  szorzattal számított adatokat is feltüntettük (az előbbieket „m” felső index, az utóbbit „sz” jelöli). A mért és a faktorokból közvetlenül becsült elméleti fűrőlyukszelvények egyezése megfelelő. Észrevehető az is, hogy a fenti módszerrel olyan szelvénytípusokat is előállíthatunk, melyek nem hozhatók (mennyiségi) kapcsolatba a kőzetfizikai jellemzőkkel. Például a lyukátmérőszelvénynek nem létezik az (1) egyenletnek megfelelő válaszfüggvénye és emiatt nem is alkalmazható az inverziós eljárások során. A faktoranalízis azonban lehetővé teszi a lyukátmérőszelvény bevonását is, mely tartalmi információt hordoz az agyagtartalom-meghatározás számára (a porózus homokok és az impermeábilis agyagok elkülönítésével). Az utolsó oszlopban látható, hogy a faktoranalízissel becsült agyagtartalom ( $V_{sh}^{(FGA-FA)}$ ) jól korrelál a Larionov-féle módszerrel számított ( $V_{sh}^{(LAR.)}$ ) agyagtartalommal (a négyzetes középérték  $RMS=2.1\%$ ).



18. ábra: A valós kódolású genetikus algoritmusalapú faktoranalízis eredménye egy amerikai egyesült államokbeli fűrásban

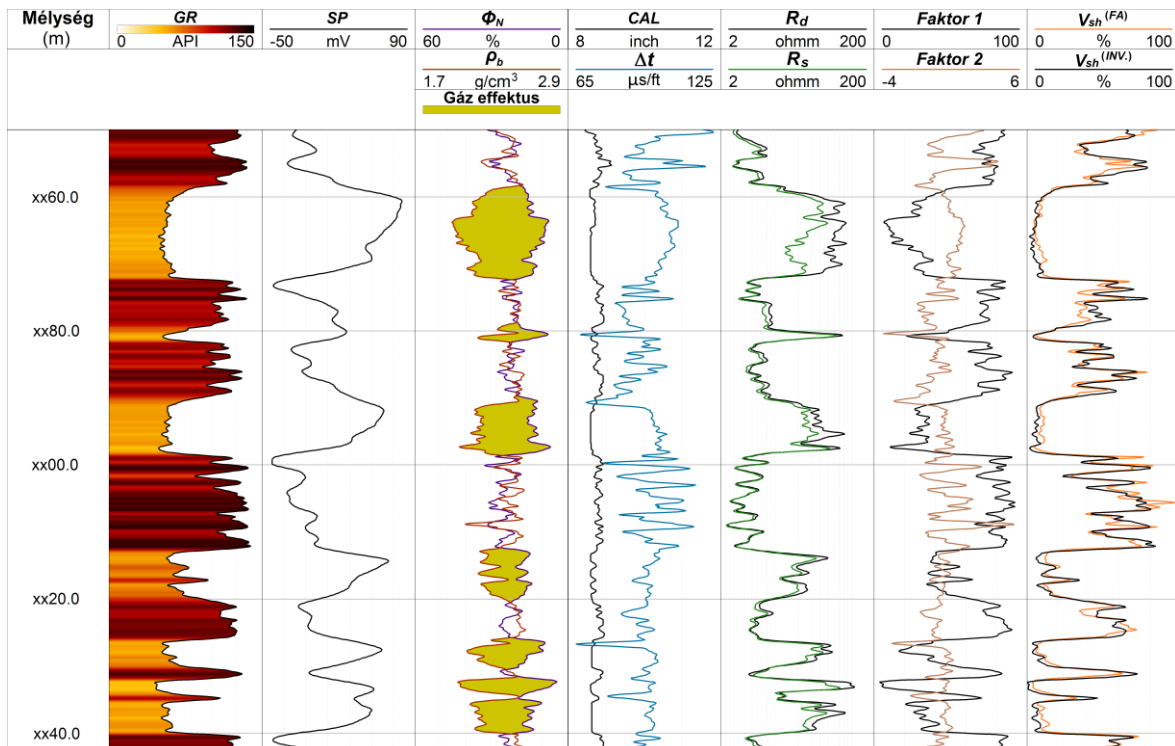
Az agyagtartalom meghatározásának lehetőségét egy hazai szénhidrogén-kutatófűrásban is bemutatjuk (Szabó, 2011). A vizsgált pannon korú rétegsor tavi üledékekből épül fel, melyben a konszolidálatlan homokokat agyag- és kőzetlisztrétegek választják el egymástól. A szénhidrogén-tároló zónában nagy és közepes porozitású, fosszilis tengervízzel és gázzal telített tárolók helyezkednek el. A faktoranalízisbe a lyukátmérő ( $CAL$ ), természetes potenciál ( $SP$ ), természetes-gamma intenzitás ( $GR$ ), neutronporozitás ( $\Phi_N$ ), közetsűrűség ( $\rho_b$ ), akusztikus intervallumidő ( $\Delta t$ ), sekély- ( $R_s$ ) és mélybehatolású ( $R_d$ ) laterolog szondával mért fajlagos ellenállás szelvényeket vonjuk be. A mérési adatokból két faktort képezünk, melyek a teljes variancia 89 %-át magyarázzák. A becsült (elforgatott) faktorsúlyokat a **4. táblázat** tartalmazza, mely azt mutatja, hogy az első faktor a litológiára érzékeny szelvényekkel ( $SP$ ,  $GR$ ,  $CAL$ ) áll szoros kapcsolatban. Az amerikai egyesült államokbeli (**3. táblázat**) és a magyarországi fűrásban kapott faktorsúlyok azonos nagyságrendűek (az  $SP$  szelvényhez tartozó faktorsúly előjelváltását a fordított  $SP$

jelenség okozza). A hazai fúrásban megjelenik a mélybehatolású szondával mért fajlagos ellenállás és a sűrűségsvlvény, melyek első faktorra gyakorolt hatása is jelentős. Az első faktor kisebb mértékben ugyan, de a porozitás hatását is tükrözi.

4. táblázat

Faktorsúly	Faktor 1	Faktor 2
$L^{(CAL)}$	0.47	-0.14
$L^{(\Phi_N)}$	0.68	-0.37
$L^{(\rho_b)}$	0.36	0.59
$L^{(\Delta t)}$	0.55	-0.58
$L^{(GR)}$	0.93	0.10
$L^{(R_d)}$	-0.46	0.85
$L^{(R_s)}$	-0.18	0.98
$L^{(SP)}$	-0.85	-0.15

Az első (skálázott) faktor és az agyagtartalom kapcsolatát a **15a. ábra** mutatja, ahol az agyagtartalom referenciaértékeit az olajiparban rutinszerűen alkalmazott OPTIMA mélységpontenkénti inverziós szoftverrel adjuk meg (Baker Atlas, 1996). A (65) exponenciális egyenlet érvényességét a  $\rho=0.96$  rangkorrelációs együttható is alátámasztja. A fúróluksvlvények kiértékelési eredményét a **19. ábra** tartalmazza, melyen a faktoranalízissel becsült ( $V_{sh}^{(FA)}$ ) és a pontenkénti inverzióval számított agyagtartalom svlvények ( $V_{sh}^{(INV.)}$ ) megfelelő egyezést mutatnak ( $RMS=8.2\%$ ).

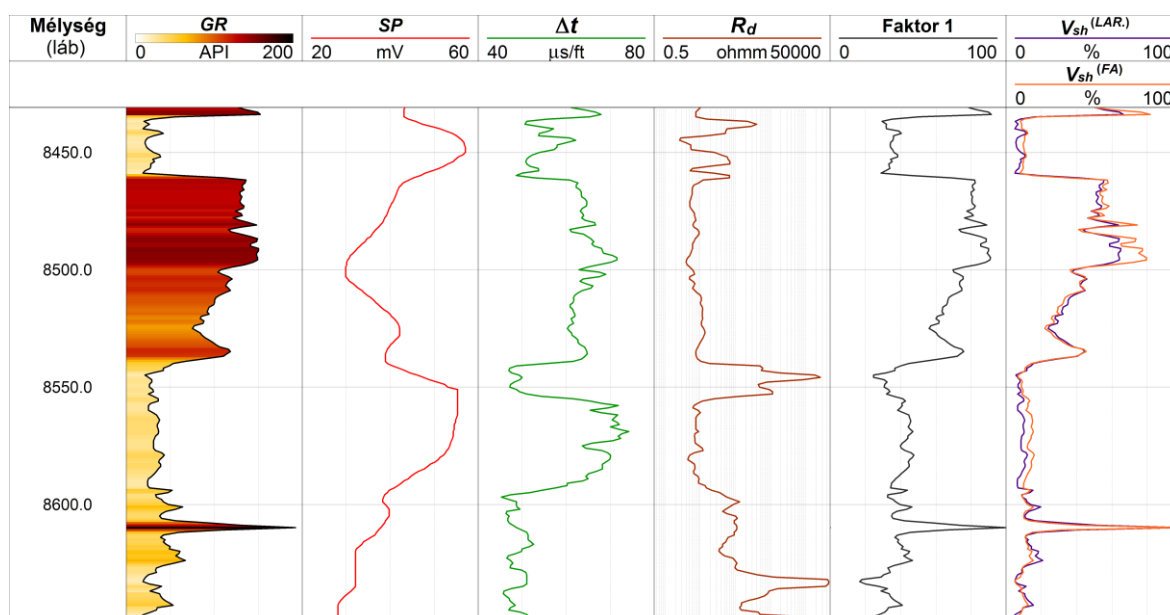


19. ábra: A faktoranalízisen alapuló agyagtartalom-becslés eredménye egy hazai szénhidrogén-kutatófúrásban

A mélyfúrési geofizikai szelvényekből képezett első faktor erősen korrelál az üledékes szénhidrogén-tároló kőzetek agyagtartalmával (**15.** és **17b. ábra**). A függvénykapcsolatot leíró (65) egyenletben szereplő regressziós együtthatókat magvizsgálatból vagy más független forrásból származó agyagtartalom értékek felhasználásával az adott fúrásban meghatározhatjuk. Az értekezésben bemutatott példákon kívül szintetikus modellkísérletek és további 14 hazai szénhidrogén-kutatófúrás vizsgálata hasonló eredményeket szolgáltatott (*Dobróka és szerzőtársai, 2013*). A genetikus algoritmus jól adaptálható a faktoranalízis végrehajtására, mely megfelelő becslést ad különböző típusú szondával és vertikális felbontással mért szelvények eltérő kombinációja, a bemenő adatsorok közötti különböző mértékű korreláció és eltérő méréskezettel mért adatok (adathiány) esetén. Az értekezésben alkalmazott genetikus operátorfajták (és vezérlőparaméter beállítások) különböző földtani környezetben érvényesnek bizonyultak.

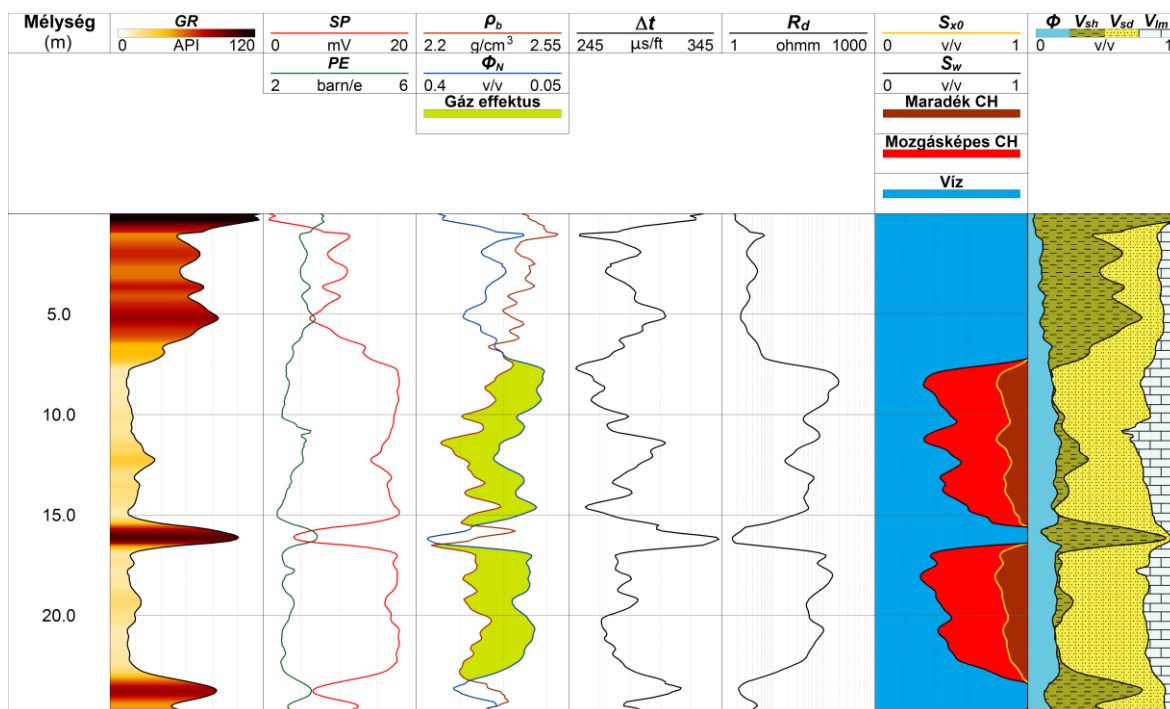
## 5.2. Kiugró adatokat tartalmazó adatrendszerek rezisztens faktoranalízise

A fúrólukszelvényeket terhelő mérési zaj (és statisztikai eloszlása) jelentősen befolyásolja a faktoranalízis eredményének a minőségét. Ebből kifolyólag a módszerfejlesztés során kiemelt figyelmet kell fordítanunk a mért adatok bizonytalanságának megfelelő (robustus) kezelésére. A szélsőségesen kieső értékek könnyen eltávolíthatók az adatrendszerből, azonban ez nem mindig előnyös, mivel hasznos információt is hordozhatnak a földtani szerkezeetről. Például a ciklusugrás jelensége az akusztikus terjedési idő detektálásakor a pórusteret kitöltő gázra vagy repedések jelenlétére utal. A kiugró adatok hatását a becsült faktorokra a **20. ábrán** szemléltetjük, ahol a dolomitos agyag képződményben mért fúrólukszelvényeket a Jöreskog-féle módszerrel dolgoztuk fel. A faktoranalízis alkalmazása a **15c. ábrán** látható első faktor-agyagtartalom összefüggésre vezet. Megállapítható, hogy a hagyományos faktoranalízis és a Larionov-féle módszer a kiugró adatokra (pl. 8610 láb mélységben) igen érzékenyen reagálnak, és kieső értékeket becsülnek mind a faktorok, mind az agyagtartalom tekintetében.



20. ábra: Kiugró adatok hatása a hagyományos faktoranalízis eredményére egy amerikai egyesült államokbeli fúrásban

Az agyagtartalom kiugróan zajos adatrendszerek esetén a 4.2. fejezetben bemutatott iteratíván újraszűzött faktoranalízissel hatékonyan becsülhető (Szabó és Dobróka, 2017a). A statisztikai eljárást szimulált földtani környezetben teszteljük, ahol az előzetesen kijelölt (ismert) közetfizikai modell alapján, az **5a. mellékletben** szereplő válaszfüggvények és az **5b. mellékletben** található zónaparaméterek felhasználásával szintetikus fúróllyuk-szelvényeket állítunk elő, majd a zajjal terhelt szelvényadatokat az IRFA eljárással dolgozzuk fel. A faktoranalízis eredményeként előálló első faktorszelvényt közvetlenül az (egzaktul ismert) agyagtartalom értékekkel hasonlítjuk össze. A szintetikus adatok felhasználásával végrehajtott vizsgálatok célja az ismert modell visszaállítása, és ezen keresztül a faktoranalízis pontosságának és zajérzékenységének felmérése. A numerikus tesztelés keretében a Jöreskog-féle eljárást az IRFA módszerrel hasonlítjuk össze, melyhez a **21. ábrán** szereplő közetfizikai modellt használjuk fel (az ábra a hibátlan mérési szelvényeket mutatja). A gáztároló agyagos karbonát- és homokképződmény közetfizikai paraméterei a következők: porozitás ( $\Phi$ ), agyagtartalom ( $V_{sh}$ ), homokrészarány ( $V_{sd}$ ), mészkőrészarány ( $V_{lm}$ ), kispert zóna víztelítettsége ( $S_{x0}$ ), érintetlen zóna víztelítettsége ( $S_w$ ). A faktoranalízis bemenő változóit, a természetes-gamma intenzitás ( $GR$ ), természetes potenciál ( $SP$ ), fotoelektromos elnyelési index ( $PE$ ), neutronporozitás ( $\Phi_N$ ), közetsűrűség ( $\rho_b$ ), akusztikus intervallumidő ( $\Delta t$ ) és a mélybehatolású szondával mért fajlagos ellenállás ( $R_d$ ) szelvényt elméleti úton állítjuk elő (**5. melléklet**). A zajjal terhelt fúróllyukszelvényeket úgy számítjuk, hogy a hibátlan adatokhoz zérus középértékű és a zajszinttel arányos skálaparaméterű Gauss-eloszlásból sorsolt véletlen számot adunk. A véletlen zajjal terhelt  $k$ -adik adat  $d'_k = d_k(1 + \mathcal{N}(\mu, \sigma))$ , ahol  $\mu=0$  a várható érték és  $\sigma$  a kívánt zajszint arányában választott szórás. A kiugró adatok szimulálása céljából a Gauss-zajjal terhelt adatok (véletlen) 10 %-ához további hatszoros mértékű normális eloszlású zajt adunk. A hibátlan (szintetikus) és a zajos fúróllyukszelvények adattérbeli eltérése  $RMS=7\%$ , valamint a kvázi-mért mennyiségek átlagos korrelációja közepes mértékű ( $\rho=0.36$ ).



21. ábra: A szintetikus fúróllyukszelvények és az elméleti (ismert) közetfizikai modell

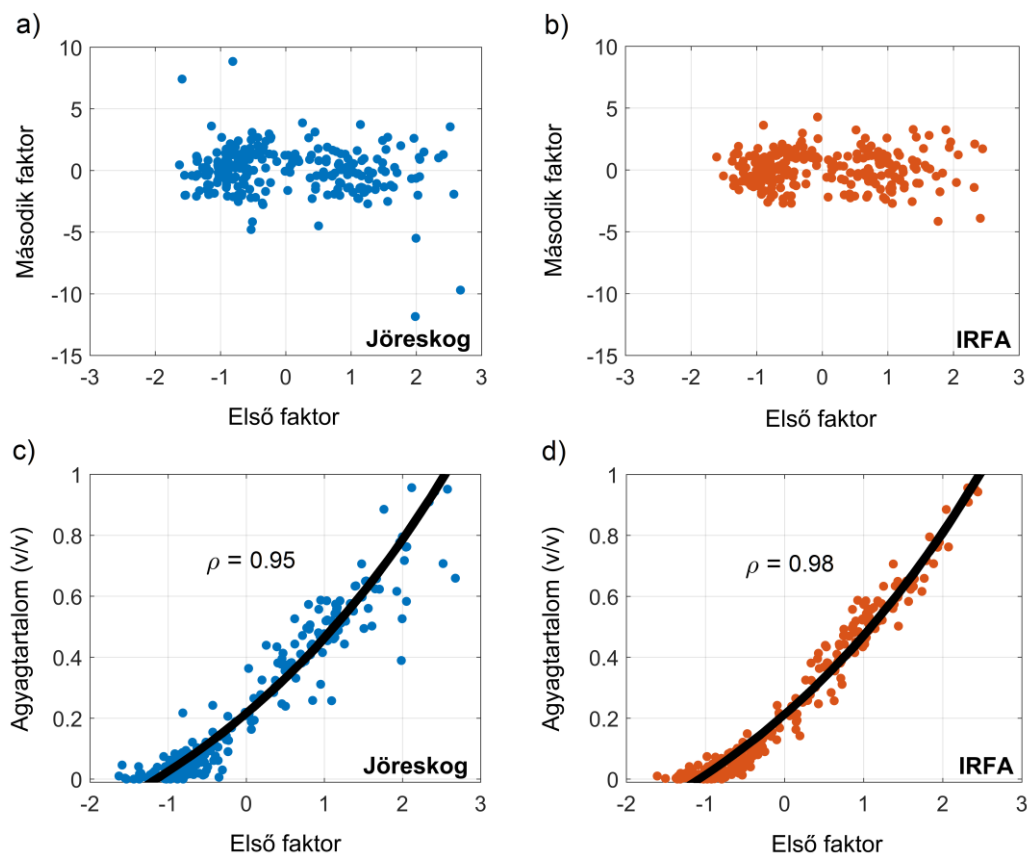


A szintetikus adatrendszer feldolgozásával két faktort képezünk. A Jöreskog-féle eljárás keretében a faktorsúlyokat a (48) formula alapján számítjuk. Ezt követően az IRFA eljárásban az (56) egyenletek megoldását 10 iterációs lépésben ismétljük, ahol az  $\alpha=1$  csillapítási tényező aktuális értékét minden lépésben 90 %-kal csökkentjük. Mivel 251 mélységpontban hétféle szelvény áll rendelkezésre, ezért az (51) Cauchy-féle diagonális súlymátrix  $1757 \times 1757$  méretű. A súlymátrixot minden iterációs lépésben a mért és a számított adatok eltérése ismeretében újra számítjuk, ahol a skálaparamétert  $\varepsilon^2=1$ -nek rögzítjük. Ezen kívül a súlytényezőket az adott szelvénytípusra számított súlyok összegével is normáljuk (a mérésfajtákra vonatkozó maximális súlyok eltérnek), mellyel különbséget teszünk az egyes mérési változók között. Az IRFA módszerrel becsült faktorsúlyok hasonlóak a hagyományos faktoranalízissel kapott eredményekhez; az előbbieket azonban a faktorok és a mért szelvények között valamivel erősebb korrelációt mutatnak (**5. táblázat**). A faktorsúlyok alapján megállapítható, hogy az első faktor szoros kapcsolatban áll a mért  $GR$ ,  $SP$ ,  $\Phi_N$ ,  $R_d$  mennyiségekkel, míg a második faktor gyenge korrelációt mutat a porozitáskövető szelvényekkel és litológiai információt nem tartalmaz. A redukált korrelációs mátrix szinguláris értékek szerinti felbontása alapján megállapítható, hogy az első faktor a bemenő adatok varianciájának a döntő részét (94 %-át), míg a második faktor annak csak a 6 %-át magyarázza.

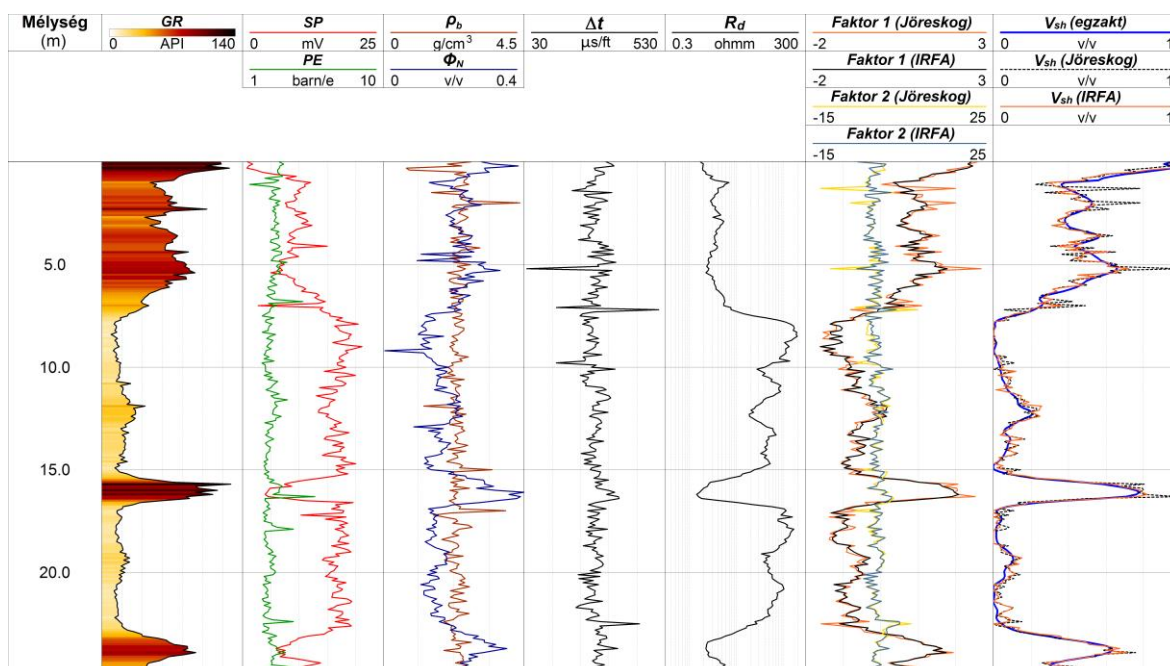
5. táblázat

Faktorsúly	Jöreskog-féle módszer		IRFA módszer	
	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 1	Faktor 2
$L^{(SP)}$	-0.95	0.02	-0.97	$3 \cdot 10^{-3}$
$L^{(GR)}$	0.96	0.01	0.98	0.01
$L^{(\rho_b)}$	0.02	-0.16	0.05	-0.23
$L^{(\Phi_N)}$	0.84	0.28	0.89	0.14
$L^{(At)}$	0.21	0.36	0.18	0.43
$L^{(R_d)}$	-0.71	-0.21	-0.79	-0.10
$L^{(PE)}$	0.52	0.07	0.58	0.03

A faktoranalízis eredményeként két korrelálatlan faktort állítunk elő, melyek keresztábrájait a **22a-b. ábrán** mutatjuk be. Látható, hogy a hagyományos Jöreskog-féle eljárás meglehetősen érzékenyen reagál az adatrendszerben jelen lévő kieső értékekre, ezzel szemben az IRFA módszer rezisztens megoldást szolgáltat. Az IRFA eljárás keretében alkalmazott adattérbeli súlyozás lehetővé teszi, hogy a jobb minőségű adatok nagyobb mértékben járuljanak hozzá a megoldáshoz, míg a kevésbé megbízhatók hatását (szinte teljesen) elnyomjuk. Az első faktor-agyagtartalom regressziós kapcsolatot a **22c-d. ábrán** láthatjuk. A (65) egyenletben szereplő regressziós együtthatók és megbízhatósági tartományaik az IRFA eljárás esetén:  $a=0.84 \pm 0.17$ ,  $b=0.27 \pm 0.05$ ,  $c=-0.63 \pm 0.16$ . A kétféle eljárással becsült regressziós együtthatók egymáshoz közel állnak, azonban az IRFA módszer esetén azok megbízhatósága nagyobb és a vizsgált mennyiségek korrelációs viszonya is erősebb. Ezt a **23. ábrán** szereplő faktorszelvények és agyagtartalom görbék is alátámasztják. Látható, hogy az IRFA eljárás az agyagtartalom szelvényt nagyobb pontossággal állítja elő. Például a Jöreskog-féle eljárás nem képes a 0–10 m szakaszon jelentkező „tüskéket” eltüntetni, ezzel szemben az IRFA eljárással becsült szelvények mentesek a kiugró értékektől. A Jöreskog-féle eljárással becsült agyagtartalom szelvény eltérése az (egzaktul) ismert agyagtartalom értékektől  $RMS=7.2\%$ , míg ugyanez az IRFA módszer esetén  $RMS=4.4\%$ -ra csökken.

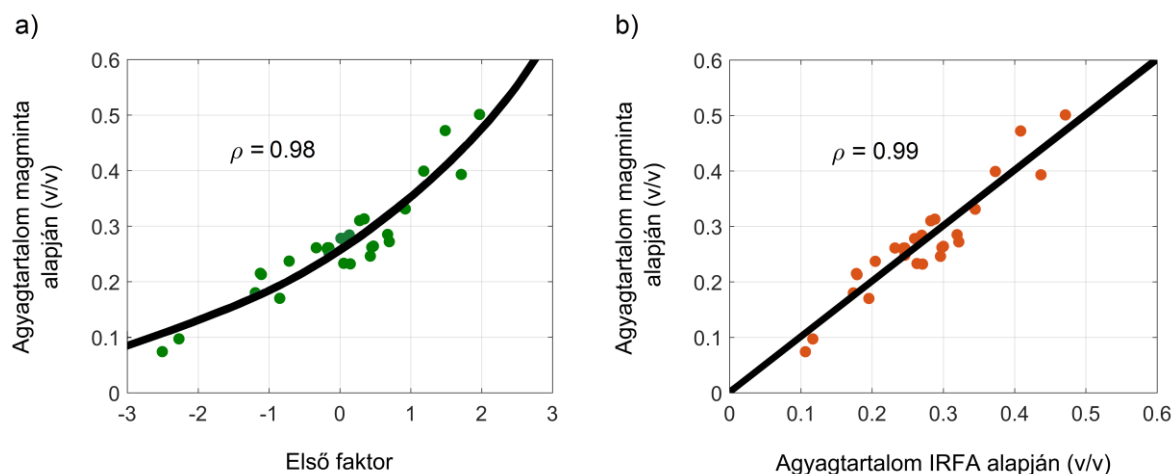


22. ábra: A Jöreskog-féle eljárással (a) és az iteratívan újraszúlyozott faktoranalízissel előállított faktorok keresztmetszeti diagramja (b), és a faktor–agyagtartalom összefüggés (c, d)



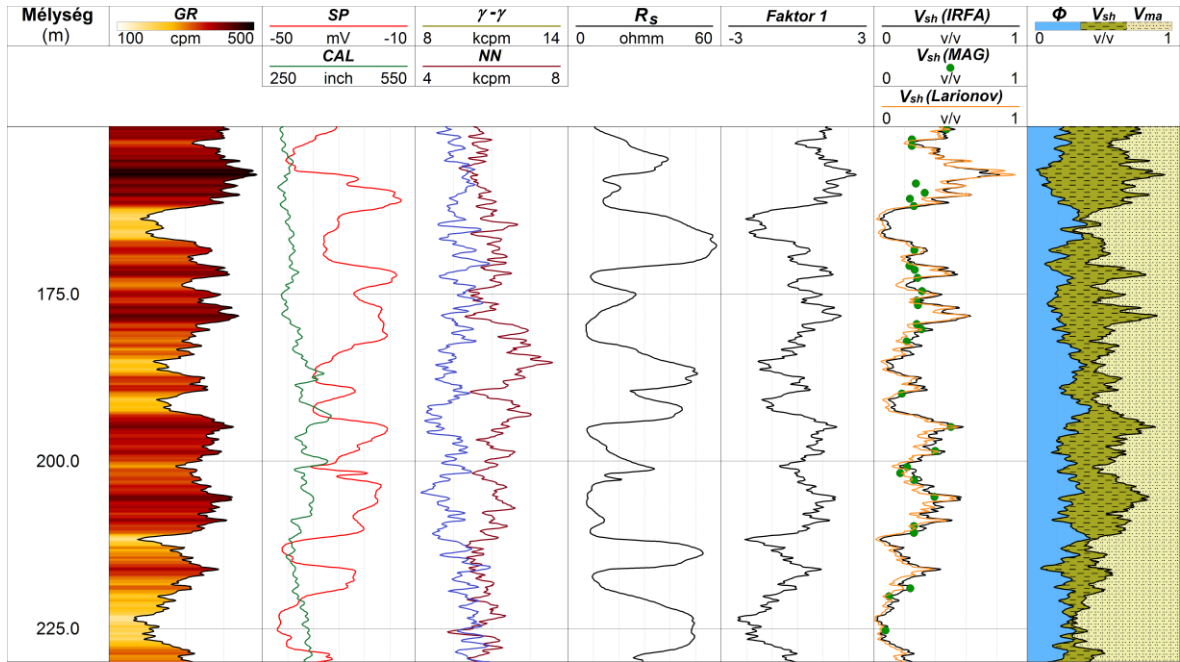
23. ábra: A hagyományos (Jöreskog-féle) és az iteratívan újraszúlyozott faktoranalízis eredménye kiugró zajjal terhelt szintetikus adatrendszer feldolgozása esetén

Az IRFA eljárással becsült agyagtartalom értékek a magvizsgálati adatokkal is megfelelő egyezést mutatnak. A Baktalórántháza 1. sz. fúrásban egy pleisztocén korú édesvíztároló rétegsort vizsgálunk, ahol a nagy porozitású (konszolidálatlan) homok és kavicsrétegeket agyagok választják el egymástól. A kvarcon kívül a közetmátrix karbonát kötőanyagot is tartalmaz, melynek laboratóriumi mérésekkel becsült mennyisége 1.5–9.6 %. Az agyagtartalom 29 mintavételi pontban szemeloszlási görbék elemzése alapján ismert. A faktoranalízis során a természetes potenciál ( $SP$ ), természetes-gamma intenzitás ( $GR$ ), lyukátmérő ( $CAL$ ), gamma-gamma intenzitás ( $\gamma\text{-}\gamma$ ), neutron-neutron ( $NN$ ) és a sekély behatolású szondával mért fajlagos ellenállás ( $R_s$ ) szelvényeket használjuk fel. A szintetikus vizsgálat keretében alkalmazott súlyozási paramétereket megtartva egyetlen faktort számítunk. A becsült faktorsúlyok:  $L^{(GR)}=0.95$ ,  $L^{(SP)}=0.49$ ,  $L^{(CAL)}=-0.13$ ,  $L^{(\gamma\text{-}\gamma)}=0.44$ ,  $L^{(NN)}=-0.34$ ,  $L^{(R_s)}=-0.40$ . Az első faktor és az agyagtartalom szoros kapcsolatát a  $\rho=0.98$  rangkorrelációs együttható mutatja (24a. ábra). A (65) modell regressziós együtthatói és azok megbízhatósági tartománya:  $a=0.43\pm 0.19$ ,  $b=0.36\pm 0.13$ ,  $c=-0.17\pm 0.19$ .



24. ábra: Az első faktor és a magvizsgálatokból származó agyagtartalom kapcsolata a Baktalórántháza 1. sz. fúrásban (a), továbbá a független módszerekkel meghatározott agyagtartalom értékek kapcsolata (b)

A Jöreskog-féle faktoranalízis, az IRFA eljárás és a magmintaelemzés eredményét a 25. ábra tartalmazza. A  $GR$  és  $SP$  szelvények jól mutatják az agyagok és homokok ciklikus váltakozását. A vizsgált szakaszon az üledékek teljesen vízzel telítettek, melyek porozitását a  $\gamma\text{-}\gamma$  és  $NN$  szelvények kombinációjával becsülhetjük. A közetmátrix térfogata az anyagmérleg egyenlettel számítható. Az első faktorból számított agyagtartalom megfelelő egyezést mutat a magvizsgálati adatokkal, valamint a (63) formula alapján végzett szelvényértelmezés eredményével. A Larionov-féle eljárással és a magadatokból nyert agyagtartalom értékek átlagos négyzetes eltérése  $RMS=4.1\%$ , míg az IRFA módszerrel becsült agyagtartalom és a magadatok között ugyanez  $RMS=3.1\%$ . Ennek alapján a (65) modell közelebb áll a laboratóriumi mérések eredményéhez. Jelen fejezetben bemutatott példák alapján megállapítható, hogy az agyagtartalom faktoranalízissel megbízhatóan becsülhető, továbbá a (65) összefüggés közelítőleg a mérési területtől függetlenül alkalmazható (a regressziós együtthatók értékeit a helyi földtani körülmények alapján kell finomítani). Az IRFA módszerrel a kiugró értékekkel terhelt adatrendszerek rezisztens feldolgozása valósítható meg a fúrásos kutatás különböző mélységtartományában.



25. ábra: A magvizsgálatokból meghatározott és faktoranalízissel becsült agyagtartalom szelvények a Baktalórántháza 1. sz. fúrásban

### 5.3. Az agyagtartalom meghatározása kétdimenziós faktoranalízissel

A 4.2. és 4.3. fejezetekben bevezetett feltáró statisztikai algoritmusokat könnyen továbbfejleszthetjük szomszédos fúrások adatrendszerének közös eljárásban történő feldolgozására, mely az agyagtartalom területi eloszlása meghatározására alkalmazható. A faktorok és az azokból származtatott közetfizikai mennyiségek két-, ill. háromdimenziós feltérképezése érdekében először valamennyi fúróluk-geofizikai adatot standardizáljuk, majd a skálázott adatokat közös mátrixba foglaljuk

$$\underline{\underline{D}} = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1k} & \cdots & d_{1K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{N_1 1} & \cdots & d_{N_1 k} & \cdots & d_{N_1 K} \\ d_{(N_1+1)1} & \cdots & d_{(N_1+1)k} & \cdots & d_{(N_1+1)K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{(N_1+N_2)1} & \cdots & d_{(N_1+N_2)k} & \cdots & d_{(N_1+N_2)K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nk} & \cdots & d_{nK} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{(N_1+N_2+\dots+N_w)1} & \cdots & d_{(N_1+N_2+\dots+N_w)k} & \cdots & d_{(N_1+N_2+\dots+N_w)K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{N1} & \cdots & d_{N2} & \cdots & d_{NK} \end{pmatrix}, \quad (67)$$

ahol  $d_{nk}$  jelöli az  $n$ -edik mélységponthoz tartozó  $k$ -edik (fajta) mérési adatot ( $N_w$  a  $w$ -edik fúrásban mért adatok száma,  $N=N_1+N_2+\dots+N_w+\dots+N_W$  a vizsgált mélységpontok teljes

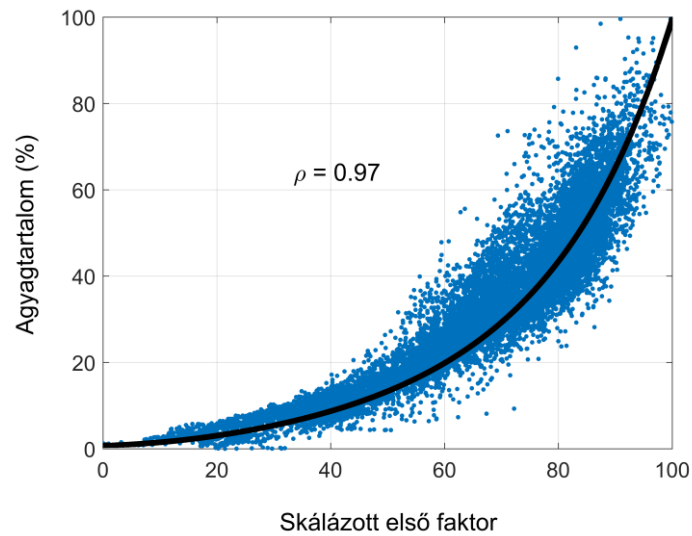
száma,  $W$  a fúrások száma,  $K$  az alkalmazott szondák száma,  $K*N$  a közös eljárásban feldolgozott adatok száma). A egydimenziós faktoranalízis algoritmusát további módosítást nem igényel, ennek megfelelően alkalmazva a (67) adatmátrix (41) egyenlet szerinti felbontását, a faktorok az IRFA vagy az FGA-FA módszerrel közvetlenül meghatározhatók. A kétdimenziós (2-D) faktoranalízis eredményeként a faktorok  $x$  vízszintes- és  $z$  mélységkoordináta menti változását térképezhetjük fel (Szabó és szerzőtársai, 2012). Szénhidrogén-kutatófúrások szelvényadatainak bevonásával a 2-D faktoranalízis tesztelését a hazai olajipar megbízásából végeztük (Dobróka és szerzőtársai, 2013).

A 2-D faktoranalízist gáztartalmú agyagos homokkötőárolók esetén teszteljük egy hazai szénhidrogén-mezőn. A 6 vizsgált fúrás közelítőleg egy ( $x$  irányban) 1500 m hosszú mérési vonal mentén helyezkedik el. A természetes-gamma intenzitás ( $GR$ ), neutronporozitás ( $\Phi_N$ ), kőzetsűrűség ( $\rho_b$ ), akusztikus intervallumidő ( $\Delta t$ ), valamint a mikrolaterolog szondával ( $R_{ml}$ ) és a mélybehatolású laterolog szondával mért fajlagos ellenállás ( $R_d$ ) szelvények valamennyi fúrásban a teljes mélységintervallumon rendelkezésre állnak. A mért fizikai mennyiségek közötti átlagos korreláció mértéke közepes ( $\rho=0.29$ ). A 2-D faktoranalízis keretében összesen  $N=16006$  mélységpont  $N*K=112042$  adatát dolgozzuk fel, melynek eredményeként három faktort becsülünk (6. táblázat). A redukált korrelációs mátrix szinguláris értékek szerinti felbontása alapján az első faktor a bemenő adatok varianciájának 89.3 %-át, a második 8.7 %-át, míg a harmadik 1.5 %-át magyarázza. Az első faktort leginkább a természetes-gamma intenzitás és a sűrűségi szelvény befolyásolja, míg a neutronporozitással és a mélybehatolású fajlagos ellenállás szelvényekkel közepesen korrelál. Ez alapján az első faktort elsősorban litológiai indikátorként értelmezhetjük, amit a porozitás és a pórustartalom (gáz) is kismértékben befolyásol. A második faktor érdemében csak az akusztikus szelvény hatását tükrözi, míg a harmadik faktor leginkább hibatenyezőnek fogható fel.

6. táblázat

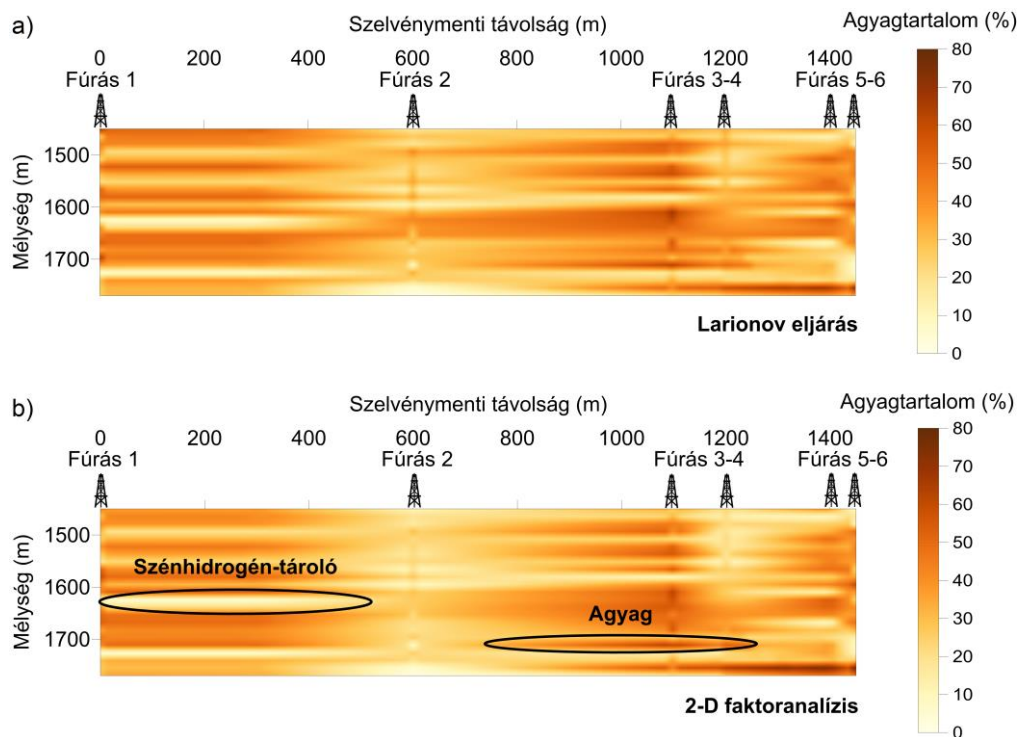
Faktorsúly	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
$L^{(GR)}$	0.94	0.20	0.18
$L^{(\Phi_N)}$	0.37	0.21	0.77
$L^{(\Delta t)}$	0.01	0.96	0.04
$L^{(\rho_b)}$	0.76	-0.28	0.28
$L^{(R_{ml})}$	0.01	-0.05	-0.06
$L^{(R_d)}$	-0.46	0.10	-0.61

Az első faktort a (66) egyenlet felhasználásával skálázzuk, ahol az  $F'_{l,min}=0$  és  $F'_{l,max}=100$  értékeket írjuk elő. Az első faktort a Larionov-féle eljárással számított agyagtartalom értékekkel hasonlítjuk össze. A vizsgált 320 m hosszúságú mélységtartományban az első faktor és az agyagtartalom között nemlineáris (exponenciális) függvénykapcsolatot találunk (26. ábra). A rangkorrelációs együttható értéke  $\rho=0.97$ , mely a két változó erős kapcsolatát mutatja. A 6. mellékletben a faktoranalízissel meghatározott agyagtartalom értékek fúrásról-fúrásra összehasonlíthatók a Larionov-féle eljárással becsült agyagtartalom szelvényekkel. A kétféle becslési eredmény megfelelő egyezést mutat egymással, melyet az Express CLASS ipari értelmezőrendszerrel (Baker Atlas, 1996) kapott eredmények is megerősítenek (Dobróka és szerzőtársai, 2013).



26. ábra: A kétdimenziós faktoranalízis eredményeként előálló első faktor–agyagtartalom összefüggés egy hazai szénhidrogénmezőn

A 2-D faktoranalízissel becsült faktorértékeket krigeléssel interpolálva előállítjuk a faktorok folytonos szelvényeit. Ezután az első faktorról a (65) tapasztalati összefüggés alapján képezhetjük az agyagtartalom szelvényét. A Larionov-féle eljárással becsült (és interpolált) agyagtartalom szelvénye (27a. ábra) megfelelő egyezést mutat a 2-D faktoranalízis eredményével (27b. ábra), melyek átlagos négyzetes eltérése  $RMS=5.9\%$ . Az agyagtartalom térképen megfelelően elkülöníthetők a kis agyagtartalommal rendelkező gáztárolók és a nagy agyagtartalmú impermeábilis zárórétegek.



27. ábra: A Larionov-féle eljárással (a) és a kétdimenziós faktoranalízissel becsült agyagtartalom szelvény (b) egy hazai szénhidrogénmezőn

## 6. A hidraulikus vezetőképesség meghatározása vízkutatófúrások szelvényeinek faktoranalízisével

A vízföldtani kutatások során a porózus és repedezett kőzetek hidraulikus vezetőképességét (más néven szivárgási tényezőjét) a kőzetminták laboratóriumi vizsgálatával, küttesztekkel vagy nagyobb léptékben tárolómodellezéssel határozzuk meg. A hidraulikus vezetőképesség a fúrólukban a nukleáris mágneses rezonancia (NMR) szelvényezéssel közvetlenül mérhető (Walsh és szerzőtársai, 2013), melynek előnye, hogy nem csak az effektív porozitás mértékéről, hanem a pórusméret-eloszlásról, ill. a pórusokat kitöltő fluidumok tulajdonságairól is informál. A költséges NMR mérések helyett a porózus közeg hidraulikus vezetőképességét általában a szemcsemérettel, a porozitással és a repedések jellemző tulajdonságaival hozzuk kapcsolatba. Elsődleges porozitású kőzetek kiértékelése során további texturális tulajdonságokat is figyelembe kell vennünk, pl. a cementációs kitevőt vagy a tekervényességi együtthatót (zónaparaméterek), melyek a szivárgási tényező meghatározására többnyire tapasztalati módszerek alkalmazását teszik lehetővé. A szivárgási tényező meghatározási pontossága nagymértékben függ a fúróluk-szelvényeket terhelő mérési zaj mértékétől, a kapcsolódó kőzetfizikai mennyiségek bizonytalanságától, a kőzetminta irányítottságától (anizotropia), de olyan tényező is lényeges lehet, mint a magmintavételi mélység pontos megadása (pozicionálási hiba). A szivárgási tényező vonatkozásában a kísérleti körülmények és módszertani megközelítések különbözősége miatt jelentős eltérés adódhat a laboratóriumi és a geofizikai értelmezés eredménye között, ezért kismélységű szerkezetek esetén a szivárgási tényező becslési hibája bizonyos esetekben elérheti az egy (másfél) nagyságrendet.

Darcy törvénye szerint a szivárgási tényező ( $K$ ) az áramlás Darcy-féle sebességének ( $q$ ) és a hidraulikus gradiensnek ( $dh/dl$ ) a sebességdimenziójú arányossági tényezője, mely elsődleges porozitású kőzetekben a pórusokat kitöltő víz sűrűségétől és viszkozitásától, a szemcse- és pórusméret eloszlástól, a porozitástól (agyagtartalomtól), valamint a víztelítettségétől függ. A szivárgási tényező a permeabilitással nő, mely a vízadókőzet áteresztőképességét jellemzi. A Kozeny-Carman egyenletet széleskörűen alkalmazzák a szivárgási tényező (cm/s) becslésére

$$K = \frac{\rho_w g}{\mu} \frac{d^2}{180} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2}, \quad (68)$$

ahol  $d$  (cm) a jellemző szemcseméret,  $\Phi$  (v/v) a kőzet porozitása,  $\rho_w$  (g/cm<sup>3</sup>) a pórúsvíz sűrűsége,  $\mu$  (g/cm\*s) a dinamikai viszkozitás és  $g$  (cm/s<sup>2</sup>) a nehézségi gyorsulás normálértéke (Bear, 1972). A (68) egyenletben szereplő  $d$  (cm) domináns átmérő szemcseméret-eloszlás vizsgálatból meghatározható

$$d = \frac{d_{10} + d_{60}}{2} \left( \frac{d_{10}}{d_{60}} \right)^{1/2}, \quad (69)$$

ahol  $d_{10}$  (cm) és  $d_{60}$  (cm) a kumulatív gyakorisági görbe 10 % és 60 %-os ordinátaértékéhez tartozó szemcseátmérők (Juhász, 2002). Mivel a kőzetminták elemzésével a szükséges szemcseátmérők könnyen meghatározhatók, és a porozitás a fúrólukszelvényekből becsülhető, a szivárgási tényező mélységi változása a (68) egyenlet alapján számítható.

Jelen értekezésben a hidraulikus vezetőképesség becslésére egy új, fúróluk-geofizikai szelvényadatok faktoranalízisén alapuló megközelítést javaslok. Mivel az első faktor szoros kapcsolatban áll az üledékes kőzetek agyagtartalmával, így azt feltételezzük, hogy a statisztikai változó megfelelően korrelál a szivárgási tényezővel is. Kimutatható, hogy az első faktor és a  $\kappa=K/K_0$  (ahol  $K_0=1$  cm/s) dimenziótlan szivárgási tényező tizesalapú logaritmusának kapcsolata jó közelítéssel lineáris

$$-\lg(\kappa) = \alpha F_1' + \beta, \quad (70)$$

ahol  $\alpha$  és  $\beta$  jelölik a mérési területre vonatkozó regressziós állandókat és  $F_1'$  képviseli a (megfelelően) skálázott első faktort. A (70) regressziós függvény ismeretében a szivárgási tényező közvetlenül előállítható a fúróluk-geofizikai adatok ismeretében. A statisztikus eljárás érvényességét szintetikus modellkísérletek és terepi alkalmazások bizonyítják, ahol a faktoranalízissel becsült szivárgási tényező értékeket a laboratóriumi mérések eredményei és a kúttesztadatok is megerősítik (Szabó, 2015).

A Baktalórántháza 1. sz. fúrásban a faktoranalízist korábban az agyagtartalom meghatározására alkalmaztuk (Szabó és szerzőtársai, 2014). Jelen vizsgálatainkban a fúrólukszelvények faktoranalízisével a víztároló rétegek szivárgási tényezőjét határozzuk meg. A vizsgált mélységszakaszon 176 kőzetmintát gyűjtöttek, mely a Kozeny-Carman egyenlet alkalmazása révén a faktoranalízistől független becslést nyújt a szivárgási tényezőre. A fúrás legfelső szakaszán pleisztocén korú üledékek (döntően homokok és kavicsok, agyag közbetelepülésekkel) találhatóak. A konszolidálatlan porózus-permeabilis rétegek jó minőségű vizet tárolnak. A pleisztocén és pannon üledék határa ~240 m mélységben helyezkedik el. A pannon korú agyagkomplexum főként agyagos homokból, kavicsból, agyagos kőzetlisztből, agyagos márgából és bitumenes agyagból áll. A statisztikai eljárásba a természetes gamma-intenzitás ( $GR$ ), természetes potenciál ( $SP$ ), gamma-gamma intenzitás ( $\gamma-\gamma$ ), termikus neutron-intenzitás ( $NN$ ) és a sekély behatolású szondával mért fajlagos ellenállás ( $R_s$ ) szelvényeket vonjuk be. A feldolgozott mérési adatok teljes száma  $N=19075$ . Két faktor számítása esetén, az első faktor a mért változók varianciájának 82 %-át magyarázza, míg a második annak 18 %-áért felelős. A becsült faktorsúlyokat a **7. táblázat** tartalmazza, mely a természetes-gamma és a fajlagos ellenállás szelvények első faktorra gyakorolt meghatározó szerepét hangsúlyozzák.

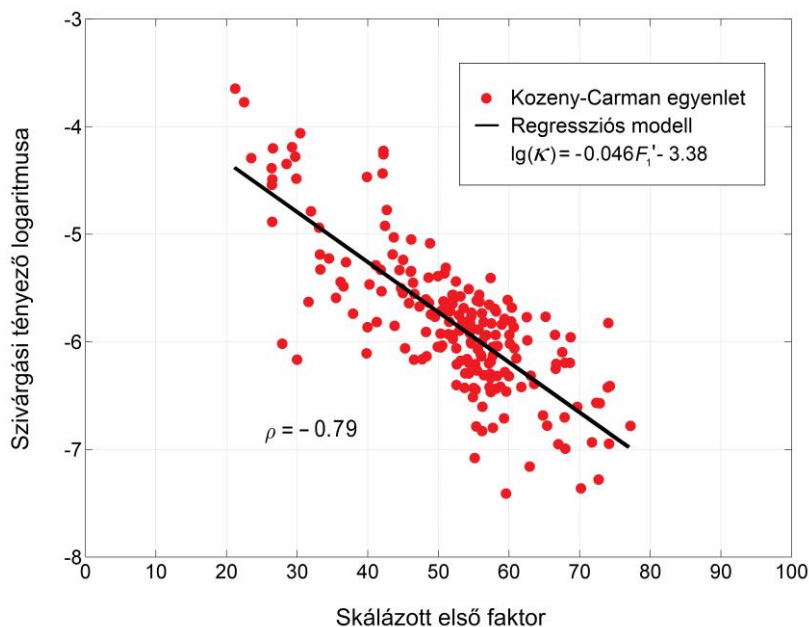
7. táblázat

Faktorsúly	Faktor 1	Faktor 2
$L^{(SP)}$	-0.41	0.85
$L^{(GR)}$	0.91	-0.15
$L^{(\gamma-\gamma)}$	0.36	-0.24
$L^{(NN)}$	0.03	-0.18
$L^{(R_s)}$	-0.79	0.21

Az első skálázott faktor és a szemcseméret-eloszlás adatokból a (68) és (69) egyenletek alapján számított szivárgási tényező regressziós kapcsolatát a **28. ábra** illusztrálja. A (68) egyenletben szereplő porozitást a neutronszelvény alapján határozzuk meg. Látható, hogy a (70) regressziós modell megfelelően írja le az első faktor és a szivárgási tényező kapcsolatát. A Pearson-féle korrelációs együttható a változók lineáris és fordított

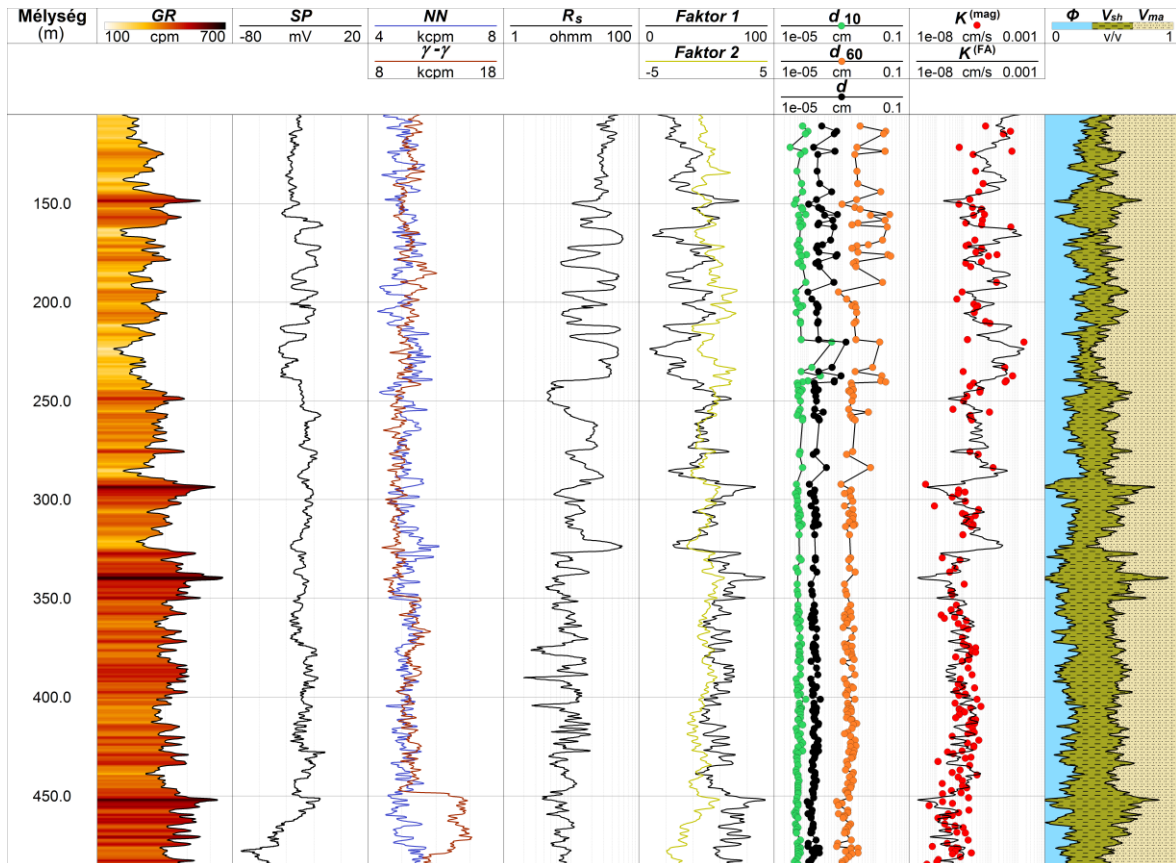


irányú kapcsolatát erősíti meg ( $\rho = -0.79$ ). A  $-\lg(\kappa) = -0.046F_1' - 3.38$  helyi regressziós egyenletben szereplő együtthatók alsó és felső korlátjai (95 %-os konfidenciaszint mellett) az alábbiak:  $\alpha_{min} = -0.052$ ,  $\alpha_{max} = -0.041$ ,  $\beta_{min} = -3.66$ ,  $\beta_{max} = -3.11$ .



28. ábra: A magvizsgálati adatok felhasználásával számított szivárgási tényező és az első faktor kapcsolata a Baktalórántháza 1. sz. fúrásban

A Baktalórántháza 1. sz. fúrásban mért szelvényeket és a faktoranalízis eredményét a **29. ábrán** láthatjuk. Az agyagtartalmat a *Larionov (1969)* által javasolt *GR* szelvényen alapuló módszerrel és faktoranalízissel is meghatározhatjuk. A mértékadó ( $d_{10}$ ), a 60 %-os kumulatív gyakorisághoz tartozó ( $d_{60}$ ) és a domináns ( $d$ ) szemcseátmérőket a kőzetmintavétel helyein tüntetjük fel. A laboratóriumi mérésekből származtatott szivárgási tényező értékeket ( $K^{(mag)}$ ) ugyanezen mélységekben ábrázolhatjuk, míg a faktoranalízis által szolgáltatott hidraulikus vezetőképességet a fekete folytonos görbe mutatja ( $K^{(FA)}$ ). A független módszerekkel meghatározott szivárgási tényező értékei (néhány pont kivételével) szoros illeszkedést mutatnak. Megjegyezzük, hogy a szivárgási tényező görbéje jó egyezést mutat a Csókás-féle eljárással számított eredménnyel (*Szabó és szerzőtársai, 2015*). A *Csókás professzor (1995)* által kidolgozott eljárás konszolidálatlan édesvíztároló üledékekben, a fúróllyukszelvények egyedüli alkalmazásával ad becslést a szivárgási tényezőre és egyéb vízminőség-jellemző paraméterekre. Az Archie-féle formációtényező és a mértékadó szemcseátmérő kapcsolatát leíró tapasztalati egyenlet (*Alger, 1971*) felhasználásával, a törmelékes üledékes tárolók valódi fajlagos ellenállása, a rétegvíz fajlagos ellenállása és a porozitás ismeretében a szivárgási tényező a fúróllyuk teljes hosszára becsülhető. A Csókás-féle módszer ezen kívül lehetőséget ad a fajlagos felület, a kritikus áramlási sebesség és a maximális (homokmentes) vízhozam számítására. A Csókás-eljárás és a faktoranalízis folytonos információt szolgáltat a szivárgási tényező fúróllyuk menti eloszlásáról, mely jól alkalmazható a magvizsgálati és kútesztadatok kiterjesztésére a hidrogeológiai feladatok megoldása során.



29. ábra: A szivárgási tényező meghatározása a Baktalórántháza 1. sz. fúrásban

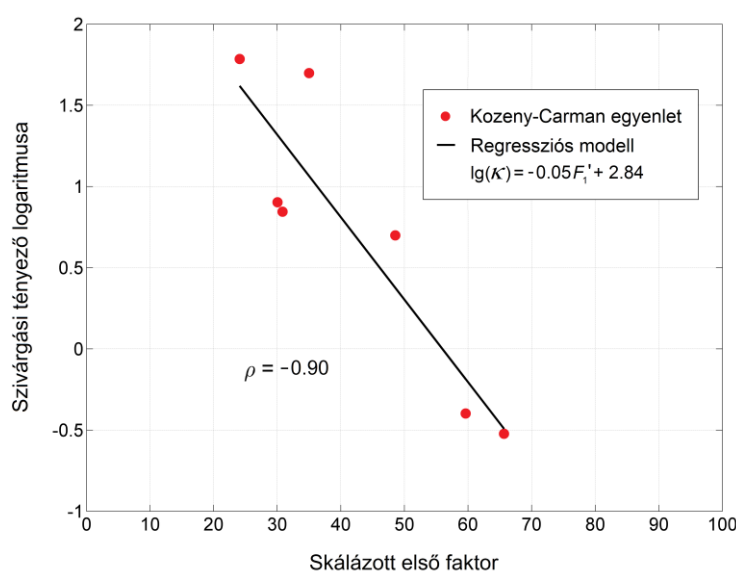
A hidraulikus vezetőképesség faktoranalízissel való meghatározását az előző példához képest eltérő földtani környezetben vizsgáljuk. Az Amerikai Földtani Szolgálat (USGS) engedélyével felhasznált fúróluk-geofizikai adatrendszer Wisconsinból (Amerikai Egyesült Államok) az FL-800 jelű fúrásból származik, melyet az ún. Sinnipee csoport rétegtani és vízföldtani jellemzése céljából mélyítették. A fúróluk-geofizikai mérések egy regionális hidrogeológiai kutatás részét képezték, melynek célja az volt, hogy a területen minél részletesebb földtani-geofizikai információt gyűjtsenek a felszínalatti vízkészletek gazdaságos felhasználása és védelme érdekében (Dunning és Yeskis, 2007). Az ordovíciumi korú Sinnipee csoportot vízadó alapkőzetnek tekintik, mely a (növekvő mélység irányában) a Galena, Decorah és Platteville formációkból áll. A paleozoikumi szerkezetre negyedidőszaki konszolidálatlan üledékek települtek vékony rétegek formájában. A vizsgált szakaszon a Sinnipee csoportot dolomit és agyagos dolomit építi fel. Kőzetmagokon végzett mérések alapján a dolomit elsődleges porozitása 2–4 %, míg az agyagos szakaszokon ugyanez maximum 10 %. A tömör dolomitban kialakult repedések és a rétegződés síkjában megjelenő párhuzamos elválások felelősek a kőzet másodlagos porozitásért és annak nagyobb átteresztőképességéért, melyet akusztikus lyukfalleképezéssel, irányított radarreflexiós mérésekkel, valamint fúrólukok közötti radarátvilágítással határoztak meg. Az akusztikus lyuktelevíziós mérések arra utalnak, hogy a víz elsősorban a rétegződés síkjában lévő elválások mentén áramlik. A vízszintes irányú szivárgási tényező meghatározására néhány elszigetelt szakaszon, Hvorslev (1951) módszerét alkalmazva kütteszketek végeztek, melynek eredményét tekintjük alapul az első faktor és a szivárgási tényező kapcsolatának meghatározása során.

A faktoranalízis bemenő mennyiségeit a természetes gamma-intenzitás ( $GR$ ), rövid és hosszú szondával mért neutron-neutron intenzitás ( $NN^{(közeli)}$ ,  $NN^{(távol)}$ ), fajlagos ellenállás, úgymint a rövid normál ( $R_{16}$ ), hosszú normál ( $R_{64}$ ) és laterál ( $R_{LAT}$ ), valamint a hőmérséklet ( $TE$ ) szelvények adják. A vizsgált mélységtartományban, mely az Amerikai Egyesült Államokban használt NGVD-29 alapszinthez képest 910–750 láb (277.4–228.6 m) magasságban helyezkedik el, összesen  $N=11298$  adatot mértek. A standardizált adatmátrix felbontásával három faktort számítottunk, ahol a mért változók teljes varianciájának 79.1 %-át az első faktor, 14.9 %-át a második, a maradék 6 %-át a harmadik faktor magyarázza. A becsült faktorsúlyok a **8. táblázatban** találhatóak, melyek az elsődleges porozitású kőzetek eredményeitől eltérnek. Az első faktor főként fajlagos ellenállás tényezőként értelmezhető, míg a litológiára vonatkozó információt az első két faktor megosztva (és ellentétes előjelű súlyokkal) tartalmazza. A  $GR$  szelvényvel a második faktor korrelál a legerősebben, melyet a neutronszelvényvel indikált kötött víztartalom is jelentősen befolyásol.

8. táblázat

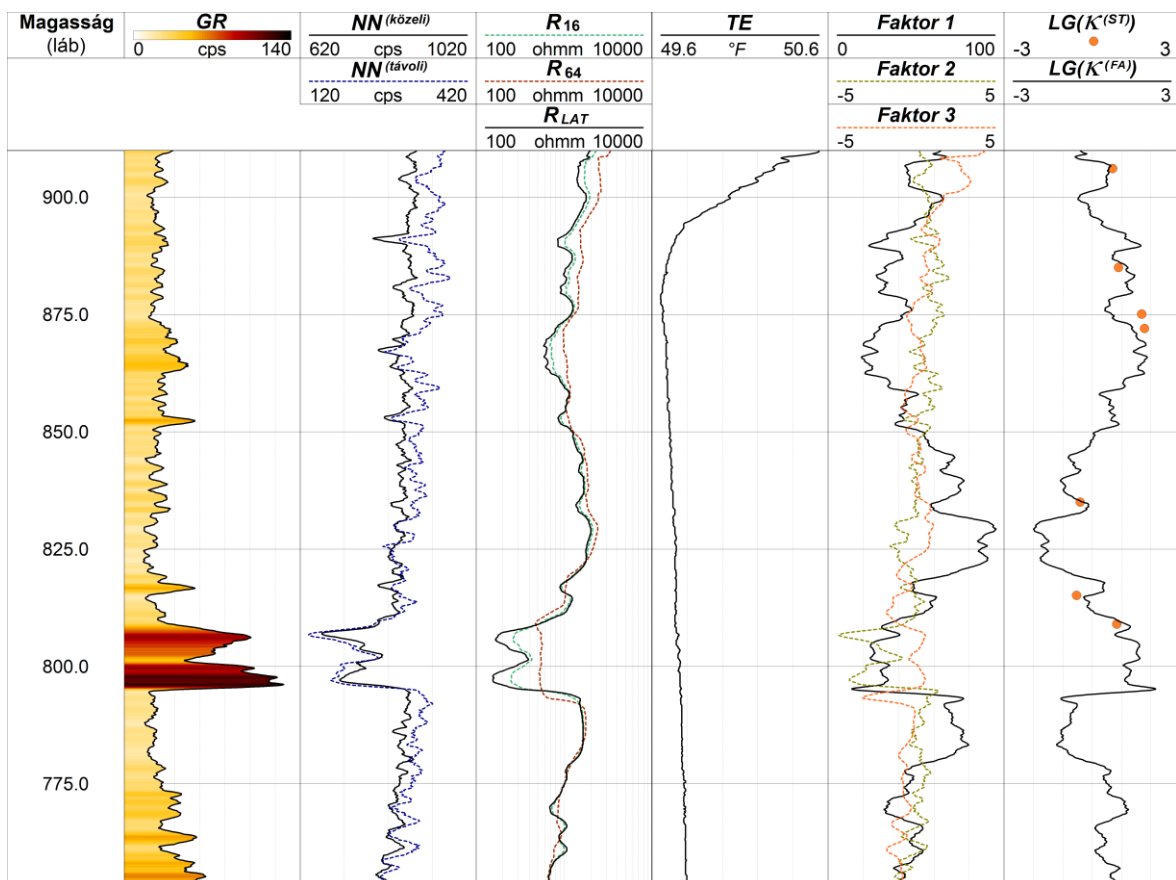
Faktorsúly	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
$L^{(GR)}$	-0.47	-0.67	-0.02
$L^{(NN^{(közeli)})}$	0.21	0.63	0.11
$L^{(NN^{(távol)})}$	0.20	0.83	0.17
$L^{(R_{16})}$	0.81	0.39	0.44
$L^{(R_{64})}$	0.59	0.32	0.73
$L^{(R_{LAT})}$	0.87	0.41	0.29
$L^{(TE)}$	0.11	0.03	0.59

A küttesztekben számított szivárgási tényező és az első faktor kapcsolata erős, melyet a  $\rho = -0.90$  korrelációs együttható igazol (**30. ábra**). A regressziós függvény  $K_0=1$  láb/nap érték esetén  $-\lg(\kappa) = -0.05 F_1' + 2.84$ , ahol az együtthatók megbízhatósági tartományát határoló értékek a következők:  $\alpha_{min} = -0.08$ ,  $\alpha_{max} = -0.02$ ,  $\beta_{min} = 1.47$ ,  $\beta_{max} = 4.21$ .



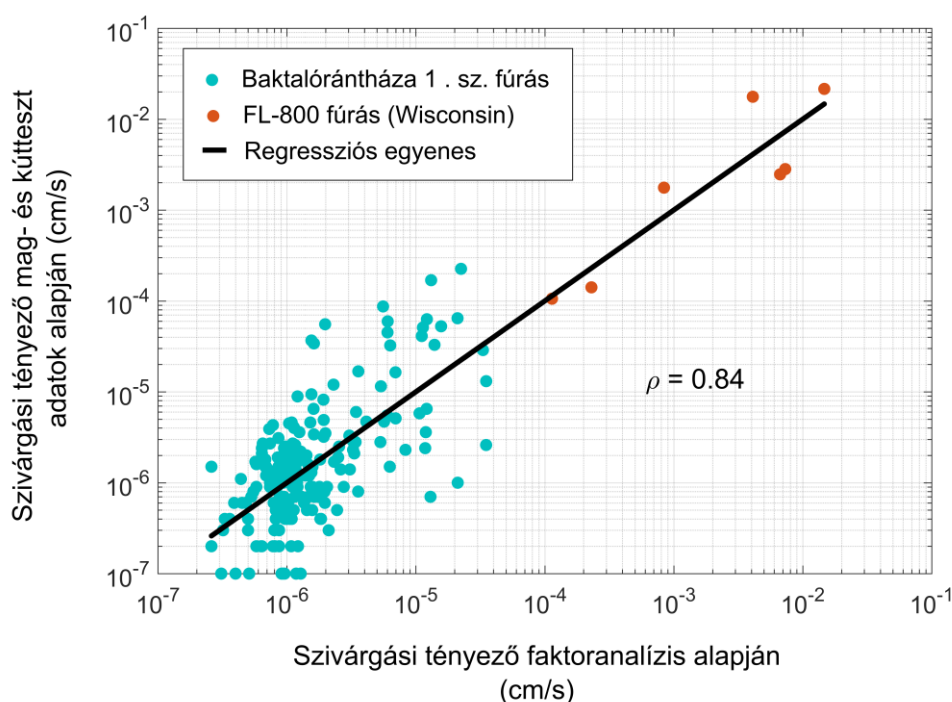
30. ábra: Vizföldtani küttesztekben meghatározott szivárgási tényező és az első faktor regressziós kapcsolata az FL-800 jelű fúrásban

A Galena és Decorah képződmények határa 810 láb (246.9 m) tengerszint feletti magasságban található, míg a Platteville Formáció teteje 790 lábnál (240.8 m) helyezkedik el (31. ábra). A legnagyobb szivárgási tényezőjű képződmény a kb. 870 láb (265.2 m) környezetében elhelyezkedő agyagos dolomit, melyet áramlásméréssel igazoltak. A repedezett formációban az agyagtartalomra érzékeny természetes gamma-szelvény az első faktorra fordított kapcsolatban áll. Az agyagtartalom maximális értékét ( $V_{sh}=0.4$  v/v) a Decorah formációban kapjuk, melynek viszonylag nagy effektív porozitása okozza ezen a szakaszon a magasabb szivárgási tényező értékeket a Platteville formáció masszív dolomitjához képest. Általában a kis  $NN$  beütésszámok és a magas  $GR$  intenzitásértékek nagy agyagtartalmat, vagyis impermeábilis kőzetet jeleznek. Mivel ebben az esetben nem agyagról, hanem ordoviciumi korú agyagpaláról van szó, a kőzet irányított szövete az a tényező, ami alapján az agyagos formációkat vízádóknak tekintjük. Ez azonban nem következik sem a  $GR$  sem pedig a  $NN$  szelvényekből, hanem kizárólag a különböző behatolású szondával mért fajlagos ellenállás görbék repedezett zónabeli eltérése mutat rá a kőzet permeábilis mivoltára. A faktoranalízis alkalmazásának jelentősége abban rejlik, hogy az első faktorra nemcsak a litológiai szelvények, hanem több különböző szondahosszal mért fajlagos ellenállás szelvény is jelentős hatást gyakorol, melyek a szivárgási tényezőről hasznos (kiegészítő) információt szolgáltatnak. A küttesztek alapján meghatározott szivárgási tényező értékek ( $K^{(ST)}$ ) és a faktoranalízissel becsült szivárgási tényező szelvény ( $K^{(FA)}$ ) megfelelő egyezést mutatnak. A (70) egyenlet felhasználásával a szivárgási tényezőt láb/nap egységben kapjuk.



31. ábra: A szivárgási tényező meghatározása az FL-800 jelű fúrásban

A fenti esettanulmányok a faktoranalízis alkalmazási lehetőségét mutatják be két egymástól eltérő felépítésű földtani környezetben. A különböző litológiai tulajdonságok és mérési körülmények ellenére a (70) egyenlet regressziós együtthatói viszonylag közel állnak egymáshoz. A **32. ábrán** a Baktalórántháza 1. sz. fúrásban becsült szivárgási tényező értékek a  $10^{-7} < K < 10^{-4}$  cm/s tartományban jelentkeznek. A pleisztocén korú kőzetekben a keresztmetszeti összetartozó pontjai nagyobb eltérést mutatnak a  $K^{(FA)} = K^{(mag)}$  egyenletet ábrázoló (fekete) egyeneshez képest, míg a szórás a kisebb szivárgási tényezőjű miocén formációban kisebb. A wisconsini FL-800 jelű fúrásban a faktoranalízis felhasználásával kapott és a kútesztek alapján becsült szivárgási tényező értékek között még szorosabb illeszkedés mutatkozik. Az ábrázolt regressziós egyenes a  $10^{-4} < K \leq 10^{-2}$  cm/s intervallumon a  $K^{(FA)} = K^{(ST)}$  egyenlőségnek felel meg. A különböző forrásból származó szivárgási tényező adatrendszerek erősen korrelálnak egymással ( $\rho = 0.84$ ).



32. ábra: A faktoranalízissel, magvizsgálatokkal és kútesztekkel becsült hidraulikus vezetőképesség kapcsolata különböző (távoli) vizkutatófúrásokban

A Szabó (2015) tanulmányban közölt szintetikus modellkísérletekből és az itt bemutatott terepi vizsgálatokból az a következtetés vonható le, hogy a faktoranalízis megfelelően alkalmazható a vízáradó képződmények hidraulikus vezetőképessége meghatározására. Megemlítjük, hogy a szivárgási tényezővel szorosan összefüggő mennyiség, az átteresztőképesség is erősen korrelál a mélyfúrési geofizikai szelvényekből becsült első faktoralapján, melynek alapján a szénhidrogén-tárolók permeabilitása független szelvényértelmezési eljárással meghatározható. A hazai olajipar megbízásából az IRFA módszert több szénhidrogén-mezőn is kipróbáltuk, ahol az eredményeket külső forrásból (determinisztikus eljárás) származó átteresztőképesség értékekkel és magvizsgálati adatokkal összehasonlítva igazoltuk (Dobróka és szerzőtársai, 2016a).

## 7. Kőzetfizikai mennyiségek meghatározása mérnökgeofizikai szondázási adatok faktoranalízisével

A felszínközeli telítetlen közeg kutatásakor a felszíni geofizikai módszerek által szolgáltatott eredmények pontosságát és megbízhatóságát jelentősen növelhetjük a sekély mélységű fúrólukakból szerzett in situ információ felhasználásával. Az erre a célra alkalmazható mérnökgeofizikai szondázási (MGSZ) módszer hazai fejlesztés eredménye, mely speciálisan kialakított lyukeszkozök révén lehetőséget teremt a mélyfúrásokban végzett mérésekhez hasonló elektromos, nukleáris és kőzetmechanikai paraméterek megfigyelésére a talaj és a konszolidálatlan üledékek legfelső (hazánkban maximum néhányszor 10 méter) mélységtartományában (Fejes és Jósa, 1990). Számos hazai és nemzetközi alkalmazási példa bizonyítja, hogy az MGSZ módszer előnyösen alkalmazható a környezetvédelmi és mérnöki feladatok megoldásában, valamint a vízföldtani kutatások területén (Draskovits és Fejes, 1994; Draskovits és szerzőtársai, 1995; Magyar és szerzőtársai, 1995; Tillmann és szerzőtársai, 2008).

A mérnökgeofizikai szondázási adatokat a mélyfúrési geofizika területéről adaptált hagyományos kiértékelési eljárásokkal dolgozzák fel, mellyel általában külön-külön határozzák meg a talajok fizikai, geotechnikai és hidrogeológiai paramétereit (Nyári és szerzőtársai, 2010). Mivel a vizsgált közeg meglehetősen inhomogén és a mérési adatok száma és pontossága is korlátozott, a kiértékelés hatékonysága nyilvánvalóan új, független szelvényértelmezési (adatfeldolgozási) eljárás bevonásával fokozható. Drahos (2005) a súlyozott legkisebb négyzetek módszerén alapuló mélységpontonkénti inverziós eljárást javasolt a talaj összetételének, porozitásának és agyagtartalmának meghatározására. Az inverziós módszerek alkalmazása mellett a faktoranalízis is előnyösen alkalmazható a talajok víztelítettségének és az abból származtatható kőzetfizikai mennyiségek becslésére (Szabó és szerzőtársai, 2012). A többváltozós statisztikai eljárással valamennyi szelvény egyidejűleg feldolgozható és az eredményül kapott víztelítettség szelvény inverzióba történő bevonásával a becsült kőzetfizikai modell minősége és megbízhatósága javítható.

### 7.1. A víztelítettség meghatározása

A talaj szilárd váza különböző nagyságú szemcsékből épül fel, melynek anyagi összetétele a törmelékes alkotórészekon kívül függ a szervesanyag-tartalomtól és a fekü típusától. A telítetlen zónában a pórusokat a víz mellett általában levegő tölti ki. A kőzetfizikai modellezés során a talaj alkotórészei térfogatarányát kell meghatároznunk: a finomszemcsés komponensek (agyagok) részarányát ( $V_{cl}$ ), a durvább szemcsék (általában homok és kavics) alkotta szilárd váz (mátrix) térfogatát ( $V_{ma}$ ), valamint a víztartalmat ( $V_w$ ) és a gáz (levegő) térfogatát ( $V_l$ ). A négy kérdéses térfogatjellemző mennyiség egységnyi kőzettérfogatra vonatkozó összegét a  $V_w + V_l + V_{cl} + V_{ma} = 1$  anyagmérleg egyenlet szabályozza. A víztelítettség a porozitás ( $\Phi$ ) ismeretében könnyen számítható

$$S_w = \frac{V_w}{\Phi} = \frac{V_w}{V_w + V_l}, \quad (71)$$

mellyel a póruseret kitöltő levegő térfogata  $S_l = 1 - S_w$ . Különböző hazai mérési területen megfigyelhető, hogy a mérnökgeofizikai szondázási szelvényekből képzett első faktor

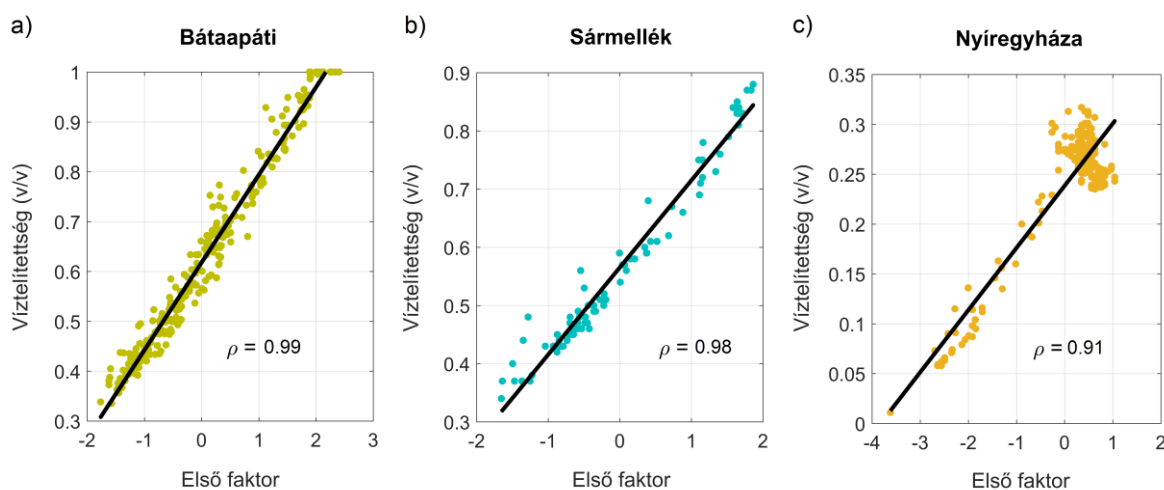
erősen korrelál a víztelítettséggel (33. ábra). Definiáljuk következőképpen az első faktorra vonatkozó faktorindex mennyiséget

$$i_{F_1} = \frac{F_1 - F_{1,min}}{F_{1,max} - F_{1,min}}, \quad (72)$$

ahol  $F_1$  jelöli az első faktor adott mélységpontbeli értékét. Az  $F_{1,min}$  és  $F_{1,max}$  területi állandók az első faktorszelvény szélsőértékeit képviselik, melyek a faktorszelvényből automatikusan (kőzetfizikai információ bevonása nélkül) meghatározhatók. A terepi tapasztalatok alapján a víztelítettség számítására az alábbi közelítő egyenlet javasolható

$$S_w = i_{F_1}. \quad (73)$$

A (73) összefüggés a faktoranalízis felhasználásával új, független szelvényértelmezési eljárásként alkalmazható a víztelítettség meghatározására (Szabó és szerzőtársai, 2012).



33. ábra: Az első faktor és a víztelítettség kapcsolata hazai, mérnökgeofizikai szondázások számára kialakított sekély mélységű fúrásokban

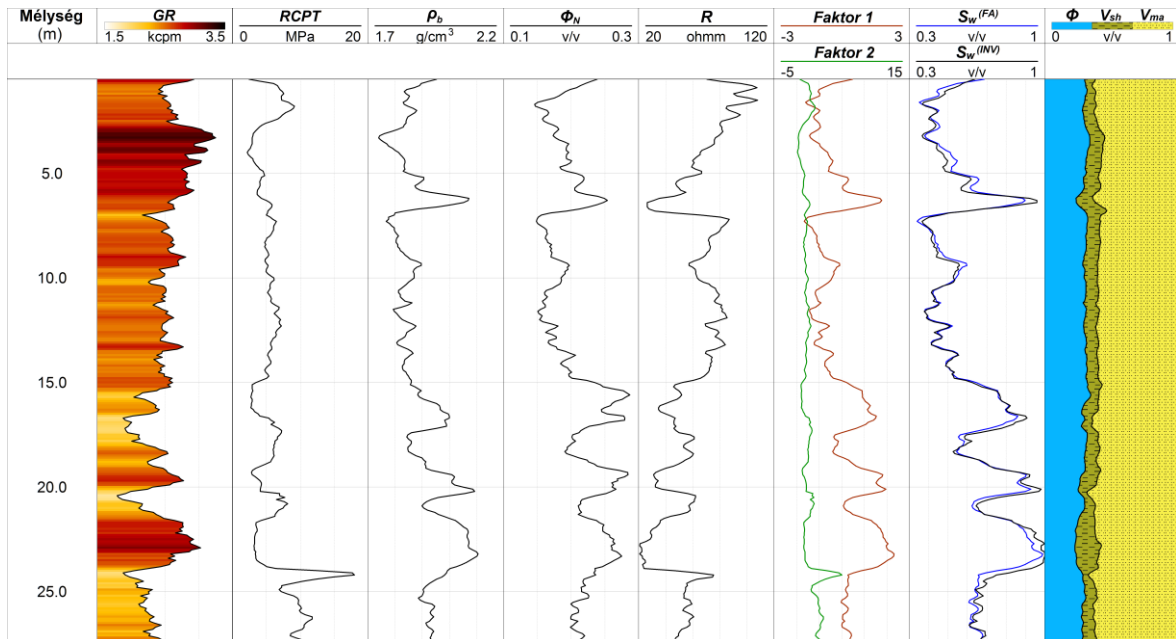
A víztelítettség meghatározását a Bataapáti (Üveghuta) területen az Elgocar-2000 Környezettechnológiai és Vízgazdálkodási Kft. által mélyített 12 sekély mélységű fúrásban mutatjuk be. A fúrások egy 550 m hosszúságú mérési vonal mentén, közelítőleg 50 m távolságra helyezkednek el egymástól. Az MGSZ mérések célja a paleotalajok tagolása, neotektonikus események azonosítása és a vízföldtani viszonyok megismerése volt. A felszínközeli in situ mérések egy komplex geofizikai kutatás részét képezték, mely a Bataapáti kis és közepes aktivitású radioaktív hulladéktároló telephely részletes jellemzését tűzte ki célul (Vértesy és szerzőtársai, 2004). A szondázások a gránitra települt löszös képződményben, a talajvízszint feletti régióban (~0–27 m mélységben) történtek. A felszínközeli üledékek kőzetfizikai paramétereit korábban Drahos (2005) mélységpontonkénti inverzióval határozta meg. Bemutatjuk, hogy a faktoranalízissel becsült víztelítettség megfelelően egyezik a pontonkénti inverzió, ill. a 8. fejezetben szereplő 2-D inverziós eljárás eredményével. Az Üveghuta 2. sz. fúrásban a természetes-gamma intenzitás

(GR), csúcscellenállás (RCPT), neutronporozitás ( $\Phi_N$ ), közetsűrűség ( $\rho_b$ ) és fajlagos ellenállás (R) (közel Gauss-eloszlást követő) szelvényeket használjuk fel. A méréseket 271 mélységpontban 0.1 m mintavételi távolsággal végezték, melynek alapján összesen  $N=1355$  szelvényadatot gyűjtöttek. A Jöreskog-féle módszerrel két korrelálatlan faktort számítottunk, melyek közül az első a mérési változók varianciájának 66 %-át, míg a második annak 33 %-át magyarázza. A (48) egyenlettel számított faktorsúlyokat a **9. táblázat** tartalmazza. Látható, hogy az első faktor a legnagyobb mértékben a porozitáskövető szelvényekkel ( $\Phi_N$ ,  $\rho_b$ ) és a víztelítettségre érzékeny fajlagos ellenállással korrelál, míg a második faktor leginkább a csúcscellenállás szelvény hatását tükrözi.

9. táblázat

Faktorsúly	Faktor 1	Faktor 2
$L^{(RCPT)}$	-0.21	0.97
$L^{(GR)}$	-0.11	-0.51
$L^{(\rho_b)}$	0.89	0.17
$L^{(\Phi_N)}$	0.90	-0.04
$L^{(R)}$	-0.87	0.09

Az első faktor és a víztelíttség kapcsolatát az Üveghuta 2. sz. fúrásban a **33a. ábra** mutatja. A Pearson-féle korrelációs együttható értéke  $\rho=-0.99$ , mely a két mennyiség nagyon erős lineáris kapcsolatát igazolja. A regressziós egyenes egyenlete  $S_w=0.18 \cdot F_1+0.62$ . Az inverziós módszerrel ( $S_w^{(INV)}$ ) és a faktoranalízissel becsült víztelíttség ( $S_w^{(FA)}$ ) szelvények megfelelő egyezést mutatnak (**34. ábra**), melyek eltérése négyzetes középértéke  $RMS=3.52\%$ .



34. ábra: A faktoranalízissel és mélységpontenkénti inverzióval becsült víztelíttség-szelvények az Üveghuta 2. sz. sekély mélységű fúrásban

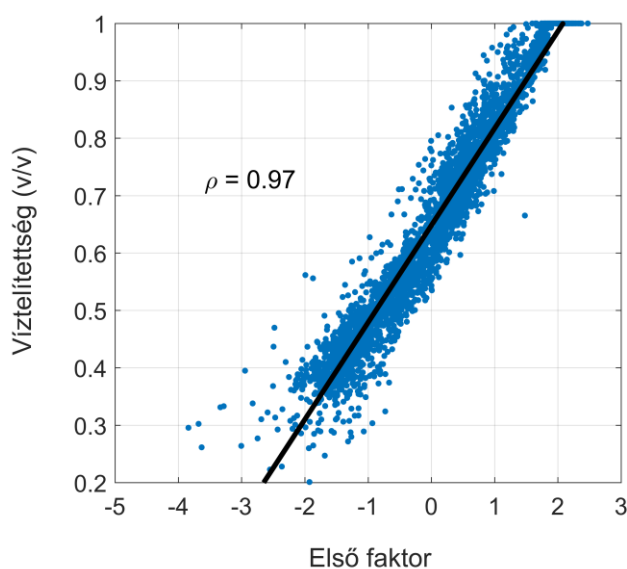


Az 5.3. fejezetben ismertetett kétdimenziós faktoranalízis algoritmusát mérnök-geofizikai szondázási adatok feldolgozására is felhasználhatjuk. Rendezzük az Üveghuta 1–12. sz. fúrások valamennyi adatát a (67) mátrixba. Ennek alapján egy  $N=15500$  adatból álló adatrendszert kapunk, mely a Jöreskog-féle módszerrel gyorsan kiértékelhető. Az elforgatott faktorsúlyok a **10. táblázatban** találhatóak, melyek nagysága és előjele hasonló az Üveghuta 2. sz. fúrásban kapott eredményekkel (**9. táblázat**). Az első faktor ebben az esetben is leginkább a  $\Phi_N$ ,  $\rho_b$ ,  $R$  szelvényekkel korrelál. Különbséggként említhető, hogy a neutronszelvény információját az első és a második faktor nagyobb mértékben osztja meg, valamint a második faktor és a csúcsellenállás szelvény kapcsolata gyengébb. Az 1-D és a 2-D faktoranalízis eredményének (kismértékű) eltérését a különböző bemenő adatrendszerek és az általuk hordozott mérési zaj, valamint a földtani szerkezet inhomogenitása okozza.

10. táblázat

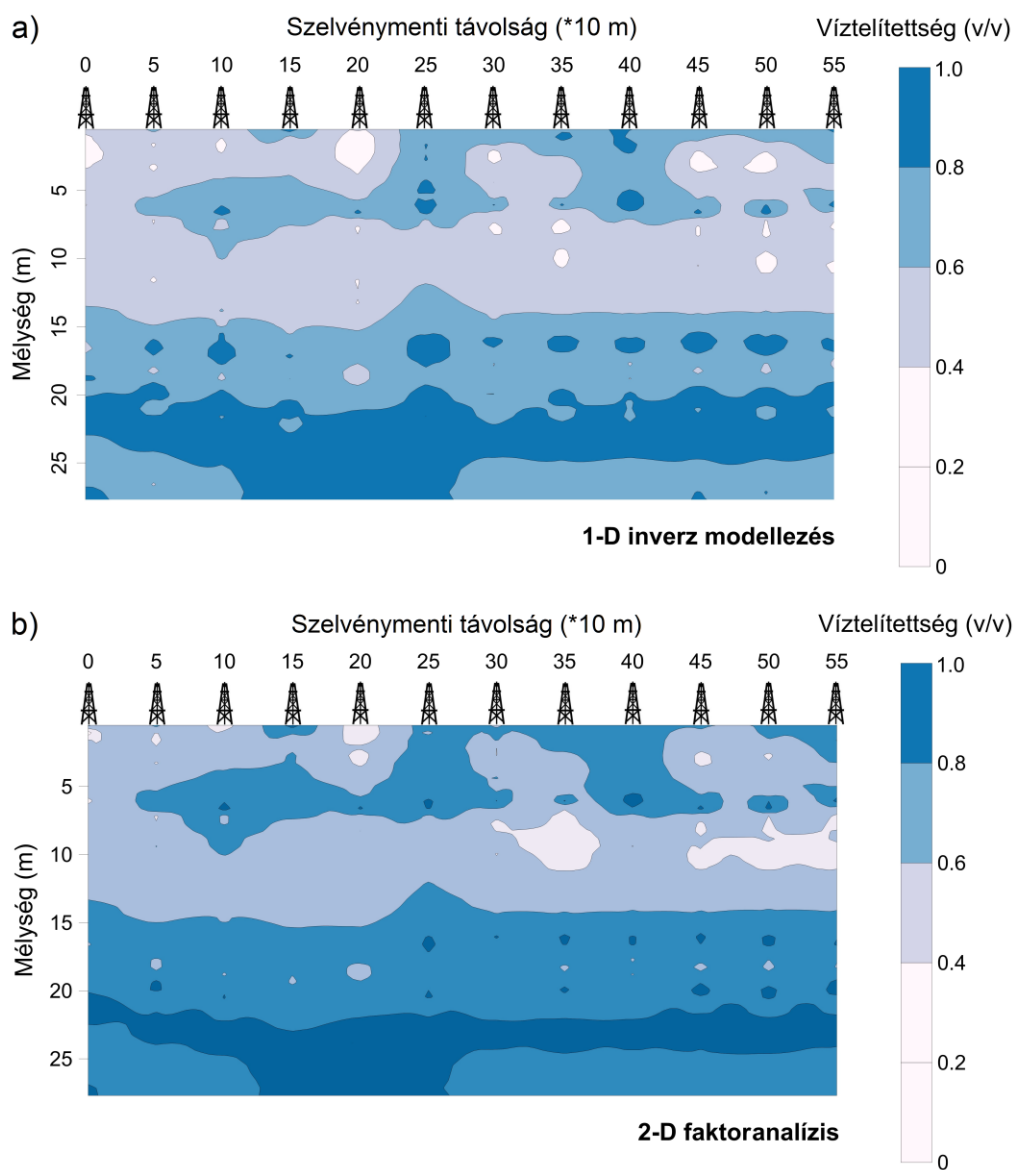
Faktorsúly	Faktor 1	Faktor 2
$L^{(RCPT)}$	-0.07	0.79
$L^{(GR)}$	0.04	-0.40
$L^{(\rho_b)}$	0.88	0.20
$L^{(\Phi_N)}$	0.75	-0.26
$L^{(R)}$	-0.89	0.18

Az első faktor és a víztelítettség regressziós kapcsolatát a **35. ábra** tartalmazza. Az adatok többségére nézve a lineáris közelítés megfelelő, ahol a Pearson-féle korrelációs együttható értéke  $\rho=0.97$ . A regressziós egyenes egyenlete  $S_w=0.17 \cdot F_1+0.65$  (ahol az együtthatók becslési hibája 0.01 nagyságrendű). Az ábrán elsősorban a kis faktorértékek tartományában nemlineáris kapcsolat látszik kirajzolódni. A két változó kapcsolatát Balogh (2018) doktori (PhD) értekezésében exponenciális függvénnyel írja le, és a faktoranalízisen alapuló kiértékelési eljárást ennek alapján továbbfejleszti.



35. ábra: A kétdimenziós faktoranalízissel becsült első faktor és a víztelítettség kapcsolata az Üveghuta 1–12. sz. sekély mélységű fúrásokban

A mélységpontenkénti inverziós eljárások sorozatával (36a. ábra) és a 2-D faktoranalízis alkalmazásával (36b. ábra) eredményül kapott víztelítettség szelvények megfelelő egyezést mutatnak. (Az Üveghuta 2. sz. fúrás az  $x=50$  m horizontális távolságnál helyezkedik el.) Látható, hogy mindkét kiértékelési módszer megfelelően elkülöníti a vízzel (és levegővel) különböző mértékben telített talajrétegeket. A mélységpontenkénti inverziós módszerrel és a faktoranalízissel becsült víztelítettség szelvények eltéréseinek négyzetes középértéke  $RMS=5.6\%$ . A faktoranalízis alkalmazása vonatkozásában előnyös, hogy a szomszédos fúrások adatainak egyesítése révén megnövelt adatszámmal biztosíthatjuk a víztelítettség meghatározásának megbízhatóságát, valamint a közetfizikai paraméterre vonatkozó információt kiterjeszthetjük a fúrások közötti térrészre. A fúrólukszelvények közös eljárásban történő feldolgozása növeli a kiértékelés hatékonyságát és gyorsaságát (a futási idő a 2-D faktoranalízis esetében egy négymagos processzorral felszerelt munkaállomáson  $\sim 20$  másodpercnek adódik).



36. ábra: A mélységpontenkénti inverzióval és kétdimenziós faktoranalízissel becsült víztelítettség szelvények (Üveghuta 1–12. sz. fúrás)

## 7.2. A száraz sűrűség meghatározása

A felszínközeli szerkezetek száraz sűrűségének meghatározása alapvető geotechnikai feladat, mely gyakran nyer alkalmazást pl. a mélyépítéseknel vagy hulladéktárolók vizsgálatánál és védelménél. A talajmechanikai paraméterek segítségével következtetni lehet a talaj/közet típusára és feszültségállapotára. A talajok kompaktciója és nyírószilárdsága nagymértékben függ a száraz sűrűségtől, ami kapcsolatba hozható a mért közetsűrűséggel és a víztartalommal (Scott, 1980). A jelenlegi (hagyományos) laboratóriumi módszerek alkalmazásával a száraz sűrűségre vonatkozó információ csak a mérési terület egy-egy pontjában áll a rendelkezésünkre. Ebben a fejezetben bemutatjuk a száraz sűrűség faktoranalízissel támogatott meghatározását, mely folytonos (sokkal részletesebb), in situ információt szolgáltat a fenti mennyiség területi eloszlásáról. A száraz sűrűség kapcsolatban áll a közetsűrűséggel, porozitással és az agyagtartalommal, melyeket a mérnökgeofizikai szondázási adatokból determinisztikus vagy inverziós módszerrel is meghatározhatunk. A víztelítettség ismerete alapvető a száraz sűrűség számítása szempontjából, melyet a mérnökgeofizikai szondázási adatok faktoranalízisével határozunk meg (Szabó, 2012).

A talajmechanikában definiált víztartalom ( $w$ ) a jelen értekezésben tárgyalt közetfizikai paraméterekkel az alábbi kapcsolatban áll

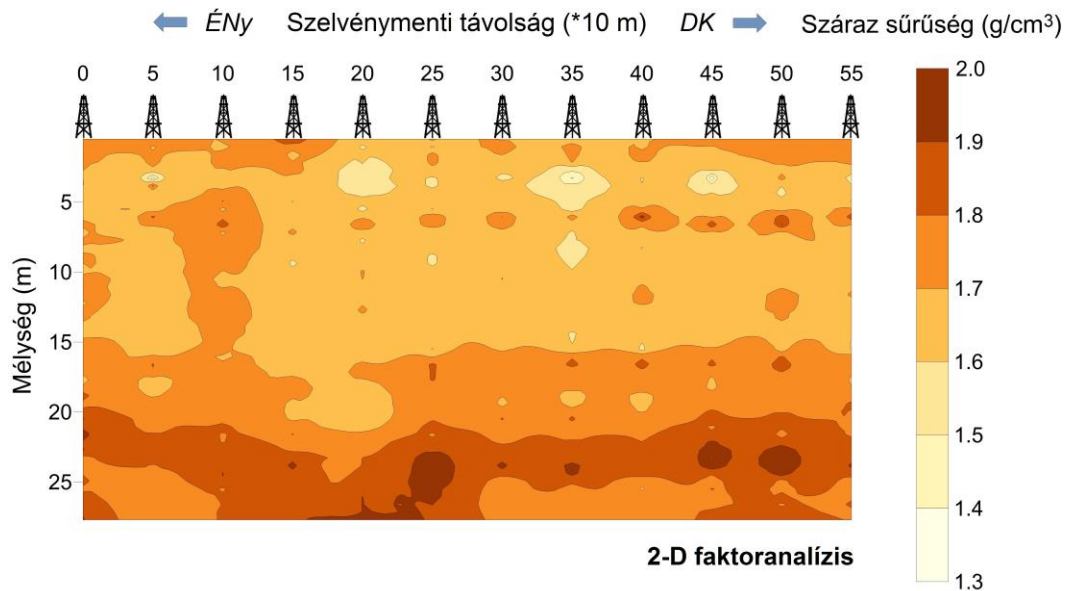
$$w = \frac{\rho_w V_w}{\rho_{ma} V_{ma}} = \frac{S_w \Phi}{\rho_{ma} (1 - \Phi - V_{cl})}, \quad (74)$$

ahol  $\rho_{ma}$  és  $\rho_w$  a talaj szilárd alkotórészei és a pórusteret kitöltő víz sűrűsége ( $\rho_w \cong 1 \text{ g/cm}^3$ ). A (74) egyenletben szereplő porozitás ( $\Phi$ ) a sűrűségsonda (8.2) válaszfüggvényéből kifejezhető (**8. melléklet**). Az agyagtartalom ( $V_{cl}$ ) a Larionov-féle eljárással a (63) egyenlet alapján becsülhető, míg a víztelítettséget ( $S_w$ ) a (73) egyenlet alapján faktoranalízissel állítjuk elő. A sűrűségsonda válaszegyenletében szereplő zónaparaméterek (mátrix és az agyag tömegsűrűsége) az irodalomban publikált értékek alapján vagy a kutatási területről származó előzetes ismeretek alapján megadhatók. A száraz sűrűség ( $\rho_d$ ) kapcsolatba hozható a mért közetsűrűséggel ( $\rho_b$ ) és a (74) egyenletben szereplő víztartalommal

$$\rho_d = \frac{\rho_b}{(1 + w)}, \quad (75)$$

melyben valamennyi fizikai mennyiség a mérnökgeofizikai szondázási adatok kiértékelésével meghatározható. A számításhoz az Üveghuta 1–12. sz. fúrások teljes adatrendszerét felhasználjuk és a 2-D faktoranalízissel előállított víztelítettség értékeket (**36b. ábra**) vesszük alapul. A (75) egyenlet felhasználásával számított száraz sűrűség szelvényt a **37. ábra** mutatja. Megfigyelhető, hogy a száraz sűrűség értéke a talajrétegek kompaktciója miatt a mélységgel növekszik. A növekedési trend megmarad abban az esetben is, amikor a víztelítettség értéke változik az egymást követő alsóbb rétegekben. A legnagyobb száraz sűrűség értékek a legalsó rétegben adódnak, ahol már megjelennek a bontott gránitból származó ásványi szemcsék is az üledékanyagban. A mérnökgeofizikai szondázási pontokat magában foglaló mérési szelvény vonalában a felszín DK-i irány felől az ÉNy-i irány felé haladva enyhén lejt (a topográfia változását a térkép nem tartalmazza). A lejtő mentén lecsúszott löszüledék mozgásának nyoma a felszín alatt is követhető. Az

MGSZ szelvény 200–550 m-es távolságú szakaszán a talajrétegek viszonylag nyugodtan települtek, míg az első 200 m-es szakaszon zavar látható. Megjegyezzük, hogy a száraz sűrűség szelvény alapján lehetőség nyílik a mért közetsűrűség és a száraz sűrűség közötti helyi regressziós összefüggés meghatározására, mellyel a száraz sűrűséget közvetlenül a gamma-gamma mérés eredményéből számíthatjuk (Szabó, 2012).

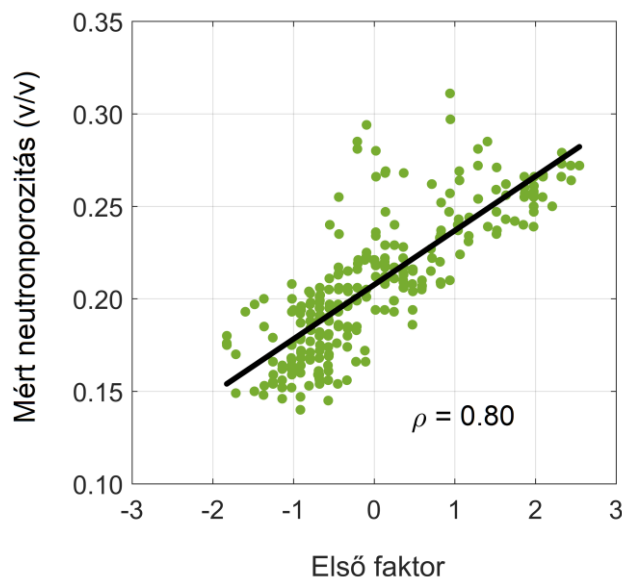


37. ábra: A kétdimenziós faktoranalízissel előállított száraz sűrűség szelvény (Üveghuta 1–12. sz. fúrás)

### 7.3. A szelvénypótlás megvalósítása fúróluk-geofizikai adatok faktoranalízisével

A statisztikai faktorok nemcsak a térfogatjellemező közetfizikai mennyiségekkel, hanem bizonyos fúróluk-geofizikai szelvényekkel is erős korrelációs kapcsolatban állnak. Például a víztartalomra érzékeny neutronporozitás szelvény általában erősen korrelál az első faktorszelvényvel. Terepi vizsgálatokkal kimutatható, hogy ez a szoros összefüggés akkor is fennáll, amikor a neutronszelvény nélkül végezzük el a fennmaradó szelvények faktoranalízisét. Ez az eljárás megteremti annak a lehetőségét, hogy az első faktorszelvényből szintetikus neutronporozitás szelvényt számítsunk, és a „mérést” kiterjesszük olyan szelvényezési szakaszokra (vagy a közeli fúrásokra), ahol nem történt neutronszondázás. A neutronszelvény pótlásának lehetősége mind a mérnökgeofizikai szondázási gyakorlatban, mind pedig az olajipari alkalmazások területén egyaránt megvalósítható (Szabó és szerzőtársai, 2012; Szabó és szerzőtársai, 2013).

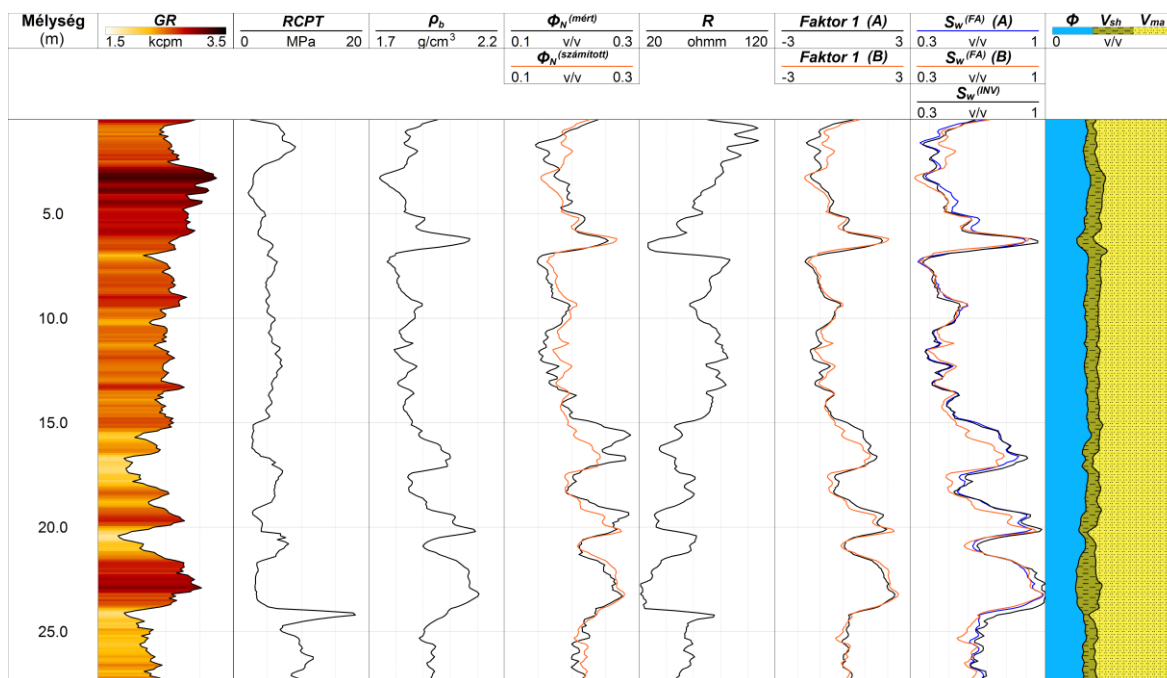
Válasszunk ki a Bábaapáti területen egy olyan fúrást, ahol a teljes szelvényezési szakaszon neutronmérés is történt. Képezzük a faktorokat az Üveghuta 2. sz. fúrásban a neutronszelvény bevonása nélkül. Ekkor a 38. ábrán szereplő lineáris összefüggést kapjuk az első faktor és a mért neutronporozitás értékek között. A helyi regressziós egyenlet:  $\Phi_N = 0.03 * F_1 + 0.21$ , ahol a Pearson-féle korrelációs együttható értéke  $\rho = 0.80$ . (Megjegyezzük, hogy a lineáris kapcsolat miatt a mért és számított neutronporozitás szelvények ugyanilyen mértékben korrelálnak.)



38. ábra: Az első faktor és a mért neutronporozitás kapcsolata az Üveghuta 2. sz. sekély mélységű fúrásban

A Bátaapáti területen érvényes első faktor–neutronporozitás összefüggés alapján a faktorértékek közvetlen felhasználásával előállíthatjuk az elméleti (szintetikus) neutronporozitás szelvényét a kijelölt intervallumon. A gyakorlatban ezt a technikát úgy hasznosíthatjuk, hogy a regressziós kapcsolatot olyan szakaszon vizsgáljuk meg, ahol a mért neutronszelvény rendelkezésre áll. Az Üveghuta 2. sz. fúrásban a mért és a számított neutronporozitás szelvények megfelelően korrelálnak. A víztelítettséget meghatározhatjuk a valódi mérési adatokat (A-típusú) és a kvázi-mért neutrongörbét tartalmazó (B-típusú) faktoranalízis eljárás felhasználásával. A mért ( $\Phi_N^{(mért)}$ ) és számított ( $\Phi_N^{(számított)}$ ) neutronporozitás szelvényét és a faktoranalízis eredményét a **39. ábra** tartalmazza. Megállapítható, hogy az  $S_w^{(FA)}(B)$  görbe megfelelően korrelál mind az A-típusú faktoranalízissel becsült ( $S_w^{(FA)}(A)$ ), mind a mélységpontenkénti inverzióval számított víztelítettség ( $S_w^{(INV)}$ ) szelvényével. A B-típusú eljárással és a pontenkénti inverzióval előállított víztelítettség szelvények eltéréseinek négyzetes középértéke  $RMS=6.74\%$ .

A faktoranalízisen alapuló szelvényinterpolációs eljárással nyert szintetikus neutronporozitás szelvény megfelelően felhasználható a mérnökgeofizikai szondázási adatrendszerek együttes (mennyiségi) kiértékelésben. Az elméleti neutronporozitás adatok felhasználásának gyakorlati jelentősége jelentkezik a hiányzó mérési szakaszokon a víztelítettség meghatározása mellett a porozitás, agyagtartalom és a szivárgási jellemzők számításában, valamint a mérnökgeofizikai szondázási adatok együttes inverziója javításában. A mért és szintetikus neutronszelvények eltérése (adattérbeli távolsága) a faktor- és regresszióelemzés egymást követő alkalmazásával iteratív úton tovább csökkenthető. Kimutatható, hogy az olajiparban alkalmazott mélyfúrású geofizikai szelvények faktoranalízisével becsült első faktor ugyancsak erősen korrelál a neutronporozitással. Ennek alapján a szelvénypótlást a nagyobb mélységtartományban elhelyezkedő szénhidrogén-tároló képződményekben is megvalósíthatjuk (**7. melléklet**). A többdimenziós faktoranalízis algoritmus felhasználásával a fenti módszer alkalmas a neutronporozitás értékek két-, ill. háromdimenziós területi kiterjesztésére.



39. ábra: A neutronszelvény pótlásának hatása a víztelítettség faktoranalízissel való becslésére az Üveghuta 2. sz. sekély mélységű fúrásban

## 8. A zónaparaméterek meghatározása meta-algoritmikus inverziós eljárással

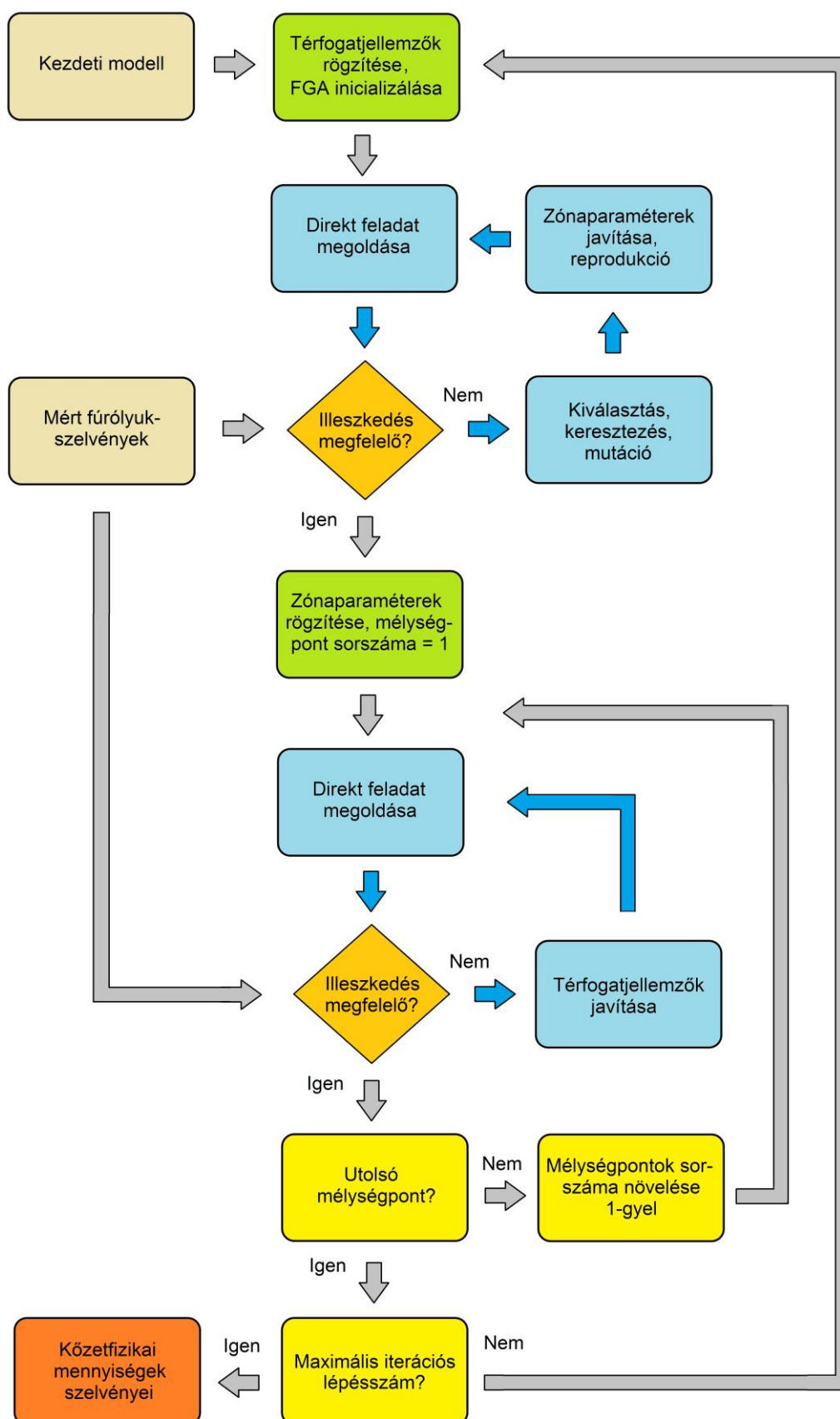
A felszínközeli üledékek víztartalmának, porozitásának, mátrixterfogatanak és agyagtartalmának meghatározására a mérnökgeofizikai szondázási adatok együttes inverziója kínál lehetőséget. *Drahos (2005)* a fenti közetfizikai jellemzők számítására súlyozott legkisebb négyzetek módszerén alapuló mélységpontenkénti inverziós eljárást javasolt. A lokális inverziós megközelítés előnye, hogy a becsült közetfizikai paraméterek pontosságát és megbízhatóságát számszerűen jellemzi, viszont hátrányként említhető az inverz feladat kismértékű túlhatározottsága, mely a zónaparaméterek kényszerű rögzítését vonja maga után. Az *1. fejezetben* bemutatott intervalluminverziós módszerrel e problémák hatékonyan kiküszöbölhetők. Az intervalluminverziós eljárás keretében a becslési pontosság szignifikáns javulása az inverz feladat nagymértékű túlhatározottságának biztosításával érhető el. Abban az esetben, amikor a mérési adatok számához képest sokkal kevesebb sorfejtési együtthatót határozunk meg, akkor az utóbbiak megbízhatósága jelentősen javítható. A becslési pontosság növelése esetén ugyanakkor a közetfizikai mennyiségek függőleges irányú (gyors) változása egyre inkább csak közelítéssel írható le. A közetfizikai modell részletesebb térbeli felbontása az ismeretlenek számának további növelését (a túlhatározottság csökkenését) vonja maga után, mely jelentősen korlátozza az intervalluminverziós módszer hatékonyságát.

A zónaparaméterek inverziós eljárásban történő (automatikus) meghatározására eddig kevesen tettek kísérletet. *Narayan és Yadav (2006)* egy új, korlátozott számú zónaparaméter becslésére alkalmas (a legkisebb négyzetek elvén alapuló) linearizált inverziós módszert közölt, melynek keretében a mért és a számított adatok hosszabb víztároló szakaszra vonatkozó átlagértékeit (nem az egyedi adatokat) hasonlították össze. A kvarcmátrix és a rétegvíz fizikai (zonális) jellemzőit az optimalizációs eljárás alatt állandónak tekintik, miközben a többi mátrixjellemzőt (ha több ásványtípusból épül fel a

kőzet) az eredeti érték maximum  $\pm 20$  %-ával engedik megváltoztatni. (A kezdeti zónaparaméter értékek megállapítását hagyományos keresztmetszeti technikákra alapozzák.) A zónaparaméterek inverziós meghatározását ugyancsak nehezíti, hogy a kérdéses mennyiségek sok esetben erősen korrelálnak egymással és a térfogatjellemző közetfizikai mennyiségekkel. Balázs (2015) elméleti úton kimutatta, hogy linearizált inverziós eljárás alkalmazása esetén a fenti mennyiségek közötti korreláció mértéke az ismeretlenek számával növekszik. Másrészt a paraméterérzékenységi vizsgálatok azt mutatják, hogy némelyik zónaparaméter csak alig vagy egyáltalán nem befolyásolja a mérési változókat. Például víztároló kőzetekben a telítettségére vonatkozó kis érzékenység a linearizált inverziós eljárás stabilitását erősen veszélyezteti (Dobróka és Szabó, 2011). Mivel az inverz feladat (zónaparaméterek által befolyásolt) célfüggvénye számos helyi minimummal rendelkezik, ezért a linearizált szélsőértékkeresés helyett globális optimalizációs eljárás használata indokolt.

A mérnökgeofizikai szondaválaszfüggvényekben szereplő térfogatjellemző közetfizikai mennyiségek és a zónaparaméterek egyidejű meghatározására új, meta-algoritmusalapú inverziós eljárást javasolunk. Az inverziós eljárás első lépésében kezdeti modellt veszünk fel, majd a külső ciklusban valós kódolású genetikus algoritmuson (FGA) alapuló véletlenkereséssel határozzuk meg a zónaparaméterek tetszőleges intervallumra vonatkozó állandó értékét. Ezt követően a belső ciklusban, az újonnan kapott zónaparaméterek rögzített értékeivel mélységpontonkénti inverziós eljárások sorozatát hajtjuk végre a térfogatjellemző mennyiségek számítása céljából. Az iteratív eljárás keretében a becsült térfogatjellemzők állandó értéke mellett globális optimalizációval újra kiszámítjuk a zónaparamétereket (külső ciklus), mellyel a belső ciklusban tovább finomítjuk a térfogatjellemző modellparamétereket (**40. ábra**). A fenti inverziós stratégián alapuló keresést megállási kritérium teljesüléséig folytatjuk. Az inverziós meta-algoritmus felhasználásával, a korábban önkényesen vagy tapasztalati úton választott állandók alkalmazása helyett a zónaparaméterek automatikusan meghatározhatók és egyben a direkt feladat megoldása is javítható. Az előremodellezés ily módon történő optimalizálása kedvező hatással van az inverz feladat megoldására. A gépi tanulás és intelligens optimalizáció területén hasonló műszaki feladatok megoldására alkalmazott meta-algoritmikus eljárások alapján (Nell és szerzőtársai, 2011), a fenti inverziós módszert valós kódolású genetikus meta-algoritmus alapú inverziós eljárásnak, röviden genetikus meta-algoritmikus inverzióknak (GMI) nevezzük.

A GMI eljárás hatékonyan alkalmazható a felszínközeli laza üledékek közetfizikai tulajdonságainak meghatározására (Szabó, 2018). Az inverziós eljárás belső ciklusában a víz, a levegő, a közetmátrix és az agyag térfogatát mélységről-mélységre (gyors és megfelelő térbeli felbontást biztosító) pontonkénti linearizált inverzióval becsüljük, míg az ismeretlenek választott zónaparamétereket evolúciós számítással (külső ciklus) optimalizáljuk. (A mélységpontonkénti inverziós módszerrel becsült térfogatjellemző mennyiségek még pontosabb és megbízhatóbb becslésére használhatjuk az intervallum-inverziós módszert, azonban ez az inverziós eljárás várhatóan több számítási időt vesz igénybe.) Az FGA alkalmazása a mért és a számított szelvényadatok legmegfelelőbb illeszkedését biztosítja, továbbá startmodellfüggetlen megoldást szolgáltat. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a mérési adatok kiértékelésének inverziós folyamata során nem szükséges az előzetes (magvizsgálati vagy egyéb laboratóriumi) információk ismerete. A GMI eljárást egyetlen vagy akár több szomszédos fúrás adatrendszerének egyidejű feldolgozására is felhasználhatjuk. Az előzőt egydimenziós, az utóbbit két- (vagy három) dimenziós GMI eljárásnak nevezzük.



40. ábra: A genetikus meta-algoritmikus inverziós eljárás folyamatábrája



### 8.1. Mérnökgeofizikai szondázási adatok egydimenziós genetikus meta-algoritmikus inverziója

A GMI eljárás (belső ciklusa) keretében a felszínközeli telítetlen üledékek térfogatjellemzőit pontonkénti linearizált inverzióval határozzuk meg. A jelenleg rendelkezésre álló mérnökgeofizikai szondaválaszték mellett az inverziós feldolgozásba bevonható adatok vektora az adott mélységben a következő

$$\vec{d}^{(m)} = [GR^{(m)}, \rho_b^{(m)}, \Phi_N^{(m)}, R^{(m)}]^T, \quad (76)$$

ahol  $GR^{(m)}$  a természetes-gamma intenzitás,  $\rho_b^{(m)}$  a közetsűrűség,  $\Phi_N^{(m)}$  a neutronporozitás és  $R^{(m)}$  a fajlagos ellenállás mért értéke (T a transzponált jelölése). A mért adatvektor elemeiből kismértékben túlhatározott inverz feladat keretében három ismeretlent határozunk meg, melyek modellvektora ugyanabban a mélységben

$$\vec{m} = [V_w, V_{cl}, V_{ma}]^T, \quad (77)$$

ahol  $V_w$  jelöli a víztartalmat,  $V_{cl}$  az agyagtartalmat és  $V_{ma}$  a mátrixtérfogatot. A gáz (levegő) térfogata a  $V_l = 1 - V_w - V_{cl} - V_{ma}$  anyagmérleg egyenlet alapján számítható. Az  $s$ -edik elméleti szondaadat az ismeretlenekkel a következőképpen fejezhető ki

$$d_s^{(sz)} = g_s(V_w, V_{cl}, V_{ma}, c_1, \dots, c_r, \dots, c_R), \quad (78)$$

ahol  $g_s$  az  $s$ -edik (pontbeli) válaszfüggvény ( $s=1,2,\dots,S$ , ahol  $S$  az alkalmazott szondák száma),  $c_r$  az  $r$ -edik zónaparaméter ( $R$  az inverzióval becsült zónaparaméterek száma). A térfogatjellemző mennyiségek linearizált inverzióval való meghatározását a zónaparaméterek rögzített értékei mellett hajtjuk végre. A mérnökgeofizikai szondázás direkt feladatának megoldására a *Drahos (2005)* által javasolt válaszegyenleteket (8. melléklet) használjuk fel. Az inverz feladatot a (3) célfüggvény szélsőértékének megkeresésével oldjuk meg (*Marquardt, 1959*), valamint a becsült paraméterek pontosságát a (16) kovarianciamátrix elemei ismertében jellemezzük.

A GMI módszer globális optimalizációs (evolúciós) fázisában a zónaparaméterek becsülésére heurisztikus keresést alkalmazunk (külső ciklus). Az FGA eljárással csak a zónaparaméterek értékét javítjuk, miközben a térfogatjellemzők aktuális értékét állandónak rögzítjük. Az előzetes inverziós kísérletek és korrelációszámítás alapján a zónaparaméterek közül a mátrix- és agyagjellemző fizikai mennyiségeket választjuk ismeretlennek, melyek értékét a mérnökgeofizikai szondázás teljes szakaszán állandónak tekintjük. Ennek alapján az FGA eljárás modellvektora

$$\vec{c} = [GR_{cl}, GR_{ma}, R_{cl}, \rho_{cl}, \rho_{ma}, \Phi_{N,cl}]^T, \quad (79)$$

ahol a „cl” és „ma” indexek az agyagra és a kőzetmátrixra vonatkozó zónaparamétereket azonosítják. A (79) oszlopvektorban szereplő konstans értékű zónaparaméterek meghatározása érdekében a fűrésben mért összes adatot a (40) egyenletnek megfelelő alakú

$\underline{D}^{(m)}$  adatmátrixba gyűjtjük. Az inverziós eljárás nem engedi meg a pontbeli adathiányt, így az invertált adatok teljes száma a vizsgált mélységtartományban  $N'=N*S$  (ahol  $N$  a fúrásban megfigyelt összes mélységpont száma).

Az FGA eljárást korábban az 1.1.2. fejezetben részletesen ismertettük, melyet a sorfejtési együtthatók meghatározása helyett ezúttal a zónaparaméterek becslésére alkalmazunk. A kezdeti populáció egyedeit a (79) véletlen modellvektorokkal képezzük. Jelöljük a modellpopuláció  $j$ -edik egyedét  $\vec{c}_j$  vektorral ( $j=1,2,\dots,J$ , ahol  $J$  a populáció mérete), melynek alkalmassága az alábbi (fitness) függvénnyel adható meg

$$F(\vec{c}_j) = - \left[ (NS)^{-1} \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \left( \frac{D_{ns}^{(m)} - g_s(\vec{m}_n, \vec{c}_j)}{D_{ns}^{(m)}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (80)$$

ahol  $D_{ns}^{(m)}$  az  $n$ -edik mélységben az  $s$ -edik szelvényezési eszközzel mért adatot jelöli, míg  $\vec{m}_n$  vektor ugyanabban a mélységben (a belső ciklusban) becsült és állandónak rögzített térfogatjellemző mennyiségeket tartalmazza. Az  $F(\vec{c}) = \max$  optimalizációs feladat megoldása érdekében valós genetikus műveleteket alkalmazunk (Houck és szerzőtársai, 1995). Az egyedek párosítását ezúttal versenyszelekcióval végezzük, melynek keretében bizonyos számú véletlenszerűen kiválasztott egyed közül a legalkalmasabbakat az átmeneti populációba soroljuk. Ezt az eljárást (ugyanazon kiinduló egyedek ismételt kiválasztásának lehetősége mellett) addig folytatjuk, míg  $J$  számú egyed kiválasztása megtörténik. A versenyek számát, mint folyamatjellemző paramétert előzetesen adjuk meg, mely nagymértékben befolyásolja az FGA eljárás konvergenciáját. Abban az esetben, amikor a versenyek számát viszonylag nagy értékre állítjuk, akkor a kisebb alkalmasságú egyedeknek kevesebb esélyük van a túlélésre. A következő lépésben az átmeneti populáció egyedeit keresztezzük. A heurisztikus keresztezés művelete a kiinduló  $\vec{c}_1$  és  $\vec{c}_2$  zónaparamétervektorokat a következőképpen módosítja

$$\left. \begin{aligned} \vec{c}_1^* &= \vec{c}_1 + \gamma(\vec{c}_1 - \vec{c}_2) \\ \vec{c}_2^* &= \vec{c}_1 \end{aligned} \right\}, \quad (81)$$

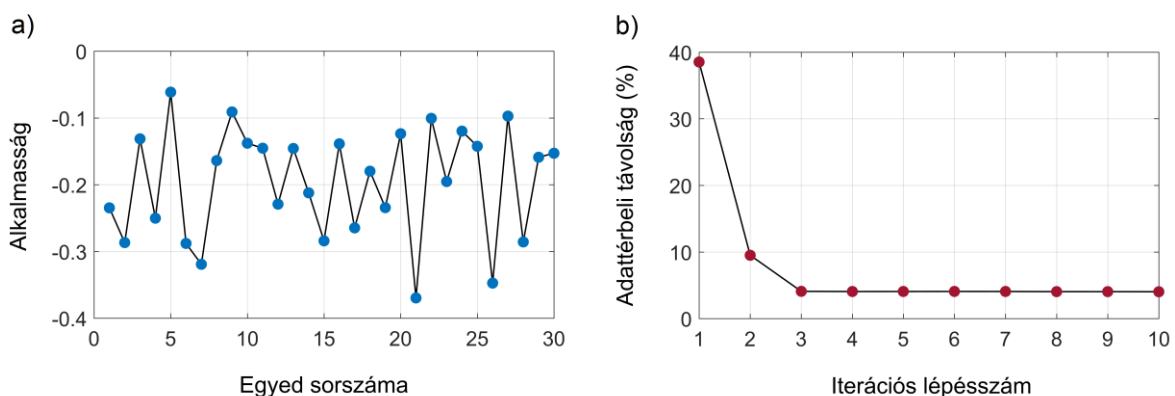
ahol  $\vec{c}_1^*$  és  $\vec{c}_2^*$  a keresztezésen átesett (új) egyedeket, míg  $\gamma$  a  $[0,1]$  tartományból egyenletes valószínűséggel generált számot jelöli. A (81) egyenletrendszer alkalmazása sikeres, hogy ha a keresztezés előtt fennáll az  $F(\vec{c}_2) < F(\vec{c}_1)$  egyenlőtlenség. Ha a  $\vec{c}_1^*$  zónaparamétervektor valamely eleme az előírt értéktartományon kívül esik, akkor a heurisztikus keresztezést megismételjük. A harmadik genetikus operátorral, az egyenletes mutációval a zónaparamétervektor  $v$ -edik elemét egy valós véletlen számra ( $\eta$ ) cseréljük

$$c_{1,r}^{**} = \begin{cases} \eta, & \text{ha } r = v \\ c_{1,r}^*, & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (82)$$

ahol  $c_{1,r}^{**}$  a mutált egyed  $r$ -edik zónaparamétere ( $r=1,2,\dots,R$ ). A fenti három genetikus alpművelet ismételt alkalmazásával a modellpopuláció összetételét folyamatosan

változtatjuk és az egymást követő generációk átlagos alkalmasságát iteratív úton javítjuk. A fenti lépéseket, valamint a sokszorosítás (reprodukción) műveletét egy meghatározott megállási kritérium teljesüléséig folytatjuk. A zónaparaméterek becslési hibáját az utolsó generációban előállított egyedek aktuális zónaparaméter-értékeinek szórásával adjuk meg.

Az egydimenziós GMI eljárást a Bátaapáti kutatási területen mért mérnökgeofizikai szondázási adatokon vizsgáljuk (7. fejezet). Az Üveghuta 4. sz. (37. ábrán  $x=150$  m szelvény menti távolságnál található) fúrásban adottak a (76) vektorban szereplő szelvényadatok, míg a (77) modellvektor és a (79) zónaparaméter-vektor elemeit tekintjük ismeretlennek. A szondaválaszfüggvényekben ismert állandónak tekintett zóna-paramétereket a 8. melléklet tartalmazza. A térfogatjellemzők becslési hibájának számítására a mért változók varianciáját az alábbiak választottuk:  $\sigma_{GR}^2 = 0.05$  kcpm<sup>2</sup>,  $\sigma_{\rho_b}^2 = 0.01$  g<sup>2</sup>/cm<sup>6</sup>,  $\sigma_{\Phi_N}^2 = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma_R^2 = 0.05$  ohm<sup>2</sup>m<sup>2</sup> (Drahos, 2005). A mért szelvények átlagos korrelációja a (20) formula alapján  $\rho=0.55$ . Az egydimenziós GMI eljárás linerizált inverziós fázisában (belső ciklus) a (77) vektorban szereplő térfogatjellemző paramétereket javítjuk, melyek kiindulási értéke minden mélységpontban:  $V_{w,0}=0.30$  v/v,  $V_{ma,0}=0.40$  v/v,  $V_{cl,0}=0.15$  v/v. A linearizált optimumkeresés 10 iterációs lépést vesz igénybe. A (3) célfüggvényben szereplő csillapítási tényező értékét  $\varepsilon^2=0$ -nak véve is stabil inverziós eljárást kapunk. A linearizált inverziós fázis befejezése után a (79) vektorban megadott zónaparamétereket az FGA eljárással határozzuk meg (külső ciklus). A kezdeti populáció 30 egyedének alkalmassági értékét a 41a. ábra mutatja, ahol a (80) formula alapján számított  $F$  értékét  $-100$ -zal szorozva a mért és a számított mérnökgeofizikai szondázási szelvények relatív adattávolságát kapjuk. A zónaparaméterek keresési tartományát a 11. táblázat tartalmazza. Az evolúciós számítás vezérlőparaméterei: versenyszelekciós kísérletek száma (200), keresztezési kísérletek száma (100) és a mutáció valószínűsége (0.05). A reprodukció során a legjobb egyedek megtartása érdekében az elitizmus szabályát alkalmazzuk. Az 1-D GMI eljárás külső ciklusában 1000 generációt tökéletesítünk, míg a teljes meta-algoritmikus inverziós folyamatot (a külső és belső ciklusban szereplő utasítások egymást követő ismételt alkalmazását) 10 iterációs lépésben folytatjuk. A linearizált és globális optimalizációs módszerek kombinálásával a mért és a számított szelvényadatok egyezése stabil inverziós eljárásban javítható. A (15) formula alapján számított relatív adattávolság az inverziós eljárás elején  $D_d=39$  %, mely a végén  $D_d=4$  %-ra csökken (41b. ábra).

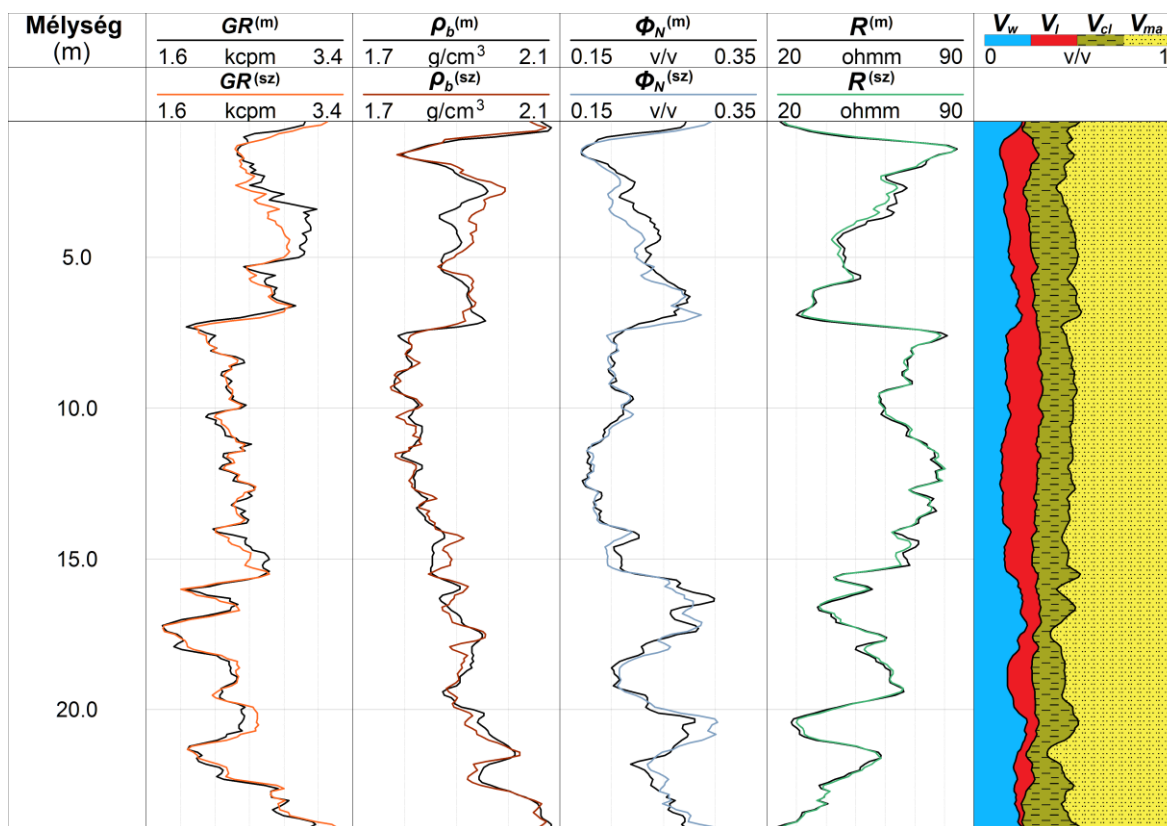


41. ábra: A genetikus meta-algoritmikus inverziós eljárás kezdetén választott populáció egyedei fitnessértékei (a), és az 1-D GMI eljárás konvergenciája (b)

Az 1-D GMI eljárással becsült zónaparamétereket és megbízhatósági tartományait a **11. táblázat** tartalmazza, míg a térfogatjellemző mennyiségek szelvényei a **42. ábra** utolsó oszlopban láthatók. A mért és a számított mérnökgeofizikai szondázási görbék megfelelő illeszkedést mutatnak (az előbbit „m”, az utóbbit „sz” felsőindex jelöli). A térfogatjellemző mennyiségek átlagos becslési hibája:  $\sigma_{V_w} = 0.01$  v/v,  $\sigma_{V_{ma}} = 0.05$  v/v,  $\sigma_{V_{cl}} = 0.01$  v/v. A három térfogatjellemző mennyiség között közepes korreláció mérhető ( $\rho=0.51$ ). A numerikus eredmények megerősítik az 1-D GMI eljárás stabilitását és terepi adatokon való alkalmazhatóságát. Kimutatható, hogy az 1-D GMI módszerrel szolgáltatott eredmények pontosak és megbízhatók. Az egydimenziós inverz feladat megoldása egy négymagos processzorral felszerelt munkaállomás használatával ~4 perc CPU-időt igényel.

11. táblázat

Zóna-paraméter	Keresési tartomány	Inverzióval becsült érték	Paraméter-becslés hibája	Mértékegység
$GR_{cl}$	8.0–12.0	8.86	0.01	kcpm
$GR_{ma}$	0–2.0	1.83	0.01	
$\rho_{cl}$	1.9–2.3	2.07	0.02	$g/cm^3$
$\rho_{ma}$	2.3–2.7	2.41	0.01	
$\Phi_{N,cl}$	0.2–0.5	0.43	0.05	v/v
$R_{cl}$	1.0–6.0	4.56	0.61	ohmm



42. ábra: Az egydimenziós genetikus meta-algoritmikus inverziós eljárás eredménye az Üveghuta 4. sz. sekély mélységű fúrásban

## 8.2. Mérnökgeofizikai szondázási adatok kétdimenziós genetikus meta-algoritmikus inverziója

A többdimenziós genetikus meta-algoritmikus inverziós módszerrel a szomszédos fúrások szelvényadatait közös inverziós eljárásban dolgozzuk fel a térfogatjellemző mennyiségek horizontális és vertikális irányú változásának meghatározása céljából. Az inverziós módszer mérnökgeofizikai szondázási adatokon történő alkalmazása során azt feltételezzük, hogy a zónaparaméterek nem változnak számottevően (laterálisan sem) a felszínközeli telítetlen közegben. A kétdimenziós GMI módszer felhasználásával a térfogatjellemző mennyiségeket linearizált pontonkénti inverzióval fúrásról-fúrásra becsüljük, míg a zónaparamétereknek a szondázás teljes tartományára vonatkozó állandó értékét az FGA módszerrel határozzuk meg. A  $j$ -edik zónaparaméter-vektor alkalmasságát valamennyi fúrásban mért és számított adat eltérése ismeretében adjuk meg

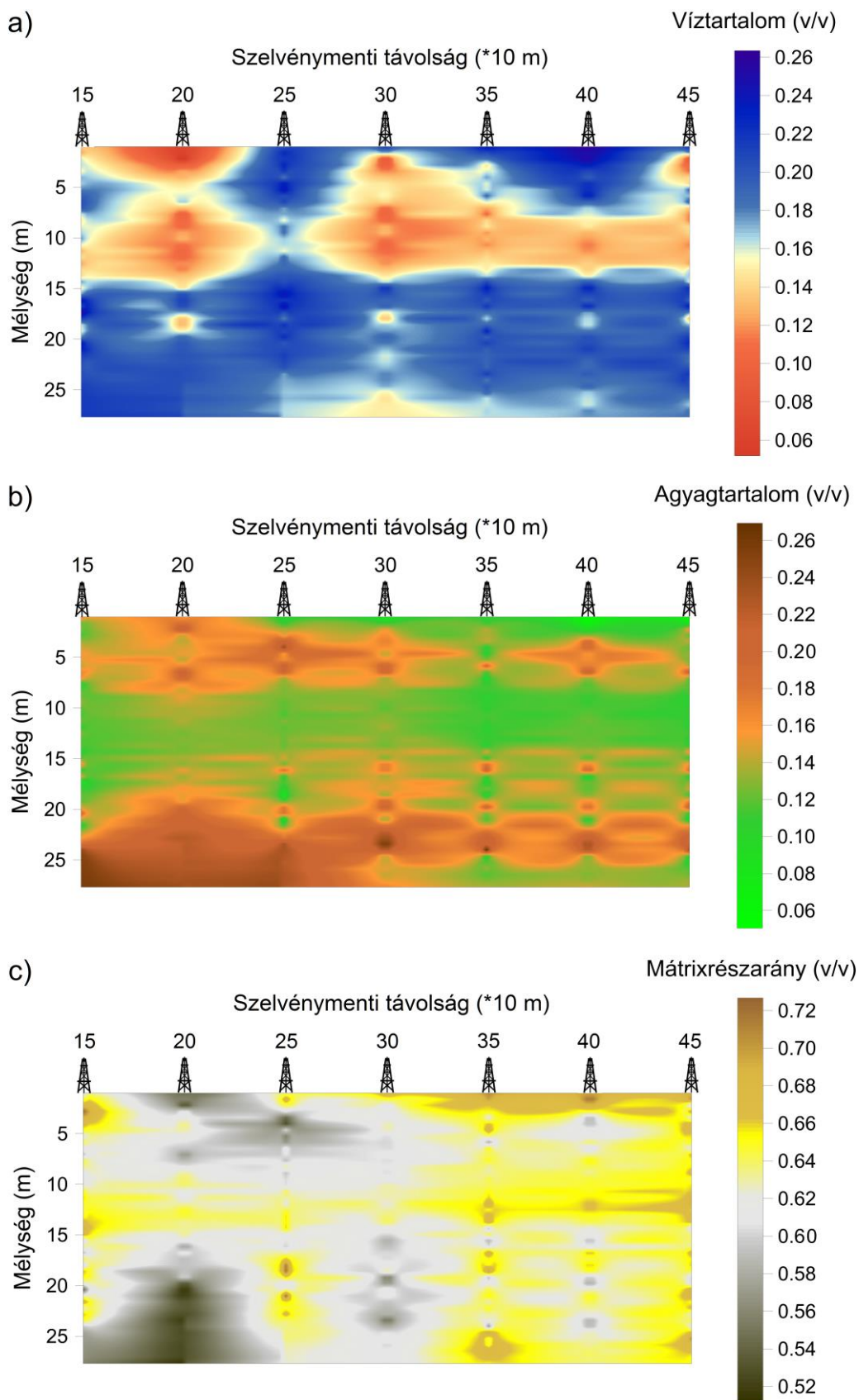
$$F^*(\vec{c}_j) = - \left[ (N^* S)^{-1} \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^{N_h} \sum_{s=1}^S \left( \frac{D_{hns}^{(m)} - g_s(\vec{m}_{hn}, \vec{c}_j)}{D_{hns}^{(m)}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (83)$$

ahol  $\vec{m}_{hn}$  jelöli a  $h$ -adik fúrás  $n$ -edik mélységpontjában becsült térfogatjellemző paraméterek vektorát, míg  $D_{hns}^{(m)}$  képviseli a  $h$ -adik fúrás  $n$ -edik pontjában az  $s$ -edik szelvényezési eszközzel mért adatot ( $H$  a vizsgált fúrások száma,  $N_h$  a  $h$ -adik fúrásban feldolgozott mélységpontok száma,  $N^* = N_1 + N_2 + \dots + N_H$  valamennyi fúrás összes mélységpontjának száma,  $S$  az alkalmazott szondák száma). Az  $F^*(\vec{c}) = \max$  optimalizációs feladatot a (81)–(82) műveletek ismételt alkalmazásával oldjuk meg (Szabó, 2018).

A 2-D GMI eljárást az Üveghuta 4–10. sz. (37. ábrán  $x=150$  m és  $x=450$  m horizontális távolságok között 50 m-enként elhelyezkedő) fúrásokban teszteljük. A fúrások talpmélysége eltérő (19.9–27.7 m), a szelvényadatokat 0.1 m távolsággal gyűjtötték. Ennek alapján a feldolgozható adatok száma 6972. A mérési változók átlagos korrelációja  $\rho=0.27$ , mely az Üveghuta 4. sz. fúráshoz képest a szelvények kevésbé szoros kapcsolatát mutatja. Ezt a közetösszetétel vízszintes irányú változása és a mérési szelvényeket terhelő eltérő mértékű zaj okozhatja. Az elméleti adatokat a 8. melléklet válaszegyenletei alapján számítjuk (Drahos, 2005). Az FGA eljárás vezérlő paraméterei megegyeznek az 1-D GMI eljárásban alkalmazottakkal, azzal a különbséggel, hogy a maximális generációk számát 250-nek írjuk elő. A 2-D GMI eljárás stabil és megbízható megoldást szolgáltat. A (15) relatív adattávolság  $D_d=42.2$  %-ról az inverziós eljárás végére 4.9 %-ra csökken. A zónaparaméterek és becslési hibájuk hasonlók az 1-D GMI eljárás eredményével (12. táblázat); a térfogatjellemzők krigeléssel előállított szelvényei a 43a-c. ábrán láthatók.

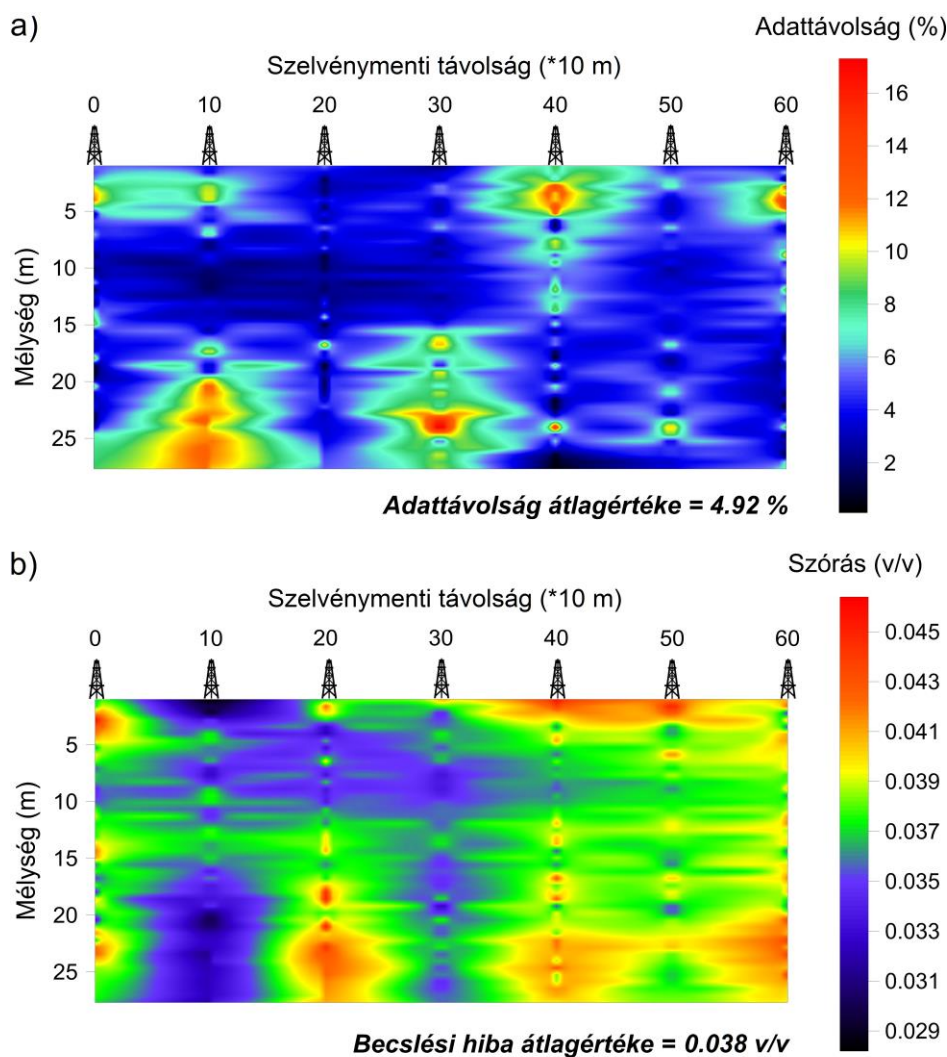
12. táblázat

Zóna-paraméter	Keresési tartomány	Inverzióval becsült érték	Paraméter-becslés hibája	Mértékegység
$GR_{cl}$	8.0–12.0	8.02	0.17	kcpm
$GR_{ma}$	0–2.0	1.98	0.01	
$\rho_{cl}$	1.9–2.3	1.97	0.03	$g/cm^3$
$\rho_{ma}$	2.3–2.7	2.31	0.01	
$\Phi_{N,cl}$	0.2–0.5	0.33	0.01	v/v
$R_{cl}$	1.0–6.0	4.19	0.49	ohmm



43. ábra: A kétdimenziós genetik meta-algoritmikus inverziós eljárás eredménye az Üvegkuta 4–10. sz. sekély mélységű fúrásokban

A GMI módszer lehetőséget teremt a becsült térfogatjellemző mennyiségek és a zónaparaméterek megbízhatóságának meghatározására, valamint az inverziós eredmény alapján számított és mért adatok illeszkedésének jellemzésére. A (15) egyenlet alapján számított relatív adattérbeli-távolság szelvény a **44a. ábrán** látható. Ennek átlagértéke  $D_d=4.9\%$ , mely a mért adatokat terhelő zaj mértékével arányos eredményt mutat. A nagy adattávolság értékek a mérési adatok zajosabb régióinál jelentkeznek, valamint a fúrások eltérő talpmélységéből adódó interpolációs hibáknak köszönhetőek. A térfogatjellemzők becslési hibáját a (16) egyenlet felhasználásával adjuk meg, míg a zónaparaméterek megbízhatóságát az FGA eljárás által becsült 30 modell aktuális paramétereinek szórásával jellemezzük (**12. táblázat**). Az előbbi meghatározásához a mért adatok variációját *Drahos* (2005) alapján adjuk meg. A térfogatjellemző mennyiségek átlagos becslési hibájának szelvénye a **44b. ábrán** látható, mely a mért adatok bizonytalanságával áll arányban. A legnagyobb pontossággal a víztelítettség és az agyagtartalom állítható elő ( $\sim 0.01$  v/v). A térfogatjellemzők szórásának négyzetes átlaga  $0.038$  v/v, ill. azok átlagos korrelációja  $\rho=0.48$ . A 2-D GMI eljárás végrehajtása  $\sim 8$  percet igényel egy négymagos processzorral rendelkező munkaállomáson.



44. ábra: A kétdimenziós GMI eljárás eredménye minőségi paramétereinek szelvényei az Üveghuta 4–10. sz. sekély mélységű fúrásokban

## 9. Az eredmények összefoglalása

A tudományos (PhD) fokozatom megszerzése (2005) óta kutatásaim fő irányát a fúróllyuk-geofizikai adatok kiértékelési hatékonyságának növelésére alkalmas újszerű inverziós és többváltozós (feltáró) statisztikai módszerek fejlesztése határozta meg. A kutatómunkámat a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén végeztem, ahol kollégáim több évtizede eredményesen és nemzetközileg elismert módon foglalkoznak a földtani szerkezetek kőzetfizikai és geometriai jellemzőinek (minősített) együttes és sorfejtéses inverziós módszerekkel történő meghatározásával, valamint geostatistikai módszerfejlesztésekkel. E kutatási irányvonalhoz csatlakozva különféle fúróllyuk-geofizikai módszerfejlesztéseket végeztem, melynek legfontosabb eredményeit jelen értekezésben foglaltam össze.

A kutatómunkám célja olyan fúróllyuk-geofizikai kiértékelési eljárások fejlesztése, mellyel a kőzetfizikai, vízföldtani (szivárgási) és geotechnikai paramétereinek pontosabb és megbízhatóbb, valamint folytonos meghatározása valósítható meg egy adott fúrásban vagy egyszerre több fúrásban. Elsőként a PhD értekezésemben tárgyalt intervalluminverziós módszert fejlesztettem tovább mélyfúrású geofizikai adatok eredményesebb kiértékelése céljából, melynek gyakorlati jelentősége a hatékony szénhidrogén készletbecslésben rejlik. Tudományos célkitűzésem lényeges része, hogy a kifejlesztett módszerek korszerűek legyenek, és a gyakorlat által támasztott igényeket megfelelően kielégítsék. A kifejlesztett kiértékelési eljárások és azok szoftveres implementációja jelentős szakmai részét képezték a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszéke és a MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt. szolnoki Petrofizika részlege közötti hosszú távú (2003–2016) kutatás-fejlesztési együttműködésnek. Ezen együttműködés keretében kifejlesztett intervalluminverziós eljárás és a faktoranalízis hazai olajipari bevezetésében aktívan részt vállaltam. A faktoranalízis és a mélyfúrású geofizikai inverziós módszerek nem-konvencionális szénhidrogén-tárolókban történő kipróbálása jelenleg a Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézete által vezetett PULSE elnevezésű, GINOP-2.3.2-15-2016-00010 sz. projekt keretében történik.

Az olajipari kutatások mellett az utóbbi években figyelmem a felszínközeli szerkezetek fúrásos kutatása felé is kiterjedt. A korábban szénhidrogén-tárolók litológiai jellemzésére kifejlesztett faktoranalízist hazai víztároló képződmények esetére is eredményesen felhasználtam. A mérnöki és környezetvédelmi feladatokban alkalmazott mérnökgeofizikai szondázási adatok feldolgozására faktoranalízisen alapuló kiértékelési eljárásokat fejlesztettem, melyekkel a felszínközeli (telítetlen) üledékek kulcsfontosságú kőzetfizikai és geotechnikai paramétereit térbeli eloszlásáról nyerhetünk megbízható információt. A kifejlesztett feltáró statisztikai módszerek jól hasznosíthatók a hidrogeofizikai kutatások során, melyek fő feladata a hidrogeológiai (kütteszt és laboratóriumi) információk kiterjesztése a fúrás teljes hosszára, valamint a fúrások közötti tartományra. A legújabb fejlesztéseim eredménye a genetikusan meta-algoritmikus inverziós módszer, mellyel a térfogatjellemező kőzetfizikai paraméterek és a szelvényértelmezés számára lényeges zónaparaméterek közös inverziós eljárásban (automatikusan) meghatározhatók. A hidrogeofizikai modellfejlesztési kutatásokat a Miskolci Egyetemen működő MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport keretein belül végeztem és jelenleg is végzem. Az értekezésben bemutatott valamennyi módszerfejlesztéshez, ill. a szintetikus és terepi adatokon történő teszteléshez számítógépi algoritmust és Mathworks Matlab fejlesztői környezetben programot fejlesztettem.



Az értekezés keretében elvégzett elméleti és gyakorlati vizsgálatok alapján a következő megállapítások tehetők az általam végzett inverziós és statisztikai módszerfejlesztési eredményeimmel kapcsolatban:

1. Új intervallum inverziós eljárást dolgoztam ki szénhidrogén-tároló képződmények kőzetfizikai paramétereinek mélységfüggésének meghatározására. A sorfejtés során Legendre-polinomokat alkalmaztam a modellparaméterek diszkretizálása céljából, mellyel nagymértékben növeltem az inverz feladat túlhatározottságát a hagyományos mélységpontonkénti inverziós eljáráshoz képest, valamint jelentősen növeltem a becsült paraméterek pontosságát és megbízhatóságát. A linearizált intervalluminverziós megközelítés esetén a sorfejtési együtthatók becslési hibájának meghatározására mélységfüggő kovarianciamátrixot vezettem be. A linearizált inverziós módszert az iteratív eljárás stabilitásának növelése céljából globális optimalizációs eljárás alapuló sorfejtéses inverziós algoritmussal kombináltam. Az intervallumhossz kiválasztásának kérdését, valamint a sorfejtési együtthatók optimális számának a meghatározását, mely a modellparaméterek korrelációs normájának minimalizálásán alapul korábban társszerzőkkel publikáltuk (*Dobróka és szerzőtársai, 2016b*). Jelen értekezésben a kombinált intervalluminverziós eljárás genetikus algoritmussal továbbfejlesztett változatát mutattam be, és egy hazai szénhidrogén-kutatófúrás mérési adatrendszeren igazoltam annak megbízhatóságát, stabilitását és startmodell-függetlenségét.
2. Az intervalluminverziós módszer hatékonyságának és pontosságának további javítása érdekében az elméleti szondaválaszfüggvényekben szereplő zónaparamétereket inverziós eljárás során belül határoztam meg. A zónaparamétereket, mint a jelentősen túlhatározott inverz feladat új ismeretlenjeit az intervalluminverziós eljárás keretében automatikusan becsülhetjük, ellentétben a mélységpontonkénti inverzióval, ahol e mennyiségeket (kényszerűségből) a priori adott mennyiségnek kell tekintenünk. A kőzetfizikai (térfogatjellemző) mennyiségek és a zónaparaméterek összehangolt együttes meghatározása tovább növeli a becsült petrofizikai modell megbízhatóságát, ill. elősegíti a szénhidrogén-készletek hatékonyabb és pontosabb becslését. A zonális jellemzők ismeretlennek való választását a szelvényadatok zónaparaméterekre vonatkozó érzékenységi függvényeire, valamint az inverziós ismeretlenek közötti korrelációs számításra alapoztam. Homogén rétegekből felépített modellt feltételezve, Simulated Annealing algoritmuson alapuló intervalluminverziós eljárással meghatároztam a texturális paramétereket. A fajlagos ellenállás egyenletekben szereplő zónaparamétereket és azok mélységfüggését külön inverziós eljárásban határoztam meg. Az intervalluminverziós eljárással javítottam a mért és a számított szelvényadatok illeszkedését, valamint a direkt feladat megoldását is pontosítottam.
3. Az intervalluminverziós eljárás kínálta nagymértékű túlhatározottság révén lehetőség nyílik bonyolult szénhidrogén-tárolók kőzetfizikai paramétereinek meghatározására. Intervallumonként állandó értékű kőzetfizikai jellemzők leírására alkalmas sorfejtést végezve, Simulated Annealing algoritmuson alapuló (globális) intervalluminverziós eljárást alkalmaztam több ásványi komponens alkotta tárolókőzetek kőzetfizikai paramétereinek meghatározására. Szintetikus és terepi fúrólukszelvény adatok intervalluminverziójával meghatároztam karbonát, ill. metamorf szénhidrogén-tárolók kőzetösszetételét, porozitását és víztelítettségét.

4. A faktoranalízis problémájának újszerű megoldására, a geofizikai inverzió eszköztárának bevonásával kétféle megközelítést javasoltam. Bevezettem az iteratívan újrászűzött faktoranalízis (IRFA) módszert, melynek keretében linearizált inverzióval együttesen meghatározhatók a faktorsúlyok és a faktorszelvények. Szintetikus és terepi adatrendszerek feldolgozásával igazoltam, hogy az iteratív eljárás rezisztens és hatékony zajelnyomó tulajdonsággal rendelkezik. A másik megközelítés alapján, a faktorok mélységeloszlását genetikus algoritmus felhasználásával határoztam meg. A kifejlesztett FGA-FA eljárás keretében a mért és a faktorokból számított adatok eltéréseivel definiált alkalmassági függvényt maximalizáltam. Az elvi adatok számítását a faktorsúlyok és faktorok szorzataként állítottam elő, mellyel a kőzetfizikai mennyiségek (válaszegyenletek) bevonása nélkül oldhatjuk meg a direkt feladatot.
5. Új, faktoranalízisen alapuló kiértékelési módszert fejlesztettem a kőzetfizikai paraméterek független szelvényértelmezési eljárással történő meghatározására. A faktorok és kőzetfizikai mennyiségek regresszióanalízisével megállapítottam, hogy a mért szelvényekből számított első faktor erősen korrelál az agyagtartalommal, melynek alapján exponenciális függvénykapcsolatot javasoltam. A Larionov-féle módszerrel és laboratóriumi adatokkal való összevetéssel igazoltam, hogy a tapasztalati összefüggés hazai és amerikai egyesült államokbeli víz- és szénhidrogén-tároló képződményekben jó közelítéssel alkalmazható. A faktoranalízis algoritmusát kiterjesztettem a szomszédos fúrások adatainak gyors és hatékony (szimultán) feldolgozására, mellyel a faktorok és az agyagtartalom többdimenziós térbeli eloszlása számításának lehetőségét egy hazai szénhidrogén-mezőn mutattam be. Kimutattam, hogy az első faktor erősen korrelál a hidraulikus vezetőképességgel, melynek alapján nemlineáris regressziós modellt vezettem be. Szintetikus fúrólukszelvények felhasználásával kimutattam, hogy a tapasztalati összefüggés a bemenő adatrendszert terhelő különböző mértékű zaj és kiugró adatok jelenléte mellett is érvényes. A Csókás-féle eljárással, magvizsgálati és próbaszivattyúzási adatokkal igazoltam, hogy a faktoranalízisen alapuló kiértékelési eljárás elsődleges és másodlagos porozitású édesvíztárolókban megfelelő közelítéssel alkalmazható. Az első faktor és a szénhidrogén-tárolók áteresztőképessége között is erős korreláció mérhető, melynek alapján a konvencionális olaj- és gáztároló képződmények permeabilitása faktoranalízissel meghatározható.
6. A faktoranalízis algoritmusát továbbfejlesztettem a víztelítettség mérnökgeofizikai szondázási adatokból történő meghatározására. Különböző hazai mérési területről származó terepi adatok felhasználásával kimutattam, hogy az első faktor és a felszínközeli üledékek víztelítettsége egymással erősen korrelál. A két mennyiség kapcsolatának leírására lineáris közelítő összefüggést javasoltam, melyben a területi állandók az első faktorszelvényből közvetlenül (kőzetfizikai információ bevonása nélkül) meghatározhatók. Összehasonlító vizsgálatot végeztem a faktoranalízis és az inverzió eredménye között. A faktoranalízis algoritmusát továbbfejlesztettem a víztelítettség és az abból származtatható száraz sűrűség területi eloszlásának meghatározására. Az első faktor és a víztelítettség kapcsolatát *Balogh (2018)* PhD értekezésében tovább vizsgálta, arra exponenciális függvényt javasolt, valamint az IRFA eljárást a Steiner-féle leggyakoribb érték módszere alkalmazásával továbbfejlesztette. A kutatásaim során további, a gyakorlat számára fontos eredményre jutottam. Az első faktor és a neutronporozitás szelvény egymással jól korrelál, abban az esetben is, amikor a neutronporozitás adatokat nem vonjuk be közvetlenül a

faktoranalízis eljárásba. A többi szelvény ismeretében a faktoranalízis eredményeként a neutronporozitás szelvény olyan mélységszakaszokon pótolható, ahol eredetileg nem történt neutronszelvényezés. Bemutattam, hogy a szintetikus és mért neutronporozitás szelvények megfelelően illeszkednek, és az előbbi hatékonyan felhasználható a víztelítettség mennyiségi meghatározására. A neutronporozitás szelvény elméleti úton történő előállításának lehetőségét hazai szénhidrogén-tárolókban is megvizsgáltuk, mely eredményeket nemzetközi konferencián ismertettük (Szabó és szerzőtársai, 2013). A faktoranalízis mérnökgeofizikai szondázási feladatokban történő további alkalmazási lehetőségeit az ELGOSCAR-2000 Környezettechnológiai és Vizgazdálkodási Kft. kollégáival való együttműködésben vizsgáljuk (Szabó és szerzőtársai, 2017).

7. Genetikus meta-algoritmikus inverziós (GMI) módszert fejlesztettem felszínközeli telítetlen üledékek közetfizikai paramétereinek meghatározására, melyet mérnökgeofizikai szondázási adatok értelmezésére használtam fel. Az inverziós módszerrel közös eljárásban határozhatók meg a térfogatjellemező mennyiségek, valamint a válaszfüggvényekben szereplő mátrix- és fluidumjellemezők. A zónaparaméterek inverzióon belül történő meghatározása ezen az alkalmazási területen is egyedülálló, ugyanis a jelenleg alkalmazott pontonkénti inverziós módszerek e problémára nem kínálnak megoldást. Az új meta-algoritmus az önkényesen felvett állandók helyett automatikusan számítja a zónaparamétereket (és egyben javítja a direkt feladat megoldását). A közetfizikai paraméterek meghatározására kidolgoztam az egydimenziós GMI eljárást, melynek keretében egyetlen fúrásban mért valamennyi szelvényadatot együttesen invertáltam. Kimutattam, hogy a zónaparaméterek alkalmassági függvénye számos lokális maximumhellyel rendelkezik (Szabó, 2018), mely szükségessé teszi a globális optimalizációs módszer alkalmazását. A GMI eljárás keretében genetikus algoritmust alkalmaztam a zónaparaméterek állandó értékeinek meghatározására. E megközelítéssel a zónaparaméterek tapasztalatokon alapuló (szubjektív) megadásából származó modellhiba és annak hatása az inverzió eredményére nézve jelentősen csökkenthető. A zónaparaméterek becslési hibáját az utolsó generációban becsült modellek (egyedek) megfelelő paraméterei szórásai átlagértékeként számítottam. A zónaparaméterek aktuális értékét rögzítve, a GMI eljárás belső ciklusában a térfogatjellemezők vertikális változását és becslési hibáját linearizált mélységpontonkénti inverzióval határoztam meg. Az értekezésben bemutatott terepi példában a pontonkénti inverziós módszernél alkalmazott Gauss-féle legkisebb négyzetek módszere nem igényelt csillapítást, mely az inverziós eljárás stabilitását mutatja. A GMI eljárást kiterjesztettem kétdimenziós közetfizikai modell meghatározására, melynek keretében több szomszédos fúrás szelvényadatát közösen dolgoztam fel. Az állandó értékű zónaparamétereket genetikus algoritmus alkalmazásával számítottam a mérnökszondázás teljes mélységtartományára, míg a térfogatjellemezőket fúrásról-fúrásra linearizált pontonkénti inverziós eljárások sorozatával határoztam meg. Az adattérbeli illeszkedést és a térfogatjellemező paraméterek megbízhatóságát szelvényyszerűen ábrázoltam. A GMI módszer továbbfejlesztését a jövőben az intervalluminverziós módszerrel való kombinálással tervezem megvalósítani, mely nemcsak a víztároló formációk, hanem a szénhidrogéntároló képződmények zónaparamétereinek meghatározására is lehetőséget nyújt. A genetikus meta-algoritmikus inverziós eljárás ezenkívül széleskörű felhasználást nyerhet a geofizikai inverz feladatok célfüggvényeiben szereplő paraméterek (csillapítási tényező, büntető függvények és vektornormák) optimalizálásában.

## Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósul meg.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani *Dobróka Mihály Professzor Úrnak*, aki doktoranduszi éveim alatt témavezetőként megismertette velem a kutatómunka szépségét, majd később szoros és folyamatos együttműködés keretében elősegítette szakmai fejlődésemet. Támogatása és szakmai tanácsai nagymértékben hozzájárultak a doktori értekezésben megfogalmazott eredmények elérésében. Köszönöm a *Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszéke valamennyi volt és jelenlegi munkatársának*, kiemelve *Gyulai Ákos Professzor Urat és Turai Endre Intézetigazgató Urat*, akik között szakmailag inspiráló, baráti légkörben dolgozhattam és dolgozhatok jelenleg is. Köszönettel tartozom *Szűcs Péter Dékán Úrnak* a doktori eljárás megindítására való ösztönzésért.

Köszönet illeti a *Tóth József, korábban Kiss Bertalan Urak* által vezetett *MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt. szolnoki Petrofizika Osztályát és kollégáit*, akikkel tizenöt évig folyamatosan együttműködve olajipari módszerfejlesztéseken dolgozhattam. A korszerű szakmai ismereteknek, és a tőlük származó terepi adatoknak nagy hasznát vettem a kutatómunkában. A szolnoki szakmai megbeszélések arra inspiráltak, hogy a módszerfejlesztések a gyakorlati igényeknek megfelelően történjenek. E mellett köszönetemet fejezem ki *Stickel János Igazgató Úrnak az ELGOSCAR-2000 Környezettechnológiai és Vízgazdálkodási Kft.* részéről nyújtott szakmai támogatást és a jelenleg is folyó együttműködést. Köszönöm *Markku Peltoniemi Professzornak és Tero Hokkanennek az Aalto Egyetem oktatójának*, hogy hosszabb szakmai tanulmányúton részt vehettem és rendszeresen szakmai kurzusokat tarthattam Finnországban, mely szélesítette a szakmai látókörömet és fejlesztette angol nyelvtudásomat. Általuk jelentős szakmai támogatást kaptam, nemzetközi és tudományos kapcsolatokra tehettem szert.

Végezetül köszönetet mondok családomnak és barátaimnak, kiemelve *Szüleimet és Feleségemet*, biztatásukért és megértő, önzetlen támogatásukért.

## Felhasznált irodalom

- Alberty M. W., Hashmy K. H., 1984: Application of ULTRA to log analysis. Transactions of 25<sup>th</sup> SPWLA Annual Logging Symposium, 17 p.
- Alger R. P., 1971: Interpretation of electric logs in fresh water wells in unconsolidated formation. SPE Reprint Series 1, 25 p.
- Archie G. E., 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME 146, 54–62.
- Asfahani J., 2014: Statistical factor analysis technique for characterizing basalt through interpreting nuclear and electrical well logging data (case study from Southern Syria). *Applied Radiation and Isotopes* 84, 33–39.
- Álmos A., Györi S., Horváth G., Várkonyiné Kóczy A., 2012: Genetikus algoritmusok. Typotex Kft., 254 p.

- Baker Atlas, 1996: OPTIMA: eXpress reference manual. Baker Atlas, Western Atlas International Inc., 98 p.
- Balázs L., 2015: Inversion of well logging measurements with a constant interval parameter. *Geosciences and Engineering* 4, 93–104.
- Ball S. M., Chace D. M., Fertl W. H., 1987: The Well Data System (WDS): an advanced formation evaluation concept in a microcomputer environment. Proceedings of SPE Eastern Regional Meeting, paper 17034, 61–85.
- Balogh G. P., 2018: Mérnökgeofizikai szondázási adatok kiértékelése új statisztikai eljárásokkal. Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 67 p.
- Bartlett M. S., 1937: The statistical conception of mental factors. *British Journal of Psychology* 28, 97–104.
- Bartlett, M. S., 1950, Tests of significance in factor analysis. *British Journal of Statistical Psychology* 3, 77–85.
- Basilevsky A. T., 1994: Statistical factor analysis and related methods: Theory and applications. John Wiley & Sons Inc., 737 p.
- Bear J., 1972: Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications, 764 p.
- Bhuyan K., Passey Q. R., 1994: Clay estimation from GR and neutron-density porosity logs. SPWLA 35<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, 1994-DDD.
- Bijani R., Ponte Neto C. F., Martins S. S., Travassos J. M., 2012: 2-D tomography of first-arrivals using the Genetic Algorithm with Elitism. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012, 6 p.
- Clavier C., Hoyle W., Meunier D., 1971: Quantitative interpretation of thermal neutron decay time logs: Part I. Fundamentals and techniques. *Journal of Petroleum Technology* 23, 743–755.
- Cranganu C., Luchian H., Breaban M. E., 2015: Artificial intelligent approaches in petroleum geosciences. Springer, 289 p.
- Csókás J., 1995: Vízadó rétegek jellemző hozamának és a vízminőségének meghatározása geofizikai fúrólukszelvények alapján. *Magyar Geofizika* 35, 176–203.
- Dobróka M., 1988: On the absorption–dispersion characteristics of channel waves propagating in coal seams of varying thickness. *Geophysical Prospecting* 36, 318–331.
- Dobróka M., Gyulai Á., Ormos T., Csókás J., Dresen L., 1991: Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded in an underground coal mine. *Geophysical Prospecting* 39, 643–665.
- Dobróka M., 1994: Változó rétegvastagságú inhomogén szeizmikus hullámvezetőben terjedő Love-típusú hullámok diszperziós relációja; az abszorpciós-diszperziós jellemzők inverziója. MTA doktori értekezés, 134 p.
- Dobróka M., 1995: Együttes inverziós algoritmusok bevezetése a mélyfúrési geofizikai értelmezésbe. Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 91 p.
- Dobróka M., Szabó N. P., 2004: Mélyfúrési geofizikai adatok feldolgozási/kiértékelési hatékonyságának növelése intervallum inverziós eljárással. Kutatási jelentés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 44 p.
- Dobróka M., Völgyesi L., 2008: Inversion reconstruction of gravity potential based on gravity gradients. *Mathematical Geosciences* 40, 299–311.
- Dobróka M., Szabó N. P., Cardarelli E., Vass P., 2009: 2D inversion of borehole logging data for simultaneous determination of rock interfaces and petrophysical parameters. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 44, 459–479.
- Dobróka M., Szabó N. P., 2011: Interval inversion of well-logging data for objective determination of textural parameters. *Acta Geophysica* 59, 907–934.

- Dobróka M., Szabó N. P., 2012: Interval inversion of well-logging data for automatic determination of formation boundaries by using a float-encoded genetic algorithm. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 86–87, 144–152.
- Dobróka M., Szabó N. P., Turai E., 2012: Interval inversion of borehole data for petrophysical characterization of complex reservoirs. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 47, 172–184.
- Dobróka M., Szabó N. P., Somogyiné Molnár J., Szegedi H., 2013: Mélyfúrési geofizikai adatok faktoranalízise és az eredmények hasznosítása. Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 186 p.
- Dobróka M., Szabó N. P., 2015: Well log analysis by global optimization-based interval inversion method. In: Cranganu C., Luchian H., Breaban M. E. (eds.), *Artificial intelligent approaches in petroleum geosciences*, Springer, 245–268.
- Dobróka M., Szegedi H., Somogyi Molnár J., Szűcs P., 2015: On the reduced noise sensitivity of a new Fourier transformation algorithm. *Mathematical Geosciences* 47, 679–697.
- Dobróka M., Szabó N. P., Vass P., Turai E., Kiss A., 2016a: Mélyfúrési geofizikai adatok faktoranalízise és az eredmények hasznosítása (2015–2016). Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 248 p.
- Dobróka M., Szabó N. P., Tóth J., Vass P., 2016b: Interval inversion approach for an improved interpretation of well logs. *Geophysics* 81, D163–D175.
- Drahos, D., 2005, Inversion of engineering geophysical penetration sounding logs measured along a profile. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 40, 193–202.
- Draskovits P., Fejes I., 1994: Geophysical methods in drinkwater protection of near-surface reservoirs: *Journal of Applied Geophysics* 31, 53–63.
- Draskovits P., Magyar B., Pattantyús Á., 1995: Geophysical methods in groundwater prospecting and environmental protection. *Física de la Tierra* 7, 53–86.
- Dunning C. P., Yeskis D. J. 2007: Lithostratigraphic and hydrogeologic characteristics of the Ordovician Sinnipee Group in the vicinity of Waupun, Fond du Lac County, Wisconsin, 1995–96. USGS Scientific Investigations Report 2007–5114, 61 p.
- Fejes I., Jósa E., 1990: The engineering geophysical sounding method. Principles, instrumentation, and computerised interpretation. In: Ward S. H. (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume II: Environmental and Groundwater, Investigations in Geophysics*, 321–332.
- Ferenczy L., 1995: Kiegészítés a statisztikus értelmezési rendszerek anyagához. Tanszéki segédlet, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 44 p.
- Geman S., Geman D., 1984: Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-6, 721–741.
- Gryc G., 1988: Geology and exploration of the National Petroleum Reserve in Alaska, 1974 to 1982. USGS Professional Paper 1399, 940 p.
- Gyulai Á., 1989: Parameter sensitivity of underground DC measurements. *Geophysical Transactions* 35, 209–225.
- Gyulai Á., Ormos T., 1999: A new procedure for the interpretation of VES data: 1.5-D simultaneous inversion method. *Journal of Applied Geophysics* 41, 1–17.
- Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M., 2010: A quick 2-D geoelectric inversion method using series expansion. *Journal of Applied Geophysics* 72, 232–241.
- Gyulai Á., Szűcs P., Turai E., Baracza M. K., Fejes Z., 2017: Geoelectric characterization of thermal water aquifers using 2.5D inversion of VES measurements. *Surveys in Geophysics* 38, 503–526.

- Hempkins W. B., 1978: Multivariate statistical analysis in formation evaluation. 48<sup>th</sup> Annual California Regional Meeting of the SPE of AIME, paper 7144, 20 p.
- Holland J. H., 1975: Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, 232 p.
- Horváth Sz. B., 1973: The accuracy of petrophysical parameters as derived by computer processing. *The Log Analyst* 14, 16–33.
- Houck C. R., Joines J., Kay M., 1995: A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation. NCSU-IE technical report 95-09, North Carolina State University, 14 p.
- Hvorslev M. J., 1951: Time lag and soil permeability in groundwater observations. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Bulletin 36, 57 p.
- Ingber L., 1989: Very fast simulated re-annealing. *Mathematical and Computer Modelling* 12, 967–973.
- Jöreskog K. G., 2007: Factor analysis and its extensions. In: Cudeck R., MacCallum R. C. (eds.), Factor analysis at 100, historical developments and future directions, Lawrence Erlbaum Associates, 47–77.
- Juhász J. 2002: Hidrogeológia. Akadémiai Kiadó, 1176 p.
- Kaiser H. F., 1958: The varimax criterion for analytical rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23, 187–200.
- Kis M., 2002: Generalised Series Expansion (GSE) used DC geoelectric-seismic joint inversion. *Journal of Applied Geophysics* 50, 401–416.
- Larionov V. V. 1969. Radiometry of boreholes (in Russian). Nedra, 238 p.
- Lawley D. N., Maxwell A. E., 1962: Factor analysis as a statistical method. *The Statistician* 12, 209–229.
- Magyar B., Stickel J., Verő L., Pádár I., 1995: Assessment and remediation of environmental damage in the abandoned Soviet military bases in Hungary. Proceedings of the Rome Symposium of IAHS, P 233.
- Marquardt D. W., 1959: Solution of non-linear chemical engineering models. *Chemical Engineering Progress* 55, 65–70.
- Mayer C., Sibbit A., 1980: GLOBAL: A new approach to computer processed log interpretation. SPE 55<sup>th</sup> Annual Fall Technical Conference and Exhibition, paper 9341, 14 p.
- Menke W., 1984: Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic Press Inc., 289 p.
- Metropolis N., Rosenbluth M. N., Teller A. H., Teller E., 1953: Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics* 21, 1087–1092.
- Michalewicz Z., 1992: Genetic algorithms + data structures = evolution programs. Springer, 387 p.
- Michalski A., 2013: Global optimization - Theory, Developments and Applications. Nova Science Publishers Inc., 182 p.
- Narayan J. P., Yadav L., 2006: Application of adaptive processing technique for the inversion of open hole logs recorded in oil fields of Indian basins. SPG 6<sup>th</sup> International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics “Kolkata 2006”, 505–512.
- Nell C., Fawcett C., Hoos H. H., Leyton-Brown K., 2011: HAL: A framework for the automated analysis and design of high-performance algorithms. In: Coello Coello C. A. (ed.), Learning and Intelligent Optimization. Selected papers of 5<sup>th</sup> International Conference, LION 5, 600–615.
- Nyári Zs., Kanlı A. I., Stickel J., Tillmann A., 2010: The use of non-conventional CPTe data in determination of 3-D electrical resistivity distribution. *Journal of Applied Geophysics* 70, 255–265.

- Poupon A., Gaymard R., 1970: The evaluation of clay content from logs. SPWLA 11<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, 1970-G.
- Poupon A., Leveaux J., 1971: Evaluation of water saturation in shaly formations. SPWLA 12<sup>th</sup> Annual Logging Symposium Transactions, paper O.
- Scales J. A., Gersztenkorn A., 1988: Robust methods in inverse theory. *Inverse Problems* 4, 1071–1091.
- Schlumberger 1989: Log interpretation principles/applications: Seventh printing. Schlumberger Co., 241 p.
- Scott C. R., 1980: Soil mechanics and foundations. Third edition, Applied Science Publishers, 406 p.
- Sen M. K., Stoffa P. L., 1995: Global optimization methods in geophysical inversion, Volume 4, First Edition, Elsevier Science, 280 p.
- Serra O., 1984: Fundamentals of well-log interpretation. Elsevier, 684 p.
- Seth V., Srivardhan V., Maiti S., 2015: Evaluation of formation shaliness using factor analysis of site-U1344A of IODP expedition 323 in the Bering Sea. EAGE 77<sup>th</sup> Annual Conference and Exhibition, Tu SP 114, 5 p.
- Simandoux P., 1963: Dielectric measurements in porous media and application to shaly formation. *Revue de L'Institut Français du Pétrole* 18, 193–215.
- Steiner F., 1991: The most frequent value: introduction to a modern conception of statistics. Academic Press, 314 p.
- Stieber S. J., 1970: Pulsed neutron capture log evaluation - Louisiana Gulf Coast. Fall Meeting of the SPE of AIME, 2961-MS.
- Szabó N. P., 2004a: Mélyfúrési geofizikai adatok értelmezésének modern inverziós módszerei. Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 118 p.
- Szabó N. P., 2004b: Global inversion of well log data. *Geophysical Transactions* 44, 313–329.
- Szabó N. P., Dobróka M., Vass P., 2009: The determination of textural parameters using interval inversion of borehole geophysical data. 15<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, P60, 5 p.
- Szabó N. P., 2011: Shale volume estimation based on the factor analysis of well-logging data. *Acta Geophysica* 59, 935–953.
- Szabó N. P., Tolnai É. E., 2011: Interval inversion of wellbore data for characterizing metamorphic hydrocarbon reservoirs. 6<sup>th</sup> Congress of Balkan Geophysical Society, P20, 5 p.
- Szabó N. P., Dobróka M., 2011: Geostatistical approach for shale volume estimation in water-bearing formations. 17<sup>th</sup> EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, P15, 5 p.
- Szabó N. P., Dobróka M., Drahos D., 2012: Factor analysis of engineering geophysical sounding data for water-saturation estimation in shallow formations. *Geophysics* 77, WA35–WA44.
- Szabó N. P., 2012: Dry density derived by factor analysis of engineering geophysical sounding measurements. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 47, 161–171.
- Szabó N. P., Dobróka M., 2013a: Float-encoded genetic algorithm used for the inversion processing of well-logging data. In: Michalski A. (ed.), *Global optimization - Theory, Developments and Applications*. Nova Science Publishers Inc., 79–104.
- Szabó N. P., Dobróka M., 2013b: Extending the application of a shale volume estimation formula derived from factor analysis of wireline logging data. *Mathematical Geosciences* 45, 837–850.



- Szabó N. P., Dobróka M., Somogyi Molnár J., Kavanda R., 2013: Shale Indicator Derived from Multivariate Statistical Analysis of Well Logs. 75<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013, We 0905, 5 p.
- Szabó N. P., Dobróka M., Turai E., Szűcs P., 2014: Factor analysis of borehole logs for evaluating formation shaliness: a hydrogeophysical application for groundwater studies. *Hydrogeology Journal* 22, 511–526.
- Szabó N. P., 2015: Hydraulic conductivity explored by factor analysis of borehole geophysical data. *Hydrogeology Journal* 23, 869–882.
- Szabó N. P., Kormos K., Dobróka M., 2015: Evaluation of hydraulic conductivity in shallow groundwater formations: a comparative study of the Csókás' and Kozeny–Carman model. *Acta Geodaetica et Geophysica* 50, 461–477.
- Szabó N. P., 2016: Hydrocarbon formation evaluation using an efficient genetic algorithm-based factor analysis method. 15<sup>th</sup> European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Mo P071, 12 p.
- Szabó N. P., Balogh G. P., 2016: Most frequent value based factor analysis of engineering geophysical sounding logs. 78<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition, Tu SBT4 12, 5 p.
- Szabó N. P., Dobróka M., 2017a: Robust estimation of reservoir shaliness by iteratively reweighted factor analysis. *Geophysics* 82, D69–D83.
- Szabó N. P., Dobróka M., 2017b: Exploratory factor analysis of wireline logs using a Float-Encoded Genetic Algorithm. *Mathematical Geosciences* 50, 317–335.
- Szabó N. P., Balogh G. P., Stickel J., 2017: Most frequent value-based factor analysis of direct-push logging data. *Geophysical Prospecting* 66, 530–548.
- Szabó N. P., 2018: A genetic meta-algorithm-assisted inversion approach: hydrogeological study for the determination of volumetric rock properties and matrix and fluid parameters in unsaturated formations. *Hydrogeology Journal*, online first, pp. 1–12.
- Tarantola A., 1987: Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation. Elsevier, 613 p.
- Tillmann A., Englert A., Nyári Zs., Fejes I., Vanderborgh J., Vereecken H., 2008: Characterization of subsoil heterogeneity, estimation of grain size distribution and hydraulic conductivity at the Krauthausen test site using cone penetration test. *Journal of Contaminant Hydrology* 95, 57–75.
- Turai E., 2011: Data processing method developments using TAU-transformation of Time-Domain IP data II. Interpretation results of field measured data. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 46, 391–400.
- USGS, 1999: Selected data from eleven wildcat wells in the national petroleum reserve in Alaska. USGS open file report 99–015.
- Vass P., 2012: Random noise reduction capability of the hermit polynomial based Least Squares Fourier Transform method. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 47, 328–343.
- Vértesy L., Fancsik T., Fejes I., Gulyás Á., Hegedűs E., Kovács A. Cs., Kovács P., Kiss J., Madarasi A., Sörös L., Szabó Z., Tóth Z., 2004: Geophysical survey at the Bábaapáti (Üveghuta) site. Annual Report of the Geological Institute of Hungary for 2003, 239–256.
- Walsh D., Turner P., Grunewald E., Zhang H., Butler J. J., Reboulet E., Knobbe S., Christy T., Lane J. W., Johnson C. D., Munday T., Fitzpatrick A., 2013: A small-diameter NMR logging tool for groundwater investigations. *Groundwater* 51, 914–926.
- Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner L. W., 1956: Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics* 21, 41–70.

## **Mellékletek**

## 1. melléklet

Az 1.2. fejezetben bemutatott intervalluminverziós vizsgálatban felhasznált elméleti szondaválaszfüggvények és zónaparaméterek.

$$\rho_b = \Phi \left[ \rho_{mf} - 1.07(1 - S_{x0}) (\alpha_0 \rho_{mf} - 1.24 \rho_{hc}) \right] + V_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} \rho_{sd}, \quad (1.1)$$

$$GR = \rho_b^{-1} (V_{sh} GR_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} GR_{sd} \rho_{sd}), \quad (1.2)$$

$$\Phi_N = \Phi \left\{ \frac{\Phi_{Nmf} - (1 - S_{x0}) C_{cor} - 2\Phi(1 - S_{x0}) S_{hf} (1 - 2.2 \rho_{hc})}{[1 - (1 - S_{x0})(1 - 2.2 \rho_{hc})]} \right\} + V_{sh} \Phi_{N,sh} + V_{sd} \Phi_{N,sd}, \quad (1.3)$$

$$\Delta t = \Phi \left[ \Delta t_{mf} S_{x0} + (1 - S_{x0}) \Delta t_{hc} \right] c_p + V_{sh} \Delta t_{sh} + V_{sd} \Delta t_{sd}, \quad (1.4)$$

$$R_d = \left[ \frac{\Phi^m S_w^n}{a R_w (1 - V_{sh})} + \frac{V_{sh} S_w}{R_{sh}} \right]^{-1}. \quad (1.5)$$

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Választott érték	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ intenzitás	Homok	$GR_{sd}$	13	API
	Agyag	$GR_{sh}$	160	
Kőzet- sűrűség	Homok	$\rho_{sd}$	2.60	g/cm <sup>3</sup>
	Agyag	$\rho_{sh}$	2.47	
	Iszapfiltrátum	$\rho_{mf}$	1.02	
	Szénhidrogén	$\rho_{hc}$	0.135	
	Iszapfiltrátum koefficiens	$\alpha_0$	1.11	–
Neutron- porozitás	Homok	$\Phi_{N,sd}$	–0.035	v/v
	Agyag	$\Phi_{N,sh}$	0.30	
	Iszapfiltrátum	$\Phi_{N,mf}$	1.0	
	Iszapfiltrátum koefficiens	$C_{cor}$	0.69	–
	Maradék szén- hidrogén koefficiens	$S_{hf}$	1.17	
Akusztikus terjedési idő	Homok	$\Delta t_{sd}$	56	μs/ft
	Agyag	$\Delta t_{sh}$	108	
	Iszapfiltrátum	$\Delta t_{mf}$	188	
	Szénhidrogén	$\Delta t_{hc}$	211	
	Kompakciós tényező	$c_p$	1.08	–
Fajlagos ellenállás	Agyag	$R_{sh}$	1.0	ohmm
	Rétegvíz	$R_w$	0.40	
	Iszapfiltrátum	$R_{mf}$	0.28	
	Cementációs kitevő	$m$	1.40	–
	Telítettségi kitevő	$n$	1.70	
	Tekervényességi együttható	$a$	0.90	

**2a. melléklet**

A 2.2. fejezetben bemutatott intervalluminverziós vizsgálatban alkalmazott elméleti szondaválaszfüggvények.

$$\rho_b = \Phi \left[ \rho_{mf} - 1.07(1 - S_{x0})(\alpha_0 \rho_{mf} - 1.24 \rho_{hc}) \right] + V_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} \rho_{sd}, \quad (2.1)$$

$$GR = \rho_b^{-1} (V_{sh} GR_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} GR_{sd} \rho_{sd}), \quad (2.2)$$

$$K = \rho_b^{-1} (\Phi S_{x0} K_{mf} \rho_{mf} + V_{sh} K_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} K_{sd} \rho_{sd}), \quad (2.3)$$

$$U = \rho_b^{-1} (\Phi S_{x0} U_{mf} \rho_{mf} + V_{sh} U_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} U_{sd} \rho_{sd}), \quad (2.4)$$

$$Th = \rho_b^{-1} (\Phi S_{x0} Th_{mf} \rho_{mf} + V_{sh} Th_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} Th_{sd} \rho_{sd}), \quad (2.5)$$

$$\Phi_N = \Phi \left\{ \begin{array}{l} \Phi_{N,mf} - (1 - S_{x0}) C_{cor} - 2\Phi(1 - S_{x0}) S_{hf} (1 - 2.2\rho_{hc}) \cdot \\ \cdot [1 - (1 - S_{x0})(1 - 2.2\rho_{hc})] \end{array} \right\} + V_{sh} \Phi_{N,sh} + V_{sd} \Phi_{N,sd}, \quad (2.6)$$

$$\Delta t = \Phi \left[ \Delta t_{mf} S_{x0} + (1 - S_{x0}) \Delta t_{hc} \right] c_p + V_{sh} \Delta t_{sh} + V_{sd} \Delta t_{sd}, \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{R_d}} = \left[ \frac{V_{sh} \left( \frac{1 - V_{sh}}{2} \right)}{\sqrt{R_{sh}}} + \frac{(\sqrt{\Phi})^m}{\sqrt{aR_w}} \right] (\sqrt{S_w})^n. \quad (2.8)$$

## 2b. melléklet

A 2.2. fejezetben bemutatott intervalluminverziós kiértékelésnél alkalmazott zónaparaméterek.

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Választott érték	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ intenzitás	Homok	$GR_{sd}$	14	API
	Agyag	$GR_{sh}$	160	
Kálium $\gamma$ -intenzitás	Homok	$K_{sd}$	0.85	%
	Agyag	$K_{sh}$	3.45	
	Izapfiltrátum	$K_{mf}$	1.50	
Urán $\gamma$ -intenzitás	Homok	$U_{sd}$	1.0	ppm
	Agyag	$U_{sh}$	5.0	
	Izapfiltrátum	$U_{mf}$	0	
Tórium $\gamma$ -intenzitás	Homok	$Th_{sd}$	4.0	ppm
	Agyag	$Th_{sh}$	18.0	
	Izapfiltrátum	$Th_{mf}$	0	
Kőzet-sűrűség	Homok	$\rho_{sd}$	2.65	g/cm <sup>3</sup>
	Agyag	$\rho_{sh}$	2.54	
	Izapfiltrátum	$\rho_{mf}$	1.02	
	Szénhidrogén	$\rho_{hc}$	0.11	
	Izapfiltrátum koefficiens	$\alpha_0$	1.11	–
Neutron-porozitás	Homok	$\Phi_{N,sd}$	–0.035	v/v
	Agyag	$\Phi_{N,sh}$	0.27	
	Izapfiltrátum	$\Phi_{N,mf}$	1.0	
	Izapfiltrátum koefficiens	$C_{cor}$	0.69	–
	Maradék szénhidrogén koefficiens	$S_{hf}$	1.40	
Akusztikus terjedési idő	Homok	$\Delta t_{sd}$	55	μs/ft
	Agyag	$\Delta t_{sh}$	100	
	Izapfiltrátum	$\Delta t_{mf}$	189	
	Szénhidrogén	$\Delta t_{hc}$	305	
	Kompakciós tényező	$c_p$	1.08	–
Fajlagos ellenállás	Agyag*	$R_{sh}$	1.0	ohmm
	Rétegvíz*	$R_w$	0.50	
	Izapfiltrátum	$R_{mf}$	0.29	
	Cementációs kitevő**	$m$	1.50	–
	Telítettség kitevő**	$n$	1.80	
	Tekervényességi együttható**	$a$	1.0	

\*Az A-jelű inverziós eljárásban ismert (rögzített állandó) és a B-jelű eljárásban ismeretlen zónaparaméter.

\*\*A B-jelű inverziós eljárásban ismert és az A-jelű eljárásban ismeretlen zónaparaméter.

**3a. melléklet**

A 3. fejezetben bemutatott szintetikus adatrendszer inverziójára alkalmazott elméleti szondaválaszfüggvények.

$$\rho_b = \Phi \left[ \rho_{mf} - 1.07(1 - S_{x0})(\alpha_0 \rho_{mf} - 1.24 \rho_{hc}) \right] + V_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} \rho_{sd} + V_{lm} \rho_{lm} + V_{do} \rho_{do}, \quad (3.1)$$

$$GR = \rho_b^{-1} \left\{ \Phi \left[ GR_{mf} S_{x0} \rho_{mf} + GR_{hc} (1 - S_{x0}) \rho_{hc} \right] + \right. \\ \left. + V_{sh} GR_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} GR_{sd} \rho_{sd} + V_{lm} GR_{lm} \rho_{lm} + V_{do} GR_{do} \rho_{do} \right\}, \quad (3.2)$$

$$\Phi_N = \Phi \left\{ \frac{\Phi_{N,mf} - (1 - S_{x0}) C_{cor} - 2\Phi(1 - S_{x0}) S_{hf} (1 - 2.2 \rho_{hc})}{[1 - (1 - S_{x0})(1 - 2.2 \rho_{hc})]} \right\} + V_{sh} \Phi_{N,sh} + V_{sd} \Phi_{N,sd} + \\ + V_{lm} \Phi_{N,lm} + V_{do} \Phi_{N,do}, \quad (3.3)$$

$$\Delta t = \Phi \left\{ \Delta t_{mf} S_{x0} + 1.11(1 - S_{x0}) [(\rho_{hc} - 0.05) \Delta t_o + (0.95 - \rho_{hc}) \Delta t_g] \right\} c_p + \\ + V_{sh} \Delta t_{sh} + V_{sd} \Delta t_{sd} + V_{lm} \Delta t_{lm} + V_{do} \Delta t_{do}, \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{R_s} = \frac{V_{sh}^{\lambda_1} S_{x0}^{n/2}}{R_{sh}} + \frac{\Phi^m S_{x0}^n}{a R_{mf} (1 - V_{sh}^{\lambda_1})}, \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{R_d} = \frac{V_{sh}^{\lambda_2} S_w^{n/2}}{R_{sh}} + \frac{\Phi^m S_w^n}{a R_w (1 - V_{sh}^{\lambda_2})}. \quad (3.6)$$

## 3b. melléklet

A 3. fejezetben bemutatott szintetikus adatrendszer intervalluminverziós kiértékelésénél alkalmazott zónaparaméterek.

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Választott érték	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ intenzitás	Homok	$GR_{sd}$	25	API
	Agyag	$GR_{sh}$	165	
	Iszapfiltrátum	$GR_{mf}$	1.0	
	Mészkeő	$GR_{lm}$	2.0	
	Dolomit	$GR_{do}$	1.0	
	Szénhidrogén	$GR_{hc}$	0	
Kőzet- sűrűség	Homok	$\rho_{sd}$	2.65	g/cm <sup>3</sup>
	Agyag	$\rho_{sh}$	2.60	
	Iszapfiltrátum	$\rho_{mf}$	1.05	
	Mészkeő	$\rho_{lm}$	2.71	
	Dolomit	$\rho_{do}$	2.86	
	Szénhidrogén	$\rho_{hc}$	0.20	
	Iszapfiltrátum koefficiens	$\alpha_0$	1.20	–
Neutron- porozitás	Homok	$\Phi_{N,sd}$	–4.0	%
	Agyag	$\Phi_{N,sh}$	30	
	Iszapfiltrátum	$\Phi_{N,mf}$	100	
	Mészkeő	$\Phi_{N,lm}$	0	
	Dolomit	$\Phi_{N,do}$	2.0	
	Iszapfiltrátum koefficiens	$C_{cor}$	1.0	–
	Maradék szén- hidrogén koefficiens	$S_{hf}$	1.0	
Akusztikus terjedési idő	Homok	$\Delta t_{sd}$	56	$\mu\text{s}/\text{ft}$
	Agyag	$\Delta t_{sh}$	100	
	Iszapfiltrátum	$\Delta t_{mf}$	189	
	Mészkeő	$\Delta t_{lm}$	156	
	Dolomit	$\Delta t_{do}$	140	
	Olaj	$\Delta t_o$	238	
	Gáz	$\Delta t_g$	305	
	Kompakciós tényező	$c_p$	1.05	–
Fajlagos ellenállás	Agyag	$R_{sh}$	3.0	ohmm
	Rétegvíz	$R_w$	0.40	
	Iszapfiltrátum	$R_{mf}$	2.0	
	Cementációs kitevő	$m$	2.0	–
	Telítettség kitevő	$n$	2.0	
	Tekervényességi együttható	$a$	1.0	
	Agyagtartalomhoz tartozó kitevő	$\lambda_1$	2.20	
		$\lambda_2$	2.10	

#### 4a. melléklet

A 3. fejezetben bemutatott terepi adatrendszer inverziójára alkalmazott elméleti szondaválaszfüggvények.

$$GR = \Phi_t \left[ GR_{mf} S_{x0} + GR_{hc} (1 - S_{x0}) \right] + \sum_{i=1}^5 V_i GR_{mai}, \quad (4.1)$$

$$\rho_b = \Phi_t \left[ \rho_{mf} S_{x0} + (1 - S_{x0}) \rho_{hc} \right] + \sum_{i=1}^5 V_i \rho_{mai}, \quad (4.2)$$

$$\Phi_N = \Phi_t \left\{ \begin{aligned} & \Phi_{N,mf} - (1 - S_{x0}) C_{cor} - 2\Phi(1 - S_{x0}) S_{hf} (1 - 2.2\rho_{hc}) \cdot \\ & \cdot [1 - (1 - S_{x0})(1 - 2.2\rho_{hc})] \end{aligned} \right\} + \sum_{i=1}^5 V_i \Phi_{N,mai}, \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta t = \Phi_1 \left\{ \Delta t_{mf} S_{x0} + 1.11(1 - S_{x0}) \left[ (\rho_{hc} - 0.05) \Delta t_o + (0.95 - \rho_{hc}) \Delta t_g \right] \right\} + \sum_{i=1}^5 V_i \Delta t_{mai} + \\ + \Phi_2 \frac{\sum_{i=1}^5 V_i \Delta t_{mai}}{\sum_{i=1}^5 V_i}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{\sqrt{R_s}} = \left[ \frac{V_{sh}^{\left(1 - \frac{V_{sh}}{2}\right)}}{\sqrt{R_{sh}}} + \frac{\left(\sqrt{\Phi_t}\right)^m}{\sqrt{aR_{mf}}} \right] \left(\sqrt{S_{x0}}\right)^n, \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{R_d}} = \left[ \frac{V_{sh}^{\left(1 - \frac{V_{sh}}{2}\right)}}{\sqrt{R_{sh}}} + \frac{\left(\sqrt{\Phi_t}\right)^m}{\sqrt{aR_w}} \right] \left(\sqrt{S_w}\right)^n. \quad (4.6)$$



## 4b. melléklet

A 3. fejezetben bemutatott terepi adatrendszer intervalluminverziós kiértékelésénél alkalmazott zónaparaméterek.

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Választott érték	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ intenzitás	Kvarc	$GR_{ma,1}$	20	API
	Káliumföldpát	$GR_{ma,2}$	180	
	Nátriumföldpát	$GR_{ma,3}$	5.0	
	Csillám	$GR_{ma,4}$	220	
	Amfibolit	$GR_{ma,5}$	35	
	Iszapfiltrátum	$GR_{mf}$	0	
	Szénhidrogén	$GR_{hc}$	0	
Kőzet- sűrűség	Kvarc	$\rho_{ma,1}$	2.65	g/cm <sup>3</sup>
	Káliumföldpát	$\rho_{ma,2}$	2.62	
	Nátriumföldpát	$\rho_{ma,3}$	2.45	
	Csillám	$\rho_{ma,4}$	2.85	
	Amfibolit	$\rho_{ma,5}$	2.95	
	Iszapfiltrátum	$\rho_{mf}$	1.0	
	Szénhidrogén	$\rho_{hc}$	0.20	
Neutron- porozitás	Kvarc	$\Phi_{N,1}$	-0.04	v/v
	Káliumföldpát	$\Phi_{N,2}$	0	
	Nátriumföldpát	$\Phi_{N,3}$	-0.02	
	Csillám	$\Phi_{N,4}$	0.17	
	Amfibolit	$\Phi_{N,5}$	0.07	
	Iszapfiltrátum koefficiens	$C_{cor}$	1.0	-
	Maradék szén- hidrogén koefficiens	$S_{hf}$	1.0	
Akusztikus terjedési idő	Kvarc	$\Delta t_{ma,1}$	54	μs/ft
	Káliumföldpát	$\Delta t_{ma,2}$	51	
	Nátriumföldpát	$\Delta t_{ma,3}$	50	
	Csillám	$\Delta t_{ma,4}$	52	
	Amfibolit	$\Delta t_{ma,5}$	48	
	Olaj	$\Delta t_o$	238	
	Gáz	$\Delta t_g$	305	
	Iszapfiltrátum	$\Delta t_{mf}$	189	-
Fajlagos ellenállás	Agyag	$R_{sh}$	4.50	ohmm
	Rétegvíz	$R_w$	0.12	
	Iszapfiltrátum	$R_{mf}$	0.19	
	Cementációs kitevő	$m$	2.20	-
	Telítettségi kitevő	$n$	2.0	
	Tekervényességi együttható	$a$	1.0	

### 5a. melléklet

Az 5.2. fejezetben bemutatott szintetikus adatrendszer faktoranalízise vizsgálatára alkalmazott elméleti szondaválaszfüggvények.

$$GR = \rho_b^{-1} (V_{sh} GR_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} GR_{sd} \rho_{sd} + V_{lm} GR_{lm} \rho_{lm}), \quad (5.1)$$

$$SP = V_{sh} SP_{sh} - K \cdot \lg \left( \frac{R_{mf}}{R_w} \right) (1 - V_{sh}), \quad (5.2)$$

$$\rho_b = \Phi \left[ \rho_{mf} - 1.07(1 - S_{x0}) (\alpha_0 \rho_{mf} - 1.24 \rho_{hc}) \right] + V_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} \rho_{sd} + V_{lm} \rho_{lm}, \quad (5.3)$$

$$\Phi_N = \Phi \left\{ \begin{array}{l} \Phi_{N,mf} - (1 - S_{x0}) C_{cor} \\ - 2\Phi(1 - S_{x0}) S_{hf} (1 - 2.2\rho_{hc}) \\ \cdot [1 - (1 - S_{x0})(1 - 2.2\rho_{hc})] \end{array} \right\} + V_{sh} \Phi_{N,sh} + V_{sd} \Phi_{N,sd} + V_{lm} \Phi_{N,lm}, \quad (5.4)$$

$$\Delta t = \Phi \left[ \Delta t_{mf} S_{x0} + (1 - S_{x0}) \Delta t_{hc} \right] + V_{sh} \Delta t_{sh} + V_{sd} \Delta t_{sd} + V_{lm} \Delta t_{lm}, \quad (5.5)$$

$$P_e = \frac{1.07}{\rho_b + 0.19} \left[ \Phi S_{x0} U_{mf} + \Phi(1 - S_{x0}) U_{hc} + V_{sh} U_{sh} + V_{sd} U_{sd} + V_{lm} U_{lm} \right], \quad (5.6)$$

$$R_d = \left[ \frac{\Phi^m S_w^n}{a R_w (1 - V_{sh})} + \frac{V_{sh} S_w}{R_{sh}} \right]^{-1}. \quad (5.7)$$

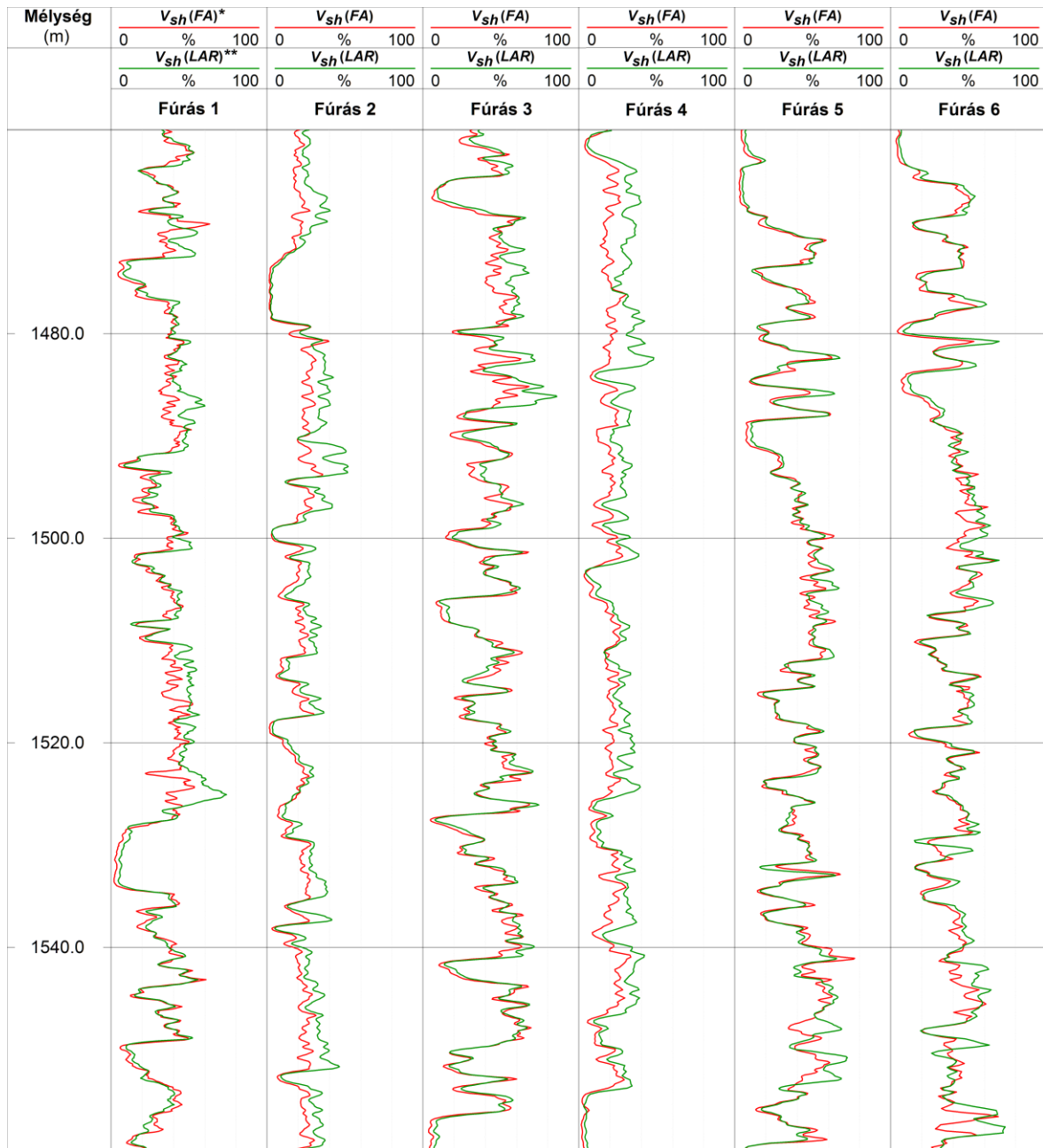
## 5b. melléklet

Az 5.2. fejezetben bemutatott szintetikus adatrendszer faktoranalízise során alkalmazott zónaparaméterek.

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Választott érték	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ intenzitás	Homok	$GR_{sd}$	20	API
	Agyag	$GR_{sh}$	120	
	Mészke	$GR_{lm}$	0	
Természetes potenciál	Agyag	$SP_{sh}$	0	mV
	Hőmérsékleti tényező	$K$	70.7	
Kőzet- sűrűség	Homok	$\rho_{sd}$	2.65	g/cm <sup>3</sup>
	Agyag	$\rho_{sh}$	2.51	
	Iszapfiltrátum	$\rho_{mf}$	1.0	
	Mészke	$\rho_{lm}$	2.71	
	Szénhidrogén	$\rho_{hc}$	0.20	
	Iszapfiltrátum koefficiens	$\alpha_0$	1.11	–
Neutron- porozitás	Homok	$\Phi_{N,sd}$	–0.04	v/v
	Agyag	$\Phi_{N,sh}$	0.36	
	Iszapfiltrátum	$\Phi_{N,mf}$	1.0	
	Mészke	$\Phi_{N,lm}$	0	
	Iszapfiltrátum koefficiens	$C_{cor}$	0.56	–
	Maradék szén- hidrogén koefficiens	$S_{hf}$	1.0	
Akusztikus terjedési idő	Homok	$\Delta t_{sd}$	182	$\mu$ s/m
	Agyag	$\Delta t_{sh}$	320	
	Iszapfiltrátum	$\Delta t_{mf}$	620	
	Mészke	$\Delta t_{lm}$	156	
	Szénhidrogén	$\Delta t_{hc}$	1260	
Fotoelektromos elnyelési index	Homok	$U_{sd}$	4.8	barn/cm <sup>3</sup>
	Agyag	$U_{sh}$	9.0	
	Mészke	$U_{lm}$	13.8	
	Iszapfiltrátum	$U_{mf}$	0	
	Szénhidrogén	$U_{hc}$	0	
Fajlagos ellenállás	Agyag	$R_{sh}$	2.0	ohmm
	Rétegvíz	$R_w$	0.50	
	Iszapfiltrátum	$R_{mf}$	0.28	
	Cementációs kitevő	$m$	2.0	–
	Telítettség kitevő	$n$	2.0	
	Tekervényességi együttható	$a$	1.0	

### 6. melléklet

Az 5.3. fejezetben faktoranalízissel és a Larionov-féle módszerrel becsült agyagtartalom szelvények a Fúrás 1–6 jelű fúrásokban.

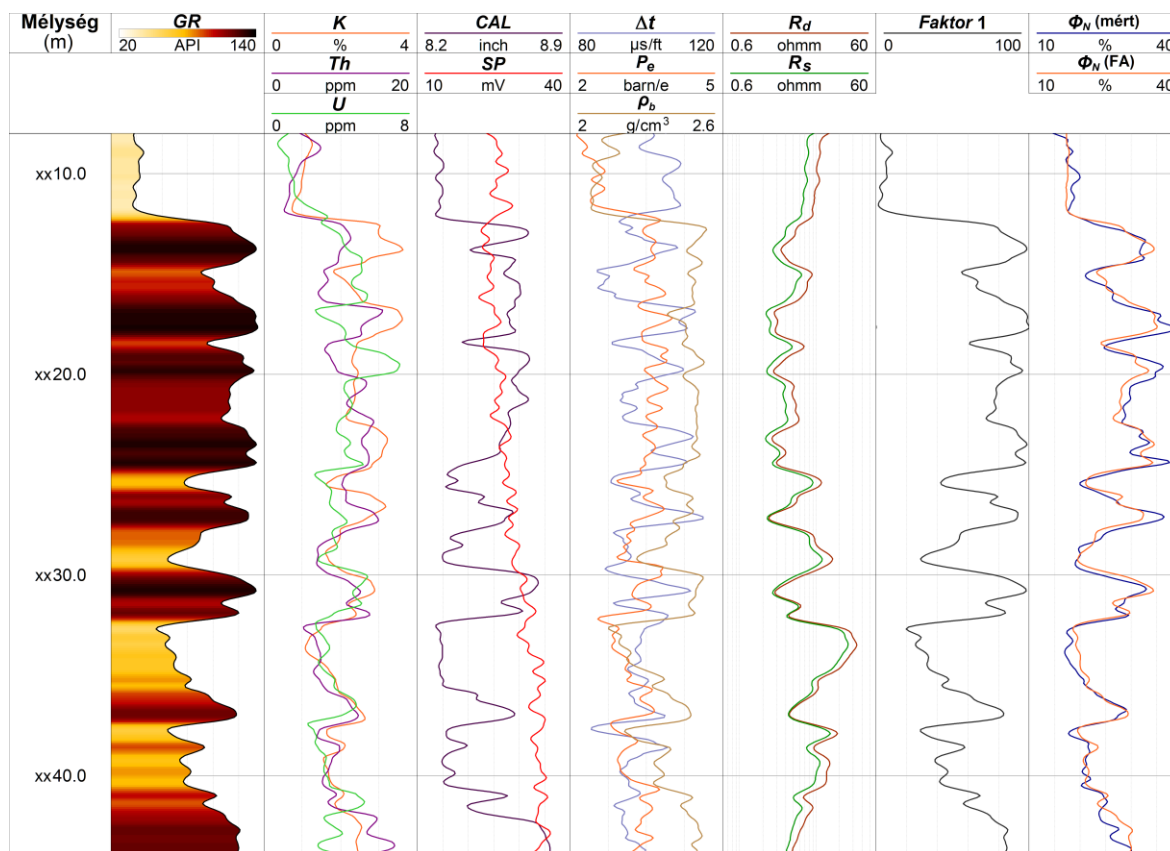


\* A faktoranalízissel becsült agyagtartalom.

\*\* A Larionov-féle eljárással számított agyagtartalom.

## 7. melléklet

A 7.3. fejezetben bemutatott szelvényinterpolációs módszer alkalmazása egy hazai szénhidrogén-kutatófúrásban.



**Mért mennyiségek:** természetes  $\gamma$ -intenzitás ( $GR$ ), káliumtartalom ( $K$ ), tóriumtartalom ( $Th$ ), urántartalom ( $U$ ), lyukátmérő ( $CAL$ ), természetes potenciál ( $SP$ ), akusztikus intervallumidő ( $\Delta t$ ), fotoelektromos elnyelési index ( $P_e$ ), közetsűrűség ( $\rho_b$ ), sekély behatolású szondával mért fajlagos ellenállás ( $R_s$ ), mélybehatolású szondával mért fajlagos ellenállás ( $R_d$ ), neutronporozitás ( $\Phi_N$ (mért)). **Becsült mennyiségek:** első (skálázott) faktor ( $Faktor\ 1$ ), faktoranalízissel számított neutronporozitás ( $\Phi_N$ (FA)).

### 8. melléklet

A 8.1 - 8.2. fejezetben bemutatott GMI inverziós eljárásban felhasznált elméleti szondaválaszfüggvények és zónaparaméterek.

$$GR = V_{cl} GR_{cl} + V_{ma} GR_{ma}, \quad (8.1)$$

$$\rho_b = V_w \rho_w + V_l \rho_l + V_{cl} \rho_{cl} + V_{ma} \rho_{ma}, \quad (8.2)$$

$$\Phi_N = V_w \Phi_{N,w} + V_l \Phi_{N,l} + V_{cl} \Phi_{N,cl} + V_{ma} \Phi_{N,ma}, \quad (8.3)$$

$$R = (V_w + V_l + V_{cl})^{-m} \left( \frac{V_{cl}}{V_w + V_{cl}} + \frac{1 - \frac{V_{cl}}{V_w + V_{cl}}}{R_w} \right)^{-1} \left( \frac{V_w + V_{cl}}{V_w + V_l + V_{cl}} \right)^{-2}. \quad (8.4)$$

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Választott érték	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ intenzitás	Mátrix	$GR_{ma}$	ismeretlen	kcpm
	Agyag	$GR_{cl}$	ismeretlen	
Kőzet- sűrűség	Mátrix	$\rho_{ma}$	ismeretlen	g/cm <sup>3</sup>
	Agyag	$\rho_{cl}$	ismeretlen	
	Rétegvíz	$\rho_w$	1.0	
	Levegő	$\rho_l$	0	
Neutron- porozitás	Mátrix	$\Phi_{N,ma}$	0	v/v
	Agyag	$\Phi_{N,cl}$	ismeretlen	
	Rétegvíz	$\Phi_{N,w}$	1.0	
	Levegő	$\Phi_{N,l}$	0	
Fajlagos ellenállás	Agyag	$R_{cl}$	ismeretlen	ohmm
	Rétegvíz	$R_w$	12	
	Cementációs kitevő	$m$	1.70	