

# Mérnökgeofizikai szondázási adatok hiperparaméter-becsléssel támogatott inverziója

SZABÓ N. P.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

<sup>2</sup>MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

<sup>@</sup>E-mail: gfnmail@uni-miskolc.hu

Az ismertetett módszer keretében felszínközeli telítetlen üledékek jellemzőit mérnökgeofizikai szondázási adatok inverziójával határozzuk meg. Az elméleti szondaválaszfüggvényekben szereplő zónaparamétereket (kőzetmátrix- és fluidumjellemzők) és a térfogatjellemző kőzetfizikai mennyiségeket (víztartalom, kvarcartalom, agyagtartalom) közös inverziós eljárásban becsljük. Az újonnan kifejlesztett metaalgoritmikus inverziós eljárás kétszintű, beágyazott algoritmust alkalmaz, amely a zónaparaméterek és a térfogatjellemző mennyiségek szukcesszív becslésén alapul. A belső ciklusban állandónak rögzített zónaparaméterek mellett keressük a mélységpontbeli jellemzők optimális értékeit, majd a külső ciklusban a zónaparaméterek változtatásával javítjuk a mélységpontbeli jellemzőket. Ezt a beágyazott technikát a gépi tanulás viszonylatában hiperparaméter-becslésnek nevezzük, ahol a zónaparaméterek felelnek meg a hiperparamétereknek. A térfogatjellemző mennyiségeket linearizált inverzióval finomítjuk, míg a zónális jellemzőket a differenciális evolúció módszerével becsljük. Mindkét optimalizációs technika lehetővé teszi a modellparaméterek becslési pontosságának jellemzését. A tanulmány bemutatja a kétféle módszer egyesítésével kifejlesztett genetikus metaalgoritmikus inverziós eljárást egy-, ill. kétdimenziós változatát. Az előbbi a fúrás teljes hossza mentén, míg az utóbbi több szomszédos fúrásban mért valamennyi szelvényadat együttes feldolgozásával önműködően szolgáltatja a térfogatjellemzők keresztshelvényeit és a releváns mélységtartományra vonatkozó zónaparaméterek állandó értékét. Mivel a zónaparamétereket hagyományosan labormérések alapján adjuk meg, így azoknak a fúrólukshelvényekből történő kinyerésével jelentősen csökkenthető a kőzetmintavétel- és a laboratóriumi mérések költségei.

## Szabó, N. P.: Inversion of direct-push logs supported by hyperparameter estimation

In this study, the petrophysical characteristics of shallow unsaturated sediments are determined by inversion of engineering geophysical sounding data. The zone parameters (i.e., rock matrix and fluid properties) and the volume-characteristic petrophysical quantities (e.g., water content, quartz content, clay content etc.) in the sonde response functions are estimated in a joint inversion procedure. The newly developed meta-algorithmic inversion method uses a two-level, embedded algorithm based on the successive estimation of zone parameters and volume-characteristic quantities. In addition to the zone parameters fixed as constant in the inner loop, we search for the optimal values of the depth-point characteristics, and then we improve the depth-point characteristics by changing the zone parameters in the outer loop. This embedded technique is called hyperparameter estimation in the terminology of machine learning, where the zone parameters correspond to the hyperparameters. Volumetric parameters are refined by linearized inversion, while zonal characteristics are estimated by the method of differential evolution. Both optimization techniques allow the characterization of the estimation accuracy of the model parameters. The study presents both the 1D and 2D variants of the genetic meta-algorithmic inversion method developed by combining the two methods. The former estimates the well logs of volume characteristics and constant values of zone parameters along a borehole automatically, while the latter automatically processes all well logging data measured in several adjacent wells to give the cross sections of the same petrophysical properties, and the zone parameters. Since zone parameters are traditionally given on the basis of laboratory measurements, the costs of rock sampling and laboratory measurements can be significantly reduced by extracting them directly from the well logs.

*Beérkezett:* 2021. november 12.; *elfogadva:* 2021. december 6.

## Bevezetés

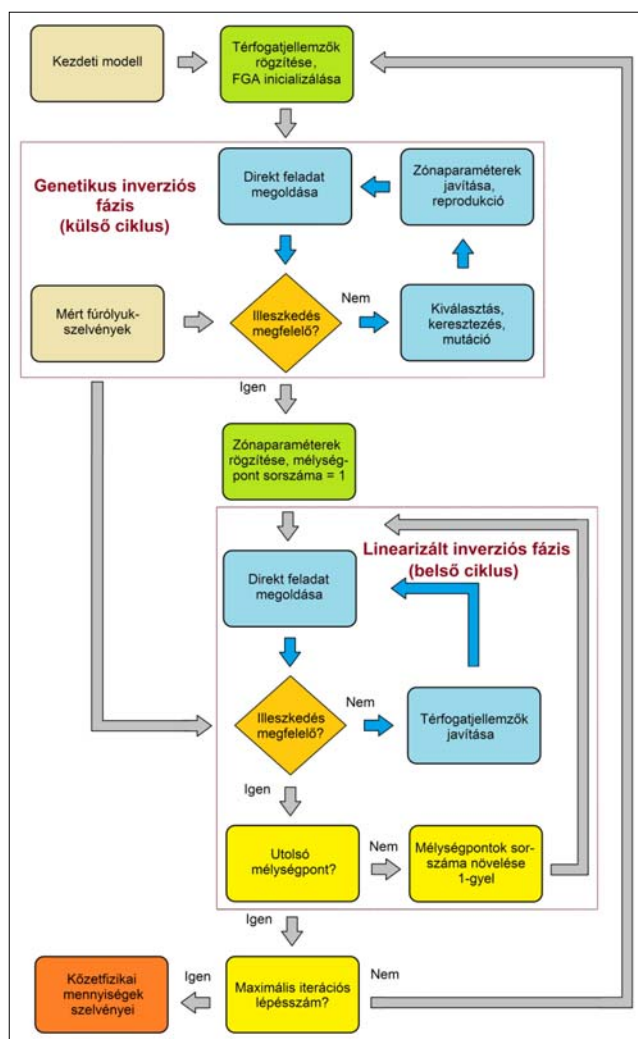
Felszínközeli üledékek víztartalmának, porozitásának, mátrixterfogatanak és agyagtartalmának meghatározására a mérnökgeofizikai szondázási (MGSZ) adatok együttes inverziója kínál lehetőséget. Drahos (2005) a fenti közetfizikai jellemzők számítására súlyozott legkisebb négyzetek módszerén alapuló mélységpontonkénti inverziós eljárást javasolt. A lokális inverziós megközelítés előnye, hogy a becsült közetfizikai paraméterek pontosságát és megbízhatóságát számszerűen jellemzi, viszont hátrányaként említhető, hogy az inverz feladat kismértékű túlhatározottsága (adat/ismeretlen arány) a zónaparaméterek kényszerű rögzítését vonja maga után. A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kifejlesztett intervalluminverziós módszerrel a fenti probléma hatékonyan kiküszöbölhető (Dobróka és szerzőtársai 2016). Az inverziós eljárással egy tetszőlegesen választott mélységintervallum adatrendszerét együttesen dolgozzuk fel, ahol a modellparaméterek mélységfüggvényét sorfejtéssel diszkretizáljuk. A becslési pontosság szignifikáns javulása a pontonkénti inverzióhoz képest 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. További előnye, hogy stabil inverziós eljárás keretében a hagyományos közetfizikai mennyiségeken kívül további ismeretlenek is bevonhatók az inverziós eljárásba (pl. a rétegvastagságok vagy a zónaparaméterek). A modelljellemzők minél részletesebb térbeli felbontása a sorfejtési együtthatók számának növelését (a túlhatározottság csökkenését) vonja maga után, ami korlátozza az intervalluminverziós módszer hatékonyságát.

A zónaparaméterek inverziós eljárásban történő (önműködő) 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 (és nem az egyedi adatokat) hasonlították össze. A kvarcmátrix és a rétegvíz fizikai (zonális) jellemzőit az optimalizációs eljárás során állandónak tekintik, miközben a többi mátrixjellemtől (ha több ásványtípusból épül fel a kőzet) az eredeti érték maximum  $\pm 20\%$ -ával engedik megváltoztatni. Emellett a kezdeti zónaparaméter értékek megállapítását hagyományos keresztdiagram-technikákra alapozzák. A zónaparaméterek inverziós meghatározását ugyancsak nehezíti, hogy a kérdéses mennyiségek sok esetben erősen korrelálnak egymással és a térfogatjellemtől 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 telítettségi kitevőre vonat-

kozó kis érzékenység a linearizált inverziós eljárás stabilitását erősen veszélyezteti (Dobróka, Szabó 2011). Mivel az inverz feladat (zónaparaméterek által befolyásolt) célfüggvénye számos helyi minimummal rendelkezik, ezért a linearizált szélsőérték-keresés helyett globális optimalizációs eljárás használata indokolt.

A globális optimumkeresés hatékony módszere az evolúciós számítási módszerek családjába tartozó genetikus algoritmus (GA) (Holland 1975). A kiváló adaptációs képességgel rendelkező optimalizációs eljárás az élő szervezetek természetes kiválasztódási mechanizmusának hasonlóságán alapul. Az egyedekből (esetünkben az inverziós modellekből) felépített populációt a véletlenkereső eljárás generációról generációra tökéletesíti. A modellparaméterek értékeit a kromoszómánc 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 hosszú távon 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 „hasznos” gének átadása az egymást követő generációk számára. A klasszikus genetikus algoritmus a modellparamétereket bináris séma szerint kódolja, ami 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 a tanulmányban szereplő inverz feladat számára.

A mérnökgeofizikai szondaválaszfüggvényekben szereplő térfogatjellemtől közetfizikai mennyiségek és a zónaparaméterek egyidejű meghatározására új, hiperparaméter-becsléssel támogatott inverziós eljárást javaslunk. Az inverziós eljárás első lépésében kezdeti modellt veszünk fel, majd a külső ciklusban valós kódolású genetikus algoritmuson 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 térfogatjellemtől mennyiségek számítása céljából. Az iteratív eljárás keretében a becsült térfogatjellemtől állandó értéke mellett globális optimalizációval újra kiszámítjuk a zónaparamétereket (külső ciklus), amivel a belső ciklusban tovább finomítjuk a térfogatjellemtől modellparamétereket. A fenti inverziós stratégián alapuló keresést megállási feltétel teljesüléséig folytatjuk (1. ábra). Az inverziós metaalgoritmus felhasználásával – a korábban önkényesen vagy tapasztalati úton választott állandók



1. ábra A genetikus metaalgoritmikus inverziós eljárás folyamat-ábrája

Figure 1 The flowchart of the genetic meta-algorithmic inversion procedure

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 metaalgoritmikus eljárások alapján (Nell és szerzőtársai 2011), a fenti inverziós módszert valós kódolású genetikus metaalgoritmikus alapú inverziós eljárásnak, röviden genetikus metaalgoritmikus inverzióknak (GMI) nevezzük.

A GMI eljárás hatékonyan alkalmazható a felszínközeli telítetlen zóna vizsgálatára. Az inverziós eljárás belső ciklusában a víz, a levegő, a közetmátrix és az agyag térfogatát mélységről mélységre (gyors) pontonkénti linearizált inverzióval becsüljük, míg az ismeretlennek választott zónaparamétereket evolúciós számítással (külső ciklus) optimalizáljuk. Az FGA alkalmazása a mért és a számított szelvényadatok legmegfelelőbb illeszkedését biztosítja, továbbá startmodellfüggetlen megoldást szolgáltat (Szabó, Dobróka 2019). 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.

## Mérnökgeofizikai szondázási adatok 1-D inverziója

Az 1-D 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

$$\mathbf{d}^{(m)} = [GR^{(m)}, \rho_b^{(m)}, \Phi_N^{(m)}, R^{(m)}]^T, \quad (1)$$

ahol  $GR^{(m)}$  a természetes-gamma-intenzitás,  $\rho_b^{(m)}$  a közet-sűrűség,  $\Phi_N^{(m)}$  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

$$\mathbf{m} = [V_w, V_{cl}, V_{ma}]^T, \quad (2)$$

ahol  $V_w$  jelöli a víztartalmat,  $V_{cl}$  az agyagtartalmat és  $V_{ma}$  a mátrixterfogatot. 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

$$d_s^{(sz)} = g_s(V_w, V_{cl}, V_{ma}, c_1, \dots, c_r, \dots, c_R) \quad (3)$$

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 történő meghatározását a zónaparaméterek rögzített értékei mellett hajtjuk végre. A mérnökgeofizikai szondázás direkt feladatának megoldására a Drahos (2005) által javasolt válaszegyenleteket használjuk fel:

$$GR = V_{cl}GR_{cl} + V_{ma}GR_{ma}, \quad (4)$$

$$\rho_b = V_w\rho_w + V_l\rho_l + V_{cl}\rho_{cl} + V_{ma}\rho_{ma}, \quad (5)$$

$$\Phi_N = V_w\Phi_{N,w} + V_l\Phi_{N,l} + V_{cl}\Phi_{N,cl} + V_{ma}\Phi_{N,ma}, \quad (6)$$

$$R = (V_w + V_l + V_{cl})^{-m} \times \left( \frac{V_{cl}/(V_w + V_{cl})}{R_{cl}} + \frac{1 - [V_{cl}/(V_w + V_{cl})]}{R_w} \right)^{-1} \times \left( \frac{V_w + V_{cl}}{V_w + V_l + V_{cl}} \right)^{-2}. \quad (7)$$

**I. táblázat** A (4)–(7) szondaválaszfüggvényekben szereplő zónaparaméterek választott értékei a Bátaapáti területen (az „ismeretleneket” inverzióval határozzuk meg)  
**Table 1** Selected values of the zone parameters in probe response functions (4)–(7) in the Bátaapáti area (“unknowns” are determined by inversion)

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Érték	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ -intenzitás	Mátrix	$GR_{ma}$	ismeretlen	kcpm
	Agyag	$GR_{cl}$	ismeretlen	
Közetsűrűség	Mátrix	$\rho_{ma}$	ismeretlen	g/cm <sup>3</sup>
	Agyag	$\rho_{cl}$	ismeretlen	
	Rétegvíz	$\rho_w$	1,0	
	Levegő	$\rho_l$	0	
Neutronporozitás	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	$m$	1,7	

ahol a zónális jellemzők jelentését és választott értékét az 1. táblázat tartalmazza.

A GMI módszer globális optimalizációs (evolúciós) fázisában a zónaparaméterek becslésére heurisztikus keresést alkalmazunk (külső ciklus). Az FGA eljárással kizárólag a zónaparaméterek értékét javítjuk, miközben a térfogatjellemzők aktuális értékét állandónak rögzítjük. Az előzetes inverziós kísérletek és korrelációs számítás 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

$$\mathbf{c} = [GR_{cl}, GR_{ma}, R_{cl}, \rho_{cl}, \rho_{ma}, \Phi_{N,cl}]^T, \quad (8)$$

ahol a „cl” és „ma” indexek az agyagra és a kőzetmátrixra vonatkozó zónaparamétereket azonosítják. A (8) oszlopvektorban szereplő állandó értékű zónaparaméterek meghatározása érdekében a fúrásban mért összes adatot az  $N \times S$  méretű  $D^{(m)}$  adatmátrixba gyűjtjük, ahol  $N$  a vizsgált mélységpontok száma,  $S$  az alkalmazott szondák száma. Az inverziós eljárás nem engedi meg a pontbeli adathiányt, így az invertált adatok teljes száma a vizsgált mélységtartományban  $N' = N \cdot S$  (ahol  $N$  a fúrásban megfigyelt összes mélységpont száma).

Az FGA eljárást a zónaparaméterek becslésére a következőképpen alkalmazzuk. A kezdeti populáció egyedeit a (8) véletlen modellvektorokkal képezzük. Jelöljük a modellpopuláció  $j$ -edik egyedét a  $\mathbf{c}$  vektorral ( $j = 1, 2, \dots, J$ , ahol  $J$  a populáció mérete), melynek alkalmassága az alábbi (fitness-) függvénnyel adható meg:

$$F(\mathbf{c}_j) = - \left[ (NS)^{-1} \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \left( \frac{D_{ns}^{(m)} - g_s(\mathbf{m}_n, \mathbf{c}_j)}{D_{ns}^{(m)}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

ahol  $D_{ns}^{(m)}$  az  $n$ -edik mélységben az  $s$ -edik szelvényezési eszközzel mért adatot jelöli, míg az  $\mathbf{m}_n$  vektor ugyanabban a mélységben (a belső ciklusban) becsült és állandónak rögzített térfogatjellemző mennyiségeket tartalmazza. Az  $F(\mathbf{c}) = \max$  optimalizációs feladat megoldása érdekében valós genetikus műveleteket alkalmazunk (Houck és szerzőtársai 1995). Az egyedek párosítását ún. versenyszerű kiválasztással 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, ami 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  $\mathbf{c}_1$  és  $\mathbf{c}_2$  zónaparaméter-vektorokat a következőképpen módosítja:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{c}_1^* &= \mathbf{c}_1 + \gamma(\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_2) \\ \mathbf{c}_2^* &= \mathbf{c}_1 \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

ahol  $\mathbf{c}_1^*$  és  $\mathbf{c}_2^*$  a keresztezésen átesett (új) egyedeket, míg  $\gamma$  a  $[0, 1]$  tartományból egyenletes valószínűséggel generált számot jelöli. A (10) egyenletrendszer alkalmazása sikeres, hogy ha a keresztezés előtt fennáll az  $F(\mathbf{c}_2) < F(\mathbf{c}_1)$  egyenlőtlenség. Ha a  $\mathbf{c}_1^*$  zónaparaméter-vektor valamely eleme az előírt értéktartományon kívül esik, akkor a heurisztikus keresztezést megismételjük. A harmadik genetikus operátorral, az egyenletes mutációval a zónaparaméter-vektor  $\nu$ -edik elemét egy valós véletlen számra ( $\eta$ ) cseréljük:

$$c_{1,r}^{**} = \begin{cases} \eta, & \text{ha } r = \nu \\ c_{1,r}^*, & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (11)$$

ahol  $c_{1,r}^{**}$  a mutált egyed  $r$ -edik zónaparamétere ( $r = 1, 2, \dots, R$ ). A fenti genetikus alapműveletek ismételt alkalmazásával a modellpopuláció összetételét folyamatosan változtatjuk, és az egymást követő generációk átlagos alkalmaságát 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.

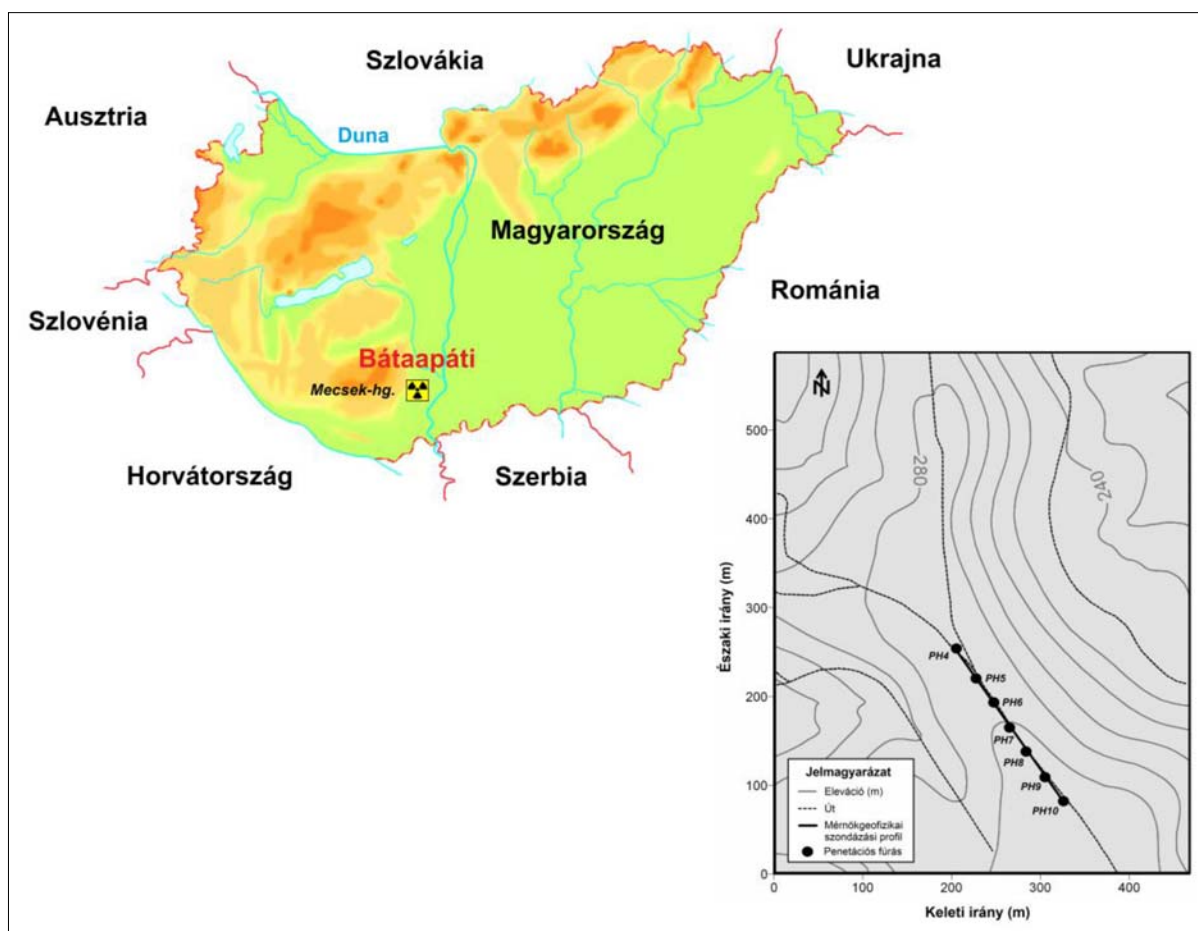
## Mérnökgeofizikai szondázási adatok 2-D inverziója

A többdimenziós genetikus metaalgoritmikus 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 (oldalirányban 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 alkalmaságát valamennyi fúrásban mért és számított adat eltérése ismeretében adjuk meg:

$$F^*(c_j) = - \left[ (N^*S)^{-1} \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^{N_h} \sum_{s=1}^S \left( \frac{D_{hns}^{(m)} - g_s(\mathbf{m}_{hm}, c_j)}{D_{hns}^{(m)}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

ahol  $\mathbf{m}_{hm}$  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,  $S$  a mért paraméterek száma).



2. ábra A teszterület Bataapati térségében és az MGSZ fúrások által meghatározott szelvény  
Figure 2 The investigation site near Bataapati and the line of the penetration holes

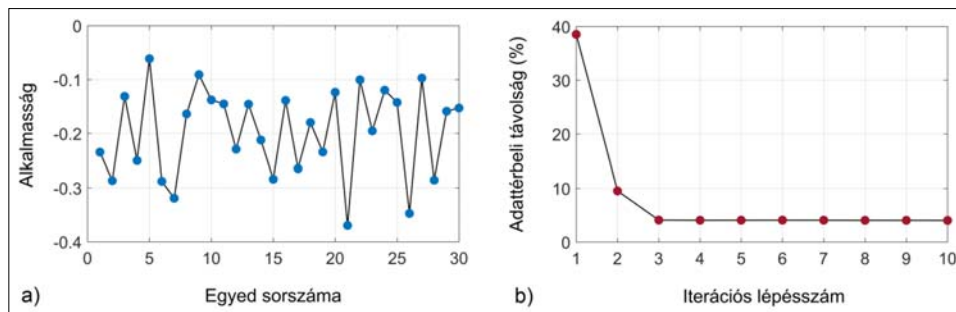
Az  $F^*(c) = \max$  optimalizációs feladatot a kiválasztás és a (10)–(11) műveletek ismételt alkalmazásával oldjuk meg.

### A GMI módszer terepi alkalmazása

Az inverziós módszer alkalmazását a Bátaapáti (Üveghuta) területen az Elgoscár-2000 Környezettechnológiai és Vízgazdálkodási Kft. által mélyített 7 sekély mélységű fúrásban (PH 4–PH 10) mutatjuk be (2. ábra). A fúrások egy 550 m hosszúságú mérési vonal mentén, közelítőleg 50 m távolságra helyezkednek el egymástól. Az inverziós vizsgálatokba bevont első fúrás (PH 4) az  $x = 150$  m szelvény menti távolságnál található. A mérnökgeofizikai szondázások fő célja a paleotalajok tagolása, alapparaméterek meghatározása és a vízföldtani viszonyok megismerése volt. A felszínközeli *in situ* mérések egy komplex geofizikai kutatás részét képezték, mely a Bátaapáti kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék-tároló telephely részletes jellemzését tűzte ki célul (Vértesy és szerzőtársai 2004). A szondázásokat a gránitra települt löszös képződményben, a talajvízszint feletti régióban (~0–27 m mélységben) végezték. A felszínközeli üledékek közetfizikai paramétereit korábban Drahos (2005) mélységpontonkénti inverzióval határozta meg, ennek eredményét felhasználhatjuk az inverziós startmodell megadásánál.

Először tekintsük az egydimenziós esetet! A PH 4 fúrásban adottak az (1) vektorban szereplő szelvényadatok, míg a (2) modellvektor és a (8) zónaparaméter-vektor

elemeit ismeretlennek tekintjük. A (4)–(7) szondaválaszfüggvényekben ismert állandónak tekintett zónaparamétereket az 1. táblázat tartalmazza. A térfogatjellemzők becslési hibája (modellkovariancia-mátrix) a bemenő adatok hibája (adatkovariancia-mátrix) ismeretében számíthatók (Menke 1984). A mért mennyiségek varianciáját az alábbiak választottuk:  $\sigma_{GR}^2 = 0,05 \text{ kcpm}^2$ ,  $\sigma_{\rho_b}^2 = 0,01 \text{ g}^2/\text{cm}^6$ ,  $\sigma_{\Phi_N}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma_R^2 = 0,05 \text{ ohm}^2 \text{ m}^2$  (Drahos 2005). A mért szelvények átlagos korrelációja közepes mértékű (a Pearson-féle korrelációs együttható:  $\rho = 0,55$ ). Az 1-D GMI eljárás linerizált inverziós fázisában (belső ciklus) a (2) modellvektorban szereplő térfogatjellemző paramétereket javítjuk, melyek kiindulási értéke valamennyi mélységpontban:  $V_{w,0} = 0,30 \text{ v/v}$ ,  $V_{ma,0} = 0,40 \text{ v/v}$ ,  $V_{cl,0} = 0,15 \text{ v/v}$ . A linearizált optimumkeresés (Marquardt-inverzió) 10 iterációs lépést vesz igénybe, ahol a csillapítási tényező zérus értéke mellett stabil inverziós eljárást kapunk. A linearizált inverziós fázis befejezése után a (8) vektorban megadott zónaparamétereket az FGA eljárással határozzuk meg (külső ciklus). A kezdeti populáció 30 egyedének alkalmazási értékét a 3a. ábra mutatja, ahol a (9) formula alapján számított  $F$  értékét  $-100$ -zal szorozva a mért és a számított mérnökgeofizikai szondázási szelvények relatív adattávolságát kapjuk. A zónaparaméterek keresési tartományát a 2. 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 modellek megtartása érdekében az elitizmus szabályát alkal-



3. ábra A genetikus metaalgoritmikus inverziós eljárás kiinduló populációja egyedei fitnessértékei (a), az 1-D GMI eljárás konvergenciája (b)

Figure 3 Fitness values of individuals in the initial population of the genetic meta-algorithmic inversion procedure (a), development of convergence of the 1-D GMI method (b)

2. táblázat Az ismeretlen zónaparaméterek keresési tartománya és az 1-D GMI eljárással becsült értékei és hibája  
Table 2 Searching range for unknown zone parameters and their values and errors estimated by 1D GMI procedure

Zónaparaméter	Keresési tartomány	Inverzióval becsült érték	Paraméterbecslés 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	$\text{g}/\text{cm}^3$
$\rho_{ma}$	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

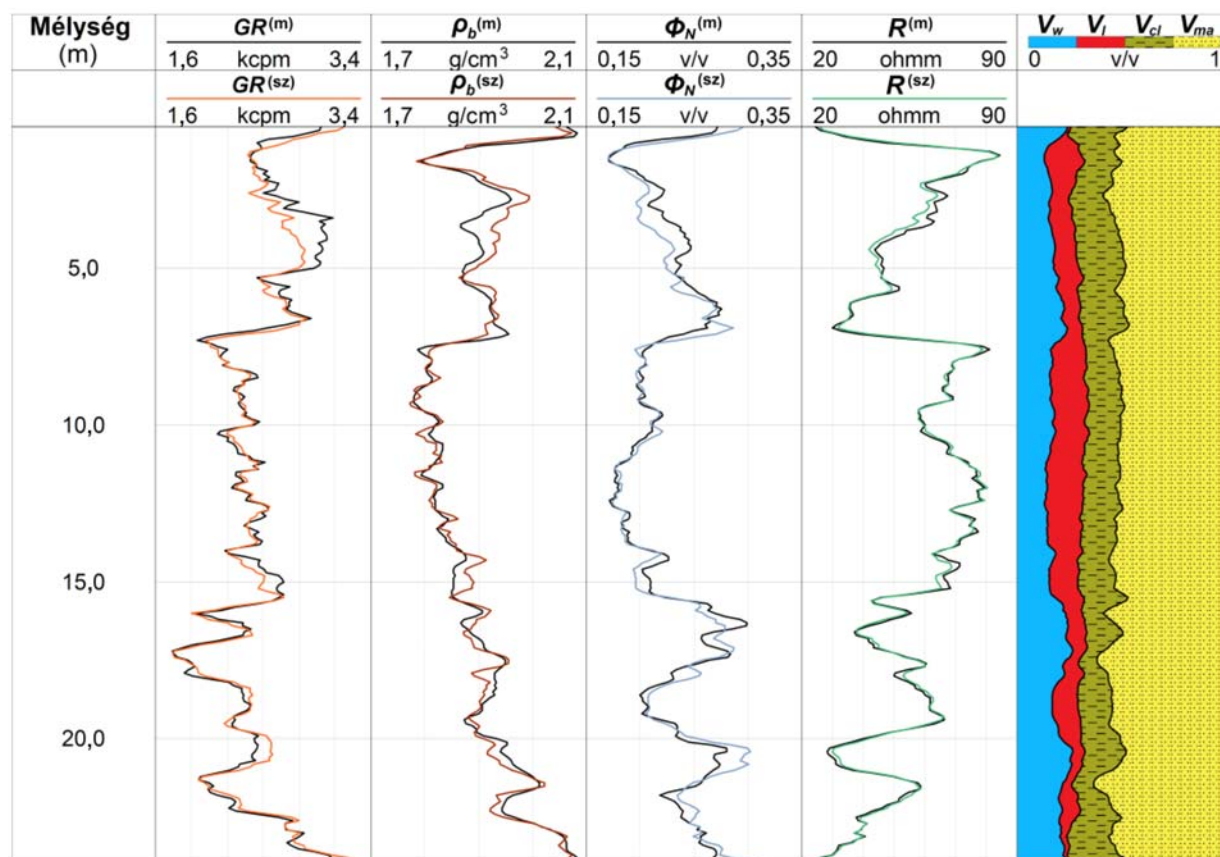
mazzuk, miszerint az új populáció legrosszabb egyedét felcseréljük a kiinduló populáció legalakalmasabb egyedével. Az 1-D GMI eljárás külső ciklusában 1000 generációt tökéletesítünk, míg a teljes metaalgoritmikus inverziós folyamatot (a külső és belső ciklusban szereplő utasítások egymást követő ismételt alkalmazását) 10 iterációs lépésben folytatjuk. A linearizált és globális optimalizációs módszerek kombinálásával a mért és a számított szelvényadatok egyezése stabil inverziós eljárásban javítható. A mért és a számított adatok (mért adatokkal normált) eltérését az RMSE- (Root Mean Square Error) értékkel jellemezzük, amely az inverziós eljárás elején  $D_d = 39\%$ , míg a (teljes inverziós eljárás) végén  $D_d = 4\%$ -ra csökken (3b. ábra).

Az 1-D GMI eljárással becsült zónaparamétereket és megbízhatósági tartományait a 2. táblázat tartalmazza, míg a térfogatjellemző mennyiségek szelvényei a 4. ábra utolsó oszlopában láthatók. A mért és a számított mérnökeofizikai 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,  $\sigma_{V_{cl}} = 0,05$  v/v, azok korrelációja közepes mértékű ( $\rho = 0,51$ ). A numerikus eredmények megerősítik az 1-D GMI eljárás stabilitását és terepi adatokon való alkalmazhatóságát. Az egydimenziós inverz feladat megoldása egy nyolcmagos processzorral

felszerelt munkaállomás használatával kb. két és félperc CPU-időt igényel.

A kétdimenziós inverziós eljárást a PH 4–10 jelű (a 2. ábrán az  $x = 150$  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  $\rho = 0,27$ , ami a PH 4 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 (4)–(7) válaszegyenletek alapján számítjuk. Az FGA eljárás vezérlő paraméterei megegyeznek az 1-D GMI eljárásban alkalmazottakkal a különbséggel, hogy a generációk maximális számát ebben az esetben 250-nek írjuk elő. A 2-D GMI eljárás stabil és megbízható megoldást szolgáltat, a relatív adattávolság  $D_d = 42,2\%$ -ról az inverziós eljárás végére 4,9%-ra csökken. A térfogatjellemzők krigeléssel előállított szelvényei az 5. ábrán láthatók, míg a zónaparaméterek és becslési hibájuk hasonlóak az 1-D GMI eljárás eredményéhez (3. táblázat).

A GMI módszer lehetőséget teremt a becsült térfogatjellemző mennyiségek és a zónaparaméterek megbízhatóságának meghatározására, valamint az inverziós

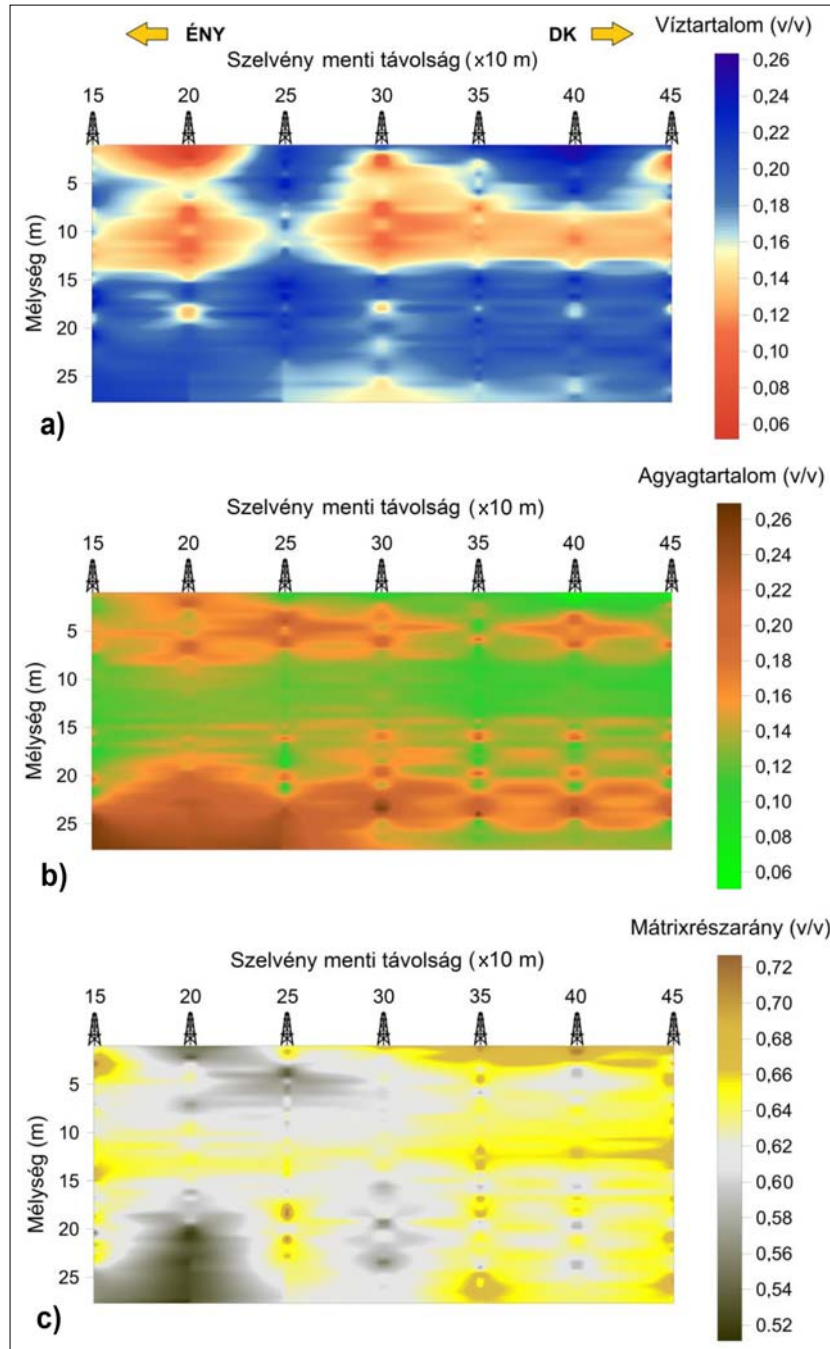


4. ábra | Az 1-D GMI eljárás eredménye a PH 4 jelű fúrásban

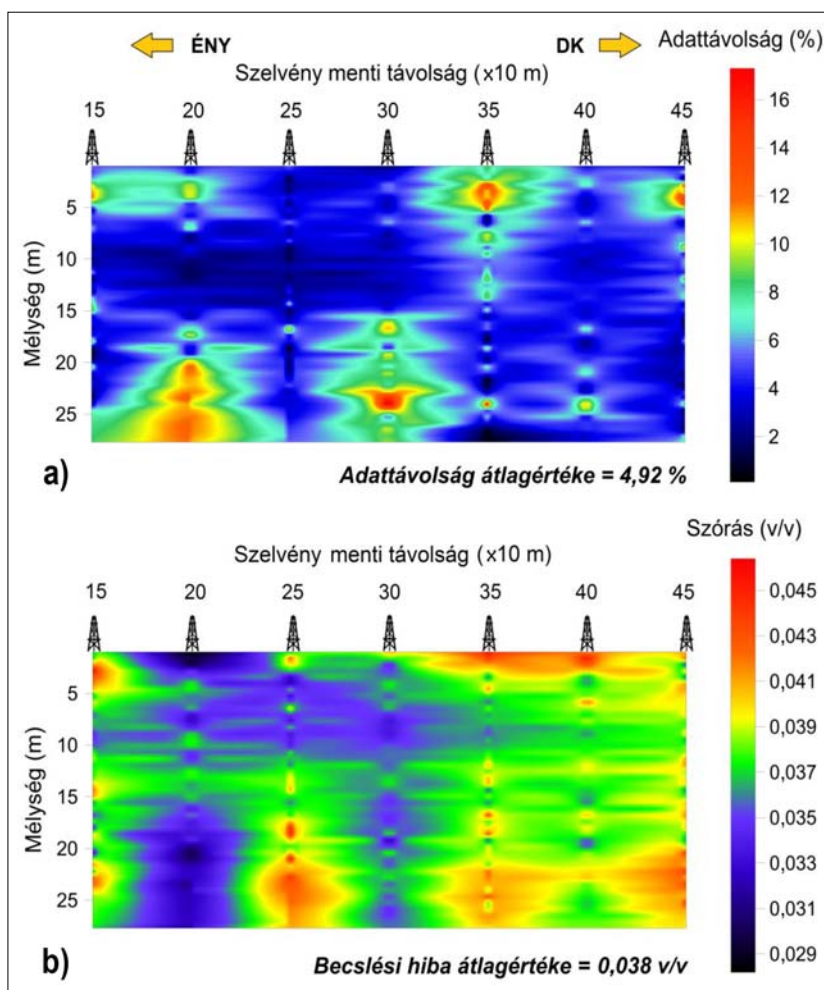
Figure 4 | The inversion result of the 1-D GMI procedure in well PH 4

**3. táblázat** | Az ismeretlen zónaparaméterek keresési tartománya és az 2-D GMI eljárással becsült értékei és hibája  
**Table 3** | Searching range for unknown zone parameters and their values and errors estimated by 2D GMI procedure

Zónaparaméter	Keresési tartomány	Inverzióval becsült érték	Paraméterbecslés 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



**5. ábra** | A 2-D GMI eljárás eredménye a PH 4–10 jelű fúrásokban  
**Figure 5** | The inversion result of the 2-D GMI procedure in wells PH 4–10



6. ábra | A 2-D GMI eljárás eredménye minőségi paramétereinek szelvényei a PH 4–10 jelű fúrásokban  
 Figure 6 | Cross sections of the quality parameters of the result of the 2-D GMI procedure in wells PH 4–10

eredmény alapján számított és mért adatok illeszkedésének jellemzésére. A relatív adattérbeli távolság (RMSE) szelvény a 6a. ábrán látható, melynek átlagértéke  $D_d = 4,9\%$ . A kapott érték a mért adatokat terhelő zaj mértékével arányos eredményt mutat. A nagy adattávolságértékek a mérési adatok zajosabb régióinál jelentkeznek, valamint a fúrások eltérő talpmélységből adódó interpolációs hibáknak tulajdoníthatóak. A térfogatjellemzők becslési hibáját a modellkovariancia-mátrix felhasználásával adjuk meg, míg a zónaparaméterek megbízhatóságát az FGA eljárás által becsült 30 modell aktuális paramétereinek szórásával jellemezzük (3. táblázat). Az előbbi meghatározásához a mért adatok varianciáját Drahos (2005) alapján adtuk meg. A térfogatjellemző mennyiségek átlagos becslési hibájának szelvénye a 6b. 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  $\sim 4$ -5 percet igényel egy nyolcmagos processzorral rendelkező munkaállomáson.

## Következtetések

A karotázs direkt feladatban szereplő zónaparaméterek becslésére új inverziós megközelítést javasolunk. Az evolúciós számítási eljáráson alapuló metaalgoritmikus inverziós eljárással a felszínközeli laza rétegek térfogatjellemzőit és a szondaválaszfüggvényekben szereplő mátrix- és fluidumjellemzőket közös inverziós eljárásban határozhatjuk meg. A zónaparaméterek inverziós eljárással történő előállításának előnye, hogy javítja az előremodellezés hatékonyságát (direkt feladat megoldását) és ez által az inverziós eljárással becsült modellparaméterek pontosságát. A genetikus metaalgoritmikus 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 térészben is vizsgálható.

A zónaparaméterek inverzióon belül történő meghatározása a mérnökgeofizikai szondázás területén is egyedülálló, ugyanis a jelenleg alkalmazott pontonkénti inverziós módszerek e problémára nem kínálnak megoldást. Az új

metaalgoritmus az önkényesen felvett állandók helyett automatikusan számítja a zónaparamétereket. Korábban kimutattam, hogy a zónaparaméterek alkalmazási függvénye számos lokális maximumhellyel rendelkezik, ami szükségessé teszi a globális optimalizációs módszer alkalmazását. A GMI eljárás keretében genetikus algoritmust alkalmaztunk a zónaparaméterek állandó értékeinek meghatározására. A zónaparaméterek becslési hibáját az utolsó generációban becsült modellek (egyedek) megfelelő paraméterei szórásai átlagértékeként számítottuk. A zónaparaméterek aktuális értékét rögzítve a GMI eljárás belső ciklusában a térfogatjellemzők vertikális változását és becslési hibáját linearizált mélységpontenkénti inverzióval határoztuk meg. A tanulmányban bemutatott terepi példában a pontenkénti inverziós módszernél alkalmazott Gauss-féle legkisebb négyzetek módszere nem igényelt csillapítást, ami az inverziós eljárás stabilitását mutatja. A GMI eljárást kiterjesztettük kétdimenziós közetfizikai modell meghatározására is, melynek keretében több szomszédos fúrás szelvényadatát közösen dolgozzuk fel. Az állandó értékű zónaparamétereket genetikus algoritmus alkalmazásával számítottuk a mérnök-szondázás teljes mélységtartományára, míg a térfogatjellemzőket fúrásról fúrásra linearizált pontenkénti inverziós eljárások sorozatával határozzuk meg. Az adattérbeli illeszkedést és a térfogatjellemző paraméterek megbízhatóságát szelvényyszerűen ábrázoltuk.

A GMI módszer továbbfejlesztését a jövőben az intervalluminverziós módszerrel való kombinálással tervezzük megvalósítani, ami nemcsak a víztároló formációk, hanem a szénhidrogén-tároló képződmények zónaparamétereinek meghatározására is lehetőséget nyújt. Különösen előnyös lehet az alkalmazása nem hagyományos tárolók vizsgálatában, ahol számos ismeretlen mellett nagyszámú zónaparaméteret is szükséges meghatározni (pl. a kőolaj, pórustartalom és számos ásványi összetevő fizikai jellemzőit). A mélységpontenkénti inverziós módszerrel becsült térfogatjellemző mennyiségek még pontosabb és megbízhatóbb becslésre használhatjuk az intervalluminverziós módszert, azonban ez az inverziós eljárás több számítási időt vesz igénybe. A globális inverziós módszer megvalósítására a párhuzamos számítási technika kiválóan alkalmazható, mellyel a futási idő jelentősen csökkenthető. A genetikus metaalgoritmikus inverziós eljárás ezenkívül széles körű felhasználást nyerhet a geofizikai inverz feladatok célfüggvényeiben szereplő paraméterek (csillapítási tényező, büntetőfüggvények és vektornormák) optimalizálásában.

## Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott kutatást az Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta az K-135323 számú (OTKA-) projekt keretében. A szerző köszönetet mond Dobróka Mihály professzornak (Miskolci Egyetem), Drahos Dezső docensnek (Eötvös Loránd Tudományegyetem) és Stickel János ügyvezető igazgatónak (Elgoscár 2000 Kft.) a szakmai támogatásért.

## A tanulmány szerzője

Szabó Norbert Péter

## Hivatkozások

- Balázs L. (2015): Inversion of well logging measurements with a constant interval parameter. *Geosciences and Engineering* 4, 93–104.
- 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., Tóth J., Vass P. (2016): 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.
- Holland J. H. (1975): *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, 232 p.
- 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.
- Menke W. (1984): *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press Inc., 289 p.
- Michalewicz Z. (1992): *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. Springer, 387 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. In: SPG 6th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics “Kolkata 2006”, pp. 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 5th International Conference, LION 5, pp. 600–615.
- Szabó N. P., Dobróka M. (2019): Series expansion-based genetic inversion of wireline logging data. *Mathematical Geosciences*, 51, 811–835.
- 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, pp. 239–256.