

Dekonvolúciós szűrési lehetőségek a geoelektromos üregkutatásban¹

NYÁRI ZSUZSANNA, FANCSIK TAMÁS²

Üregkutatási feladatok megoldására jól alkalmazhatók a négyelektrodás fajlagos ellenállás módszerek. Ezen kutatások részben arra irányulnak, hogy — összetett földtani környezetben is — nagy pontossággal meg tudjuk jósolni az üregek számát, illetve azok pozícióját. E problémának a megoldására egy archeogeofizikai alkalmazásra kidolgozott dekonvolúciós módszert fejlesztettünk tovább.

A cikkben bemutatjuk, hogy a továbbfejlesztett eljárás nemcsak a kiindulási módszerhez képest eredményez javulást a hatópozíció meghatározásában, de olyan bonyolultabb geológiai szituációban is eredményes, ahol — a napjainkban igen elterjedten alkalmazott — FD inverziós módszer sem tudott üreget kimutatni.

Zs. NYÁRI, T. FANCSIK: Filtering possibilities using deconvolution method in geoelectric cavity detection

Configurations with four electrodes are widely used in detecting cavities. The aim of the measurements is to estimate reliably the number and the positions of the cavities. Solving this problem with deconvolution has been invented for archeogeophysical applications.

This paper presents the development of that method which determines the position of the cavity more reliably, and can be effectively used in such cases where a conventional FD inversion method failed.

Bevezetés

Az üregek (pincék, barlangok stb.) helyzetének, illetve egyéb paramétereinek meghatározása rendszeres feladat a mérnökgeofizikai gyakorlatban. Többek között az Országos Pinceprogram keretében — veszélyes üregek lokalizálására — évről évre egyre több megrendelést kap az ELGI Mérnökgeofizikai Főosztálya. Az ilyen jellegű feladatok megoldása során a megrendelő által adott, bizonytalan ismereteken alapuló tájékoztatás után kell a méréseket megtervezni, majd a feldolgozást követően megbízható információval szolgálni.

A hatók horizontális és vertikális helyzetének, méretének megállapítása céljából a mért adatok valamilyen inverziós eljárással történő feldolgozására van szükség. Előfordul, hogy a megrendelő felvilágosítással tud szolgálni a vizsgált területen található üregek hozzávetőleges mélységéről, méretéről, esetlegesen a tartalmáról is (levegővel, vízzel telt, tömedékelt), ami alapján az inverziós startmodell kialakítása megtörténhet. A kutatandó objektumok számáról, pozíciójáról azonban általában nincs információ, az inverzió eredményének megbízhatósága azonban tovább növelhető e paraméterek megfelelő becslése alapján.

Az alább ismertetendő eljárás segítségével az üreg vagy üregek helyzetét és számát összetettebb földtani szituációban is elég jól megjósolhatjuk. A módszer a ható vagy hatók középpontjának felszíni vetületét adja meg, több üreg esetén pedig jó felbontást biztosít. Ennek megfelelően az eljárás minden további nélkül alkalmazható önálló üregkutatási feldolgozási módszerként, de beépíthető valamilyen inverziós eljárásba, növelve ezzel az inverzió eredményének megbízhatóságát. Önálló módszerként tekintve, a vizsgálatok során összehasonlítjuk a teljesítőképeségét

egy FD inverziós módszerrel, aminek során látni fogjuk, hogy a felbontóképessége bizonyos esetekben felülmúlhatja az FD inverzióét, sőt olyan példát is bemutatunk, ahol a hatót akkor is lokalizálni lehetett, amikor az FD inverzió nem mutatott ki üreget.

Az eljárás ismertetése

Archeogeofizikai kutatások kapcsán a hatók helyzetének meghatározására TSOKSAS, TSOURLOS [1997] olyan dekonvolúciós eljárást dolgozott ki, amely a következő elven alapul. A mérési vonal mentén a $\rho(x)$ anomália úgy tekinthető, mint valamilyen (például az origóban adott) $\rho_0(x)$ görbe és egy $D(x)$ pozíciófüggvény konvolúciója:

$$\rho(x) = \rho_0(x) * D(x) ,$$

ahol $D(x)$ ideális esetben egy $\delta(x-x_1)$ jellegű Dirac-delta függvény, amely a megfelelő helyre történő eltolást okozza. A szerzők a $\rho_0(x)$ -et egy nagyellenállású hatót tartalmazó homogén féltér esetén FD modellezéssel állították elő, ahonnan — a mérési és modellezési görbe nem túl jelentős eltéréseinek feltételezésével — a pozíciófüggvényt a

$$\rho(x) * \rho_0^{-1}(x) = D(x) \quad (1)$$

konvolúció alapján kapták, ahol

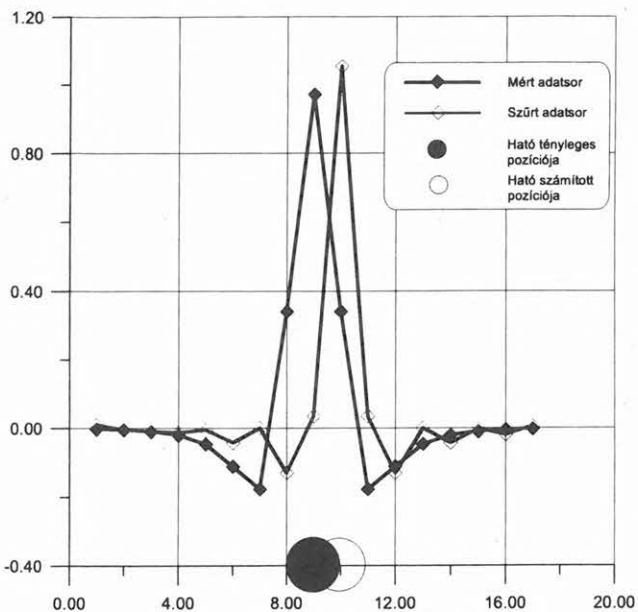
$$\rho_0(x) * \rho_0^{-1}(x) = \delta(x) .$$

A pozíciófüggvény tehát kijelöli a ható helyzetét és — tekintve, hogy a Dirac-féle deltafüggvényt közelíti — a ható anomáliától keskenyebb szinuszkardinális jellegű függvényként jelenik meg az (1)-ben kijelölt művelet elvégzése után. Az (1) kifejezés által meghatározott konvolúciót üregkutatási problémára szeretnénk alkalmazni, nézzük meg tehát, hogy a hivatkozott szerzők által közölt szűrőegyütthatókkal (a $\rho_0^{-1}(x)$ értékekkel) egy üreg

¹ A cikk rövidített változata elhangzott Pécsen a Magyar Geofizikusok Egyesületének vándorgyűlésén 1998. szeptember 23-án

² Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17-23.

hatásának modellezése esetén milyen eredményre jutunk. (Az üreghatást analitikusan számítottuk, összhangba hozva a modell paramétereit azzal a modellel, melyre a $\rho_0^{-1}(x)$ értékei adottak voltak.) Az 1. ábrán látható, hogy az így kapott pozíció függvény maximuma eltolódik a ható tényleges helyzetéhez képest, olyannyira, hogy kétséges az üreg feltárásának lehetősége is. Az itt bemutatott eltolás a hivatkozott publikációban megtalálható eredmények némelyikén is jelentkeznek. A továbbiakban azt vizsgáltuk, hogy a csepert sem jelentéktelen mértékű eltolás kedvezőtlen hatása hogyan küszöbölhető ki.



1. ábra. A TSOKAS, TSOURLOS [1997] által kidolgozott dekonvolúciós szűrés eredménye analitikusan számított üreg adatokra dipól elrendezés esetén

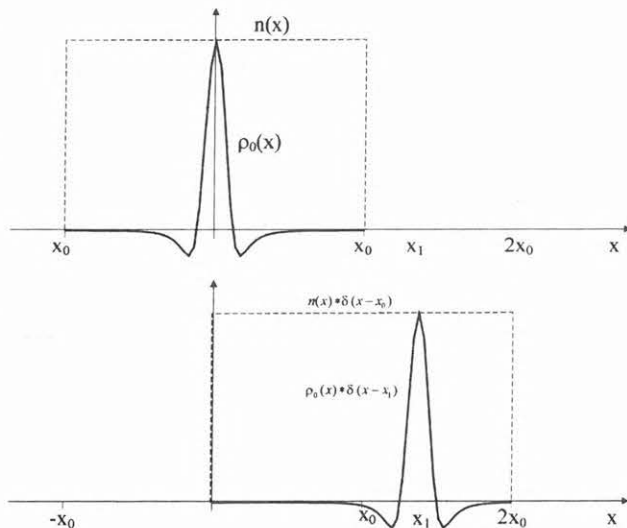
Fig. 1. Analytically calculated cavity anomaly in case of dipole profiling and the result of the deconvolution filtering invented by TSOKAS, TSOURLOS [1997]

A mérési vonal egy x_1 pontjánál található $\rho(x)$ anomáliát mint véges számú diszkrét minta által reprezentált függvényt fogjuk fel, amelyet (a felbontástól eltekintve) az origóban érvényes $\rho_0(x)$ függvényből a következőképpen kapunk. A 2. ábrán látható, hogy a $\rho_0(x)$ -et egy $\delta(x-x_1)$ függvény tolja az x_1 pontba, továbbá egy origó középpű, de a mérés térbeli kiterjedésével egyenlő ($2x_0$) hosszúságú $n(x)$ négyszögimpulzus — x_0 eltolás mellett — csonkítja. Röviden:

$$\rho(x) = [\rho_0(x) * \delta(x-x_1)] [n(x) * \delta(x-x_0)]$$

Abból indultunk ki tehát (összhangban az idézett publikációval), hogy a mérési és a modellezett fajlagos ellenállásgörbe lényegében megegyezik, csak a pozíciójuk eltérő. Az origóban adott, modellezett görbe felhasználásával ekkor — (1) összefüggés alapján — a pozíciófüggvény a következőképpen adódik:

$$D(x) = \{[\rho_0(x) * \delta(x-x_1)] [n(x) * \delta(x-x_0)]\} * \{\rho_0(x)n(x)\}^{-1} \quad (2)$$



2. ábra. Az eltolás és a csonkítás hatása az adatrendszerre

Fig. 2. Effects of shift and truncation on the dataset

Nyilván a modellezett görbét is csonkítani kell, legcélszerűbben a mérési vonalnak megfelelő hossz alapul véve. A (2) kifejezést a koordináta szerinti Fourier-transzformáció segítségével is felírhatjuk. Ha a térfrekvenciát k -val jelöljük, akkor (2) a következő alakot ölti:

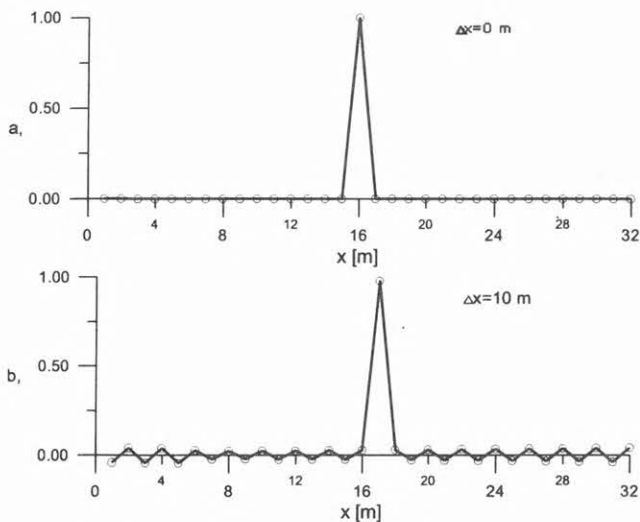
$$D(k) = \frac{[e^{-ikx_1} R_0(k)] * [e^{-ikx_0} N(k)]}{R_0(k) * N(k)} \quad (3)$$

(3) némi átalakítása után

$$D(k) = e^{-ikx_1} \frac{R_0(k) * [N(k)e^{-ik(x_0-x_1)}]}{R_0(k) * N(k)} \quad (4)$$

Látható, hogy a számláló és a nevező nem egyezik meg egymással. A pozíciófüggvényre a Dirac-féle $\delta(x-x_1)$ függvényt a várakozásnak megfelelően visszakapjuk akkor, ha a számlálóban az $e^{-ik(x_0-x_1)}$ tag elhanyagolható. Ebben az esetben a mérés körülményei által meghatározott tartományon a pozíciófüggvényre csak akkor adódik a $\delta(x-x_1)$ transzformált alakja, ha a számlálóból a zavaró tag eliminálható, ami akkor lehetséges, ha $x_0 \approx x_1$ vagyis $\Delta x = 0$. A 3. ábrán ennek a „zavaró” tagnak a szerepét mutatjuk be. Az ábra a) részén az az eset található, amikor az $x=16$ m-ben található üreg esetén a zavaró tag elhanyagolható, míg az ábra b) része a $\Delta x = x_0 - x_1 = 10$ m-nek megfelelő esetet tünteti fel, ahol az eltolódás megjelenik, az egyszerű dekonvolúció nem a tényleges helyén jelzi a hatót.

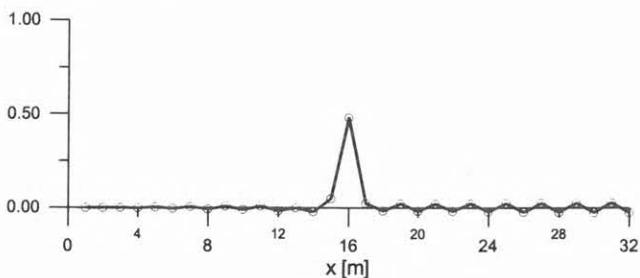
A „zavaró tag” hatásának kiküszöbölésére azt a lehetőséget vizsgáltuk, hogy a modellezett $\rho_0(x)$ görbének és az $n(x)$ -nek változtatjuk az egymáshoz viszonyított helyzetét, ami azt jelenti, hogy a nevezőben megjelenik egy $e^{-ik(x_0-x')}$ jellegű mennyiség. Ekkor visszakaphatjuk a Dirac-delta jellegű pozíciófüggvényt, amennyiben $x' \approx x_1$. Mivel az üreg helyzete ismeretlen, célszerű a vesszős koordinátával minden egyes mérési pontot érinteni (azaz az üreg középpontját ezen pontok alá feltételezni), és a különböző pozíciófüggvényeket összegezni.



3. ábra. A zavaró tag hatása a dekonvolúció eredményére

Fig. 3. Effect of the disturbing part on the result of deconvolution

Látható a 4. ábrán, hogy a pozíciófüggvények összege a ható helyzetének megfelelően adja a pozíciót, ami az 1. ábra eredményének tükrében jelentős javulást jelent. A zavaró tag ily módon történő eltávolítását keresőüreg módszernek neveztük el, az összegzést pedig horizontális összegzésnek. A keresőüreg módszer lényeges eleme még, hogy a $\rho_0(x)$ görbét a homogén feltérben található üreg felszínén létrehozott látszólagos fajlagos ellenállás anomáliájának analitikusan adott alakjával modelleztük NYÁRI [1997] alapján.



4. ábra. A dekonvolúció eredménye horizontális összegzés után

Fig. 4. Result of deconvolution after horizontal stacking

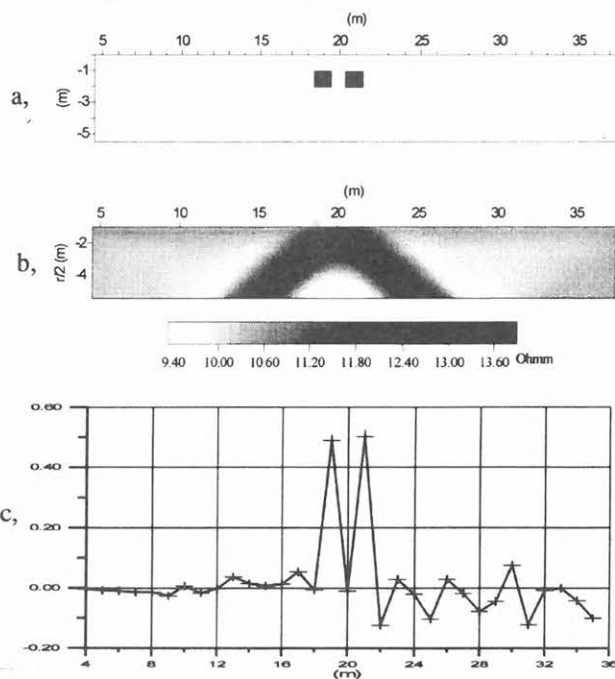
Mínt hogy egy dipól-dipól szelvényezés során általában több elektródátávolságot használunk, a különböző elektródátávolságokhoz tartozóan is elvégezhetjük a fent követett összegzést. A hagyományos geoelektromos terminológiának megfelelően ez különböző behatolási mélységekkel hozható kapcsolatba, s ezért az egyes „mélységszintekre” vonatkozó (horizontális összegzés eredményeként kapott) pozíciófüggvényeket szintén összegezzük — tekintve, hogy ugyanazon hatóra, vagy hatókra vonatkoznak. Ezt az összegzést — inkább a szemléletesség, mint a fizikai tartalom miatt — vertikális összegzésnek nevezzük, amivel további jelkiemelést érhetünk el.

Eredmények

A keresőüreg eljárás hatékonyságát véges differenciás modelleken vizsgáltuk meg, amelyeket PRÁCSER Ernő

bocsátott a rendelkezésünkre. Először a TSOKAS, TSOURLOS [1997]-ből kiemelt és az 1. ábrán bemutatott esetre végeztünk számítást. Az általunk kapott pozíció egybeesik a ható középpontjának felszíni vetületével, az 1. ábrán található eredménynél pontosabban meghatározva az üreg a helyzetét.

A módszer felbontóképességére irányuló vizsgálataink is meglepően jó eredményt hoztak. Két, $l=1$ m oldalhosszúságú alappal rendelkező, $1000 \Omega\text{m}$ fajlagos ellenállású hasábal modelleztük az üregeket, melyeket $10 \Omega\text{m}$ fajlagos ellenállású közegbe helyeztük. A két hasáb közti távolság 1 m volt, csakúgy, mint a fedővastagság (5a. ábra). Az FD számításokat $a=AB=MN=1$ m-es dipóltávolságokra $n=1,2,\dots,8$ mélységszintre végeztük. Az így kapott pszeudoszelvényvel (5b. ábra) végeztük el a dekonvolúciós eljárást. A vertikális összegzés után kapott pozíciófüggvényen (5c. ábra) a két, egymáshoz közeli üreg hatása határozottan elkülönül, és a valóságnak megfelelő helyen jelenik meg.

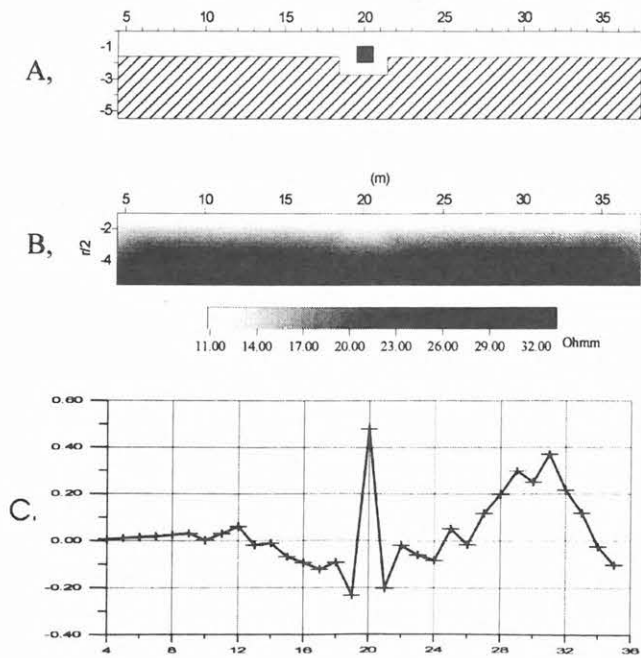


5. ábra. Dekonvolúció 2 hatós FD modellre

Fig. 5. Deconvolution for an FD model with 2 cavities

Az eljárás segítségével összetett földtani szerkezet esetén is sikeresen kiemelhető az üreg hatása. A 6a. ábrán látható modell egy kis ellenállású ($10 \Omega\text{m}$) fedőréteg és egy $100 \Omega\text{m}$ ellenállású feké közé ékelődött $1000 \Omega\text{m}$ ellenállású, $l=1$ m oldalhosszúságú 2D-s négyzet alapú hasábot szemléltet. Az FD modellezéssel $a=1$ m-es dipólközellel, $n=1,2,\dots,8$ mélységszintre számított pszeudoszelvényen (6b. ábra) üregre utaló anomália már nem fedezhető fel. A dekonvolúciós eljárás eredményeként kapott pozíciófüggvényen azonban üreget jelző spike egyértelműen elkülöníthető (6c. ábra).

Mindkét bemutatott modellre elvégeztük a Loke-féle FD inverziós eljárás [LOKE, BARKER 1992] alapuló kiértékelést (7. ábra). Látható, hogy a kétüreges modell esetében az inverzió nem tudja egymástól elkülöníteni a két hatót. A másik modellnél pedig sem az eredeti földtani környezetet, sem — ami minket elsősorban érdekelt — az üreg helyzetét nem sikerült visszakapni.

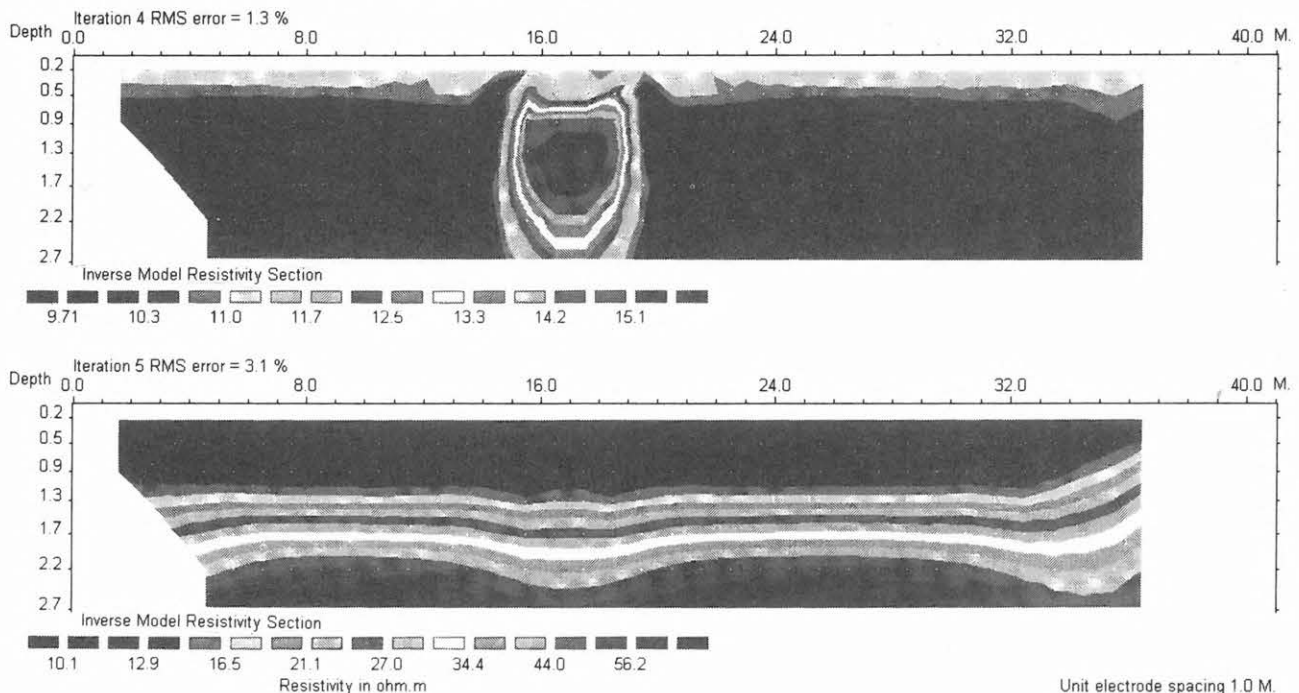


6. ábra. Dekonvolúció inhomogén közegben lévő ható FD modelljére

Fig. 6. Deconvolution for an FD model with a cavity in inhomogenous medium

Összefoglalás

A szerzők által kidolgozott dekonvolúción alapuló szűrési eljárás az elméleti vizsgálatok alapján alkalmas lehet arra, hogy geoelektromos mérési adatokból a mérési szel-



7. ábra. FD inverzió eredményei az 5. és 6. ábrán bemutatott modellek esetén

Fig. 7. Results of FD inversion using the models from Fig. 5 and Fig. 6

vény mentén található üregszerű anomáliák pozícióját pontosan megadjuk. Lehetőséget ad egymáshoz közeli hatók elkülönítésére, és összetett földtani környezetben az üreg hatásának kiemelésére.

Maga a módszer nagyon érzékeny a zajokra, ezért a terepi alkalmazást megelőzően valamilyen zajcsökkentő eljárás elvégzése szükséges. Érdekesnek látszik robusztus módszerek alkalmazása a pozíciófüggvényekben rejlő információtöbblet feldolgozásához. A módszer teljes automatizálásával lehetőség nyílik inverziós eljárás kifejlesztésére. A jel/zaj viszony tovább javítható nemlineáris eljárások alkalmazásával.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak PRÁCSER Ernőnek az FD előremodellezésekért és dr. Erich NIESNERnek, hogy rendelkezésünkre bocsátotta az AGI cég FD inverziós rendszerét. A dolgozat a T25370 sz. OTKA projekt keretében végzett kutatások eredményeinek felhasználásával készült.

HIVATKOZÁSOK

- LOKE M. H., BARKER R. D. 1996: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* **40**, 131–152
- NYÁRI Zs. 1997: Analitikus modellezés a geoelektromos üregkutatás lehetőségeinek vizsgálatára. *Magyar Geofizika* **38**, 3
- TSOKAS G. N., TSOURLOS P. I. 1997: A least-squares approach to depth anomalies from archeological sites by inversion filtering. *Geophysics* **62**, 1, 36–43