

# Vertikális elektromos szondázások kiértékelése 1.5-D inverziós módszerrel<sup>1</sup>

GYULAI ÁKOS, ORMOS TAMÁS<sup>2</sup>

*A dolgozat új inverziós módszer alkalmazásának első eredményeit mutatja be terepi VESZ mérési adatokon. A módszer lényege az, hogy az inverzióban 1-D direkt feladat megoldást alkalmazunk, viszont 2-D geológiai szerkezet jellemzőit becsüljük meg. (Ezért az 1.5-D elnevezés.)*

*A szerkezet rétegvastagságait és a fajlagos ellenállások horizontális irányú változásait egyváltozós függvényekkel írjuk le, amelyeknek együtthatóit a szelvény mentén több ponton mért VESZ görbék adataiból együttes LSQ inverzióval számítjuk. Ezzel a módszerrel egyrészt jelentősen csökkentjük az ekvivalencia hatását, másrészt a teljes geológiai modelltől is képet kaphatunk.*

**Á. GYULAI, T. ORMOS: Interpretation of vertical electrical sounding curves with 1.5-D inversion method**

*This paper presents the first application results of a new joint inversion method on VES data set measured on field. The basic idea of this method: 1-D forward modelling is used, but the parameter of the 2-D geological structure are estimated. (For this reason we use the 1.5-D designation.)*

*Each layer thickness and each apparent resistivity versus horizontal distance are described with mathematical functions, and their coefficient are estimated with LSQ joint inversion from VES field data measured on several points on the section. With this method can be reduced significantly the influence of the equivalence, and we can get an image about the complete geological model.*

## 1. Bevezetés

A mérnöki, geológiai, hidrogeológiai, geotechnikai és környezetvédelmi gyakorlatban 1-D (síkréteges), 2-D (dőlt réteges és inhomogén), 3-D (inhomogén) geoelektromos struktúrák kutatására egyaránt szükség lehet.

Az 1-D struktúrák kutatására jól kidolgozott egyenáramú módszerek állnak rendelkezésre [KOEFOED 1979].

A 2-D struktúrák kutatására elsősorban FD módszereket dolgoztak ki, beleértve inverziós módszerek kifejlesztését is [LIEBIG 1996; BARKER, LOKE 1996 és még sokan mások]. Dőlt, síkréteges esetre GYULAI és ORMOS [1996] közölt inverziós módszert a rétetparaméterek minősített becslésére.

2-D és 3-D struktúrák geoelektromos kutatására tomográfiai módszereket dolgoztak ki [SAKAYAMA, SHIMA 1986; CSÓKÁS et al. 1986]. A geoelektromos tomográfiai módszerek fejlesztésével, illetve továbbfejlesztésével ma már több kutatócsoport is foglalkozik és az eredményeit publikálja.

Anélkül, hogy a dolgozatban ezt részletesen tárgyalnánk, megjegyezzük, hogy mindegyik módszernél alkalmaznak olyan közelítéseket, amelyek

rontják a paraméterbecslés megbízhatóságát azon túl is, amelyet az inverz probléma belső meghatározatlansága (például ekvivalencia) egyébként is okozna. Ilyen problémaként jelentkezik például az FD inverziónál a diszkretizálásból eredő hibák hatása, vagy blokk inverziónál a blokkok előre meghatározott méretéből, illetve alakjából származó közelítések.

Az előbbieket azért említjük, mert tudatában vagyunk annak, hogy az általunk javasolt új módszer alkalmazhatóságának is vannak feltételei, amelyeket a későbbiekben részletesen kutatni kívánunk.

## 2. 2-D inverzió lokálisan 1-D előremodellezéssel

A VESZ mérések kiértékelésében elterjedt gyakorlat, hogy a szondázási görbéket egymástól függetlenül értékelik ki (lokálisan 1-D modelleket feltételezve) és a lokális paraméterekből szerkesztéssel határozzák meg a geológiai szerkezet jellemzőit (határfelületeket, fajlagos ellenállásokat, tektonikai elemeket stb.). Ez a gyakorlat azon alapul, hogy a csapásirányú Schlumberger-elrendezésben mért szondázásokat csak kismértékben torzítják a lassú és távoli szerkezeti hatások és ezért a gyakorlat számára elegendő pontosságú paraméterbecslés adható ilyen módon, illetve a becslések megbízhatóságát legalább olyan mértékben ronthatja az in-

<sup>1</sup> Beérkezett: 1997. május 20-án

<sup>2</sup> Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék, H-3515 Miskolc, Egyetemváros

verz probléma „belső gyengesége”, mint az előbbi közelítések hibája.

Ezért is tartjuk fontosnak olyan együttes (joint) inverziós módszerek kidolgozását, amelyekkel ezt a „belső gyengeséget” lehet feloldani [HERING et al. 1995; MISIEK et al. 1996].

Az általunk kidolgozott és 1.5-D inverzióknak nevezett módszernél lokálisan 1-D előremodellezést alkalmazunk, de a teljes 2-D szerkezet jellemzőit határozzuk (becsüljük) meg.

A módszernél a rétegvastagságok és fajlagos ellenállások szelvény menti változásait alkalmasan választott függvényekkel írjuk le, amelyeket a modell a priori ismeretei alapján választunk ki.

Az eddigi vizsgálatainkban hatványfüggvényeket:

$$\rho_i(x) = \sum_{n=1}^N a_{in} x^{(n-1)} \quad (1)$$

$$h_i(x) = \sum_{m=1}^M b_{im} x^{(m-1)} \quad (2)$$

és periodikus függvényeket:

$$\rho_i(x) = \frac{1}{2} d_{io} + \sum_{k=1}^K d_{ik} \cos k \frac{2\pi x}{X} + \sum_{k=1}^K d_{ik}^* \sin k \frac{2\pi x}{X} \quad (3)$$

$$h_i(x) = \frac{1}{2} c_{io} + \sum_{l=1}^L c_{il} \cos l \frac{2\pi x}{X} + \sum_{l=1}^L c_{il}^* \sin l \frac{2\pi x}{X} \quad (4)$$

alkalmaztunk ( $i$  a rétegeket,  $x$  a távolságot,  $X$  a szelvényhosszat jelöli). Előnyök lehetnek azonban más függvények is, amint azt DOBRÓKA [1996] bemutatta.

Az ismeretleneket itt az  $a_{im}$ ,  $b_{im}$ , illetve  $c_{il}$ ,  $c_{il}^*$ ,  $d_{ik}$ ,  $d_{ik}^*$  együtthatók jelentik, amelyeket együttes inverzióval határozzunk meg. Az együttes inverzió úgy valósul meg, hogy valamennyi VESZ mérési adatot egyidejűleg vonjuk be az inverziós eljárásba. Az együtthatók a mérési adatokat összekapcsolják, ugyanis rétegenként minden mérőponton (mérőállomáson) azonosak.

Az inverzió befejeztével az (1)–(4) segítségével a szelvényben pontról pontra előállítjuk a modellvastagság és fajlagos ellenállás értékeit.

### 3. Az inverziós vizsgálat eredménye terepi VESZ adatokon

Az inverziós módszer ellenőrzését néhány modellre szimulált adatokkal elvégeztük. A tesztelés eddigi eredményei azt mutatták, hogy érdemes a

módszer továbbfejlesztésével, illetve alkalmazásával foglalkozni. Ezért kipróbáltuk az új módszert szelvény menti terepi VESZ adatok feldolgozására.

A VESZ méréseket Korlát község határában mérték [FERENCZY 1983]. A szelvényben 6 VESZ görbe állt rendelkezésre, a szelvény 700, 800, 900, 1000, 1150, 1300 m-re lévő pontjaiban. A mérési adatok az 1. ábrán láthatók. A görbék ábrázolásánál eltértünk az  $r$  (AB/2) és az  $R$  ( $\rho_a$ ) tengely megszozott azonos léptékű beosztásától, azért hogy a  $\rho_a$ -beli változások láthatóak legyenek. Az ábra alsó része az 1.5-D inverzió végeredményét mutatja. Jól látható az andezit (tufa?) fokozatos elmélyülése mellett az 1150 m-es pontnál jelentkező hirtelen mélységváltozás is, amelyet vetőként interpretáltunk. Az inverziót 5-réteges modellre oldottuk meg, a startmodellét az 1. táblázat mutatja. A 2. ábrán

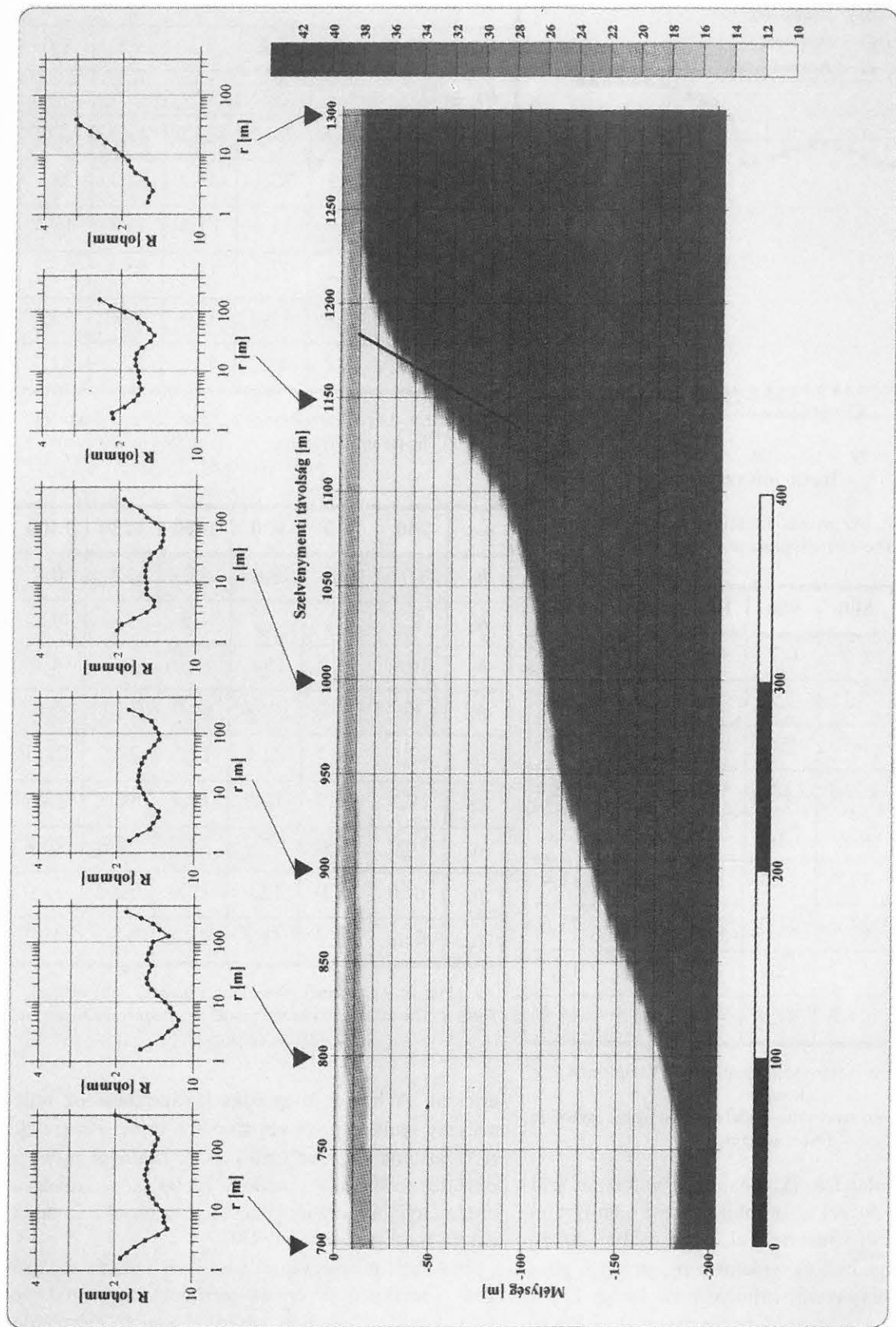
$\rho \backslash x$	700	800	900	1000	1150	1300
$h_1$	1,5	0,8	0,5	0,7	0,5	0,3
$h_2$	4,0	3,0	2,0	2,5	2,0	0,5
$h_3$	30,0	18,0	23,0	18,0	19,0	6,0
$h_4$	135,0	135,0	110,0	75,0	40,0	4,0
$\rho_1$	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
$\rho_2$	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
$\rho_3$	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
$\rho_4$	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
$\rho_5$	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

1. táblázat. A startmodell paraméterei ( $\rho_i$ : [ohmm],  $h_i$ : [m],  $x_i$ : [m])

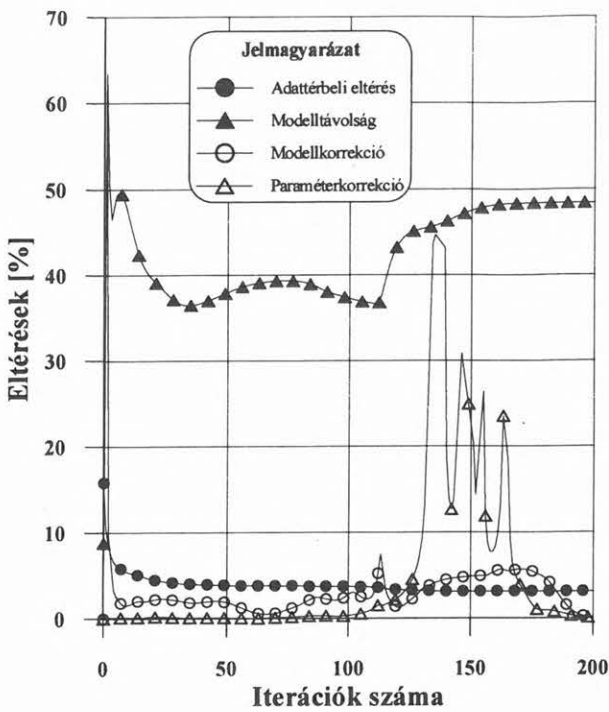
Table 1. The parameters of the startmodel ( $\rho_i$ : [ohmm],  $h_i$ : [m],  $x_i$ : [m])

bemutatjuk az eltérések változását az iteráció folyamán. Ezek az eltérések a paraméter korrekció kivételével HERING és szerzőtársainál [1995] vannak definiálva. A paraméterkorrekciókat az együtthatókból számítottuk. A mintegy 50%-os modell-távolságon azt kell érteni, hogy az inverzióval kapott eredménymodell jelentősen eltér a startmodell-től, tehát ez a módszer távolról eljut a megoldáshoz. Az 1. ábrán látható eredmény-szelvény adatait táblázatosan is bemutatjuk (2. táblázat).

A táblázat sraffozott része mutatja azokat a paramétereket, amelyek változása állomásról állomásra megengedett volt az inverzióban. A 2. táblázat vastagságra vonatkozó eredményeit ötödfokú hatványfüggvénnyel kaptuk, míg a fajlagos ellenállások



1. ábra. Az 1.5-D inverzió eredménye a terepi VESZ adatokkal  
 Fig. 1. The results of the 1.5-D inversion, and the VES field data set



2. ábra. Az inverzió iterációs folyamata  
Fig. 2. The iteration-process of the inversion

$p \setminus x$	700	800	900	1000	1150	1300
$h_1$	0,9	0,7	0,7	1,1	1,4	0,5
$h_2$	7,7	5,2	3,2	2,2	1,5	1,0
$h_3$	11,2	9,9	7,6	6,1	6,3	9,9
$h_4$	165,9	159,9	122,7	98,9	38,9	0,0
$\rho_1$	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
$\rho_2$	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
$\rho_3$	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
$\rho_4$	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
$\rho_5$	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9

2. táblázat. Az eredménymodell paraméterei. Valamennyi  $\rho_i(x)$  konstans

Table 2. The parameters of the model resulted by the inversion. All  $\rho_i(x)$  are constant

rétegenként állandók (konstansok) voltak a szelvény mentén. Mivel ez utóbbira nézve nem rendelkezünk a priori ismeretekkel, egy későbbi vizsgálatban megengedtük egyenként a  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  és  $\rho_4$  paraméterek szelvény menti változását is. Az így kapott eredményeket a 3.–5. táblázatok mutatják. Látható, hogy a 3. és 5. táblázat vastagság adatait alig befolyásolja a fajlagos ellenállások felszabadítása, viszont a  $\rho_3$  változása jelentősen megváltoztatja a  $h_3$

$p \setminus x$	700	800	900	1000	1150	1300
$h_1$	0,9	0,7	0,7	1,1	1,4	0,5
$h_2$	7,9	5,3	3,2	2,2	1,5	1,0
$h_3$	11,7	10,1	7,5	5,8	5,9	10,0
$h_4$	162,3	158,6	124,2	101,9	41,0	0,0
$\rho_1$	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
$\rho_2$	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
$\rho_3$	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1
$\rho_4$	12,5	12,6	12,7	12,8	13,0	13,2
$\rho_5$	42,2	42,2	42,2	42,2	42,2	42,2

3. táblázat. Az eredménymodell paraméterei.  $\rho_4(x)$  változik  
Table 3. The parameters of the model resulted by the inversion.  $\rho_4(x)$  is changed

$p \setminus x$	700	800	900	1000	1150	1300
$h_1$	1,1	0,8	0,8	1,2	1,5	0,6
$h_2$	4,2	3,1	2,0	1,5	1,1	0,8
$h_3$	30,9	23,1	15,6	10,9	8,5	9,7
$h_4$	139,4	133,1	105,0	84,9	34,1	0,0
$\rho_1$	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
$\rho_2$	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$\rho_3$	16,4	17,0	17,7	18,4	19,6	20,8
$\rho_4$	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
$\rho_5$	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2

4. táblázat. Az eredménymodell paraméterei.  $\rho_3(x)$  változik  
Table 4. The parameters of the model resulted by the inversion.  $\rho_3(x)$  is changed

értékeit. A helyes megoldás kiválasztásához tehát szükség lenne a  $\rho_3$ -ra vonatkozó a priori ismeretekre (konstans vagy változik). A 6. táblázat  $\rho_2$  és  $\rho_4$  együttes változása mellett mutatja az inverzió eredményét, amely lényegesen nem tér el a 2. táblázat vastagság-eredményeitől.

Érdeemes megjegyezni, hogy az andezit mélységére vonatkozó inverziós eredmény nagyon közel áll a korábbi, elméleti görbével kapott kiértékelés eredményéhez, amelynél egyszerűbb (3-réteges) modellt feltételeztünk és több a priori információt is felhasználtuk a kiértékeléskor.

$p \setminus x$	700	800	900	1000	1150	1300
$h_1$	0,9	0,7	0,8	1,1	1,5	0,6
$h_2$	7,8	5,0	3,0	2,0	1,3	0,8
$h_3$	11,7	10,2	7,9	6,4	6,6	9,6
$h_4$	164,4	158,5	121,7	98,0	38,4	0,0
$\rho_1$	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
$\rho_2$	11,4	11,3	11,1	11,0	10,7	10,5
$\rho_3$	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
$\rho_4$	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
$\rho_5$	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4

5. táblázat. Az eredménymodell paramétereit.  $\rho_2(x)$  változik  
Table 5. The parameters of the model resulted by the inversion.  $\rho_2(x)$  is changed

Összefoglalásul megállapítjuk, hogy az általunk kifejlesztett új együttes inverziós módszer a jelenlegi formájában alkalmas terepi VESZ adatok feldolgozására olyan módon, hogy a korábbiakhoz képest kevesebb a priori információ esetében is megbízhatóbb becslést ad a geológiai szerkezet egészére nézve.

A szerzők köszönetet mondanak dr. FERENCZY László főmunkatársnak, aki a korábbi mérési adatait rendelkezésünkre bocsátotta. A kutatási eredmények részben a MTA-DFG projekt (nyilvántartási szám az MTA-nál 30 008/70/96, a DFG-nél DR 110/8-1) keretében végzett munkálatok alapján születtek.

## HIVATKOZÁSOK

- BARKER R. D., LOKE M. H. 1996: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* **1**, 131–153
- CSÓKÁS J., DOBRÓKA M., GYULAI Á. 1986: Geoelectric determination of quality changes and tectonic disturbances in coal deposits. *Geophysical Prospecting* **34**, 1067–1081
- DOBRÓKA M. 1996: Laterálisan inhomogén hullámvezetőben terjedő Love-típusú hullámok abszorpciós-diszperziós jellemzőinek joint inverziója. *Magyar Geofizika* **36**, 1, 19–27
- FERENCZY L. 1983: Vizsoly-Korlát községek ivóvízellátásával kapcsolatos geofizikai kutatás.

$p \setminus x$	700	800	900	1000	1150	1300
$h_1$	0,9	0,7	0,8	1,1	1,5	0,6
$h_2$	8,0	5,0	2,8	1,9	1,2	0,8
$h_3$	12,8	10,7	8,0	6,1	6,2	9,6
$h_4$	159,2	154,0	124,0	101,2	40,8	0,0
$\rho_1$	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
$\rho_2$	11,5	11,2	11,0	10,8	10,4	10,0
$\rho_3$	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
$\rho_4$	12,5	12,6	12,7	12,9	13,1	13,3
$\rho_5$	41,5	41,5	41,5	41,5	41,5	41,5

6. táblázat. Az eredménymodell paramétereit.  $\rho_4(x)$  és  $\rho_2(x)$  változik  
Table 6. The parameters of the model resulted by the inversion.  $\rho_4(x)$  and  $\rho_2(x)$  are changed

Kutatási jelentés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék

- GYULAI Á., ORMOS T. 1996: Geoelektromos adatok analitikus előremodellezésen alapuló szimultán inverziója dőlt réteges földtani szerkezetekre. *Magyar Geofizika* **37**, 1, 17–26
- HERING A., MISIEK R., GYULAI Á., ORMOS T., DOBRÓKA M., DRESEN L. 1995: A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface wave seismic data. Part I: basic ideas. *Geophysical Prospecting* **43**, 135–156
- KOEFOD O. 1979: *Geosounding Principles, Resistivity Sounding Measurements*. Amsterdam-Oxford-New York
- LIEBIG A. 1996: Zweidimensionale geoelektrische Inversion als Teil einer integrierten geophysikalischen Auswertung zur Erkundung oberflächennaher Schichten. Doktori értekezés, Ruhr-Universität, Bochum
- MISIEK R., LIEBIG A., GYULAI Á., ORMOS T., DOBRÓKA M., DRESEN L. 1996: A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface wave seismic data. Part II: applications. *Geophysical Prospecting* **45**, 65–85
- SAKAYAMA T., SHIMA H. 1986: High resolution two dimensional resistivity inversion technique using alfa centers. 56<sup>th</sup> Annual International Meeting, Houston, SEG Expanded Abstracts, 47–49