

Doktori értekezés tézisei

**FELSZÍNKÖZELI FÖLDTANI SZERKEZETEK VIZSGÁLATA  
SZEIZMIKUS ÉS EGYENÁRAMÚ GEOELEKTROMOS  
ADATOK EGYÜTTES INVERZIÓJÁVAL**

Írta:

**Kis Márta**

Miskolci Egyetem

Geofizikai Tanszék

**Miskolc**

**1998**

## I. Tudományos előzmények, célkitűzések

A felszínközeli szerkezetek vizsgálata mérnökgeofizikai és környezetvédelmi geofizikai feladatok megoldása során néhány métertől néhányszor tíz méteres mélységek kutatását teszi szükségessé. A leggyakoribb alkalmazást ezen a területen a geoelektromos és a sekélyszeizmikus módszerek kapják.

Az egyenáramú geoelektromos VESZ módszer a felszínközeli szerkezetek kutatásának egyik leggyakrabban használt hatékony és gyors eszköze. A vonatkozó direkt és inverz feladatok megoldása jól ismert különböző mérési elrendezések esetére. A Schlumberger elektróda elrendezéssel mért látszólagos fajlagos ellenállások inverzióját mind az ellenállás-, mind pedig a magfüggvény tartományban részletesen tárgyalja a nemzetközi szakirodalom, beleértve a megoldás egyértelműségi és stabilitási problémáit is. A refrakciós szeizmikus futási idők inverziójánál hasonló problémákkal találkozhatunk, a paraméterbecslés pontossága és megbízhatósága gyakran elégtelen ebben az esetben is. Újabban a szeizmikus vezetett hullám módszerek is gyakori alkalmazást nyernek mérnök- és környezetgeofizikai feladatok megoldása során. Önmagában a vezetett hullám inverziós probléma is belső ekvivalenciákkal és többértelműségi problémákkal terhelt.

A geofizikai inverz feladat stabilitási és egyértelműségi problémáinak kiküszöbölésére gyakran numerikus (regularizációs) megoldásokat alkalmazunk. Létezik azonban fizikai válasz is a felmerülő kérdésekre: az együttes inverzió. Ennek keretében két vagy több fizikailag különböző, vagy fizikailag ugyan azonos, de lényegesen eltérő mérési elrendezésben (pl. Schlumberger, Wenner, vagy dipól-dipól) gyűjtött adatrendszerrel vonunk be ugyanazon inverziós eljárásba. A nemzetközi szakirodalom e témakört részletesen tárgyalta mind magnetotellurikus és egyenáramú geoelektromos adatok, mind mágneses és gravitációs adatok vonatkozásában, mind pedig szeizmikus, akusztikus karotázs és gravitációs adatok együttes inverziója terén.

A Ruhr Egyetem Geofizikai Intézete és a ME Geofizikai Tanszék kutatási együttműködése keretében különböző geofizikai adatok együttes inverziós algoritmusainak fejlesztése folyik. A kutatások eredményei a bányabeli VSP és

egyenáramú geoelektromos adatok, valamint felszíni geoelektromos és vezetett hullám szeizmikus adatok együttes inverziójának területén jelentkeztek. A kutatások során megmutatkozott, hogy az alsó féltér fizikai jellemzőinek meghatározása DC geoelektromos-vezetett hullám együttes inverziós eljárással alacsony frekvenciás diszperziós adatokat igényel, amelyek terepi mérésekből nem mindig határozhatók meg kellő pontossággal.

Ebből kiindulva tűztem ki kutatásaim céljaként a refrakciós szeizmikus időadatok integrálását a Love-hullám szeizmikus-geoelektromos együttes inverzióba. Annak érdekében, hogy terepi adatok feldolgozására minél inkább alkalmas módszert fejlesszek ki, az LSQ eljárás mellett együttes inverziós vizsgálataimat kiterjesztettem a LAD (Least Absolute Deviations) módszerre is. A geofizikai inverzió egy fontos gyakorlati problémájának, a belső ekvivalencia együttes inverzióval való feloldhatóságának kutatását is feladatommak választottam.

A minél pontosabb paraméterbecslés elérése végett a szeizmikus-geoelektromos együttes inverziós algoritmus globális optimalizációs módszer felhasználásával történő megfogalmazását is célul tűztem ki.

Kutatásaim során fontos feladatnak tekintettem olyan együttes inverziós módszer fejlesztését, amely a gyakorlati alkalmazások számára már kielégítően bonyolult földtani modell vizsgálatára is alkalmas. Ezért terjesztettem ki kutatásaimat 2D szerkezetek lokálisan 1D közelítésre alapozott inverziós vizsgálatára is.

## **II. Az elvégzett vizsgálatok**

Értekezésemben a vonatkozó direkt feladatok áttekintése után irodalomból ismert általános elveket és módszereket felhasználva inverziós algoritmus fejlesztést végeztem, majd az algoritmusokat programszerűen megvalósítottam. Ennek keretében mind linearizált, mind globális optimalizációs eljárással, valamint mind a független, mind a két illetve három módszeren alapuló együttes inverzió vonatkozásában algoritmus és szoftverfejlesztést valósítottam meg. A kidolgozott új inverziós eljárásokat terepi és szintetikus adatok felhasználásával teszteltem.

A módszerek teljesítőképességének vizsgálata céljából különböző zajjal terhelt szintetikus adatrendszereket generáltam. Ezek felhasználásával vizsgáltam a geofizikai inverzió gyakorlatában leggyakrabban alkalmazott linearizált LSQ és LAD módszereket, mind független, mind együttes inverziós változatokban. A vizsgálatok céljából általános objektív függvényeket vezettem be és az inverziós eljárásokat ennek minimalizálásán keresztül definiáltam. Az eredmények alapján a becslés pontossága és megbízhatósága szempontjából összehasonlító vizsgálatokat végeztem. A fenti eljárásokat terepi adatrendszerek inverziójára is alkalmaztam.

A geoelektromos ekvivalencia probléma feloldhatóságát célzó vizsgálatokban konduktív illetve rezisztív típusú ekvivalenciát mutató szerkezetekre végeztem független geoelektromos és együttes inverziós tesztvizsgálatokat.

Kutatásaimat kiterjesztettem szeizmikus és geoelektromos szempontból egyaránt "labilis" modellre is, amelyen független és együttes inverziós stabilitás vizsgálatot valósítottam meg.

A Simulated Annealing (SA) módszerét felhasználva a globális optimalizáció elveit bevezettem az együttes inverzió területére. E vizsgálatok közben olyan új módszer kidolgozására törekedtem, amely a hagyományos SA eljárás általánosításának tekinthető. Az általánosított algoritmust két speciális esetben többféle zajjal terhelt szintetikus illetve terepi adatok segítségével teszteltem. Összehasonlítást tettem az általánosított linearizált és a globális optimalizáció eredményei között.

Kétdimenziós szerkezetek kutatásában az előremodellezéshez választott eljárás döntően meghatározza az inverziós módszer számítási idő igényét. Vizsgálatokat végeztem arra vonatkozóan, hogy 2D szerkezetek lokálisan 1D közelítésen alapuló előremodellezéssel történő vizsgálata milyen módon javítható. Ezen vizsgálataimban a lokális vastagságoknak a vastagságfüggvények integrálközepével történő közelítésével foglalkoztam. További vizsgálatokat az együttes inverziós problémához lehetőleg jobban illeszkedő bázisfüggvények megválasztása területén végeztem. A cellánként (intervallumonként) konstans függvények a probléma diszkrétizálása során inverziós szempontból igen kedvezőnek bizonyultak. Ezek mellett részletesen vizsgáltam a

Csebisev-polinomok alkalmazhatóságát is, mivel ezek súlyfüggvényre ortogonálisak, és így sorfejtésre alapozott inverziós módszerfejlesztésre különösen alkalmasak. A sorfejtéses inverzió pontosságára vonatkozó vizsgálataimat kiterjesztettem a mérési vonalak számára és a Csebisev-polinomok fokszámára is.

### III. Új tudományos eredmények

1. Új eljárást vezettem be szeizmikus refrakciós futási idők, Love típusú vezetett hullám diszperziós adatok illetve egyenáramú látszólagos fajlagos ellenállások linearizált együttes inverziójára. Ennek keretében általánosított objektív függvényt állítottam elő

$$\Phi = \sum_{i=1}^N |e_i|^p + \lambda^2 \sum_{k=1}^M |P_k|^q = \sum_{i=1}^N \left| A_i - \sum_{j=1}^M G_{ij} P_j \right|^p + \lambda^2 \sum_{k=1}^M |P_k|^q,$$

ahol  $\lambda^2$  csillapítási tényező,  $e_i$  a mért és számított adatok linearizált (relatív) eltérés vektorának,  $P_i$  a (relatív) paraméterkorrekció vektornak  $i$ -ik, illetve  $k$ -ik eleme. Az utóbbi vektorokban együttes inverzió esetén az eljárásba vont valamennyi módszer adatait illetve paramétereit szerepeltetem. Ezen objektív függvény minimalizálásán keresztül az IRLS módszer alkalmazásával általános együttes inverziós módszert definiáltam, amely a  $p$  és  $q$  paraméterek megfelelő választásával visszaadja az LSQ ( $p=2$ ,  $q=0$ ), a Marquardt-Levenberg ( $p=2$ ,  $q=2$ ), illetve a LAD-IRLS ( $p=1$ ,  $q=0$ ) módszereket, illetve ez utóbbi módszer két új változatát (csillapított LAD<sub>2</sub>-IRLS  $p=1$ ,  $q=2$  illetve módosított LAD<sub>1</sub>-IRLS  $p=1$ ,  $q=1$ ).

1.a. Az eljárást szintetikus adatokon tesztelve megállapítottam, hogy a refrakciós szeizmikus és geoelektromos adatok együttes inverzióba integrálása a paraméterbecslés pontosságát és az inverziós eljárás stabilitását növeli. Bemutattam, hogy még pontosabb paraméterbecslést kapunk, ha az inverzióba a Love-hullám diszperziós adatrendszerét is bevonjuk. Ez a hatás mindaddig fennáll, míg a réteghatárok az alkalmazott két módszer szempontjából identikusak.

2. Numerikus tesztek alapján megállapítottam, hogy konduktív illetve rezisztív típusú ekvivalenciát mutató szerkezeteken végzett független inverzió *ekvivalencia* tartománya jelentősen redukálható, valamint konvergens és egyértelmű megoldás állítható elő, ha a geoelektromos adatrendszer mellett szeizmikus (refrakciós) adatrendszert is bevonunk az inverzióba. Bemutattam, hogy a két módszert (geoelektromos-refrakciós) integráló együttes inverziós eljárás keretében tapasztalt ekvivalencia tartomány tovább szűkíthető egy harmadik módszer, (például Love-vezetett hullám) adatainak inverzióba vonásával. Ekvivalens földtani szerkezeten gyűjtött geoelektromos mérési adatok feldolgozása során jelentkező stabilitási problémák megoldására numerikusan szimulált Love-hullám diszperziós adatrendszert vontam együttes inverzióba. Ezáltal terepi adatok felhasználásával is igazoltam az együttes inverzió ekvivalencia tartományt jelentősen lecsökkentő hatását.

3. Új módszert vezettem be szeizmikus refrakciós futási idők, Love típusú vezetett hullám diszperziós adatok illetve egyenáramú látszólagos fajlagos ellenállások együttes inverziójára, melyben egy globális optimalizációs eljárás (Simulated Annealing) továbbfejlesztett változatát alkalmaztam. Az ennek keretében kidolgozott algoritmusban és programban a Simulated Annealing (SA) eljárás energia függvényét általánosítottam részben úgy, hogy benne az együttes inverziós kombinált adatrendszert illetve válaszgyenletet szerepeltettem, részben pedig azért, hogy a mért- és számított adatok eltérésvektorának illetve a paramétervektornak  $L_p$  normáját kombináltam az 1. tézisben bemutatott objektív függvénynek megfelelően, de a linearizálást elkerülve:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \left| a_i^{\text{obs}} - g_i(\mathbf{P}) \right|^p + \lambda^2 \sum_{k=1}^M |P_k|^q .$$

Az eljárás  $p=2$ ,  $q=0$  esetben a hagyományos SA algoritmussal megvalósított együttes inverziós módszert ad.  $p=1$ ,  $q=0$  esetén az energiafüggvényt az eltérésvektor  $L_1$  normájaként definiáló globális együttes inverziós eljárásra jutunk (LAD-SA), míg  $p=1$ ,  $q=1$  illetve  $p=1$ ,  $q=2$  ennek módosított (kevert határozottságú együttes inverziós feladatok megoldására alkalmas  $LAD_1$ -SA, illetve  $LAD_2$ -SA) változatát kapjuk. Az eljárás tehát egyik speciális határesetként a hagyományos SA-t adja vissza, további határesetekben pedig három rezisztens, új (módosított SA) együttes inverziós eljárásra vezet.

3.a. Az általánosított objektív függvényre alapozott SA együttes inverziós eljárást szintetikus adatokon teszteltem. Vizsgálataim megmutatták, hogy a globális optimalizációval megvalósított VESZ-refrakciós-vezetett hullám diszperziós együttes inverziós eljárás a linearizált együttes inverziós algoritmus esetében bizonyított valamennyi előnyt megtartja, ugyanakkor viszont a globális optimalizálásból eredően jobb paraméterbecslést biztosít és nagyobb startmodell-függetlenség jellemzi.

4. Kétdimenziós földtani szerkezetek geofizikai linearizált inverziós vizsgálatára új módszert dolgoztam ki, amelyben a modellparamétereket általánosított ortogonális (vagy súlyfüggvényre ortogonális) bázisfüggvények szerint kifejtett függvénysor formájában veszem fel és az inverziós feladatot a sorfejtési együtthatókra fogalmazom meg. Az eljárásban a direkt feladatot lokálisan egydimenziós közelítésben kezeltem úgy, hogy a modellparamétereket a kétdimenziós modell horizontális koordinátáktól függő paramétereinek a vizsgálati pont megfelelően választott környezetében definiált integrálközepeként adtam meg. Az eljárást mind független, mind pedig együttes inverziós feladatra megfogalmaztam. Bemutattam, hogy ez a módszer a bázisfüggvényeknek hatvány-, illetve intervallumonként konstans függvényekként való felvételével két irodalmi előzménynek tekinthető eljárást, mint speciális esetet ad vissza.

5. A 4. tézisben megfogalmazott általános eljárást két speciális esetben algoritmus- és programszerűen is megvalósítottam és numerikusan vizsgáltam.

5.a. A modellparaméterek intervallumon konstans függvények szerinti sorfejtésére alapozott inverziós eljárást mind független inverzióra, mind pedig szeizmikus refrakciós futási idők és egyenáramú látszólagos fajlagos ellenállások linearizált együttes inverziójára megfogalmaztam. Az algoritmust és programot numerikusan teszteltem. Megállapítottam, és egy, a tesztelés céljából felvett modellen számszerűen igazoltam, hogy az eljárás az egydimenziós földtani modellen végzett inverziós vizsgálatokhoz képest, illetve a mérési vonalak számának növekedtével a probléma túlhatározottságától függő mértékben egyre stabilabb és pontosabb paraméterbecslést ad.

5.b. A modellparaméterek Csebisev-polinomok szerinti sorfejtésére és a lokális vastagságok integrálközéppel történő helyettesítésére alapozott általánosított sorfejtéses inverziós eljárást mind független inverzióra, mind pedig szeizmikus refrakciós futási idők és egyenáramú látszólagos fajlagos ellenállások linearizált együttes inverziójára megfogalmaztam. Az algoritmust és programot numerikusan teszteltem. Megállapítottam, és egy, a tesztelés céljából felvett modellen számszerűen igazoltam, hogy az eljárás a mérési vonalak számának növekedtével a probléma túlhatározottságától (illetve az alkalmazott polinom fokszámtól) függő mértékben egyre stabilabb és pontosabb paraméterbecslést ad.

### **Az eredmények hasznosítása**

Az értekezés keretében együttes geofizikai inverziós módszerfejlesztést végeztem. Eredményeim alapján a paraméterbecslés pontosabbá és megbízhatóbbá tehető, ami a gyakorlati alkalmazások szempontjából alapvető jelentőségű. A globális optimalizációs módszer bevezetése az együttes geofizikai inverzióba szintén olyan lépés, amely a megbízhatóbb inverziós eredmények lehetőségén keresztül a gyakorlati feladatok jobb és elfogadhatóbb megoldását teszi lehetővé. A 2D szerkezetek inverziós vizsgálatára javasolt általánosított sorfejtéses eljárás stabil és gyors inverziós módszert jelent. Ezáltal szintén megbízhatóbbá tehető egyes mérnökgeofizikai, illetve környezetgeofizikai feladatok megoldása. Az általánosított sorfejtéses inverziós eljárás mind Csebisev-polinomokra, mind cellánként konstans függvényekre alapozott változatában várhatóan jelentős gyakorlati alkalmazásokra talál.



#### IV. Az értekezés témaköréből készült publikációk jegyzéke

- Kis M., Amran A., Dobróka M. 1995:** Robust joint inversion of geoelectric, refraction- and surface wave seismic data. 57th EAEG International Conference, Glasgow, 29 May-3 June. *Extended abstract.*
- Kis M., Amran A. 1995:** Refrakciós időadatok, felületi hullám diszperziós adatok és egyenáramú geoelektromos adatok joint inverziója. Magyar Geofizika **36** (4), 289-296
- Kis M. 1997:** Global inversion of geophysical data using Simulated Annealing. International Conference of PhD Students, Miskolc, 11-17 August 1997. *Extended abstract.*
- Kis M. 1996:** Geofizikai adatok globális optimalizációja a Simulated Annealing módszer alkalmazásával. Magyar Geofizika **37** (3), 289-296
- Dobróka M., Kis M., Kovács A.Cs. 1998:** Robust tomography methods. 60th EAEG Meeting, Leipzig, 8-12 June 1998. *Extended abstract.* (Accepted for publication)
- Ormos T., Gyulai Á., Kis M., Dobróka M., Dresen L. 1998:** A new approach for the investigation of 2D structures, method development and case history. 60th EAEG Meeting, Leipzig, 8-12 June 1998. *Extended abstract.* (Accepted for publication)

#### Nemzetközi konferencia előadások

- Kis M., Amran A., Dobróka M. 1995:** Robust joint inversion of geoelectric, refraction- and surface wave seismic data. 57th EAEG International Conference, Glasgow, 29 May-3 June
- Kis M. 1997:** Global inversion of geophysical data using Simulated Annealing. International Conference of PhD Students, Miskolc, 11-17 August 1997
- Dobróka M., Kis M., Kovács A.Cs. 1998:** Robust tomography methods. 60th EAEG Meeting, Leipzig, 8-12 June 1998. (Accepted)
- Ormos T., Gyulai Á., Kis M., Dobróka M., Dresen L. 1998:** A new approach for the investigation of 2D structures, method development and case history. 60th EAEG Meeting, Leipzig, 8-12 June 1998. (Accepted)

Hazai konferencia előadások

- Kis M., Amran A. 1995:** Felszíni szeizmikus- és egyenáramú geoelektromos adatok együttes inverziója. Geofizikai Inverziós Ankét, Miskolc-Tapolca, 1995. dec. 12-13.
- Kis M. 1993:** Szeizmikus és geoelektromos adatrendszerek joint inverziója. Ifjú Geofizikusok Ankétja, Csopak, 1993. április 20-21
- Kis M., Hursán G. 1995:** A korrigált empirikus szórásnégyzet (azaz a mintából számított variancia) aktuális torzulásairól. V. Geomatematikai Ankét, Szeged, 1995. okt. 4-6.
- Hursán G., Kis M. 1995:** A robusztusság mérőszámai a reziduál normák minimalizálásán alapuló eljárásokra. V. Geomatematikai Ankét, Szeged, 1995. okt. 4-6.
- Kis M. 1996:** Dőlt réteges földtani szerkezet szeizmikus refrakciós és egyenáramú geoelektromos paramétereinek együttes inverziója. Ifjú Geofizikusok Ankétja, Balatonvilágos, 1996. ápr. 25-26.
- Kis M. 1996:** Globális optimalizációs módszer (simulated annealing) alkalmazása szeizmikus refrakciós és egyenáramú geoelektromos adatrendszerek inverziójára. Ifjú Geofizikusok Ankétja, Balatonvilágos, 1996. ápr. 25-26.
- Kis M. 1996:** Geofizikai együttes inverzió globális optimalizációs módszer (Simulated Annealing) alkalmazásával. A Magyarhoni Földtani Társulat és a Magyar Geofizikusok Egyesülete közös ALFÖLD-96 Vándorgyűlése, Kerekegyháza, 1996. szept. 8-11