

Doktori (Phd) értekezés tézisei

MÓDSZERFEJLESZTÉS A SORFEJTÉSES INVERZIÓ TERÜLETÉN,  
LOKÁLISAN 1D ELŐREMODELLEZÉSSSEL

Írta: KAVANDA RÉKA

**Tudományos vezető:**

**DR. GYULAI ÁKOS**

**egyetemi tanár**

**Társ témavezető:**

**DR. ORMOS TAMÁS**

**egyetemi magántanár**

Miskolci Egyetem

Geofizikai Tanszék

Miskolc

2016.

## I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az elmúlt egy-két évtizedben a mérés- és számítástechnika fejlődése jelentős változást hozott a geoelektromos mérési gyakorlatban is. A hagyományos mérési rendszereket sok esetben a számítógéppel vezérelt multielektrodás rendszerek váltották fel, melyeknek nagy gyakorlati előnye a pontonként mért Vertikális Elektromos Szondázással szemben, a gyorsaság. A földtani szerkezet vizsgálata segítségével akár egyetlen terítéssel is megoldható lehet. A mérőrendszer fejlődésével párhuzamosan megjelentek az adatok kiértékelését, értelmezését szolgáló feldolgozó szoftverek is (pl. Loke és Barker 1996). A számítógépek fejlesztésének köszönhetően egyre igényesebb modellszámítások és inverziós módszerfejlesztések történtek.

Az adatokat feldolgozó/értelmező inverziós eljárás számítási idejét döntően befolyásolja az előremodellezésben alkalmazott módszer. 2D szerkezetek esetén az ideális feldolgozási mód a 2D előre modellezés és 2D inverziós módszer alkalmazása lenne, azonban ez az eljárás nagy számítási időt (órák, napok) igényel, ami a mérnöki gyakorlat számára kedvezőtlen, így a kutatók gyorsabb, rendszerint közelítő eljárásokat kerestek. Gyakran alkalmazott eljárás az előre modellezés egyszerűsítése, pl. 1D direkt feladat megoldás alkalmazása 2D modelleken végzett (közelítő) inverzióban. Ennek egy továbbfejlesztett változata az ún. „stich together” eljárás, amikor az adott pont (1D) kiértékelésének eredményeit, mint startmodellt felhasználjuk a következő pontbeli számításnál, így összefűzzük az 1D-s kiértékeléseket.

Christiansen és Auken (2004) az 1D modellek összekapcsolására laterális kényszerfeltételeket alkalmazott. 1996-ban Dobróka M. akadémiai doktori értekezésében az egyes modellek között lokálisan 1D előremodellezést használva, a modellparaméterek laterális koordináták szerinti sorfejtésével teremtett kapcsolatot. 1997-ben Gyulai és Ormos a 2D modell vastagság függvényeit, illetve a fajlagos ellenállásokat Fourier sorokkal és hatványfüggvényekkel diszkretizálva, a sorfejtés együtthatóira fogalmaztak meg inverziós eljárást, melyet 1.5D geoelektromos inverziós eljárásnak neveztek el. Később Gyulai és szerzőtársai (2010) az 1.5D inverzióból kiindulva fejlesztették ki az ún. kombinált inverziós eljárást (CGI), melynek célja a dőlésirányú terítésben mért adatrendszer 2D feldolgozása volt.

A 1.5D inverzió továbbfejlesztésével foglalkozott laterálisan inhomogén szerkezeten mért csapás irányú terítések esetében Kis (1998) PhD értekezésében. Vizsgálataiban a diszkretizálásra Csebisev-polinomokat alkalmazott és az 1D előremodellezést a vastagságfüggvények integrálközepével definiált modellparaméterekkel végezte.

Turai és Dobróka (2001, 2002) sorfejtéses inverziós eljárást dolgozott ki időtartományban mért indukált polarizációs (GP) adatok TAU transzformációjának egzakt megoldására. 2013-ban Dobróka és szerzőtársai magnetotellurikus adatok feldolgozása céljából alkalmaztak sorfejtéses inverziós eljárást. Hasonló elven alapszik mélyfúrás geofizikai adatok inverziós értelmezésére kidolgozott intervallum inverziós módszer is (Dobróka 1995, Szabó 2004).

Mindezen előzmények alapján kutatásaim célja, hogy a mérési vonal alatt laterálisan változó paraméterrel rendelkező 2D szerkezet esetén, a lokálisan 1D előremodellezést alkalmazó sorfejtéses geoelektromos inverziós eljárások pontosságát és stabilitását növeljem, továbbá segítségükkel a multielektrodás rendszerekkel mért (akár dőlésirányú) terítés adatainak feldolgozása is elfogadható pontossággal megvalósítható legyen.

## II. ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK

Dőlés irányú terítésben, a Gyulai Á. által továbbfejlesztett Spitzer (1995) FD programjával számított szintetikus adatokkal végeztem numerikus vizsgálataimat. Szimmetrikus és aszimmetrikus modellel dolgoztam, melyekben a fajlagos ellenállás értékeket laterálisan homogénnek tekintettem és a vastagságfüggvények meghatározásával foglalkoztam.

Az 1.5D közelítés keretében a direkt feladat megoldására a becsült modell vastagság adatait egy pontra, a vonatkozási pontra számítottam és ezekkel a paraméterekkel határoztam meg a horizontálisan rétegzett, rétegenként homogén (1D) modell látszólagos fajlagos ellenállásait különböző terítési távolságok mellett. Az 1.5D inverziós eljárásban a korábbi kutatásokban alkalmazott, Fourier-soros és hatványfüggvényekkel történő diszkretizáció mellett, vizsgáltam újabb ortogonális, illetve ortonormált bázisfüggvények bevonásának lehetőségét, az inverzió stabilitásának és a paraméterbecslés pontosságának növelése céljából. A Legendre-, illetve Csebisev-polinomokkal történő diszkretizáció eredményeit összehasonlítottam a Fourier-soros és a hatványfüggvényekkel történő diszkretizáció eredményeivel, abból a célból, hogy a hatványfüggvényeket kiváltsam stabilabb eredményt nyújtó bázisfüggvényekkel.

Kis (1998) csapás irányú mérésekre fejlesztett általánosított sorfejtéses eljárásának algoritmusát továbbfejlesztve megadtam a dőlés irányú terítés mentén mért látszólagos fajlagos

ellenállások feldolgozására szolgáló algoritmust. Ebben az eljárásban az 1D előremodellezéshez a vastagságokat az  $x_j$  pont, mint szelvényközép körül laterális irányban definiált  $(x_j - \Delta, x_j + \Delta)$  intervallumon integrálközepként értelmeztem.

Levezettem a hibaterjedés törvénye alapján a lokálisan 1D előremodellezésbe bevitt vastagságok kovariancia-mátrixát és a belőle származtatható korrelációs mátrix, illetve varianciák kifejezését az integrálközep módszer esetére.

Megvizsgáltam, hogy a vastagságfüggvény rekonstrukciója optimalizálható-e a  $(2\Delta)$  integrációs tartomány változtatásával úgy, hogy a különböző réteghatárokhoz eltérő integrációs intervallumok tartozzanak.

A Csebisev-polinomok mellett az integrálközep eljárásba bevezettem a Legendre-, illetve Fourier-sorok alkalmazását. eredményeimet összehasonlítottam az 1.5D módszerrel kapott értékekkel.

Az integrálközep eljárás a geoelektromos mérés oldal irányú érzékenységét veszi figyelembe, mellyel pontosabb közelítést ad, mint a 1.5D módszer. Ez alapján indokoltnak tűnt az a feltételezés, hogy a geoelektromos mérés oldal irányú érzékenysége az integrálközep számításában a középponttól távolodva csökken. Az elv alkalmazásával kezdeti vizsgálatokat csapás irányú mérésekre vonatkozóan Török és Kis (2001) végzett, a probléma részletes elemzése azonban nem történt meg. Vizsgálataimat dőlés irányú terítésben mért adatok kiértékelése szempontjából végeztem és új bázisfüggvényeket alkalmazva kidolgoztam a súlyozott integrálközep módszert, és meghatároztam a kovariancia, illetve korrelációs mátrixokat. A fejlesztésben diszkretizációs módszerként a Fourier-sorokat, Legendre- és Csebisev-polinomokat használtam.

Az integrálközep, ill. a súlyozott integrálközep módszerek alkalmazhatóságát szignifikánsan 2D szerkezeten is vizsgáltam és összehasonlítást végeztem a módszerek pontosságát illetően.

Terepi példán igazoltam a súlyozott integrálközep módszer gyakorlati alkalmazhatóságát, összehasonlítva azt az adatrendszeren korábban készült 2D analitikus módszerrel történő kiértékelés eredményeivel (Gyulai 2004).

### III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

#### 1. Tézis

Az 1.5D inverziós eljárás módosításaként javaslatot tettem a hatványfüggvények Legendre-polinomokkal, illetve Csebisev-polinomokkal való kiváltására. Egy szimmetrikus- és egy aszimmetrikus modellen FD módszerrel számított szintetikus adatrendszer alkalmazásával megmutattam, hogy az ortogonális, illetve súlyfüggvényre nézve ortogonális polinomok alkalmazásával az eredetileg Fourier-soros diszkretizálásra alapozott 1.5D módszerrel egyenértékű inverziós eljárás definiálható. Vizsgálataim megmutatták, hogy a Legendre-, illetve Csebisev-polinomokkal történő diszkretizálás a dőlésirányú szelvényeken mért adatok 1.5D inverziójában eredményesen alkalmazható.

#### 2. Tézis

Az általánosított sorfejtéses inverziós eljárás továbbfejlesztéseként javaslatot tettem a sorfejtéses diszkretizáció Fourier-sorral, illetve Legendre-polinomokkal történő megvalósítására. Szimmetrikus és aszimmetrikus modelleken FD eljárással számított dőlés irányú szelvényeken bemutattam, hogy az eljárás a 1.5D inverziónál kismértékben jobb paraméterbecslést eredményez. Az integrációs intervallum vizsgálata során megállapítottam, hogy a különböző mélységű réteghatárok esetén más-más integrációs intervallum választása szükséges. Az integrációs intervallumok optimális értékeit meghatároztam. A diszkretizációt Fourier-sorral, Legendre-, illetve Csebisev-polinomokkal megvalósítva numerikus vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy a három ortogonális függvényrendszer egymáshoz igen közeli eredményt szolgáltat.

#### 3. Tézis

A súlyozott integrálközep módszer továbbfejlesztéseként, súlyfüggvényként  $\exp(-(x/D)^2)$  függvényt vezettem be és a laterálisan változó vastagság függvények diszkretizálására Fourier-sort, Legendre-, illetve Csebisev-polinomokat alkalmaztam. Numerikus vizsgálataim során megállapítottam, hogy a D paraméter optimális értéke réteghatáronként eltérő. Szimmetrikus és aszimmetrikus modelleken FD módszerrel számított szintetikus adatrendszert használva meghatároztam a D paraméter különböző mélységű réteghatárokhoz tartozó optimális értékét. Bemutattam, hogy a dőlés irányú szelvények inverziós feldolgozása során a súlyozott integrálközep eljárás a 1.5D inverziónál, illetve az

integrálközep módszerénél jobb paraméterbecslést eredményez mind a Fourier sorral, mind a Legendre-, illetve Csebisev-polinomokkal történt diszkretizálás esetén.

#### 4. Tézis

Az inverziós eredmény minősítésére a hibaterjedés törvénye alapján megadtam a lokálisan 1D előremodellezésbe bevitt vastagságok kovariancia-mátrixát és a belőle származtatható korrelációs mátrix, illetve varianciák kifejezését.

A.) Integrálközep eljárás esetén

$$\left\{ \underline{COV}(\hat{h}(x)) \right\}_{i,j} = \sum_{n=1}^{Q_i} \sum_{m=1}^{Q_j} \frac{1}{2\Delta} \int_{x_j-\Delta}^{x_j+\Delta} \Phi_n(x') dx' \left\{ \underline{COV}(\bar{B}) \right\}_{l,h} \frac{1}{2\Delta} \int_{x_j-\Delta}^{x_j+\Delta} \Phi_n(x') dx'$$

B.) Súlyozott Integrálközep eljárás esetén

$$\left\{ \underline{COV}(\hat{h}(x)) \right\}_{i,j} = \sum_{n=1}^{Q_i} \sum_{m=1}^{Q_j} \frac{1}{\int_{-\Delta}^{+\Delta} W(u) du} \int_{x_j-\Delta}^{x_j+\Delta} \Phi_n(x') dx' \left\{ \underline{COV}(\bar{B}) \right\}_{l,h} \frac{1}{\int_{-\Delta}^{+\Delta} W(u) du} \int_{x_j-\Delta}^{x_j+\Delta} \Phi_n(x') dx'$$

#### 5. Tézis

Az általam továbbfejlesztett súlyozott integrálközep módszert terepi példán alkalmaztam. Ennek az inverzióknak az eredményét összehasonlítottam 2D dőltréteges analitikus szimultán inverzió eredményével. Az összehasonlítás azt mutatja, hogy az új módszer eredménye jó egyezést mutat a 2D előremodellezésen alapuló inverzió eredményével, tehát az új módszer alkalmas terepi mérések kiértékelésére.

#### IV. AZ ÉRTEKEZÉS EREDMÉNYEINEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

A geoelektromos gyakorlatban a multielektrodás mérések adatrendszerének feldolgozásában fontos a számítási idő lehetőség szerinti csökkentése. Ez a törekvés elfogadhatóvá teszi különböző egyszerűsítések, közelítő megoldások alkalmazását. A dolgozatban tárgyalt módszerek az előre modellezésben végeznek egyszerűsítést a lokálisan 1D direkt feladat megoldás alkalmazásával. Vizsgálataim megmutatták, hogy a módosított integrálközep és a továbbfejlesztett súlyozott integrálközep módszerekkel műszakilag elfogadható pontosság mellett a számítási idő (a 2D módszerekhez képest) nagyságrendileg

csökkenthető. Ezáltal az értekezésben kidolgozott módszerek a terepi adatok feldolgozásában fontos szerepet tölthetnek be.

Egy másik alkalmazási lehetőséget az inverziós módszerfejlesztés területén látunk. Az inverziós fejlesztések fő irányát a 2D/3D szerkezeteken végzett inverzió jelenti. Az értekezésben tárgyalt lokálisan 1D előremodellezést és sorfejtéses diszkretizációt alkalmazó módszerek igényes startmodellt szolgáltathatnak az ún. kombinált 2D/3D inverziós eljárások részére, amelyek ezáltal kevesebb iterációban (kisebb számítási idő mellett) juthatnak elfogadható eredményre.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány/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” projekt részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával, valamint a TÁMOP 4.2.2.B-15/1/KONV-2015-0003 jelű projekt részeként - a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.



## A TÉZISFÜZETBEN SZEREPLŐ HIVATKOZÁSOK LISTÁJA

- Christiansen, A. V. és Auken, E. 2004: Optimizing a layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data using Broyden's update and 1D derivatives: *Journal of Applied Geophysics*, 56, 247-261. Paper (pdf - 0.9 Mb).
- Dobróka M. 1995: Együttes inverziós algoritmusok bevezetése a mélyfúrési geofizikai értelmezésbe. Zárójelentés. Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, Miskolc.
- Dobróka M. 1996: Változó rétegvastagságú inhomogén szeizmikus hullámvezetőben terjedő Love-típusú hullámok diszperziós relációja; Az abszorpciós-diszperziós jellemzők inverziója, Doktori értekezés, Miskolc Egyetem, Miskolc.
- Dobróka M., Prácser E., Kavanda R., Turai E. 2013: Quick imaging of MT data using an approximate inversion algorithm. *Acta Geodaetica et Geophysica*, Vol.48, pp.17-25.
- Gyulai Á., Ormos T. 1997: Interpretation of vertical electrical sounding curves with the 1.5-D inversion method. *Magyar Geofizika* 38. pp. 25-36.
- Gyulai Á. 2004: 2-D simultaneous inversion method to determine dipping geological structures. *Geophysical Transactions* 2004. Vol.44. Nos.-3-4, pp. 257-271
- Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M. 2010: A quick 2-D geoelectric inversion method using series expansion. *Journal of Applied Geophysics*, No. 72, 232-241.
- Kis M. 1998: Felszínközeli földtani szerkezetek vizsgálata szeizmikus és egyenáramú geoelektromos adatok együttes inverziójával. PhD értekezés. Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék.
- Loke, M.H., Barker, R.D. 1996: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152.
- Spitzer K. 1995: A 3D finite-difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods. *Geophysical Journal International* 123, 903-914.
- Szabó N. P. 2004: Mélyfúrési geofizikai adatok modern inverziós módszerei. PhD értekezés. Miskolci Egyetem.
- Török I, Kis M. 2001: GSE and weighted GSE inversion in the interpretation of DC geoelectric data *Publications of the University of Miskolc. Series A-Mining*. Vol. 59: pp. 69-80.
- Turai E., Dobróka M. 2001: A new method for the interpretation of induced polarization data - the TAU-transform approach. *Publications of the University of Miskolc. Series A-Mining*. Vol.56. pp.197-202.
- Turai E., Dobróka M. 2002: A new tool for surveying waste site, oil reservoir and oil contaminated soil: the Generalized TAU Transform method. *Intellectual Service for Oil &*

Gas Industry: Analysis, Solutions, Perspectives: Proceedings. Ufa: Ufa State Aviation Technical University. pp. 156-161.Vol

## AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK ÉS ELŐADÁSOK JEGYZÉKE

### FOLYÓIRAT CIKKEK

- [1] Szabó N.P., Dobróka M., Kavanda R.(2013): Cluster analysis assisted float encoded genetic algorithm for a more automated characterization of hydrocarbon reservoirs. *Intelligent Control and Automatization*. Vol.4, pp. 362-370
- [2] M. Dobróka, E. Prácsér, R. Kavanda, E. Turai (2013): Quick imaging of MT data using an approximate inversion algorithm. *Acta Geodaetica et Geophysica*, Vol.48., pp.17-25.
- [3] Szabó N. P., Kavanda R. (2013): Száraz sűrűség meghatározása mérnökgeofizikai szondázási adatok statisztikus feldolgozásával. *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat*, Vol.146, pp.2-6.

### NEMZETKÖZI KONFERENCIÁK KIADVÁNYAI (EXTENDED ABSTRACTS)

- [1] Szabó N. P., Dobróka M., Somogyiné Molnár J., Kavanda R.: Shale indicator derived from multivariate statistical analysis of well logs. 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013., P 09 05, London, Nagy-Britannia
- [2] R. Kavanda , Zs. Nyari (2009): Reconstruction of groundwater aquifer models with cluster analysis. 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, P 23, pp. 1-4, Dublin, Ireland
- [3] Á. Gyulai, T. Ormos, M. Dobróka & R. Kavanda (2007): The Strategy of Joint Inversion Using Function Series. 13<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, P 24, pp. 1-4, Istambul, Turkey
- [4] R. Kavanda (2007): Results of single and function inversion of resistivity data for hydrogeological application. European Geosciences Union, General Assembly 2007, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 10342, Vienna, Austria
- [5] Kavanda R. (2007): 1.5D Függvényinverzió alkalmazása laterális változások kimutatására. III. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia kiadványa, pp. 242-246, Kolozsvár

- [6] R. Kavanda , A. Gyulai, T. Ormos (2006): Combined Function Inversion Method. 68<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE Europec, P 221, pp. 1-5, Vienna, Austria

#### HAZAI KONFERENCIÁK KIADVÁNYAI

- [1] Kavanda R. (2005): Geoelektromos módszerek a vízbázisvédelemben. Doktoranduszok Fórumának kiadványa, pp. 34-40, Miskolc
- [2] Kavanda R. (2004): Geofizikai módszerek alkalmazása a Szobi Hidegréti vízbázis védelemben helyezésének diagnosztikai fázisában. Ifjú Szakemberek Ankétjának absztrakt füzet, Sárospatak

#### NEMZETKÖZI KONFERENCIA ELŐADÁSOK

- [1] R. Kavanda , Zs. Nyari (2009): Reconstruction of groundwater aquifer models with cluster analysis. 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Dublin, Ireland
- [2] R. Kavanda (2007): Results of single and function inversion of resistivity data for hydrogeological application. European Geosciences Union, General Assembly 2007, Vienna, Austria
- [3] Kavanda R. (2007): 1.5D Függvényinverzió alkalmazása laterális változások kimutatására. III. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Kolozsvár
- [4] R. Kavanda , A. Gyulai, T. Ormos (2006): Combined Function Inversion Method. 68<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE Europec, Vienna, Austria

#### HAZAI KONFERENCIA ELŐADÁSOK

- [1] Kavanda R. (2005): Geoelektromos módszerek a vízbázisvédelemben. Doktoranduszok Fóruma, Miskolc
- [2] Kavanda R. (2004): Geofizikai módszerek alkalmazása a Szobi Hidegréti vízbázis védelemben helyezésének diagnosztikai fázisában. Ifjú Szakemberek Ankétja, Sárospatak