

Doktori értekezés tézisei

**GEOELEKTROMOS MÉRÉSI ADATOK VIZSGÁLATA ANALITIKUS
MODELLEZÉSEN ALAPULÓ ELJÁRÁSOKKAL FELSZÍNKÖZELI ÜREGEK
KIMUTATÁSA ÉS PARAMÉTEREINEK MEGHATÁROZÁSA CÉLJÁBÓL**

Írta:

Nyári Zsuzsanna

ELGI

Miskolci Egyetem

Geofizikai Tanszék

Miskolc

2000.

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

A néhány métertől néhányszor tíz méterig terjedő felszínközeli térrészben található üregek, üregszerű lokális anomáliák kutatása gyakori feladat a mérnökgeofizikai és környezetvédelmi geofizikai gyakorlatban. Az egyenáramú mérési módszerek alkalmazása elterjedté vált ezen a területen.

Felszínközeli inhomogenitások egyenáramú módszerrel történő kutatásához gyakran a négyelektródás axiális dipól elrendezést, vagy valamelyik Wenner módosulatot alkalmaznak. A vonatkozó analitikus előre modellezési eljárás a nemzetközi szakirodalomból ismert.

A mérési adatok feldolgozására a szakirodalom számtalan módszert ajánl. Az inverziós módszerekkel lehetőség nyílik a szelvény menti ható(k) paramétereinek minősített becslésére. Az inverziós eljárás során felmerülő stabilitási és ekvivalencia problémákra az együttes, illetve – fizikailag azonos, de egymástól független mérési adatrendszer esetén – a szimultán inverzió jelenthet megoldást. A nemzetközi szakirodalomban részletes utalásokat találhatunk két vagy több különböző mérési módszerrel gyűjtött adatrendszer együttes inverziójára. Zajjal terhelt mérési adatok esetén az inverzió stabilitása megfelelően választott jelkiemelő szűrési eljárás inverzióba való beágyazásával jelentősen növelhető.

Néhány esetben előfordulhat, hogy a geofizikai feladat megoldásához nem szükséges ismerni a ható(k) összes paraméterét, fontos viszont a hatók számának és pozíciójának pontos megadása. Főképp nagy mennyiségű adat esetén jelentős előnyt jelenthet, hogy ilyen esetekben inverzió elvégzése nélkül is lehet megbízható eredményre jutni dekonvolúciós szűrés elvégzésével. A szakirodalomban főleg mágneses mérések feldolgozásánál alkalmazzák ezt a módszert, de FD modellezésen alapuló geoelektromos alkalmazás is ismert.

Kutatásaim során célul tűztem ki a már ismert analitikus modellezési eljárás továbbfejlesztését az axiális dipól és Wenner elektróda elrendezésekkel mért adatrendszerek megismeréséhez és több üreg hatásának leírásához összetett földtani környezet esetén is.. Szükséges volt megismerni az egyes mérési rendszerek érzékenységét

a meghatározandó hatóparaméterek tekintetében. Az analitikus vizsgálatok lezárásaként az egyes modellparaméterekre vonatkozóan kimutathatósági határértékek megadást tűztem ki célul.

A hatók helyzetének gyors, pontos meghatározása céljából szükségesnek tartottam a már ismert dekonvolúciós szűrési eljárás továbbfejlesztését kimondottan egyenáramú üregkutatási célú mérési adatok feldolgozására.

A továbbfejlesztett analitikus előremodellezési eljárást kívántam alkalmazni a mérési adatok feldolgozásához. Ehhez célul tűztem ki a már ismert inverziós és együttes inverziós eljárások továbbfejlesztését szimultán inverziós feladatok megoldására is. Vizsgálni kívántam az inverzió minőségi paramétereinek alakulását különböző mérési elrendezések esetén. Kutatásaim tárgyát képezte az inverzióval kapott becslések pontosságának és megbízhatóságának növelése, az egyes modellparaméterek közti ekvivalencia csökkentése, több ható esetén a felbontóképesség növelése.

II. AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK

Értekezésemben a témához tartozó szakirodalom áttekintése után elvégeztem az analitikus modellezési eljárás továbbfejlesztését tetszőleges négyelektródás mérési elrendezés és több hatót tartalmazó modellek esetére is. Elméleti úton vizsgáltam, és véges differenciás modellekkel végzett számításokkal ellenőriztem, hogy az eljárás nem tartalmaz-e számottevő modellhibát abból eredően, hogy a levezetések vonalforrások terét jellemzik, míg a mérési adatok pontforrásokkal keltett térre vonatkoznak. Úgyszintén vizsgáltam, hogy több ható esetén alkalmazható-e az együttes hatások leírására a szuperpozíció elve.

Négyféle elektróda elrendezésre végeztem analitikus modellvizsgálatokat abból a célból, hogy kimutathatósági határértékeket tudjak megállapítani az egy modellparaméterekre.

Paraméter érzékenységi vizsgálatokat végeztem, hogy meghatározzam az egyes elektróda elrendezésekhez a modellparaméterek érzékenységét az elektródák mérési vonal menti elhelyezkedésének függvényében.

Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrési eljárás dolgoztam ki felszínközeli hatók pozíciójának megadása céljából. A mérési adatok horizontális és vertikális összegzését alkalmazó módszerrel összetett földtani esetekben is lehetőséget kerestem a mérési vonal mentén lévő üregszerű hatók számának és pozíciójának megbízható kijelöléséhez. Az eljárást FD modellezéssel számított adatokon teszteltem, majd sikerrel alkalmaztam terepi adatok feldolgozásánál is. A terepi tesztelést először egy ismert hatónál végeztem el, majd ennek sikere után alkalmaztam a módszert valós geofizikai probléma a megoldására is.

Egy a szakirodalomban ismertetett, L_2 norma minimalizálásán alapuló inverziós algoritmust továbbfejlesztésébe kezdtem geoelektromos adatok üregkutatói célú felhasználására. Az új algoritmus teszteléséhez analitikusan számított adatrendszerket hoztam létre, melyekhez különböző szórású, Gauss-eloszlású hibákat adtam hozzá. Vizsgáltam két különböző mérési elrendezésnél az inverzió minősítő paramétereinek alakulását. Két eltérő méretű üreg modellezésekor megfigyeltem az üregek mélységének, a hatók távolságának és a paraméterbecslések bizonytalanságának összefüggéseit a vizsgált két elektróda elrendezés esetén.

Az axiális dipól és a Wenner alfa elrendezésekkel azonos mérési vonal mentén történő mérések feldolgozásához egy szimultán inverziós eljárás fejlesztését végeztem. A modellvizsgálatok során a terepi körülmények szimulálásához az azonos hibájú adatrendszerek mellett kevert hibájúakat (a terepi tapasztalatok alapján az inverzióban résztvevő axiális dipól adatrendszerhez hozzáadott hiba nagyobb volt, mint amivel a Wenner adatrendszert terheltem) is alkalmaztam. Vizsgáltam, hogy a szimultán inverzió az egyedihez képest milyen mértékben növeli azok megbízhatóságát.

A sikeresen tesztelt inverziós algoritmusokat gyakorlati feladatok megoldásához is alkalmaztam. A szimultán inverzió létjogosultságát ismert paraméterű hatónál végezett mérések feldolgozásával vizsgáltam.

III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Szakirodalmi hivatkozások alapján levezettem tetszőleges sorrendben, egyenes vonal mentén elhelyezett 2 elektródapár esetére a homogén féltér és a benne lévő, vízszintes körhengerrel jellemezhető ható elektromos potenciáljait (ΔV_0 , ill. ΔV_c) leíró kifejezéseket

$$\Delta V_0 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\ln \frac{1 - \cos(\xi_{P_1} - \xi_{C_2})}{1 - \cos(\xi_{P_1} - \xi_{C_1})} - \ln \frac{1 - \cos(\xi_{P_2} - \xi_{C_2})}{1 - \cos(\xi_{P_2} - \xi_{C_1})} \right)$$

$$\Delta V_c = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2I\rho_1}{m\pi} \cdot \frac{\alpha}{e^{2m\eta_0} - \alpha} \left\{ (\cos m\xi_{C_1} - \cos m\xi_{C_2})(\cos m\xi_{P_1} - \cos m\xi_{P_2}) + \right. \\ \left. + (\sin m\xi_{C_1} - \sin m\xi_{C_2})(\sin m\xi_{P_1} - \sin m\xi_{P_2}) \right\}$$

$$\alpha = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

ahol I a mérőáram erőssége, ρ_1 a környezet, ρ_2 a ható fajlagos ellenállása, valamint C_1 , C_2 a pozitív és negatív táp-, P_1 és P_2 a pozitív és negatív mérőelektródák pozícióját jelöli. A fenti két képlet felhasználásával határoztam meg 4 különböző mérési elrendezés esetén a pszeudo szelvények minden egyes vonatkoztatási pontjára a látszólagos fajlagos ellenállás értékeket. Kiterjesztettem a képletek alkalmazását negatív előjelű ellenálláskontraszt ($\rho_2 \ll \rho_1$) esetére is.

1.a Bebizonyítottam, hogy a direkt feladat vonalforrásra vonatkozó megoldása alkalmazható 2D hatók pontforrás esetén adott hatásának leírásához. Az elkövetett hiba számszerűsítéséhez 2,5 dimenziós modellezési eljárással származtatott adatrendszereket alkalmaztam kontrollként. A modellezési hibát az azonos elrendezéshez tartozó, azonos paraméterű modellekre analitikusan és numerikusan számított adatsorok közti távolsággal jellemeztem. Megállapítottam, hogy a modellezési hiba homogén féltérben lévő kétdimenziósnak tekinthető lokális ható esetén olyan alacsony, hogy hatása elhanyagolható a mérési adatok feldolgozása során.

1.b Kiterjesztettem az eljárást több hatót tartalmazó modellek esetére is. Ekkor a látszólagos fajlagos ellenállás értékeket a hatók külön-külön számított potenciáljának szuperpozíciójával állítottam elő. Kontrollszámításokkal igazoltam a szuperpozíciós összegzés létjogosultságát.

2. Az 1. tézisben ismertetett analitikus modellezési eljárással elméleti görbeseregeket számítottam, melyek alapján látszólagos fajlagos ellenállás szelvényeket állítottam elő négyféle négyelektródás elrendezés esetére. Szakirodalmi hivatkozások alapján definiáltam egy kimutathatósági határt, és az

alapján vizsgáltam az egyes konfigurációk és a modellparaméterek kapcsolatát. Megállapítottam, hogy jelerősség szempontjából az axiális dipól elrendezés alkalmazható a leghatékonyabban üregkutatásra.

a, ható és a környezete közti ellenállás kontraszt szempontjából meghatározott kerekített kimutathatósági határértékek:

$$\rho_2/\rho_1 \text{ (axiális dipól)}=2$$

$$\rho_2/\rho_1 \text{ (Wenner)}=3$$

b, hatómélység (H) és sugár (R) szempontjából megállapított kerekített kimutathatósági határértékek:

$$H/R \text{ (axiális dipól)} < 4$$

$$H/R \text{ (Wenner)} < 2$$

c, azonos mélységben elhelyezkedő, tetszőleges méretű ható esetén a két üreg hatásának elkülönítéséhez szükséges minimális hatótávolság (L):

$$L \text{ (axiális dipól)} = L \text{ (Wenner)} = 3(R_1 + R_2)$$

3. Ellentétes irányú fajlagos ellenállás kontraszttal jellemezhető modellekkel végzett paraméter érzékenységi vizsgálatokkal megállapítottam, hogy jól vezető ható esetén mindegyik konfigurációnál a geometriai paraméterek (mélység, sugár) érzékenységei elrendezéstől és a többi modellparaméter értékektől függően abszolút értékben 5-40%-kal magasabbak annál, mint ami szigetelő hatóra jellemző. A legjelentősebb eltérés a kétféle ható esetén az axiális dipól elrendezésnél jelentkezett. Kimutattam, hogy minden elektróda elrendezés csak minimális mértékben érzékeny a ható ellenállásának változására. Legnagyobb abszolút értékű érzékenységgel a ható helyét megadó paraméter jelentkezett. A két geometriai paraméter érzékenysége egymással ellentétes irányú, de abszolút értékben hasonló nagyságú, ami egy későbbi adatfeldolgozás esetén felmerülő ekvivalencia problémára utal.

4. Új eljárást dolgoztam ki felszínközeli hatók pozíciójának megadása céljából. A mérési vonal menti $\rho(x)$ anomáliát úgy tekintettem, mint a hatót leíró $\rho_0(x)$ elméleti görbe és egy $D(x)$ pozíció függvény konvolúciója, ahol $D(x)$ ideális esetben egy Dirac-delta függvény, mely a $\rho_0(x)$ -t az x_1 pozícióban található ható fölé tolja. Így a hatók pozícióját megadó $D(x)$ függvény az analitikusan számított $\rho_0(x)$ függvény és a mérésekből származó $\rho(x)$ függvény dekonvolúciójából állítható elő, amely a Fourier transzformált térben az alábbiak szerint alakul:

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

ahol k a térfrekvenciát jelöli, $R_0(k)$ alatt $\rho_0(x)$ függvény, $N(k)$ alatt pedig $n(x)$ négyzetimpulzus függvény Fourier transzformált párját kell érteni.

4.a Bevezettem a keresőüreg módszert, melynek megfelelően minden egyes szelvénypontra elvégzem a dekonvolúciót, annak érdekében, hogy az ismeretlen helyzetű hatót lokalizáljam. Definiáltam a horizontális összegzés módszerét, melynek során a kereső üreg eljárással kapott dekonvolúciós görbéket összegeztem egy-egy mérési vonal mentén. Az így kapott függvény a ható tényleges helyzetének megfelelő pozícióban éri el a maximumát. A keresőüreg eljárással és a horizontális összegzés módszerével sikerült kiküszöbölni a pozíció függvény képletében szereplő „zavaró tag” ($e^{-ik(x_0-x_1)}$) okozta eltolást.

4.b Bevezettem a vertikális összegzés módszerét, mellyel a több mélység szinten mért adatokból álló pszeudo szelvény dolgozható fel. Ilyenkor a minden mélység szinten minden horizontális x koordinátára el kell végezni a kereső üreg eljárást és a horizontális összegzést, majd a szintenként kapott függvényeket összegezni kell. Az eljárással jelentős zajcsökkentés, illetve jelkiemelés érhető el.

5. Új minősített inverziós eljárást dolgoztam ki egy a szakirodalom szerint már sikeresen alkalmazott algoritmus továbbfejlesztésével üregkutató célú geoelektromos mérési adatok feldolgozására. A direkt feladat megoldását az 1. tézisben ismertetett analitikus modellezési eljárással végeztem. Figyelembe vettem, hogy napjainkban a felszínközeli geoelektromos méréseket leggyakrabban több mélység szinten végzik, a mérési adatok vektorát ($\bar{Y}_s^{mért}$, s mérési elrendezésre) a pszeudo szelvény összes adatával töltöm fel:

$$\bar{Y}_s^{mért} = (\rho_a^1)_{n=1}, (\rho_a^2)_{n=1}, \dots, (\rho_a^{m_1})_{n=1}, (\rho_a^1)_{n=2}, (\rho_a^2)_{n=2}, \dots, (\rho_a^{m_2})_{n=2}, \dots$$

ahol n a mélység szint sorszámát, m_i pedig az i -dik mélység szinten mért adatok számát jelöli. Így lényegében az azonos mérési elrendezésekhez tartozó mérési adatok összességére egy együttes inverziót valósítottam meg.

5.a Keresztkorrelációs jelkiemelő eljárást építettem az inverziós eljárásba. Beláttam, hogy ugyan azon P modellparaméterektől függ a válaszfüggvény autokorrelációs függvénye, mint maga a

válaszfüggvény, tehát a korrelációs függvények szerinti inverzió ugyan azokat a modellparamétereket eredményezi, mint az eredeti eljárás.

5.b Az inverzió tesztelését két elektróda elrendezés esetén vizsgáltam. A minősítő paraméterek alakulása alapján egyértelműen igazoltam, hogy a modellparaméterek axiális dipól mérési elrendezés alkalmazásával becsülhetők meg a legnagyobb pontossággal. A ható paraméterei közül a helyparaméter becslésének volt legkisebb a bizonytalansága. A korrelációs együtthatók vizsgálata alapján nagyon erős függésre mutattam rá a mélység és a sugár paraméterek között, ami erőteljes ekvivalenciára utalt. A paraméterek közti korreláció abszolút értéke nagyobb volt Wenner elrendezés esetén, mint az axiális dipólnál.

5.b Kétüreges modellekkel végzett vizsgálataim során megállapítottam, hogy mindkét elektróda elrendezés esetén az üregek helye a sekélyebben lévő hatónál adható meg kisebb bizonytalansággal. A méret és mélység paraméterek bizonytalansága az axiális dipól elrendezésnél a sekélyebb, míg a Wennernél a mélyebb hatónál volt kisebb. A két üreg középpontja közti távolság csökkenésekor mindkét konfigurációnál a nagyobb üreg paramétereinek bizonytalansága csak kis mértékben, míg a kisebbik, felszínközeli hatóé erőteljesen megnőtt. A korrelációs vizsgálatokkal bebizonyítottam, hogy a két ható paraméterei egymástól kevésbé függenek, ám a hatók közelítésével ez a függőség jelentősen megnő.

6. Új szimultán inverziós eljárást dolgoztam ki, mellyel két tetszőlegesen választott, különböző négyelektródás elrendezéssel mért pszeudo szelvény feldolgozása végezhető el az 1. tézisben bemutatott analitikus modellezésen alapuló direkt feladat megoldás alkalmazásával. Az algoritmusba beépítettem az 5.a tézisben ismertetett korrelációs szűrési eljárást.

6.a Az inverzió tesztelésekor bizonyítottam, hogy szimultán inverzióval minden modellparaméter tekintetében növelni lehet azok becslésének megbízhatóságát. A korrelációs mátrixok vizsgálatával igazoltam, hogy ezzel az eljárással csökkenthető a mélység és sugár paraméterek közt meglévő rendkívül erős ekvivalencia.

Az eredmények hasznosítása

Az értekezés bemutat egy olyan analitikus direkt feladat megoldást, mely a gyakorlatban elterjednek számító üregkutatósi problémák vizsgálatához nyújt segítséget. Az ezzel a módszerrel

számított elméleti görbék és paraméter érzékenységek vizsgálatával olyan megállapításokat tettem, melyekkel jellemezhetők a vizsgált mérési módszerek korlátai, ezáltal támpontot adhatnak a méréstervezéshez.

Az értekezés ismertet háromféle adatfeldolgozási eljárást, melyekkel a mérési adatok megbízható feldolgozására nyílt lehetőség. Az inverziós algoritmusok általános értelemben is hozzájárultak az inverziós módszerek fejlesztéséhez. Sikerült bebizonyítani a szimultán inverzió létjogosultságát azáltal, hogy használatával csökkenthető egyes modellparamétereknél az egymás közti korreláció valamint a paraméter becslések bizonytalansága. Mindhárom feldolgozási eljárással sikerült már valós gyakorlati problémára megoldást előállítani.

IV. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBŐL KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

SZAKCIKKEK

NYÁRI ZS. 1997: Analitikus modellezés a geoelektromos üregkutatás lehetőségeinek vizsgálatára, Magyar Geofizika, 38/3. pp.: 194-204.

NYÁRI ZS., FANCSIK T. 1998: Dekonvolúciós szűrési lehetőségek a geoelektromos üregkutatásban, Magyar Geofizika. 39/3pp.: 80-83.

NYÁRI ZS.: 1999: Cavity detection by resistivity methods-new aspects in data processing, ELGI kiadvány, pp.: 1-9.

HOLCZINGER I., HERMANN L., NYÁRI ZS., PRÓNAY ZS. 1999: Solution of engineer geophysical tasks ELGI kiadvány, pp.: 18-26.

NYÁRI ZS. 2000: Quality controlled resistivity inversion in cavity detection Geophysical Transactions 2000 Vol43 N1 pp 47-63.

TUDOMÁNYOS JELENTÉSEK

NYÁRI ZS. 1997: Geoelektromos előremodellezési és inverziós vizsgálatok T019008 OTKA belső I. részjelentése, ME Geofizikai Tsz

NYÁRI ZS. 1998: Egyenáramú geofizikai módszer alkalmazásának lehetőségei a mérnökgeofizikai gyakorlatban, Összefoglaló jelentés a mérnökgeofizikai kutatások témakör keretében 1998-ban elért eredményekről, ELGI jelentés, pp. 15-25.

HIVATKOZHATÓ KONFERENCIA ELŐADÁSOK

- NYÁRI ZS. (PLANK ZS.) 1995: Hohlräumerkundung mit geoelektrischen Meßverfahren Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Hamburg Németország, pp 222..
- NYÁRI ZS. (PLANK ZS.) 1995: Geoelektromos és elektromágneses módszerek környezetvédelmi alkalmazásai, Nemzetközi Környezetvédelmi Ifjúsági Konferencia Mezőtúr kiadványa 1995., pp 180-186.
- NYÁRI ZS, FANCSIK T. 1998: Dekonvolúciós szűrési lehetőségek a geoelektromos üregkutatásban, Magyar Geofizikusok Vándorgyűlése, Pécs, pp.: 31-32.
- FANCSIK T., NYÁRI ZS. 1999: Processing of geoelectric cavity detection data using deconvolution filtering method EAGE Helsinki, PO94
- NYÁRI ZS. 1999: New inversion processing possibilities in geoelectric cavity detection EEGS Budapest, Vo5
- ORMOS T., GYULAI Á., NYÁRI ZS. 1999: Cavity detection with resistivity and shallow seismic methods EEGS Budapest, VoP2
- HOLCZINGER I., PATTANTYÚS-Á. M., PRÓNAY ZS., HERMANN L., NYÁRI ZS. 1999: Multipurpose geophysical investigation on Buda Castle Hill EEGS Budapest, ArP4
- HOLCZINGER I., PATTANTYÚS-Á.M, NYÁRI ZS. 1999: Geofizikai mérések a balácapusztai régészeti területen Magyar Geofizikusok Vándorgyűlése, Zalakaros, pp.: 38.
- PATTANTYÚS Á. M., HOLCZINGER I., NYÁRI ZS. 2000: Múltunk kutatása geofizikai módszerekkel-régészeti példák Magyar Földtudományi Szakemberek Világtalálkozója, Piliscsaba, A1

EGYÉB KONFERENCIA ELŐADÁSOK

- NYÁRI ZS. (PLANK ZS.) 1994: Üregkutatás geofizikai módszerekkel, előadás, Ifjú Geofizikusok Ankétja, Visegrád
- NYÁRI ZS. (PLANK ZS.) 1995: A Miskolci Egyetem üreg- és pincekutatási eredményei Önkormányzati Konferencia, Miskolc-Tapolca
- NYÁRI ZS 1996: Analytische Modellierung der Hohlräume V. Arbeitsseminar, Bucha Németország
- NYÁRI ZS. 1999: Analitikus előremodellezésen alapuló inverzió a geoelektromos üregkutatásban, Inverziós Ankét Miskolc
- NYÁRI ZS. 1999: Sokelektródás fajlagos ellenállásmérő rendszer alkalmazása mérnökgeofizikai feladatok megoldásában Ifjú Geofizikusok Ankétja, Balatonvilágos